महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ, मुंबई
(स्वायत्त) (ISO21001:2018) (ISO/IEC27001:2013)

अभियांत्रिकी आणि तंत्रज्ञान पदविका

शिक्षण पुस्तिका
(Learning Material)

ए. सी. मशीन्स परफॉर्मन्स
A. C. MACHINES PERFORMANCE
(315333)

विद्युत अभियांत्रिकी गट
(के-स्कीम)

मराठी - इंग्रजी (द्विभाषिक) माध्यम
(अभियांत्रिकी व तंत्रज्ञानातील पाचवे सत्र पदविका)

शिक्षण पुस्तिका
(Learning Material)

ए. सी. मशीन्स परफॉर्मन्स

A. C. MACHINES PERFORMANCE (ACM)

(315333)

विद्युत अभियांत्रिकी गट
के-स्कीम

K-Scheme

मराठी – इंग्रजी (द्विभाषिक) माध्यम

(अभियांत्रिकी व तंत्रज्ञानातील पाचवे सत्र पदविका)

MAHARASHTRA STATE BOARD OF TECHNICAL EDUCATION MUMBAI

महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ, मुंबई

(स्वायत्त) (ISO 21001:2018) (ISO/IEC 27001:2013)

ए. सी. मशीन्स परफॉर्मन्स
A. C. MACHINES PERFORMANCE (ACM)
(315333)

मार्गदर्शक

डॉ. संजय वसंत भंगाळे
विभागप्रमुख, विद्युत अभियांत्रिकी

प्रकल्प समन्वयक

संजय भाऊराव पवार
विभागप्रमुख, विद्युत अभियांत्रिकी

संकलक

विशाल बाळकृष्ण राव
अधिव्याख्याता, विद्युत अभियांत्रिकी

नितीन ज्ञानेश्वर सोनवणे
अधिव्याख्याता, विद्युत अभियांत्रिकी

हरिदास मधुकर काकड
अधिव्याख्याता, विद्युत अभियांत्रिकी

कविता विलास आहिरे
अधिव्याख्याता, विद्युत अभियांत्रिकी

स्वाती महेश सोंजे
विभागप्रमुख, विद्युत अभियांत्रिकी

सिद्धी पोपट बिले
अधिव्याख्याता, विद्युत अभियांत्रिकी

महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळ.

(स्वायत्त) (ISO: २१००१:२०१८) (ISO/IEC: २७००१-२०१३)

शासकीय तंत्रनिकेतन इमारत, चौथा मजला, ४९, खेरवाडी, बांद्रा (पूर्व), मुंबई - ४०० ०५१.

दूरध्वनी क्र.: ०२२-६२५४२१०० / १५३ / १७०

email : director@msbte.com web site : www.msbte.ac.in

प्रास्ताविक

महाराष्ट्र राज्यातील पदविका स्तरावरील तंत्रशिक्षणामध्ये विद्यार्थ्यांचे रोजगार कौशल्य विकसित करून विद्यार्थ्यांचा सर्वांगीण विकास घडवून आणण्याकरिता महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ कटिबद्ध आहे. उद्योगधंद्यातील बदलत्या तंत्रज्ञानाशी संबंधित गरजा लक्षात घेऊन महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळाकडून पदविका अभ्यासक्रम वेळोवेळी अद्यावत करण्यात येतो. अभियांत्रिकी पदविका अभ्यासक्रम शिकत असताना संकल्पनात्मक ज्ञान, सुसंगत संदर्भ, प्रश्न विचारणे, विश्वसनीय पुरावे, कारणमीमांसा आणि सुस्पष्ट निकष यांचा वापर करून अर्थाची उकल करण्याची, विश्लेषण व मूल्यमापन करण्याची तसेच तर्काने अनुमान काढण्याची क्षमता म्हणजेच चिकित्सक विचार विद्यार्थ्यांमध्ये अधिक दृढ होतील असा मला विश्वास आहे. जेव्हा विद्यार्थी ज्ञान मिळवण्याच्या माध्यमाशी पूर्णपणे परिचित आणि सोयीस्कर असतात, तेव्हा त्यांच्यासाठी वर्गातील चर्चेत भाग घेणे सोपे होते, संकल्पनात्मक व सैद्धांतिक बाबींचे आकलन परिपूर्ण होते, संज्ञानात्मक क्षमता सुधारते आणि त्यांचा आत्मविश्वास देखील वाढतो. या सर्व गोष्टींचा विचार करून मंडळाकडून शैक्षणिक सामुग्रीची निर्मिती करण्यात आलेली आहे. भारत देश हा खेड्यापाडयातून विकसित झालेला देश असून ग्रामीण भागातील विद्यार्थ्यांना तांत्रिक शिक्षण घेताना भाषेचा अडसर न येता तांत्रिक बाबींचा आशय समजून घेणे शक्य होईल या दृष्टिकोनातून महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळाने पदविका स्तरावरील तांत्रिक शिक्षणाकरीता विद्यार्थ्यांना मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यमाचा पर्याय उपलब्ध करुन दिलेला आहे.

राष्ट्रीय शैक्षणिक धोरण-२०२० प्रादेशिक भाषेतील शिक्षणास प्रोत्साहन देते, ज्यामुळे विद्यार्थ्यांना तांत्रिक अभ्यासक्रमांसाठी प्रादेशिक भाषेतुन शिक्षणाचे माध्यम निवडता येते. त्या अनुषंगाने प्रादेशिक भाषांमध्ये तांत्रिक सामग्री आणि अभ्यास सामग्रीचा विकास आणि भाषांतर करण्याची आवश्यकता आहे. या धोरणास अनुसरुन मंडळाने भागधारकांसाठी शैक्षणिक वर्ष २०२१-२२ पासून I-Scheme तसेच शैक्षणिक वर्ष २०२३-२४ पासून K-Scheme मध्ये द्विभाषिक माध्यमाचा पर्याय प्रथम ते तृतीय वर्षाकरिता उपलब्ध करून दिलेला आहे. या पर्यायास अनुसरून मंडळाने मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक शैक्षणिक सामग्रीही संबंधीत विद्यार्थी व अधिव्याख्यातांकरिता उपलब्ध करून दिली आहे.

पदविका स्तरावरील तंत्रशिक्षण अधिक दर्जेदार करण्यासाठी महाराष्ट्रातील अनुभवी व तज्ञ अध्यापकांनी व्यवहारिक मराठी भाषा व इंग्रजी भाषेतील तांत्रिक शब्दावली यांचा वापर करून मराठी इंग्रजी भाषेचा सुवर्णमध्य साधण्याचा प्रयत्न केलेला आहे. मंडळाच्या स्तरावर गठीत सुकाणू समितीमार्फत सदर शैक्षणिक सामुग्रीचा दर्जा, तसेच इतर बाबींची तपासणी करण्यात आलेली आहे. त्यामुळे सदर शैक्षणिक सामुग्री अधिक संपन्न झालेली असून,विद्यार्थी त्यांच्या व्यक्तिमत्त्वाचा सुसंवादी आणि सर्वांगीण विकास साधतील. परिणामतः विश्वस्तरीय मनुष्यबळाच्या गरजा पूर्ण करण्यात महाराष्ट्र राज्य अग्रेसर राहील व पर्यायाने राष्ट्रनिर्मिती करीता निश्चितच हातभार लागेल, असा मला विश्वास आहे.

अभियांत्रिकी पदविका अभ्यासक्रमातील विषयांची मराठी-इंग्रजी (द्विभाषिक) शैक्षणिक सामुग्री बनविण्यासाठी अध्यापक व सुकाणू समितीचे सदस्य यांनी दर्शविलेले समर्पण व वचनबद्धता कौतुकास पात्र आहे, या सर्वांचे मी मनःपूर्वक अभिनंदन करतो!

(डॉ. प्रमोद नाईक)
संचालक
म. रा. तंत्र शिक्षण मंडळ, मुंबई

अनुक्रमणिका

अ.क्र.	युनिटचे नाव (Unit Name)	पान क्र.
1	थ्री फेज इंडक्शन मोटर्स (Three Phase Induction Motors)	1
2	स्टारटिंग अँड स्पीड कंट्रोल ऑफ थ्री फेज इंडक्शन मोटर्स (Starting and Speed Control of Three Phase Induction Motors)	28
3	सिंगल फेज इंडक्शन मोटर (Single Phase Induction Motors)	62
4	थ्री फेज सिंक्रोनस मशीन्स (Three Phase Synchronous Machines)	84
5	स्पेशल पर्पज मशीन्स (Special Purpose Machines)	122

युनिट-1

थ्री फेज इंडक्शन मोटर्स

(Three Phase Induction Motors)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome):

CO 1 - थ्री फेज इंडक्शन मोटरचा परफॉर्मन्स टेस्ट करा.

(Test the performance of three phase induction motor.)

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

1. थ्री फेज एसी मशीन्स क्लासिफाय करा.

   (Classify three phase AC machines.)

2. दिलेल्या इंडक्शन मोटरच्या कंस्ट्रक्शनचे डिटेल्स आणि वर्किंग प्रिंसिपल एक्सप्लेन करा.

   (Explain constructional details and working principle of the given induction motor.)

3. टू फेज आणि थ्री फेज मुळे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्डचे प्रॉडक्शन एक्सप्लेन करा.

   (Explain the production of a rotating magnetic field with two and three phases.)

4. सिंक्रोनस स्पीडला डिफाईन (define) करा.

   (Define synchronous speed.)

5. थ्री फेज इंडक्शन मोटरचे जनरल स्पेसिफिकेशन्स आणि रेटिंगचा मेन्शन करा.

   (Mention the general specifications and ratings of three phase induction motor.)

6. दिलेल्या कंडीशनमध्ये रोटरचा परफॉर्मन्स एनालाइज (Analyze) करा.

   (Analyze the behavior of the rotor under the given conditions.)

7. इंडक्शन मोटरशी रिलेटेड दिलेल्या पॅरामीटर्सचे कॅल्क्युलेशन (calculation) करा.

   (Calculate the given parameter related to the induction motor.)

8. इंडक्शन मोटरच्या स्लिप मेजरमेंट मेथड्स डीस्क्राइब करा.

   (Describe the given method(s) for slip measurement of the given induction motor.)

9. इंडक्शन मोटरच्या टॉर्क-स्लिप कॅरॅक्टरीस्टिक्स (torque-slip characteristics) इंटरप्रेट करा आणि ॲप्लिकेशन सांगा.

   (Interpret the torque-slip characteristics of the given induction motor and state its applications.)

परिचय (Introduction): इलेक्ट्रिक मोटर हे एक असे डिव्हाइस (Device) आहे की जे इलेक्ट्रिकल एनर्जीला (Electrical Energy) मेकॅनिकल एनर्जीमध्ये (Mechanical Energy) कन्वर्ट (convert) करते. त्यानंतर ही मेकॅनिकल एनर्जी विविध कामांसाठी वापरली जाऊ शकते. या मोटर्स डी.सी. सप्लाय (DC Supply) तसेच सिंगल फेज (Single Phase) आणि थ्री फेज (Three Phase) ए.सी. सप्लायवर (AC Supply) वर्क करू

शकतात. डी.सी. सप्लायवर (DC supply) वर्क करत असणाऱ्या मोटर्सला डी.सी. मोटर्स (DC motors) असे म्हणतात तर ए.सी. सप्लायवर (AC supply) वर्क करत असणाऱ्या मोटर्सला ए.सी. मोटर्स (AC motors) असे म्हणतात. या मोटर्स फॅराडेच्या इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनच्या प्रिंसिपलवर (Faraday's law of electromagnetic induction) वर्क करतात. ए.सी. सप्लाय सामान्यत: सर्वत्र उपलब्ध असतो, म्हणून ए.सी. मोटर्सचा वापर अधिक प्रमाणात केला जातो.

ए.सी. मोटर्सचे क्लासिफिकेशन सिंगल फेज इंडक्शन मोटर्स आणि थ्री फेज इंडक्शन मोटर्स (Induction Motor), सिंक्रोनस मोटर्स (Synchronous Motors) आणि काही स्पेशल पर्पज मोटर्स (Special Purpose Motors) अशा प्रकारे केले जाते. या सर्व प्रकारांपैकी, विविध इंडस्ट्रियल ॲप्लिकेशनसाठी (Industrial applications) थ्री फेज इंडक्शन मोटर्स मोठ्या प्रमाणात वापरल्या जातात. म्हणूनच या युनिटमध्ये आपण थ्री फेज इंडक्शन मोटर्सचे वर्किंग प्रिंसिपल (Working Principle), त्यांचे टाइप आणि त्याच्या कॅरॅक्टरीस्टिक्सचा अभ्यास करणार आहोत.

1.1 थ्री फेज एसी मशीन्स: क्लासिफिकेशन (Three Phase AC Machines: Classification):

थ्री फेज एसी मशीन्स इंडस्ट्रियल (Industrial) तसेच कमर्शियल (Commercial) ॲप्लिकेशनसाठी मोठ्या प्रमाणात वापरल्या जातात. थ्री-फेज एसी मशीन्सचे क्लासिफिकेशन (Classification) खालीलप्रमाणे केले जाते

1) सिंक्रोनस मशीन्स (Synchronous Machines)

२) इंडक्शन मशीन्स (Induction Machines) त्यांनाच असिन्क्रोनस मशीन्स (Asynchronous Machines) असेही म्हणतात.

1. सिंक्रोनस मशीन्स (Synchronous Machines):

a) सिंक्रोनस जनरेटर (Synchronous Generators):सिंक्रोनस जनरेटर हे मॅग्नेटिक फील्डमध्ये फील्ड वायंडिंग फिरवून एसी पॉवर तयार करण्यासाठी वापरले जाते, त्यामुळे स्टेटर वायंडिंगमध्ये ईएमएफ (E.M.F.) इन्ड्युस (Induce) होतो.

b) सिंक्रोनस मोटर्स (Synchronous Motors): सिंक्रोनस मोटर्स या रोटर रोटेट करण्यासाठी मॅग्नेटिक फील्ड रोटेट करून एसी इलेक्ट्रिक पॉवरला मेकॅनिकल पॉवरमध्ये कन्वर्ट (Convert) करण्यासाठी वापरल्या जातात.

2. इंडक्शन मशीन्स (Induction) /असिंक्रोनस (Asynchronous) मशीन्स:

या टाइपच्या मशिन्सचे खालील दोन टाइप पडतात -

a) **स्कीरल केज इंडक्शन मोटर्स (Squirrel Cage Induction Motors):** ही मोटर तिच्या साध्या पण मजबूत कंस्ट्रक्शनमुळे सर्वात जास्त प्रमाणात वापरली जाणारी थ्री-फेज इंडक्शन मोटर आहे. या मोटरच्या रोटरमध्ये एक सॉलिड मेटलचा (Solid Metal) केज (Cage) असतो आणि त्यात इन्ड्युस होणाऱ्या करंटमुळे टॉर्क तयार होतो.

b) **वाउंड रोटर ओर स्लिप-रिंग इंडक्शन मोटर्स (Wound rotor or Slip ring Induction Motor):**या टाइपच्या मोटरच्या रोटरमध्ये स्लिप रिंग्सशी जोडलेली थ्री फेज वायंडिंग असते. यात

एक्सटर्नल रेजिस्टन्सला रोटर सर्किटमध्ये जोडता येते, त्याचा उपयोग मोटरचा स्टार्टिंग स्पीड आणि टॉर्क (Torque) कंट्रोल (Control) करण्यासाठी केला जाऊ शकतो.

मुख्य फरक (Key Differences):

a) सिंक्रोनस मशीन्स सिंक्रोनस स्पीडने (Synchronous Speed)रोटेट होतात, तर इंडक्शन मशीन्स सिंक्रोनस स्पीडपेक्षा थोड्या कमी स्पीडने रोटेट होतात.

b) सिंक्रोनस मशीनला रोटरसाठी डीसी एक्सायटेशनची (D.C. Excitation) आवश्यकता असते, तर इंडक्शन मशीनला डीसी सप्लायची (D.C. Supply) आवश्यक नसते.

c) सिंक्रोनस मशीन्स सामान्यत: इलेक्ट्रिसिटी जनरेटिंग साठी आणि जेथे कॉन्स्टंट स्पीड (Constant speed) आवश्यक आहे, अशा ॲप्लिकेशनमध्ये वापरल्या जातात, तर इंडक्शन मशीन्स या बहुतेक इंडस्ट्रियल (Industrial) आणि कमर्शिअल (Commercial) ॲप्लिकेशनमध्ये वापरल्या जातात.

1.2 स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर: कंस्ट्रक्शनल डिटेल्स (Squirrel cage induction motor and slip ring induction motor: constructional details)

1.2.1 स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर कंस्ट्रक्शन (Construction of Squirrel Cage Induction Motor):

स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरमध्ये खालील पार्ट असतात:

a) स्टेटर (Stator)

b) रोटर (Rotor)

c) फॅन (Fan)

d) बियरिंग्स (Bearings)

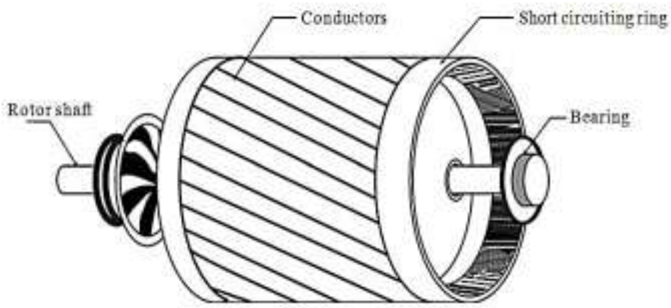


Fig. 1.1: स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरचे कंस्ट्रक्शन (Construction of Squirrel Cage Rotor)

a) स्टेटर (Stator): यात कोअर (Core) आणि मेटल हाऊसिंगसह (Metal Housing) थ्री फेज वायंडिंग (Three Phase Winding) असते. स्टेटर फ्रेमच्या इंटरनल पेरीफेरीवर (Internal Periphery) स्लॉट (Slot) तयार केले जातात आणि त्या स्लॉटमध्ये वायंडिंग प्लेस केलेल्या असतात. या वायंडिंग इलेक्ट्रिकली (Electrically) आणि फिजिकली (Physically) 120^0 स्पेसमध्ये (In Space) असतात. एसी करंटद्वारे प्रोड्यूस झालेल्या फ्लक्ससाठी (Flux) लो रिलक्टंस (Low Reluctance) पाथ (Path) प्रोवाइड (Provide) करण्यासाठी वायंडिंग ही लॅमिनेटेड (Laminated) आयर्न कोअरवर (Iron Core) फिटिंग केली जाते.

b) **रोटर (Rotor):** हा मोटरचा रोटेट होणारा भाग आहे, जो दिलेल्या इलेक्ट्रीकल एनर्जीपासून (Electrical Energy) मेकॅनिकल एनर्जी (Mechanical Energy) देतो. मोटरचे आउटपुट हे नेमप्लेटवर (Nameplate) हॉर्सपॉवरच्या (Hp) रुपात नमूद केलेले असते. त्यात रोटरच्या एक्सटर्नल पेरीफेरीवर (Periphery) स्लॉट असतात. रोटरवर कोणतीही वायंडिंग नसते, परंतु या स्लॉटमध्ये कॉपर बार (Copper Bars) बसवलेले असतात आणि एन्ड रिंगद्वारे (End Ring) दोन्ही एंड ला ते बार शॉर्ट सर्किट केलेले असतात. एडी करंट (Eddy Current) आणि हिस्टेरिसिस (Hysteresis) मुळे होणारा पॉवर लॉस (Power Loss) टाळण्यासाठी रोटर कोअर लॅमिनेटेड केलेली असते. सुरूवातीच्या ऑपरेशन दरम्यान कॉगिंग (Cogging) रोखण्यासाठी आणि स्टेटर आणि रोटर दरम्यान एक चांगला ट्रान्सफॉर्मेशन रेशिओ (Transformation Ratio) देण्यासाठी रोटर कंडक्टर (Rotor Conductors) हे स्क्यू (Skew) केलेले असतात.

c) **फॅन (Fan):** पॉवर लॉसमुळे तयार होणारी हिट (Heat) बाहेर टाकून टेम्परेचर (Temperature) मेन्टेन (Maintain) ठेवण्यासाठी एक फॅन रोटरच्या मागील बाजूस जोडलेला असतो आणि म्हणूनच मोटरचे टेम्परेचर (Temperature) एका लिमिटमध्ये (Limit) ठेवण्यास मदत होते.

d) **बियरिंग्स (Bearings):** रोटरला सपोर्ट म्हणून बियरिंग्स वापरलेल्या असतात. तसेच या बियरिंग्स मोटरला फिरण्यासाठी स्मूथ पोर्शन (Smooth Portion) प्रोवाइड (Provide) करतात.

1.2.2 स्लिप-रिंग इंडक्शन मोटर कंस्ट्रक्शन (Construction of Slip-ring induction motor): स्लिप-रिंग इंडक्शन मोटरला वाउंड रोटर इंडक्शन मोटर (Wound-Rotor Induction Motor) म्हणून देखील ओळखले जाते. स्क्वीरल केज मोटर्सच्या विरुद्ध, स्लिप-रिंग मोटरमधील रोटरमध्ये थ्री-फेज इन्सुलेटेड वायंडिंग असतात, त्याचे टर्मिनल स्लिप रिंगसला जोडलेले असतात. या स्लिप रिंग्स एक्सटर्नल रेजिस्टन्सला (External Resistance) रोटर सर्किटमध्ये जोडण्यास उपयोगी पडतात त्यामुळे स्पीड कंट्रोल करणे आणि जास्त स्टार्टिंग टॉर्क मिळविणे शक्य होते.

a) **स्टेटर (Stator):** स्लिप-रिंग इंडक्शन मोटरचे स्टेटर हे स्क्वीरल केज मोटरच्या स्टेटरसारखेच असते.

b) **रोटर (Rotor):** मुख्य फरक रोटर कंस्ट्रक्शनमध्ये असतो. शॉर्ट-सर्किटेड बार ऐवजी, रोटरमध्ये थ्री-फेज वायंडिंग स्लिप रिंग्ससोबत जोडलेले असतात. या स्लिप रिंग्स कंडक्टिंग (Conducting) मटेरियल (Material) पासून बनविलेल्या असतात आणि स्टेशनरी ब्रशेससह (Stationary Brushes) इलेक्ट्रीकल कॉन्टॅक्ट (Electrical Contact) केलेला असतो, तसेच त्यांचा उपयोग वायंडिंगला एक्सटर्नल रेजिस्टन्ससोबत जोडण्यासाठी होतो.

c) **स्लिप रिंग्स (Slip Rings):** स्लिप रिंग्स या मेटल (Metal) पासून बनविलेल्या असतात. या स्लिप रिंग्स रोटेट होत असतात व स्टेशनरी ब्रशेससोबत इलेक्ट्रीकल कॉन्टॅक्ट करतात. ते रोटेट होत असलेल्या रोटरपासून एक्सटर्नल रेजिस्टन्समध्ये इलेक्ट्रीकल एनर्जी आणि सिग्नल ट्रान्सफर (Transfer) करण्यासाठी वापरले जातात.

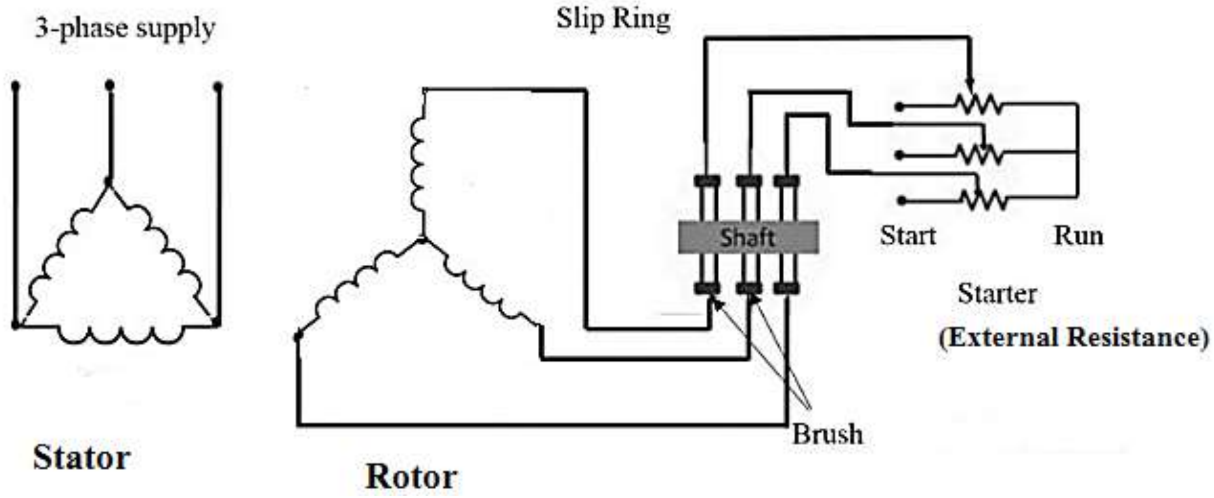


Fig. 1.2 स्लिप-रिंग इंडक्शन मोटर (Slip Ring Induction Motor)

d) **एक्सटर्नल रेजिस्टन्स (External Resistance):** एक्सटर्नल रेजिस्टन्स (सामान्यत: स्टार कनेक्टेड रिओस्टॅट (Star Connected Rheostat)) हे स्लिप रिंग्सद्वारे रोटर सर्किटशी जोडलेले असतात. रोटरचा स्पीड आणि टॉर्क कंट्रोल करण्यासाठी हा रेजिस्टन्स व्हॅरी (Vary) केला जातो.

e) **लॅमिनेशन (Laminations):** एडी करंटमुळे (Eddy Current) होणारा पॉवर लॉस (Power Loss) कमी करण्यासाठी स्टेटर आणि रोटर दोन्ही कोअर्स लॅमिनेटेड (Laminated) असतात.

f) **वायंडिंग (Winding):** स्टेटर आणि रोटरमधील वायंडिंग या मॅग्नेटिक फील्डचे योग्य डिस्ट्रीब्यूशन (Distribution) करण्यासाठी आणि रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) तयार करण्यासाठी डिझाइन केलेल्या असतात.

थ्री फेज इंडक्शन मोटरचे पार्ट, त्याचे मटेरियल ॲन्ड फंक्शन (Parts of Three phase Induction motor, its material and function):

Table 1.1: थ्री फेज इंडक्शन मोटरचे पार्ट, त्याचे मटेरियल ॲन्ड फंक्शन

अनु क्र	पार्ट (Part)	मटेरियल (Material)	फंक्शन (Function)
1	स्टेटर फ्रेम (Stator Frame)	आयर्न केस (iron case)	कोअरला सपोर्ट (support) करणे आणि इंटरनल पार्टचे प्रोटेक्शन करणे.
2	स्टेटर कोअर (Stator Core)	सिलिकॉन स्टील (silicon steel)	स्टेटर वायंडिंगला होल्ड (hold) करणे.
3	स्टेटर वायंडिंग (Stator Winding)	कॉपर (copper) आणि इन्सुलेटेड (insulated)	रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) तयार करणे
4	रोटर कोअर (Rotor Core)	सिलिकॉन स्टील	रोटर वायंडिंगला होल्ड (hold) करणे

अनु क्र	पार्ट (Part)	मटेरियल (Material)	कार्य (Function)
5	रोटर वायंडिंग (Rotor Winding)	कॉपर (copper) आणि इन्सुलेटेड (insulated)	रोटर करंट (rotor current) तयार करणे.
6	एअर गॅप (Air Gap)	----------	मॅंग्नेटिक कपलिंगसाठी (magnetic coupling) तसेच रोटर व स्टेटरमध्ये गॅप (clearanace) ठेवणे.
7	एअर इनलेट-आउटलेट (Air Inlet-Outlet)	----------	कुलिंग (cooling) व्हावे म्हणून एअर सर्क्युलेशनसाठी (Circulation) मोकळी जागा
8	कूलिंग फॅन (Cooling Fan)	अल्युमिनियम (Aluminum)	हवा सर्क्युलेशनसाठी (Circulation).
9	स्लिप-रिंग्स (Slip-Rings)	फॉस्फर ब्रॉन्झ (Phosphor Bronze)	ब्रशद्वारे रोटर सर्किटला एक्स्टर्नल रेजिस्टन्स (external resistance) जोडणे
10	ब्रशेस (Brushes)	कार्बन (Carbon)	रेजिस्टन्स आणि स्लिप-रिंग्सदरम्यान कनेक्शन (connection) प्रोवाइड (provide) करण्यासाठी.
11	शाफ्ट (Shaft)	माइल्ड स्टील (Mild Steel)	रोटरला सपोर्ट (Support) देणे.

1.3 रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड कन्सेप्ट: प्रॉडक्शन (टू आणि थ्री फेजसह), सिंक्रोनस स्पीड (Concept of rotating magnetic field: production of rotating magnetic field (with two and three phases), synchronous speed.):

इंडक्शन मशीनच्या ऑपरेशनमध्ये रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) हे मेन (Main) प्रिंसिपल आहे. हे एक मॅग्नेटिक फील्ड आहे, जे सर्कुलर मोशन ने सतत रोटेट होत असते. रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड खालील दोन सिस्टमद्वारे तयार होते:

a) **पॉलीफेज एसी सप्लाय (Polyphase A.C. Supply):** पॉलीफेज (Polyphase) (थ्री-फेज) सिस्टममध्ये, तीन कॉइल्स फिजिकली (Physically) 120° अपार्ट (Aparts) असतात आणि इलेक्ट्रिकली 120° फेज डिफरन्स (Phase Difference) असलेला करंट त्यातून पास (Pass) केला जातो. मग तिन्ही कॉइलद्वारे प्रोड्युस केलेल्या मॅग्नेटिक फील्डची व्हेक्टर सम (Vector Sum) मुळे एक रिझल्टंट मॅग्नेटिक फील्ड तयार होते, जे स्टेटरच्या अराउंड (Around The Stator) फिरते.

b) **टू-फेज सिस्टमः** स्प्लिट-फेज (Split-Phase) किंवा कॅपेसिटर-स्टार्ट (Capacitor-Start) मोटर्ससारख्या सिस्टम्समध्ये, फेज डिफरंस असलेले दोन करंटदेखील रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic

Field) तयार करतात. मात्र हे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड थ्री-फेज फील्डइतके सर्कुलर (Circular) नसते. त्यासाठी आपण प्रथम कल्पना करू या की इलेक्ट्रिक मोटरच्या स्टेटरमध्ये थ्री-फेज वायंडिंग ही स्टेटर कोअरमध्ये फिजिकली 120° ने डिस्ट्रीब्यूट केलेली आहे. सर्व वायंडिंग एकसारख्याच आहेत आणि Fig. 1.3 प्रमाणे सप्लाय बॅलन्स (Balanced Supply) आहे, प्रत्येक फ्लक्सचे अम्प्लिट्युड (Amplitude) ϕm इतके आहे, फेज सीक्वेन्स (Phase Sequence) R-Y-B असा असून, फ्लक्स ϕY हा ϕR पेक्षा 120° ने लॅग आहे तर ϕB हा ϕY पेक्षा 120° ने लॅग आहे म्हणजेच फ्लक्स ϕB हा ϕR पेक्षा 240° ने लॅग आहे.

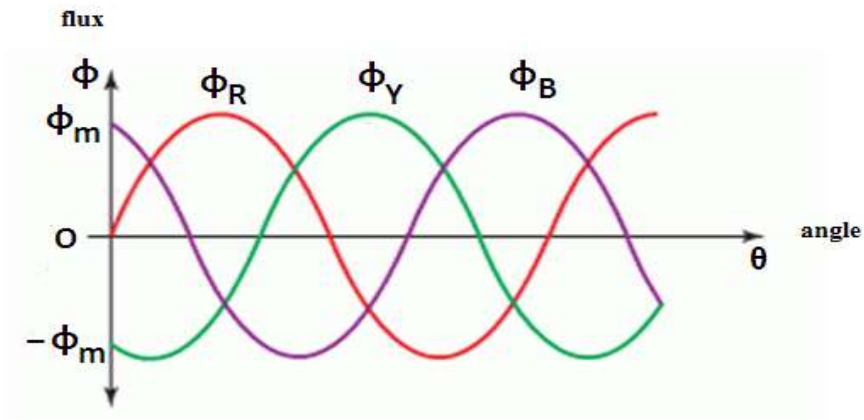


Fig 1.3 थ्री-फेज फ्लक्स प्रॉडक्शन (Three Phase Flux Produced Due To Individual Line Currents)

लेट (Let),
$$\phi_R = \phi_m \sin(\omega t) = \phi_m \sin(\theta)$$
$$\phi_Y = \phi_m \sin(\omega t - 120^0) = \phi_m \sin(\theta - 120^0)$$
$$\phi_B = \phi_m \sin(\omega t - 240^0) = \phi_m \sin(\theta - 240^0)$$

म्हणून रिझल्टंट फ्लक्स असा दिला जातो,

$$\phi_T = \phi_R + \phi_Y + \phi_B$$

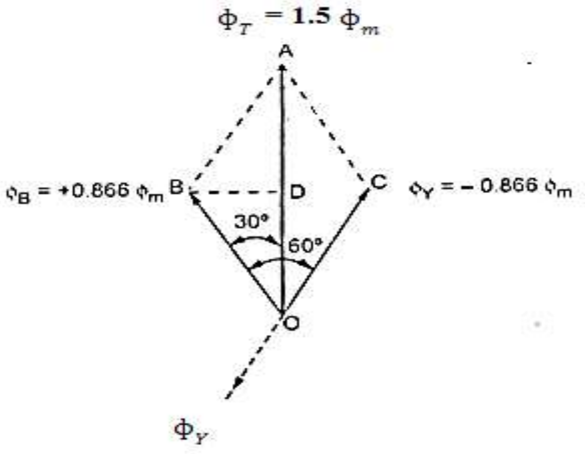
आता,

केस (Case) (1), at $\theta = 0^0$

म्हणून

$$\phi_R = \phi_m \sin(0) = 0$$
$$\phi_Y = \phi_m \sin(0 - 120^0) = -0.866\,\phi_m$$
$$\phi_B = \phi_m \sin(0 - 240^0) = 0.866\,\phi_m$$

म्हणून व्हेक्टर डायग्राम (vector diagram) अशी मिळेल,



$$\phi_T = 1.5\,\phi_m$$

म्हणजेच at $\theta = 0^0$ या वेळी एकूण रिझल्टंट फ्लक्स ϕ_T हे ϕ_m पेक्षा 1.5 पटीने जास्त मिळतील.

केस (Case) (2), $\theta = 60^0$

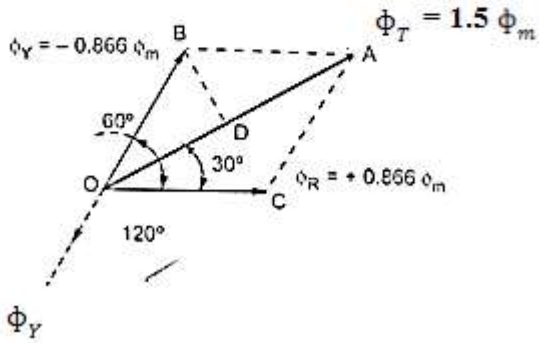
म्हणून

$$\phi_R = \phi_m \sin(60) = 0.866\,\phi_m$$

$$\phi_Y = \phi_m \sin(60 - 120^0) = \phi_m \sin(-60^0) = -0.866\,\phi_m$$

$$\phi_B = \phi_m \sin(60 - 240^0) = \phi_m \sin(-180^0) = 0$$

म्हणून व्हेक्टर डायग्राम (Vector Diagram) अशी मिळेल



म्हणून,

$$\phi_T = 1.5\,\phi_m$$

म्हणजेच at $\theta = 60^0$ या वेळी एकूण रिझल्टंट फ्लक्स ϕ_T हे ϕ_m पेक्षा 1.5 पटीने जास्त मिळतील मात्र त्याची डायरेक्शन (direction) मूळ डायरेक्शनपेक्षा क्लॉकवाइज डायरेक्श ने 60^0 इतकी फिरलेली असेल.

केस (Case) (3), $\theta = 120^0$

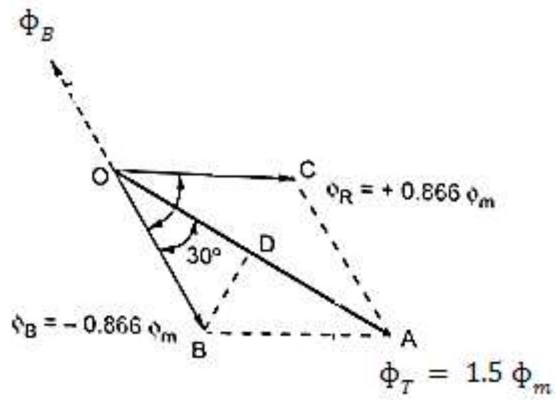
म्हणून

$$\phi_R = \phi_m \sin(120) = 0.866\,\phi_m$$

$$\phi_Y = \phi_m \sin(120 - 120^0) = \phi_m \sin(0^0) = 0$$

$$\phi_B = \phi_m \sin(120 - 240^0) = \phi_m \sin(-120^0) = -0.866\,\phi_m$$

म्हणून व्हेक्टर डायग्राम (vector diagram) अशी मिळेल –



म्हणून,

$$\phi_T = 1.5\,\phi_m$$

त्यामुळे रिझल्टंट फ्लक्स ϕ_T हे ϕm च्या 1.5 पट असेल, परंतु तो त्याच्या मागील स्थानावरून 60^0 आणि त्याच्या मूळ स्थानावरून 120^0 पर्यंत क्लॉकवाइज फिरलेला आहे.

अशा प्रकारे रिझल्टंट फ्लक्स ϕ_T हा फेज सीक्वेंसच्या (Phase sequence) डायरेक्शनने रोटेट होतो, ज्यामुळे समान रिझल्टंट फ्लक्स (Resultant flux) तयार होतो. अशा प्रकारे याला रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating magnetic field) असे म्हणतात.

1. **सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed):** रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड ज्या स्पीडने फिरते, त्याला सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) असे म्हणतात. सिंक्रोनस स्पीड हा Ns ने दाखवतात व तो खालीलप्रमाणे कॅल्क्युलेट (Calculate) केला जातो

$$Ns = \frac{120.f}{p}$$

जेथे -

'f' - सप्लायची फ्रिक्वेंसी (Frequency Of The Supply) (हर्ट्ज (Hz) मध्ये)

'p' - पोलची (Poles) संख्या.

2. **रोटर स्पीड (Rotor Speed):** रोटर ज्या स्पीडने रोटेट होते, त्याला रोटर स्पीड किंवा ऍक्चुअल स्पीड (Rotor Speed) असे म्हणतात. हे Nr किंवा N द्वारे दर्शविले जाते.
   a) **इंडक्शन मोटर्स:** इंडक्शन मोटरमध्ये, रोटरचा स्पीड नेहमीच सिंक्रोनस स्पीडपेक्षा कमी असतो; म्हणजेच (N < Ns)
   b) **सिंक्रोनस मोटर्स:** सिंक्रोनस मोटरमध्ये, रोटर स्पीड हा सिंक्रोनस स्पीड इतका असतो. म्हणजे (N = Ns).
3. **स्लिप स्पीड (Slip speed):** स्लिप स्पीड म्हणजेच सिंक्रोनस स्पीड (Ns) आणि रोटर स्पीड (N) मधील फरक. म्हणून स्लिप स्पीड = (Ns - N)

जेथे, Ns = सिंक्रोनस स्पीड

N = रोटर स्पीड

4. **स्लिप (Slip):** % स्लिप हे स्लिप स्पीड आणि सिंक्रोनस स्पीड (स्टेटरचे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड) यांचा रेशिओ (ratio) असतो. हे खालीलप्रमाणे परसेंटेज (%) मध्ये व्यक्त केले जाते.

$$\% \, s = \frac{Ns - N}{Ns} * 100$$

जेथे (Ns – N) = स्लिप स्पीड

Ns = सिंक्रोनस स्पीड

स्लिप दोन स्पीडचा रेशिओ आहे, म्हणूनच ती युनिटलेस (Unitless) क्वांटिटी (Quantity) आहे.

5. **रोटेशनची डायरेक्शन (Direction of Rotation):** रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डची डायरेक्शन थ्री-फेज ए.सी. सप्लायच्या फेज सिक्वेंसवर (Phase Sequence) अवलंबून असते. रोटेशनची डायरेक्शन बदलण्यासाठी, आपल्याला सप्लायमधील कोणत्याही दोन फेजचा सिक्वेंस उलट करणे आवश्यक आहे.

उदा. जर फेज सिक्वेंस R – Y - B असेल, तर रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड क्लॉकवाइज (Clockwise) डायरेक्शनने फिरते. आणि जर फेज सिक्वेंस R – B - Y मध्ये बदलला असेल तर रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड एंटीक्लॉकवाइज (Anticlockwise) डायरेक्शनने फिरते.

1.4 स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर अँड स्लिप रिंग इंडक्शन मोटर: वर्किंग प्रिंसिपल अँड कॉम्पॅरिजन (Squirrel Cage Induction Motor and Slip Ring Induction Motor: Working Principle, Comparison.):

1.4.1 स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर्सचे वर्किंग प्रिंसिपल (Squirrel Cage Induction Motor Working Principle):

जेव्हा स्टेटर वायंडिंगला थ्री फेज ए.सी. सप्लाय दिला जातो, तेंव्हा रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार होते. हे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड रोटर कंडक्टरला कट (Cut) करते आणि त्यात इन्ड्युस ई.एम.एफ. (Induce Emf) तयार करते. रोटर कंडक्टरमध्ये रोटर बार शॉर्ट सर्किटेड असल्याने, त्यामधून करंट फ्लो (Flow) होतो. हा रोटर करंट स्वतःचे आणखी एक मॅग्नेटिक फील्ड तयार करतो. त्या दोन मॅग्नेटिक फील्डमध्ये इंटरॅक्शन (Interaction) होते. या इंटरॅक्शनमुळे टॉर्क तयार होतो आणि अशा प्रकारे रोटर रोटेट होते.

1.4.2 स्लिप रिंग इंडक्शन मोटरचे वर्किंग प्रिंसिपल (Slip Ring Induction Motor: Working Principle) :

सुरुवातीला स्लिप रिंग आणि ब्रशेसद्वारे एक्सटर्नल रेजिस्टन्स रोटर सर्किटमध्ये अॅड केला जातो, म्हणूनच स्टेटर हा सप्लायपासून कमी करंट घेतो आणि मोटर कमी करंट - कमी स्पीडने सुरू होते. मग जसजसा रोटर रेजिस्टन्स स्लोली कमी होतो, तसतसा रोटर स्पीड वाढत जातो. जेव्हा मोटर पूर्ण स्पीड ने रोटेट होते, तेव्हा एकूण रेजिस्टन्स रिमुव्ह केला जातो आणि स्लिप रिंग्स शॉर्ट सर्किट केल्या जातात. अशा प्रकारे ही मोटर नंतर स्क्वीरल केज मोटर म्हणून वर्किंग करते. दुसऱ्या शब्दांत सांगायचे तर ही मोटर स्लिप रिंग मोटर म्हणून सुरू होते आणि स्क्वीरल केज मोटर म्हणून पुढे चालू राहते.

उदा.1.1 : एक 4-पोल, 50 हर्ट्ज, थ्री फेज इंडक्शन मोटर 1440 rpm वर चालू आहे. तर स्लिप, सिंक्रोनस स्पीड आणि रोटर स्पीड कॅल्क्युलेट (Calculate) करा.

उत्तर :दिलेला डेटा (data):

पोलची संख्या (p) = 4,

सप्लाय फ्रिक्वेंसी (f) = 50 हर्ट्ज (Hz), आणि

रोटर स्पीड (Nr) = 1440 rpm.

सिंक्रोनस स्पीड (Ns) कॅल्क्युलेट (Calculate) करा:

सिंक्रोनस स्पीड हा रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डचा स्पीड आहे.

$$Ns = \frac{120.f}{p}$$

$$Ns = \frac{120*50}{4}$$

Ns 1500 = rpm

$$\%\, s = \frac{Ns - N}{Ns} * 100$$

$$\%\, s = \frac{1500 - 1440}{1500} * 100$$

s 0.04 = किंवा %4

रोटरचा स्पीड दिलेला आहे:

रोटर स्पीड (Nr) = 1440 rpm

उदा. 1.2: एक 4-पोल, 3-फेज इंडक्शन मोटरला असा सप्लाय दिलेला आहे, ज्याची फ्रिक्वेंसी 50 हर्ट्ज आहे. तर खालील पॅरामीटर्स कॅल्क्युलेट (Calculate) करा.

a) स्टेटरचे मॅग्नेटिक फील्ड किती स्पीडने रोटेट होत आहे ?
b) स्लिप 0.04 असते, तेव्हा रोटरचा स्पीड किती असेल ?
c) जेव्हा स्लिप 0.03 असते तेव्हा रोटर करंटची फ्रिक्वेंसी किती असेल ?
d) रोटर स्टेशनरी (Stationary) असतांना रोटर करंटची फ्रिक्वेंसी किती असेल ?

उत्तर :

स्टेटर फील्ड सिंक्रोनस स्पीडने रोटेट होते,

a) सिंक्रोनस स्पीड,

Ns = (120*f)/p

Ns = (120* 50)/4

Ns = 1500 rpm

b) रोटर स्पीड, N = Ns (1 - s)

= 1500 (1−0.04)

= 1440 rpm.

c) रोटर करंटची फ्रिक्वेंसी

s = 0.03

f ′ = s.f

= 0.03 × 50

= 1.5 r.p.s

= 90 r.p.m

d) रोटर करंटची फ्रिक्वेंसी,(स्टेशनरी (stationary) असतांना) s = 1,

f ′ = sf

= 1 × f

= f

= 50Hz

1.4.3 ऍडव्हान्टेज, डिस-ऍडव्हान्टेज ॲड ॲप्लिकेशन (Advantages, Disadvantages and Applications):

स्कीरल केज इंडक्शन मोटर्सचे:

ऍडव्हान्टेज (Advantages):

a) किंमत कमी आहे.
b) कमी मेंटेनन्स (Maintenance) आवश्यक आहे (स्लिप रिंग्स किंवा ब्रशेस नसल्यामुळे).
c) चांगला स्पीड कंट्रोल (Control) (कॉस्टंट स्पीड (Constant Speed) राखण्यास सक्षम आहेत).
d) इलेक्ट्रीकल एनर्जीला मेकॅनिकल एनर्जीमध्ये कन्वर्ट (Convert) करण्यात जास्त इफिशियंसी (Efficiency) (रनिंग कंडीशनमध्ये मिळते, स्टार्टिंग दरम्यान नाही).
e) टेम्परेचर (Temperature) कंट्रोल (Control) अधिक चांगले आहे (म्हणजे जास्त हिट होत नाही).
f) ही मोटर साईझ ने (Size) लहान (Compact) आणि वजनाने हलकी (Light Weight) आहे.
g) कोणतेही ब्रशेस नसल्यामुळे स्पार्किंगची (Sparking) शक्यता कमी असते.

डिस-ऍडव्हान्टेज (Disadvantages):

a) पुअर स्पीड कंट्रोल (Poor Speed Control): स्पीड सहजपणे बदलता येत नाही.
b) ही मोटर स्टार्टिंगला जास्त एनर्जी वापरते.
c) जास्त स्टार्टिंग करंट (High Starting Current): फुल लोड करंटच्या (Full Load Current) जवळपास 5 ते 9 पट (Times).

d) सप्लाय व्होल्टेज कमी असेल, तेव्हा इंडक्शन मोटर अधिक करंट घेते. सप्लाय व्होल्टेज जास्त असेल, तेंव्हा मॅग्नेटिक सॅच्युरेशन (Magnetic Saturation) होते.

e) लो स्टार्टिंग टॉर्क (Low Starting Torque): स्टार्टिंग टॉर्क हा फुल लोड टॉर्कच्या (Full Load Torque) फक्त 1.5-2 पट (Times) असू शकतो.

ॲप्लिकेशन (Applications): स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर्स सामान्यत: अनेक (Many) इंडस्ट्रियल (Industrial) ॲप्लिकेशन मध्ये वापरल्या जातात. विशेषत: जेथे कॉन्स्टंट स्पीड राखणे आवश्यक आहे, सेल्फ स्टार्टिंग (Self-Starting) करणे आवश्यक आहे किंवा कमी मेंटेनन्स (Maintenance) करण्याची गरज आहे, अशा ठिकाणी स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर्स उपयुक्त आहेत.

या मोटर्स सामान्यतः खालील ठिकाणी वापरल्या जातात –

a) सेंट्रीफ्यूगल पंप्स (Centrifugal Pumps)

b) इंडस्ट्रियल ड्राइव्ह (Industrial Drive) (उदा. कन्व्हेयर बेल्ट (Conveyor Belts) चालविण्यासाठी)

c) मोठे ब्लोअर (Blower) आणि फॅन (Fan)

d) मशीन टूल्स (Machine Tools)

e) लेथ (Lathe) आणि इतर रोटेटिंग (Rotating) मशीन्स (Machines).

स्लिप रिंग इंडक्शन मोटरचे:

ॲडव्हान्टेज (Advantages):

a) उत्कृष्ट स्टार्टिंग टॉर्क – त्यामुळे जास्त हेवी (Heavy) मशीन्स चालविण्यासाठी उपयुक्त.

b) एक्सटर्नल रेजिस्टन्समुळे (External Resistance) स्टार्टिंग करंट कमी (Low Starting Current) असतो.

c) ही मोटर जास्त करंट म्हणजे फुल लोड करंटच्या 6 ते 7 पट करंट हँडल (Handle) करू शकते.

डिस-ॲडव्हान्टेज (Disadvantages):

a) स्क्वीरल केज मोटरच्या तुलनेत ब्रशेस आणि स्लिप रिंगसमुळे मेंटेनन्स (Maintenance) कॉस्ट जास्त आहे.

b) कंस्ट्रक्शन कॉम्प्लिकेटेड (Complicated) आहे.

c) जास्त कॉपर लॉस (Higher Copper Losses)

d) स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरपेक्षा कमी इफिशियंसी

e) स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरपेक्षा कॉस्ट जास्त (Costly).

ॲप्लिकेशन (Applications): स्लिप रिंग इंडक्शन मोटरचे काही ॲप्लिकेशन आहेत. जेथे जास्त टॉर्क आणि कमी स्टार्टिंग करंट आवश्यक आहे, त्या ठिकाणी या मोटर्स वापरल्या जातात. काही उदाहरणे खालिलप्रमाणे -

a) लिफ्ट (Lift),

b) कॉम्प्रेसर (Compressor),

c) क्रेन (Crane),

d) कन्व्हेयर्स (Conveyors),

e) हॉईस्ट (Hoist) आणि

f) अशा बरेच ठिकाणी जेथे वेरिएबल स्पीड (Variable Speed) आणि फ्रीक्वेंट स्टार्ट स्टॉपची (Frequent Start-Stop) आवश्यकता असते, तेथे या मोटर्स वापरल्या जातात.

1.4.3 स्लिप रिंग अँड स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरमधील कॉम्पॅरिजन (Comparison between Slip Ring (Phase Wound) and Squirrel Cage Induction Motor):

Table 1.2: स्लिप रिंग अँड स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरमधील कॉम्पॅरिजन

अनु. क्रमांक	स्लिप रिंग/फेज वाउंड इंडक्शन मोटर	स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर
1	स्लिप रिंग आणि ब्रशेसमुळे (Slip rings and brushes) कंस्ट्रक्शन कॉम्प्लिकेटेड (Complicated) असते.	कंस्ट्रक्शन (Construction) खूप सिंपल (Simple) असते.
2	रोटर वायंडिंग (Rotor Winding) ही स्टेटर वायंडिंग (Stator Winding) सारखीच असते.	रोटरमध्ये रोटर बारचा (Rotor Bars) समावेश असतो आणि हे रोटर बार एन्ड रिंगसच्या (End Ring) मदतीने कायमचे शॉर्ट सर्किट (Short Circuit) केलेले असतात.
3	स्लिप रिंग आणि ब्रशेसमुळे आपण रोटर सर्किट मध्ये एक्सटर्नल रेजिस्टन्स (External resistance) सहजपणे अॅड (Add) करू शकतो.	रोटर बार कायमस्वरूपी शॉर्ट सर्किट (Short Circuit) केल्यामुळे एक्सटर्नल रेजिस्टन्स एँड (Add) करणे शक्य नाही.
4	एक्सटर्नल रेजिस्टन्स एँड केल्यामुळे स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) जास्त मिळू शकतो.	स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) कमी आहे आणि त्यात मॉडिफिकेशन (Modification) करता येत नाही
5	स्लिप रिंग आणि ब्रशेस असतात	स्लिप रिंग आणि ब्रशेस नसतात.
6	स्लिप रिंग आणि ब्रशेस (Slip Rings and Brushes) ब्रशेसमुळे वारंवार मेंटेनेंस करणे आवश्यक आहे.	कमी मेंटेनेंसची आवश्यक असते.
7	कॉम्प्लिकेटेड कंस्ट्रक्शन आणि स्लिप रिंग व ब्रशेसची उपस्थिती, यामुळे मोटरची किंमत अधिक असते.	स्लिप रिंग इंडक्शन मोटरच्या तुलनेत कंस्ट्रक्शन साधे आणि रॉबस्ट (Robust)असल्याने किंमत कमी असते.

अनु. क्रमांक	स्लिप रिंग/फेज वाउंड इंडक्शन मोटर	स्कीरल केज इंडक्शन मोटर
8	ही मोटर केवळ 10% उद्योगांमध्ये वापरली जाते.	साधे कंस्ट्रक्शन आणि कमी किंमत यामुळे स्कीरल केज इंडक्शन मोटर मोठ्या प्रमाणात वापरली जाते.
9	रोटर कॉपर लॉस (rotor copper loss) जास्त आहे, त्यामुळे इफिशियंसी (Efficiency) कमी आहे.	रोटर कॉपर लॉस (rotor copper loss) कमी आहे म्हणून इफिशियंसी (Efficiency) जास्त आहे.
10	रोटर रेजिस्टन्स मेथडद्वारे स्पीड कंट्रोल (Speed Control) शक्य आहे.	रोटर रेजिस्टन्स मेथडद्वारे स्पीड कंट्रोल (Speed Control) शक्य नाही.
11	जेथे स्टार्टिंग (Starting) टॉर्क जास्त आवश्यक आहे, तेथे स्लिप रिंग इंडक्शन मोटर वापरली जाते म्हणजेच हॉइस्ट (Hoist), क्रेन (Crane)लिफ्ट (lift) इ.	स्कीरल केज इंडक्शन मोटर ही लेथ मशीन, ड्रिलिंग मशीन, फॅन, ब्लोअर, प्रिंटिंग मशीन इ. (Lathe machine, drilling machine, fans, blowers, printing machines)मध्ये वापरली जाते

1.4.5 थ्री-फेज इन्डक्शन मोटर टेक्निकल स्पेसिफिकेशन (Technical Specifications):

मोटर टाइप :थ्री-फेज इंडक्शन मोटर (स्लिप रिंग किंवा स्कीरल केज)
पॉवर रेटिंग: : 0.5 HP ते अनेक HP (उदा .5 HP, 15 HP, 100 HP, इत्यादि)
रेटेड व्होल्टेज : 415V (बहुतेक देशांमध्ये स्टँडर्ड (standard), मात्र 380 V/400 V/440 V हे देखील वापरले जाते.
रेटेड फ्रिक्वेन्सी : 50 Hz / 60 Hz
फेजेसची संख्या : 3
रेटेड स्पीड : पोल्सनुसार बदलतो (उदा. 2–पोल →3000 rpm, 4–पोल →1500 rpm, 6–पोल →1000 rpm)
पोल्सची संख्या : 2, 4, 6, 8 (ॲप्लिकेशननुसार)
फुल लोड करंट : पॉवर रेटिंग व व्होल्टेजनुसार बदलते (उदा. 5 HP व 415 V साठी सुमारे 7.5 A)
पॉवर फॅक्टर : 0.8 – 0.95 लॅगिंग (lagging) लोडनुसार बदलतो.
इफिशियंसी : 85% – 95% (आकार व लोडनुसार बदलते).
इन्सुलेशन क्लास : क्लास B, F, किंवा H (F मोस्टली कॉमन) (mostly common)

1.5 रोटर बिहेवियर ॲन्ड रिलेशन्स : स्टँडस्टिल ॲन्ड रनिंग कन्डिशन स्पीड, स्लिप, इन्ड्युस ईएमएफ/करंट्सची फ्रिक्केंसी, पॉवर फॅक्टर (Rotor Behaviour and Relations: Standstill and Running Conditions, Speed, Slip, Frequency of Induced emf /Currents, Power Factor):

1.5.1 रोटर इन्ड्युस ई.एम.एफ. ची फ्रिक्केंसी (Frequency of Rotor induced e.m.f (fr or f')):

$$f_r = s \cdot f$$

जेथे f – सप्लाय फ्रीक्केंसी (supply frequency)

s– स्लिप (slip)

1.5.2 मोटर रनिंग असताना रोटरमध्ये इन्ड्युस होणाऱ्या ईएमएफ चे इक्वेशन (Equation of rotor induced e.m.f. under running condition):

$$E_{2r} = s.\ E_2$$

जेथे E_2 - रोटर इन्ड्युस ई.एम.एफ.(मोटर स्टेशनरी (standstill) असतांना)

s – स्लिप (Slip)

1.5.3 रोटर रेसिस्टंस (Rotor Resistance): यावर रोटर फ्रीक्केंसीचा कुठलाही इफेक्ट होत नाही.

1.5.4 रोटर रियाक्टंस (Rotor Reactance):

$$X_{2r} = s.\ X_2$$

जेथे X_2 – रोटर रियाक्टंस (मोटर स्टेशनरी (standstill) असतांना)

s - स्लिप (slip)

1.5.5 रोटर इम्पिडंस (Rotor Impedance): $Z_{2r} = \sqrt{R_2^2 + (s.X_2)^2}$

1.5.6 रोटर पॉवर फॅक्टर (Rotor Power Factor):

$$cos\phi_{2r} = \frac{R_2}{Z_{2r}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2+(s.X_2)^2}}$$

1.5.7 रोटर करंट (Rotor Current) :

$$I_{2r} = \frac{E_{2r}}{Z_{2r}} = \frac{s.E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s.X_2)^2}}$$

$$I_{2r} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(R_2^2/_{s^2} \right) + (X_2)^2}}$$

1.5.8 ट्रान्सफर केलेली पॉवर (Power Transferred):

$$P_{2r} = I_{2r}{}^2.\frac{R_2}{s}$$

1.6 स्लिप मेजरमेंट मेथड्स : टॅकोमीटर, स्ट्रोबोस्कोप आणि गॅल्व्हनोमीटर (Slip Measurement Methods: Tachometer, Stroboscope, Galvanometer):

मोटर्सच्या स्लिप मेजर (**Measure**) करण्यासाठी सामान्यत: तीन मेथड्स आहेत:

1. टॅकोमीटर मेथड (**Tachometer method)**
2. स्ट्रोबोस्कोपिक मेथड (**Stroboscopic method)**
3. गॅल्व्हनोमीटर मेथड (**Galvanometer method)**

1. **टॅकोमीटर मेथड (Tachometer Method):** टॅकोमीटरचा वापर करून इंडक्शन मोटरच्या शाफ्टच्या ॲक्चुअल स्पीडचे थेट मेजरमेंट (Measurement) केले जाते. नंतर सिंक्रोनस स्पीडशी त्याची कॉम्पॅरिजन करून स्लिप कॅल्क्युलेट (Calculate) केली जाते.

Fig 1.4: टॅकोमीटर (Tachometer)

एक्सप्लेनेशन:

टॅकोमीटर स्लिप कसे मेजर करते:

a) ॲक्चुअल rpm मेजर करा: मेकॅनिकल, इलेक्ट्रिकल किंवा कॉन्टॅक्टलेस पद्धतींसारख्या विविध टेक्नोलॉजीचा वापर करून टॅकोमीटरने मोटर शाफ्टचा ॲक्चुअल स्पीड मोजला जातो.

b) सिंक्रोनस स्पीड कॅल्क्युलेट (Calculate) केला जातो: फोर्मुला वापरुन सिंक्रोनस स्पीड मोजला जाऊ शकतो:

$$N_s = \frac{120 * F}{\mathrm{P}}$$

जेथे **Ns -** सिंक्रोनस स्पीड आहे,

f - सप्लाय फ्रिक्वेंसी आहे आणि

p - ही पोलची संख्या आहे.

c) स्लिप कॅल्क्युलेट (Calculate) केली जाते: सिंक्रोनस स्पीड मधून ॲक्चुअल स्पीड मायनस करून खालील फार्मूला वापरून स्लिप कॅल्क्युलेट (Calculate) केली जाते:

स्लिप $s = \frac{N_s - \mathrm{N}}{N_s}$

जेथे **N -** ॲक्चुअल स्पीड (**rpm**)

d) आता परसेंटेज (**Percentage**) स्लिप**:** $\% \ s = \frac{N_s - \mathrm{N}}{N_s} * 100$

2. **स्ट्रॉबोस्कोपिक मेथड (Stroboscopic Method)**: स्ट्रोबोस्कोपिक इफेक्टमध्ये रोटेटिंग ऑब्जेक्टवर विशिष्ट फ्रीक्वेंसीचा **(**Specific Frequency) लाईट पाडून झाल्यावर फिरणारा ऑब्जेक्ट (Object) स्टेशनरी (Stationary) दिसू लागतो. जेंव्हा रोटेटिंग ऑब्जेक्टवर विशिष्ट फ्रीक्वेंसीचा लाईट टाकला जातो**,** तेंव्हा फ्रीक्वेंसीनुसार तो ऑब्जेक्ट स्टेशनरी (Stationary) दिसतो किंवा स्लोली (Slowly) फिरतांना दिसतो**,** नंतर

सिंक्रोनस स्पीड आणि ॲक्चुअल स्पीड यामधील फरक यांचे निरीक्षण करून स्लिप कॅल्क्युलेट (Calculate) केली जाते.

स्ट्रॉबोस्कोपिक इफेक्ट (Stroboscopic Effect): स्ट्रोबोस्कोप हा कंट्रोल्ड फ्रीक्वेंसीच्या (Controllable Frequency) लाईटचा लहान, शार्प फ्लॅश (Sharp Flash) तयार करतो. जेव्हा फिरणारा ऑब्जेक्ट या फ्लॅशद्वारे प्रकाशित होतो, तेव्हा फ्लॅशच्या फ्रीक्वेंसीनुसार तो स्टेशनरी-स्थिर (Stationary) किंवा हळू फिरतांना दिसू लागतो.

स्लिप मेजरमेंट (Slip Measurement): इंडक्शन मोटरमध्ये, रोटरचा स्पीड (ॲक्चुअल शाफ्ट स्पीड) नेहमीच सिंक्रोनस स्पीडपेक्षा (रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डचा स्पीड) कमी असतो. स्पीड मधील या डिफरन्सला स्लिप (Slip) म्हणतात.

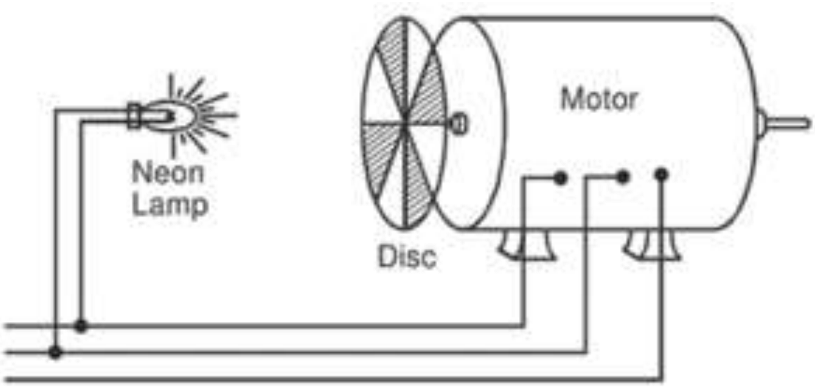


Fig. 1.5 स्ट्रॉबोस्कोपिक मेथड (Arrangement for Stroboscopic method)

a) सर्कुलर डिस्क अल्टरनेट (Alternate) व्हाइट आणि ब्लॅक रंगाच्या सेगमेंटने मार्क केली जाते. या सेगमेंटची संख्या पोलच्या संख्येएवढी असते. उदा. 6 पोल मोटरसाठी, 6 सेगमेंट (3 ब्लॅक आणि 3 व्हाइट) अल्टरनेट (Alternate) असावेत. मग ही डिस्क इंडक्शन मोटरच्या शाफ्टवर बसविली जाते. मग निऑन गॅस भरलेला स्ट्रोबोस्कोपिक लँप (Lamp) डिस्कवर फोकस (Focused) केला जातो आणि मोटर सुरू होते. आपण हे ओब्झर्व करू शकतो की डिस्क मोटरच्या उलट डायरेक्शन ने रोटेट होत आहे.

b) एका फिक्स पॉइंट वर एक मिनिटात ट्रॅव्हल केलेल्या सेगमेंटची संख्या मेजर केली जाते, या संख्येला सेगमेंटच्या (पोलच्या) संख्येने डीवाइड केल्यावर स्लिप स्पीडचे थेट व्हॅल्यू मिळते. (Ns - N).

c) सिंक्रोनस स्पीड (Ns) ची व्हॅल्यू (Value) सप्लाय फ्रिक्वेंसी (f) आणि पोलची संख्या (p) यांच्या आधारे कॅल्क्युलेट केली जाते.

d) त्यानंतर खालील फॉर्मुला वापरून स्लिप कॅल्क्युलेट (Calculate) केली जाते:

$$s = \frac{N_s - N}{N_s}$$

ऍडव्हान्टेज(Advantage): स्ट्रोबोस्कोप ही स्पीड मेजरमेंटसाठी नॉन-कॉन्टॅक्ट टाइप (Non-Contact Type) मेथड (Method) आहे म्हणजे शाफ्टमध्ये कोणताही एक्सटर्नल लोड जोडला जात नाही. ते वापरण्यास तुलनेने सोपे देखील आहेत आणि कमीत कमी मेंटेनन्सची आवश्यकता आहे.

3. गॅल्व्हनोमीटर मेथड (Galvanometer Method): इंडक्शन मोटरमध्ये स्लिप मेजर करण्यासाठी गॅल्व्हनोमीटर मेथड सुद्धा वापरली जाते. या मेथडमध्ये रोटर सर्किटमध्ये फ्लो होणारा करंट मेजर करण्यासाठी गॅल्व्हनोमीटर वापरतात. रोटर फ्रिक्वेंसी कॅल्क्युलेट करून आणि मेन फ्रीक्वेंसीसोबत कॉम्पॅरिजन करून स्लिप कॅल्क्युलेट केली जाते. गॅल्व्हनोमीटरचा वापर रोटर करंट किंवा रोटर सर्किटमधील इन्ड्युस व्होल्टेज (Induced Voltage) मेजर करून मोटरमधील स्लिप कॅलक्युलेट करण्यासाठी केला जातो.

हे खालीलप्रमाणे वर्क करते:

रोटर करंट मेजरमेंट: रोटर सर्किटमध्ये फ्लो होणारा करंट हा थेट स्लिप दाखवतो. गॅल्व्हनोमीटरचा वापर डायरेक्ट (Direct) किंवा शंट (Shunt) रेजिस्टन्स वापरून या करंटचे मेजरमेंट करण्यासाठी केला जातो.

रोटर व्होल्टेज मेजरमेंट: रोटर सर्किटमध्ये इन्ड्युस होणारे व्होल्टेज (Induced Voltage) हे स्लिपच्या प्रपोशनल (Proportion) असते. हे व्होल्टेज मेजर करण्यासाठी गॅल्व्हनोमीटर वापरले जाते. हे गॅल्व्हनोमीटर स्लिप कॅल्क्युलेट करण्यासाठी कॅलिब्रेट (Calibrate) केलेले असते. आपणास माहित आहे की रोटर फ्रिक्वेन्सी (f' किंवा fr) ही रोटर वायंडिंगमध्ये इन्ड्युस होणाऱ्या करंटची फ्रिक्वेंसी असते, जी थेट स्लिपशी रिलेटेड असते.

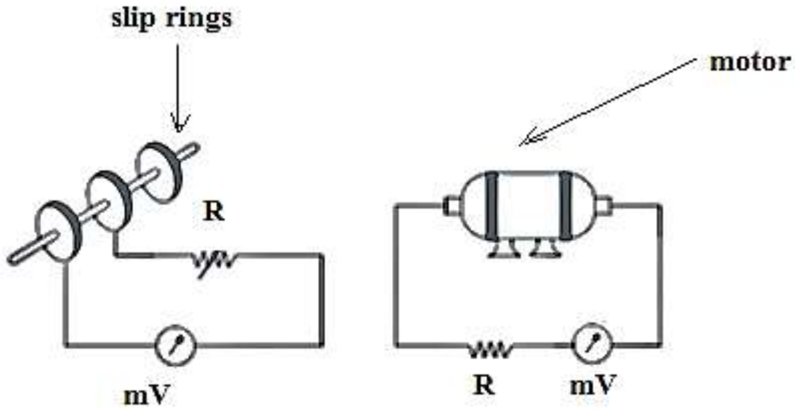


Fig. 1.6 गॅल्व्हनोमीटर मेथड (Arrangement for galvanometer method)

गॅल्व्हनोमीटरचा रोल(Role): गॅल्व्हनोमीटर हे एक सेंसीटिव करंट-मेजरिंग इंस्ट्रूमेंट (Sensitive Current-Measuring Instrument) म्हणून वापरले जाते. त्याचे डिफ्लेक्शन (Deflection) म्हणजेच पॉइंटर (Pointer) किंवा कॉइलची (Coil) मूवमेंट (Movement) ही करंट किंवा व्होल्टेज मेजर करण्याचे प्रमाण आहे, जे स्लिप कॅल्क्युलेशनसाठी उपयोगी पडते.

स्लिप कॅलक्युलेट करण्यासाठी वापरली जाणारी गॅल्व्हनोमीटर मेथड ही इंडक्शन मोटरमधील स्लिप आणि रोटर करंट किंवा रोटर व्होल्टेज दरम्यानच्या रिलेशन वर अवलंबून असते. एक तर रोटर करंट किंवा

इन्ड्युस व्होल्टेज अचूकपणे मेजर करून, स्लिप कॅल्क्युलेट करण्यासाठी गॅल्व्हनोमीटरच्या डिफ्लेक्शनचा (Deflection) वापर केला जाऊ शकतो.

मग स्लिप अशी कॅल्क्युलेट (Calculate) केली जाते –

$$s = \frac{f_r}{f}$$

1.7 टॉर्कः स्टार्टिंग, फुल लोड, मॅक्सिमम टॉर्क (Torques: Starting, Full Load and Maximum Torque & Their Ratios):

इंडक्शन मोटरमधील टॉर्कचे टाइप (Types of Torque):

1. **स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) (Tst) :**
   a) मोटर सुरू होताना (झिरो स्पीड किंवा पूर्ण स्लिपवर) तयार होणारा टॉर्क.
   b) ज्या ठिकाणी स्टार्टिंग ला जास्त टॉर्क आवश्यक असते (उदा. कन्वेअर्स, कंप्रेसर्स) त्यांच्यासाठी अत्यंत महत्त्वाचा.
   c) रोटरचा रेसिस्टंस (Rotor Resistance), व्होल्टेज आणि मोटरच्या डिझाइनवर अवलंबून असतो.
   d) स्क्विरल केज मोटर्समध्ये, स्टार्टिंग टॉर्क सामान्यतः फुल लोड टॉर्कच्या **1.5** ते **2.5** पट असतो.
2. **फुल लोड टॉर्क (Full Load Torque) (T_{FL}):**
   a) मोटरने आपल्या रेटेड स्पीडवर आणि लोडवर तयार केलेला टॉर्क.
   b) हा मोटरचा नार्मल (Normal) ऑपरेटिंग (Operating) टॉर्क असतो, ज्यासाठी ती डिझाइन केलेली असते.
   c) इतर टॉर्क्सची कॉम्पॅरिजन करण्यासाठी हा टॉर्क रेफरन्स म्हणून वापरला जातो.
3. **मॅक्सिमम टॉर्क (Maximum Torque) (T_{max}):**
   a) मोटरने तयार केलेला सर्वात जास्त टॉर्क, जो मोटर थांबण्यापूर्वी (सिंक्रोनस स्पीड अगोदर) एका विशिष्ट स्लिपवर मिळतो.
   b) टेम्परररी ओव्हरलोड्स कॅरी करणाऱ्या मोटर्ससाठी महत्त्वाचा आहे.
   c) स्क्विरल केज मोटर्समध्ये, मॅक्सिमम टॉर्क सामान्यतः फुल लोड टॉर्कच्या **2.5** ते **3.5** पट असतो.

टॉर्क इक्वेशन (Torque Equation) :

$$T = \frac{k.s.E_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}$$

फुल लोड टॉर्क(Full Load Torque) (T_{FL}):

$$T_{FL} = \frac{3}{2\pi n_s}.\frac{s.E_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}$$

$$T_{FL} = \frac{k.s.E_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}$$

जेथे n_s= Ns / 60

स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) : As s = 1

$$T_{ST} = \frac{3}{2\pi n_s}.\frac{E_2^2.R_2}{R_2^2+(X_2)^2}$$

$$T_{ST} = \frac{k.\ E_2^2.R_2}{R_2^2+(X_2)^2}$$

मॅक्सिमम टॉर्कसाठी आवश्यक कंडीशन (Condition):

लेट (Let), $T = \frac{k.s.E_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}$

$$\frac{dT}{ds} = 0$$

$$\frac{d}{ds}\left(\frac{k.s.E_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}\right) = 0$$

$$\frac{[\,(R_2^2+(s.X_2)^2)\,(k.E_2^2.R_2)\,]-[\,(k.s.E_2^2.R_2)\,(2s.(X_2)^2)]}{(R_2^2+(s.X_2)^2)^2} = 0$$

$$[\,(R_2^2+(s.X_2)^2)\,(k.E_2^2.R_2)\,] - [\,(k.s.E_2^2.R_2)\,(2s.(X_2)^2)] = 0$$

$$[\,(R_2^2+(s.X_2)^2)\,] - [\,(s)\,(2s.(X_2)^2)] = 0$$

$$\left[\,(R_2^2+\left(s^2.{X_2}^2\right)\right] - \left(2s^2.({X_2}^2\right) = 0$$

$$\left[\,(R_2^2-\left(s^2.{X_2}^2\right)\right] = 0$$

$$\left[\,(R_2^2=\left(s^2.{X_2}^2\right)\right]$$

$$R_2 = s.X_2$$

$$s = s_m$$

त्यामुळे, $R_2 = s_m.X_2$ or $s_m = \frac{R_2}{X_2}$ **- - - मॅक्सिमम टॉर्कसाठी आवश्यक कंडीशन**

मॅक्सिमम टॉर्क -

$$T = \frac{k.s.E_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}$$

पुट (put) $s_m = \frac{R_2}{X_2}$

मग, $T_m = \frac{k.\ E_2^2}{2.X_2}$

a) मॅक्सिमम टॉर्कच्या वेळी स्लिपची व्हॅल्यू रोटरच्या रेसिस्टन्स आणि रिऍक्टन्सवर अवलंबून असते.

b) मॅक्सिमम टॉर्क स्वतः सप्लाय फ्रीक्वेंसी (Supply Frequency) आणि व्होल्टेजवर अवलंबून नसतो, परंतु तो ज्या स्लिपवर मिळतो ते स्लिपचे व्हॅल्यू R_2 वर अवलंबून असते.

c) स्लिप रिंग मोटर्समध्ये, आपण R_2 एक्स्टर्नली एडजस्ट (Adjust) करून मॅक्सिमम टॉर्क ज्या स्लिपवर पाहिजे त्या पॉइंटकडे नेऊ शकता.

टॉर्क इक्वेशन रेशियो (Torque Equation Ratio)

1. स्टार्टिंग टॉर्क टु मॅक्सिमम टॉर्क (Starting Torque to Maximum Torque):

$$\frac{T_{st}}{T_m} = \frac{\frac{k.\ E_2^2.R_2}{R_2^2+(X_2)^2}}{\frac{k.\ E_2^2}{2.X_2}}$$

$$= \frac{k.\ E_2^2.R_2}{R_2^2+(X_2)^2}\ x\ \frac{2X_2}{k.\ E_2^2}$$

Put $\frac{R_2}{X_2} = s_m = a,$

We get,

$$\frac{T_{st}}{T_m} = \frac{2a}{1+a^2}$$

2. फुल लोड टॉर्क टु मॅक्सिमम टॉर्क (Full Load Torque to Maximum Torque) :

$$\frac{T_{FL}}{T_m} = \frac{\frac{k.\ sE_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}}{\frac{k.\ E_2^2}{2.X_2}}$$

$$= \frac{k.\ sE_2^2.R_2}{R_2^2+(s.X_2)^2}\ x\ \frac{2.X_2}{k.\ E_2^2}$$

Put, $\frac{R_2}{X_2} = s_m = a,$

Hence,

$$\frac{T_{FL}}{T_m} = \frac{2as}{a^2+s^2}$$

1.8 टॉर्क-स्लिप कॅरेक्टरिस्टिक्स (Torque Slip (T-S) Characteristics):

थ्री-फेज इंडक्शन मोटरची टॉर्क-स्लिप कॅरेक्टरिस्टिक्स (Torque-Slip Characteristics) ही मोटरचा टॉर्क आणि स्लिप (सिंक्रोनस स्पीड आणि ॲक्चुअल रोटर स्पीडमधील फरक) यांच्यातील रिलेशन डीसक्राइब (Describe) करतात. सामान्यत: ही कॅरेक्टरिस्टिक्स रेक्टांगुलर हायपरबोला (Rectangular Hyperbola) या

आकारात असते आणि तिचे तीन रिजन मध्ये क्लासिफिकेशन केले जाऊ शकते: लो (Low) स्लिप, मीडियम (Medium) स्लिप आणि लार्ज (Large) स्लिप.

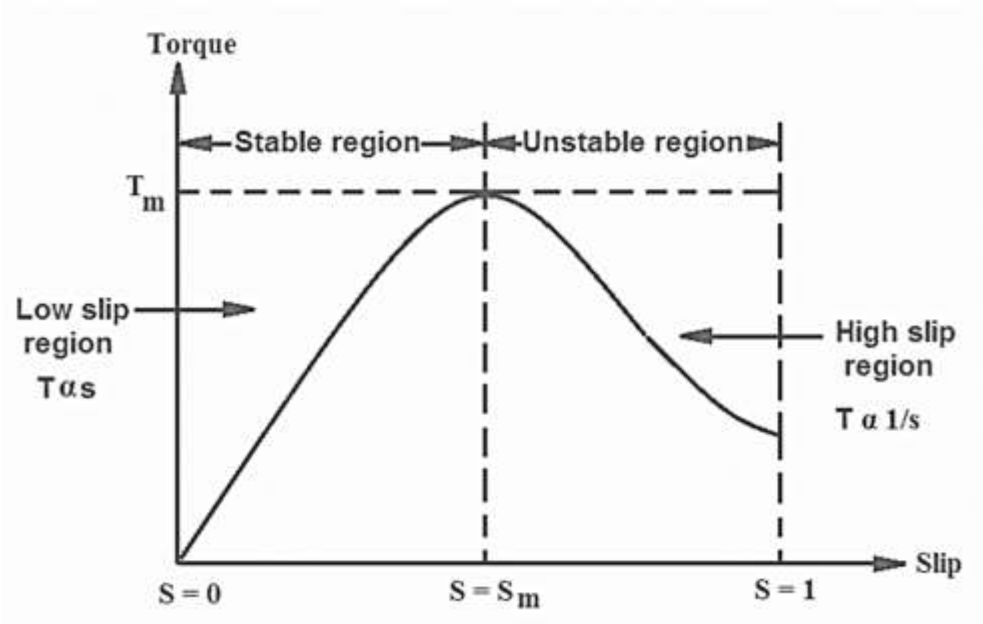


Fig 1.7: टॉर्क-स्लिप कॅरेक्टरिस्टिक्स (Torque Slip (T-S) Characteristics)

एक्सप्लेनेशन:

a) **लो (low) स्लिप रिजन :** कॅरेक्टरिस्टिक्स कर्व्हच्या (Characteristics Curve) या रिजनमध्ये, टॉर्क (Torque) हा जवळपास स्लिपच्या (Slip) प्रपोशनल (Proportional) असतो, परिणामी त्यांच्यामध्ये लीनियर (Linear) रिलेशन असतो. मोटरचा स्पीड त्याच्या रेटेड स्पीडच्या (Rated Speed) जवळपास असतो आणि तुलनेने टॉर्क हा कमी असतो.

b) **मीडियम (Medium) स्लिप रिजन :** कॅरेक्टरिस्टिक्स कर्व्हच्या या रिजनमध्ये, जोपर्यंत मॅक्झिमम टॉर्क (Maximum Torque) किंवा ब्रेकडाउन टॉर्क (Breakdown Torque) प्राप्त होत नाही, तोपर्यंत टॉर्क हा स्लिपच्या बरोबरीने वाढत जातो, म्हणजेच कॅरेक्टरिस्टिक्स कर्व्ह कमी होण्यापूर्वी असलेल्या या स्लिपला मोटर आपला मॅक्झिमम टॉर्क (Highest/Maximum Torque) तयार करते.

c) **लार्ज (Large) स्लिप रिजन :** कॅरेक्टरिस्टिक्स कर्व्हच्या या रिजनमध्ये, म्हणजे ब्रेकडाउन टॉर्कच्या (Breakdown Torque) पलीकडे स्लिप वाढत असताना, टॉर्क (Torque) कमी होत जातो. मोटर कमी स्पीडने फिरते आणि कदाचित स्टॉलिंगकडे (Stalling) जाते म्हणजेच बंद पडते.

इम्पॉर्टन्ट पॉइंट:

a) स्लिप (Slip)(s): स्लिप हा टॉर्कवर इफेक्ट पाडणारा एक इम्पॉर्टन्ट पॅरामिटर आहे. स्लिप ही सिंक्रोनस स्पीड आणि ॲक्चुअल रोटर स्पीडमधील फरक म्हणजेच स्लिप स्पीडला सिंक्रोनस स्पीडद्वारे डिवाइड (Divide) करून डिफाइन (Define) केली जाते.

b) मक्झिमम टॉर्क: स्लिपच्या एका स्पेसिफिक व्हॅल्यूवर (Specific Slip Value) मोटर ही त्याच्या मक्झिमम टॉर्कवर (Maximum Torque) पोहोचते, ही स्लिप फुल-लोड स्लिपपेक्षा कमी असते.

c) स्टार्टिंग कंडीशन (Starting Condition): जेव्हा स्लिप = **1** असते (म्हणजे रोटर स्टेशनरी (Stationary) असते), तेंव्हा स्टार्टिंग टॉर्क हा जास्त असू शकतो, परंतु मोटरच्या ऑपरेशनल रेंजमधील मक्झिमम टॉर्कपेक्षा कमी असतो.

d) सिंक्रोनस स्पीड: जेंव्हा, स्लिप = **0,** म्हणजेच सिंक्रोनस स्पीडला टॉर्क झिरो असतो, कारण स्टेटर मॅग्नेटिक फील्ड आणि रोटर यांच्या दरम्यान रिलेटिव स्पीड (Relative Speed) राहत नाही.

1.9 स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटर: लॉसेस अॅन्ड पॉवर स्टेजेस (Squirrel Cage Induction Motor: Losses and Power Stages):

स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरमध्ये, खालील लॉस होतात:

a) कॉन्स्टंट लॉस (Constant Loss): हा लॉस व्होल्टेजवर डिपेंड असतो म्हणूनच नो लोडपासून फुल लोडपर्यंत (from no load to full load) कॉन्स्टंट राहतो. याचे दोन टाइप आहेत:

1. **कोअर लॉस (Core loss):** यात स्टेटर कोअर लॉस (Stator Core Loss) आणि रोटर कोअर लॉस (rotor core loss) इनक्लूयुड (include) असतो.
2. **मेकॅनिकल लॉस (Mechanical Loss):** यात फ्रिक्शन आणि विंडेज लॉस (Friction And Windage Loss) इनक्ल्युड (Include) असतो.

b) व्हेरिएबल लॉस (Variable Losses): यात स्टेटर कॉपर लॉस (Stator Copper Losses) आणि रोटर कॉपर लॉस (Rotor Copper Losses) इनक्लूयुड असतात. ते करंटवर (Current) डिपेंड असतात, म्हणून त्याला व्हेरिएबल लॉस असे म्हणतात.

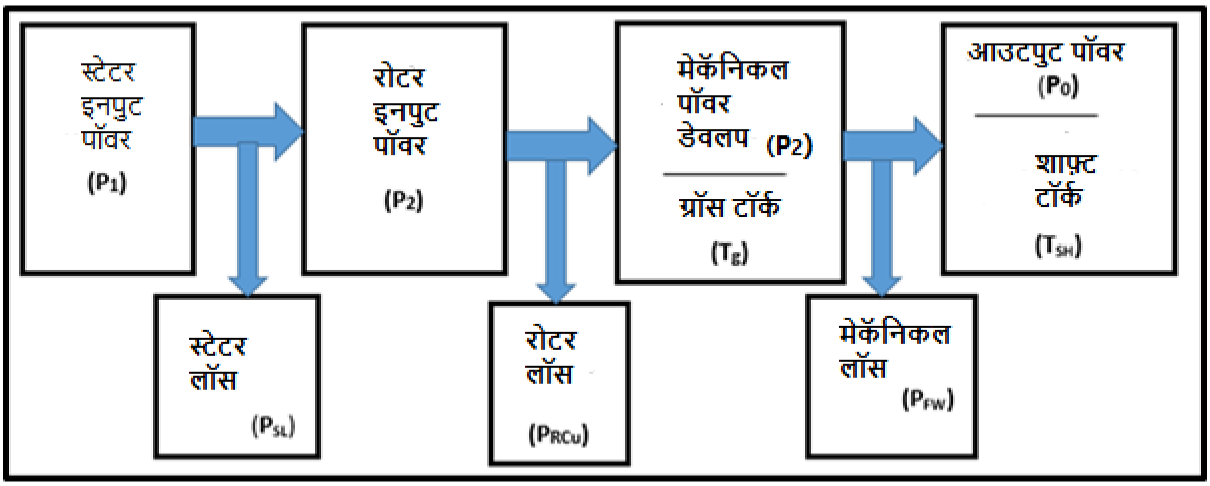


Fig 1.8: पॉवर फ्लो डायग्राम (Power Flow Diagram)

स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरमध्ये, पॉवर स्टेजेस (Power Stages) म्हणजे कशा प्रकारे इलेक्ट्रीकल एनर्जीचे कन्वर्जन (Conversion) मेकॅनिकल एनर्जीमध्ये होते ते इनक्ल्युड असते. हे खालीलप्रमाणे एक्सप्लेन केले जाऊ शकते:

1. **स्टेटर इनपुट पॉवर (Stator Input Power) (P_1):** थ्री-फेज एसी सप्लाय हा स्टेटर वायंडिंगला स्टार्टिंग इलेक्ट्रीकल पॉवर देतो. ही पॉवर रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार करण्यासाठी वापरली जाते.

$$P_1 = \sqrt{3}\,.V_L\,.I_L * \cos\Phi$$

2. **स्टेटर लॉस (Stator Losses)(P_{SL}):** स्टेटर वायंडिंग रेजिस्टन्स मधील कॉपर लॉस आणि कोअर लॉस (हिस्टेरिसिस आणि एडी करंट लॉस) (hysteresis and eddy current losses) यामुळे स्टेटर इनपुट पॉवरचा एक पार्ट त्यामध्ये लॉस होतो.
3. **रोटर इनपुट पॉवर (Rotor Input Power) (P_2):** स्टेटर पॉवर लॉस गेल्यानंतर उर्वरित पॉवर, रोटरसाठी इनपुट पॉवर (Rotor Input Power) बनते. स्टेटरमधून रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डमुळे ही पॉवर रोटर कंडक्टरमध्ये (Rotor Conductor) इन्ड्युस (Induce) होते.

   म्हणून, $P_2 = P_1 - P_{SL}$

$$\boldsymbol{P_2 = \frac{2\pi\ N_S\,.T}{60}}$$

4. **रोटर लॉस (Rotor Losses) (P_{rcu}):**रोटर इनपुट पॉवर देखील पूर्णपणे मेकॅनिकल पॉवरमध्ये कन्वर्ट (Convert) होत नाही. रोटरच्या स्वत:च्या रेजिस्टन्समध्ये होणारा कॉपर लॉस आणि हाय स्लिपच्या वेळी स्किन इफेक्टमुळे (Skin Effect) होणारे लॉस याला रोटर पॉवर लॉस म्हणतात.

$$\mathbf{P_{rcu} = (s)\ P_2}$$

5. **मेकॅनिकल पॉवर डेवलप (Mechanical Power Developed) (P_M):**रोटर कॉपर लॉस गेल्यानंतर, उर्वरित पॉवर मेकॅनिकल पॉवर (P_M) मध्ये कन्वर्ट होते, जी रोटरमध्ये डेवलप होते. तसेच असोसिएटेड टॉर्क (Associated Torque) तयार होतो, त्याला ग्रॉस टॉर्क (Tg) असे म्हणतात.

   म्हणूनच. $P_M = P_2 - P_{rcu}$

$$P_M = (1 - s)\ P_2$$

$$P_M = \frac{2\pi\ N\,.T}{60}$$

6. **मेकॅनिकल लॉस (Mechanical Losses) (P_{FW}):**रोटरच्या आत मोटरने डेवलप केलेली मेकॅनिकल पॉवर लोड ला देण्यासाठी शाफ्टमध्ये ट्रान्सफर (Transfer) केली जाते (उदा. फॅन, पंप इ.). परंतु काही पॉवर फ्रिक्शन, विंडेज (Friction, Windage) आणि इतर मेकॅनिकल लॉस मध्ये वेस्ट जाते.

7. **आउटपुट पॉवर (Output Power) (P_0):** मेकॅनिकल लॉस गेल्यानंतर लोडला दिलेल्या मेकॅनिकल पॉवरला आउटपुट पॉवर (Output Power) (P_0) म्हणतात. या पॉवरशी रिलेटेड टॉर्कला शाफ्ट टॉर्क (Shaft Torque) (T_{sh}) म्हणतात.

   म्हणूनच, $P_0 = P_M - P_{FW}$.

8. **पॉवरमधील रिलेशन (Power Relations):**

   a) $P_1 = \sqrt{3} . V_L . I_L * \cos \Phi$
   b) $P_2 = P_1 - P_{SL}$
   c) $P_{rcu} = (s) P_2$
   d) $P_M = P_2 - P_{rcu}$
   e) $P_0 = P_M - P_{FW}$

***

स्वाध्याय (Exercise) :

1. सिंक्रोनस स्पीड आणि स्लिप स्पीड डिफाइन (define) करा.
   (Define synchronous speed and slip speed).
2. थ्री फेज इंडक्शन मोटरचे पॉवर स्टेजेस दर्शविणारी ब्लॉक डायग्राम काढा.
   (Draw block diagram showing power stages of 3 φ Induction motor)
3. 500 V, 50 हर्ट्ज, 6 पोल, 3 φ इंडक्शन मोटर 975 rpm वर चालत असून एनर्जी इनपुट 40 किलोवॅट आहे. स्टेटरचे लॉस 1 किलोवॅट आहे आणि फ्रिक्शन आणि विंडेजचे लॉस एकूण 2 किलोवॅट आहे. तर स्लिप रोटर कॉपर लॉस, शाफ्ट पॉवर, इफिशियंसी कॅल्क्युलेट (calculate) करा.
   (The power input to a 500 V, 50 Hz, 6 pole, 3 φ induction motor running at 975 RPM is 40 kW. The stator losses are 1 kW and the friction and Windage losses total 2 kW. Calculate:slip, rotor cu loss, Shaft power,efficiency)
4. थ्री फेज इंडक्शन मोटर कधीही सिंक्रोनस स्पीडने का चालत नाही हे सांगा.
   (State why three phase induction motor never runs on synchronous speed).
5. स्क्वीरल केज आणि फेज वाउंड इंडक्शन मोटरची कॉम्पॅरिजन करा.
   (Compare squirrel cage I.M. and phase wound I.M.)
6. 3-फेज इंडक्शन मोटरला जेव्हा 3-फेज सप्लाय दिला जातो, तेंव्हा रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) चे प्रॉडक्शन कसे होते ते स्पष्ट करा. त्याची फेजर डायग्राम (Phasor diagram) काढा.
   (Explain production of R.M.F. in 3-phase I.M. when 3 φ supply is fed to it. Draw its phasor diagram.)
7. 3- φ स्क्वीरल केज इंडक्शन मोटरमध्ये रोटर बार स्क्यू (skew) का केलेले असतात त्याची कारणे सांगा.
   (State the reasons of skewed rotor bars in 3 φ squirrel cage I.M.)
8. थ्री - फेज इंडक्शन मोटरच्या रनिंग स्टेटमध्ये मॅक्झिमम टॉर्क (maximum torque) मिळविण्यासाठी आवश्यक कंडीशन डिराइव (derive) करा.
   (Derive conditio n for maximum torque under running condition of 3–φ induction motor.)

Suggested Learning Materials / Books:

Sr.No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	Theraja B. L., Theraja A. K.	A Textbook of Electrical Technology Vol II	S. Chand and Co. New Delhi ISBN10: 8121924375
2	Ashfaq Husain	Electric Machine	Dhanpat Rai & co. ISBN13: 978-8177001662
3	Kothari D. P. and Nagrath I. J.	Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9352606405
4	Bhattacharya S. K.	Electrical Machines	Tata McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9332902855
5	Dr. P. S. Bimbhra	Electrical Machinery	Khanna Publication ISBN13:978-9389139105
6	Mittle V. N., Arvind Mittle	Design of Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi, ISBN: 9788180141263, 9788180141263
7	Samarjit Ghosh	Electrical Machines	Pearson Education India, 2012; 9788131776025

Learning Websites and Portals:

Sr. No	Link / Portal	Description
1	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/speed-control-slip-ring/	Speed Control of Slip Ring Induction Motor (VLAB)
2	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/106/108106072/	Operation of Induction Machine and Synchronous Machine
3	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/105/108105131/	Construction of Three Phase Induction Motor
4	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/102/108102146/	Electromechanical Energy Conversion and Synchronisation of Alternators
5	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/lab-equipment-familiarization/index.html	Familiarization of the electrical machine laboratory apparatus (VLAB)

युनिट – 2
स्टार्टींग अँड स्पीड कंट्रोल ऑफ थ्री फेज इंडक्शन मोटर
(Starting and Speed Control of Three Phase Induction Motors)

विषय निष्पत्ती (Course Outcomes):

CO2 - योग्य टेक्नोलॉजीचा वापर करून थ्री फेज इंडक्शन मोटरचा स्पीड कंट्रोल करा.

(Control the speed of three phase induction motor using appropriate technique(s).)

घटक निष्पत्ती (Teory Learning Outcomes):

1. थ्री फेज इंडक्शन मोटरसाठी स्टार्टरची नीड(Need) ठरवा.
   (Justify the need of starter for three phase induction motor.)
2. इंडक्शन मोटरच्या विविध स्टार्टर चे कन्स्ट्रक्शनल डिटेल्स डीसक्राइब करा.
   (Describe constructional details of the given type of starter for the induction motor.)
3. थ्री फेज इंडक्शन मोटरर्सच्या विविध स्टार्टर्स ची वर्किंग स्पष्ट करा.
   (Explain working of the given starter for three phase induction motors.)
4. सॉफ्ट स्टार्टरमध्ये वापरल्या जाणाऱ्या सर्व कॉम्पोनंट्सची लिस्ट करा.
   (List all the components used in the given soft starter.)
5. दिलेल्या सॉफ्ट स्टार्टरचे वर्किंग स्पष्ट करा.
   (Explain the working of the given soft starter.)
6. इंडक्शन मोटरर्सच्या विविध स्पीड कंट्रोल मेथड स्पष्ट करा.
   (Explain the given method(s) of speed control for the induction motor)

परिचय (Introduction):

थ्री-फेज इंडक्शन मोटर (Three Phase Induction Motor) मूळतः सेल्फ स्टार्टींग (Self-starting) मोटर आहे. जेव्हा थ्री फेज सप्लाय इंडक्शन मोटर च्या स्टेटर (Stator) ला दिला जातो तेव्हा रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field-RMF) तयार होते आणि रोटर (Rotor) फिरू लागतो. मोटर सुरु होताना मोटरची स्लिप (Slip) युनिटी (1) असते ज्यामुळे स्टार्टींग करंट (Starting Current) जास्त निर्माण होतो. थ्री-फेज इंडक्शन मोटरच्या स्टार्टींग मेथड म्हणजे थ्री फेज इंडक्शन मोटर ला सुरळीत, सुरक्षित आणि कार्यक्षम मेथडने सुरु करण्याची टेक्नोलॉजी होय.

थ्री-फेज इंडक्शन मोटरसाठी स्टार्टर (Starter) हे एक असे इक्विपमेंट)Equipment) आहे जे मोटर ला कंट्रोल आणि सुरक्षित स्टार्ट करते, ज्यामुळे मोटर आणि पॉवर सिस्टमला (Power System) नुकसान पोहोचवू शकणारा हाय इनरश करंट (Inrush Current) कमी होतो. स्टार्टरशिवाय, मोटरला पॉवर ग्रिडशी (Power Grid) थेट जोडल्याने व्होल्टेज डिप्स (Voltage Dips), मेकॅनिकल स्ट्रेस (Mechanical Stress) आणि ओव्हरलोड (Overload) प्रॉब्लेम्स उद्भवू शकतात.

जेव्हा थ्री फेज इंडक्शन मोटर रेटेड सप्लाय व्होल्टेज ला जोडली जाते त्यावेळी मोटर अति हाय स्टार्टींग करंट घेते. जर स्टार्टींग चा अति हाय करंट (High Starting Current) व्यवस्थितरीत्या कंट्रोल नाही केला गेला तर अशा करंट मुळे मोटरच्या सर्व कॉम्पोनन्ट्स वरती अतिरिक्त लोड निर्माण होतो. यामुळे पॉवर सप्लाय मध्ये अनवॉन्टेड फ्लक्चुएशन (Unwanted Fluctuations) निर्माण होतात. म्हणून थ्री फेज इंडक्शन मोटरच्या स्टार्टींग करंट ला कंट्रोल करण्यासाठी विविध स्टार्टींग मेथड्स (Starting Methods) वापरल्या जातात. स्टार्टर चा उद्द्येश फक्त मोटर स्टार्ट करणे हाच नसून तर स्टार्टर मुख्यतः अजून दोन कार्य करते.

1. हेवी स्टार्टींग करंट कमी करणे (Reduces the heavy starting current).
2. ओव्हरलोड आणि अंडर व्होल्टेज प्रोटेक्शन देणे (Overload & under voltage protection).

थ्री फेज इंडक्शन मोटरचे प्रोटेक्शन करणे आणि मोटर कंट्रोल्ड स्टार्ट करणे, हाय इनरश करंट लिमिट करण्यासाठी आणि सुरळीत ऑपरेशन सुनिश्चित करण्यासाठी स्टार्टर्स आवश्यक आहेत. स्टार्टर्स विविध टाइप चे असतात. प्रत्येक स्टार्टर्स चे ऍडव्हांटेजेस (Advantages), डीस-ऍडव्हांटेजेस (Disadvantages) आणि ॲप्लिकेशन्स (Applications) असतात आणि स्टार्टर्स हे मोटरच्या स्पेसिफिकेशन नुसार निवडले जातात. थ्री फेज इंडक्शन मोटरसाठी स्टार्टर्स खाली नमूद करण्यात आलेले उद्दिष्ट पूर्ण करण्यासाठी वापरले जातात.

1. मोटर चा हेवी स्टार्टींग करंट कमी करणे (Reduces the heavy starting current).
2. मोटरचे ओव्हरलोड आणि अंडर व्होल्टेज (Under voltage) पासून प्रोटेक्शन करणे.
3. मोटरला सेफली स्टार्ट करणे (Safely Start the Motor).

2.1 थ्री फेज इंडक्शन मोटर साठी स्टार्टर ची नेसिसीटी (Necessity of starters for three phase induction motors):

स्टार्टरची डेफिनिशन (Starter Definition): थ्री-फेज इंडक्शन मोटर स्टार्टर हे एक इक्विपमेंट आहे जे मोटरला इलेक्ट्रिक एनर्जी फ्लो कंट्रोल करण्यासाठी वापरले जाते, ज्यामुळे मोटरचा स्टार्टींग करंट कंट्रोल करून मोटर सुरळीत आणि सेफ(Safe) स्टार्ट केली जाते.

a) थ्री फेज इंडक्शन मोटरच्या रोटर सर्किटमध्ये इनड्युस ई.एम.एफ.चे म्यॅग्निट्युड (Induced EMF Magnitude) इंडक्शन मोटरच्या स्लिपवर (Slip) डिपेंड असते. हे इनड्युस ई.एम.एफ. प्रभावीपणे रोटर करंटचे म्यॅग्निट्युड (Rotor Current Magnitude) ठरवते. रनिंग कंडिशन (Running Condition) मध्ये मोटरचा रोटर करंट खालील प्रमाणे दिला जातो.

$$I_{2r} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (s\,X_2)^2}}$$

b) पण सुरुवातीला, मोटरचा स्पीड झिरो (Motor Speed N = 0) असतो आणि स्लिप युनीटी (१) असते. त्यामुळे सुरुवातीला रोटर इंड्यूस ई.एम.एफ. चे म्यॅग्निट्युड खूप जास्त असते. रोटर कंडक्टर शॉर्ट सर्किट असल्याने, सुरुवातीला जास्त ई.एम.एफ. रोटरमधून खूप जास्त करंट फ्लो करते.

c) ही कंडीशन अगदी सेकेंडरी शॉर्ट सर्किट (Secondary Short Circuited) असल्येल्या ट्रान्सफॉर्मरसारखीच (Transformer) असते. असा ट्रान्सफॉर्मर जेव्हा रेटेड व्होल्टेज ला जोडला जातो तेव्हा तो शॉर्ट सर्किट केलेल्या सेकेंडरीमधून खूप जास्त करंट फ्लो करतो. सेकेंडरी करंट (Secondary Current) लार्ज असल्याने, प्रायमरी देखील सप्लाय मधून खूप जास्त करंट घेतो.

d) त्याचप्रमाणे थ्री फेज इंडक्शन मोटरमध्ये, जेव्हा रोटर करंट जास्त असतो, तेव्हा स्टेटर सप्लाय मधून खूप जास्त करंट घेतो. सुरुवातीला हा करंट टोटल लोड करंटच्या (Total Load Current) 5 ते 8 पट जास्त असू शकतो.

e) सुरुवातीला इतक्या मोठ्या प्रमाणात करंट फ्लो मुळे मोटरच्या वायंडिंग (Motor Winding) ला डॅमेज (Damage) होण्याची शक्यता असते. त्याचप्रमाणे अचानक करंट फ्लो लाईन व्होल्टेज कमी होते. त्यामुळे त्याच लाईनशी जोडलेल्या इतर इक्विपमेंट मध्ये व्होल्टेजमध्ये वाढ होऊ शकते ज्यामुळे त्यांच्या वर्किंग वर परिणाम होऊ शकतो. असे परिणाम टाळण्यासाठी, सुरुवातीला मोटरने घेतलेल्या करंटला लिमिट करणे आवश्यक आहे.

f) स्टार्टर हे एक असे इक्विपमेंट आहे जे मोटर स्टार्ट करताना कमी व्होल्टेज पुरवून हाय स्टार्टींग करंट (High Starting Current) कंट्रोल करण्यासाठी वापरले जाते. स्टार्टर केवळ स्टार्टींग करंट कंट्रोल करत नाही तर ओव्हरलोडिंग आणि कमी व्होल्टेज कंडीशनपासून इंडक्शन मोटरला प्रोटेक्शन देखील करतो. सिंगल फेजिंगपासून (Single Phasing) प्रोटेक्शन देखील स्टार्टरद्वारे केले जाते.

2.2 स्टार्टर्सचे टाइप: प्रायमरी रेझिस्टन्स स्टार्टर, डीओएल, ऑटो ट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर, स्टार डेल्टा स्टार्टर, रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टर: कन्स्ट्रक्शन डिटेल्स अॅन्ड वर्किंग. (Types of Starters: Primary resistance starter, DOL, auto transformer starter, star delta starter, rotor resistance starter: constructional details and working).

2.2.1 प्रायमरी रेझिस्टन्स स्टार्टर (Primary Resistance Starter):

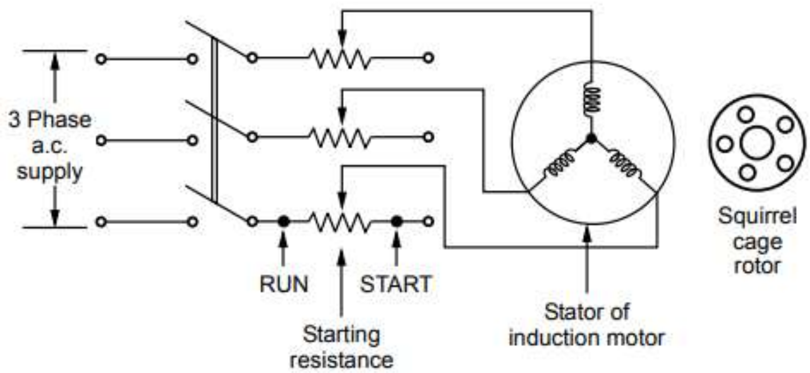


Fig. 2.1: प्रायमरी रेझिस्टन्स स्टार्टर (Primary Resistance Starter)

Fig. 2.1: प्रायमरी रेझिस्टन्स स्टार्टर (Primary Resistance Starter)

a) इंडक्शन मोटरच्या स्टेटरला कमी व्होल्टेज देण्यासाठी , स्टेटर वाइंडिंगच्या (Stator Winding) प्रत्येक फेज मध्ये तीन रेझिस्टन्स (Three Resistances) सिरीज मध्ये जोडले जातात. सुरुवातीला सर्किटमध्ये रेझिस्टन्स व्हॅल्यू जास्त ठेवली जाते. या रेझिस्टन्समुळे व्होल्टेज ड्रॉप (Voltage Drop) तयार होतो. त्यामुळे स्टेटरला कमी व्होल्टेज दिले जाते. ज्यामुळे हाय स्टार्टिंग करंट कमी होतो. स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टरची स्कीमॅटिक डायग्राम Fig. 2.1 मध्ये दाखवली आहे.

b) जेव्हा मोटर स्टार्ट होते, तेव्हा स्टेटर सर्किटमधून रेझिस्टन्स ची व्हॅल्यू स्लोली कमी केली जाते. जेव्हा स्टेटर सर्किटमधून म्हणजेच रिओस्टॅट्समधून (Rheostate) रेझिस्टन्स पूर्णपणे काढून टाकले जातात तेव्हा स्टेटरला रेटेड व्होल्टेज ॲप्लाय (Apply) केले जाते आणि मोटर नॉर्मल स्पीड वर चालते.

c) ऑपरेशनल परफॉर्मन्स (स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टरच्या स्टार्टिंग टॉर्क (Tst) आणि फुल लोड टॉर्क (T_{FL}) मधील रिलेशन):

जसे, $P_2 = T \times Ws$

T हा प्रोड्यूसड टॉर्क आहे आणि P_2 हा Ns साठी रोटर इनपुट आहे.

$$\therefore \quad T \propto P_2$$

But $$P_2 = \frac{P_c}{s} \quad \text{where} \quad P_c = \text{Total copper loss}$$

$$= \frac{3 I_{2r}^2 R_2}{s}$$

$$\therefore \quad T \propto \frac{I_{2r}^2}{s}$$

परंतु रोटर करंट I_{2r} आणि स्टेटर करंट ट्रान्सफॉर्मर ॲक्शन एकमेकांशी रिलेटेड आहेत.

$$\therefore \quad T \propto \frac{I_1^2}{s} \quad \text{where } I_1 = \text{Stator current}$$

$$\text{At start,} \quad s = 1, \quad T = T_{st} \quad \text{and} \quad I_1 = I_{st}$$

$$\therefore \quad T_{st} \propto I_{st}^2$$

d) जेव्हा स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टर (Stator Resistance Starter) वापरला जातो, तेव्हा स्टेटर व्होल्टेज ज्या पॅरामिटर ने कमी होतो तो X < 1 असतो. सुरुवातीचा प्रवाह या पॅरामिटर X च्या प्रपोशनल असतो. म्हणून जर Isc हा सुरुवातीला पूर्ण रेटेड व्होल्टेज कंडीशन मध्ये काढलेला नॉर्मल करंट असेल तर,

$$I_{st} = x\, I_{sc}$$

$$\therefore \quad T_{st} \propto (x\, I_{sc})^2$$

$$\text{But} \quad T_{F.L.} \propto \frac{(I_{FL})^2}{s_f} \quad \text{where } s_f = \text{Full load slip}$$

Taking ratio

$$\frac{T_{st}}{T_{F.L.}} = x^2 \left(\frac{I_{sc}}{I_{FL}} \right)^2 s_f$$

X < 1 म्हणून, स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टरमुळे सुरुवातीचा टॉर्क X^2 कमी करतो हे दिसून येते.

स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टरचे ऍडव्हान्टेज (Advantages):

a) स्टार्टरचे कन्स्ट्रक्शन सोपे आणि स्वस्त आहे (Simple & Economical Construction).

b) हे स्टार्टर स्टार आणि डेल्टा कनेक्टेड (Delta Connected) स्टेटर साठी वापरले जाऊ शकते.

स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टरचे डीस-ऍडव्हान्टेज (Disadvantages):

a) स्टेटर रेझिस्टन्सच्या वापरामुळे मोठ्या प्रमाणात पॉवर लॉस (Power Loss) होतो.

b) स्टेटरला कमी व्होल्टेज दिल्यामुळे मोटरचा स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) कमी होतो.

स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टरचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) **हाय इनर्शिया लोड (High Inertia Load):** स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टर्स हाय इनर्शिया लोड असलेल्या ॲप्लिकेशन साठी योग्य आहेत, जिथे यंत्रसामग्रीवर जास्त स्ट्रेस टाळण्यासाठी स्मूथ स्टार्टींग हवी असते.

b) **सेन्सिटिव्हलोड (Sensitive Load):** पंप (Pump), कॉम्प्रेसर (Compressor) आणि फॅन (Fan) यांसारख्या सेन्सिटिव्ह लोड ला कंट्रोल ॲक्सेलेरेशन (Acceleration) आवश्यक असलेल्या ॲप्लिकेशन साठी वापर केला जातो.

2.2.2 डायरेक्ट ऑन लाईन (DOL) स्टार्टर:

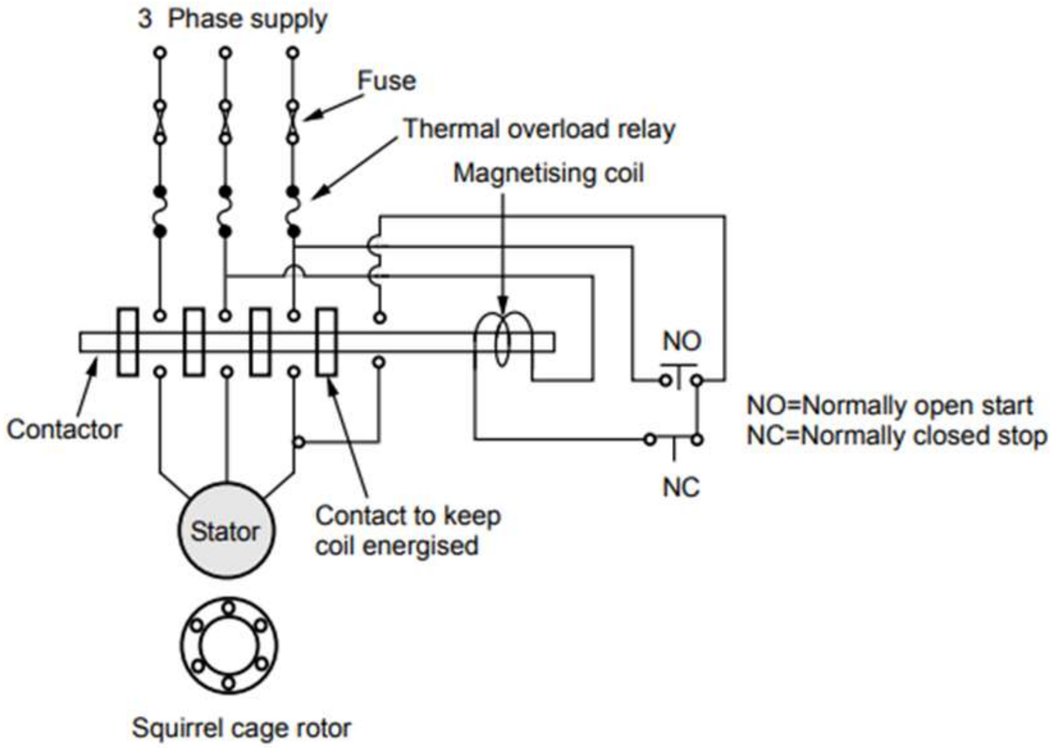


Fig. 2.2: डायरेक्ट ऑनलाइन (DOL) स्टार्टर

Fig. 2.2: डायरेक्ट ऑनलाइन (DOL) स्टार्टर

a) 5 एचपी (5 HP) पेक्षा कमी रेटिंग असलेल्या लो कॅपॅसिटी मोटर्समध्ये, स्टार्टींग करंट फारसा जास्त नसतो आणि अशा मोटर्स कोणत्याही स्टार्टरशिवाय स्टार्टींग करंटचा कॅरी करू शकतात. त्यामुळे

स्टार्टींग करंट कंट्रोल करण्यासाठी दिलेले व्होल्टेज कमी करण्याची आवश्यकता नसते. अशा मोटर्स एका टाइप च्या स्टार्टरचा वापर करतात ज्यामुळे व्होल्टेज कमी न करता स्टेटरला थेट सप्लाय लाईन्सशी जोडण्यासाठी केला जातो. म्हणूनच अशा स्टार्टरला डायरेक्ट ऑन लाईन स्टार्टर (Direct ON Line Starter) म्हणून ओळखले जाते.

b) जरी हे स्टार्टर अप्लाय केलेले व्होल्टेज कमी करत नसले तरी, ते वापरले जाते कारण ते ओव्हरलोडिंग (Overloading), अंडरव्होल्टेज (Undervoltage), सिंगल फेजिंग (Single Phasing) इत्यादी विविध गंभीर अबनॉर्मल कंडीशनपासून मोटरचे प्रोटेक्शन करते.

c) आकृतीमध्ये डायरेक्ट ऑन लाईन स्टार्टरमधील विविध कॉम्पोनन्ट्स चे कन्स्ट्रक्शन दाखवले आहे.यात फ्यूज (Fuse), थर्मल ओव्हरलोड रिले (Thermal Overload Relay), कॉन्टॅक्ट (Contact), कॉन्टॅक्टर (Contactor), मॅग्नेटायझिंग कॉइल (Magnetising Coil), सामान्यतः नॉर्मली ओपन (NO) आणि नॉर्मली क्लोज (NC) कॉन्टॅक्ट असतात. NO कॉन्टॅक्ट सामान्यतः ओपन असतो आणि NC सामान्यतः बंद असतो. कॉन्स्ट्रक्शन कॉम्पोनन्ट्स चे फंक्शन (Function) खालीलप्रमाणे आहेत.

1. **कॉन्टॅक्टर (Contactor):** एक इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक स्विच (Electromagnetic Switch) जो ऍक्टिव्हेट (Activate) झाल्यावर मोटरला पॉवर सप्लायशी कॉन्टॅक्ट करण्यासाठी क्लोज होतो.
2. **सर्किट ब्रेकर (MCCB):** जास्त करंट वाढल्यावर ट्रिपिंग (Tripping) आणि ओव्हरकरंट (Overcurrent) प्रोटेक्शन करते.
3. **ओव्हरलोड रिले (Overload Relay):** कॉन्टॅक्टर ट्रिप (Trip) करून ओव्हरलोडमुळे मोटरला ओवर हिटिंग (Over Heating) होण्यापासून प्रोटेक्शन करते.
4. **स्टार्ट आणि स्टॉप बटण (Start & StopButton):** कॉन्टॅक्टर कॉइलचे ऍक्टिव्हेशन (Activation) आणि डी-ऍक्टिव्हेशन (De-activation) कंट्रोल करते.
5. **ऑक्झीलरी कॉन्टॅक्ट (Auxiliary Contact):** स्टार्ट बटण (Start Button) ओपन केल्यानंतरही कॉन्टॅक्ट क्लोज स्थितीत ठेवण्यासाठी आणि ओव्हरलोडपासून प्रोटेक्शन करण्यासाठी वापरले जाते.

d) सुरुवातीला, नॉर्मली ओपन (NO) कॉन्टॅक्ट ला सेकंदासाठी प्रेस केले जाते ज्यामुळे कॉइल ऍक्टिव्हेट होते आणि कॉन्टॅक्टरला होल्ड करते. त्यामुळे स्टेटरला थेट सप्लाय मिळतो. जोपर्यंत सप्लाय चालू आहे तोपर्यंत कॉइलला सप्लाय मिळतो आणि कॉन्टॅक्टर ऑन स्थितीत ठेवला जातो.

e) जेव्हा नॉर्मली क्लोज (NC) प्रेस केले जाते तेव्हा कॉइल सर्किट (Coil Circuit) ओपन होते ज्यामुळे कॉइल डी-एनर्जाइज (De-energise) होते आणि मोटरचा सप्लाय बंद होतो.

f) ओव्हरलोड असलेल्या स्थितीत, मोटर चा करंट वाढतो ज्यामुळे जास्त हिट निर्माण होते, ज्यामुळे टेम्परेचर (Temperature) लिमिट पेक्षा जास्त वाढते. हाय- टेम्परेचरमुळे थर्मल रिले (Thermal Relay) ओपन होतात, ज्यामुळे मोटर ओव्हरलोड परिस्थितीपासून प्रोटेक्ट होते.

डीओएल स्टार्टरचे ऍडव्हांटेजेस (Advantages):

a) हे स्टार्टर क्विक स्टार्टिंग आहे (Quick Starting Time).

b) स्टार डेल्टा आणि सॉफ्ट स्टार्टरच्या तुलनेत डी. ओ. एल स्टार्टरची कॉस्ट कमी असते.

c) ते सहजपणे वापरात आणता येते (Easy to Use).

d) इतर स्टार्टर्सच्या तुलनेत ह्या स्टार्टर चे ट्रबलशूटिंग (Troubleshooting) सोपे असते.

e) ह्या स्टार्टर मुळे स्टार्टिंग टॉर्क (High Starting Torque) जास्त मिळतो.

f) ह्या स्टार्टर चा आकार लहान असतो (Compact Size).

डीओएल स्टार्टरचे डीस-ऍडव्हांटेजेस (Disadvantages):

a) जास्त स्टार्टिंग करंटमुळे, व्होल्टेज कमी होऊन पावर सप्लाय फ्लक्चुएशन (Supply Fluctuations) होते.

b) जास्त स्टार्टिंग टॉर्कमुळे मोटरच्या कॉम्पोनन्ट्स चे नुकसान होऊ शकते.

c) फक्त 3 एचपी (3-HP) पर्यंतच्या मोटर रेंजसाठी योग्य आहे.

डीओएल स्टार्टरचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) कमी एचपी रेटिंग असलेल्या मोटर्समध्ये .

b) कॉम्प्रेसर (Compressor), कन्व्हेयर (Conveyor), पंप (Pumps), फॅन (Fan).

2.2.3 ऑटो-ट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर (Auto-transformer Starter):

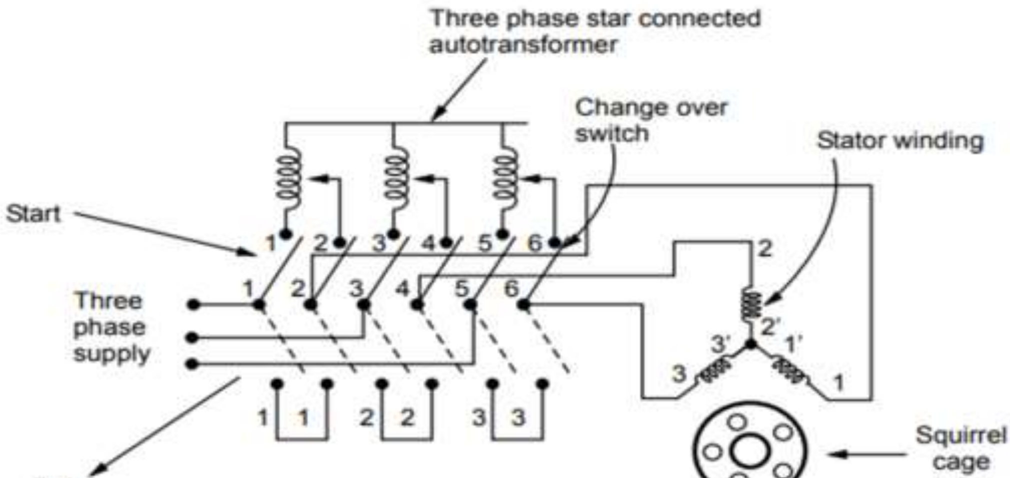


Fig. 2.3:ऑटो-ट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर (Auto-transformer Starter)

Fig. 2.3: ऑटो-ट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर (Auto-transformer Starter)

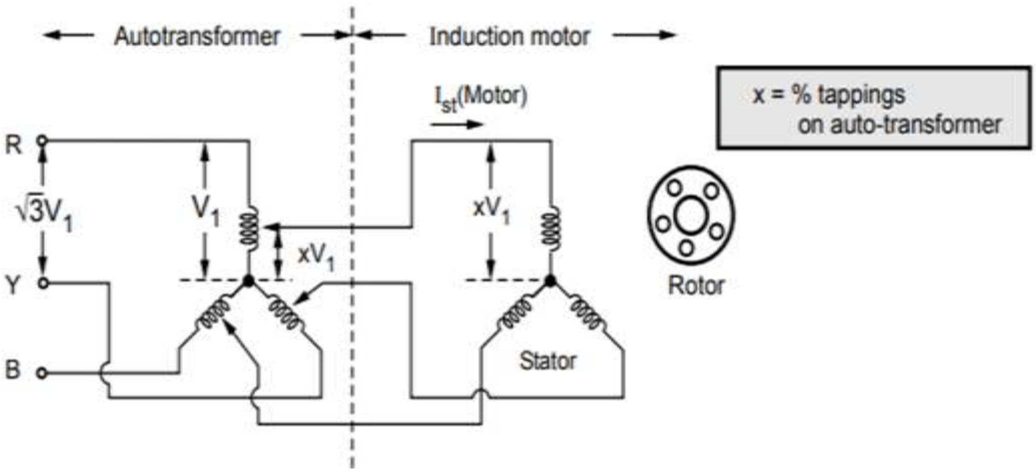
स्टेटरला अप्लाय केलेले व्होल्टेज कमी करण्यासाठी थ्री फेज स्टार कनेक्टेड ऑटोट्रान्सफॉर्मर वापरता येतो. अशा स्टार्टरला ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर म्हणतात. ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टरची स्किम्याटिक डायग्राम **Fig. 2.3** मध्ये दाखविली आहे.

a) यामध्ये चेंज ओव्हर स्विच (Change-over Switch), सिंगल वाइंडिंग (Single Winding), टॅप पॉइंट्स (Tap-Points), व्होल्टेज ट्यापिंग्स (Voltage Tappings) आणि एन्क्लोजर (Enclosure) यांचा समावेश आहे. कंस्ट्रक्शन पार्टसची (Construction Parts) फंक्शन खालीलप्रमाणे आहेत.

1. **सिंगल वाइंडिंग (Single Winding):** ऑटोट्रान्सफॉर्मरचे प्रमुख वैशिष्ट्य म्हणजे त्याचे सिंगल वाइंडिंग, जी प्रायमरी आणि सेकंडरी वायंडिंग दोन्ही म्हणून काम करते.
2. **टॅप पॉइंट्स (Tap Points):** वाइंडिंगमध्ये इंटरमीडिएट टॅप पॉइंट्स (Intermediate Tap-Points) असतात, ज्यामुळे अनेक व्होल्टेज सेटिंग्ज करता येतात.
3. **व्होल्टेज टॅप्स (Voltage Taps):** हे टॅप पॉइंट्स सामान्यतः सुरुवातीच्या वेगवेगळ्या व्होल्टेज लेवल साठी डिझाइन केलेले असतात, जसे की रेटेड व्होल्टेजच्या 50%, 65% आणि 80%.
4. **एन्क्लोजर (Enclosure):** ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर योग्य एन्क्लोजरमध्ये ठेवला जातो, बहुतेकदा एअर-कूल्ड (Air Cooled) किंवा ऑइल-कूल्ड (Oil Cooled) असतो.

b) जेव्हा स्विच स्टार्ट पोझिशनमध्ये असेल, तेव्हा स्टेटर वाइंडिंगला सप्लाय दिला जातो कारण तेव्हा कमी व्होल्टेज असते हे ऑटोट्रान्सफॉर्मरसह दिलेल्या टॅपिंगद्वारे कंट्रोल केले जाऊ शकते.

c) ऑटोट्रान्सफॉर्मरसाठी वापरल्या जाणाऱ्या फ्रॅक्शनल पर्सेंटेज टॅपिंग X द्वारे दिलेल्या व्होल्टेजमध्ये होणारा ड्रॉप (Drop) खालील आकृतीमध्ये दाखवला आहे.



d) जेव्हा मोटर नॉर्मल स्पीड च्या ८० % स्पीड वरती फिरते, तेव्हा चेंजओव्हर स्विच रन पोझिशनमध्ये (Run Position) टाकला जातो. यामुळे, स्टेटर वायंडिंग वर रेटेड व्होल्टेज दिले जाते. मोटर नॉर्मल स्पीडने फिरू लागते. रिले (Relay) वापरून स्विच बदलणे ऑटोमॅटिकली (Automatically) केले जाते.

e) ऑपरेशनल परफॉर्मन्स (ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टरचा स्टार्टिंग टॉर्क (Tst) आणि फुल लोड टॉर्क (T_{FL}) मधील रिलेशन :स्टेटर वर लो व्होल्टेज अॅप्लाय करण्यासाठी ऑटोट्रान्सफॉर्मरसाठी वापरल्या जाणाऱ्या फ्रॅक्शनल पर्सेंटेज टॅपिंग्ज X मानूया.

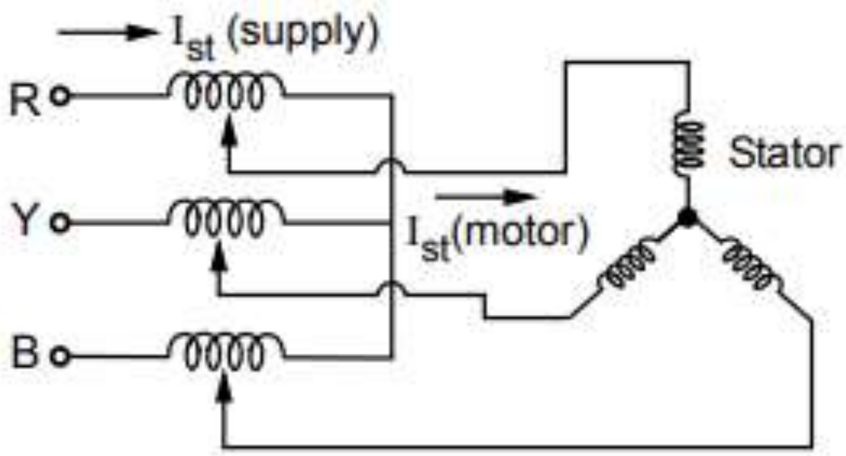
जर,

Isc = रेटेड व्होल्टेजवर फ्लो होणारा मोटर करंट

Ist = स्टार्टरसह फ्लो होणारा मोटर करंट,

Ist = x Isc ... मोटर साईडचा करंट

परंतु खालील आकृतीत दाखवल्याप्रमाणे, सप्लाय मधून घेतलेला स्टार्टींग करंट आणि ऑटोट्रान्सफॉर्मरमुळे फ्लो होणारा मोटर स्टार्टींग करंट (मोटर) यांच्यात एक निश्चित रिलेशन आहे.



$$\text{Autotransformer ratio } x = \frac{I_{st}(\text{supply})}{I_{st}(\text{motor})}$$

$$\therefore \quad I_{st}\,(\text{supply}) = x\, I_{st}\,(\text{motor})$$

Substitute I_{st} (motor) from equation

$$\therefore \quad I_{st}\,(\text{supply}) = x \cdot x\, I_{sc} = x^2\, I_{sc}$$

$$\text{Now} \quad T_{st} \propto I_{st}^2\,(\text{motor}) \propto x^2\, I_{sc}^2$$

$$\text{and} \quad T_{F.L.} \propto \frac{(I_{F.L.})^2}{s_f}$$

$$\therefore \quad \frac{T_{st}}{T_{F.L.}} = x^2 \left[\frac{I_{sc}}{I_{F.L.}}\right]^2 \times s_f$$

ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टरचे ऍडव्हांटेजेस (Advantages):

a) **ऍडजस्टेबल स्टार्टिंग टॉर्क (Adjustable Starting Torque):** ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर स्टार्ट करताना वेगवेगळ्या लेवल चे टॉर्क ॲप्लाय करता ज्यामुळे सेन्सिटिव्ह लोड किंवा मशीन साठी हे स्टार्टर उपयोगी ठरते.

b) **कंट्रोल स्टार्टिंग करंट (Control Starting Current):** ते स्टार्टींग दरम्यान मोटरच्या इनरश करंटला लिमिट करू शकतात, ज्यामुळे मोटर आणि पॉवर सिस्टमवरील स्ट्रेस कमी होतो.

c) **मोटर प्रोटेक्शन (Motor Protection):** सॉलिड-स्टेट ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर्समध्ये (Solid-State Starters) कन्वेन्शनल (Conventional) मेथडपेक्षा अधिक डेवलप मोटर प्रोटेक्शन सर्किट असते, ज्यामुळे चांगल प्रोटेक्शन मिळते.

d) **हाय एफिशियंसी (High Efficiency):** ऑटोट्रान्सफॉर्मर्स सामान्यतः कन्वेन्शनल टू-वाइंडिंग ट्रान्सफॉर्मर्सपेक्षा (Two Winding Transformer) सिंगल-वाइंडिंग डिझाइनमुळे आणि कमी लॉस मुळे अधिक एफिशियंट असतात.

e) **कॉम्पॅक्ट साइज (Compact Size):** ऑटोट्रान्सफॉर्मर्स सामान्यतः सेम पॉवर रेटिंगसाठी ड्युअल-वाइंडिंग ट्रान्सफॉर्मर्सपेक्षा (Dual Winding Transformer) लहान आणि हलके असतात, जागा कमी घेतात आणि वजन कमी असते.

f) **लो कॉस्ट (Low Cost):** सिंगल-वाइंडिंग डिझाइन आणि कमी कॉपर वापर (Low Copper Requirement) यामुळे ऑटोट्रान्सफॉर्मर्ससाठी प्रॉडक्शन (Production) कॉस्ट कमी होतो.

g) **व्होल्टेज रेग्युलेशन (Voltage Regulation):** ऑटोट्रान्सफॉर्मर्समध्ये सामान्यतः 2-वाइंडिंग ट्रान्सफॉर्मर्सपेक्षा चांगले व्होल्टेज रेग्युलेशन असते, ज्यामुळे अधिक कॉन्स्टंट व्होल्टेज आउटपुट (Stable Voltage Output) मिळते.

h) **लो एक्सायटेशन करंट (Low Excitation Current):** ऑटोट्रान्सफॉर्मर्सना दोन-वाइंडिंग ट्रान्सफॉर्मर्सच्या तुलनेत कमी एक्सायटेशन करंट ची आवश्यक असते.

i) **लो कॉपर रिक्वायरमेंट (Low Copper Requirement)**: ऑटोट्रान्सफॉर्मर्सच्या सिंगल-वाइंडिंग डिझाइनमध्ये कॉपर ची कमी रिक्वायरमेंट असते, ज्यामुळे खर्चात बचत होते आणि मटेरियलचा वापर कमी होतो.

ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टरचे डिस-ॲडव्हांटेजेस (Disadvantages):

a) हाय शॉर्ट-सर्किट करंट (More Short-Circuit Current) फ्लो होण्याची शक्यता असते.

b) प्रायमरी आणि सेकंडरी वायंडिंग एकच असते (Same Primary & Secondary).

c) फक्त मिडीयम ते लो व्होल्टेज साठी उपयुक्त

ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टरचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) इंडक्शन आणि सिंक्रोनस मोटर्स (Induction & Synchronous Motor) सुरू करण्यासाठी.

b) लॅबोरेटरी (Laboratory) मध्ये वापरले जाते.

2.2.4 स्टार-डेल्टा स्टार्टर (Star-Delta Starter):

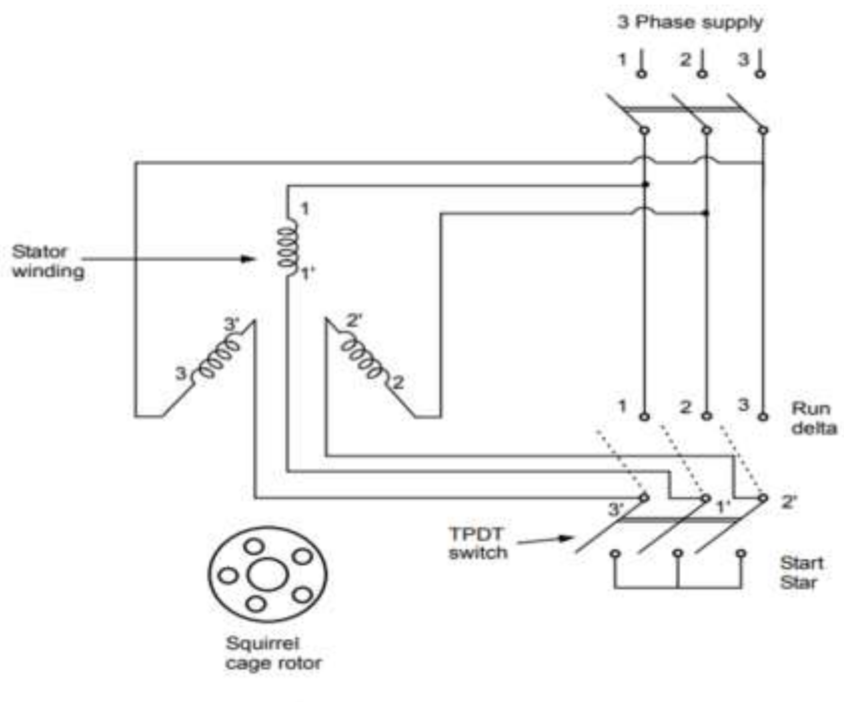


Fig 2.4 स्टार-डेल्टा स्टार्टर (Star-Delta Starter)

Fig 2.4 स्टार-डेल्टा स्टार्टर (Star-Delta Starter)

a) स्टार-डेल्टा स्टार्टरची कॉन्स्ट्रक्शनल अरेंजमेंट वरील आकृतीमध्ये दाखवली आहे. स्टार डेल्टा स्टार्टर मॅन्युअल (Manual), ऑटोमॅटिक (Automatic) आणि सेमी-ऑटोमॅटिक (Semi-automatic) व्हर्जन मध्ये उपलब्ध आहे. त्यात मेन कॉन्टॅक्टर (Main Contactor), स्टार कॉन्टॅक्टर (Star Contactor), डेल्टा कॉन्टॅक्टर (Delta Contactor), टाइमर (Timer), थर्मल ओव्हरलोड रिले (Thermal Overload Relay) आणि इंटरलॉकिंग स्विच (Interlocking Switch) ज्याला टीपीडीटी स्विच (TPDT-Tripple Pole Double Throw Switch) म्हणतात

b) कॉन्स्ट्रक्शन कॉम्पोनन्ट्सची फंक्शन खालीलप्रमाणे आहेत.

1. **मेन कॉन्टॅक्टर (Main Contactor):** हा प्रायमरी कॉन्टॅक्टर आहे जो मोटर वायंडिंगला सप्लाय सोबत जोडतो.
2. **स्टार कॉन्टॅक्टर (Star Contactor):** हा कॉन्टॅक्टर स्टार्टींग दरम्यान स्टार कॉन्फिगरेशनमध्ये (Star Configuration) मोटर वायंडिंगला कनेक्ट असतो .
3. **डेल्टा कॉन्टॅक्टर (Delta Contactor):** मोटरने प्री-डीफाइन स्पीड (Pre-defined Speed) अचिव्ह केल्यावर हा कॉन्टॅक्टर मोटर वायंडिंगला डेल्टा कॉन्फिगरेशन मध्ये जोडतो.
4. **टाइमर (Timer):** टाइमर स्टार आणि डेल्टा कनेक्शनमधील डीले (Dealy) टाईम कंट्रोल करतो.
5. **थर्मल ओव्हरलोड रिले (Thermal Overload Relay):** हा रिले मोटरला ओवर हिट होण्यापासून वाचवतो.
6. **इंटरलॉक स्विचेस (Interlock Switches):** हे स्विचेस खात्री करतात की स्टार कॉन्टेक्टर चालू असताना डेल्टा कॉन्टेक्टर चालू होऊ शकत नाही.

c) हे सर्वात स्वस्त स्टार्टर आहे आणि म्हणूनच इंडक्शन मोटर्ससाठी सामान्यतः वापरले जाते यामध्ये ट्रिपल पोल डबल थ्रो (TPDT) स्विच असतो. स्विच सुरुवातीला स्टारमध्ये स्टेटर वाइंडिंगला जोडतो. त्यामुळे प्रत्येक फेजच व्होल्टेज १ /√३ ने कमी होतो. या कमी झालेल्या व्होल्टेजमुळे स्टार्टींग करंट लिमिट मध्ये असतो.

d) स्विच चे ऑपरेशन रिले वापरून ऑटोमॅटिक (Automatic) असू शकते जे सुनिश्चित करते की मोटर रन पोझिशनमध्ये स्विचसह सुरू होणार नाही.

e) जेव्हा स्विच दुसऱ्या बाजूला घेतला जातो, तेव्हा वाइंडिंग डेल्टामध्ये, सप्लाय ला जोडली जाते. त्यामुळे त्याला सामान्य: रेटेड व्होल्टेज मिळते. जेव्हा मोटर पुरेसा स्पीड मिळवते तेव्हा वाइंडिंग डेल्टामध्ये जोडले जातात.

f) स्टार्टिंग टॉर्क (Tst) टू फुल लोड टॉर्क (T_{FL}) यांचे रेशो.

समजा,

Isc = रेटेड व्होल्टेजसह डेल्टा कनेक्शनवर स्टार्टिंग फेज करंट.

I_{FL} = डेल्टा कनेक्शनवर फुल लोड फेज करंट.

$$\frac{T_{st}}{T_{F.L.}} = x^2 \left[\frac{I_{sc}}{I_{F.L.}}\right]^2 s_f$$

Now the factor x in this type of starter is $1/\sqrt{3}$.

$$\therefore \quad \boxed{\frac{T_{st}}{T_{F.L.}} = \frac{1}{3}\left(\frac{I_{sc}}{I_{F.L.}}\right)^2 s_f}$$

स्टार-डेल्टा स्टार्टरचे ऍडव्हांटेजेस (Advantages):

a) स्टार्टिंग करंट आणि टॉर्क ३३% पर्यंत कमी होतो

b) लाईट लोड असलेल्या परिस्थितीतही चांगले काम करते

c) हिट निर्माण होत नाही (No Heat Dissipation).

d) कमी मेकॅनिकल स्ट्रेस (Low Mechanical Stresses).

e) ऑटोमॅटिक चेंजओव्हर कार्यपद्धतीमुळे मॅन्युअल काम कमी होते.

स्टार-डेल्टा स्टार्टरचे डीस-ऍडव्हांटेजेस (Disadvantages):

a) लोड असताना स्टार्टींग करताना ट्रान्समिशन स्ट्रेस (Transmission Stress) येऊ शकतो.

b) डीओएल स्टार्टरच्या तुलनेत स्टार डेल्टा स्टार्टर ची सुरू होण्याची टाईम जास्त असते.

c) सॉफ्ट स्टॉप शक्य नाही.

d) डीओएल स्टार्टरच्या तुलनेत जास्त कॉम्पोनन्ट्स असतात.

e) डीओएल स्टार्टरच्या तुलनेत वायरिंग कॉम्प्लिकेटेड असते.

f) स्टार्टिंग टॉर्क कमी होतो परंतु स्टार्टींग टॉर्क ऍडजस्ट करता येत नाही.

g) कॉस्ट जास्त आहे (High Cost).

स्टार-डेल्टा स्टार्टरचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) लो टू मिडीयम व्होल्टेज आणि लो टॉर्क असलेल्या स्क्विरल केज इंडक्शन मोटर्ससाठी (Squirrel Cage Induction Motors), स्टार डेल्टा स्टार्टींग पद्धत सामान्यतः वापरली जाते (SCIM).

b) सेंट्रीफ्यूगल कॉम्प्रेसर (Centrifugal Compressor) देखील स्टार-डेल्टा स्टार्टर्स वापरतात.

c) जिथे स्टार्टींग करंट कमी असतो आणि लाईन करंट कमी असतो तिथे हे वापरण्यासाठी योग्य आहे.

d) कॉटन (Cotton), फूड आणि ड्रिंक्स (Food & Drinks), शुगर इंडस्ट्री (Sugar Industries),इत्यादी उद्योगांमध्ये याचा वापर केला जाऊ शकतो.

2.2.5 रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टर (Rotor Resistance Starter):

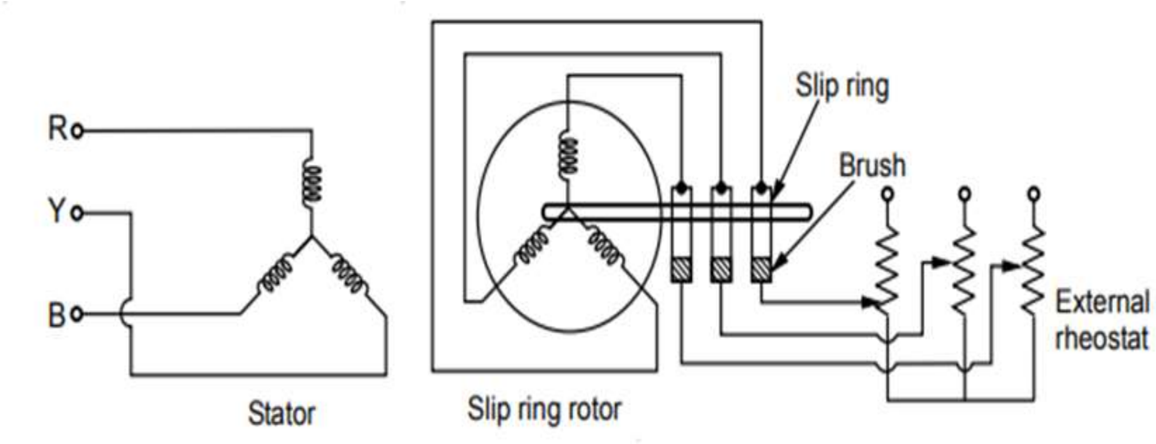


Fig. 2.5: रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टर (Rotor Resistance Starter)

Fig. 2.5: रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टर (Rotor Resistance Starter)

a) रोटर सर्किट मधील करंट कमी करण्यासाठी रोटर सर्किट मध्ये ३ स्टार कनेक्टेड रेसिस्टन्स (Three Star Connected Resistances) जोडलेले असतात.

b) रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टरचे कन्स्ट्रक्शनआकृतीमध्ये दाखवली आहे. त्यात वाऊंड रोटर इंडक्शन मोटर (Wound Rotor Induction Motor), स्लिप रिंग्ज (Sliprings), ब्रशेस (Brushes), एक्सटर्नल रेझिस्टर्स (External Resistances), स्टार्टर स्विच किंवा कंट्रोलर (Starter Switch & Controllers) असतात. रोटर रेसिस्टन्स स्टार्टरच्या विविध पार्टस चे फंक्शन खाली दिले आहे.

1. **वाउंड रोटर इंडक्शन मोटर (Wound Rotor Induction Motor):** या टाइप च्या मोटरमध्ये रोटर असतो ज्यामध्ये वायंडिंग असतात जे स्लिप रिंग्ज आणि ब्रशेसशी जोडलेले असतात.
2. **स्लिप रिंग्ज (Slip Rings):** रोटर वायंडिंगशी जोडलेले इन्सुलेटेड रिंग्ज (Insulated Rings), ज्यामुळे एक्स्टर्नल कनेक्शन (External Connections) शक्य होतात.
3. **ब्रशेस (Brushes):** कंडक्टर जे स्लिप रिंग्जशी कॉन्टॅक्ट करतात, एक्सटर्नल रेसिस्टन्स करंट फ्लो करतात.
4. **एक्सटर्नल रेसिस्टन्स (External Resistance):** रेसिस्टन्सचा सेट, सामान्यतः स्टार कॉन्फिगरेशन मध्ये व्यवस्था केलेला, रोटर वायंडिंगसह सिरीज मध्ये जोडलेला असतो.
5. **स्टार्टर स्विच किंवा कंट्रोलर (Starter Switch OR Controller)**: रोटर सर्किटमधील रेसिस्टन्सची लेवल कंट्रोल करणारे इक्विपमेंट, मोटरचा स्पीड वाढत असताना स्लोली बायपास करतो.

c) रोटर वायंडिंगच्या प्रत्येक स्टेज ला स्लिप रिंग आणि ब्रश असेंब्लीद्वारे एक्सटर्नल रेसिस्टन्स जोडलेला असतो. सुरुवातीला जास्तीत जास्त रेसिस्टन्स सर्किटमध्ये असतो. मोटर स्पीड अचिव्ह करत असताना, रेसिस्टन्स स्लोली कट-ऑफ केला जातो. ह्या स्टार्टरचे ऑपरेशन मॅन्युअल किंवा ऑटोमॅटिक असू शकते.

रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टरचे ऍडव्हांटेजेस (Advantages):

a) रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टरने हाय स्टार्टिंग टॉर्क (High Starting Torque) मिळवता येतो.
b) हे मोटरच्या पॉवर फॅक्टरमध्ये इम्प्रूव्हमेंट (Improving the Power Factor) करते.
c) लाईन करंट हार्मोनिक्स (Line Current Harmonics) क्रियेट होत नाही.
d) कमी स्टार्टिंग करंट (Starting Current is Low).
e) स्मूथ आणि वाईड स्पीड कंट्रोल शक्य आहे (Smooth & Wide Speed Control is Possible).

रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टरचे डीस-ऍडव्हान्टेज (Disadvantages):

a) रोटर सर्किटमध्ये जोडलेल्या एक्सटर्नल रेझिस्टन्समध्ये पॉवर लॉस झाल्यामुळे कमी इफिशन्सी असते.
b) हे स्टार्टर फक्त स्लिप रिंग इंडक्शन मोटर सुरू करण्यासाठी वापरले जाऊ शकते.
c) स्लिप रिंग आणि कार्बन ब्रशेस असल्याने त्याचा फ्रीक्वंट मेंटेनन्स (Frequent Maintenance) आवश्यक असते.

रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टरचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) **हेवी इंडस्ट्रियल लोड (Heavy Industrial Load)**: रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टर्स सामान्यतः हेवी उद्योगांमध्ये वापरले जातात जिथे हाय स्टार्टिंग टॉर्क आवश्यक असतो, जसे की मायनिंग (Mining), सिमेंट प्लांट (Cement Plants) आणि स्टील मिल्स (Steel Mills).

b) **क्रेन ड्राइव्ह (Crane Drive)**: हे स्टार्टर्स क्रेन साठी योग्य आहेत, जे हेवी वस्तू उचलण्यासाठी आवश्यक असलेले हाय टॉर्क प्रोड्यूस करतात.

c) **पंपिंग आणि कॉम्प्रेसर सिस्टम (Pumping and Compressor System):** ते अशा उपयोगांमध्ये वापरले जाऊ शकतात जिथे स्टार्ट करताना हाय टॉर्क आवश्यक असतो, जसे की पंप आणि कॉम्प्रेसर साठी.

d) **कन्व्हेयर सिस्टम्स (Conveyor System):** रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टर्स सामान्यतः कन्व्हेयर सिस्टम्समध्ये वापरले जातात, विशेषतः मायनिंग जिथे मोठ्या कन्व्हेयरना लक्षणीय स्टार्टिंग टॉर्कची आवश्यकता असते.

विविध स्टार्टर्स ची कॉम्पॅरिजन (Comparison between Different Starters):

Fig. 2.1 विविध स्टार्टर्स ची कॉम्पॅरिजन (Comparison between Different Starters)

पॅरामीटर	स्टेटर रेझिस्टन्स स्टार्टर	ऑटो-ट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर	स्टार-डेल्टा स्टार्टर	रोटर रेझिस्टन्स स्टार्टर	डायरेक्ट ऑन लाईन स्टार्टर
अप्लाइड व्होल्टेज (Applied Voltage)	कंट्रोल करता येते	कंट्रोल करता येते	57.73%	कंट्रोल करता येते	100%
इनिशिअल कॉस्ट (Initial Cost)	लो	हाय	सर्वात लो	हाय	लो
ऑपरेशन (Operation)	सोपे	कॉम्प्लिकेटेड	सोपे	कॉम्प्लिकेटेड	सोपे
युज (Applicable to)	स्क्विरल केज इंडक्शन मोटर	स्क्विरल केज इंडक्शन मोटर	स्क्विरल केज इंडक्शन मोटर	स्लिप रिंग इंडक्शन मोटर	स्लिप रिंग इंडक्शन मोटर
मेंटेनन्स (Maintenance)	लो	हाय	लो	हाय	लो
स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque)	लो	लो	मिडीयम	हाय	लो
मोटर कॅपसिटी (Motor Capacity)	लो	मिडीयम आणि हाय	मिडीयम	मिडीयम आणि हाय	लो
योग्य मोटर एचपी (Applicable Motor HP)	3 एचपी	3-5 एचपी	5 एचपी पेक्षा जास्त	5 एचपी पेक्षा जास्त	3 एचपी पर्यंत

2.3 सॉफ्ट स्टार्टर्स: कॉम्पोनन्ट डिटेल्स ॲन्ड वर्किंग (Soft starters: Component Details and Working):

a) सॉफ्ट स्टार्टर (Soft Starters) हा एक टाइप चा मोटर स्टार्टर आहे जो मोटर सुरू करताना व्होल्टेज लो करण्यासाठी व्होल्टेज रिडक्शन टेक्निक्सचा (Voltage Reduction Techniques) वापर करतो. सॉफ्ट स्टार्टर मोटर सुरू करताना व्होल्टेजमध्ये स्लोली वाढ करतो. यामुळे मोटर स्पीड सुरळीत आणि स्लोली वाढते. अचानक फुल व्होल्टेज सप्लाय दिल्यामुळे मुळे होणारे कोणताही मेकॅनिकल लॉस आणि मेकॅनिकल शॉक टाळता येतो.

b) मोटर थांबताना, सप्लाय व्होल्टेज स्लोली लो केले जाते जेणेकरून मोटरचा स्पीड कमी होईल. एकदा स्पीड झिरोवर पोहोचला की, मोटरचा इनपुट व्होल्टेज सप्लाय ऑफ केला जातो.

c) सॉफ्ट स्टार्टरमध्ये व्होल्टेजचे रेग्युलेशन(Voltage Regulation) करण्यासाठी वापरला जाणारा मेन पार्ट म्हणजे थायरिस्टर (SCR) सारखा सेमीकंडक्टर स्विच (Semiconductor Switch). थायरिस्टरच्या फायरिंग अँगलला (Firing Angle) ऍडजस्ट केल्याने त्यातून सप्लाय होणाऱ्या व्होल्टेजचे रेग्युलेशन होते. ओव्हरकरंट प्रोटेक्शन साठी वापरल्या जाणाऱ्या ओव्हरलोड (OLR) रिले सारखे इतर पार्ट देखील वापरले जातात.

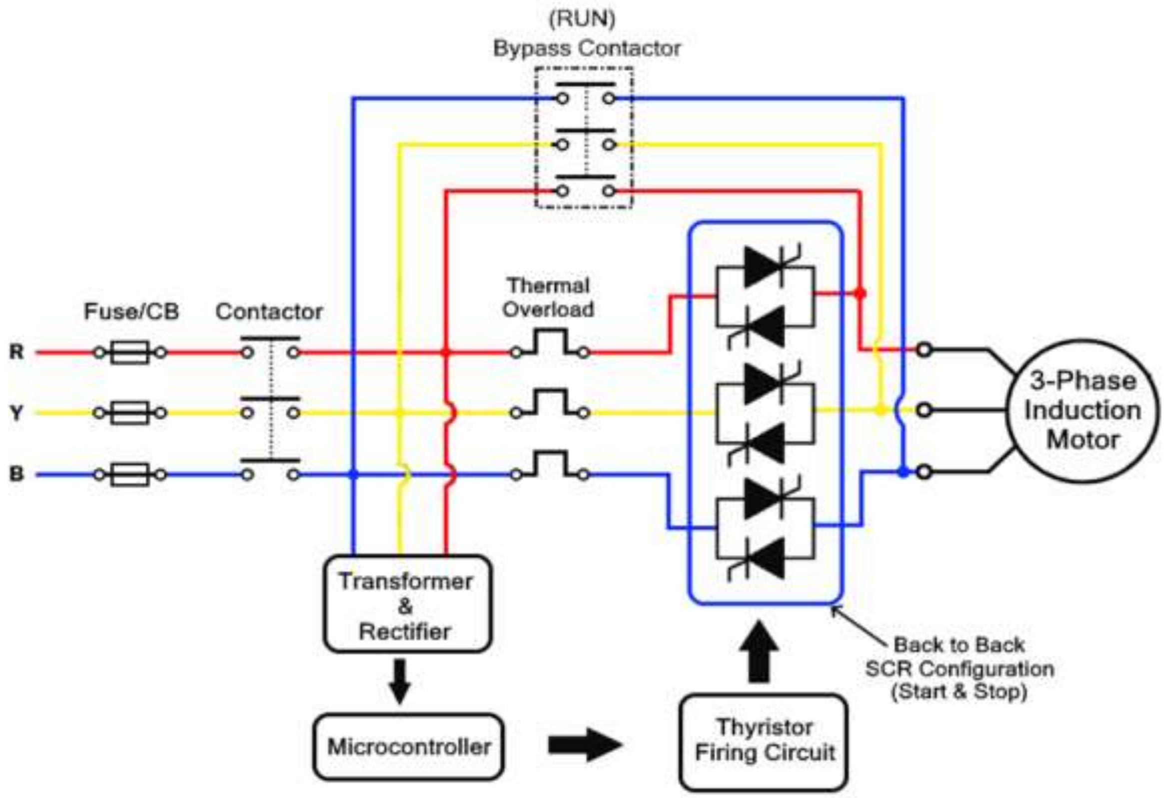


Fig. 2.6 सॉफ्ट स्टार्टर (Soft starter)

Fig. 2.6 सॉफ्ट स्टार्टर (Soft starter)

d) थ्री फेज इंडक्शन मोटर सॉफ्ट स्टार्टरमध्ये, मोटरच्या प्रत्येक फेजमध्ये दोन थायरिस्टर (SCR) अँटी-पॅरलल कॉन्फिगरेशनमध्ये (Anti-Parallel Configuration) जोडलेले असतात ज्यामुळे ते एकूण ६ एससीआर बनतात. हे एससीआर पीआयडी कंट्रोलर (PID Controller) किंवा मायक्रोकंट्रोलर (Microcontroller) लॉजिक सर्किटरी वापरून कंट्रोल केले जातात. आकृतीमध्ये दाखवल्याप्रमाणे रेक्टिफायर सर्किट (Rectifier Circuit) वापरून लॉजिक सर्किटरी मेन सप्लाय वापरून रन जाते.

e) वरील डायग्रॅम सॉफ्ट स्टार्टरची सर्किट डायग्राम दाखवते. त्यात फ्यूज किंवा सर्किट ब्रेकर (Fuse OR Circuit Breaker), कॉन्टॅक्टर (Contactor), थर्मल ओव्हरलोड रिले (Thermal Overload Relay), बायपास कॉन्टॅक्टर (Bypass Contactor), ट्रान्सफॉर्मर (Transformer), रेक्टिफायर (Rectifier), मायक्रो-कंट्रोलर (Microcontroller), थायरिस्टर फायरिंग सर्किट (SCR Firing Circuit) आणि अँटी-पॅरलल थायरिस्टर (Anti-Parallel Thyristers) असतात.

f) सॉफ्ट स्टार्टरच्या प्रमुख कॉम्पोनन्ट्स चे फंक्शन खालीलप्रमाणे आहे

1. **थायरिस्टर (SCRs):** हे मुख्य पॉवर स्विच आहेत जे मोटर व्होल्टेजवर कंट्रोल ठेवतात. थ्री-फेज मोटरमध्ये, प्रत्येक स्टेज साठी दोन थायरिस्टर सामान्यतः अँटी-पॅरलल कॉन्फिगरेशनमध्ये जोडलेले असतात.

2. **कंट्रोल सर्किट (Control Circuit):** हे सर्किट थायरिस्टर फायरिंगचे कंट्रोल करते, बहुतेकदा मायक्रोकंट्रोलर किंवा PID कंट्रोलर वापरते. यात करंट आणि व्होल्टेज मॉनिटरिंग आणि प्रोटेक्शन साठी सेन्सर्स (Voltage Monitoring & Protection Sensors) देखील आहेत.
3. **पॉवर सर्किट (Power Circuit):** यामध्ये थायरिस्टर, मोटर वायंडिंग आणि कंट्रोल सर्किट आहेत.
4. **बायपास स्विच (Bypass Switch):** जेव्हा मोटर फुल स्पीड अचिव्ह करते, तेव्हा थायरिस्टरला बायपास करून मोटरला थेट मेन सप्लायशी जोडण्यासाठी बायपास स्विच वापरला जातो.
5. **प्रोटेक्शन कॉम्पोनन्ट्स (Protection Components)**: यामध्ये प्रोटेक्शन साठी सर्किट ब्रेकर, फ्यूज, ओव्हरलोड रिले आणि मॅग्नेटिक कॉन्टॅक्टर्स (Magnetic Contactors) वापरले जातात.

सॉफ्ट स्टार्टरचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle of Soft Starter):

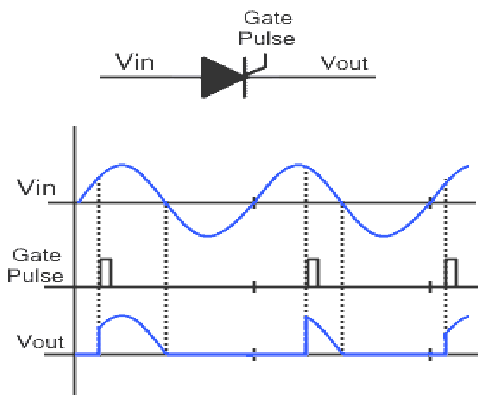


Fig 2.7(a): सॉफ्ट स्टार्टरचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle of Soft Starter)

a) सॉफ्ट स्टार्टरमध्ये व्होल्टेज कंट्रोल करण्यासाठी वापरला जाणारा मुख्य पार्ट म्हणजे थायरिस्टर. हा एक कंट्रोल रेक्टिफायर आहे जो फायरिंग पल्स नावाचा गेट पल्स (Gate Pulse) दिल्यावर फक्त एकाच डायरेक्शन ने करंटचे फ्लो सुरू होतो.

b) फायरिंग पल्सचा अँगल (Firing Pulse Angle) इनपुट व्होल्टेज सायकलचा किती पार्ट त्यातून जाऊ द्यायचा हे ठरवतो. अल्टरनेटिंग करंट मॅक्सिमम आणि मिनिमम पीक व्हॅल्यू (AC Maximum & Minimum Peak Value) दरम्यान फिरत असल्याने संपूर्ण 360° ची अल्टरनेटिंग करंट ची सायकल तयार होते, म्हणून आपण स्पेसिफिक कालावधीसाठी थायरिस्टर स्टार्ट करण्यासाठी आणि दिलेल्या व्होल्टेजवर कंट्रोल ठेवण्यासाठी फायरिंग पल्सच्या अँगलचा वापर करू शकतो.

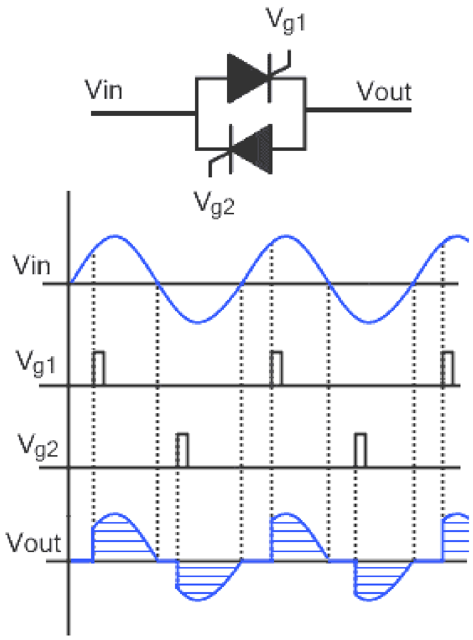


Fig 2.7(b): सॉफ्ट स्टार्टरचे कार्य (Working Principle of Soft Starter)

c) प्रत्येक स्टेज साठी असे दोन थायरिस्टर अँटी-पॅरलल कॉन्फिगरेशनमध्ये जोडलेले असतात. त्यामुळे ते दोन्ही डायरेक्शनचा करंट फ्लो कंट्रोल करू शकते. प्रत्येक हाफ सायकल मध्ये, फायरिंग अँगल खालील डायग्राम मध्ये दर्शविला आहे.

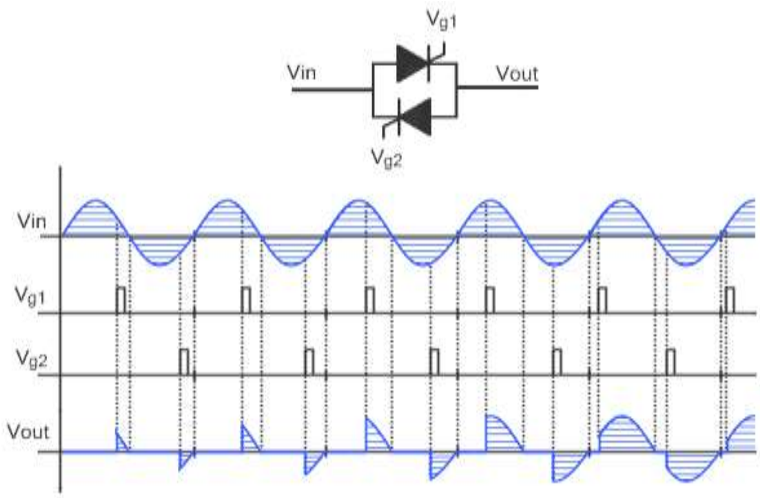


Fig 2.7(c): सॉफ्ट स्टार्टरचे कार्य (Working Principle of Soft Starter)

d) मोटर स्टार्ट आणि स्टॉप करण्यासाठी, व्होल्टेज कंट्रोल करण्यासाठी प्रत्येक थायरिस्टरची पेयर स्वतंत्र टप्प्यासाठी असलेल्या थायरिस्टर च्या तीन पेयर वापरल्या जातात. थायरिस्टरचा कंडक्शन टाईम लॉजिक सर्किटरीद्वारे कंट्रोल केलेल्या फायरिंग अँगलवर अवलंबून असतो.

e) लॉजिक सर्किटरीमध्ये (Proportional Intergal Controller-PID) कंट्रोलर किंवा पल्स जनरेट (Pulse Generate) करण्यासाठी प्रोग्राम केलेला एक साधा मायक्रोकंट्रोलर असतो. ऑप्टो-आयसोलेटर (Opto-Isolator) वापरून कंट्रोलरला सप्लाय मेनपासून वेगळे केले जाते आणि DC सोर्स पुरवण्यासाठी रेक्टिफायर

वापरला जातो. मायक्रोकंट्रोलरद्वारे प्रोड्यूस होणारे पल्स थायरिस्टर फायरिंग सर्किटला दिले जातात जे SCR ट्रिगर करण्यापूर्वी ॲम्प्लिफाय (Amplify) करते.

g) जेव्हा मोटर सुरू होते, तेव्हा कंट्रोलर प्रत्येक SCR साठी पल्स प्रोड्यूस करतो. झिरो क्रॉसिंग डिटेक्टर (ZCD-Zero Crossing Detector) वापरून शोधल्या जाणाऱ्या झिरो क्रॉसिंगच्या आधारे पल्स प्रोड्यूस होते. मिनिमम व्होल्टेज देण्यासाठी पहिला फायरिंग पल्स अँगल अंदाजे 180° च्या जवळ असतो.

h) प्रत्येक झीरो क्रॉसिंग नंतर स्लोली, फायरिंग पल्सचा अँगल कमी होऊ लागतो, ज्यामुळे थायरिस्टरचा कंडक्शन टाईम वाढतो. थायरिस्टर मधून फ्लो होणारा करंट आणि त्याचे व्होल्टेज वाढू लागते त्यामुळे मोटरचा स्पीड स्लोली वाढतो.

i) एकदा मोटरने फुल स्पीड प्राप्त केला कि (0° फायरिंग अँगलवर), नॉर्मल ऑपरेशनमध्ये बायपास कॉन्टॅक्टर वापरून थायरिस्टर पूर्णपणे बायपास केले जातात. SCR फायरिंग थांबवते म्हणून सॉफ्ट स्टार्टरची इफिशन्सी वाढते. मोटर थांबताना, SCR कंट्रोल घेते आणि सप्लाय व्होल्टेज कमी करण्यासाठी व्यवस्थित मेथडने फायरिंग सुरू करते.

सॉफ्ट स्टार्टरचे ॲडव्हांटेजेस (Advantages):

a) स्टार्टर कॉम्पॅक्ट आहे (Compact Size).

b) मायक्रोकंट्रोलर वापरून मल्टी डायमेन्शन ऑपरेशन शक्य आहे.

c) मॅन्युअल, ऑटोमॅटिक आणि सेमी-ऑटोमॅटिक मोडमध्ये उपलब्ध आहे.

d) ऑपरेशनसाठी कमी पॉवरची आवश्यकता असते (Low Operational Power).

e) एनर्जी कन्झर्वेशन शक्य आहे (Energy Conservation is Possible).

f) लो ऑपरेटिंग कॉस्ट.

सॉफ्ट स्टार्टरचे डीस-ॲडव्हांटेजेस (Disadvantages):

a) त्याची कॉस्ट जास्त आहे (High Initial Cost).

b) पॅनेलचे इंटर्नल टेम्परेचर खूप वाढते (Internal Components Issues).

सॉफ्ट स्टार्टरचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) सेंट्रीफ्यूगल पंप (Centrifugal Pump-Cleanliness, Irrigation & Oil Industries).

b) पंखे, एक्झॉस्टर्स आणि ब्लोअर (Fans, Exhausters and Blowers).

c) क्रशर आणि ग्राइंडर (Crusher & Grinder).

सॉफ्ट स्टार्टर आणि कन्वेन्शनल स्टार्टरमधील कॉम्पॅरिजन (Comparison between Soft Starter & Conventional Starter):

Table 2.2: सॉफ्ट स्टार्टर आणि कन्वेन्शनल स्टार्टरमधील कॉम्पॅरिजन (Comparison between Soft Starter & Conventional Starter)

पॅरामीटर	सॉफ्ट स्टार्टर	कन्वेन्शनल स्टार्टर
साईज (Size)	कॉम्पॅक्ट	लार्ज इन साईज
एनर्जी सेविंग (Energy Saving)	शक्य	शक्य नाही
कॉम्पोनंट्स (Components)	मायक्रोकंट्रोलर, एससीआर	कॉन्टॅक्टर, फ्यूज / सर्किट ब्रेकर
रनिंग कॉस्ट (Running Cost)	लो	हाय
परचेस कॉस्ट (Purchase Cost)	हाय	लो
इंटर्नल हीटिंग (Internal Heating)	हाय	लो
ऑपरेशन (Operation)	स्मूथ	लाऊड ऑपरेशन
ऑपरेटिंग प्रिन्सिपल (Operating Principle)	फायरिंग पल्स	इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक
अव्हेलेबिलिटी (Availability)	ऑटोमॅटिक आणि सेमी-ऑटोमॅटिक	कन्वेन्शनल
टाइप (Types)	ऑटोमॅटिक आणि सेमी-ऑटोमॅटिक	१. डीओएल २. स्टार-डेल्टा ३. ऑटो-ट्रान्सफॉर्मर ४. रोटर रेझिस्टन्स

2.4 स्पीड कंट्रोल मेथड: स्टेटर व्होल्टेज कंट्रोल, पोल चेंजिंग, रोटर परेसिस्टन्स, व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी ड्राइव्ह (VFD) {Speed control methods: stator voltage control, pole changing, rotor resistance, variable frequency drives (VFD)}.

परिचय (Introduction): वेगवेगळ्या लोड कंडीशन मॅच (Match) करण्यासाठी आणि एनर्जी एफिशियन्सी वाढवन्यासाठी थ्री-फेज इंडक्शन मोटर्ससाठी स्पीड कंट्रोल मेथड महत्त्वपूर्ण आहेत. या मेथड मोटरच्या स्पीड चे करेक्ट कंट्रोल करण्यास मदत करतात, ज्यामुळे विविध ॲप्लिकेशनमध्ये एफिशियंट ऑपरेशन शक्य होते.

स्पीड कंट्रोलचे प्रमुख फायदे खालीलप्रमाणे आहेत:

a) **एनर्जी इफिशन्सी (Energy Efficiency):** मोटारचा स्पीड लोड डिमांड सोबत मॅचकरून, स्पीड कंट्रोल मुळे एनर्जी चा वापर कमी होतो, ज्यामुळे ऑपरेशनल कॉस्ट कमी होतो.

b) **इम्प्रूव्हड परफॉर्मन्स (Improved Performance):** चेन्जेबल स्पीड कंट्रोलमुळे मोटर्सना वेगवेगळ्या ॲप्लिकेशनसाठी युज करता येते.

c) **एन्हान्स्ड प्रोसेस कंट्रोल (Enhanced Process Control):** पंप, कॉम्प्रेसर आणि फॅन सारख्या ॲप्लिकेशनसाठी , स्पीड कंट्रोल , करंट रेट, व्होल्टेज आणि इतर प्रोसेस पॅरामीटर्सवर कंट्रोल करता येतात.

d) **लेस विअर (Less Wear):** स्मूथ स्पीड कंट्रोल मेकॅनिकल (Mechanical) पार्ट्स वरील स्ट्रेस कमी करते, मोटर्स आणि रिलेटेड पार्ट्सचे सर्व्हिस लाईफ वाढवते.

e) **कॉस्ट सेविंग (Cost Saving):** एनर्जी चा वापर ऑप्टिमाइझ (Optimum Energy Use) करून आणि डाउनटाइम कमी करून, स्पीड कंट्रोल मेथड लॉंग टर्म कॉस्ट सेविंग करू शकतात.

2.4.1 स्टेटर व्होल्टेज कंट्रोल (सप्लाय व्होल्टेज कंट्रोल) (Stator Voltage Control):

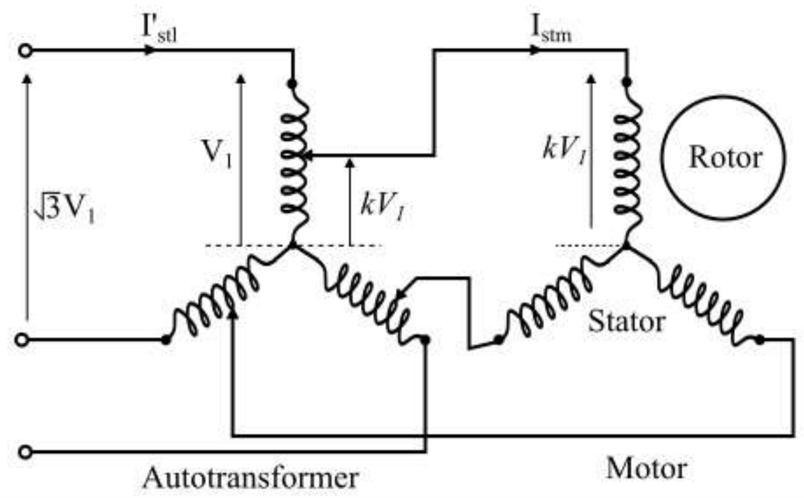


Fig. 2.8: ऑटो-ट्रान्सफॉर्मर युज करून स्टेटर व्होल्टेज कंट्रोल (Stator Voltage Control)

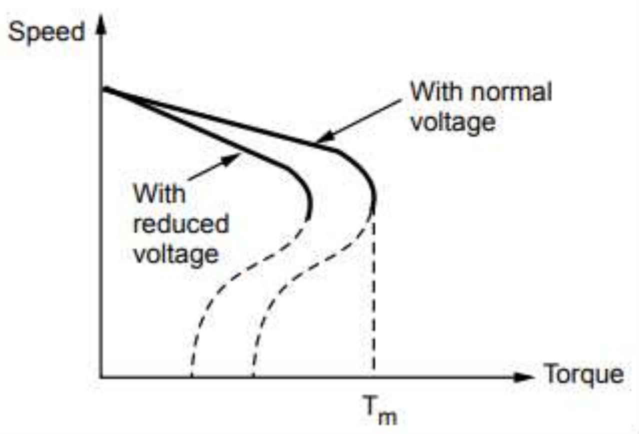


Fig 2.9: थ्री फेज इंडक्शन मोटर स्पीड-टॉर्क कॅरॅक्टेरिस्टिक्स (Characteristics)

आपल्याला माहित आहे की,

$$T \propto \frac{s E_2^2 R_2}{R_2^2 + (s X_2)^2}$$

आता E2, हा स्टॅन्डस्टील कंडिशन (Standstill Condition) मधील इंड्यूस इ एम एफ (EMF) असून तो सप्लाय व्होल्टेज वर डिपेंड आहे.

म्हणून, $E2 \propto V$

तसेच लो स्लिप रिजन साठी, जो इंडक्शन मोटरचा ऑपरेटिंग रिजन आहे, $(S \varphi X2)^2 << R2$ आणि म्हणून इग्नोर केले जाऊ शकते.

$$T \propto \frac{s V^2 R_2}{R_2^2} \propto s V^2 \text{ for constant } R_2$$

आता जर सप्लाय व्होल्टेज रेटेड व्हॅल्यूपेक्षा कमी केला तर वरील इक़्वेशनमुळे निर्माण होणारा टॉर्क देखील कमी होतो. परंतु इक्कल लोड सप्लाय करण्यासाठी इक्कल टॉर्क डेव्हलप करणे आवश्यक आहे म्हणून स्लिपचे व्हॅल्यू वाढते जेणेकरून प्रोड्युस टॉर्क (Produced Torque) समान राहतो. स्लिप वाढते म्हणजे मोटर कमी स्पीडने चालू राहते, ज्यामुळे सप्लाय व्होल्टेज कमी होतो. म्हणून, मोटर कमी स्पीडने आवश्यक लोड टॉर्क निर्माण करते.

स्टेटर व्होल्टेज कंट्रोल चे ऍडव्हांटेजेस:

a) स्पीड कंट्रोलची हि मेथड सिंपल आणि इकोनोमिकल आहे (Simple & Economical).
b) सेंट्रल ऑपरेशन्ससाठी योग्य आहे.
c) रेटेड स्पीड पेक्षा कमी कमी स्पीड चे योग्य कंट्रोल करता येते.
d) कंट्रोल सर्किट सिंपल आहे.
e) त्याचे कंट्रोल सर्किट कॉम्पॅक्ट आणि लाईट वेट आहे.

स्टेटर व्होल्टेज कंट्रोलचे डीस-ऍडव्हांटेजेस:

a) व्होल्टेज कमी झाल्यामुळे, मोटरचा करंट फ्लो वाढतो.
b) वाढत्या करंट फ्लोमुळे, मोटर ओवर हिट होऊ शकते.
c) ही मेथड रेअर ॲप्लिकेशनसाठी वापरली जाते.

2.4.2 पोल चेंजिंग मेथड (Pole changing Method):

a) या स्पीड कंट्रोल मेथडला पोल चेंजिंग (Pole Changing) कंट्रोल मेथड म्हणतात. या मेथडमध्ये, स्टेटर पोलची संख्या बदलून स्टेप्स मध्ये एक, दोन किंवा चार टाईप चे स्पीड मिळवणे शक्य आहे. या मेथडने कॉन्स्टंट स्पीड कंट्रोल शक्य नाही.

b) या मेथडमध्ये, सिंपल स्विचिंगच्या (Simple Switching Arrangement) मदतीने स्टेटर वायंडिंग चे कनेक्शन बदलले जातात. यामुळे, स्टेटर पोलची संख्या 2:1 च्या रेशोमध्ये बदलली जाते. म्हणून दोन्ही सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) पैकी कोणताही एक स्पीड निवडता येतो.

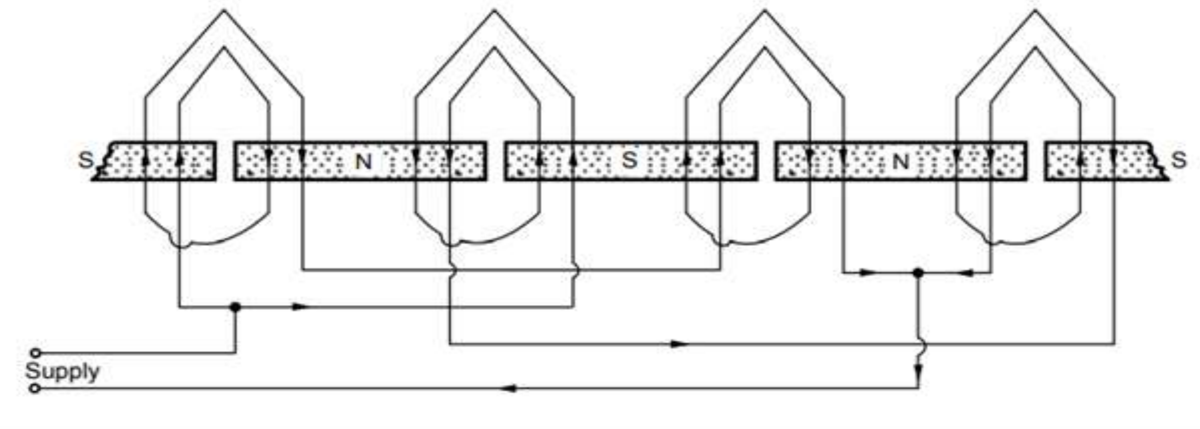


Fig 2.10 पोल चेंजिंग मेथड (Pole changing Method)

c) आकृतीत दाखवल्याप्रमाणे, थ्री फेज वायंडिंग च्या सिंगल फेजमुळे होणारे पोल क्रिएशन कन्सिडर (Consider) करा . स्टेटर वायंडिंगला थ्री टॅपिंग पॉइंट्स आहेत. त्यापैकी दोनला सप्लाय दिला जातो आणि तिसरा पॉइंट ओपन ठेवला जातो.

d) जर आता आधी सप्लाय देणाऱ्या दोन टर्मिनल्सना एकत्र जोडले आणि या कॉमन पॉइंट (Common Point) आणि तिसऱ्या ओपन टर्मिनलमध्ये सप्लाय दिला तर आकृतीत दाखवल्याप्रमाणे पोल तयार होतात.

e) असे दिसून येते की दोन कॉइलमधून जाणारा करंट फ्लो उर्वरित दोन कॉइलमधून जाणारया करंट फ्लो ची डायरेक्शन वेगळी आहे. अशा प्रकारे वरची डायरेक्शन म्हणजे S पोल आणि खालची डायरेक्शन म्हणजे N पोल तयार होत आहे. असे दिसून येते की फक्त 4 पोल तयार होतात. म्हणून 50 Hz फ्रेक्वेन्सी साठी शक्य सिंक्रोनस स्पीड 1500 RPM आहे.

पोल चेंजिंग मेथड चे ऍडव्हांटेजेस (Advantages):

a) ही मेथड सिंपल आहे.

b) ही मेथड हायली एफिशियंट आहे (Highly Efficient Method).

c) यामुळे इलेक्ट्रिसिटीचा कमी वापर होतो (Low Power Requrement).

d) स्पीड कंट्रोल अरेंजमेंट सिंपल आहे.

पोल चेंजिंग मेथड चे डीस-ऍडव्हांटेजेस (Disadvantages):

a) कंटीन्युअस स्पीड कंट्रोल शक्य नाही (Continuous Speed Control is Not Possible).

b) पोल बदलल्याने सिस्टममध्ये हार्मोनिक्स (System Harmonics) तयार होतात.

c) वाईड स्पीड कंट्रोल (Wide Speed Control) साठीहि मेथड योग्य नाही.

2.4.3 रोटर रेझिस्टन्स कंट्रोल (Rotor Resistance Control):

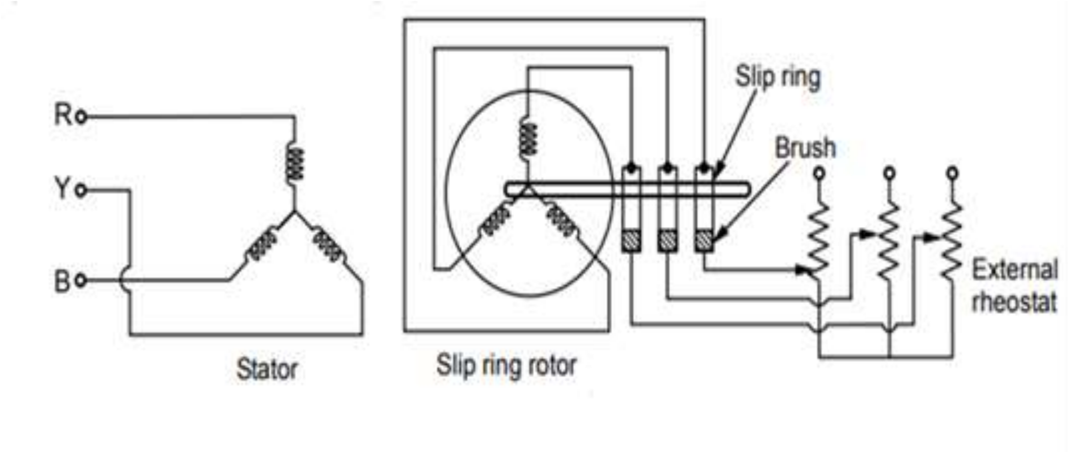


Fig 2.10 रोटर रेझिस्टन्स कंट्रोल (Rotor Resistance Control)

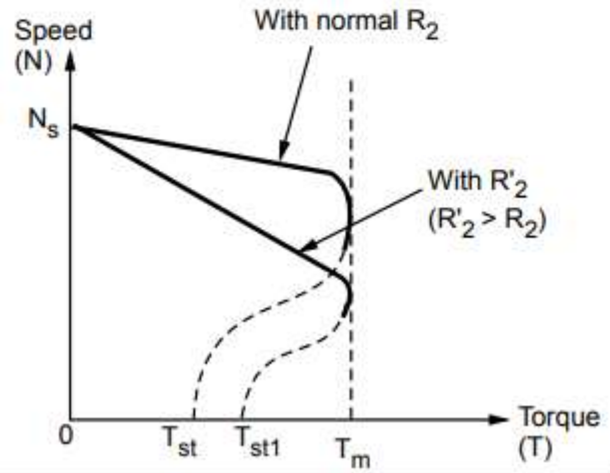


Fig 2.11: थ्री फेज इंडक्शन मोटर स्पीड-टॉर्क कॅरॅक्टेरिस्टिक्स

आपल्याला माहित आहे की,

$$T \propto \frac{s E_2^2 R_2}{R_2^2 + (s X_2)^2}$$

कमी स्लिप रिजन साठी (sX2) « R2 आणि दुर्लक्षित केले जाऊ शकते आणि कॉन्स्टंट सप्लाय व्होल्टेजसाठी E2 देखील कॉन्स्टंट आहे.

$$T \propto \frac{s R_2}{(R_2)^2} \propto \frac{s}{R_2}$$

अशाप्रकारे जर रोटरचा रेसिस्टन्स वाढवला तर निर्माण होणारा टॉर्क कमी होतो. परंतु जेव्हा मोटरवरील लोड इक्वल असतो तेव्हा मोटरला लोडच्या नीड इतकाच टॉर्क पुरवावा लागतो. म्हणून मोटर R2 मुळे T मध्ये होणारा ड्रॉप (Drop) भरून काढण्यासाठी तिचा स्लिप वाढतो देते आणि लोड टॉर्क स्थिर (Load Torque) ठेवते.

त्यामुळे अतिरिक्त रोटर रेझिस्टन्स R2 मुळे, मोटर स्लिप वाढते म्हणजेच मोटरचा स्पीड कमी होतो. अशा प्रकारे रोटर रेझिस्टन्स R2 वाढवून, नॉर्मल स्पीडपेक्षा लो स्पीड मिळवता येतो.

रोटर रेझिस्टन्स स्पीड कंट्रोलचे ऍडव्हांटेजेस (Advantages):

a) ही पद्धत सिंपल आणि रगड आहे (Simple & Rugged Method).
b) स्मूथ स्पीड कंट्रोल शक्य आहे (Smooth Speed Control is Possible).
c) हाय स्टार्टींग टॉर्क देतो .
d) ही पद्धत इंटरमीडिएट (Intermediate Type Loads) टाइप च्या लोड साठी योग्य आहे.

रोटर रेझिस्टन्स स्पीड कंट्रोलचे डीस-ऍडव्हांटेजेस (Disadvantages):

a) रोटर रेझिस्टन्समध्ये पॉवर लॉस होतो.
b) मोटरवरील लोड बदलत असताना, स्पीड देखील बदलतो.
c) हाय मेंटेनन्सची आवश्यकता असते.
d) एकूण पॉवर फॅक्टर कमी होतो.
e) एकूण सिस्टम इफिशन्सी कमी होते.

रोटर रेझिस्टन्स स्पीड कंट्रोलचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) क्रेन (Crane).
b) हॉईस्ट (Hoist).
c) कन्व्हेयर्स (Conveyors).

2.4.4 व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी ड्राइव्हस् (VFD) Variable Frequency Drives (VFD):

व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी ड्राइव्ह (VFD), ज्याला व्हेरिएबल स्पीड ड्राइव्ह (VSD) असेही म्हणतात, हे एक इलेक्ट्रॉनिक इक्विपमेंट आहे जे एसी मोटरच्या पॉवर सप्लायची फ्रेक्वेन्सी (Frequency) आणि व्होल्टेज (Voltage) बदलून मोटरचा स्पीड आणि टॉर्क कंट्रोल करते.

आकृतीमध्ये VFD चे कन्स्ट्रक्शन डिटेल्स दाखवले आहेत. त्यात रेक्टिफायर (Rectifier), डीसी बस (DC Bus) (Filter-फिल्टर) आणि इन्व्हर्टर (Inverter) असतात. कन्स्ट्रक्शन पार्ट्स चे फंक्शन खालीलप्रमाणे आहे.

a) रेक्टिफायर (Rectifier): व्हीएफडी चे वर्क रेक्टिफायरपासून सुरू होतो, जिथे येणारी एसी पॉवर (AC Power) डीसीमध्ये कन्वर्ट (Convert) केली जाते. हे सामान्यतः डायोड्स (Diode) असलेल्या सहा-पल्स रेक्टिफायर (Six Pulse Rectifier) वापरून कन्वर्ट केले जाते.

b) डीसी बस (DC Bus): नंतर रेक्टिफाइड डीसी (Rectified DC), डीसी बसमधून जातो, जो व्होल्टेज फ्लक्चुएशन (Voltage Fluctuations) स्टेबल करण्यासाठी फिल्टर म्हणून काम करतो. या बसमध्ये सामान्यतः डीसी व्होल्टेज कॉन्स्टंट करण्यासाठी कॅपेसिटर (Capacitor) आणि इंडक्टर (Inductor) असतात.

c) **इन्व्हर्टर (Inverter):** शेवटी, इन्व्हर्टरद्वारे डीसी पॉवर पुन्हा एसीमध्ये कन्वर्ट केली जाते. हे इलेक्ट्रॉनिक स्विच वापरून केले जाते, जसे की आयजीबीटी (IGBT-इन्सुलेटेड गेट बायपोलर ट्रान्झिस्टर), जे पल्स-विड्थ मॉड्युलेटेड (Pulse Width Modulated-पीडब्ल्यूएम) वेव्हफॉर्म तयार करण्यासाठी हाय स्पीड ने ऑन आणि ऑफ करतात.

d) **स्पीड कंट्रोल (Speed Control):** पीडब्ल्यूएम वेव्हफॉर्मची स्विचिंग फ्रिक्वेन्सी (Switching Frequency) आणि पल्स विड्थ (Pusle Width) ॲडजस्ट करून, व्हीएफडी मोटरला पुरवलेली फ्रिक्वेन्सी आणि व्होल्टेज कंट्रोल करते, ज्यामुळे तिचा स्पीड आणि टॉर्क कंट्रोल होतो. मोटर स्पीड चा फॉर्म्युला $N = 120\ F / P$ आहे, जिथे N म्हणजे RPM मध्ये स्पीड, F म्हणजे Hz मध्ये फ्रिक्वेन्सी आणि P म्हणजे मोटर पोलची संख्या.

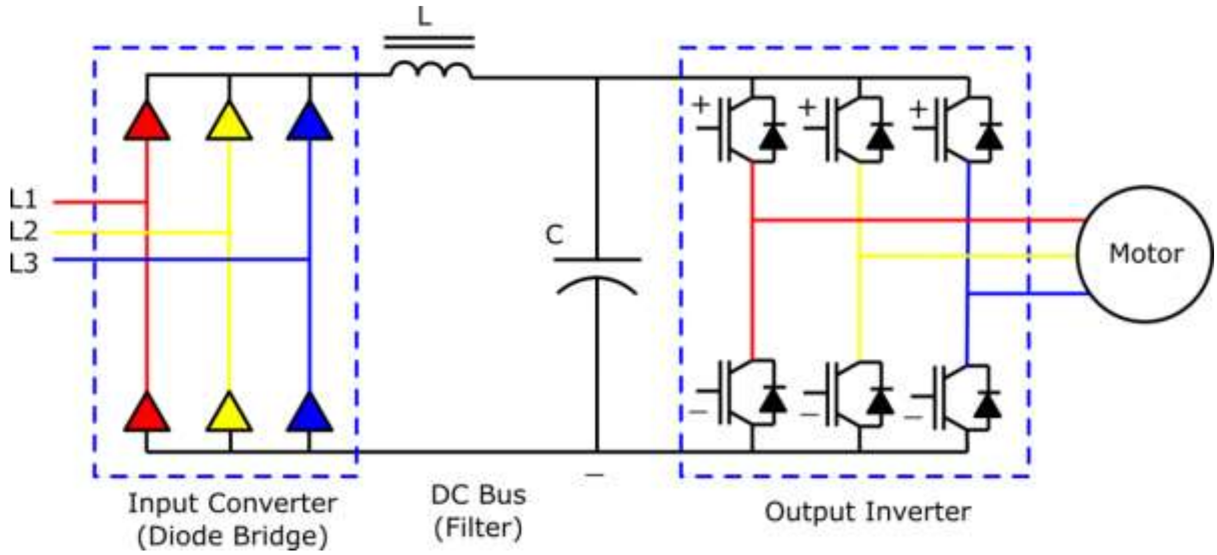


Fig 2.12: व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी ड्राइव्ह (VFD)

Fig 2.13 व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी ड्राइव्ह (VFD)

VFD चे वर्किंग (Working of Variable Frequency Drive):

a) **AC ला DC मध्ये कन्वर्ट करणे:** रेक्टिफायर येणाऱ्या AC पॉवरला DC मध्ये कन्वर्ट करतो.

b) **DC ला स्मूथ करणे:** DC बस DC व्होल्टेज फिल्टर करते आणि कॉन्स्टंट करते.

c) **DC ला परत AC मध्ये कन्वर्ट करणे:** इन्व्हर्टर DC पॉवरला व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी आणि व्होल्टेजसह AC मध्ये कन्वर्ट करतो.

d) **मोटर स्पीड कंट्रोल करणे:** VFD मोटरला पुरवलेल्या AC पॉवरची फ्रेक्वेन्सी आणि व्होल्टेज ऍडजस्ट करते, ज्यामुळे स्पीड आणि टॉर्क कंट्रोल शक्य होते.

VFD चे ऍडव्हांटेजेस / फिचर्स (Advantages / Features of VFD):

a) यामुळे एनर्जीचा वापर कमी होतो (Very Less Power Requirement).

b) यामुळे एनर्जी सेविंग (Energy Saving) आणि एनर्जी कझर्वेशन (Energy Conservation) होण्यास मदत होते.

c) ॲक्युरेट आणि स्मुथ स्पीड कंट्रोल शक्य आहे (Accurate & Smooth Speed Control).

d) VFD मोटर स्टार्ट-अप दरम्यान सुरुवातीचा इनरश करंट कमी करतात, ज्यामुळे पीक पॉवर डिमांड (Peak Power Demand) कमी होते आणि कॉस्ट कमी होतो.

e) VFD डायग्नोस्टिक्स (Dignostics), कम्युनिकेशन प्रोटोकॉल (Communication Protocol) आणि बिल्ट-इन प्रोटेक्शन (In-Built Protection) ते विविध ॲप्लिकेशनसाठी योग्य बनतात.

VFD चे डीस-ऍडव्हांटेजेस (Disadvantages):

a) इनिशियल कॉस्ट जास्त असते.

b) VFD सिस्टिम मध्ये हार्मोनिक्स निर्माण करू शकतात, ज्यासाठी एक्सट्रा फिल्टची आवश्यकता असू शकते.

c) VFD हिट निर्माण करतात, ज्यासाठी व्हेंटिलेशन आणि कुलिंग सिस्टम (Ventilation & Cooling System) आवश्यक असतात.

d) सर्व मोटर्स VFD शी सिन्क्रोनाईज (Synchronised) नसतात.

e) चुकीची इन्स्टॉलेशन किंवा सेटअपमुळे ऑपरेशनल प्रोब्लेम उद्भवू शकतात आणि इफिशन्सी कमी होऊ शकते.

व्हीएफडीचे ॲप्लिकेशन (Applications):

a) एचव्हीएसी सिस्टम (HVAC System).

b) कन्व्हेयर बेल्ट (Conveyor Belt), मिक्सर (Mixer), क्रशर (Crusher).

c) क्रेन आणि हॉईस्ट (Crane & Hoist).

d) ट्रेडमिल आणि फिटनेस ॲप्लिकेशन (Trademill & Fitness Equipments).

e) ट्रान्सपोर्टेशन आणि इलेकट्रीक व्हेहिकल (Transportation & Electric vehicles).

वेगवेगळ्या स्पीड कंट्रोल मेथड्सची कॉम्पॅरिजन (Comparison between Different Speed Control Methods):

Table 2.3 वेगवेगळ्या स्पीड कंट्रोल मेथड्सची कॉम्पॅरिजन

पॅरामीटर	स्टेटर व्होल्टेज कंट्रोल	वेरीयेबल फ्रिक्वेन्सी कंट्रोल	रोटर रेसिस्टन्स कंट्रोल	पोल चेंजिंग मेथड
ऑपरेटिंग प्रिंसिपल (Operating Principle)	सप्लाय व्होल्टेज कमी करणे	सप्लाय फ्रिक्वेन्सी चेंज करणे.	रोटर सर्किटमध्ये एक्सटर्नल रेसिस्टन्स जोडणे	सिम्पल स्विचिंगचा वापर करून पोल ची संख्या बदलणे
कंट्रोल कॉम्पोनन्ट (Control Components)	ऑटोट्रान्सफॉर्मर	VFD	एक्सटर्नल रेसिस्टन्स	स्विचिंग सर्किट
कंस्ट्रक्शन (Construction)	सिंपल	कॉम्प्लिकेटेड	कॉम्प्लिकेटेड	सिंपल
आकार (Size)	कॉम्पॅक्ट	मिडीयम	लार्ज	कॉम्पॅक्ट
ऍडव्हांटेजेस (Advantages)	सिंपल आणि लो कॉस्ट	अचूक आणि एफिशियंट	हाय स्टार्टींग टॉर्क	सिंपल स्पीड कंट्रोल
डीस-ऍडव्हांटेजेस (Disadvantages)	लिमिटेड स्पीड कंट्रोल रेंज	अधिक कॉम्प्लिकेटेड	पॉवर लॉस	लिमिटेड स्पीड कंट्रोल रेंज
ॲप्लिकेशन (Applications)	पंखे आणि पंप	क्रेन आणि हॉईस्ट	क्रेन आणि हॉईस्ट	ट्रॅक्शन सिस्टम

***

स्वाध्याय (Exercise):

1. स्टार्टर (starter) ची नीड सांगा.

   (State the need / necessity of starter.)

2. योग्य डायग्रामसहित प्रायमरी रेसिस्टन्स स्टार्टर (Primary Resistance Starter) चे कन्स्ट्रक्शन आणि वर्किंग स्पष्ट करा.

   (With neat suitable diagram explain the construction & working of primary resistance starter.)

3. योग्य डायग्रामसहित डायरेक्ट ऑन लाईन स्टार्टर (Direct On Line – DOL Starter) चे कन्स्ट्रक्शन आणि वर्किंग स्पष्ट करा.

   (With neat suitable diagram explain the construction & working of DOL starter.)

4. योग्य डायग्रामसहित ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर (Autotransformer Starter) चे कन्स्ट्रक्शन आणि वर्किंग स्पष्ट करा.

(With neat suitable diagram explain the construction & working of autotransformer starter.)

5. योग्य डायग्रामसहित स्टार-डेल्टा स्टार्टर (Star-Delta Starter चे कन्स्ट्रक्शन आणि वर्किंग स्पष्ट करा.

   (With neat suitable diagram explain the construction & working of star-delta starter.)

6. योग्य डायग्रामसहित रोटर रेसिस्टन्स स्टार्टर (Rotor Resistance Starter) चे कन्स्ट्रक्शन आणि वर्किंग स्पष्ट करा.

   (With neat suitable diagram explain the construction & working of rotor resistance starter.)

7. सॉफ्ट स्टार्टर (Soft Starter) म्हणजे काय? सॉफ्ट स्टार्टरचे मेन बेनेफिट (फायदे) लिस्ट करा.

   (Define soft starter. Lit the key features (benefits) of soft starter.)

8. ऑटोट्रान्सफॉर्मर स्टार्टर (Autotransformer Starter) आणि स्टार-डेल्टा स्टार्टर (Star-Delta Starter) यांची कॉम्पॅरिजन करा.

   (Compare autotransformer & star-delta starter.)

9. सॉफ्ट स्टार्टर (Soft Starter) आणि कन्वेंशनल स्टार्टर (Conventional Starter) यांची कॉम्पॅरिजन करा. (Compare soft starter & conventional starter.)

10. थ्री फेज इंडक्शन मोटर (three-phase Induction Motor - I.M.) साठी स्पीड कंट्रोल मेथड्सची नीड सांगा.

    (State the need / necessity of speed control methods for three phase I.M.)

11. थ्री फेज इंडक्शन मोटरच्या स्पीड कंट्रोलच्या विविध मेथड्स सांगा. त्यापैकी एक एक्सप्लेन करा.

    (List different speed control methods of three phase I.M. Explain any one in detail.)

12. थ्री फेज इंडक्शन मोटरसाठी लागू होणाऱ्या व्हेरियेबल फ्रीक्वेन्सी ड्राइव्ह (Variable Frequency Drive – VFD) ची डायग्राम काढा आणि एक्सप्लेन सांगा.

    (Draw and explain the variable speed control drives (VFD) applicable to three phase I.M.)

13. व्हेरियेबल फ्रीक्वेन्सी ड्राइव्ह (VFD) म्हणजे काय? VFD ची कन्स्ट्रक्शन डायग्राम काढा आणि त्यातील विविध ब्लॉक्सचे एक्सप्लेनेशन द्या.

    (Draw the constructional diagram of VFD. State the function of blocks involved.)

14. इंडस्ट्रीयल वापरासाठी कन्वेंशनल स्पीड कंट्रोल मेथड्स पेक्षा VFD का चांगले आहे, याचे एक्सप्लेनेशन द्या.

(Justify, Why the VFD is better than the conventional speed control method for industrial Applications.)

Suggested learning materials / books:

Sr. No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	Theraja B. L., Theraja A. K.	A Textbook of Electrical Technology Vol II	S. Chand and Co. New Delhi ISBN10: 8121924375
2	Ashfaq Husain	Electric Machine	Dhanpat Rai & co. ISBN13: 978-8177001662
3	Kothari D. P. and Nagrath I. J.	Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9352606405
4	Bhattacharya S. K.	Electrical Machines	Tata McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9332902855
5	Dr. P. S. Bimbhra	Electrical Machinery	Khanna Publication ISBN13:978-9389139105
6	Mittle V. N., Arvind Mittle	Design of Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi, ISBN: 9788180141263, 9788180141263
7	Samarjit Ghosh	Electrical Machines	Pearson Education India, 2012; 9788131776025

Learning websites & portals:

Sr. No	Link / Portal	Description
1	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/speed-control-slip-ring/	Speed Control of Slip Ring Induction Motor (VLAB)
2	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/106/108106072/	Operation of Induction Machine and Synchronous Machine
3	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/105/108105131/	Construction of Three Phase Induction Motor
4	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/102/108102146/	Electromechanical Energy Conversion and Synchronisation of Alternators
5	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/lab-equipment-familiarization/index.html	Familiarization of the electrical machine laboratory apparatus (VLAB)

Additional Website References Used:

Sr. No	Link / Portal	Reference Links
1	**Fig.2.1** Primary resistance starter	https://www.google.com/imgres?q=primary%20resistance%20starter&imgurl
2	**Fig. 2.2** Direct online (DOL) starter	https://www.google.com/imgres?q=Direct%20online%20(DOL)%20starter&imgurl
3	**Fig. 2.3** Autotransformer starter	https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.indiamart.com%2Fproddetail%2Fauto-transformer-starter
4	**Fig. 2.4** Star-Delta starter	https://www.google.com/imgres?q=Star-Delta%20starter&imgurl
5	**Fig. 2.5** Rotor resistance starter	https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sanjeevanielectricals.co.in%2Fwinding-motor.
6	**Fig. 2.6** Soft starter	https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2F5.imimg.com%2Fdata5%2FSELLER%2FDefault%2F2023%2F4%2F301853573%2FGL%2FZW%2FUM%2F11443302%2F12-5-hp-soft-starter.
7	**Fig. 2.13** VFD	https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fimage.made-in-china.com.

युनिट-3

सिंगल फेज इंडक्शन मोटर

(Single Phase Induction Motor)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome):

CO 3- इंडस्ट्रियल अँप्लिकेशन्ससाठी (Industrial application) सिंगल फेज इंडक्शन मोटर्सचा (Single phase Induction Motor) युज करणे.

(Use single phase induction motor for industrial applications.)

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

1. सिंगल-फेज इंडक्शन मोटर्समधील डबल फील्ड रिव्हॉल्व्हिंग थिअरी (Double field Revolving Theory) आणि त्याचे महत्त्व एक्सप्लेन करणे.

   (Explain the double field revolving theory and its significance in single-phase induction motors.)
2. सिंगल फेज इंडक्शन मोटर्ससाठी दिलेल्या सेल्फ स्टार्टिंग टेक्निक (Self Starting Technique) डीसक्राइब करणे.

   (Describe the given self-starting technique(s) for the single phase induction motors)
3. दिलेल्या सिंगल-फेज इंडक्शन मोटरच्या कन्स्ट्रक्शनचे (Construction) डीसक्राइब करणे.

   (Describe the constructional details of the given single-phase induction motor.)
4. दिलेल्या सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working principle) एक्सप्लेन करणे.

   (Explain the working principles of the given single phase induction motor)
5. दिलेल्या सिंगल फेज इंडक्शन मोटरच्या टॉर्क-स्लिप कॅरक्टेरिस्टिक्स (Torque-Slip Characteristics) समजून घेणे आणि त्यांचे अँप्लिकेशन् एक्सप्लेन करणे.

   (Interpret the torque-slip characteristics of the given single phase induction motor and state its application.)

परिचय (Introduction): सिंगल-फेज इंडक्शन मोटर (Single phase Induction Motor) ही एक स्मॉल (Small), फ्रॅक्शनल-किलोवॅट रेटिंग (Fractional Kilo-watt rating) असलेली मोटर आहे. रोटेटींग मॅग्नेटिक फिल्ड (Rotating Magnetic field) तयार करण्यासाठी ही मोटर इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनच्या प्रिन्सिपलवर (Electromagnetic Induction Principle) कार्य करते. ही मोटर फॅन (fan), हेअर ड्रायर (Hair Dryer), वॉशिंग मशीन (Washing Machine),व्हॅक्यूम क्लीनर (Vacuum Cleaner), मिक्सर (Mixer), रेफ्रिजरेटर (Refrigerator), फूड प्रोसेसर (Food Processor) आणि किचन अप्लायन्सेस (kitchen appliances) मध्ये वापरली जाते.

3.1 नीड ऑफ सिंगल फेज इंडक्शन मोटर (Need of Single Phase Induction Motor):

सिंगल-फेज इंडक्शन मोटर्स बऱ्याच अँप्लिकेशन्समध्ये आवश्यक आहेत, विशेषत: जेथे थ्री फेज पॉवर सप्लाय (Three Phase Power Supply) उपलब्ध नाही किंवा जेथे इलेक्ट्रिसिटी (Electricity) आवश्यकता तुलनेने कमी आहे. ही मोटर घरगुती उपकरणे, लहान इंडस्ट्रियल अँप्लिकेशन्स (Industrial application) आणि व्यावसायिक सेटिंग्जमध्ये त्यांच्या साधेपणा, कॉस्ट-प्रभावीपणा आणि मेंटेनन्स सुलभतेमुळे मोठ्या प्रमाणात वापरली जाते. सिंगल-फेज इंडक्शन मोटर्स विविध अँप्लिकेशन्स साठी एक प्रॅक्टिकल (Practical) , इकॉनॉमिकल (Economical) आणि व्हर्सटाईल सोल्युशन (Versatile Solution) प्रदान करतात जेथे सिंगल फेज पॉवर सप्लाय (Single Phase Power Supply) उपलब्ध आहे.

3.1.1 सिंगल फेज इंडक्शन मोटर कन्स्ट्रक्शन (Construction of single phase Induction Motor):

सिंगल-फेज इंडक्शन मोटरमध्ये एक स्टेशनरी (Stationary) आणि एक रोटेटिंग (Rotating) असे दोन मुख्य भाग असतात.सिंगल फेज इंडक्शन मोटरमधील स्टेशनरी भाग स्टेटर (Stator) म्हणून ओळखला जातो आणि रोटेटिंग भाग रोटर (Rotor) म्हणून ओळखला जातो.

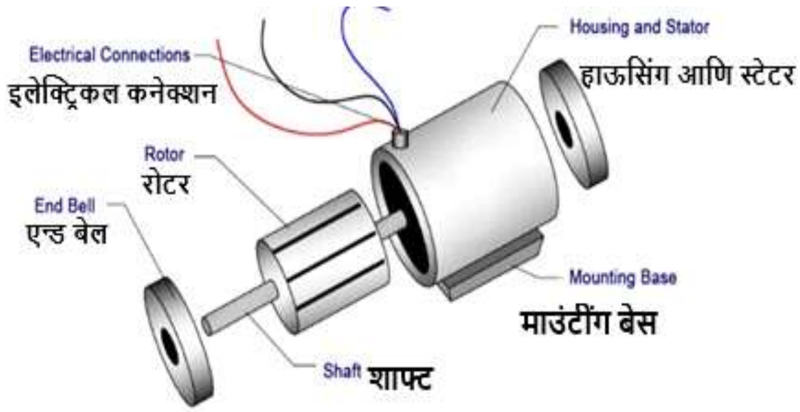


Fig 3.1 सिंगल-फेज इंडक्शन मोटर (Single Phase Induction Motor)

एडी करंट लॉसेस (Eddy current losses) कमी करण्यासाठी स्टेटर कोअर (Stator core) लॅमिनेटेड सिलिकॉन स्टीलचे (Laminated Silicon Steel) बनलेले असतात. स्टेटरमध्ये दोन वाईंडिंग्ज(Windings) असतात: मेन वाईंडिंग्ज (Main) किवा रनींग वाईंडिंग्ज (Running Windings) आणि ऑग्झिलरी वाईंडिंग्ज (Auxillary) (स्टार्टींग वाईंडिंग्ज) (Starting Windings). या वाईंडिंग्ज सिंगल-फेज एसी सप्लाय ला जोडलेल्या आहेत. ऑग्झिलरी वाईंडिंग्जमध्ये सेन्ट्रिफ्युगल स्विच (Centrifugal Switch) जोडलेले आहे. स्विचचे कार्य म्हणजे स्टार्टींग वाईंडिंग्जला कट (Cut) करणे आहे.

स्टेटर वाइंडिंग (Stator Winding) ही ठराविक संख्येच्या पोल्स (Poles) साठी गुंडाळलेली असते. याचा अर्थ असा की जेव्हा सिंगल फेज ए.सी. सप्लाय (Single-phase A.C. Supply) ने एक्साइट (Excite) केले जाते, तेव्हा स्टेटर (Stator) एक मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) तयार करतो, जो ठराविक संख्येच्या पोल्सचा परिणाम निर्माण करतो. स्टेटर वाइंडिंग ज्या पोल्ससाठी तयार केलेली असते, ती संख्या मोटरचा सिंक्रोनस स्पीड

(Synchronous Speed) ठरवते. सिंक्रोनस स्पीड Ns ने दर्शवला जातो. सिंक्रोनस स्पीड Ns सप्लाय फ्रिक्वेन्सी (Supply Frequency - f) आणि पोल्स (P) यांच्यातील रिलेशन(Relation) खालील सूत्राने दिलेले आहे:

$$Ns=120f/P \text{ r.p.m.}$$

इंडक्शन मोटर (Induction Motor) कधीच सिंक्रोनस स्पीडने फिरत नाही, तर ती या स्पीडपेक्षा थोडीशी कमी स्पीडने फिरते. रोटर हा मोटरचा फिरणारा भाग असून तो स्टेटरच्या आत असतो. रोटर हा सिलिंडरच्या (Cylindrical) आकाराचा असून त्याच्याभोवती स्लॉट्स (Slots) असतात.

स्किरल केज टाइप च्या रोटरमध्ये (Squirrel Cage Rotor), या स्लॉट्समध्ये ॲल्युमिनियम (Aluminum), किंवा कॉपर बार्स (Copper Bars) बसवलेले असतात. हे बार्स दोन्ही टोकांना कंडक्टिंग रिंग्स (Conducting Rings) द्वारे कायमस्वरूपी शॉर्ट केलेले असतात, ज्यांना एंड रिंग्स (End Rings) असे म्हणतात. संपूर्ण रचना एक पिंजऱ्यासारखी (Cage-like) दिसते म्हणून त्याला स्किरल केज रोटर (Squirrel Cage Rotor) असे म्हणतात.

या रोटरला कोणतीही एक्सटर्नल इलेक्ट्रिकल कनेक्शन (External Electrical Connection) नसते. त्यामध्ये करंट (Current) फक्त इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शन (Electromagnetic Induction) द्वारे निर्माण होतो.

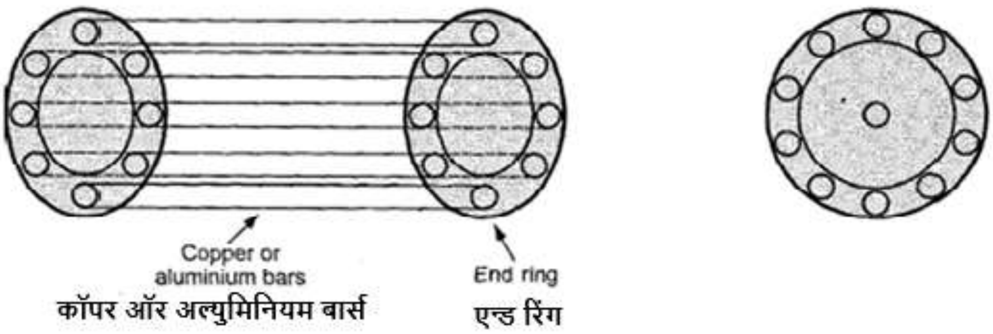


Fig 3.2 a) स्किरल केज टाइप स्ट्रक्चर ऑफ मोटर (Squirrel Cage type structure of motor) **b) सिम्बॉलिक रिप्रेझेंटेशन (Symbolic representation)**

टू पोल सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे स्किमॅटीक रीप्रेसेंटेशन (Schematic Representation) :

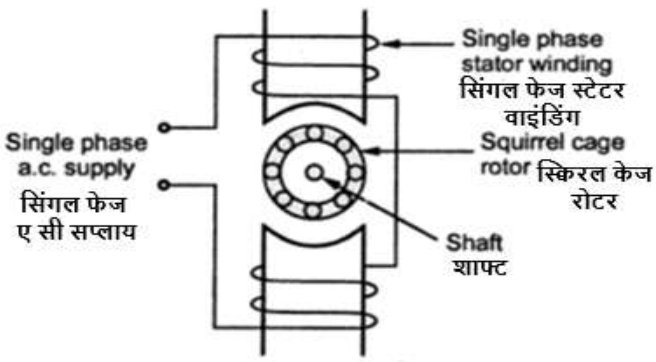


Fig 3.3 टू पोल सिंगल फेज इंडक्शन मोटर (Two pole Single Phase Induction Motor)

3.1.2 सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle of Single Phase Induction Motor):

जेव्हा सिंगल फेज ए सी सप्लाय स्टेटर वाइंडिंग ला दिला जातो, तेव्हा अल्टरनेटिंग करंट (Alternating Current) स्टेटर किंवा मुख्य वाइंडिंगमध्ये वाहू लागतो. या AC करंटमुळे फ्लक्स (Flux) निर्माण होतो. हा फ्लक्स रोटरच्या कंडक्टरना लिंक करतो आणि त्यामुळे रोटरच्या कंडक्टरना कट होतो. फॅराडेच्या इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनच्या नियमाप्रमाणे (Faraday's Law of Electromagnetic Induction), रोटरमध्ये इ एम एफ (EMF) इंड्यूस(Induce) होते. रोटर सर्किट बंद (Circuit closed) झाल्यावर रोटरमध्ये करंट वाहू लागतो. या रोटर करंटमुळे निर्माण होणाऱ्या फ्लक्सला रोटर फ्लक्स (Rotor Flux) म्हणतात.

हा फ्लक्स इंडक्शन प्रिंसिपलवर(Induction Principle) निर्माण होतो, त्यामुळे या मोटरला इंडक्शन मोटर असे नाव देण्यात आले आहे. सध्या या प्रणालीमध्ये दोन टाइप चे फ्लक्स असतात: मेन फ्लक्स (Main Flux) रोटर फ्लक्स या दोन्ही फ्लक्समुळे मोटरला फिरण्यासाठी आवश्यक टॉर्क तयार होतो. या मोटरमध्ये एक सिंगल फेज वाइंडिंग स्टेटरवर असते आणि रोटरवर केज वाइंडिंग (Cage Winding) असते. जेव्हा सिंगल फेज सप्लाय स्टेटर वाइंडिंगला दिला जातो, तेव्हा एक पल्सेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Pulsating Magnetic Field) तयार होते. अशा स्थितीत, रोटर आपोआप फिरत नाही. त्यामुळे रोटरला फिरवण्यासाठी काही विशेष स्टार्टिंग मेथड (Special Starting Methods) वापराव्या लागतात.

3.2 डबल फील्ड रिव्हॉल्विंग थिअरी (Double Field Revolving Theory):

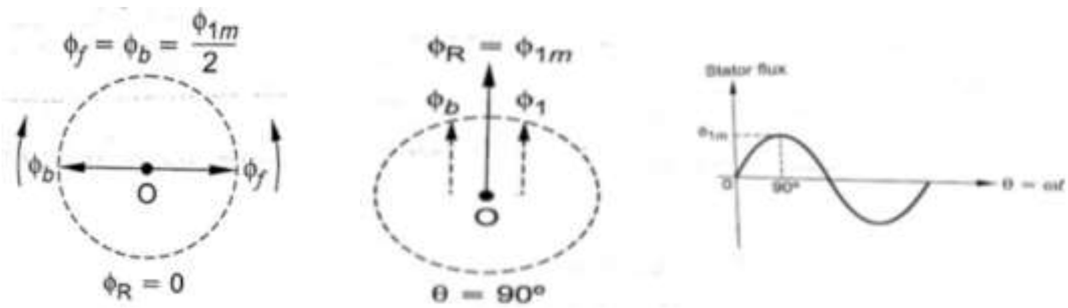
डबल फील्ड रिव्हॉल्विंग थिअरीनुसार (Double Field Revolving Theory), जेव्हा अल्टरनेटिंग सप्लाय दिला जातो, तेव्हा स्टेटर वाइंडिंगद्वारे तयार होणारी मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) ही दोन रोटेटिंग फील्ड्स (Revolving Fields) च्या बेरीजसारखा असतो, जे सिंक्रोनस स्पीडने अपोझिट डायरेक्शनमध्ये (Opposite Directions) फिरतात आणि दोघांची मॅग्निट्यूड (Magnitude) समान असते. प्रत्येक रिव्हॉल्विंग फील्डचा मॅग्नेटिक फ्लक्स हा फ्लक्सच्या मॅक्सिमम व्हॅल्युच्या अर्ध्या (Half of Maximum Value of Alternating Field), म्हणजेच $\phi 1m/2$ इतका असतो, जिथे $\phi 1m$ ही अल्टरनेटिंग फ्लक्सचे मॅक्सिमम व्हॅल्यु आहे.

समजा,

1. ϕf हा फॉरवर्ड कंपोनंट (Forward Component) असून तो अँटी-क्लॉकवाईज (Anti-clockwise) फिरतो.
2. ϕb हा बॅकवर्ड कंपोनंट (Backward Component) असून तो क्लॉकवाईज (Clockwise) फिरतो.

या दोन कंपोनंट्सचा एकत्र परिणाम म्हणजे मूळ स्टेटर फ्लक्सच आहे.

मोटर सुरू होताना, हे दोन्ही कंपोनंट्स एकमेकांच्या विरुद्ध डायरेक्शनने असतात, त्यामुळे फ्लक्सचा एकत्र परिणाम $\phi R = 0$ हा स्टेटर फ्लक्सचा इनिशिअल इंस्टंटेनिअस व्हॅल्यु दर्शवतो. 90° नंतर, हे दोन्ही कंपोनंट्स अशा मेथडने फिरतात की ते एकाच डायरेक्शनने दर्शवले जातात. त्यामुळे, त्यांचा एकत्र परिणाम म्हणजे दोघांची अल्जेब्रिक सम (Algebraic Sum), जी फ्लक्स ϕR असते.



a) b) c)

Fig 3.4 स्टेटर फ्लक्स आणि त्याचे दोन कंपोनंट्स (Stator flux and its two Components)

So, $\phi_R = (\phi 1m/2) + (\phi 1m/2)$

$\phi_R = \phi 1m$

ही $\theta = 90°$ या इंस्टंटची स्टेटर फ्लक्सची इंस्टंटेनिअस व्हॅल्यु आहे. अशा प्रकारे, दोन्ही कंपोनंट्सचा सतत फिरणे म्हणजे मूळ अल्टरनेटिंग स्टेटर फ्लक्स (Alternating Stator Flux) तयार होतो. हे दोन्ही फ्लक्स कंपोनंट्स फिरत असतात आणि म्हणूनच रोटर कंडक्टर्सना कट करतात (Get cut by the rotor conductors). या फ्लक्स कटिंगमुळे रोटर कंडक्टर्समध्ये इ एम एफ इंड्यूस होतो आणि त्यातून रोटर करंट वाहतो. हा रोटर करंट रोटर फ्लक्स (Rotor Flux) निर्माण करतो.

रोटर फ्लक्स, फॉरवर्ड कंपोनंट (ϕf) बरोबर इंटरॅक्ट(Interact) करतो आणि अँटी-क्लॉकवाईज टॉर्क (Anti-clockwise Torque) निर्माण करतो. आणि बॅकवर्ड कंपोनंट (ϕb) बरोबर इंटरॅक्ट करून क्लॉकवाईज टॉर्क (Clockwise Torque) निर्माण करतो. मोटर सुरू होताना, हे दोन्ही टॉर्क्स मॅग्निट्यूडमध्ये समान पण डायरेक्शनने विरुद्ध असतात. प्रत्येक टॉर्क रोटरला स्वतःच्या डायरेक्शनने फिरवायचा प्रयत्न करतो. त्यामुळे रोटरवर येणारा नेट टॉर्क = 0 होतो. म्हणूनच सिंगल फेज इंडक्शन मोटर सेल्फ स्टार्टिंग नसते.

3.2.1 क्रॉस फील्ड थिअरी (Cross Field Theory):सिंगल फेज इंडक्शन मोटर सेल्फ-स्टार्टिंग का नसते, हे समजावण्यासाठी एक पर्यायी सिद्धांत म्हणजे क्रॉस फील्ड थिअरी (Cross Field Theory) आहे.

समजा, सिंगल फेज इंडक्शन मोटर आहे आणि तिचा रोटर स्थिर अवस्थेत आहे (Standstill Rotor), जसे की खाली दिलेल्या आकृतीत दाखवले आहे. स्टेटर वाइंडिंग (Stator Winding) ला सिंगल फेज ए सी सप्लाय दिला आहे. या सप्लायमुळे एक अल्टरनेटिंग फ्लक्स Φf (Alternating Flux) तयार होतो, जो स्टेटर वाइंडिंगच्या ॲक्सिसवरून (Along the Axis of the Stator Winding) क्रिया करतो. या फ्लक्समुळे ट्रान्सफॉर्मर ॲक्शनमुळे रोटर कंडक्टरमध्ये इ एम एफ इंड्यूस होतो. रोटर हा क्लोज्ड सर्किट असल्यामुळे हा इ एम एफ रोटर कंडक्टरमध्ये करंट प्रवाहित करतो. या रोटर करंटची डायरेक्शन (Direction of Rotor Current) Figure मध्ये दाखवलेली आहे.

आता, फ्लेमिंग्स लेफ्ट हँड रूल (Fleming's Left Hand Rule) वापरून आपण रोटर कंडक्टरवर होणाऱ्या फोर्सची डायरेक्शन (Direction of Force on Rotor Conductors) शोधू शकतो. जर स्टेटर फ्लक्स Φs अपवर्ड डायरेक्शनने (Upward direction) कार्यरत असेल आणि पॉझिटिव्हली (Positively) वाढतो, तर लेफ्ट

बाजूचे कंडक्टर्स (Left-side Conductors) यांना लेफ्ट टू राईट (left to right) फोर्स जाणवतो. आणि राईट बाजूचे कंडक्टर्स (Right-side Conductors) यांना राईट टू लेफ्ट फोर्स जाणवतो यामुळे रोटरवर होणारा एकूण फोर्स = 0 होतो. त्यामुळे टॉर्क निर्माण होत नाही, आणि म्हणूनच रोटर फिरू शकत नाही.

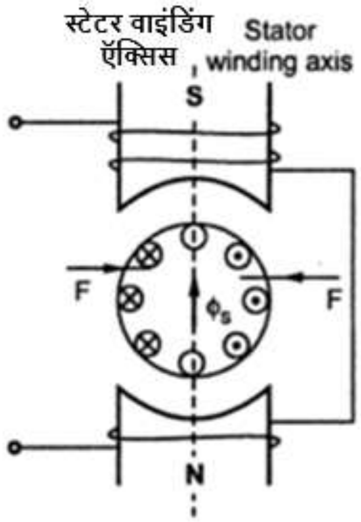


Fig 3.5 सिंगल फेज इंडक्शन मोटर (Single Phase Induction Motor)

त्यामुळे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार होण्यासाठी, एकमेकांपासून वेगळे ॲंगल असलेले दोन फ्लक्स (Two Fluxes separated by some angle) आवश्यक असतात. क्रॉस फील्ड थिअरीनुसार, स्टेटर फ्लक्सला दोन कंपोनंट्समध्ये विभाजित (Resolved into Two Components) करता येते, एक स्टेटर वाइंडिंगच्या ॲक्सिससह कार्यरत (Along the Axis of Stator Winding) आणि दुसरा त्याच्या परपेंडीक्युलर (Perpendicular) डायरेक्शनने कार्यरत.

आता असा विचार करूया की, रोटरला अँटी-क्लॉकवाईज (Anticlockwise) डायरेक्शनने एक इनिशिअल पुश (Initial Push) दिला. या फिरण्यामुळे, रोटर स्टेटर फ्लक्सला प्रत्यक्षतः कट करतो, आणि त्यामुळे डायनॅमिक इ एम एफ (Dynamic EMF) निर्माण होतो. हाच इ एम एफ स्पीड इ एम एफ किंवा रोटेशनल इ एम एफ (Speed or Rotational EMF) म्हणून ओळखला जातो. या इ एम एफ ची डायरेक्शन फ्लेमिंग्स राईट हॅंड रूल (Fleming's Right Hand Rule) वापरून ठरवली जाऊ शकते. हा इ एम एफ स्टेटर फ्लक्स Φs शी इन फेज (In Phase with Φs) असते.

या इएमएफ ची डायरेक्शन खालील Fig. मध्ये दाखवली आहे. हा इएमएफ म्हणजे E_2 ने दर्शवली जातो. हा इ एम रोटरमधून एफ करंट प्रवाहित करतो, ज्याला I_2N म्हणतात. हा रोटर करंट स्वतःचा फ्लक्स Φr तयार करतो. Φr चा ॲक्सिस स्टेटर फ्लक्सच्या ॲक्सिस ला 90° ने क्रॉस करतो. म्हणूनच या फ्लक्सला क्रॉस फील्ड (Cross Field) असे म्हणतात.

रोटर रिॲक्टन्स (Rotor Reactance) खूप जास्त असल्यामुळे, रोटर करंट I_2N आणि फ्लक्स Φr हे दोन्ही रोटेशनल इ एम एफ च्या 90° मागे (lag by almost 90°) असतात. म्हणजेच Φr हा Φs च्या स्पेशियल ॲक्सिसशी

90° ने क्वाड्रेचरमध्ये (In Quadrature in Space) असतो आणि टाईम फेजमध्ये देखील Φs च्या 90° मागे (Lags by 90° in Time) असतो. अशा दोन फ्लक्सेसमुळे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार होते.

Fig 3.6 डायरेक्शन ऑफ इ एम एफ (The direction of e.m.f)

या रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डची डायरेक्शन, मूळ दिलेल्या इनिशिअल पुशच्या दिशेशी (Direction of Initial Push) सारखीच असते. म्हणूनच, रोटरला त्या डायरेक्शनने टॉर्क अनुभवायला मिळतो, आणि त्यामुळे रोटर अँटी-क्लॉकवाईज डायरेक्शनने फिरू लागतो (आपल्याला दिलेल्या केसप्रमाणे), आणि शेवटी एक स्टेडी स्टेटमध्ये सब-सिंक्रोनस स्पीड गाठतो.

3.3 सिंगल फेज इंडक्शन मोटरच्या सेल्फ स्टार्टींग टेक्निक (Self Starting Techniques of Single Phase Induction Motor):

3.3.1 फेज स्प्लिटिंग (Phase Splitting): फेज स्प्लिटिंग (Phase Splitting) ही सिंगल फेज इंडक्शन मोटरला सेल्फ-स्टार्टिंग बनवण्यासाठी वापरली जाणारी मुख्य संकल्पना आहे. यामध्ये, सिंगल फेज ए सी सप्लाय पासून टू-फेज पावर सप्लायचे अनुकरण (Simulation of Two-Phase Supply) केले जाते, जेणेकरून रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार होऊ शकेल. सिंगल फेज ए सी सप्लाय केवळ ऑस्सिलेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Oscillating Magnetic Field) तयार करतो, जे रोटरला फिरवू शकत नाही. मोटरला सेल्फ-स्टार्टिंग बनवण्यासाठी, रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड आवश्यक असते.

त्यासाठी पुढील रचना केली जाते. मुख्य वाइंडिंग (Main Winding) थेट ए सी सप्लायला जोडली जाते. एक ऑक्सिलरी वाइंडिंग (Auxiliary or Starting Winding) त्याच्याशी पॅरलल जोडली जाते, पण तिच्या करंटचा फेज शिफ्ट करण्यासाठी ती मॉडिफाइड (Modified) केली जाते. हा फेज शिफ्ट खालीलपैकी कोणत्याही घटकाद्वारे साधला जातो:

1. रेझिस्टन्स (Resistance) - स्प्लिट फेज मोटर्समध्ये
2. कॅपॅसिटन्स (Capacitance)-कॅपॅसिटर स्टार्ट किंवा कॅपॅसिटर स्टार्ट-कॅपॅसिटर रन मोटर्समध्ये

या दोन्ही वाइंडिंगमधील इम्पीडन्सचा फरक (Difference in Impedance) ऑक्सिलरी वाइंडिंगमधील करंटला मुख्य वाइंडिंगच्या करंटच्या तुलनेत 25° ते 90° ने लॅग ऑर लीड (Lead or Lag) करतो. या दोन करंट्समधील

फेज डिफरन्स (Phase Difference) एक क्वासी-रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Quasi-Rotating Magnetic Field) तयार करतो, जे रोटरला सुरुवात करण्यासाठी आवश्यक टॉर्क निर्माण करते. फेज स्प्लिटिंग ही एक तंत्र आहे ज्यामुळे ऑक्सिलरी वाइंडिंगमध्ये फेज शिफ्टेड करंट तयार केला जातो. त्यामुळे सिंगल फेज सप्लायमधून रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार होतो आणि मोटर सेल्फ स्टार्टिंग होऊ शकते.

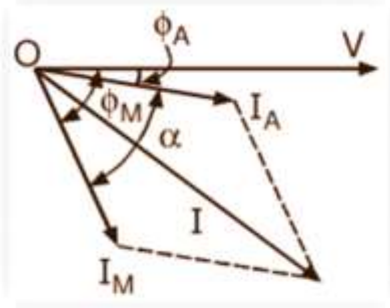


Fig 3.7 सिंगल फेज इंडक्शन मोटरमधील फेज स्प्लिटिंग (Phase Splitting in Single phase Induction Motor)

3.3.2 शेडेड पोल टेक्निक (Shaded pole technique):शेडेड पोल टेक्निक ही एक अशी पद्धत आहे जी सिंगल-फेज इंडक्शन मोटर सेल्फ स्टार्टींग बनवण्यासाठी वापरली जाते. या तंत्रामध्ये एक सोपी रचना वापरून शेडिंग कॉइल्स(shading coils) च्या साहाय्याने एक विक रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (weak rotating magnetic field) तयार केली जाते. सिंगल-फेज मोटर्स मध्ये स्टेटर एक पल्सेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण करतो, जो स्वतःहून रोटर सुरू करू शकत नाही. हे अडथळे दूर करण्यासाठी शेडेड पोल टेक्निक वापरली जाते. यात स्टेटर पोलच्या वेगवेगळ्या भागांमध्ये फेज शिफ्ट तयार केला जातो, ज्यामुळे रोटेटिंग फील्ड सारखा प्रभाव निर्माण होतो आणि मोटर सुरू होते.

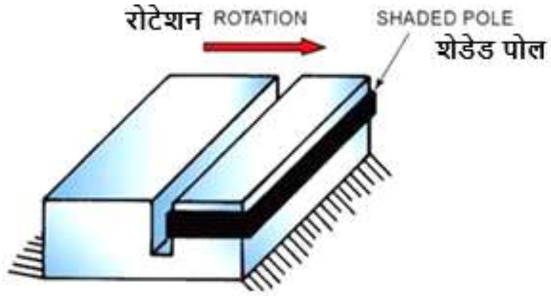


Fig 3.8 शेडेड पोल (Shaded Pole)

या मेथडमध्ये, प्रत्येक स्टेटर पोलवर एक शेडेड भाग असतो, ज्यामध्ये एक शॉर्ट-सर्किट केलेली कॉपर रिंग (short-circuited copper ring) असते. हिला शेडिंग कॉइल किंवा शेडिंग बँड (shading coil or shading band) म्हणतात. ही शेडिंग कॉइल प्रत्येक पोलच्या अंदाजे 1/3 पृष्ठभागावर (pole face) असते. जेव्हा एसी व्होल्टेज (AC voltage) दिले जाते, तेव्हा पोलमधील मॅग्नेटिक फ्लक्स (magnetic flux) वाढतो. फ्लक्समध्ये होणाऱ्या बदलामुळे शेडिंग कॉइल मध्ये इंड्यूस करंट (induced current) तयार होतो जो लेन्झचा नियम (Lenz's Law) नुसार, त्या बदलाला विरोध करतो. त्यामुळे शेडेड भागामधील फ्लक्समध्ये विलंब (delay) होतो. अनशेडेड भाग (Unshaded part) मधील फ्लक्स लवकर वाढतो आणि शेडेड भाग मधील फ्लक्स नंतर वाढतो. त्यामुळे

फ्लक्समध्ये एक स्वीपिंग मोशन (Sweeping Motion) तयार होते, जी अनशेडेड भागाकडून शेडेड भागाकडे जाते. हा स्वीपिंग फ्लक्स एक रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार करतो. हे लहानसे रोटेटिंग फील्ड रोटर मध्ये करंट इंड्यूस करण्यासाठी आणि रोटरला अनशेडेड भागाकडून शेडेड भागाकडे फिरवण्यासाठी पुरेसे असते.

3.3.3 रिलक्टन्स मेथड (Reluctance Method): रिलक्टन्स टेक्निक ही एक कमी प्रसिद्ध असलेली मेथड आहे, जी सिंगल-फेज इंडक्शनच्या सेल्फ-स्टार्टिंग साठी वापरली जाते. या मेथडमध्ये व्हेरिएबल मॅग्नेटिक रिलक्टन्स (Variable Magnetic Reluctance) या तत्त्वाचा वापर करून स्टार्टअप दरम्यान एक डायरेक्शनल टॉर्क (Directional Torque) तयार केला जातो. रिलक्टन्स म्हणजे एखाद्या पदार्थाने मॅग्नेटिक फ्लक्स (Magnetic Flux) ला दिलेला प्रतिकार. ज्या पाथमध्ये (Path) रिलक्टन्स कमी असतो, तिथे जास्त मॅग्नेटिक फ्लक्स प्रवाहित होतो. या तंत्रामध्ये, स्टेटर पोल्स (Stator Poles) किंवा मॅग्नेटिक पाथ (Magnetic Path) असिमेट्रिक (Asymmetric) रितीने डिझाईन केला जातो, ज्यामुळे रोटरला वेगवेगळ्या दिशांना अनइक्वल मॅग्नेटिक रिलक्टन्स (Unequal Magnetic Reluctance) अनुभवायला मिळतो. यामुळे अल्टरनेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड सायकल (Alternating Magnetic field Cycle) दरम्यान एक नेट अनबॅलन्स्ड मॅग्नेटिक पुल (Net Unbalanced Magnetic Pull) निर्माण होतो. हा असिमेट्रिकल पुल एक विक रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड (Rotating Magnetic Field) निर्माण करतो, जो रोटरला स्टार्ट करण्यासाठी पुरेसा असतो.

सिंगल-फेज सप्लाय मुळे एक पल्सेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड तयार होते. रिलक्टन्समधील असमत्वामुळे हा फिल्ड रोटरच्या वेगवेगळ्या भागांशी वेगळ्या प्रकारे इंटरॅक्ट होतो. रोटर हा ज्या डायरेक्शनने रिलक्टन्स कमी आहे, तिकडे जास्त अट्रॅक्ट होतो. हा डायरेक्शनल फोर्स (Directional Force) एक छोटासा पण उपयोगी नेट स्टार्टिंग टॉर्क (Net Starting Torque) निर्माण करतो, जो रोटरला स्टार्ट करतो.

Fig 3.9 रिलक्टन्स मोटर (Reluctance Motor)

ही पद्धत मुख्यता थेरॉटिकल (Theoretical) असून स्टँडर्ड हाऊसहोल्ड मोटर्स (Standard Household Motors) मध्ये वापरली जात नाही. काही वेळा हि मेथड शेडेड पोल्स किंवा ऑक्सिलरी विंडिंग्ज सोबत हायब्रिड मोटर टाईप्स (hybrid motor types) मध्ये एकत्रित केली जाते. म्हणून, रिलक्टन्स पद्धत ही मॅग्नेटिक असिमेट्री (Magnetic Asymmetry) चा वापर करून अनइक्वल मॅग्नेटिक रिलक्टन्स (Unequal Magnetic Reluctance) आधारित डायरेक्शनल फोर्स(directional force) तयार करते. या प्रक्रियेमुळे एक फारच छोटासा नेट टॉर्क तयार

होतो जो मोटरला डिव्हाइसशिवाय सुरू करण्यात मदत करतो. मात्र हा टॉर्क कमकुवत असल्यामुळे, ही मेथड स्वतंत्रपणे वापरण्यात फारशी व्यवहार्य नाही.

3.4 सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे टाइप (Types of Single Phase Induction Motor):

रोटेटिंग स्टेटर मॅग्नेटिक फ्लक्स (Rotating Stator Magnetic flux) तयार करण्याच्या मेथडनुसार, सिंगल फेज इंडक्शन मोटर्स (Single-phase Induction Motors) खालील प्रकारांमध्ये वर्गीकृत केल्या जातात:

1. स्प्लिट फेज इंडक्शन मोटर (Split Phase Induction Motor)
2. कॅपॅसिटर स्टार्ट इंडक्शन मोटर (Capacitor Start Induction Motor)
3. कॅपॅसिटर स्टार्ट कॅपॅसिटर रन इंडक्शन मोटर (Capacitor Start Capacitor Run Induction Motor)
4. शेडेड पोल इंडक्शन मोटर (Shaded Pole Induction Motor)

या प्रत्येक मोटर प्रकारात रोटर सुरू करण्यासाठी किंवा मॅग्नेटिक फिल्ड फिरवण्यासाठी वेगवेगळ्या मेथड वापरल्या जातात.

3.4.1 स्प्लिट फेज इंडक्शन मोटर (Split Phase Induction Motor):

या टाइप च्या मोटरमध्ये सिंगल फेज स्टेटर वाइंडिंग (Single-Phase Stator Winding) असते, जी मेन वाइंडिंग (Main Winding) म्हणून ओळखली जाते. याव्यतिरिक्त, स्टेटरमध्ये आणखी एक वाइंडिंग असते, जी ऑक्सिलरी वाइंडिंग (Auxiliary Winding) किंवा स्टार्टिंग वाइंडिंग (Starting Winding) म्हणून ओळखली जाते. ऑक्सिलरी वाइंडिंग मध्ये सिरीज रेझिस्टन्स (Series Resistance) असतो, ज्यामुळे तिचा इम्पीडन्स (Impedance) प्रामुख्याने रेझिस्टिव्ह (Resistive) असतो. दुसरीकडे, मेन वाइंडिंग ही इंडक्टिव्ह (Inductive) असते.

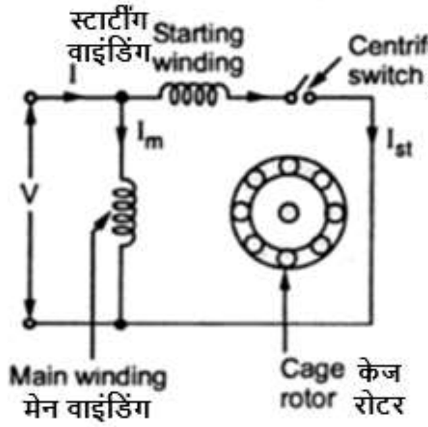
समजा

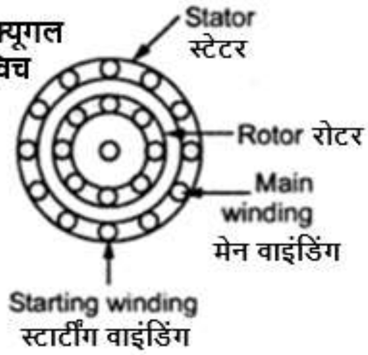
Im = मेन वाइंडिंगमधून वाहणारा करंट

Ist = ऑक्सिलरी वाइंडिंगमधून वाहणारा करंट

मेन वाइंडिंग इंडक्टिव्ह असल्यामुळे, Im करंट व्होल्टेज V च्या जास्त अँगलने (Φm) मागे असतो (lags). तर, Ist करंट व्होल्टेज V शी जवळजवळ इन फेज (in phase) असतो, कारण ऑक्सिलरी वाइंडिंग ही प्रामुख्याने रेझिस्टिव्ह आहे.यामुळे या दोन करंट्समध्ये एक फेज डिफरन्स (α) निर्माण होतो आणि परिणामी त्या दोन करंट्समुळे तयार होणाऱ्या फ्लक्सेसमध्ये (fluxes) देखील फेज डिफरन्स निर्माण होतो.

ही परिस्थिती खालील फिगर (Fig. c) मध्ये दाखवलेली आहे. या फेज डिफरन्स मुळे एक टाइप ची रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड तयार होते, जी मोटरला सेल्फ-स्टार्टिंग करण्यास मदत करते. ही मोटर टाइप साधी, स्वस्त आणि सामान्यतः घरगुती ॲप्लिकेशनमध्ये वापरली जाते जसे की वॉशिंग मशीन, फॅन्स, आणि पंप्स. मेन वाइंडिंग आणि ऑक्सिलरी वाइंडिंग यांच्यामुळे तयार होणाऱ्या दोन फ्लक्सेसचा एकत्रित परिणाम म्हणजे एक रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड होते. या रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्डमुळे, सुरुवातीला फक्त एका डायरेक्शनने कार्य करणारा स्टार्टिंग टॉर्क (Starting torque) निर्माण होतो, जो रोटर सुरू करण्यासाठी पुरेसा असतो.





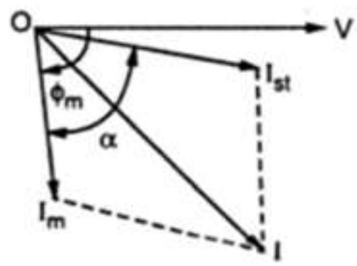


Fig 3.10 a) सर्किट डायग्राम (Circuit Diagram) **b) रिप्रेझेंटेशन (Representation)** **c) फेझर डायग्राम (Phasor diagram)**

ऑक्सिलरी वाइंडिंग सिरीजमध्ये सेंट्रीफ्यूगल स्विच (centrifugal switch) ने जोडलेली असते. जेव्हा मोटर 75% ते 80% सिंक्रोनस स्पीड (synchronous speed) गाठते, तेव्हा हा सेंट्रीफ्यूगल स्विच यांत्रिकरित्या (mechanically) उघडतो. त्यामुळे ऑक्सिलरी वाइंडिंग सर्किटमधून वेगळी होते, आणि मोटर केवळ मेन वाइंडिंगवर चालू राहते. त्यामुळे ऑक्सिलरी वाइंडिंग ही फक्त सुरुवातीसाठी (Short-time use) डिझाइन केली जाते. मेन वाइंडिंग ही सातत्याने चालण्यासाठी (continuous use) डिझाइन केलेली असते.

स्टार्टिंगवेळी, Im (मेन वाइंडिंगचा करंट) आणि Ist (ऑक्सिलरी वाइंडिंगचा करंट) हे दोन्ही 'α' अँगलने एकमेकांपासून स्प्लिट (split) असतात. म्हणूनच या मोटरला स्प्लिट फेज मोटर (Split Phase Motor) असे म्हणतात. टॉर्क-स्पीड कॅरॅक्टरिस्टिक्स खालील प्रमाणे दाखवता येते. % फुल लोड टॉर्क

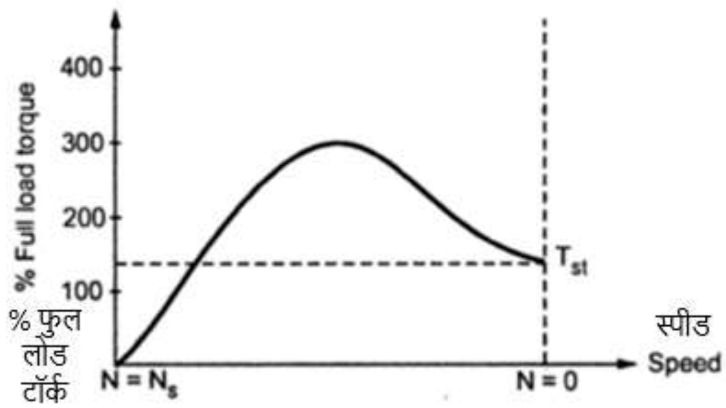


Fig 3.11 स्प्लिट फेज मोटारीची टॉर्क स्पीड कॅरॅक्टरिस्टिकस (Torque-Speed Characteristics of Split Phase Motor)

या मोटर्समध्ये लो स्टार्टिंग करंट(low starting current) असतो आणि मॉडरेट स्टार्टिंग टॉर्क(Moderate starting torque) निर्माण होतो.

अँप्लिकेशन्स (Applications) : या मोटर्सचा वापर सोप्या व सहज सुरू होणाऱ्या लोडसाठी (Easily Started Loads) केला जातो, जसे की, फॅन्स (Fans), ब्लोअर्स (Blowers), ग्राइंडर्स (Grinders), सेंट्रीफ्यूगल पंप्स (Centrifugal Pumps), वॉशिंग मशीन्स (Washing Machines), ऑइल बर्नर्स (Oil Burners), ऑफिस

इक्विपमेंट्स (Office Equipments)या मोटर्स 1/20 kW ते 1/2 kW या पॉवर रेंजमध्ये (Power Range) उपलब्ध असतात.

3.4.2 कॅपॅसिटर स्टार्ट इंडक्शन मोटर्स (Capacitor Start Induction Motors):

या टाइप च्या मोटरची रचना रेझिस्टन्स स्प्लिट फेज प्रकारासारखीच (Resistance Split Phase Type) असते. फरक एवढाच की ऑक्सिलरी वाइंडिंग च्या सिरीजमध्ये कॅपॅसिटर (Capacitor) जोडलेला असतो. हा कॅपॅसिटीव्ह सर्किट (Capacitive Circuit) एक लीडिंग करंट (Leading Current) घेतो. याच वैशिष्ट्याचा ॲप्लिकेशन इथे करून Im आणि Ist या दोन करंट्समधील फेज अँगल 'α' वाढवला जातो.

कॅपॅसिटर सर्किटमध्ये कायमस्वरूपी राहतो की सेंट्रीफ्यूगल स्विच (Centrifugal Switch) चा वापर करून डिस्कनेक्ट केला जातो, यावरून त्याचा टाइप ठरतो. कॅपॅसिटर स्टार्ट मोटरची रचना खालील Fig a) मध्ये दाखवलेली आहे. या मोटरमध्ये Im करंट व्होल्टेजच्या तुलनेत Φm कोनाने मागे (lags) असतो (मेन वाइंडिंग इंडक्टिव्ह असल्यामुळे). Ist करंट कॅपॅसिटरमुळे व्होल्टेजच्या तुलनेत Φst कोनाने पुढे (Leads) असतो.

यामुळे Im आणि Ist या दोन करंट्समध्ये मोठा फेज डिफरन्स निर्माण होतो, जो सुमारे 90° इतका असतो आणि तो आदर्श परिस्थिती (Ideal Case) मानला जातो. याची फेजर डायग्राम (Phasor Diagram) फिगर b) मध्ये दर्शवलेला आहे.

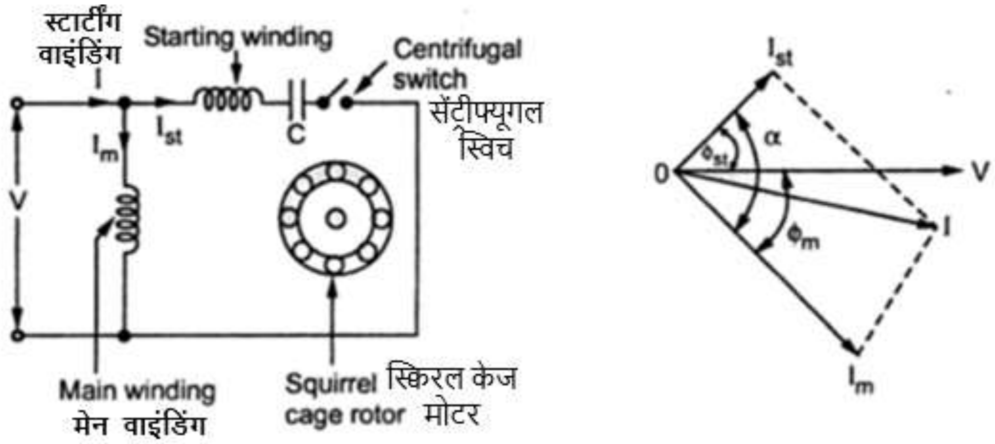


Fig 3.12 a) स्किमॅटिक डायग्राम (Schematic Diagram) b) फेझर डायग्राम (Phasor Diagram)

स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) हा कोन 'α' (Phase Angle α) च्या प्रमाणात (Proportional) असतो, आणि म्हणूनच अशा टाइप च्या मोटर्स खूप हाय स्टार्टिंग टॉर्क (Very High Starting Torque) निर्माण करतात. जेव्हा मोटरचा स्पीड (Speed) 75 ते 80% सिंक्रोनस स्पीड च्या जवळ येतो, तेव्हा सेंट्रीफ्युगल स्विच कार्य करून स्टार्टिंग वाइंडिंग सर्किटमधून डिस्कनेक्ट होते. कॅपेसिटर फक्त स्टार्टिंग वेळी सर्किटमध्ये (Only at Start) असतो, त्यामुळे याला कॅपेसिटर स्टार्ट मोटर (Capacitor Start Motor) असे म्हणतात.

3.4.3 कॅपेसिटर स्टार्ट अँड रन मोटर (Capacitor Start and Run Motor):

ही मोटर कॅपेसिटर स्टार्ट मोटर सारखीच आहे, फक्त एवढाच फरक आहे की स्टार्टिंग वाइंडिंग आणि कॅपेसिटर हे नेहमी सर्किटमध्ये जोडलेले असतात. कॅपेसिटर कायमस्वरूपी सर्किटमध्ये ठेवण्याचे फायदे खालीलप्रमाणे आहेत:

a) मोटरची ओव्हरलोड कॅपॅसिटी (Overload Capacity) सुधारते.

b) पॉवर फॅक्टर (Power Factor) जास्त मिळतो.

c) एफिशियन्सी (Efficiency) वाढते.

d) मोटरचे कमी आवाजात व सुसाट चालणे (Quieter Running of the Motor) शक्य होते.

टाइप (Types):

a) सिंगल व्हॅल्यू कॅपॅसिटर रन मोटर (Single Value Capacitor Run Motor): या प्रकारामध्ये एकाच कॅपॅसिटन्स व्हॅल्यूचा कॅपॅसिटर वापरला जातो, जो स्टार्टिंग आणि रनिंग दोन्ही अवस्थांमध्ये सर्किटमध्ये कायम राहतो.

b) टू व्हॅल्यू कॅपॅसिटर रन मोटर (Two Value Capacitor Run Motor): या प्रकारात, मोटर सुरू करताना हाय व्हॅल्यू कॅपॅसिटर (high value capacitor) वापरला जातो, ज्यामुळे जास्त स्टार्टिंग टॉर्क मिळतो. पण एकदा स्पीड मिळाल्यानंतर, सेंट्रीफ्यूगल स्विचद्वारे हा कॅपॅसिटर सर्किटमधून काढून टाकला जातो, आणि त्याऐवजी लो व्हॅल्यू कॅपॅसिटर (low value capacitor) सर्किटमध्ये कायम राहतो, जो रनिंग दरम्यान वापरला जातो.

3.4.3.1 सिंगल व्हॅल्यू कॅपॅसिटर रन मोटर (Single Value Capacitor Run Motor):

या मोटरमध्ये एक रनिंग वाइंडिंग (Running Winding) आणि एक स्टार्टिंग वाइंडिंग (Starting Winding) असते, जी कॅपॅसिटरसोबत सिरीजमध्ये जोडलेली असते. कारण कॅपॅसिटर सर्किटमध्ये कायमस्वरूपी राहतो, म्हणून या मोटरला परमनंट स्प्लिट कॅपॅसिटर रन मोटर (Permanent split Capacitor Run Motor) असे म्हणतात.

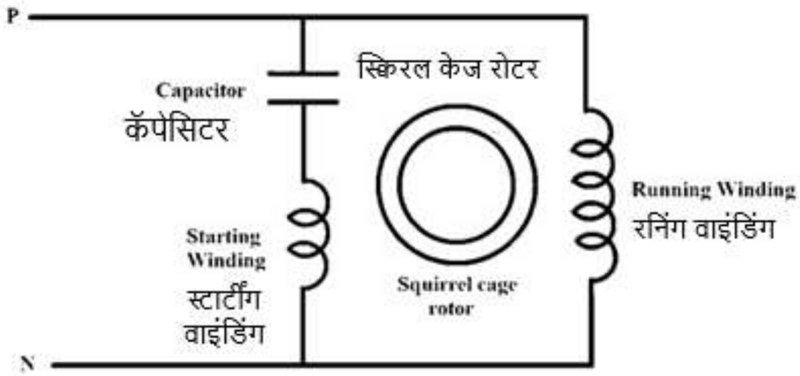


Fig 3.13 सिंगल व्हॅल्यू कपॅसिटर रन मोटर (Single Value Capacitor run Motor)

यामध्ये सुरुवात (Starting) आणि चालू स्थिती (Running) दोन्हीकरिता एकच कॅपॅसिटर वापरला जातो, त्यामुळे ना सुरुवातीचा कार्यक्षम (Optimum Starting) टॉर्क मिळतो, ना रनिंग दरम्यान सर्वोत्तम कार्यक्षमतेची (Optimum Running Performance) हमी मिळते. या प्रकारात 2 ते 20 μF कॅपॅसिटन्सचे कॅपॅसिटर्स वापरले जातात. कमी व्हॅल्यूचा कॅपॅसिटर वापरल्यामुळे, तयार होणारा स्टार्टिंग टॉर्क कमी असतो, जो रेटेड टॉर्कच्या 50 ते 100% दरम्यान असतो. जर रनिंग वाइंडिंग आणि स्टार्टिंग वाइंडिंग एकसारख्या (Identical) असतील, तर

एक्सटर्नल स्विचच्या (External Switch) साहाय्याने ही मोटर सोप्या रीतीने रिव्हर्स (Easily Reversed) करता येते.

ॲप्लिकेशन्स (Applications): फॅन्स, ब्लोअर्स, व्होल्टेज रेग्युलेटर्स (voltage regulators) इत्यादींमध्ये या मोटरचा वापर केला जातो.

3.4.3.2 टू व्हॅल्यू कॅपॅसिटर रन मोटर (Two Value Capacitor Run Motor):

या मोटरमध्ये हाय व्हॅल्यू कॅपॅसिटर स्टार्टिंग वाइंडिंग च्या सिरीजमध्ये असतो, त्यामुळे हाय स्टार्टिंग टॉर्क मिळतो. रनिंग दरम्यान, सेंट्रीफ्यूगल स्विच च्या मदतीने लो व्हॅल्यू कॅपॅसिटर सर्किटमध्ये ठेवला जातो. या प्रकारात रनिंग आणि स्टार्टिंग वाइंडिंग्ज दोन्ही सर्किटमध्ये कायम राहतात. दोन कॅपॅसिटर्स वापरून टू व्हॅल्यू कॅपॅसिटन्स मिळवले जातात. स्टार्टिंग दरम्यान, जेव्हा सेंट्रीफ्यूगल स्विच बंद असतो, तेव्हा दोन्ही कॅपॅसिटर पॅरेललमध्ये जोडले जातात, त्यामुळे त्यांची मिळून एकत्रित कॅपॅसिटन्स तयार होते (sum of individual capacitances). एकदा मोटरने फुल लोड स्पीडच्या 75% पर्यंत स्पीड गाठला की, स्विच उघडतो आणि फक्त कॅपॅसिटर A स्टार्टिंग वाइंडिंग सर्किटमध्ये राहतो.

त्यामुळे ऑप्टिमम स्टार्टिंग परफॉर्मन्स (Optimum starting performance) आणि ऑप्टिमम रनिंग परफॉर्मन्स (Optimum running performance) या दोन्ही मिळतात. ही मोटर अशा ॲप्लिकेशन्ससाठी उपयुक्त असते, जिथे चांगला सुरूवातीचा टॉर्क आणि कार्यक्षम चालणे आवश्यक असते.

ॲप्लिकेशन्स (Applications):फॅन्स,ब्लोअर्स, व्होल्टेज रेग्युलेटर्स इत्यादी.

3.4.3.2 टू व्हॅल्यू कॅपॅसिटर रन मोटर (Two Value Capacitor Run Motor):

ही मोटर सुरू होण्यासाठी हाय कॅपॅसिटर स्टार्टिंग वाइंडिंग सोबत सिरीज मध्ये असतो, ज्यामुळे स्टार्टिंग टॉर्क जास्त मिळतो. रनिंग दरम्यान, लोअर कॅपॅसिटर सेंट्रिफ्यूगल स्विच द्वारे त्याच्या जागी घेतला जातो. रनिंग आणि स्टार्टिंग दोन्ही वाइंडिंग्ज सर्किटमध्ये राहतात.

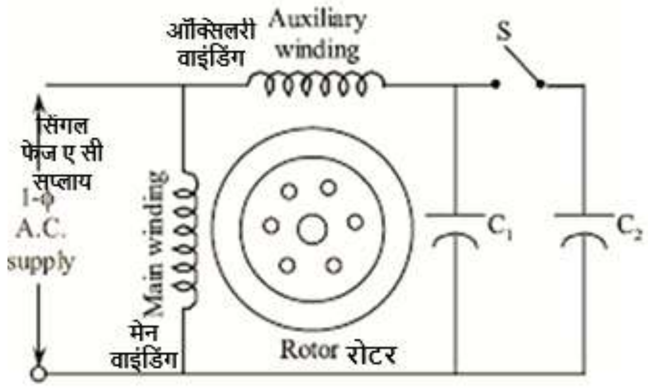


Fig 3.14 टु व्हॅल्यू कपॅसिटर रन मोटारची सर्किट डायग्राम
(Circuit diagram of two value capacitor run Motor)

कॅपॅसिटन्सचे दोन वेगवेगळे व्हॅल्यूज मिळवण्यासाठी, सुरुवातीला दोन कॅपॅसिटर्स पॅरलल (Parallel) मध्ये जोडले जातात आणि नंतर एक स्विच करून बाहेर काढला जातो, जेणेकरून रनिंगसाठी कमी कॅपॅसिटन्स वापरता येईल. सुरुवातीला, जेव्हा सेंट्रिफ्यूगल स्विच बंद असतो, तेव्हा दोन्ही कॅपॅसिटर्स पॅरलल मध्ये जोडले

जातात, त्यामुळे त्यांची एकत्रित कॅपॅसिटन्स ही त्यांच्या वैयक्तिक कॅपॅसिटन्सची सम (Sum) असते. मोटरने जेव्हा पूर्ण लोड स्पीडच्या सुमारे 75% गाठले, तेव्हा स्विच उघडतो , आणि फक्त कॅपॅसिटर A स्टार्टिंग वाइंडिंग सर्किटमध्ये राहतो. यामुळे, सुरूवात आणि चालू स्थिती दोन्हीसाठी ऑप्टिमम परफॉर्मन्स (Optimum Performance) साधता येतो.

एडव्हानटेजेस (Advantages):

a) जड लोड्स (Heavy Loads) सुरू करण्याची क्षमता.

b) अत्यंत शांत ऑपरेशन (Extremely Quiet Operation).

c) जास्त एफिशियन्सी (Efficiency) आणि पॉवर फॅक्टर (Power Factor).

d) 25 टक्के ओव्हरलोड कॅपॅसिटी (Overload Capacity) विकसित करण्याची क्षमता.

ॲप्लिकेशन्स (Applications): कंप्रेसर्स (Compressors), फायर स्ट्रोकर्स (Fire Strokers) इत्यादी

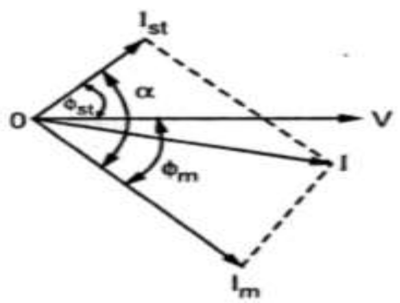


Fig 3.15 कॅपॅसिटर स्टार्ट कॅपॅसिटर रन इंडक्शन मोटरची फेजर डायग्राम
(Phasor diagram of Capacitor start capacitor run Motor)

फेजर डायग्राम (Phasor Diagram) Fig. (b) मध्ये दाखवल्याप्रमाणे असते. इफिशन्सी (Performance) केवळ सुरूवातीस नव्हे तर चालू स्थितीत (Running Condition) देखील कॅपॅसिटर वर अवलंबून असते. म्हणून, त्याची किंमत अशी असावी की बेस्ट स्टार्टींग (Best Starting) आणि बेस्ट रनिंग कंडीशनमध्ये (Best Running Condition) समतोल साधता येईल.म्हणूनच, अशा टाइप च्या मोटरमध्ये उपलब्ध स्टार्टींग टॉर्क सुमारे 50% ते 100% पर्यंत फुल लोड टॉर्कचा असतो.

टॉर्क-स्लिप कॅरेक्टरिस्टिक्स खालील फिगर मध्ये दाखवलेले आहे.

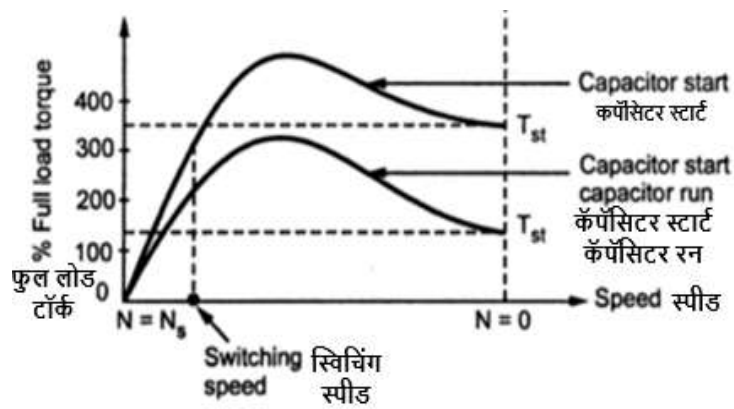


Fig 3.16 टॉर्क स्पीड कॅरॅक्टरिस्टिकस (Torque-Slip Characteristics)

ॲप्लिकेशन्स (Applications) : या मोटर्सना हाय स्टार्टिंग टॉर्क (High Starting Torque) असतो, त्यामुळे त्या हार्ड स्टार्टिंग लोड्स (Hard Starting Loads) साठी वापरल्या जातात. या मोटर्स कंप्रेसर्स (Compressors), कन्व्हेअर्स (Conveyors), ग्राइंडर्स (Grinders), फॅन्स, ब्लोअर्स, रेफ्रिजरेटर्स, एअर कंडिशनर्स इत्यादींसाठी वापरल्या जातात. या मोटर्स सर्वात सामान्यतः वापरल्या जाणाऱ्या मोटर्स आहेत. कॅपॅसिटर स्टार्ट कॅपॅसिटर रन मोटर्स या सिलिंग फॅन्स, आणि एअर-सर्क्युलेटर्स (Air-Circulators) मध्ये वापरल्या जातात.या मोटर्स 6 किलो व्हॅट (6 kW) पर्यंत उपलब्ध आहेत.

3.4.4 शेडेड पोल इंडक्शन मोटर्स (Shaded Pole Induction Motors):

या टाइप च्या मोटरमध्ये स्क्विरल केज रोटर (Squirrel Cage Rotor) आणि स्टेटर (Stator) असतो, ज्यामध्ये सॅलियंट पोल्स (Salient Poles) म्हणजेच प्रोजेक्टेड पोल्स (Projected Poles) असतात. या पोल्सना शेडेड (Shaded) केलेले असते, म्हणजे प्रत्येक पोलच्या विषम भागावर कॉपर बँड (Copper Band) बसवलेला असतो, ज्याला शेडिंग बँड (Shading Band) असे म्हणतात. फिगर (a) मध्ये 4 पोल मोटोरचे शेडेड पोल कंस्ट्रक्शन (Shaded Pole Construction) दाखवले आहे, तर फिगर (b) मध्ये एका पोलवर असलेला कॉपर शेडिंग बँड (Copper Shading Band) दाखवलेला आहे.

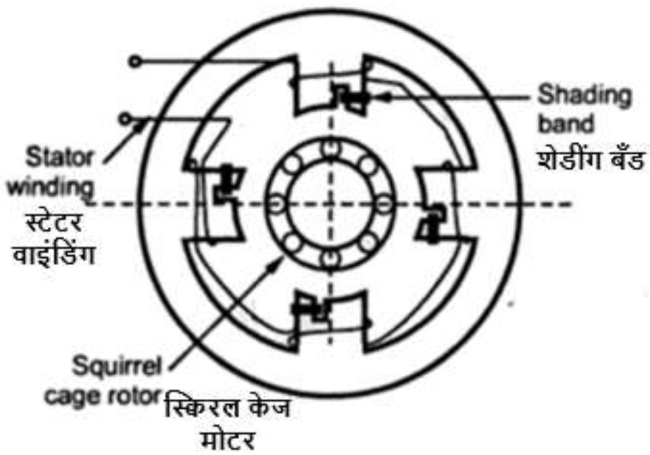
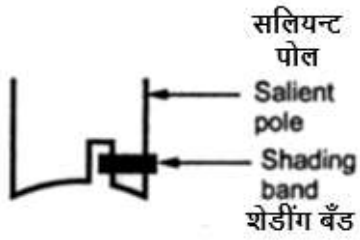


Fig 3.17 (a) 4- पोल शेडेड पोल कन्स्ट्रक्शन
(4 - Pole shaded pole construction)



(b) सलियन्ट पोल विथ शेडींग बँड
(Salient pole with shading band)

ऑपरेशन ऑफ शेडेड पोल इंडक्शन मोटर (Operation of Shaded Pole Induction Motor): इंस्टंट (instant) $t = t_1$ ला, करंटचा (Current) वाढण्याचा दर आणि त्यामुळे फ्लक्सचा (Flux) वाढण्याचा दर खूप जास्त असतो. ट्रान्सफॉर्मर अॅक्शन (Transformer Action) मुळे, कॉपर शेडिंग बँडमध्ये (Copper Shading Band) मोठा ई.एम.एफ. (E.M.F.) इंड्यूस (Induced) होतो. हा बँड शॉर्ट सर्किटेड (Short Circuited) असल्यामुळे, या ई.एम.एफ.मुळे त्यात करंट सर्क्युलेट (Current Circulates) होतो, जो स्वतःचा फ्लक्स निर्माण करतो. लेन्झच्या नियमानुसार (Lenz's Law), या करंटची डायरेक्शन अशी असते की ती कॉझ लाअपोझ करते.

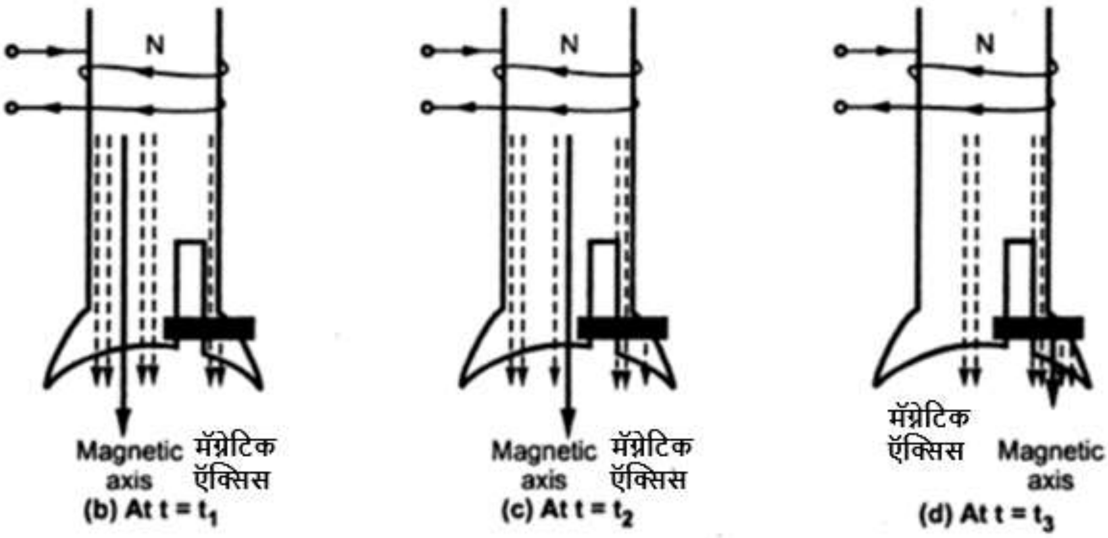


Fig 3.18 शेडेड पोल इंडक्शन मोटर मधील रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डचे प्रोडक्शन (Production of Rotating Magnetic Field in Shaded pole Motor)

म्हणून, शेडिंग रिंग फ्लक्स (Shading Ring Flux) हा मुख्य फ्लक्सच्या (Main Flux) विरोधात असतो. त्यामुळे, नॉन-शेडेड भागात (Non-Shaded Part) फ्लक्सची गर्दी म्हणजेच क्रौलिंग (Crowling) होते, तर शेडेड भागात (Shaded Part) फ्लक्स कमी होतो. त्यामुळे एकूण मॅग्नेटिक अॅक्सिस (Magnetic Axis) नॉन-शेडेड भागाकडे सरकतो, हे फिगर (b) मध्ये दाखवले आहे.

इंस्टंट $t = t_2$ ला, करंट व फ्लक्सचा वाढण्याचा दर (Rate of Rise) जवळजवळ शून्य असतो, कारण फ्लक्स जवळपास त्याच्या मॅक्सिमम व्हॅल्युला (Maximum Value) पोहोचतो. म्हणून $d\Phi/dt=0$, आणि त्यामुळे शेडिंग रिंगमध्ये इंड्यूस होणारा इ.एम.एफ. (Induced E.M.F. in Shading Ring) खूप कमी असतो. त्यामुळे शेडिंग रिंग फ्लक्स निग्लिजिबल (Negligible) असतो, आणि मुख्य फ्लक्सच्या डिस्ट्रिब्युशनवर त्याचा फारसा परिणाम होत नाही. त्यामुळे, मुख्य फ्लक्सचे डिस्ट्रिब्युशन (Main Flux Distribution) युनिफॉर्म (Uniform) असते आणि मॅग्नेटिक अॅक्सिस पोलच्या मध्यभागी (Centre of the Pole Face) राहतो. हे फिगर (c) मध्ये दाखवले आहे.

इंस्टंट $t = t_3$ ला, करंट आणि फ्लक्स कमी होतो . हा कमी होण्याचा दर खूप जास्त असल्यामुळे पुन्हा एकदा शेडिंग रिंगमध्ये मोठा इ.एम.एफ. इंड्यूस होतो. हा करंट रिंगमध्ये सर्क्युलेट होतो आणि स्वतःचा फ्लक्स निर्माण करतो. आता, या शेडेड रिंग करंटामुळे निर्माण होणारा फ्लक्स कमी होण्यासाठी विरोध (Opposes Decrease in Flux) करतो, म्हणजे त्याची डायरेक्शन मुख्य फ्लक्ससारखीच (Same as Main Flux) असते, आणि त्यामुळे मुख्य फ्लक्स बळकट होतो (Strengthens). त्यामुळे शेडेड भागात फ्लक्सची क्रौलिंग होते, आणि मॅग्नेटिक अॅक्सिस शेडेड भागाच्या मध्यभागी सरकतो. हे फिगर (d) मध्ये दाखवले आहे. ही प्रक्रिया निगेटिव्ह हाफ सायकल (Negative Half Cycle) साठीही सतत चालू राहते. यामुळे एक टाइपचा रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण होतो, याची डायरेक्शन नॉन-शेडेड भागाकडून शेडेड भागाकडे असते. त्यामुळे मोटर स्टार्टिंग टॉर्क निर्माण करते

आणि फिरायला लागते. स्टार्टिंग टॉर्क कमी असतो, जो फुल लोड टॉर्कच्या सुमारे 40 ते 50% इतकाच असतो. टॉर्क-स्पीड कॅरेक्टरिस्टिक्स (Torque-Speed Characteristics) पुढील आकृतीत दर्शवले आहेत.

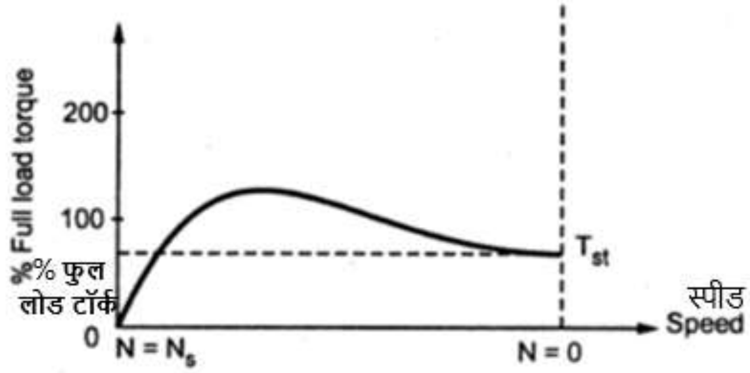


Fig 3.19 शेडेड पोल इंडक्शन मोटरची टॉर्क स्पीड कॅरॅक्टरिस्टिकस (Torque-Speed Characteristics of Shaded Pole Motor)

सेंट्रिफ्यूगल स्विचच्या अनुपस्थितीमुळे (Absence of Centrifugal Switch) या मोटरचे कन्स्ट्रक्शन साधे आणि मजबूत असते, पण या टाइपच्या मोटरला अनेक मर्यादा (Limitations) असतात:

a) स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) कमी असतो.
b) पॉवर फॅक्टर (Power Factor) खूप कमी असतो.
c) I^2R कॉपर लॉसेस (Copper Losses) शेडिंग रिंगमध्ये जास्त असल्यामुळे एफिशियन्सी (Efficiency) खूप कमी असते.
d) स्पीड रिव्हर्सल (Speed Reversal) करणे कठीण असते. स्पीड रिव्हर्सलसाठी एक अतिरिक्त सेट शेडिंग रिंग्स (Additional Set of Shading Rings) लागतो.
e) एका सेटला ओपन करून दुसऱ्याला क्लोज केल्यास डायरेक्शन बदलता येते, पण ही पद्धत कठीण आणि महागडी आहे.
f) या मोटर्सची साईझ आणि पॉवर रेटिंग (Size and Power Rating) खूप लहान असतो. या मोटर्स सहसा 1/300 ते 1/20 kW च्या रेंजमध्ये उपलब्ध असतात.

ॲप्लिकेशन्स (Applications):

या मोटर्स स्वस्त असतात, पण त्यांचा स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque), पॉवर फॅक्टर आणि एफिशियन्सी खूपच कमी असते. या मोटर्स सामान्यतः छोट्या फॅन्स (Small Fans), टॉय मोटर्स (Toy Motors), अॅडव्हर्टायझिंग डिस्प्ले (Advertising Displays), फिल्म प्रोजेक्टर्स (Film Projectors), रेकॉर्ड प्लेयर्स (Record Players), ग्रामोफोन्स (Gramophones), हेअर ड्रायर्स (Hair Dryers), फोटो कॉपींग मशीन (Photocopying Machines) इत्यादींसाठी वापरल्या जातात.

सर्व टाइपच्या सिंगल फेज इंडक्शन मोटरची कम्पॅरिझन (Comparison of All types of Single phase Induction Motor):

Fig 3.1: सर्व टाइपच्या सिंगल फेज इंडक्शन मोटरची कम्पॅरिझन (Comparison of All types of Single phase Induction Motor):

फीचर्स (Feature)	स्प्लिट फेज मोटर (Split Phase Motor)	कॅपॅसिटर स्टार्ट मोटर (Capacitor Start Motor)	कॅपॅसिटर स्टार्ट-कॅपॅसिटर रन मोटर (Capacitor Start Capacitor Run Motor)	शेडेड पोल मोटर (Shaded Pole Motor)
स्टार्टिंग मेकॅनिझम (Starting Mechanism)	वेगवेगळ्या इम्पिडन्स असलेल्या ऑक्सिलरी वाइंडिंगचा वापर (Uses auxiliary winding with different impedance)	ऑक्सिलरी वाइंडिंग आणि स्टार्ट कॅपॅसिटर सिरीजमध्ये (Start capacitor in series with auxiliary winding)	ऑक्सिलरी वाइंडिंगसोबत स्टार्ट आणि रन दोन्ही कॅपॅसिटर (Start + run capacitors with auxiliary winding)	स्टेटर पोल्सपैकी एका भागावर शेडिंग कॉईल (Shading coil on part of stator poles)
कॅपॅसिटर वापर (Capacitor Used)	वापरले जात नाही (No)	हो (केवळ स्टार्ट दरम्यान) (Yes - only during starting)	हो (स्टार्ट + रन दोन्ही दरम्यान) (Yes - start and run)	वापरले जात नाही (No)
स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque)	मॉडरेट (Moderate)	हाय (High)	व्हेरी हाय (Very High)	व्हेरी लो (Very Low)
रनिंग परफॉर्मन्स (Running Performance)	मॉडरेट	मॉडरेट (Moderate)	उत्कृष्ट – (रन कॅपॅसिटरमुळे) (Excellent due to run capacitor)	पुअर (Poor)
एफिशिअन्सी (Efficiency)	मिडीयम	मिडीयम	हाय	लो
पॉवर फॅक्टर (Power Factor)	लो ते मिडीयम (Low to Medium)	मिडीयम	हाय	वॅरी
सेंट्रीफ्युगल स्विचचा वापर(Use of Centrifugal Switch)	हो – स्टार्ट वाइंडिंग डिस्कनेक्ट करते (Yes – disconnects start winding)	हो – कॅपॅसिटर व स्टार्ट वाइंडिंग डिस्कनेक्ट करते (Yes – disconnects capacitor + start winding)	हो – फक्त स्टार्ट कॅपॅसिटर डिस्कनेक्ट करते (Yes – disconnects only start capacitor)	नो
डायरेक्शन रिवर्सल (Direction Reversal)	रिव्हर्सिबल (reversible)	रिव्हर्सिबल	रिव्हर्सिबल	नॉट इझिली रिव्हर्सिबल (Not easily reversible)

फीचर्स (Feature)	स्प्लिट फेज मोटर (Split Phase Motor)	कॅपॅसिटर स्टार्ट मोटर (Capacitor Start Motor)	कॅपॅसिटर स्टार्ट-कॅपॅसिटर रन मोटर (Capacitor Start Capacitor Run Motor)	शेडेड पोल मोटर (Shaded Pole Motor)
कन्स्ट्रक्शन कॉस्ट (Construction Cost)	लो	मिडीयम	हाय	व्हेरी लो
कॉम्प्लेसिटी (Complexity)	सिम्पल (Simple)	मिडीयम	कॉम्प्लेक्स (Complex)	व्हेरी सिम्पल
अँप्लिकेशन्स (Applications)	फॅन्स, वॉशिंग मशीन (Fans, washing machines)	पंप्स,रेफ्रिजरेटर्स (Compressors, pumps, refrigerators)	एअर कंडिशनर्स, कन्वेअर्स, हेवी टूल्स (Air conditioners, conveyors, heavy tools)	लहान फॅन्स, खेळणी, इलेक्ट्रिक घड्याळे (Small fans, toys, electric clocks)

सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे एडव्हानटेजेस (Advantages of Single phase Induction Motor):

a) सिंपल कन्स्ट्रक्शन (Simple Construction) असल्यामुळे ही मोटर इकोनोमिकॅल (Economical) आहे.

b) सेल्फ-स्टार्टिंग कॅपेबिलिटी (Self-Starting Capability) मुळे ही मोटर थेट सिंगल फेज सप्लाय ला जोडता येते.

c) स्क्विरल केज रोटर कन्स्ट्रक्शन (Squirrel Cage Rotor Construction) रगड (Rugged) आणि मेन्टेनन्स-फ्री (Maintenance-Free) आहे.

d) कॉम्पॅक्ट (Compact) आणि लाइट वेट मोटर (Lightweight Motor), होम व लाइट वेट अँप्लिकेशन्ससाठी उपयुक्त आहे.

e) स्टार्टर्समधून (Starters) एक्सटर्नल रेझिस्टर्स (External Resistors) वापरून स्पीड कंट्रोल करणे सोपे आहे.

f) ही मोटर स्टँडर्ड डिझाइन्स आणि रेटिंगसह (Standard Designs and Ratings) सहज उपलब्ध.

सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे डिसएडव्हानटेजेस (Disdvantages of Single phase Induction Motor):

a) ही मोटर थ्री फेज मोटरच्या तुलनेत फक्त 60-65% मॅक्सिमम टॉर्क (Maximum Torque) निर्माण करते.

b) यात पॉवर फॅक्टर (Power Factor) सुमारे 0.4 ते 0.5 असतो.

c) यात टॉर्क पल्सेशन्स (Torque Pulsations) मुळे वायब्रेशन्स (Vibrations) आणि नॉइज जास्त होतो.

d) थ्री फेज मोटरच्या तुलनेत एफिशियन्सी (Efficiency) सुमारे 5% कमी असते.

e) सेल्फ-स्टार्टिंग साठी स्पेशल सर्किट्स (Special Circuits) लागतात, ज्यामुळे कॉस्ट आणि साइज दोन्ही वाढतात.

f) स्टार्टअप दरम्यान (During Start-up), सप्लायमधून 20-30% अधिक करंट (Higher Current) घेतला जातो.

सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे ॲप्लिकेशन्स (Applications of Single phase Induction Motor):

a) सिंगल फेज इंडक्शन मोटर्स इंडस्ट्रीमध्ये खूप प्रमाणात वापरल्या जातात, विशेषतः फ्रॅक्शनल हॉर्सपॉवर फील्डमध्ये (Fractional Horsepower Field).

b) या मोटर्स लो पॉवर कॉन्स्टंट स्पीड अप्लायन्सेस (Low Power Constant Speed Apparatus) जसे की मशीन टूल्स (Machine Tools), डोमेस्टिक अप्लायन्सेस (Domestic Appliances), अॅग्रीकल्चरल मशिनरी (Agricultural Machinery) यामध्ये वापरल्या जातात, विशेषतः जिथे थ्री फेज सप्लाय सहज उपलब्ध नसतो.

c) 1/400 kW ते 1/25 kW साईझच्या सिंगल फेज मोटर्स टॉयज (Toys), हेअर ड्रायर्स (Hair Dryers), व्हेंडिंग मशीन (Vending Machines) मध्ये वापरल्या जातात.

d) युनिव्हर्सल मोटर (Universal Motor) मोठ्या प्रमाणावर पोर्टेबल टूल्स (Portable Tools), व्हॅक्युम क्लीनर्स (Vacuum Cleaners) आणि किचन इक्विपमेंट (Kitchen Equipment) मध्ये वापरली जाते.

***

स्वाध्याय (Exercise):

1. सिंगल फेज इंडक्शन मोटर सेल्फ स्टार्टींग का नाही हे एक्सप्लेन करा.
   (Explain why Single phase Induction Motor not self-Starting.)
2. सिंगल फेज इंडक्शन मोटरच्या विविध टाईप्स ची लिस्ट करा.
   (List the different types of Single phase Induction Motor.)
3. सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle) एक्सप्लेन करा.
   (State the working principle of Single phase Induction Motor.)
4. सिंगल फेज इंडक्शन मोटरमध्ये सेंट्रिफ्यूगल स्विच चे (Centrifugal Switch) फंक्शन सांगा.
   (State the function of Centrifugal switch in Single phase Induction Motor.)
5. सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे एडव्हानटेजेस आणि डिसएडव्हानटेजेस सांगा.
   (List the advantages and disadvantages Single Phase Induction Motor.)
6. सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे विविध ॲप्लिकेशन्स सांगा.
   (State different applications of Single phase Induction Motor.)
7. डबल फील्ड रिव्हॉल्विंग थिअरी (Double Field Revolving Theory) एक्सप्लेन करा.
   (Explain Double field revolving theory.)
8. सिंगल फेज इंडक्शन मोटरचे सेल्फ-स्टार्टिंगचे टेक्निकचे (Self Starting Techniques) एक्सप्लेनेशन द्या
   (Explain the different Self starting techniques of single phase Induction Motor.)

Suggested Learning Materials / Books:

Sr.No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	Theraja B. L., Theraja A. K.	A Textbook of Electrical Technology Vol II	S. Chand and Co. New Delhi ISBN10: 8121924375
2	Ashfaq Husain	Electric Machine	Dhanpat Rai & co. ISBN13: 978-8177001662
3	Kothari D. P. and Nagrath I. J.	Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9352606405
4	Bhattacharya S. K.	Electrical Machines	Tata McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9332902855
5	Dr. P. S. Bimbhra	Electrical Machinery	Khanna Publication ISBN13:978-9389139105
6	Mittle V. N., Arvind Mittle	Design of Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi, ISBN: 9788180141263, 9788180141263
7	Samarjit Ghosh	Electrical Machines	Pearson Education India, 2012; 9788131776025

Learning Websites and Portals:

Sr. No	Link / Portal	Description
1	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/speed-control-slip-ring/	Speed Control of Slip Ring Induction Motor (VLAB)
2	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/106/108106072/	Operation of Induction Machine and Synchronous Machine
3	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/105/108105131/	Construction of Three Phase Induction Motor
4	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/102/108102146/	Electromechanical Energy Conversion and Synchronisation of Alternators
5	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/lab-equipment-familiarization/index.html	Familiarization of the electrical machine laboratory apparatus (VLAB)

युनिट- 4

थ्री फेज सिंक्रोनस मशीन्स

(Three Phase Synchronous Machines)

विषय निष्पत्ती (Course Outcomes):

CO4 - थ्री फेज अल्टरनेटरचा परफॉर्मन्स टेस्ट करा.

(Test the performance of three phase alternator.)

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

1. थ्री फेज अल्टरनेटरचे कन्स्ट्रक्शनल डिटेल्सचे डीस्क्राइब करा.

   (Describe the constructional details of three phase alternators.)
2. अल्टरनेटरचे वर्किंग प्रिन्सिपल एक्सप्लेन करा.

   (Explain the working principle of alternator.)
3. टर्बो अल्टरनेटरमध्ये रोटेटींग फील्डचे एडव्हानटेजेस सांगा.

   (State the advantages of rotating field in turbo alternators.)
4. दिलेल्या थ्री फेज अल्टरनेटरसाठी स्पीड आणि फ्रिक्वेन्सी कॅलक्युलेट करा.

   (Calculate the speed and frequency for the given three phase alternator.)
5. दिलेल्या थ्री फेज अल्टरनेटरसाठी पिच फॅक्टर, डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टर आणि ईएमएफ (EMF) कॅलक्युलेट करा.

   (Calculate the pitch factor, distribution factor and EMF for the given three phase alternator.)
6. थ्री फेज अल्टरनेटरमध्ये वापरण्यात येणाऱ्याएक्ससाइटेशन सिस्टमचे (Excitation System) एक्सप्लेनेशन द्या.

   (Explain the given type of excitation system used in three phase alternator.)
7. सिंक्रोनस रिऍक्टन्सचे सिग्निफिकन्स एक्सप्लेन करा.

   (Explain the significance of synchronous reactance.)
8. पॉवर फॅक्टरचा थ्री फेज अल्टरनेटरच्या परफॉर्मन्सवर होणारा इम्पॅक्ट एक्सप्लेन करा.

   (Explain the impact of power factors on performance of the three phase alternator.)
9. दिलेल्या लोडिंग कंडिशन्ससाठी थ्री फेज अल्टरनेटरचे व्होल्टेज रेग्युलेशन (voltage regulation) कॅलक्युलेट करा.

   (Calculate the voltage regulation of three phase alternators for the given loading conditions.)
10. थ्री फेज सिंक्रोनस मोटरचे वर्किंग प्रिन्सिपल आणि पॉवर फॅक्टर इम्प्रूव्हमेंट ॲप्लिकेशन एक्सप्लेन करा.

(Explain the working principle of three phase synchronous motor and its use for power factor improvement.)

11. सिंक्रोनायझेशनची (synchronisation) नेसेसिटी आणि त्यासाठी लागणाऱ्या कंडिशन्स (conditions) एक्सप्लेन करा.

    (Explain necessity of synchronisation and describe the conditions for it.)

परिचय (Introduction):

एक इलेक्ट्रोमेकॅनिकल एनर्जी कन्वर्जन डिव्हाईस (Electromechanical Energy Conversion Device) किंवा इलेक्ट्रिकल मशीन (Electrical Machine) जी सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed), म्हणजेच रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डचा स्पीड (Speed of Rotating Magnetic Field) यावर कार्य करते, तिला सिंक्रोनस मशीन (Synchronous Machine) असे म्हणतात.सिंक्रोनस मशीन ही एक AC मशीन आहे, म्हणजेच ती कार्य करण्यासाठी AC सप्लाय (AC Supply) ची आवश्यकता असते.

एनर्जी कन्वर्जन (Energy Conversion) च्या आधारे, सिंक्रोनस मशिन्स दोन प्रकारात वर्गीकृत केल्या जातात:

1. **सिंक्रोनस जनरेटर्स (Synchronous Generators):** सिंक्रोनस मशीन जी मेकॅनिकल एनर्जीचे AC इलेक्ट्रिक एनर्जीमध्ये रूपांतर करते, तिला सिंक्रोनस जनरेटर (Synchronous Generator) किंवा अल्टरनेटर (Alternator) म्हणतात.
2. **सिंक्रोनस मोटर्स (Synchronous Motors):** जी मशीन AC इलेक्ट्रिक एनर्जीचे मेकॅनिकल एनर्जीमध्ये रूपांतर करते, तिला सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motor) म्हणतात.

सिंक्रोनस मशिन्स या इलेक्ट्रिकल पॉवर सिस्टीम (Electrical Power System) मध्ये मोठ्या प्रमाणावर वापरल्या जातात, जसे की:

a) पॉवर जनरेशन (Power Generation)
b) पॉवर फॅक्टर करेक्शन (Power Factor Correction)
c) कॉनस्टंट स्पीड मेकॅनिकल लोड ड्रायव्हिंग (Driving Constant Speed Mechanical Load)

बहुतेक व्यावसायिक वापरासाठी वापरल्या जाणाऱ्या सिंक्रोनस मशिन्स या थ्री-फेज AC मशिन्स (Three-Phase AC Machines) असतात. काही सिंगल-फेज सिंक्रोनस मशिन्स (Single-Phase Synchronous Machines) देखील असतात, पण त्या स्पेशल ॲप्लिकेशन्स (Special Applications) मध्ये वापरल्या जातात. सिंक्रोनस मशीन (जनरेटर किंवा मोटर) नेहमी कॉनस्टंट स्पीड (Constant Speed) ने कार्य करते, ज्याला सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) म्हणतात.

हा स्पीड खालील फॉर्म्युला द्वारे दिला जातो:

$$N_s = (120 \times f) / P$$

जिथे,

N_s = सिंक्रोनस स्पीड (synchronous speed) in RPM

f = सप्लाय फ्रिक्वेन्सी (supply frequency) in Hz

P = पोल्सची संख्या (number of poles)

सिंक्रोनस मशीनच्या सॅटिसफॅक्टरी ऑपरेशनसाठी (For satisfactory operation), ती नेहमी वरील दिलेल्या रिलेशनशिपने (relationship) कार्य करते.जर सिंक्रोनस मशीन ही रिलेशनशिप पाळण्यात अयशस्वी ठरली, तर ती काम करणे थांबवते, आणि ही स्थिती लॉस ऑफ सिंक्रोनिझम (loss of synchronism) किंवा आऊट ऑफ सिंक्रोनिझम (out of synchronism) म्हणून ओळखली जाते.म्हणूनच, हे स्पष्ट होते की सिंक्रोनस मशीन (synchronous machine) ही कॉनस्टंट स्पीड (constant speed) वर काम करण्यासाठीच डिझाइन केलेली असते.

सिंक्रोनस मशीनचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle):

सिंक्रोनस मशीनचे वर्किंग प्रिन्सिपल इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंटरॲक्शन (Electromagnetic Interaction) आणि मॅग्नेटिक इंटरलॉकिंग (Magnetic Interlocking) या नियमांवर आधारित आहे.

a) जेव्हा कंडक्टर (Conductor) आणि मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) यांच्यात रिलेटिव्ह मोशन (Relative Motion) असते, तेव्हा कंडक्टरमध्ये EMF इंड्यूस (Emf Induced) होते, आणि करंट कॅरी करणाऱ्या कंडक्टरवर मॅग्नेटिक फील्ड एक फोर्स (Force) लावते.
b) स्टेटर आणि रोटरच्या मॅग्नेटिक फील्डस् (Magnetic Fields Of Stator And Rotor) एकमेकांशी इंटरलॉक होऊन एकाच स्पीडने (Speed) फिरतात, ज्याला मॅग्नेटिक इंटरलॉकिंग म्हणतात.
c) मशीनची सुरुवात इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंटरॲक्शनने होते आणि नंतर रोटर व स्टेटरचे फील्डस् सिंक्रोनस स्पीडने फिरतात.

4.1 थ्री फेज अल्टरनेटरस् (Three Phase Alternators): कन्स्ट्रक्शनल डिटेल्स (Constructional Details), वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle), टाइप्स (Types) आणि कॉम्पॅरिजन (Comparison)

4.1.1 कन्स्ट्रक्शनल डिटेल्स (Constructional Details):

डीसी जनरेटर (DC Generator) मध्ये रोटेटिंग आर्मेचर वाइंडिंग (Rotating Armature Winding) आणि स्टेशनरी मॅग्नेटिक फील्ड (Stationary Magnetic Field) असते. पण अल्टरनेटर (Alternator) मध्ये स्टेशनरी आर्मेचर वाइंडिंग (Stationary Armature Winding) आणि रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) असते. फिल्ड वाइंडिंग्ज (Field Windings) रोटर (rotor) मध्ये बसवलेल्या असतात, तर आर्मेचर वाइंडिंग्ज (Armature Windings) स्टेटर (Stator) मध्ये असतात.

रोटर फिल्ड वाइंडिंग्ज (Rotor Field Windings) ला एक्सटर्नल डीसी सप्लाय (External DC Supply) दिला जातो, जो स्लिप रिंग्ज (Slip Rings) आणि ब्रशेस (Brushes) च्या मदतीने जोडलेला असतो.प्राइम मूव्हर (Prime Mover) रोटरला (Rotor) पुली (Pulley) आणि बेल्ट (Belt) च्या सहाय्याने रोटेट (Rotate) करतो.फिरणारा रोटर (Rotor) एक वेरिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) निर्माण करतो. हा

वेरिंग फील्ड (Field) आर्मेचर वाइंडिंग्ज (Armature Windings) मध्ये ईएमएफ (EMF) निर्माण करतो. ही वीज टर्मिनल्स (Terminals) द्वारे लोड किंवा सर्किट (Circuit) ला पुरवली जाते.

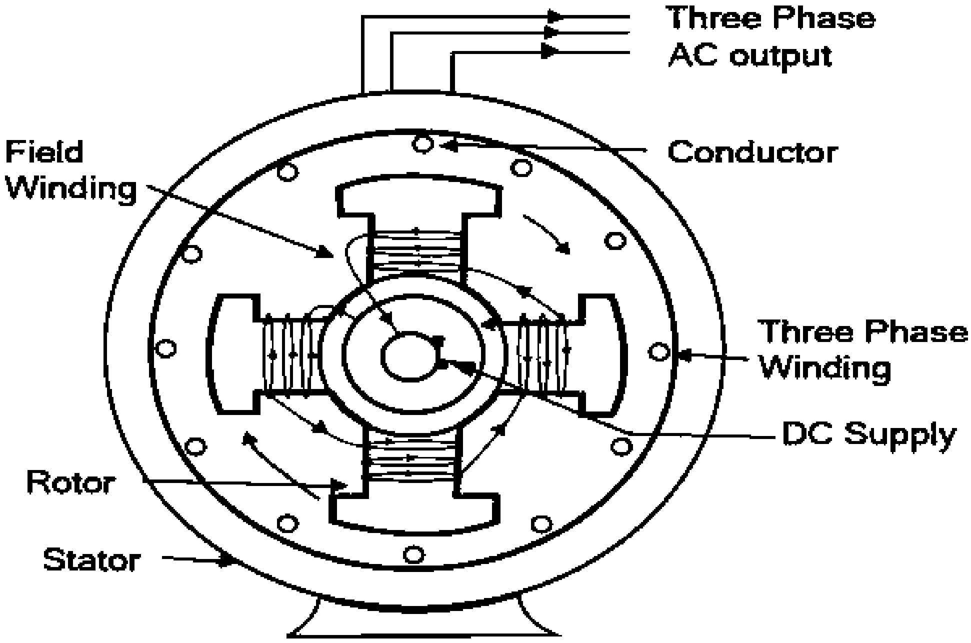


Fig 4.1: कन्स्ट्रक्शन ऑफ अल्टरनेटर (Construction of Alternator)

अल्टरनेटर (Alternator) विविध स्टेशनरी (Stationary) आणि मूव्हिंग (Moving) कंपोनन्टस् (Components) ने बनलेला असतो, आणि प्रत्येक घटकाचा स्वतःचा एक विशिष्ट परपझ (Purpose) असतो. खाली अल्टरनेटरचे कंपोनन्टस् (Components of the Alternator) दिले आहेत:

रोटर (Rotor): रोटर (Rotor) हा अल्टरनेटर (Alternator) चा रोटेटिंग पार्ट (Rotating Part) आहे. तो सिलिंड्रिकल शेप (Cylindrical Shape) मध्ये तयार केला जातो, ज्यामध्ये कॉपर वाइंडिंग्ज (Copper Windings) असतात, ज्यांना फिल्ड वाइंडिंग (Field Winding) म्हणतात.ही फिल्ड वाइंडिंग्ज (Field Windings) इलेक्ट्रोमॅग्नेट्स (Electromagnets) असतात, ज्या फिरवल्यावर आवश्यक ती रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) निर्माण करतात.

रोटर (Rotor) ला एक शाफ्ट (Shaft) असतो, जो ड्राईव्ह बेल्ट पुली सिस्टिम (Drive Belt Pulley System) च्या सहाय्याने फिरवला जातो. जो सोर्स (Source) रोटर (Rotor) फिरवतो, त्याला प्राइम मूव्हर (Prime Mover) म्हणतात. हा प्राइम मूव्हर (Prime Mover) कोणताही सोर्स असू शकतो — उदा. इंजिन (Engine), वॉटर टर्बाइन (Water Turbine), विंड टर्बाइन (Wind Turbine) इत्यादी.

अल्टरनेटरमध्ये वापरले जाणारे रोटरचे टाइप्स (Types of Rotors Used in Alternators or Synchronous Generators):

1. सॅलिअंट पोल टाइप (Salient Pole Type)
2. सिलिंड्रिकल पोल टाइप (Cylindrical Pole Type)

1. **सॅलिअंट पोल टाइप (Salient Pole Type):** हा असा रोटर टाइप (Rotor Type) आहे ज्यामध्ये मोठ्या संख्येने प्रोजेक्टिंग पोल्स (Projecting Poles) असतात. हे पोल्स मॅग्नेटिक लॅमिनेटेड स्टील (Magnetic Laminated Steel) किंवा कास्ट आयर्न (Cast Iron) च्या कोअरवर बसवलेले असतात.

   a) सॅलिअंट (Salient) हा शब्द म्हणजे प्रोजेक्टिंग (Projecting) किंवा बाहेर आलेला/उभा असलेला असा अर्थ दर्शवतो, जसे खालील फिगर (Figure) मध्ये दाखवले आहे.

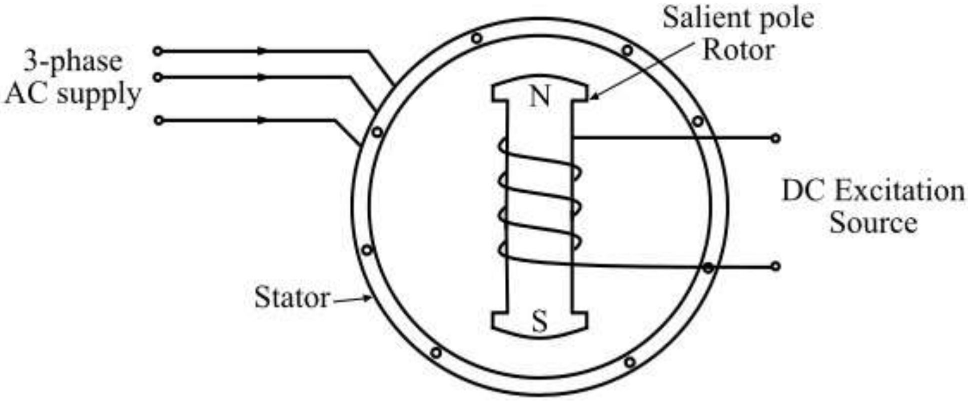


Fig 4.2: सॅलिअंट पोल टाइप (Salient Pole Rotor)

   b) सॅलिअंट पोल्स (Salient Poles) हे लॅमिनेटेड स्टील (Laminated Steel) किंवा चांगल्या मॅग्नेटिक प्रॉपर्टीज (Magnetic Properties) असलेल्या कास्ट आयर्न (Cast Iron) पासून बनवलेले असतात, जेणेकरून एडी करंट लॉसेस (Eddy Current Losses) कमी होतील.पोल शूज (Pole Shoes) मध्ये डॅम्पर वाइंडिंग (Damper Winding) साठी मल्टिपल स्लॉट्स (Multiple Slots) असतात, जे हंटिंग (Haunting) टाळण्यास मदत करतात.

   c) फिल्ड कॉइल्स (Field Coils) प्रत्येक पोलवर गुंडाळले जातात आणि नंतर सिरीज कनेक्ट (Series Connect) केले जातात.ही फिल्ड कॉइल (Field Coil) एक स्वतंत्र डीसी सोर्स (DC Source) ला स्लिप रिंग्ज (Slip Rings) द्वारे जोडून एनर्जाईज (Energize) केली जाते.स्लिप रिंग (Slip Ring) आणि ब्रशेस (brushes) हे रोटर शाफ्ट (Rotor Shaft) वर माउंट (Mount) केलेले असतात.

   d) सॅलिअंट पोल रोटर (Rotor) ला लार्ज डायामीटर (Large Diameter) आणि स्मॉल ॲक्सियल लेंग्थ (Small Axial Length) असते.हे लो स्पीड (Low Speed) आणि मिडियम स्पीड अल्टरनेटरस् (Medium-Speed Alternators) मध्ये वापरले जातात, उदा. हायड्रोपॉवर स्टेशनस् (Hydropower Stations).

   e) हे हाय स्पीड (High Speed) साठी योग्य नसतात कारण त्यांच्या डिझाईन (Design – Salient Poles) मुळे जास्त स्पीडवर वाइंडिंग लॉसेस (Winding Losses) वाढतात.या प्रकाराच्या डिझाईनमध्ये (Design) इतकी मेकॅनिकल स्ट्रेंग्थ (Mechanical Strength) नसते की ते हाय स्पीड (High Speed) सहन करू शकतील.

2. सिलिंड्रिकल टाइप (Cylindrical Type):

a) या टाइपच्या रोटरला (Rotor) फारच कमी म्हणजे फक्त 2 किंवा 4 पोल्स (Poles) असतात. तो लॅमिनेटेड स्टील सिलिंडर (Laminated Steel Cylinder) पासून बनवलेला असतो.सिलिंड्रिकल रोटर (Cylindrical Rotor) मध्ये फिल्ड वाइंडिंग (Field Winding) साठी स्लॉट्स (Slots) असतात, आणि या वाइंडिंग्जना सिरीज कनेक्ट (Series Connect) केलेले असते.पोल्स (Poles) मात्र अनस्लॉटेड (Un-Slotted) ठेवलेले असतात, जसे की खालील फिगर (Figure) मध्ये दाखवले आहे.

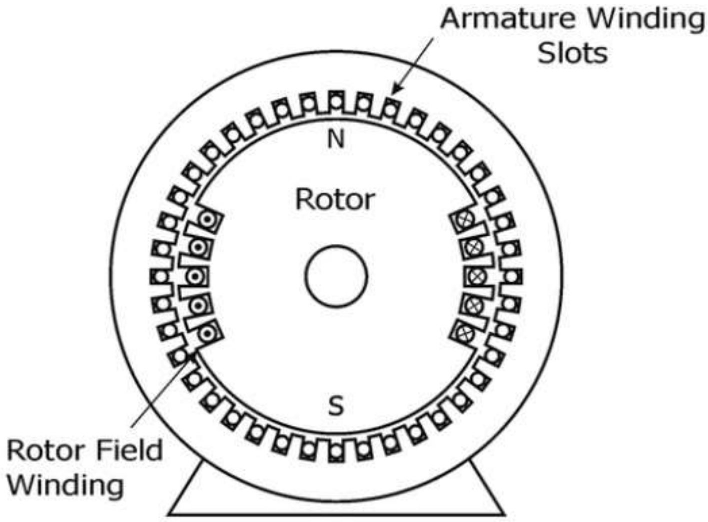


Fig 4.3: सिलिंड्रिकल टाइप (Non Salient (Cylindrical) pole rotor)

b) कारण हे पोल्स (Poles) कोअर (Core) मधून बाहेर आलेले नसतात, त्यामुळे याला नॉन-सॅलिअंट पोल (Non-Salient Pole) किंवा राउंड रोटर (Round Rotor) असेही म्हणतात.या प्रकारामध्ये फार थोडे आणि नॉन-सॅलिअंट पोल्स (Non-Salient Poles) असल्यामुळे, त्याचा रोटर डायामीटर (Rotor Diameter) छोटा असतो, पण त्याची ॲक्सियल लेंग्थ (Axial Length) ही सॅलिअंट पोल रोटर (Salient Pole Rotor) पेक्षा जास्त असते.

c) सिलिंड्रिकल डिझाईन (Cylindrical Design) मुळे अधिक मेकॅनिकल स्ट्रेंग्थ (Mechanical Strength), रॉबस्टनेस (Robustness), आणि युनिफॉर्म मॅग्नेटिक फ्लक्स डिस्ट्रिब्युशन (Uniform Magnetic Flux Distribution) मिळते.

d) या प्रकाराला लोअर विंडेज लॉस (Lower Windage Loss) असतो. त्यामुळे हे हाय-स्पीड (High-Speed), नॉइजलेस ऑपरेशन (Noise-Less Operation) साठी योग्य असते.

e) हे हाय-स्पीड अल्टरनेटरस् (High-Speed Alternators) साठी डिझाईन (Design) केलेले असतात, जसे की थर्मल पॉवर स्टेशनस् (Thermal Power Stations) मध्ये वापरले जातात.

स्टेटर (Stator):

a) स्टेटर (Stator) हा एक इलेक्ट्रिकल मशीन (Electrical Machine) चा स्टेशनरी पार्ट (Stationary Part) असतो. अल्टरनेटर (Alternator) मध्ये तो आर्मेचर वाइंडिंग (Armature Winding) कॅरी करण्यासाठी वापरला जातो, जी इंड्यूस्ड ईएमएफ (Induced EMF) निर्माण करते.

b) कोअर (Core) हा लॅमिनेटेड स्टील (Laminated Steel) किंवा चांगल्या मॅग्नेटिक क्वालिटी (Magnetic Quality) असलेल्या कास्ट आयर्न (Cast Iron) पासून तयार केलेला असतो, जेणेकरून एडी करंट लॉसेस (Eddy Current Losses) कमी होतील. रोटर (Rotor) जो फिल्ड वाइंडिंग्ज (Field Windings) कॅरी करतो, तो स्टेटरच्या (Stator) आत फिरतो पण त्याला फिजिकली टच (Physically Touch) करत नाही.

c) याउलट, डीसी जनरेटरचा स्टेटर (DC Generator's Stator) मॅग्नेट्स (Magnets) कॅरी करतो, जे आवश्यक मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) निर्माण करतात.

d) अल्टरनेटरची स्टेशनरी आर्मेचर वाइंडिंग (Alternator's Stationary Armature Winding) खालीलप्रमाणे डीसी जनरेटरच्या रोटेटिंग आर्मेचर (DC Rotating Armature) पेक्षा अनेक ॲडव्हांटेजेस (Advantages) देते:

1. रोटरी आर्मेचर (Rotary Armature) साठी ब्रशेस (Brushes) लागतात, आणि हाय व्होल्टेज (High Voltage) वर त्यामध्ये मोठा व्होल्टेज ड्रॉप (Voltage Drop) होतो.
2. ब्रशेसमधून (From Brushes) होणारे फ्रिक्शन (Friction) आणि स्पार्क्स (Sparks) हे डॅमेज (Damage) करतात, त्यामुळे त्यांचे लाइफ स्पॅन (Lifespan) कमी होते आणि त्यासाठी सतत मेंटेनन्स (Maintenance) करावे लागते.
3. स्टेशनरी आर्मेचर (Stationary Armature) मध्ये मूव्हिंग पार्ट्स (Moving Parts) नसतात, त्यामुळे आउटपुट करंट (Output Current) थेट टर्मिनल्स (Terminals) मधून घेतले जाते, आणि ब्रशेस (Brushes) व त्यासोबतचे लॉसेस (Losses) टाळले जातात.
4. हाय व्होल्टेज (High Voltage) साठी स्टेशनरी आर्मेचर वाइंडिंग (Stationary Armature Winding) डिझाईन (Design) करणे आणि इन्सुलेट (Insulate) करणे सोपे असते.
5. आर्मेचर वाइंडिंग (Armature Winding) ला मेकॅनिकल स्ट्रेंथ (Mechanical Strength) देऊन ती इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक (Electromagnetic) व सेंट्रीफ्यूगल फोर्सेस (Centrifugal Forces) सहन करण्यासाठी चांगल्या प्रकारे ब्रेस (Brace) करता येते.
6. स्लिप रिंग्ज (Slip Rings) चा वापर करून स्मॉल डीसी व्होल्टेज (Small DC Voltage) द्वारा रोटर फिल्ड वाइंडिंग (Rotor Field Winding) सुरक्षितपणे एनर्जाईज (Energize) करता येते.

योक (Yoke): योक (Yoke) हा अल्टरनेटरचा (Alternator) सर्वात बाहेरील भाग असतो. तो मेकॅनिकल सपोर्ट (Mechanical Support) देण्यासाठी वापरला जातो आणि अंतर्गत भागांना एन्व्हायर्नमेंटल कंडिशन्स (Environmental Conditions) पासून सुरक्षित ठेवतो, जे नुकसान करू शकतात.

स्लिप रिंग आणि ब्रशेस (Slip Ring and Brushes): स्लिप रिंग (Slip Ring) हा असा कंपोनन्ट (Component) आहे जो स्टेशनरी (Stationary) आणि रोटेटिंग पार्टस् (Rotating Parts) यांच्यामध्ये इलेक्ट्रिकल पॉवर ट्रान्सफर (Electrical Power Transfer) करतो. अल्टरनेटरमध्ये, स्लिप रिंग (Slip Ring) चा वापर डीसी बॅटरी (DC Battery) मधून रोटर फिल्ड वाइंडिंग (Rotor Field Winding) कडे डीसी पॉवर (DC Power) पोहोचवण्यासाठी केला जातो. हे ब्रशेस (Brushes) च्या मदतीने घडते, जे स्लिप रिंगवर स्लाईड (Slide over the Slip Ring) होतात. स्लिप रिंग्स (Slip Rings) हे कन्सेंट्रिक डिस्क्स (Concentric Discs) पासून बनवलेले असतात आणि रोटरच्या शाफ्टवर (Rotor Shaft) बसवलेले असतात. अल्टरनेटरमध्ये फक्त डीसी सप्लाय (DC Supply) लागतो म्हणून त्याला फक्त दोन स्लिप रिंग्स (Two Slip Rings) लागतात. हा डीसी करंट (DC Current) फिल्ड वाइंडिंग (Field Winding) मधून प्रवाहित होतो आणि रोटरच्या रोटेशननुसार बदलणारे मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) निर्माण करतो.

डायोड रेक्टिफायर (Diode Rectifier): डायोड रेक्टिफायर (Diode Rectifier) हा एक टू-टर्मिनल सेमिकंडक्टर कंपोनन्ट (Two-Terminal Semiconductor Component) आहे जो अल्टरनेटिंग करंट (AC) चे युनिडायरेक्शनल डायरेक्ट करंट (DC) मध्ये रूपांतर करतो.प्रत्येक फेजसाठी दोन अशा एकूण 6 डायोड्स (6 Diodes – Two Per Phase) वापरले जातात, जेणेकरून स्मूद DC आउटपुट मिळू शकेल. हे लक्षात ठेवा की हे फक्त अशा अल्टरनेटरमध्ये वापरले जाते ज्यांना DC आउटपुट लागतो, जसे की ऑटोमोबाइल्स (Automobiles) आणि सबमरीनमध्ये (Submarine).

व्होल्टेज रेग्युलेटर (Voltage Regulator): व्होल्टेज रेग्युलेटर (Voltage Regulator) किंवा एव्हीआर (AVR – Automatic Voltage Regulator) हा अल्टरनेटरचा आउटपुट व्होल्टेज मॉनिटर (Output Voltage Monitor) करण्यासाठी वापरला जातो. तो रोटरला जाणारा एनर्जायझिंग करंट (Energizing Current to the Rotor) ॲडजस्ट करून आउटपुट व्होल्टेज रेग्युलेट (Adjust Output Voltage) करतो. अल्टरनेटरचे आउटपुट (Alternator Output) व्होल्टेज रेग्युलेटरमध्ये फीडबॅक (Feedback) केले जाते. हे यंत्रणा रोटर स्पीड बदलला तरी आउटपुट व्होल्टेज कॉन्स्टंट (Maintains Constant Output Voltage Regardless of Rotor Speed) ठेवते.

पुली आणि बेल्ट (Pulley and Belt): पुली आणि बेल्ट (Pulley and Belt) हे रोटर (Rotor) ला प्राइम मूव्हर (Prime Mover) जसे की इंजिन (Engine) किंवा टर्बाइन (Turbine) शी जोडण्यासाठी वापरले जातात. हे रोटर ला हाय स्पीडने रोटेट (Rotate At High Speed) करण्यास मदत करतात, जेणेकरून बदलते मॅग्नेटिक फील्ड (Varying Magnetic Field) तयार होईल.

ड्राईव्ह एंड बेअरिंग (Drive End Bearing): बेअरिंग (Bearing) चा उपयोग फ्रिक्शन कमी (reduce Friction) करण्यासाठी आणि पुलीपासून शाफ्टला जास्तीत जास्त एनर्जी ट्रान्सफर (Maximum Energy Transfer to the Shaft) करण्यासाठी केला जातो. हे स्मूद रोटेशन (Smooth Rotation) सुनिश्चित करते.

वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle):

a) जेव्हा प्राइम मूव्हर (Prime Mover) जसे की इंजिन (Engine), टर्बाइन (Turbine) इत्यादी द्वारे रोटर (Rotor) फिरवला जातो (उदा. अॅण्टी-क्लॉकवाईज डायरेक्शनमध्ये - Anticlockwise Direction),

b) तेव्हा स्टेटर वाइंडिंग (Stator Winding) जी आर्मेचर वाइंडिंग (armature Winding) म्हणून कार्य करते,हिला रोटर पोल्सचा मॅग्नेटिक फ्लक्स (Magnetic Flux of the Rotor Poles) कट करतो. इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शन (Electromagnetic Induction) मुळे आर्मेचर वाइंडिंगमध्ये (Armature Winding) EMF इंड्यूस (EMF is Induced) होते. हा इंड्यूस्ड EMF (Induced EMF) अल्टरनेटिंग नेचरची (Alternating in Nature) असते कारण रोटरचे नॉर्थ आणि साउथ पोल्स (North and South Poles of The Rotor) आर्मेचर वाइंडिंगच्या कंडक्टर्स (Conductors) समोर एकामागोमाग एक (Alternately) जातात.

c) इंड्यूस्ड EMF ची डायरेक्शन (Direction) आपण फ्लेमिंग्ज राईट हँड रूल (Fleming's Right Hand Rule) च्या मदतीने ठरवू शकतो.

d) जेव्हा रोटर फिरवला जातो, तेव्हा आर्मेचर वाइंडिंगमध्ये (Armature Winding) थ्री-फेज व्होल्टेज (Three-Phase Voltage) निर्माण होते. या निर्मित व्होल्टेजचा परिमाण (Magnitude of Generated Voltage) हे रोटरच्या स्पीडवर (Speed of Rotation of Rotor) आणि DC एक्ससाइटेशन करंटवर (DC Excitation Current) अवलंबून असते. तथापि, प्रत्येक फेजमध्ये निर्माण होणाऱ्या व्होल्टेजचे परिमाण समान असते, पण ते एकमेकांपासून 120 इलेक्ट्रिकल डिग्रीने डीस्प्लेस्ड (Displaced by 120 Electrical Degrees from each other) असते.

4.1.3 अल्टरनेटरचे टाइप (Types of Alternators):

अल्टरनेटरचे दोन मुख्य टाइप आहेत:

1. टर्बो अल्टरनेटर (Turbo Alternator)
2. हायड्रो अल्टरनेटर (Hydro Alternator)

1. टर्बो अल्टरनेटर / जनरेटर (Turbo Alternator / Generator):

एखाद्या गॅस किंवा स्टीम टर्बाईनच्या (Gas or Steam Turbine) शाफ्टला (Shaft) जोडलेला जो इलेक्ट्रिक जनरेटर (Electric Generator) वीज निर्मितीसाठी वापरला जातो, त्याला टर्बो जनरेटर (Turbo Generator) म्हणतात.टर्बो जनरेटर्स सामान्यतः स्टीम टर्बाईनद्वारे चालवलेले असतात आणि तेच जगभरात वीज पुरवठ्याचा मुख्य सोर्स आहेत.हे जनरेटर्स (Generators) स्टीम-चालित टर्बो-इलेक्ट्रिक शिप्समध्ये (Steam-Powered Turbo-Electric Ships) देखील वापरले जातात.

लहान टर्बो जनरेटर्स (Small Turbo-Generators), जे गॅस टर्बाइन्सद्वारे चालवले जातात (Gas Turbines), ते प्रामुख्याने APU (ऑक्सिलिअरी पॉवर युनिट्स - Auxiliary Power Units) म्हणून वापरले जातात — विशेषतः एअरक्राफ्टसाठी (Aircraft). खाली टर्बो जनरेटरचे एक चित्र (Turbo Generator Picture) दाखवले आहे.

Fig 4.4: टर्बो जनरेटर (Practical Turbo Generator)

वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle): टर्बो जनरेटर (Turbo Generator) हा इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनच्या सिद्धांतावर (Electromagnetic Induction Principle) कार्य करतो. जेव्हा टर्बाईन (Turbine) ला इलेक्ट्रिकल जनरेटर (Electrical Generator) शी जोडले जाते, तेव्हा वाफेची गतिज ऊर्जा (Kinetic Energy - K.E) ही टर्बाईनमधील फॅन-टाइपच्या ब्लेड्स (Fan-Type Blades) वर आदळते. यामुळे, जनरेटरमधील रोटर (rotor) फिरतो आणि विद्युत निर्मिती (Electricity Generation) होते.

टर्बो जनरेटरचे टाइप (Turbo Generator Types):

टर्बो जनरेटर तीन प्रकारात उपलब्ध असतात:

1. एअर-कूल्ड टर्बो जनरेटर (Air-Cooled Turbo Generator)
2. हायड्रोजन-कूल्ड टर्बो जनरेटर (Hydrogen-Cooled Turbo Generator)
3. वॉटर-कूल्ड टर्बो जनरेटर (Water-Cooled Turbo Generator)

2. **हायड्रो अल्टरनेटर / जनरेटर (Hydro Alternator / Generator):** हायड्रो जनरेटर (Hydro Generator) हे पाण्याच्या प्रवाहाने रोटेटिंग टर्बाईनच्या यांत्रिक ऊर्जेला (Mechanical Energy) विद्युत ऊर्जेमध्ये (Electrical Energy) कन्वर्ट करतात. ही प्रक्रिया पुढील तीन भागांत होते: धरण (Dam): जे पाण्याचा साठा (Water Reservoir) तयार करते,पेनस्टॉक (Penstock): जे पाणी टर्बाईनकडे नेतं,आणि जनरेटर (Generator): जो विद्युत निर्माण करतो. निर्माण होणारी पॉवर (Power) ही पाण्याचा फ्लो रेट (Flow Rate) आणि रेझरव्हायर व टर्बाईनमधील उंचीतील फरक (Height Difference / Head) यावर अवलंबून असते.

कन्स्ट्रक्शन (Construction):

a) **रोटर (Rotor):** रोटर ही रोटेटिंग असेंब्ली (Rotating Assembly) आहे जी टर्बाईनच्या शाफ्टकडून टॉर्क (Torque) प्राप्त करते. हा मॅग्नेटाइझ (Magnetized) केलेला असतो, ज्यामुळे तो मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) तयार करतो.

b) **स्टेटर (Stator):** स्टेटर हा स्टेशनरी (Stationary) पार्ट आहे, ज्यामध्ये रोटरच्या रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्डमुळे व्होल्टेज इंड्यूस (Voltage is Induced) होते.

c) **आर्मेचर (Armature):** आर्मेचर हा स्टेटरचाच पार्ट आहे, ज्यामध्ये कंडक्टर्स (Conductors) असतात आणि ज्यामध्ये इलेक्ट्रिसिटी प्रोड्युस (Electricity Generation) होते.

d) **कोअर (Core):** रोटर व स्टेटर दोघांच्याही कोअर (Core) हे लॅमिनेटेड आयर्न शीट्स (Laminated Iron Sheets) पासून बनवलेले असतात, जेणेकरून एडी करंट लॉसेस (Eddy Current Losses) कमी होतील.

e) **वाइंडिंग (Winding):** कॉपर वाइंडिंग्ज (Copper Windings) या स्टेटरच्या आर्मेचर स्लॉट्समध्ये फिट केल्या जातात.

वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle):

a) **वॉटर फ्लो (Water Flow):** अंडर प्रेशर वॉटर (Under Pressure) – जसे की धरणातून (Dam) – टर्बाईन (Turbine) मधून फ्लो होते .

b) **टर्बाईन रोटेशन (Turbine Rotation):** पाण्याची काइनेटिक एनर्जी (Kinetic Energy) टर्बाईनचे ब्लेड्स (Blades) फिरवते.

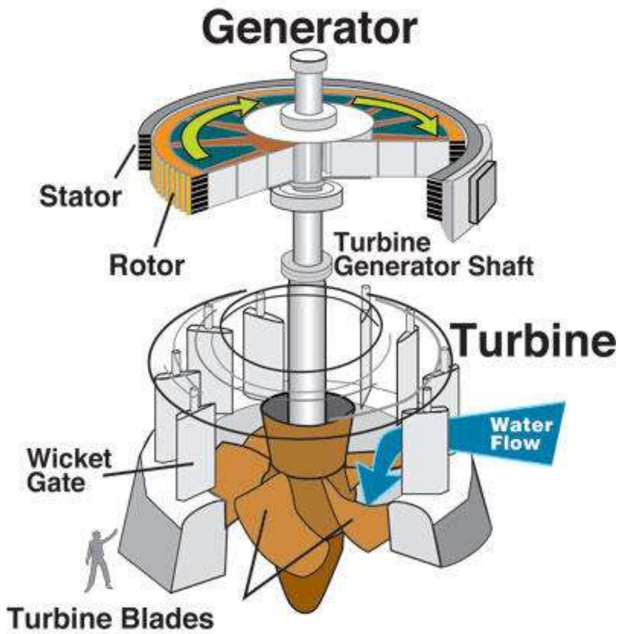


Fig 4.5: हायड्रो अल्टरनेटर / जनरेटर (Hydro Alternator/Generator)

c) **जनरेटर रोटेशन (Generator Rotation):** टर्बाईन ही जनरेटरच्या रोटर (Generator's Rotor) शी जोडलेली असते, त्यामुळे रोटर फिरतो.

d) **मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field):** फिरणारा रोटर (Rotating Rotor) एक मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) तयार करतो.

e) **इलेक्ट्रिसिटी जनरेशन (Electricity Generation):**या मॅग्नेटिक फील्डमुळे, स्टेटर वाइंडिंग्ज (Stator Windings) मध्ये व्होल्टेज इंड्यूस (Voltage is Induced) होते आणि इलेक्ट्रिसिटी जनरेट (Electricity is Generated) होते.

f) **पॉवर ट्रान्समिशन (Power Transmission):** निर्मित वीज ग्रीडमध्ये ट्रान्समिट (Transmitted to the Grid) करून वितरणासाठी (Distribution) वापरली जाते.

4.1.4 कॉम्पॅरिजन: टर्बो आणि हायड्रो अल्टरनेटर (Comparison: Turbo and Hydro Alternator):

Table 4.1: कॉम्पॅरिजन: टर्बो आणि हायड्रो अल्टरनेटर (Comparison: Turbo and Hydro Alternator)

फीचर्स (Feature)	टर्बो अल्टरनेटर (Turbo Alternator)	हायड्रो अल्टरनेटर (Hydro Alternator)
ॲप्लिकेशन (Application)	थर्मल (Thermal) व न्यूक्लिअर (Nuclear) पॉवर प्लांटमध्ये वापर	हायड्रोइलेक्ट्रिक (Hydroelectric) पॉवर स्टेशनमध्ये वापर
स्पीड (Speed)	हाय स्पीड (High Speed) – 3000 किंवा 3600 आरपीएम (RPM) (सिंक्रोनस स्पीड - Synchronous Speed)	कमी स्पीड (Low Speed) – साधारणतः 100 ते 1000 आरपीएम (Rpm)
साईज ॲण्ड शेप (Size And Shape)	लांबट आणि अरुंद – सिलिंडरकल रोटर (Cylindrical Rotor)	छोटा आणि मोठा व्यास – सॅलिअन्ट पोल रोटर (Salient Pole Rotor)
रोटर टाइप (Rotor Type)	नॉन-सॅलिअन्ट (Non-Salient) – सिलिंडरकल रोटर (Cylindrical Rotor)	सॅलिअन्ट पोल रोटर (Salient Pole Rotor)
पोल्सचे नंबर (Number Of Poles)	कमी पोल्स (Fewer Poles) – 2 किंवा 4	अधिक पोल्स (Many Poles) – कधी कधी 20 किंवा अधिक
कूलिंग मेथड (Cooling Method)	हायड्रोजन (Hydrogen) किंवा वॉटर कूलिंग (Water Cooling) – हाय क्षमतेसाठी	सामान्यतः एअर कूलिंग (Air Cooling), मोठ्या युनिटसाठी वॉटर कूलिंग (Water Cooling)
इफिशियन्सी (Efficiency)	हाय इफिशन्सी (High Efficiency) – जास्त गती व घट्ट रचना	थोडीशी कमी इफिशन्सी – यांत्रिक मर्यादांमुळे
कन्स्ट्रक्शन कॉम्प्लेक्सिटी (Construction Complexity)	मजबूत (Robust) व अचूक बॅलन्सिंग (Balancing) आवश्यक	यांत्रिकदृष्ट्या सोपे, परंतु मोठा आकार ही एक अडचण
इंस्टॉलेशन (Installation)	हाय गतीमुळे मजबुत पाया (Reinforced Foundation) लागतो	मोठ्या वजनामुळे मोठा बेस (Larger Base) लागतो
ऑपरेशन एन्व्हायर्नमेंट (Operation Environment)	इनडोअर (Indoor) व कंट्रोल वातावरण	पाण्याजवळ (Near Water Sources) – अधिक पर्यावरणीय बदल सहन करावे लागतात

4.2 टर्बो अल्टरनेटरस्: रोटेटिंग फील्डचे ॲडव्हान्टेजेस (Turbo Alternators: Advantages of Rotating Field):

a) **हाय व्होल्टेज आणि करंट इफिशियंट हँडलिंग (Efficient Handling of High Voltage and Current):** आर्मेचर वाइंडिंग (Armature Winding) ही स्टेशनरी (Stationary) असते, त्यामुळे हाय

पॉवर आउटपुट सर्किट्सना (High-Power Output Circuits) इन्सुलेट (Insulate) आणि कूल (Cool) करणे सोपे जाते.

b) **स्लिप रिंगद्वारे लो पॉवर ट्रान्सफर (Low Power Through Slip Rings):** फक्त थोडासा डीसी एक्ससाइटेशन करंट (DC Excitation Current) रोटरला (Rotor) पुरवला जातो, त्यामुळे स्लिप रिंग्स (Slip Rings) कमी घर्षणासह (Low Wear) वापरली जातात

c) **बेटर मेकॅनिकल स्ट्रेंथ (Better Mechanical Strength):** सिलिंड्रिकल रोटर (Cylindrical Rotor) हा सिमेट्रिकल (Symmetrical) आणि वेल-बॅलन्स्ड (Well-Balanced) असतो, जो हाय-स्पीड ऑपरेशन्स (High-Speed Operations) साठी (उदा. 3000 RPM) योग्य असतो.

d) **इम्प्रूव्ह्ड कुलिंग (Improved Cooling):** स्टेशनरी स्टेटर वाइंडिंग्ज (Stationary Stator Windings) ला एअर, हायड्रोजन किंवा वॉटर कुलिंग सिस्टीम्स (Air, Hydrogen or Water Cooling Systems) चा वापर करून प्रभावीपणे कूल (Cool) करता येते.

e) **सिम्प्लिफाइड मेंटेनन्स (Simplified Maintenance):** स्टेशनरी आर्मेचर वाइंडिंग (Stationary Armature Winding) ला इंस्पेक्शन (Inspection) आणि रिपेअर (Repair) साठी सहज पोहोचता येते.

f) **लार्ज पॉवर आउटपुटला सपोर्ट (Supports Large Power Output):** लार्ज करंट्सना रोटेटिंग पार्ट्स (Rotating Parts) मधून ट्रान्सफर (Transfer) करायची गरज नसल्यामुळे, हे लार्ज स्केल जनरेशन (Large-Scale Generation) साठी अतिशय योग्य ठरते.

4.3 स्पीड ॲन्ड फ्रिक्वेन्सी यांचे रिलेशन (Relation for Speed and Frequency): थ्री-फेज अल्टरनेटरमध्ये (Three-Phase Alternator), निर्माण होणाऱ्या व्होल्टेजची फ्रिक्वेन्सी (Frequency of Generated Voltage) ही रोटेशन स्पीड (Speed of Rotation) आणि फील्ड पोल्सची संख्या (Number of Field Poles) यावर अवलंबून असते.

लेट,

N = रोटेशन स्पीड आरपीएममध्ये (Speed of rotation in RPM)

P = फील्ड पोल्सची संख्या (Number of field poles)

तेव्हा, फ्रिक्वेन्सीचे ईक़्वेशन (Frequency of generated voltage) खालीलप्रमाणे आहे:

$F = N \times P / 120$ Hz

टीप: इथे N ही सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) आहे, कारण अल्टरनेटर (Alternator) ही सिंक्रोनस मशीन (Synchronous Machine) आहे. ज्यामध्ये रोटर (Rotor) नेहमी सिंक्रोनस स्पीडने फिरतो.

4.4 वाइंडिंग (Winding): शॉर्ट पिच्ड वाइंडिंगचे ॲडव्हान्टेजेस (Advantages of Short Pitched Winding), पिच फॅक्टर व डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टरसाठी रिलेशन (Relations for Pitch Factor and Distribution Factor)

4.4.1 शॉर्ट-पिच्ड वाइंडिंगचे ॲडव्हान्टेजेस (Advantages of Short Pitched Winding):

अॅक्चुअल वापरात, शॉर्ट-पिच कॉइल्स (Short Pitch Coils) वापरल्या जातात, कारण त्याचे खालील फायदे आहेत:

a) कॉइल्ससाठी लागणाऱ्या एंड कनेक्शन्सची लांबी (Length of End Connections) कमी असते, म्हणजेच इनअॅक्टिव्ह वाइंडिंग लांबी (Inactive Length of Winding) कमी असते. त्यामुळे कॉपर (Copper) कमी लागतो आणि एकूण खर्चात बचत होते. म्हणून हे आर्थिकदृष्ट्या फायदेशीर (Economical) ठरते.

b) शॉर्ट-पिचिंग (Short Pitching) मुळे हाय फ्रिक्वेन्सी हार्मोनिक्स (High Frequency Harmonics) दूर होतात, जे ईएमएफ (EMF) च्या साइनसॉइडल (Sinusoidal) नेचरला बिघडवतात. त्यामुळे निर्माण होणाऱ्या ईएमएफचे वेव्हफॉर्म (EMF Waveform) अधिक साइनसॉइडल स्वरूपाचे होते.

c) कारण हाय फ्रिक्वेन्सी हार्मोनिक्स (High Frequency Harmonics) नष्ट होतात, त्यामुळे त्यावर अवलंबून असणारे एडी करंट (Eddy Current) आणि हिस्टेरेसिस लॉसेस (Hysteresis Losses) सुद्धा कमी होतात. यामुळे इफिशियन्सी (Efficiency) वाढते.

4.4.2 पिच फॅक्टर व डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टरसाठी रिलेशन (Relations for Pitch Factor and Distribution Factor):

a) पिच फॅक्टर ऑर कॉइल स्पॅन फॅक्टर (Pitch Factor or Coil Span Factor-Kp or Kc): प्रात्यक्षिक वापरात, शॉर्ट-पिच्ड कॉइल्स (Short Pitch Coils) प्राधान्याने वापरल्या जातात. त्यामुळे कॉइल तयार करताना, एका कॉइल साइडला दुसऱ्या कॉइल साइडशी जोडले जाते, जे एका पोल पिचपेक्षा (Pole Pitch) थोडेसे कमी अंतरावर असते. म्हणूनच, प्रत्यक्ष कॉइल स्पॅन (Coil Span) हा 180° पेक्षा कमी असतो. सहसा कॉइल एक किंवा दोन स्लॉटने (Slots) कमी केली जाते.

महत्त्वाचा मुद्दा (Key Point): कॉइल्स ज्या अँगलने (Angle) शॉर्ट पिच केल्या जातात, त्या अँगलला शॉर्ट पिच अँगल (Short Pitch Angle) म्हणतात आणि तो 'α' (alpha) ने दर्शविला जातो.

α=तो अँगल (Angle) ज्याने कॉइल्स शॉर्ट पिच केल्या जातात

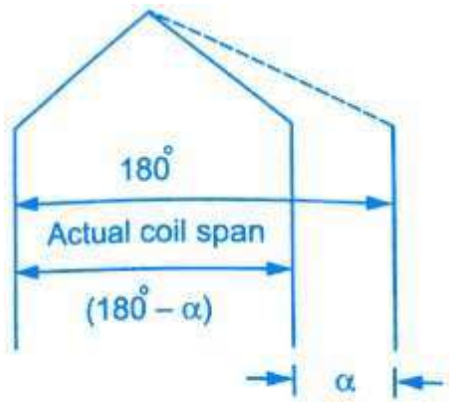


Fig 4.6: शॉर्ट पिच अँगल (Angle of Short Pitch)

कॉइल्सना स्लॉट्सच्या (Slots) संख्येनुसार शॉर्ट केलं जातं, म्हणजेच, एक स्लॉट, दोन स्लॉट्स वगैरे. जर स्लॉट अँगल (Slot Angle) ला β (beta) असेल, तर शॉर्ट पिच अँगल (Short Pitch Angle) हा नेहमी त्या स्लॉट अँगलचा मल्टीपल (multiple) असतो.

$\alpha = \beta \times$ जितके स्लॉट्सने कॉइल शॉर्ट केली आहे (Number of slots by which coils are short pitched)

(किंवा)

α= (180°−कॉइलचा प्रत्यक्ष स्पॅन (Actual coil span))

पिच फॅक्टर (Kp किंवा Kc): जेव्हा कॉइल शॉर्ट पिच केली जाते, तेव्हा मिळणाऱ्या रिजल्टंट ईएमएफ (Resultant EMF) आणि फुल पिच कॉइलमधून मिळणाऱ्या रिजल्टंट ईएमएफ यांचा रेशोला पिच फॅक्टर (Kp किंवा Kc) म्हणतात .हा नेहमी 1 पेक्षा कमी असतो.

$$Kp \text{ किंवा } Kc = \frac{\text{फुल पिच वाइंडिंगमधील ईएमएफ (EMF induced in full pitch winding)}}{\text{शॉर्ट पिच वाइंडिंगमधील ईएमएफ(EMF induced in short pitch winding)}}$$

= 2E{ cos (α/2**) / 2E}**

= 2E cos (α/2)

b) डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टर (Distribution Factor – Kd): फुल पिच कॉइल्स (Full Pitch Coils) प्रमाणेच, कन्सन्ट्रेटेड वाइंडिंग (Concentrated Winding) सुद्धा प्रत्यक्षात फारशी वापरली जात नाही.प्रत्येक पोल (Pole) खाली उपलब्ध असलेल्या सर्व स्लॉट्स (Slots) वापरण्याचा प्रयत्न केला जातो, ज्यामुळे निर्माण होणारे ईएमएफ (EMF) अधिक साइनसॉइडल (Sinusoidal) स्वरूपाचे होते. अशा वाइंडिंगला डिस्ट्रीब्युटेड वाइंडिंग (Distributed Winding) म्हणतात.

उदाहरणार्थ, समजा एक18 स्लॉट्स (Slots) आणि 2 पोल्स (Poles) असलेला अल्टरनेटर आहे.

म्हणून:

स्लॉट्स पर पोल (Slots per pole) = n=9

प्रत्येक फेजसाठी स्लॉट्स पर पोल (Slots per pole per phase) = m=3

स्लॉट अँगल (Slot Angle) β = 180°/9 = 20°

डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टर (Distribution Factor – Kd): जेव्हा कॉइल्स डिस्ट्रीब्युटेड असतात, तेव्हा मिळणाऱ्या रिजल्टंट ईएमएफ (Resultant EMF) आणि कॉइल्स कन्सन्ट्रेटेड असताना मिळणाऱ्या रिजल्टंट ईएमएफ यांच्या रेशोला डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टर (Distribution Factor – Kd) म्हणतात.

हा फॅक्टर नेहमी 1 पेक्षा कमी असतो.

$$K_d = \frac{Emf\ with\ distribured\ winding}{Emf\ with\ concentrated\ winding} \qquad \textbf{OR}$$

$$K_d = \frac{Phasor\ sum\ of\ coil\ emf\ /phase}{Arithmetic\ sum\ of\ coil\ emf\ /phase}$$

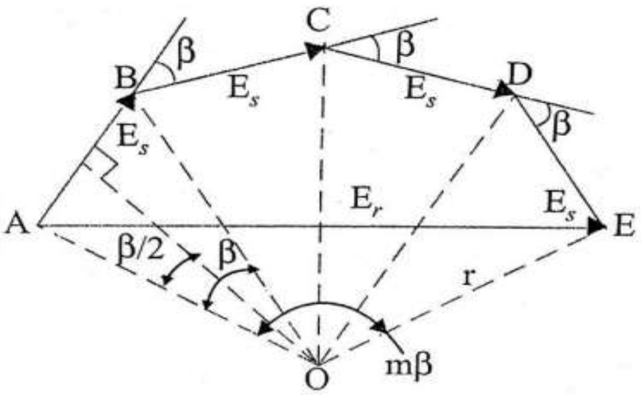
$$\beta = \frac{180°}{\text{No. of slots/pole}} = \frac{180°}{n}$$

म्हणून, एका पोलर ग्रुपमध्ये (Polar Group) निर्माण होणारा एकूण (रिजल्टंट) व्होल्टेज (Voltage) =m*Es

Es= एका कॉइल साइडमध्ये (Coil Side) निर्माण होणारा व्होल्टेज

m = प्रत्येक फेजसाठी स्लॉट्स पर पोल (Slots per pole per phase)

खालील आकृती (Figure) 'm' व्होल्टेजेस (Voltages), Es, त्यांच्यामध्ये फेज डिफरन्स (Phase Difference) β° आहे, यांचा व्हेक्टर सम (Vector Sum) कसा शोधायचा हे दाखवते.जर m ची व्ह्याल्यु मोठी असेल, तर त्या व्होल्टेज व्हेक्टर्सचे टोक (Tips of Vectors) जोडून तयार होणारी ABCED कर्व ही एका सर्कल चा भाग बनते ज्याची रेडीयस r असेल.



AB = Es = 2r sin(β/2)

The arithmetic sum = m E_S = m× 2r sin(β/2)

The vector sum AE= E_r = 2r sin(mβ/2)

∴ The distribution factor (Kd) is proved as,

$$K_d = \frac{\text{Vector or phasor sum of coil emfs}}{\text{Arithmetic sum of coil emfs}} = \frac{2r\sin(\frac{m\beta}{2})}{m\times 2r\sin(\frac{\beta}{2})}$$

$$\therefore K_d = \frac{\sin(\frac{m\beta}{2})}{m\times\sin(\frac{\beta}{2})}$$

उदाहरण क्र. 1: 36 स्लॉट्स (Slots), 4 पोल्स (Poles), सिंगल लेयर (Single Layer), थ्री-फेज (Three Phase) विंडिंग (Winding) साठी डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टर (Distribution Factor) काढा.

Solution:

$$n = \text{slots/pole} = 36/4 = 9$$

$$m = \text{slots/pole/phase} = n/3 = 3 \quad \text{and} \quad \beta = \frac{180°}{n} = \frac{180°}{9} = 20°$$

$$K_d = \frac{\sin\frac{m\beta}{2}}{m\sin\frac{\beta}{2}} = \frac{\sin\frac{20°\times 3}{2}}{3\sin\frac{20°}{2}} = \mathbf{0.9598}$$

4.5 एक्ससाइटेशन सिस्टिम (Excitation System):

डेफिनिशन (Definition): जी प्रणाली सिंक्रोनस मशीन (Synchronous Machine) च्या रोटर वाइंडिंग (Rotor Winding) ला आवश्यक ती फील्ड करंट (Field Current) पुरवते, अशा प्रणालीस एक्ससाइटेशन सिस्टिम (Excitation System) असे म्हणतात. दुसऱ्या शब्दांत सांगायचे तर, फील्ड वाइंडिंग (Field Winding) मध्ये करंट (Current) पास करून फ्लक्स (Flux) निर्माण करणारी प्रणाली म्हणजे एक्ससाइटेशन सिस्टिम (Excitation System) होय. थ्री-फेज अल्टरनेटर (Three-Phase Alternator) मध्ये, एक्ससाइटेशन सिस्टिम रोटरच्या फील्ड वाइंडिंगला आवश्यक डायरेक्ट करंट (DC - Direct Current) पुरवते, ज्यामुळे विद्युत पॉवर निर्माण करण्यासाठी मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) तयार होते.

प्रमुख टाइप खालीलप्रमाणे आहेत:

a) DC एक्ससाइटेशन सिस्टिम (DC Excitation System)
b) AC एक्ससाइटेशन सिस्टिम (AC Excitation System)
c) स्टॅटिक एक्ससाइटेशन सिस्टिम (Static Excitation System)

1. **DC एक्ससाइटेशन सिस्टिम (DC Excitation System):**
   a) या प्रणालीमध्ये एक वेगळा डी.सी. जनरेटर (DC Generator) वापरला जातो, ज्याला एक्सायटर (Exciter) म्हणतात, आणि तो अल्टरनेटरच्या फील्ड वाइंडिंगसाठी (Field Winding) डी.सी. पॉवर पुरवतो.
   b) हा एक्सायटर (Exciter) अल्टरनेटरच्या शाफ्टने (Shaft) किंवा स्वतंत्र मोटरने (Motor) चालवला जाऊ शकतो.
   c) एक्सायटरचा आउटपुट (Output of Exciter) रेक्टिफाय (Rectify) करून ऑटोमॅटिक व्होल्टेज रेग्युलेटर (Automatic Voltage Regulator – AVR) द्वारे कंट्रोल केला जातो, जेणेकरून आवश्यक तेवढे व्होल्टेज (Voltage) कायम राखले जाऊ शकेल.

ॲडवांटेजेस (Advantages): सिंपल आणि रिलायबल (Simple and Reliable), वेल-इस्टॅब्लिश्ड टेक्नॉलॉजी (Well-established Technology)

डिसॲडवांटेजेस (Disadvantages): स्वतंत्र एक्सायटर (Exciter) लागतो, बल्की (Bulky) असतो आणि मेंटेनन्स (Maintenance) लागतो

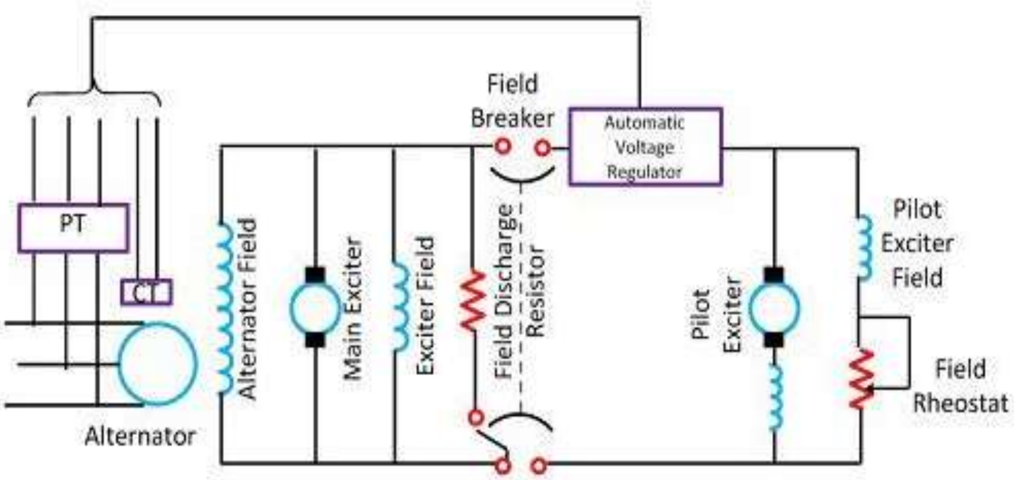


Fig 4.7: DC एक्ससाइटेशन सिस्टिम (D.C. Excitation System)

2. **ए.सी. एक्सायटेशन सिस्टीम (AC Excitation System):**
   a) या सिस्टीममध्ये एक ए.सी. एक्सायटर (AC Exciter) थेट अल्टरनेटरच्या फील्ड वाइंडिंगला (Field Winding) ए.सी. पॉवर (AC Power) पुरवतो.
   b) ए.सी. एक्सायटरचा आउटपुट (Output) रोटेटिंग रेक्टिफायर्स (Rotating Rectifiers)-म्हणजेच डायोड्स (Diodes) किंवा थायरिस्टर्स (Thyristors)- यांच्या सहाय्याने रेक्टिफाय (Rectify) केला जातो. हे रेक्टिफायर्स रोटर शाफ्टवर (Rotor Shaft) बसवलेले असतात.
   c) ही सिस्टीम सुद्धा ए.व्ही.आर. (AVR – Automatic Voltage Regulator) ने कंट्रोल केली जाते.

ॲडवांटेजेस (Advantages):
   a) हायर पॉवर आउटपुट (Higher Power Output)
   b) डी.सी. एक्सायटर्सच्या तुलनेत बॅटर ट्रान्झिएंट रिस्पॉन्स (Better Transient Response compared to DC Exciters)

डिसॲडवांटेजेस (Disadvantages):
   a) डी.सी. सिस्टीम्सपेक्षा कॉम्प्लेक्स. (More Complex than DC Systems)
   b) रोटेटिंग रेक्टिफायर्समुळे (Due to Rotating Rectifiers) हायअर लॉसेस होऊ शकतात.
   c) जास्त खर्चिक (More Expensive) असू शकते.

3. **स्टॅटिक एक्सायटेशन सिस्टीम (Static Excitation System):**
   a) या सिस्टीममध्ये एक स्टॅटिक (Static/Solid-State) रेक्टिफायर वापरला जातो जो अल्टरनेटरच्या आउटपुटमधून ए.सी. पॉवर (AC Power) घेऊन त्याला डी.सी. मध्ये कन्व्हर्ट (Convert to DC) करतो आणि फील्ड वाइंडिंगला (Field Winding) पुरवतो.
   b) एक ट्रान्सफॉर्मर (Transformer) अल्टरनेटरचा व्होल्टेज आवश्यक पातळीपर्यंत स्टेप डाउन (Step Down) करतो.

c) या रेक्टिफायरचा आउटपुट ए.व्ही.आर. (AVR) द्वारा फील्ड करंट (Field Current) कंट्रोल करण्यासाठी वापरला जातो.

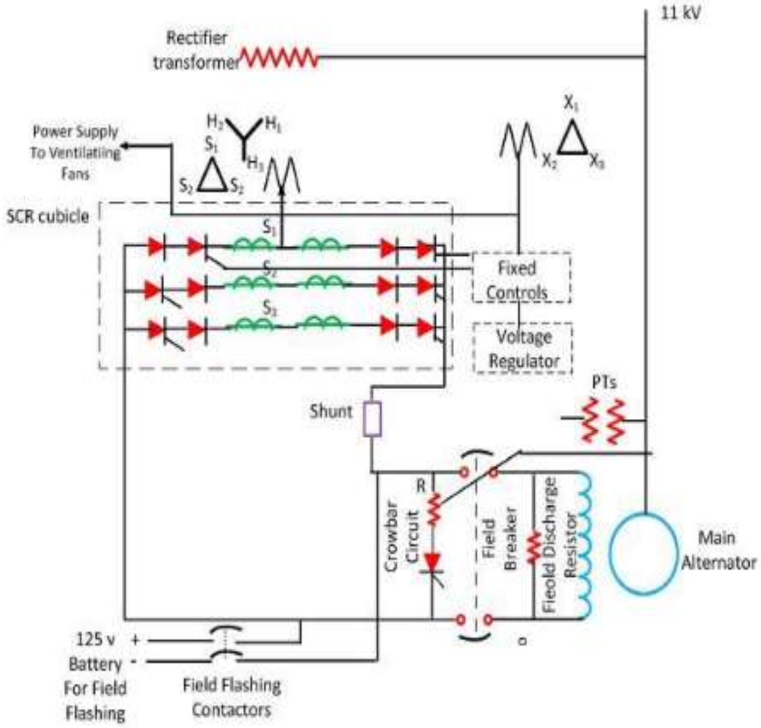


Fig 4.8: स्टॅटिक एक्सायटेशन सिस्टीम (Static Excitation System)

ॲडवांटेजेस (Advantages):

a) हाय एफिशियन्सी (High Efficiency)

b) फास्ट रिस्पॉन्स (Fast Response)

c) कॉम्पॅक्ट डिझाईन (Compact Design)

d) लो मेंटेनन्स (Low Maintenance)

डिसॲडवांटेजेस (Disadvantages):

a) डी.सी. सिस्टीम्सपेक्षा कॉम्प्लेक्स (More Complex than DC Systems)

b) इनिशियल कॉस्ट (Initial Cost) जास्त असू शकतो.

4.6 अल्टरनेटरचे ई.एम.एफ. इक्वेशन (E.M.F. Equation Of Alternator):

आपल्याला माहिती आहे की, सिंक्रोनस जनरेटर (Synchronous Generator) किंवा अल्टरनेटर (Alternator) एक इलेक्ट्रिकल एनर्जी तयार करण्यासाठी ईएमएफ (EMF) निर्माण करतो. खाली सिंक्रोनस जनरेटर किंवा अल्टरनेटरसाठी ई.एम.एफ. इक्वेशनचे डेरीवेशन (Derivation) दिले आहे.

गृहित धरा:

Φ = पर पोल फ्लक्स (Flux per pole), वेबर्समध्ये (Wb)

P = पोल्सची संख्या (Number of Poles)

N = सिंक्रोनस स्पीड आर.पी.एम मध्ये (Synchronous Speed in RPM)

f = इंड्यूस ईएमएफची फ्रिक्वेन्सि (Frequency of induced EMF) Hz मध्ये

Z = एकूण कंडक्टर्सची संख्या (Total Number of Conductors)

Zph = प्रत्येक फेजसाठी सिरीजमध्ये जोडलेले कंडक्टर्स

Zph = Z / 3 (कारण 3 फेजेस आहेत)

एक कंडक्टर एका स्लॉटमध्ये असल्याचे समजा,

एका कंडक्टरमध्ये इंड्यूस झालेल्या ईएमएफची अवरेज व्हयालू:

$E_{avg} = d\Phi/dt$

एका कंडक्टरच्या एका फुल रिवोल्युशणसाठी (One full revolution of conductor):

Eavg per conductor = (एक रिवोल्युशण मध्ये कट झालेला फ्लक्स) / (त्या रिवोल्युशणसाठी लागलेला टाईम)

एक रिवोल्युशणमध्ये कट झालेला टोटल फ्लक्स (Total Flux Cut) = $\Phi \times P$

त्या रिवोल्युशणसाठी लागलेला टाईम (Time for One Revolution) = 60 / Ns seconds

(इथे Ns = सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) in RPM)

E_{Avg} per conductor $= \Phi P / (60/N_s)$ …… (1)

$= \Phi P N_s/60$

But $f = PN_s/120$

Therefore $PN_s/60 = 2f$

Substation in (1),

E_{Avg} per conductor = 2 f Φ volts

सोपेपणासाठी फुल पिच वाइंडिंग (full pitch winding) गृहित धरले आहे, म्हणजे हा कंडक्टर (conductor) दुसऱ्या अशा कंडक्टरला जोडलेला आहे जो त्याच्या 180° इलेक्ट्रिकल अँगलने विरुद्ध बाजूस आहे. म्हणजेच हे दोन्ही ई.एम.एफ. एकाच डायरेक्शनने करंट निर्माण करण्याचा प्रयत्न करतात, म्हणजेच हे EMF एकमेकांना सपोर्ट करतात. म्हणून एका टर्नसाठी (Turn) रिझल्टंट ई.एम.एफ. (Resultant EMF) हे एका कंडक्टरमध्ये इंड्यूस झालेल्या EMF पेक्षा दुप्पट (twice) असेल.

EMF per turn = 2 x (EMF per conductor)

= 2 x (2 f Φ)

= 4 f Φ volts

Tph (Turns per Phase) म्हणजे प्रत्येक फेज (Phase) मध्ये सिरीजमध्ये जोडलेले एकूण टर्न्स (Turns). कॉन्सेंट्रेटेड वाइंडिंग (Concentrated Winding) गृहित धरल्यास, आपण असे म्हणू शकतो की हे सर्व टर्न्स (Turns) एका पोल (Pole) आणि फेज (Phase) साठी एका सिंगल स्लॉट (Single Slot) मध्ये ठेवलेले आहेत. म्हणून सर्व टर्न्समधील इंड्यूस्ड ईएमएफ (Induced EMF) एकाच फेज (Phase) मध्ये असते, कारण

ती सर्व एकाच स्लॉटमध्ये असतात. म्हणूनच, एकूण ईएमएफ (EMF) म्हणजे त्या सर्व टर्न्सच्या (Turns) ईएमएफ्सचा अल्जेब्रिक सम (Algebraic Sum) असेल.

Average Eph = Tph x (Average EMF per turn)

Average Eph = Tph x 4 f Φ

पण AC सर्किट्स (AC Circuits) मध्ये अल्टरनेटिंग क्वांटिटी (Alternating Quantity) चा RMS व्हॅल्यू (RMS Value) विश्लेषणासाठी वापरला जातो. जर EMFसायनसॉइडल स्वरूपाचा असेल, तर त्याचा फॉर्म फॅक्टर (Form Factor) 1.11 असतो.

Form Factor, Kf = (R.M.S.)/Average = 1.11 .... for sinusoidal

R.M.S. value of Eph = Kf x Average value

Therefore, **E = 4.44 x f Φ Tph volts** **.............** (2)

नोट (Note): हे इंड्यूस्ड EMF (induced EMF) चे बेसिक इक्वेशन (Equation) आहे, जे फुल पिच (Full Pitch) आणि कॉन्सन्ट्रेटेड टाइप वाइंडिंग (Concentrated Type Of Winding) साठी प्रति फेज (Phase) इंड्यूस होणाऱ्या EMF साठी वापरली जाते.

पण जसं पूर्वी नमूद केलं आहे, अल्टरनेटर (Alternator) साठी वापरली जाणारी वाइंडिंग (Winding) ही डिस्ट्रिब्युटेड (Distributed) आणि शॉर्ट पिच (Short Pitch) प्रकाराची असते, त्यामुळे इंड्यूस्ड EMF (Induced EMF) वर थोडासा परिणाम होतो.

आता आपण डिस्ट्रिब्युटेड (Distributed) आणि शॉर्ट पिच (Short Pitch) प्रकाराच्या वाइंडिंग (Winding) चा EMF इक्वेशन (EMF Equation) वर होणारा परिणाम पाहूया.

म्हणून सिंक्रोनस जनरेटर किंवा अल्टरनेटर (Synchronous Generator Or Alternator) साठीचे जनरलाइज (Generalized) EMF इक्वेशन (EMF Equation) चे जनरलाइज (Generalized) खालीलप्रमाणे लिहिता येते:

Eph = 4.44 f ΦTph Kc Kd volts

पण फुल पिच कॉइल (Full Pitch Coil) साठी, Kc = 1 असतो आणि कॉन्सन्ट्रेटेड वाइंडिंग (Concentrated Winding) साठी Kd = 1 असतो.

4.7 सिंक्रोनस रिऍक्टन्स (Synchronous Reactance):

डेफिनिशन (Definition): लीकेज रिऍक्टन्स (Leakage Reactance - Xl) आणि आर्मेचर रिऍक्शन रिऍक्टन्स (Armature Reaction Reactance - Xa) यांचा मिळून जो एकत्रित परिणाम होतो, त्याला सिंक्रोनस रिऍक्टन्स (Synchronous Reactance - Xs) असे म्हणतात.

Xs = Xl + Xa

इथे:

Xl = लीकेज रिऍक्टन्स (Leakage Reactance) (म्हणजे अशा लीकेज फ्लक्स (leakage flux) मुळे निर्माण होणारा रिऍक्टन्स, जो संपूर्ण वाइंडिंगसोबत लिंक होत नाही)

Xa = आर्मेचर रिऍक्शन रिऍक्टन्स (Armature Reaction Reactance) (म्हणजे आर्मेचर फ्लक्स (Armature Flux) चा मुख्य फ्लक्स (Main Flux) वर होणारा परिणाम)

एक्सप्लेनेशन (Explanation): हा एक इमॅजिनरी रिऍक्टन्स (Imaginary Reactance) असते, जो आर्मेचर सर्किट (Armature Circuit) मधील व्होल्टेज इफेक्ट्स (Voltage Effects) लक्षात घेण्यासाठी वापरला जातो .हा व्होल्टेज इफेक्ट्स दोन घटकांमुळे होतात:ॲक्च्युअल आर्मेचर लीकेज रिऍक्टन्स (Actual Armature Leakage Reactance) आणि एअर गॅप फ्लक्स (Air Gap Flux) मध्ये आर्मेचर रिऍक्शन (Armature Reaction) मुळे होणारा बदलसिंक्रोनस रिऍक्टन्स (Synchronous Reactance) सहसा प्रत्येक फेज (Per Phase) मध्ये ओहम्स (Ohms) मध्ये व्यक्त केली जाते आणि ती सिंक्रोनस जनरेटर (Synchronous Generator) च्या पर फेज समतुल्य सर्किटमध्ये (Per-phase Equivalent Circuit) वापरली जाते.

4.8 आर्मेचर रिॲक्शन ॲट व्हेरियस पॉवर फॅक्टर्स (Armature Reaction at Various Power Factors):

जेव्हा लोड (Load) अल्टरनेटर (Alternator) ला जोडले जाते, तेव्हा अल्टरनेटरच्या आर्मेचर वाइंडिंगमध्ये (Armature Winding) करंट (Current) वाहतो. प्रत्येक करंट कॅरी करणारा कंडक्टर (Current-Carrying Conductor) स्वतःचा फ्लक्स (Flux) निर्माण करतो. म्हणूनच, जेव्हा आर्मेचर करंट वाहते, तेव्हा ते सुद्धा स्वतःचा फ्लक्स (Armature Flux) निर्माण करते. त्यामुळे एअर गॅपमध्ये (Air Gap) दोन टाइपचे फ्लक्स अस्तित्वात असतात: आर्मेचर करंटमुळे तयार होणारा फ्लक्स (Flux produced by Armature Current) आणि फिल्ड वाइंडिंगमुळे तयार होणारा मुख्य फ्लक्स (Main Flux produced by Field Winding)

टीप (Note): मुख्य फ्लक्स (Main Flux) वर आर्मेचर फ्लक्स (Armature Flux) चा जो परिणाम होतो – ज्यामुळे मुख्य फ्लक्सचे प्रमाण आणि वितरण (Magnitude and Distribution) बदलते – त्यालाच आर्मेचर रिॲक्शन (Armature Reaction) असे म्हणतात.

आर्मेचर रिॲक्शनचा प्रभाव फक्त आर्मेचर वाइंडिंगमधून वाहणाऱ्या करंटच्या प्रमाणावर (Magnitude of Armature Current) अवलंबून नसतो, तर लोडचा पॉवर फॅक्टर (Power Factor of the Load) काय आहे, यावरही तो अवलंबून असतो. आता आपण लोड पॉवर फॅक्टरच्या नेचरचा (Nature of Load Power Factor) आर्मेचर रिॲक्शनवर होणाऱ्या परिणामाचा अभ्यास (Study of Its Effect on Armature Reaction) करूया.

1. युनिटी पॉवर फॅक्टर लोड (Unity Power Factor Load):

a) एक प्युअर रेझिस्टिव्ह लोड (Purely Resistive Load) विचारात घ्या जो अल्टरनेटर (Alternator) ला जोडलेला आहे आणि ज्याचा पॉवर फॅक्टर (Power Factor) युनिटी (Unity) आहे. जेव्हा Eph (इंड्यूस्ड ई.एम.एफ.) Iaph (आर्मेचर करंट) वाहतो आणि लोडचा पॉवर फॅक्टर युनिटी आहे, तेव्हा Eph आणि Iph हे फेजमध्ये (In-Phase) असतात.

b) जर Φf (Main Flux) हा फिल्ड वाइंडिंगने (Field Winding) निर्माण केला असेल, जो Eph तयार करण्यास कारणीभूत आहे, तर Eph हा Φf च्या मागे 90° ने लॅग (Eph lags Φf by 90°) करतो. आता, जे आर्मेचर करंट (Ia) आहे ते एक आर्मेचर फ्लक्स (Φa) तयार करतो. Φa आणि Ia हे नेहमीच एकाच डायरेक्शनने असतात.

c) फेजर डायग्राम (Phasor Diagram) वरून स्पष्ट होते की Main Flux (Φf) आणि Armature Flux (Φa) यांच्यात 90° चा फेज डिफरन्स असतो.

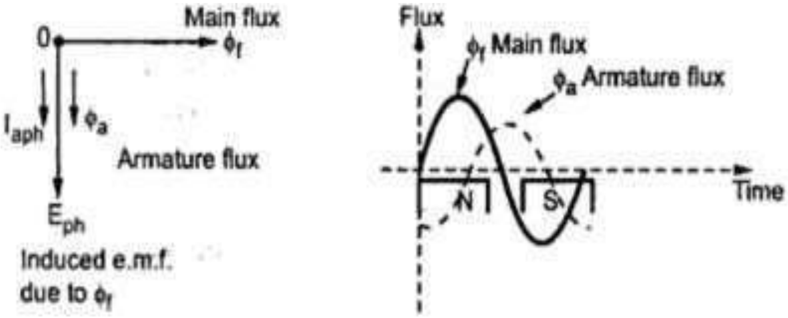


Fig 4.9: युनिटी पॉवर फॅक्टर लोड (Unity Power Factor Load)

d) वरील आकृतीमध्ये दोन फ्लक्सेसचे वेव्हफॉर्म्स (Waveforms of the Two Fluxes) दाखवलेले आहेत.त्या वेव्हफॉर्म्सवरून दिसते की:डाव्या अर्ध्या भागात (Left Half of Each Pole) – दोन्ही फ्लक्स एकमेकांना विरोध करतात (Oppose Each Other) आणि उजव्या अर्ध्या भागात (Right Half of Each Pole) – दोन्ही फ्लक्स एकमेकांना सहाय्य करतात (Assist Each Other) म्हणून, एअर गॅपमधील सरासरी फ्लक्स (Average Flux in Air Gap) स्थिर राहतो, पण त्याचे वितरण (Distribution) बिघडते.

टीप (Note): युनिटी पॉवर फॅक्टर असलेल्या लोडच्या परिस्थितीत आर्मेचर रिॲक्शनमुळे निर्माण होणारा हा डिस्टॉर्शन (Distorting Effect) क्रॉस मॅग्नेटायझिंग इफेक्ट (Cross Magnetizing Effect) म्हणून ओळखला जातो.

e) अशा टाइपच्या फ्लक्स डिस्टॉर्शनमुळे, अल्टरनेटरच्या टर्मिनल व्होल्टेजमध्ये थोडीशी घट (Small Drop in Terminal Voltage) होते.

2. झिरो लॅगिंग पॉवर फॅक्टर लोड (Zero Lagging Power Factor Load):

a) जर प्युअर इंडक्टिव्ह लोड (Purely Inductive Load) अल्टरनेटरला (Alternator) जोडलेला असेल, तर Iaph (Armature Current) — जो Eph (Induced EMF) मुळे वहातो आहे. तो Eph च्या 90° ने मागे (Lags Eph by 90°) असतो. हाच अँगल आहे पॉवर फॅक्टर अँगल Φ (Power Factor Angle Φ).

b) Eph हा मुख्य फ्लक्स Φf (Main Flux) च्या 90° ने मागे असतो. तर Φa (Armature Flux) ही Ia (Armature Current) च्याच डायरेक्शनने असते. हा संबंध फेसर डायग्राम (Phasor Diagram) व वेव्हफॉर्म्स (Waveforms) मधून दाखवला जातो.

c) फेसर डायग्रामवरून दिसते की Φa व Φf या दोन्ही फ्लक्सेस एकमेकांच्या नेमक्या विरुद्ध डायरेक्शनने (Opposite Directions) आहेत.

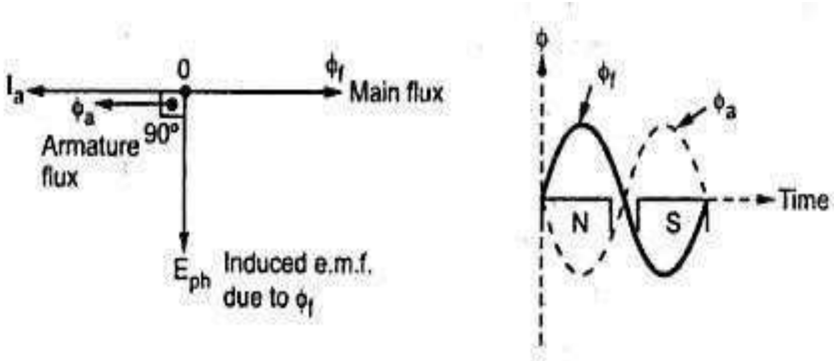


Fig 4.10: Zero Lagging Power Factor Load

d) टीप (Note): म्हणूनच, आर्मेचर फ्लक्स (Armature Flux) हे मुख्य फ्लक्स (Main Flux) ला कॅन्सल (Cancel) करण्याचा प्रयत्न करते.या टाइपच्या परिणामाला डीमॅग्नेटायझिंग इफेक्ट ऑफ आर्मेचर रिॲक्शन (Demagnetizing Effect of Armature Reaction) म्हणतात.

e) या प्रभावामुळे मुख्य फ्लक्स (Main Flux) कमी होतो, त्यामुळे टर्मिनल व्होल्टेज (Terminal Voltage) मध्ये घट होते. ही घट युनिटी पॉवर फॅक्टर (Unity Power Factor) लोडपेक्षा जास्त असते.

3. झिरो लीडिंग पॉवर फॅक्टर लोड (Zero Leading Power Factor Load):

a) जर एक प्युअर कॅपेसिटिव्ह लोड (purely capacitive load) अल्टरनेटरला (Alternator) जोडलेला असेल आणि त्याचा पॉवर फॅक्टर (power factor) झिरो लीडिंग (zero leading) असेल, तर Eph (induced EMF) मुळे निर्माण होणारा आर्मेचर करंट Iaph (Armature current) Eph च्या 90° ने पुढे (leads by 90°) असतो. हाच अँगल म्हणजे पॉवर फॅक्टर अँगल Φ (power factor angle Φ) आहे.

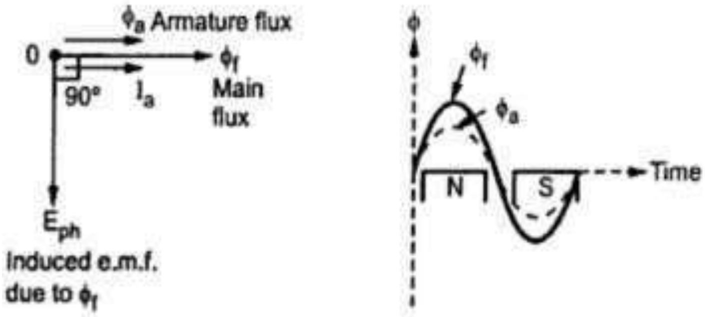


Fig 4.11: झिरो लीडिंग पॉवर फॅक्टर लोड (Zero Leading Power Factor Load)

b) Eph (EMF) हा मुख्य फ्लक्स Φf (main field flux) च्या ९०° ने मागे (lags by 90°) असतो, तर Iaph आणि त्यामधून निर्माण होणारा Φa (Armature Flux) हे नेहमीच समान डायरेक्शनने (same direction) असतात. फेजर डायग्राम (phasor diagram) आणि वेव्हफॉर्म्स (waveforms) खालील आकृतीमध्ये दाखवलेले आहेत.

c) फेजर डायग्राम व वेव्हफॉर्म्स मधून हे स्पष्ट होते की आर्मेचर फ्लक्स (Φa) आणि मुख्य फ्लक्स (Φf) हे दोन्ही समान डायरेक्शनने (Same Direction) आहेत.त्यामुळे हे दोन्ही एकमेकांना मदत (Assist) करतात, जे मुख्य फ्लक्समध्ये वाढ (Addition in Main Flux) घडवून आणते.

टीप (Note): आर्मेचर रिॲक्शनचा असा परिणाम जिथे आर्मेचर फ्लक्स, मुख्य फ्लक्सला सहाय्य (assist) करतो, त्याला मॅग्नेटायझिंग इफेक्ट ऑफ आर्मेचर रिॲक्शन (Magnetizing Effect of Armature Reaction) म्हणतात.

d) या मॅग्नेटायझिंग इफेक्ट मुळे मुख्य फ्लक्समध्ये वाढ होते आणि त्यामुळे आर्मेचर मध्ये जास्त EMF इंड्यूस (Greater EMF Induced) होते.परिणामी, लीडिंग पॉवर फॅक्टर लोडसाठी टर्मिनल व्होल्टेज (Terminal Voltage) मध्ये वाढ (Increase) होते.

e) इंटरमिजिएट पॉवर फॅक्टर लोड्स (Intermediate Power Factor Loads) म्हणजे झिरो लॅगिंग व झिरो लीडिंग यांच्या दरम्यान यामध्ये आर्मेचर रिॲक्शन, लॅगिंग लोडसाठी: पार्शियली क्रॉस मॅग्नेटायझिंग इफेक्ट (Partly Cross Magnetizing) आणि पार्शियली डीमॅग्नेटायझिंग इफेक्ट (Partly Demagnetizing) किंवा लीडिंग लोडसाठी पार्शियली मॅग्नेटायझिंग (Partly Magnetizing)असा मिश्र परिणाम (Combined Effect) दाखवतो.

4.9 व्होल्टेज रेग्युलेशन: डायरेक्ट लोडिंग मेथड आणि सिंक्रोनस इम्पीडन्स मेथड (Voltage Regulation: Direct Loading Method and synchronous impedance method):

डेफिनिशन (Definition): एखाद्या अल्टरनेटर (Alternator) किंवा सिंक्रोनस जनरेटर (Synchronous Generator) चे व्होल्टेज रेग्युलेशन (Voltage Regulation) म्हणजे टर्मिनल व्होल्टेज (Terminal Voltage) मध्ये होणारी वाढ, जेव्हा लोड पूर्ण क्षमतेवरून (Full-load rated value) शून्यावर आणले जाते, परंतु अल्टरनेटरचा स्पीड (Speed) आणि फील्ड करंट (Field Current) कायम ठेवला जातो.

दुसऱ्या शब्दांत: अल्टरनेटरचे व्होल्टेज रेग्युलेशन म्हणजे नो-लोड (No-load) ते फुल-लोड (Full-load) दरम्यानच्या टर्मिनल व्होल्टेजमधील बदल, जो फुल-लोड व्होल्टेजने भागलेला असतो.

पर युनिट व्होल्टेज रेग्युलेशन (Per Unit Voltage Regulation):

$$\textbf{Per unit voltage regulation} = \frac{\{(\text{Voltage at no load}) - (\text{Voltage at full load})\}}{\text{Voltage at full load}}$$

$$= \frac{\text{Eph} - \text{Vph}}{\text{Vph}}$$

$$\textbf{Percentage voltage Regulation} = \frac{\text{Eph} - \text{Vph}}{\text{Vph}} * 100$$

आयडियल व्होल्टेज रेग्युलेशन हे 0 % असते, म्हणजे लोड लावल्यावर कोणताही व्होल्टेज ड्रॉप होत नाही. प्रत्यक्षात, व्होल्टेज रेग्युलेशन जितके कमी असेल तितके चांगले.

फॅक्टर्स अफेक्टिंग ऑन व्होल्टेज रेग्युलेशन (Factors Affecting Voltage Regulation):

1. लोड करंटची व्ह्याल्यु (Value of Load Current): जास्त लोड करंट असल्यास, इंटरनल इम्पीडन्सवर (Internal Impedance) व्होल्टेज ड्रॉप जास्त होतो आणि रेग्युलेशन वाढते.
2. पॉवर फॅक्टरची व्ह्याल्यु (Value of Power Factor):
   लॅगिंग पॉवर फॅक्टर (Lagging Power Factor): व्होल्टेज ड्रॉप वाढतो, रेग्युलेशन खराब होते.
   लीडिंग पॉवर फॅक्टर (Leading Power Factor): व्होल्टेज ड्रॉप कमी होतो, कधी कधी निगेटिव्ह रेग्युलेशनही होऊ शकते.
   युनिटी पॉवर फॅक्टर (Unity Power Factor): मध्यम रेग्युलेशन.
3. लोडचा टाइप (Type of Load): रेसिस्टिव्ह (Resistive), इंडक्टिव्ह (Inductive), आणि कॅपेसिटिव्ह (Capacitive) लोड्स वेगवेगळ्या मेथडने व्होल्टेज ड्रॉपला प्रभावित करतात.

4.9.1 डायरेक्ट लोडिंग मेथड (Direct Loading Method):

a) डायरेक्ट लोड टेस्ट (Direct Load Test) मध्ये, अल्टरनेटर (Alternator) ला सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) ने चालवले जाते आणि त्याचा टर्मिनल व्होल्टेज (Terminal Voltage) त्याच्या रेटेड व्हॅल्यू (Rated Value) पर्यंत बदलला जातो (V).

b) यानंतर, लोड अशा प्रकारे बदलला जातो की टेस्ट सर्किटमध्ये जोडलेल्या ॲमीटर (Ammeter) आणि वॉटमीटर (Wattmeter) वर दिलेल्या पॉवर फॅक्टर (Power Factor) वर रेटेड व्हॅल्यू दर्शविल्या जातात.

c) त्यानंतर लोड पूर्णपणे कमी केला जातो आणि अल्टरनेटरचा स्पीड आणि फील्ड एक्साइटेशन (Field Excitation) स्थिर ठेवले जाते. अशा परिस्थितीत, अल्टरनेटरचा नो-लोड व्होल्टेज (Ea) नोंदवला जातो.

d) या नोंदवलेल्या व्हॅल्यूजचा वापर करून व्होल्टेज रेग्युलेशन (Voltage Regulation) खालील सूत्राने काढले जाते:

Percentage voltage Regulation $= \frac{\mathbf{Eph - Vph}}{\mathrm{Vph}} * 100$

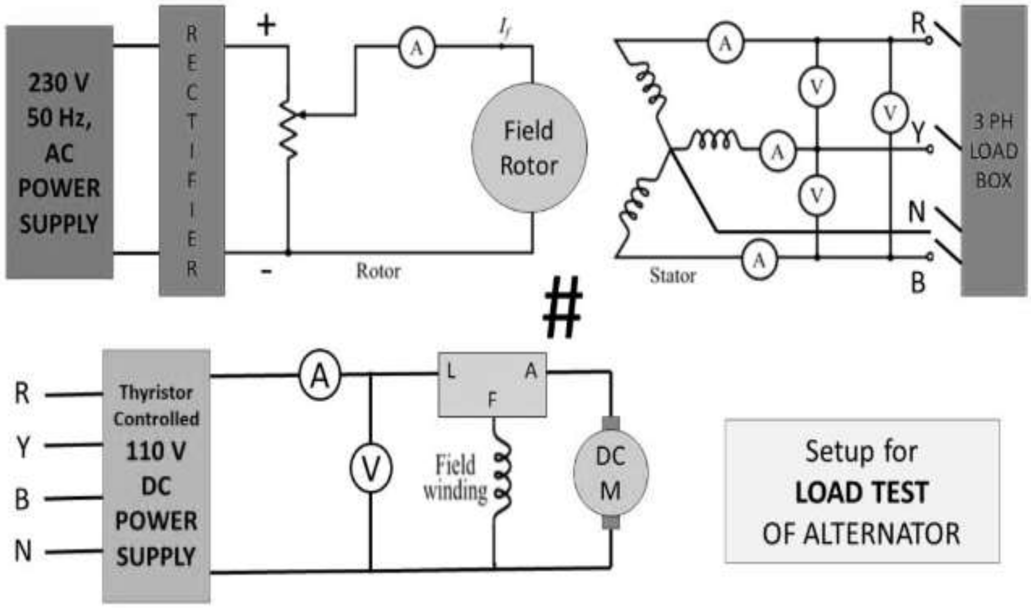


Fig 4.12: डायरेक्ट लोड टेस्ट सर्किट डायग्राम (Circuit diagram of direct load test)

टीप: ही डायरेक्ट लोड टेस्ट फक्त 5 kVA पेक्षा कमी क्षमतेच्या लहान अल्टरनेटरसाठी (Small Alternators of power rating less than 5 kVA) योग्य असते.

4.9.2 सिंक्रोनस इम्पीडन्स मेथड (Synchronous Impedance Method):

सिंक्रोनस इम्पीडन्स मेथड (Synchronous Impedance Method) किंवा ईएमएफ मेथड (EMF Method) वापरून मोठ्या क्षमतेच्या अल्टरनेटरचे (Large Alternators) व्होल्टेज रेग्युलेशन (Voltage Regulation) निश्चित केले जाते. ही पद्धत आर्मेचर रिऍक्शनचा (Armature Reaction) परिणाम एका इम्याजिनरी रिऍक्टन्सने (Imaginary Reactance) दर्शवून वापरात येते.

अल्टरनेटरसाठी सूत्र:

$$V = Ea - IaZs$$

$$= Ea - Ia(Ra + jXs) \quad \ldots(1)$$

सुरुवातीला, अल्टरनेटरची सिंक्रोनस इम्पीडन्स (Zs) मोजली जाते. त्यानंतर प्रत्यक्ष जनरेटेड ईएमएफ (Ea) ची व्ह्यालयु वरील समीकरणाद्वारे काढली जाते.अशा प्रकारे Ea आणि V यांच्या मदतीने व्होल्टेज रेग्युलेशन (Voltage Regulation) काढता येते.

सिंक्रोनस इम्पीडन्स मेजरमेंट (Measurement of Synchronous Impedance):

सिंक्रोनस इम्पीडन्स (Synchronous Impedance) ची किंमत ठरवण्यासाठी खालील चाचण्या (Tests) अल्टरनेटरवर घेतल्या जातात:

1. डी.सी. रेझिस्टन्स टेस्ट (D.C. Resistance Test)
2. ओपन सर्किट टेस्ट (Open Circuit Test)
3. शॉर्ट सर्किट टेस्ट (Short Circuit Test)

1. डी.सी. रेझिस्टन्स टेस्ट (D.C. Resistance Test):

a) समजा अल्टरनेटर हे स्टार-कनेक्टेड (Star-Connected) आहे आणि फील्ड वाइंडिंग (Field Winding) ओपन-सर्किटेड (Open-Circuited) आहे. आता, प्रत्येक जोडलेल्या टर्मिनल्समधील डी.सी. रेझिस्टन्स (DC Resistance), व्हीटस्टोन ब्रिज (Wheatstone's Bridge) वापरून किंवा ॲमीटर-वोल्टमीटर मेथड (Ammeter-Voltmeter Method) वापरून मोजा.

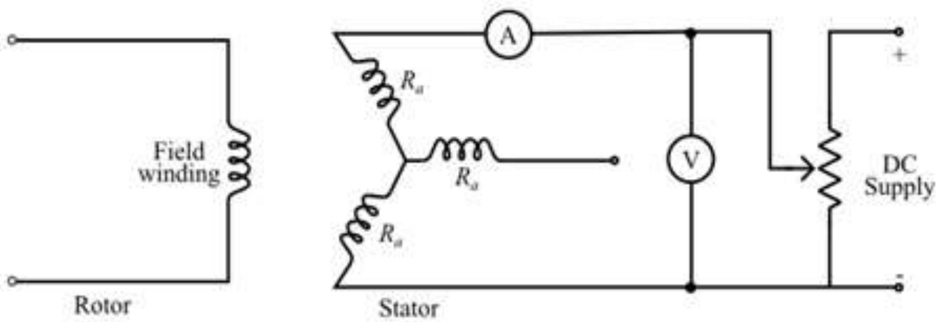


Fig 4.13: डी.सी. रेझिस्टन्स टेस्ट (D.C. Resistance Test)

b) घेतलेल्या तीन रेझिस्टन्स व्हॅल्यूज (Resistance Values) चा सरासरी (Average) Rt म्हणून घेतला जातो.ही Rt ची व्हॅल्यू 2 ने भागून, प्रत्येक फेजसाठी डी.सी. रेझिस्टन्स (DC Resistance per Phase) मिळते.

c) टेस्ट करताना अल्टरनेटर (Alternator) स्थिर (At Rest) असावा, कारण ए.सी. इफेक्टिव्ह रेझिस्टन्स (AC Effective Resistance) ही डी.सी. रेझिस्टन्स (DC Resistance) पेक्षा जास्त असते,याचे कारण स्किन इफेक्ट (Skin Effect) आहे.

d) एका फेजसाठी ए.सी. इफेक्टिव्ह रेझिस्टन्स (AC Effective Resistance per Phase) खालीलप्रमाणे काढला जाऊ शकते:

AC Resistance=DC Resistance×फॅक्टर (Factor)

e) हा फॅक्टर 1.20 ते 1.75 च्या दरम्यान असतो, आणि तो अल्टरनेटरच्या साईझवर (Depending on the size of the alternator) अवलंबून असतो.

2. ओपन सर्किट टेस्ट (Open Circuit Test):

ओपन सर्किट टेस्ट (Open Circuit Test) करण्यासाठी, लोड टर्मिनल्स (Load Terminals) ओपन ठेवले जातात आणि अल्टरनेटर (Alternator) ला त्याच्या रेटेड सिंक्रोनस स्पीडने (Rated Synchronous Speed) चालवले जाते. सर्किट डायग्राम (Circuit Diagram) ओपन सर्किट टेस्टसाठी खालीलप्रमाणे असतो.

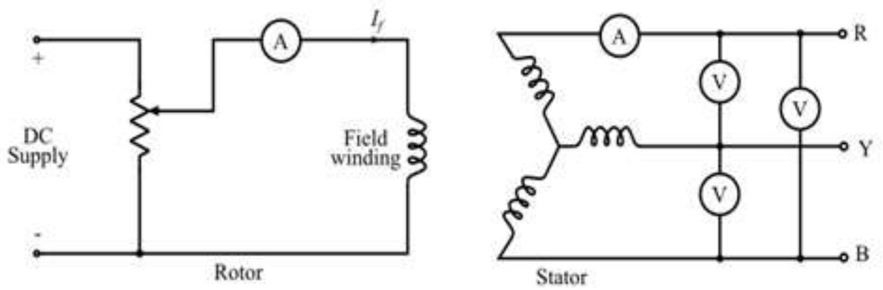
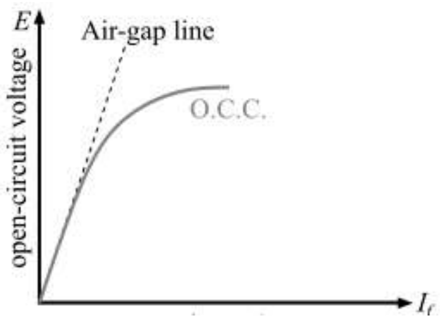


Fig 4.14: ओपन सर्किट टेस्ट (Open Circuit Test)

a) सुरुवातीला, फील्ड करंट (Field Current – If) शून्यावर सेट केला जातो. त्यानंतर, फील्ड करंट टप्प्याटप्प्याने वाढवला जातो आणि प्रत्येक स्टेपमध्ये ओपन सर्किट टर्मिनल व्होल्टेज (Et) मोजले जाते.

b) फील्ड करंट इतपत वाढवला जातो की, तो अल्टरनेटरच्या रेटेड व्होल्टेजपेक्षा (Rated Voltage) 25% अधिक व्होल्टेज (Voltage) निर्माण करू शकेल.

c) एक ग्राफ (Graph) काढला जातो, ज्यामध्ये ओपन सर्किट फेज व्होल्टेज (Open Circuit Phase Voltage) ($E_{ph} = E_t / \sqrt{3}$) आणि फील्ड करंट (If) यांच्यामध्ये संबंध दाखवला जातो. मिळणाऱ्या या कॅरॅक्टरिस्टिक कर्व्ह (Characteristic Curve) ला ओपन सर्किट कॅरॅक्टरिस्टिक्स (Open Circuit Characteristics – O.C.C.) म्हणतात.



d) O.C.C. चे स्वरूप (Shape) सामान्य मॅग्नेटायझेशन कर्व्ह (Magnetisation Curve) सारखे असते. जेव्हा या कर्व्हचा रेषात्मक भाग (Linear Portion) वाढवून एक्सटेंड केला जातो, तेव्हा त्याला एअर गॅप लाईन (Air Gap Line) म्हणले जाते, जी एक विशिष्ट वैशिष्ट्य दर्शवते.

3. शॉर्ट सर्किट टेस्ट (Short Circuit Test):

शॉर्ट सर्किट टेस्ट (Short Circuit Test) करण्यासाठी, आर्मेचर टर्मिनल्स (Armature Terminals) तीन ॲमीटरस (Ammeters) च्या माध्यमातून शॉर्ट सर्किट (Short-Circuited) केले जातात, जसे की फिगर (Figure) मध्ये दाखवले आहे.

a) अल्टरनेटर (Alternator) सुरू करण्यापूर्वी, फील्ड करंट (Field Current – If) शून्यावर कमी केला पाहिजे. प्रत्येक ॲमीटर (Ammeter) ची रेंज (Range) ही रेटेड फुल लोड व्हॅल्यू (Rated Full-Load Value) पेक्षा अधिक असावी. यानंतर, अल्टरनेटरला सिंक्रोनस स्पीडने (Synchronous Speed) चालवले जाते.

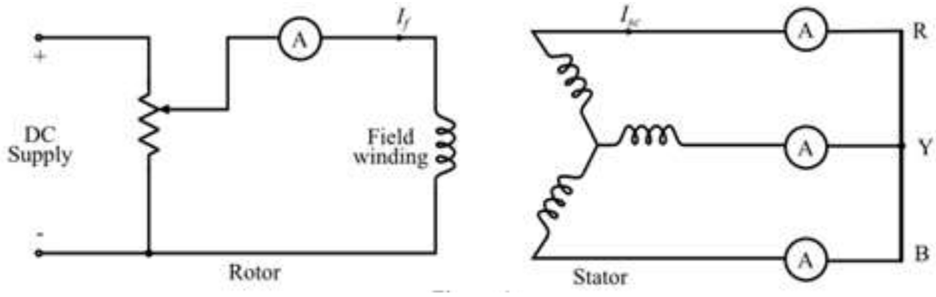
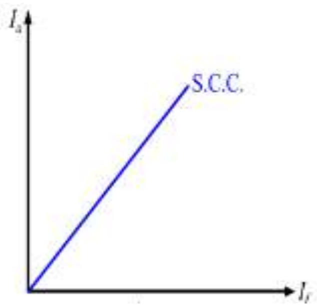


Fig 4.15: शॉर्ट सर्किट टेस्ट (Short Circuit Test)

b) त्यानंतर, फील्ड करंट (If) टप्प्याटप्प्याने वाढवला जातो आणि प्रत्येक स्टेपमध्ये आर्मेचर करंट (Armature Current) मोजला जातो. फील्ड करंट अशा पातळीपर्यंत वाढवता येतो की आर्मेचर करंट हे रेटेड व्हॅल्यूच्या १५०% पर्यंत जाऊ शकेल.

c) प्रत्येक स्टेपमध्ये, फील्ड करंट (If) आणि तीन ॲमीटर रीडिंग्सचा सरासरी (Average of Ammeter Readings) घेतला जातो. यानंतर, एक ग्राफ (Graph) काढला जातो, ज्यामध्ये आर्मेचर करंट (Ia) आणि फील्ड करंट (If) यांच्यातील संबंध दाखवले जातात.



d) मिळणारी ही कॅरॅक्टरिस्टिक शॉर्ट सर्किट कॅरॅक्टरिस्टिक (Short-Circuit Characteristic – S.C.C.) म्हणून ओळखली जाते, आणि ही सरळ रेषा (Straight Line) असते, जशी की फिगरमध्ये (In the Figure) दाखवली आहे.

4.10 अल्टरनेटरचे सिंक्रोनायझेशन: डेफिनिशन, नेसेसिटी ॲण्ड कंडिशन्स (Synchronisation of Alternators: Definition, Necessity and Conditions):

4.10.1 डेफिनिशन (Definition): अल्टरनेटरचे सिंक्रोनायझेशन (Synchronization) ही एक प्रक्रिया आहे ज्यामध्ये येणाऱ्या अल्टरनेटर (Alternator) चे इलेक्ट्रिक कॅरॅक्टरिस्टिक्स (Electric Characteristics) विद्यमान इलेक्ट्रिकल सिस्टीम (Electrical System) (उदा. ग्रीड (grid) किंवा दुसरा अल्टरनेटर (Alternator)) शी जुळवले जातात, जेणेकरून त्याला पॅरलल (Parallel) जोडता येईल.

4.10.2 नेसेसिटी (Necessity):

a) **स्टेबल पॉवर सप्लाय (Stable Power Supply):** सिंक्रोनायझेशन (Synchronization) मुळे येणारा अल्टरनेटर (Alternator) प्रणालीमध्ये फ्लक्च्युएशन्स (Fluctuations) किंवा डिस्रप्शन्स (Disruptions) निर्माण करत नाही.

b) **लोड शेअरिंग (Load Sharing):** अनेक अल्टरनेटरस् (Alternators) मध्ये इलेक्ट्रिकल डिमांड (Electrical Demand) चे कार्यक्षम वाटप (Distribution) करता येते.

c) **इन्क्रीज जनरेशन कॅपॅसिटी (Increased Generation Capacity):** अधिक डिमांड (Demand) असताना प्रणालीमध्ये अतिरिक्त अल्टरनेटरस् (Alternators) जोडता येतात.

d) **रिडंडन्सी (Redundancy):** एक अल्टरनेटर (Alternator) मेंटेनन्स (Maintenance) किंवा रिपेअर (Repair) साठी बंद असताना इतर अल्टरनेटरस् (Alternators) कार्यरत राहतात, त्यामुळे पॉवर सप्लाय (Power Supply) खंडीत होत नाही.

e) **रिड्युस्ड इलेक्ट्रिकल स्ट्रेस (Reduced Electrical Stress):** सर्व अल्टरनेटरस् (Alternators) जवळपास समान पॅरामिटर्स (Parameters) वर चालल्यामुळे इक्विपमेंट्स (Equipment) वर होणारा ताण कमी होतो.

4.10.3 कंडिशन्स (Conditions):

a) **ईक्वल टर्मिनल व्होल्टेज (Equal Terminal Voltage):** येणाऱ्या अल्टरनेटर (Alternator) चे टर्मिनल व्होल्टेज (Terminal Voltage) चालू बसबार (Busbar) च्या व्होल्टेज (Voltage) सारखे असावे.

b) **सेम फ्रीक्वेन्सी (Same Frequency):** येणाऱ्या अल्टरनेटर (Alternator) ची फ्रीक्वेन्सी (Frequency) विद्यमान बसबार (Busbar) किंवा चालू अल्टरनेटर (Alternator) शी जुळली पाहिजे.

c) **आयडेंटिकल फेज सिक्वेन्स (Identical Phase Sequence):** येणाऱ्या अल्टरनेटर (Alternator) ची फेज सिक्वेन्स (Phase Sequence) (उदा. R-Y-B किंवा B-R-Y) विद्यमान प्रणालीसारखीच असावी.

d) **झीरो फेज डिफरन्स (Zero Phase Difference):** जोडणीच्या वेळी येणाऱ्या अल्टरनेटर (Alternator) च्या व्होल्टेज (Voltage) आणि बसबार व्होल्टेज (Busbar Voltage) मधील फेज अँगल (Phase Angle) शक्यतो शून्य असावा.

e) **सिमिलर वेव्हफॉर्म (Similar Waveform):** आदर्श परिस्थितीत येणाऱ्या आणि चालू असलेल्या अल्टरनेटरस् (Alternators) चे वेव्हफॉर्म्स (Waveforms) एकसारखे असावेत.

4.11 थ्री फेज सिंक्रोनस मोटर: प्रिन्सिपल ऑफ ऑपरेशन,लोड अँगल सिग्निफिकन्स (Three phase synchronous motor: principle of operation, significance of load angle):

4.11.1 प्रिन्सिपल ऑफ ऑपरेशन (Principle of Operation): थ्री फेज सिंक्रोनस मोटर (Three-Phase Synchronous Motor) स्टेटरमध्ये (Stator) रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) तयार करते जे रोटरच्या (Rotor) मॅग्नेटिक फील्डशी (Magnetic Field) इंटरॅक्ट (Interact) करते आणि त्यामुळे रोटर (Rotor) त्याच सिंक्रोनस स्पीडने (Synchronous Speed) फिरतो.

कन्स्ट्रक्शन डिटेल्स (Constructional Details):

स्टेटर (Stator):

a) स्टेटर हा मोटरचा स्टेशनेरी पार्ट (Stationary Part) आहे आणि सिलिकॉन स्टीलच्या (Silicon Steel) लॅमिनेटेड कोर (Laminated Core) वापरून बनवलेला असतो, ज्यामुळे एडी करंट (Eddy Current) आणि हिस्टेरिसिस लॉसेस (Hysteresis Losses) कमी होतात.

b) यात थ्री फेज वाइंडिंग्स (Three-Phase Windings) असतात, जे सामान्यतः स्टार (Star) किंवा डेल्टा (Delta) कनेक्टेड असतात आणि रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) तयार करण्यासाठी डिझाईन केलेले असतात.

c) स्टेटर वाइंडिंग्स (Stator Windings) इन्सुलेटेड (Insulated) असतात जेणेकरून ते हाय व्होल्टेज (High Voltages) आणि करंट्स (Currents) सहन करू शकतील.

रोटर (Rotor):

a) रोटर हा मोटरचा रोटेटिंग पार्ट (Rotating Part) आहे आणि दोन प्रकारांचा असू शकतो: सॅलियंट पोल (Salient Pole) किंवा सिलेंड्रिकल (Cylindrical).

b) सॅलियंट पोल रोटर (Salient Pole Rotors): यामध्ये प्रत्येक पोलवर प्रोजेक्टिंग पोल्स (Projecting Poles) असतात, ज्यावर फील्ड वाइंडिंग्स (Field Windings) लावलेल्या असतात, आणि हे लो-स्पीड (Low-Speed) वापरासाठी योग्य असतात.

c) सिलेंड्रिकल रोटर (Cylindrical Rotors): यामध्ये स्मूथ सिलेंड्रिकल सरफेस (Smooth Cylindrical Surface) असतो आणि स्लॉट्समध्ये (Slots) फील्ड वाइंडिंग्स (Field Windings) बसवलेल्या असतात, जे सामान्यतः हाय-स्पीड (High-Speed) मोटर्समध्ये वापरले जातात.

d) रोटर फील्ड वाइंडिंग्सला (Rotor Field Winding) DC पॉवर (DC Power) पुरवली जाते, जी एक्स्टरनल DC सोर्सकडून (External DC Source) किंवा मोटर शाफ्टवर बसवलेल्या DC जनरेटरकडून (DC Generator) मिळते.

e) डॅम्पर वाइंडिंग्स (Damper Windings): रोटरमध्ये समाविष्ट असू शकतात, जे स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) देतात आणि ओसिलेशन(Oscillations) कमी करतात.

वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle):

a) समजा एक थ्री फेज दोन पोल्स सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motor) आहे, ज्यामध्ये दोन रोटर पोल्स (Rotor Poles) — N_R आणि S_R आहेत, जसे Figure-2 मध्ये दाखवले आहे. स्टेटर (Stator) देखील दोन पोल्ससाठी वाउंड (Wound) केलेला आहे — N_S आणि S_S. स्टेटर वाइंडिंग (Stator Winding) ला 3-फेज AC सप्लाय (AC Supply) दिला जातो आणि रोटर फील्ड वाइंडिंग (Rotor Field Winding) ला DC व्होल्टेज (DC Voltage) दिला जातो.

b) स्टेटर वाइंडिंग (Stator Winding) एक रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड (Rotating Magnetic Field) तयार करते, जे स्टेटर (Stator) च्या भोवती सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) ने फिरते. रोटर (Rotor) ला दिलेला DC व्होल्टेज (DC Voltage) एक टू-पोल फिल्ड (Two-pole Field) तयार करतो, जोपर्यंत रोटर (Rotor) सुरू होत नाही तोपर्यंत तो स्थिर राहतो. या अवस्थेत, एक रिव्हॉल्विंग स्टेटर

पोल पेअर (Revolving Stator Pole Pair)- Ns - Ss आणि एक स्टॅशनरी रोटर पोल पेअर (Stationary Rotor Pole Pair) —NR - SR अस्तित्वात असतात.

c) समजा एका क्षणी स्टेटर पोल्स (Stator Poles) Figure-2 (Figure-2) प्रमाणे स्थित आहेत. त्या वेळी Ns आणि NR हे पोल्स एकमेकांना रिपेल (Repel) करतात आणि Ss आणि SR देखील रिपेल (Repel) करतात. त्यामुळे रोटर (Rotor) वर अँटी-क्लॉकवाइज डायरेक्शन (Anticlockwise Direction) मध्ये टॉर्क (Torque) निर्माण होतो.

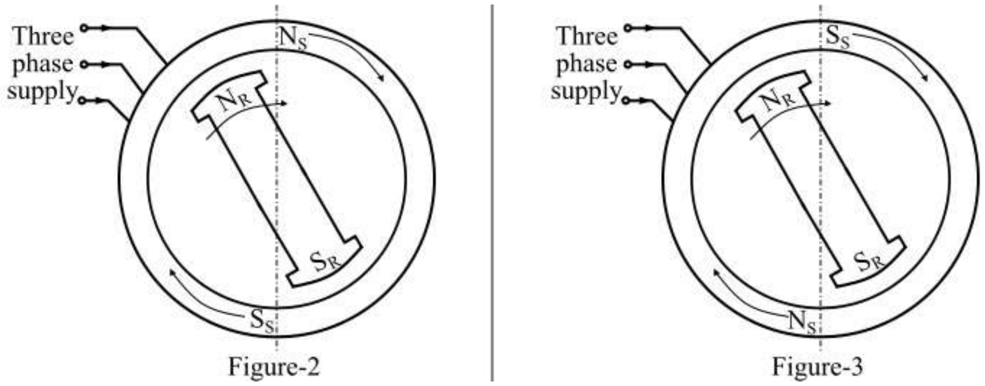


Fig 4.16: सिंक्रोनस मशीनचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working principle of 3 phase synchronous machine)

d) हाफ AC सप्लाय सायकल (AC Supply Cycle) नंतर, स्टेटर पोल्स (Stator Poles) ची पोलॅरिटी (Polarity) उलटते, पण रोटर पोल्स (Rotor Poles) ची पोलॅरिटी (Polarity) तीच राहते, जसे Figure-3 (Figure-3) मध्ये दाखवले आहे. आता Ss आणि NR एकमेकांना अॅट्रॅक्ट (Attract) करतात आणि Ns आणि SR देखील एकमेकांना अॅट्रॅक्ट (Attract) करतात. त्यामुळे रोटर (Rotor) क्लॉकवाइज डायरेक्शन (Clockwise Direction) मध्ये फिरण्याचा प्रयत्न करतो.

e) कारण स्टेटर पोल्स (Stator Poles) सतत त्यांची पोलॅरिटी (Polarity) बदलत असतात, त्यामुळे ते रोटर (Rotor) ला आधी एका डायरेक्शनने आणि नंतर दुसऱ्या डायरेक्शनने खेचतात. पण रोटर (Rotor) ची इनर्शिया (Inertia) जास्त असल्यामुळे तो हलत नाही आणि म्हणून स्टार्टिंग टॉर्क (Starting Torque) शून्य असतो. म्हणजेच, सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motor) ही सेल्फ-स्टार्टिंग (Self-starting) नसते.

अॅडव्हांटेजेस (Advantages):

a) सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motor) कॉनस्टंट स्पीडने (Constant Speed) फिरते, ज्यामुळे स्थिर आणि अचूक स्पीड मिळतो.

b) सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motors) बहुतेक वेळा हाय एफिशियन्सी ने (High Efficiency) चालते, ज्यामुळे ऑपरेशन कॉस्ट कमी होतो आणि एनर्जी वाचते.

c) एक्सायटेशन (Excitation) कंट्रोल करून, सिंक्रोनस मोटरचा (Synchronous Motors) लीडिंग पॉवर फॅक्टर (Leading Power Factor) मिळवता येतो.

d) या मोटरमध्ये कमी टॉर्क रिपल (Torque Ripple) असतो आणि ते अधिक सुरळीत चालतात, ज्यामुळे मेकॅनिकल वायब्रेशन (Mechanical Vibrations) कमी होतात आणि स्थिर, शांत ऑपरेशन शक्य होते.

e) सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motors) विविध उद्योगांमध्ये विद्युत पावर (Electrical Power) आणि औद्योगिक यंत्रसामग्री (Industrial Machinery) उत्पादनासाठी वापरल्या जातात.

अप्लिकेशन्स (Applications):

a) बहुतेक वेळा विद्युत् ऊर्जा (Electrical Energy) मध्ये यांत्रिक ऊर्जा (Mechanical Energy) कन्वर्ट करण्यासाठी सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motors) वापरतात.

b) सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motors) अनेक औद्योगिक यंत्रसामग्रीमध्ये वापरल्या जातात कारण त्यांची इफिशन्सी (Efficiency) आणि स्थिर वेगाने चालण्याची क्षमता (Capacity to Operate at Constant Speeds) असते.

c) रासायनिक प्रक्रिया सुविधा (Chemical Processing Facilities) मध्ये पंप (Pumps) चालवण्यासाठी सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motors) वापरल्या जातात, जिथे स्थिर वेग आवश्यक असतो.

d) सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motors) कॉनस्टंट स्पीडने चालतात, त्यामुळे मोठ्या प्रमाणावर एअर कंडिशनिंग सिस्टीम्स (Air Conditioning Systems) साठी विश्वासाई आणि कार्यक्षम पर्याय आहेत.

e) सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motors) कम्युनिकेशन नेटवर्क्स (Communication Networks) मध्ये टाइमिंग मेकॅनिझम्स (Timing Mechanisms) सिंक्रोनाइज करण्यासाठी आणि इतर वापरासाठी वापरल्या जातात.

4.11.2 लोड अँगल (Load Angle): लोड अँगल (Load Angle), ज्याला पॉवर अँगल (Power Angle) देखील म्हणतात, हा रोटरच्या मॅग्नेटिक फिल्ड (Magnetic Field) आणि स्टेटरच्या रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड (Rotating Magnetic Field) यामधील अँगल (Angle) असतो. म्हणजेच, लोड अँगल (Load Angle) हा फिल्ड फ्लक्स (Field Flux) आणि रिझल्टंट एअर गॅप फ्लक्स (Resultant Air Gap Flux) यामधील अँगल (Angle) असतो.

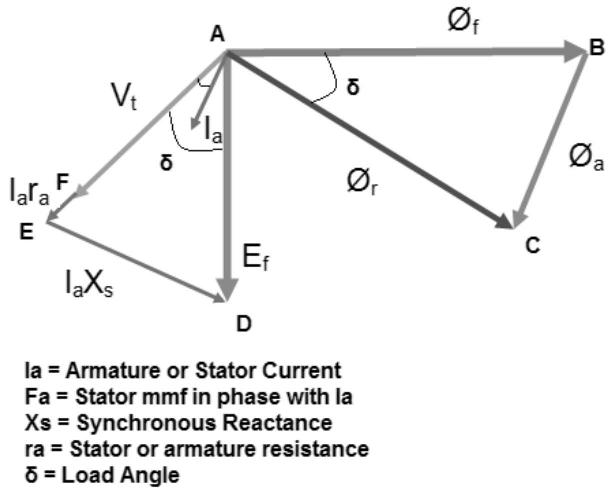


Fig 4.17: लोड अँगल (Load Angle)

लोड अँगलचे सिग्निफिकन्स (Significance of Load Angle):

a) जेव्हा सिंक्रोनस जनरेटर (Synchronous Generator) मध्ये मेकॅनिकल पॉवर इनपुट (Mechanical Power Input) प्राइम मूव्हर (Prime Mover) द्वारा वाढवला जातो, तेव्हा फील्ड पोल्स (Field Poles) हे स्टेटर पोल्स (Stator Poles) किंवा फ्लक्स (Flux) पेक्षा पुढे जातात. त्यामुळे लोड अँगल (Load Angle) वाढतो.

b) लोड अँगल (Load Angle) वाढल्यामुळे इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक टॉर्क (Electromagnetic Torque) वाढतो. कारण सिंक्रोनस मशीन (Synchronous Machine) मध्ये इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक टॉर्क (Electromagnetic Torque) हा प्राइम मूव्हर टॉर्क (Prime Mover Torque) चा विरोध करतो, आणि जेव्हा हा टॉर्क (Torque) दोन्ही टॉर्कना संतुलित करतो, तेव्हा मेकॅनिकल इनपुट (Mechanical Input) इलेक्ट्रिकल आउटपुट (Electrical Output) मध्ये कन्वर्ट होते.

c) त्यामुळे लोड अँगल (Load Angle) वाढल्याने पॉवर आउटपुट (Power Output) वाढतो. सिंक्रोनस जनरेटर (Synchronous Generator) चा पॉवर आउटपुट (Power Output) खालील सूत्राने दिला जातो:

$P = (E_f V_t \sin \delta) / X_s$

d) वरिल सूत्रानुसार, अँगल δ (Angle δ) वाढल्यास पॉवर आउटपुट (Power Output) वाढतो, जर फील्ड एक्सायटेशन (Field Excitation) आणि जनरेटर टर्मिनल व्होल्टेज (Generator Terminal Voltage) स्थिर ठेवले तर. म्हणून लोड अँगल (Load Angle) ला पॉवर अँगल (Power Angle) असेही म्हणतात.

4.12 पॉवर फॅक्टर इम्प्रूव्हमेंटसाठी सिंक्रोनस मोटरचा वापर (Synchronous Motor for Power Factor Improvement):

जेव्हा सिंक्रोनस मोटर (Synchronous Motor) नो-लोड (No-Load) स्थितीत आणि ओव्हर-एक्ससाइटेड (Over-Excited) असते, तेव्हा तिला सिंक्रोनस कंडेन्सर (Synchronous Condenser) म्हणतात.ओव्हर-एक्ससाइटेड सिंक्रोनस मोटर लीडिंग करंट (Leading Current) पुरवते आणि कॅपॅसिटर प्रमाणे (like a capacitor) कार्य करते, ज्यामुळे पॉवर फॅक्टरमध्ये सुधारणा होते.

a) सिंक्रोनस मोटरमध्ये, फील्ड वाइंडिंगसाठी स्वतंत्र DC सोर्स वापरला जातो. त्यामुळे AC इनपुट सप्लाय फक्त स्टेटर एनर्जाइज करण्यासाठी करंट पुरवतो, जो सप्लाय व्होल्टेजसोबत इन-फेज असतो. त्यामुळे पॉवर फॅक्टर युनिटी राहतो.

b) DC एक्ससाइटेशन बदलून पॉवर फॅक्टर अॅडजस्ट करता येतो. एक्ससाइटेशन वाढवल्यास पॉवर फॅक्टर लॅगिंगपासून युनिटी व लीडिंग पर्यंत बदलतो.

c) जेव्हा DC एक्ससाइटेशन वाढते, तेव्हा फील्ड वाइंडिंग ओव्हर-मॅग्नेटाइज्ड होतात. त्याची भरपाई करण्यासाठी स्टेटरला एक अतिरिक्त करंट कंपोनंट मिळतो.

d) हा करंट सप्लाय व्होल्टेजला लीड करतो, आणि त्यामुळे लीडिंग पॉवर फॅक्टर निर्माण होतो किंवा रिऍक्टिव्ह पॉवर जनरेट होते.

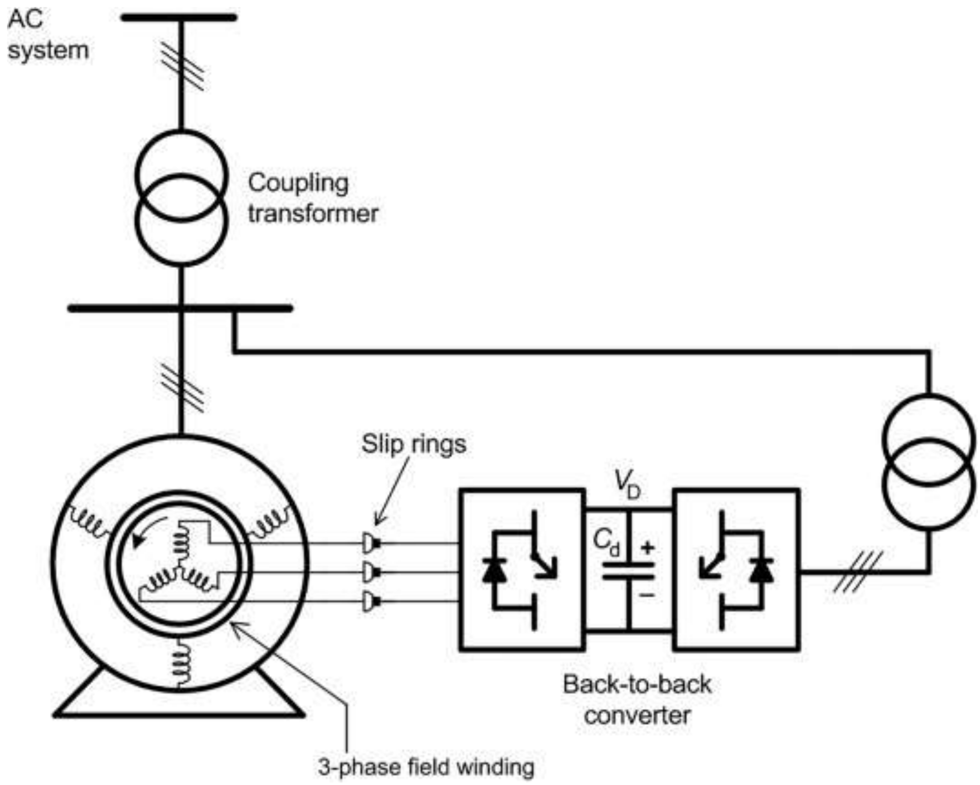


Fig 4.18: सिंक्रोनस मोटरचा पॉवर फॅक्टर इम्प्रूव्हमेंटसाठी वापर (Use of Synchronous Motor for Power Factor Improvement)

e) इंडक्टिव्ह लोड रिऍक्टिव्ह पॉवर कंझ्युम करतो (लॅगिंग पॉवर फॅक्टर), तर कॅपेसिटिव्ह लोड ती जनरेट करतो (लीडिंग पॉवर फॅक्टर).सिंक्रोनस मोटर वापरून, DC एक्ससाइटेशन ॲडजस्ट करून संपूर्ण सिस्टीमचा पॉवर फॅक्टर सुधारता येतो.

f) फक्त पॉवर फॅक्टर सुधारण्यासाठी वापरली जाणारी सिंक्रोनस मोटर सिंक्रोनस कंडेन्सर (synchronous condenser) म्हणून ओळखली जाते.

g) सिंक्रोनस कंडेन्सर लोडच्या पॅरललमध्ये जोडला जातो आणि पॉवर फॅक्टर सुधारतो. त्यामुळे लाइनमध्ये वाया जाणारा अतिरिक्त करंट कमी होतो.

h) परिणामी, वीज बिल कमी होतो आणि एनर्जी सेव्हिंग होते. जेव्हा सिंक्रोनस कंडेन्सर सप्लायला पॅरलल जोडला जातो, तेव्हा तो लीडिंग करंट घेतो आणि रिऍक्टिव्ह कंपोनंट कमी करतो.

i) अशा प्रकारे पॉवर फॅक्टर सुधारला जातो. मोठ्या इंडस्ट्रीजमध्ये सिंक्रोनस कंडेन्सर्सचा वापर विशेषतः पॉवर फॅक्टर सुधारण्यासाठी केला जातो.

***

स्वाध्याय (Exercise):

1. सिन्क्रोनस इम्पीडन्स (Synchronous Impedance) आणि सिन्क्रोनस रिऍक्टन्स (Synchronous Reactance) यांना डिफइन करा.

   (Define (1) Synchronous Impedance (2) Synchronous Reactance.)

2. अल्टरनेटर (Alternator) साठी सलियंट रोटर (Salient Rotor) आणि सिलिंड्रिकल रोटर (Cylindrical Rotor) यांची कॉम्पॅरिजन करा.

   (Compare salient Rotor and cylindrical Rotor for alternator**)**

3. थ्री-फेज सिन्क्रोनस मोटर (3-Phase Synchronous Motor) चा वर्किंग प्रिन्सिपल (Principle of Operation) समजावून सांगा.

   (Explain principal of operation of 3 phase synchronous motor.)

4. डिस्ट्रीब्युशन फॅक्टर (Distribution Factor) म्हणजे काय ते डायग्राम (neat diagram) सह एक्सप्लेन करा.

   (Define and explain distribution factor of a winding with neat diagram.)

5. अल्टरनेटरचा ई.एम.एफ. इक्वेशन (EMF Equation) डीराइव करा.

   (Derive the EMF equation of alternator**)**

Suggested Learning Materials / Books:

Sr.No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	Theraja B. L., Theraja A. K.	A Textbook of Electrical Technology Vol II	S. Chand and Co. New Delhi ISBN10: 8121924375
2	Ashfaq Husain	Electric Machine	Dhanpat Rai & co. ISBN13: 978-8177001662
3	Kothari D. P. and Nagrath I. J.	Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9352606405
4	Bhattacharya S. K.	Electrical Machines	Tata McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9332902855
5	Dr. P. S. Bimbhra	Electrical Machinery	Khanna Publication ISBN13:978-9389139105
6	Mittle V. N., Arvind Mittle	Design of Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi, ISBN: 9788180141263, 9788180141263
7	Samarjit Ghosh	Electrical Machines	Pearson Education India, 2012; 9788131776025

Learning Websites and Portals:

Sr. No	Link / Portal	Description
1	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/speed-control-slip-ring/	Speed Control of Slip Ring Induction Motor (VLAB)
2	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/106/108106072/	Operation of Induction Machine and Synchronous Machine
3	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/105/108105131/	Construction of Three Phase Induction Motor
4	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/102/108102146/	Electromechanical Energy Conversion and Synchronisation of Alternators
5	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/lab-equipment-familiarization/index.html	Familiarization of the electrical machine laboratory apparatus (VLAB)

युनिट-5
स्पेशल पर्पज मशीन्स
(Special Purpose Machines)

विषय निष्पत्ती (Course Outcome):

CO 5- इंडस्ट्रियल ऍप्लिकेशन्स साठी स्पेशल पर्पज मशीन्सचा युज.

(Use special purpose electrical machines for industrial applications.)

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

1. दिलेल्या टाइपच्या स्पेशल पर्पज मशीन्सचे कन्स्ट्रक्शन डीस्क्राइब करा .

   (Describe construction of the given type of special purpose machine.)
2. दिलेल्या स्पेशल पर्पज मशीन्सचे वर्किंग प्रिन्सिपल एक्सप्लेन करा.

   (Explain the working principle of the given special purpose machine.)
3. स्पेशल अँप्लिकेशन (Special Applications) साठी रिलेवंट स्पेशल पर्पज मशीन्स सिलेक्ट करा.

   (Select relevant special purpose machine for the specified application.)

परिचय (Introduction): स्पेशल पर्पज मशीन्स (Special Purpose Machine) ह्या विशेषतः डिझाइन केलेल्या मशीन्स आहे ज्या स्पेशल वर्क्स किंवा ऑपरेशन्स करण्यासाठी डेवलप केल्या जातात जी कन्वेन्शनल मशीन्स वापरून एफिशियन्सीने करता येत नाहीत. सिंपल मशीन्सच्या उलट, स्पेशल पर्पज मशीन्स प्रॉडक्टीविटी (Productivity), आणि अॅक्यूरसी (Accuracy) वाढविण्यासाठी स्पेसिफिक अॅप्लिकेशन (Application), प्रोसेस किंवा प्रोडक्शन लाइनसाठी कस्टम-बिल्ट(Custom-Built) केली जातात.

या मशीन्सचा वापर मोठ्या प्रमाणात प्रोडक्शन साठी केला जातो, विशेषतः ऑटोमोटिव्ह (Automotive),इलेक्ट्रॉनिक्स (Electronics), फार्मास्युटिकल्स (Pharmaceuticals), पॅकेजिंग (Packaging) आणि मॅन्युफॅक्चरिंग (Manufacturing) यासारख्या इंडस्ट्रीमध्ये, जिथे हाय स्पीड (High Speed), प्रिसीजन (Precision) आणि रीलायबिलिटी (Reliability) महत्त्वाची असते.

एफिशियन्सी वाढवण्यात, मॅन्युफॅक्चरिंग ची क़्वलिटी सुनिश्चित करण्यात आणि मॅन्युफॅक्चरिंग टाईम आणि कॉस्ट कमी करण्यात स्पेशल पर्पज मशीन्स महत्त्वपूर्ण भूमिका बजावतात. इंडस्ट्रीयल ऑटोमेशन (Automation)आणि स्मार्ट मॅन्युफॅक्चरिंगकडे (Smart Manufacturing) वाटचाल करत असताना, स्पेशल पर्पज मशीनची रिक़्वायरमेंट आणि डेवलपमेंट लक्षणीयरीत्या वाढत आहे.

5.1 युनिव्हर्सल मोटर, सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर, परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर्स (पीएमएसएम), स्टेपर मोटर्स. (Universal motor, synchronous reluctance motor, permanent magnet synchronous motors (PMSM), stepper motors.)

5.1.1 युनिव्हर्सल मोटर (Universal motor):

युनिव्हर्सल मोटर ही एक टाइपची इलेक्ट्रिक मोटर आहे जी एसी (अल्टरनेटिंग करंट) किंवा डीसी (डायरेक्ट करंट) सप्लायवर चालते. हाय स्पीड आणि कॉम्पॅक्ट (Compact) डिझाइनमुळे ते सामान्यतः पोर्टेबल पॉवर टूल्स (Portable Power Tools), मिक्सर (Mixer) सारख्या हाऊसहोल्ड अप्लायंसेससाठी आणि व्हॅक्यूम क्लीनरमध्ये (Vaccum Cleaner) वापरली जाते.

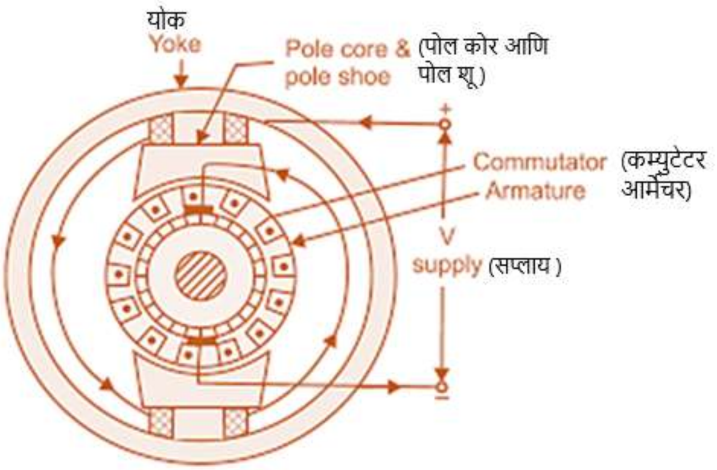


Fig. 5.1: युनिव्हर्सल मोटर (Universal Motor)

वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle): युनिव्हर्सल मोटर ही स्टेटर द्वारे प्रोड्युस होणाऱ्या मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) आणि रोटर (आर्मेचर) (Rotor – Armature) मधील करंट फ्लो करणाऱ्या कंडक्टर्स (Conductors) यांच्यातील इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंटरॲक्शन (Electromagnetic Interaction) या प्रिन्सिपलवर वर्क करते.

1. **करंट फ्लो (Current Flow):** जेव्हा मोटरला डीसी (DC) किंवा एसी (AC) सप्लाय (Supply) दिला जातो, तेव्हा करंट फिल्ड वाइंडिंग्स (Field windings – stator) आणि आर्मेचर वाइंडिंग्स (Armature windings – rotor) मधून फ्लो होतो.
2. **मॅग्नेटिक इंटरॲक्शन (Magnetic Interaction):** फिल्ड वाइंडिंग्स (Field windings) एक मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic field) तयार करतात. आर्मेचर कंडक्टर्स (Armature conductors) जे करंट कॅरी करतात, ते या मॅग्नेटिक फील्ड सोबत इंटरॲक्ट करतात आणि लॉरेन्झ फोर्स (Lorentz force – $F = BIL$) नुसार आर्मेचर वर एक फोर्स (force) निर्माण होतो.
3. **रोटेशन (Rotation):** हा फोर्स (force) आर्मेचर ला रोटेट करण्यासाठी कारणीभूत ठरतो.कम्युटेटर (commutator) हे सुनिश्चित करतो की टॉर्क (torque) कायम एकाच डायरेक्शनने राहतो, जरी एसी करंट सतत डायरेक्शन बदलत असेल तरी.
4. **स्पीड कंट्रोल (Speed Control):** व्होल्टेज (voltage) मध्ये चेंज करून किंवा इलेक्ट्रॉनिक सर्किट्स (electronic circuits) चा वापर करून स्पीड (speed) कंट्रोल करता येतो.मात्र, युनिव्हर्सल मोटर्स

(universal motors) फार हाय स्पीड ने रोटेट करतात (साधारणतः 20,000 RPM पर्यंत), जे टूल्स (tools) साठी युजफुल ठरते.

युनिव्हर्सल मोटरचे कन्स्ट्रक्शन (Construction of Universal Motor): युनिव्हर्सल मोटरचे कन्स्ट्रक्शन डीसी सिरीज मोटर (DC series motor) सारखेच असते, पण काही विशेष बदल केलेले असतात जेणेकरून ती एसी (AC) आणि डीसी (DC) दोन्ही सप्लायवर चालू शकते. ही एक सिंगल-फेज मोटर (single-phase motor) आहे आणि ती हाय स्पीड हाय टॉर्क (torque) देण्यासाठी डिझाइन केलेली असते, त्यामुळे ती पोर्टेबल टूल्स (Portable Tools) आणि हाऊसहोल्ड अप्लायंसेससाठी (Household Appliances) योग्य ठरते.

युनिव्हर्सल मोटरचे मेन पार्टस (Main Constructional Parts of a Universal Motor):

1. **स्टेटर (Stator – Field Poles ॲन्ड Field Windings):** स्टेटर मध्ये लॅमिनेटेड सॉफ्ट आयर्न कोर (Laminated Soft Iron Core) आणि सॅलियंट (Salient) पोल्स (Poles) असतात. प्रत्येक पोलभोवती फिल्ड वाइंडिंग्स (Field Windings – Series Wound) वाउंड असतात. या वाइंडिंग्स मधून करंट फ्लो झाल्यास त्या मॅग्नेटिक फील्ड (Magnetic Field) तयार करतात.लॅमिनेशन्स (Laminations) चा वापर एसी ऑपरेशन दरम्यान होणारे एडी करंट लॉसेस (Eddy Current Losses) कमी करण्यासाठी केला जातो.
2. **रोटर (Rotor – Armature):** रोटर किंवा आर्मेचर (Armature) हे DC मोटर प्रमाणेच असते, ज्यामध्ये आर्मेचर वाइंडिंग्स (Armature Windings) वाउंड करण्यासाठी स्लॉट्स (Slots) असतात. ते एका शाफ्ट (Shaft) वर माउंट (Mounting) असते आणि स्टेटर द्वारे तयार केलेल्या मॅग्नेटिक फील्ड मध्ये रोटेट होते. आर्मेचर कोर (Armature Core) सुद्धा लॅमिनेटेड असतो, जेणेकरून एसी सप्लाय वर एडी करंट लॉसेस कमी होतील.
3. **कम्युटेटर (Commutator):** एक सिलिंड्रीकल सेगमेंटेड कॉपर रिंग (Cylindrical Segmented Copper Ring) जी रोटर शाफ्ट वर माउंट (Mounting) असते. ती वाइंडिंग्स मधील अल्टरनेटिंग करंट ला युनिडायरेक्शनल टॉर्क (Unidirectional Torque) मध्ये कन्वर्ट करते. एसी आणि डीसी ऑपरेशन मध्ये एकसारखीच वर्क करते, कारण ती सप्लाय फ्रिक्वेन्सीनुसार आर्मेचर मधील करंट बदलते.
4. **कार्बन ब्रशेस (Carbon Brushes):** दोन कार्बन किंवा ग्रेफाइट ब्रशेस (Carbon or Graphite Brushes) हे कम्युटेटर सेगमेंट् वर प्रेस केलेले असतात. ते रोटेटिंग आर्मेचर आणि स्टेशनरी सर्किट (Circuit) यांच्यामधील इलेक्ट्रिकल कॉन्टॅक्ट (Electrical Contact) करतात. या ठिकाणी फ्रिक्शन मुळे वेळोवेळी मेंटेनन्स आवश्यक असतो.
5. **फ्रेम/हाऊसिंग (Frame/Housing):** एक्सटर्नल केसिंग (Casing) सर्व इंटरनल पार्ट्सना एकत्र ठेवते. हे कास्ट आयर्न (Cast Iron) किंवा हाय-स्ट्रेंथ प्लास्टिक (High-Strength Plastic) पासून बनवलेले असते, विशेषतः पोर्टेबल टूल्स मध्ये त्यांना लाईट वेट बनवण्यासाठी.

एडव्हांटेजेस (Advantages):

1. **हाय स्पीड कपॅसिटी (High Speed Capability):** युनिव्हर्सल मोटर्स फार हाय स्पीडने चालू शकतात (साधारणतः 20,000 RPM किंवा त्याहून अधिक), त्यामुळे ब्लेंडर्स (Blenders), ड्रिल्स (Drills) आणि व्हॅक्यूम क्लीनर्ससारख्या अँप्लिकेशनसाठी वापरली जाते.
2. **कॉम्पॅक्ट ॲन्ड लाईटवेट (Compact and Lightweight):** हाय पॉवर-टू-वेट रेश्योमुळे, हे पोर्टेबल टूल्स आणि अप्लायंसेससाठी योग्य असतात.
3. **एसी ॲन्ड डीसी दोन्हीवर ऑपरेट (Operates on Both AC and DC):** जसे नावातून दिसते, युनिव्हर्सल मोटर्स अल्टरनेटिंग करंट (AC) आणि डायरेक्ट करंट (DC) दोन्हीवर चालू शकतात.
4. **हाय स्टार्टिंग टॉर्क (High Starting Torque):** युनिव्हर्सल मोटर्स हाय स्टारटिंग टॉर्क प्रोड्युस करते, जो फोर्स आवश्यक असलेल्या ॲप्लिकेशनमध्ये उपयुक्त असतो (उदा. पॉवर टूल्स).
5. **सिंपल कन्स्ट्रक्शन (Simple Construction):** मोटरचे कन्स्ट्रक्शन सिंपल असते, ज्यामुळे ती मॅन्युफॅक्चरिंग करणे स्वस्त पडते.
6. **स्पीड कंट्रोल (Speed Control):** सिंपल इलेक्ट्रॉनिक कंट्रोलर्स वापरून स्पीड सहज कंट्रोल करता येतो, जो मिक्सर्स आणि सिव्हिंग मशीनसारख्या ॲप्लिकेशनमध्ये उपयुक्त ठरतो.
7. **कॉम्पॅक्ट साईज फॉर हाय पॉवर आउटपुट (Compact Size for High Power Output):** इतर समान आउटपुट असलेल्या मोटर्सच्या तुलनेत, युनिव्हर्सल मोटर्स सामान्यतः लहान असतात, जे जागा कमी असलेल्या ठिकाणी फायदेशीर ठरते.

डिसएडव्हांटेजेस (Disadvantages):

1. **हाय मेंटेनन्स (High Maintenance):** युनिव्हर्सल मोटरमध्ये ब्रशेस (brushes) आणि कम्युटेटर (commutator) असतात जे झिजतात, त्यामुळे त्यांची नियमित बदली आणि स्वच्छता आवश्यक असते.
2. **नॉईसी ऑपरेशन (Noisy Operation):** ब्रशेस आणि कम्युटेटरमधील संपर्कामुळे मोटर वापरात जोरदार नॉइज आणि कंप (Vibrations) निर्माण होतो.
3. **ओव्हरहीटिंग (Overheating):** जास्त लोड (load) आणि करंट (current) मुळे मोटर गरम होण्याचा धोका वाढतो, विशेषतः दीर्घकाळ वापरल्यास.
4. **लो एफिशियन्सी (Low Efficiency):** युनिव्हर्सल मोटर्सची इफिशन्सी तुलनेत कमी असते कारण ब्रशेस (brushes) आणि कम्युटेटरमुळे (commutator) फ्रिक्शन आणि हिट निर्माण होते.
5. **इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंटरफेरन्स (EMI) (Electromagnetic Interference):** ब्रशेसमधील स्पार्किंगमुळे इलेक्ट्रॉनिक ॲप्लिकेशनमध्ये जर योग्य शील्डिंग नसेल तर अडथळा येऊ शकतो.
6. **शॉर्टर लाइफस्पॅन (Shorter Lifespan):** झिजण्यामुळे आणि उष्णतेमुळे मोटरचे आयुष्य कमी होते.
7. **पूअर स्पीड रेग्युलेशन (Poor Speed Regulation):** लोड बदलल्यावर मोटरचा स्पीड मोठ्या प्रमाणात बदलतो; इलेक्ट्रॉनिक स्पीड कंट्रोलशिवाय स्पीड स्टेशनरी राहात नाही.

अप्लिकेशन्स: (Applications):

1. **हाऊसहोल्ड अप्लायन्सेस (Household Appliances)** मध्ये युनिव्हर्सल मोटर्सचा मोठ्या प्रमाणावर वापर केला जातो. व्हॅक्यूम क्लीनर्स (Vacuum Cleaners) मध्ये हाय-स्पीड सक्शन (Suction) साठी, ब्लेंडर्स आणि मिक्सर्स (Blenders And Mixers) मध्ये हाय टॉर्क (Torque) आणि वेरीएबल स्पीड (Variable Speed) साठी हे मोटर्स उपयुक्त असतात. फूड प्रोसेसर्स (Food Processors) मध्ये कॉम्पॅक्ट आणि हाय RPM मोटरची गरज असते, तर हेअर ड्रायर्स (Hair Dryers) मध्ये हलके वजन आणि हाय-स्पीड एअर फ्लो (Airflow) आवश्यक असतो. सिव्हिंग मशीन (Sewing Machines) मध्ये अचूक स्पीड कंट्रोल आणि कॉम्पॅक्ट डिझाईनसाठी युनिव्हर्सल मोटर वापरली जाते.
2. **पॉवर टूल्स (Power Tools)** जसे की ड्रिल्स (Drills), ग्राइंडर्स (Grinders), सँडर्स (Sanders) आणि इलेक्ट्रिक सॉज (Electric Saws) यामध्ये हाय टॉर्क आणि स्पीड कंट्रोल आवश्यक असतो, म्हणून यामध्ये युनिव्हर्सल मोटर्स फार उपयुक्त ठरतात.
3. **पर्सनल केअर डिव्हाइसेस (Personal Care Devices)** मध्ये सुद्धा याचा वापर केला जातो. इलेक्ट्रिक शेवर्स (Electric Shavers), क्लिपर्स (Clippers) आणि काही जुन्या किंवा बजेट मॉडेल्समधील टूथब्रशेस (Toothbrushes) मध्ये युनिव्हर्सल मोटर्स वापरल्या जातात.
4. **ऑटोमोटिव्ह अप्लिकेशन्स (Automotive Applications)** मध्येही काही ठिकाणी यांचा वापर आढळतो. उदाहरणार्थ, विंडशील्ड वायपर्स (Windshield Wipers), पोर्टेबल कार व्हॅक्यूम्स (Portable Car Vacuums), आणि जुन्या मॉडेल्समधील स्मॉल फॅन्स किंवा ब्लोअर्स (Small Fans or Blowers) मध्ये हे मोटर्स वापरले जातात.
5. **इंडस्ट्रियल युसेस (Industrial Uses)** मर्यादित प्रमाणात असले तरी, अशा ठिकाणी युनिव्हर्सल मोटर्स उपयुक्त ठरतात जिथे हलके वजन, हाय स्पीड आणि इंटरमिटंट ऑपरेशन (Intermittent Operation) आवश्यक असते. सतत चालू न राहणाऱ्या, परंतु वेळोवेळी वापरल्या जाणाऱ्या लहान मशिन्समध्ये हे मोटर्स वापरले जातात.

5.1.2 सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर (Synchronous Reluctance Motor):

सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर (Synchronous Reluctance Motor) ही एक टाइपची एसी मोटर (AC Motor) आहे, जी मग्नेटिक रिलक्टन्स (Magnetic Reluctance) या तत्त्वावर आधारित असते. ही मोटर इतर कन्वेन्शनल मोटर्सपेक्षा वेगळी आहे कारण तिच्या रोटर मध्ये (Rotor) कोणत्याही टाइपचे वायंडिंग (Windings) किंवा परमनंट मॅग्नेट्स (Permanent Magnets) नसतात. त्यामुळे ही मोटर साधी, मजबूत आणि कमी मेंटेनन्स लागणारी असते.

सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरचे कन्स्ट्रक्शन अ‍ॅन्ड वर्किंग प्रिन्सिपल (Construction and Working Principle of Synchronous Reluctance Motor):

सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरचे मेन पार्ट्स (Main Parts of Synchronous Reluctance Motor):

1. **स्टेटर (Stator):** स्टेटर हा एक सामान्य थ्री फेज इंडक्शन मोटर स्टेटर (3-Phase Induction Motor Stator) सारखाच असतो. यात थ्री फेज डिस्ट्रिब्युटेड वाइंडिंग (3-Phase Distributed Windings) असतात, ज्या लॅमिनेटेड स्लॉट्स (Laminated Slots) मध्ये ठेवलेल्या असतात.जेव्हा याला 3-फेज एसी सप्लाय (3-Phase AC Supply) दिला जातो, तेव्हा हे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) तयार करतात.लॅमिनेशन (Lamination) मुळे एडी करंट लॉसेस (Eddy Current Losses) कमी होतात.
2. **रोटर (Rotor):**यामध्ये सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर इतर मोटर्सपेक्षा वेगळी असते. रोटरला सॅलियंट पोल्स (Salient Poles) असतात आणि तो लॅमिनेटेड सिलिकॉन स्टील (Laminated Silicon Steel) पासून बनवलेला असतो.

   फ्लक्स बॅरियर्स (Flux Barriers): हे विशेष एअर कॅव्हिटीज (Air Cavities) किंवा फ्लक्स बॅरियर्स (Flux Barriers) रोटर लॅमिनेशन्समध्ये कट किंवा पंच करून बनवले जातात. यामुळे मॅग्नेटिक ॲनायसोट्रॉपी (magnetic anisotropy) तयार होते.

   a) d-ॲक्सिस (direct axis): कमी रिलक्टन्सचा मार्ग (मॅग्नेटिक फ्लक्स याच मार्गाने जायला प्राधान्य देतो).
   b) q-ॲक्सिस (quadrature axis): जास्त रिलक्टन्सचा मार्ग (मॅग्नेटिक फ्लक्स याला टाळतो).

   रोटरवर कोणत्याही वायंडिंग किंवा मॅग्नेट्स (windings or magnets) नसतात.रोटर फिरतो कारण रिलक्टन्स टॉर्क (reluctance torque) तयार होतो, जो रोटरला किमान मॅग्नेटिक रिलक्टन्सच्या ॲक्सिसशी संरेखित होण्याची प्रवृत्ती देतो.

   रोटर कंस्ट्रक्शनचे टाइप (Types of Rotor Construction):

   a) ॲक्सियली लॅमिनेटेड ॲनायसोट्रॉपिक रोटर (Axially Laminated Anisotropic Rotor): बारीक लॅमिनेशन्स ॲक्सिअल डिरेक्शनमध्ये (axial direction) स्टॅक केलेले असतात, ज्यात अल्टरनेट फ्लक्स बॅरियर्स (alternating flux barriers) असतात.
   b) रॅडियली लॅमिनेटेड रोटर (Radially Laminated Rotor): तुलनेने कमी वापरला जातो, यामध्ये रॅडियल फ्लक्स बॅरियर्स (radial flux barriers)असतात.
   c) सेगमेंटेड रोटर (Segmented Rotor): मॅग्नेटिक व नॉन-मॅग्नेटिक मटेरियल्सचे (Magnetic And Non-Magnetic Materials) भाग एकत्र करून बनवलेला असतो.
3. **शाफ्ट ॲन्ड बेअरिंग्ज (Shaft & Bearings):** रोटर हा शाफ्टवर माउंट (Mounted On Shaft) केलेला असतो आणि दोन्ही टोकांवर बेअरिंग्ज (Bearings) ने सपोर्ट दिला जातो.शाफ्ट द्वारे मेकॅनिकल टॉर्क (Mechanical Torque) लोडपर्यंत पोहोचवला जातो.
4. **कुलिंग सिस्टीम (Cooling System):** इतर मोटर्सप्रमाणेच, यामध्ये सुद्धाफॅन (Fan) किंवा एक्स्टर्नल कुलिंग सिस्टीम (External Cooling System) असू शकते.

वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle):

सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर मध्ये जेव्हा स्टेटरमधील कोणताही एक फेज एनर्जाइज (Energize) केला जातो, तेव्हा त्या स्टेटर फेजच्या समोर असलेल्या रोटर पोलवर एक रिलक्टन्स टॉर्क (Reluctance Torque) तयार होतो. हा टॉर्क रोटरला अशा स्थानी खेचतो जिथे मग्नेटिक रिलक्टन्स (Magnetic Reluctance) सर्वात कमी असते. जेव्हा रोटर त्या मिनिमम रिलक्टन्स पोजीशन (Minimum Reluctance Position) वर पोहोचतो, तेव्हा लगेच पुढील फेजला एनर्जी दिली जाते. अशा प्रकारे सीक्वेन्शियल फेज एक्साइटेशन (Sequential Phase Excitation) द्वारे रोटर नेहमीच पुढे पुढे ओढला जातो आणि मोटरमध्ये रोटेशनल स्पीड निर्माण होतो .

ही एक्साइटेशन प्रोसेस रोटर पोझिशन सेन्सर्स (Rotor Position Sensors) च्या मदतीने कंट्रोल केली जाते. हे सेन्सर्स रोटरची अचूक स्थिती ओळखून योग्य वेळी पुढील फेजला एनर्जाइज करतात. त्यामुळे मोटर कोणत्याही डिस्टर्बंस शिवाय कंटीन्युअस रोटेशन (Continuous Rotation) करत राहते.

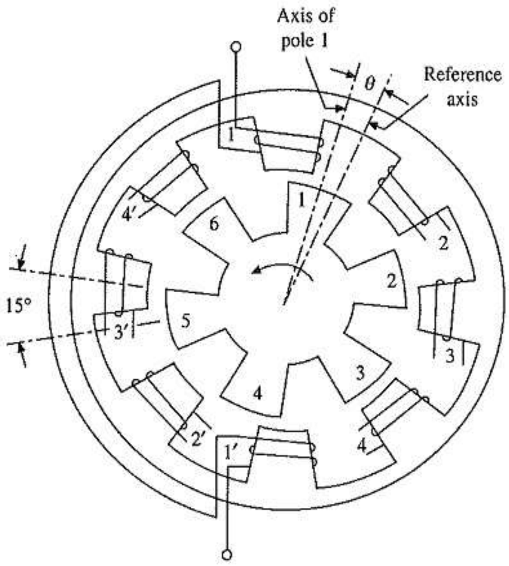


Fig.5.2 सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर (Synchronous Reluctance Motor)

या मोटरचा स्पीड (Speed), रोटरवर निर्माण होणाऱ्या ॲवरेज टॉर्कवर (Average Torque) अवलंबून असतो. हा टॉर्क वेगवेगळ्या फेज करंट्सच्या मॅग्निट्यूड वर (Magnitude of Phase Currents) अवलंबून असतो. विशेष म्हणजे, या मोटरमध्ये टॉर्क निर्माण होण्यासाठी करंटच्या दिशेचा काही संबंध नसतो. त्यामुळे सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर मध्ये फक्त युनिडायरेक्शनल करंट (Unidirectional Current) वापरूनही एफिशियन्सी टिकवता येते. मोटरच्या फिरण्याच्या दिशेवर नियंत्रण ठेवण्यासाठी, केवळ फेज एक्साइटेशन सीक्वेन्स (Phase Excitation Sequence) बदला जातो. जर फेज एक्साइट करण्याचा क्रम 1-2-3-4-1 असा ठेवला गेला, तर मोटर अँटी-क्लॉकवाइझ (Anti-clockwise) फिरते. आणि जर क्रम उलट म्हणजे 4-3-2-1-4 दिला गेला, तर ती क्लॉकवाइझ (Clockwise) डायरेक्शनने फिरते.

याशिवाय, ही मोटर रिजेनेरेटिव्ह ब्रेकिंगला सुद्धा (Regenerative Braking) सपोर्ट करते. जर रोटरने मिनिमम रिलक्टन्स पोजीशन क्रॉस केल्यानंतर कोणताही फेज एनर्जाइज केला गेला, तर त्यामुळे तयार होणारा टॉर्क रोटरच्या फिरण्याच्या विरुद्ध काम करतो. याला ब्रेकिंग टॉर्क (Braking Torque) म्हणतात, जो रोटरची

गती कमी करतो आणि त्याची मेकॅनिकल एनर्जी (Mechanical Energy) ही इलेक्ट्रिकल एनर्जी (Electrical Energy) मध्ये कन्वर्ट होते. ही ऊर्जा परत पॉवर सोर्स (Power Source) कडे फीड केली जाते.

अशा प्रकारे सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरही एफिशियन्सी वापर करणारी, कमी मेंटेनन्स लागणारी आणि डायरेक्शन व वेगावर अचूक नियंत्रण असलेली प्रणाली आहे. ही मोटर आधुनिक औद्योगिक क्षेत्रात आणि विविध स्मार्ट ॲप्लिकेशनमध्ये मोठ्या प्रमाणावर वापरली जाते.स्विच्ड रिलक्टन्स मोटरमध्ये (Switched Reluctance Motor) स्टेटरच्या एका फेज वायंडिंगची इंडक्टन्स ही रोटरच्या स्थितीवर (Rotor Position) अवलंबून बदलत असते, कारण या मोटरमध्ये स्टेटर आणि रोटर दोघांच्याही रचनांमध्ये सॅलियंट पोल्स (Salient Poles)असतात.

जेव्हा रोटर आणि स्टेटरचे पोल्स पूर्णपणे एकमेकांशी जुळलेले असतात (Fully Aligned Position),तेव्हा मॅग्नेटिक सर्किट मधील रिलक्टन्स (Reluctance) सर्वात कमी असते, आणि त्यामुळे त्या अवस्थेतील इंडक्टन्स (Inductance) मॅक्सिमम (Maximum) असते.

दुसऱ्या टोकाला, जेव्हा रोटर आणि स्टेटरचे पोल्स एकमेकांपासून पूर्णपणे वेगळे झालेले असतात (Non-Aligned Position), तेव्हा मॅग्नेटिक रिलक्टन्स (Magnetic Reluctance) सर्वाधिक असते, आणि त्यामुळे त्या स्थितीत इंडक्टन्स मिनीमम (Minimum)असते.

रोटर पोझिशन अँगल θ (Theta) नुसार फेज 1 ची इंडक्टन्स कशी बदलते हे एका आकृतीमध्ये दाखवले गेले आहे. इथे, θ हा कोन हा रेफ्रेन्स ॲक्सिस (Reference Axis) आणि रोटर पोल 1 च्या ॲक्सिसमधील अँगल दर्शवतो. ही संदर्भ ॲक्सिस अशा प्रकारे निवडलेली आहे की ती नॉन-अलाइन्ड पोझिशनला (Non-Aligned Position) दर्शवते.

या सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर मध्ये रोटरला एकूण सहा पोल्स (Six Poles) आहेत, त्यामुळे जेव्हा रोटर एक पूर्ण फेरी (0° ते 360°) पूर्ण करतो, तेव्हा प्रत्येक फेजची इंडक्टन्स सहा वेळा जास्तीत जास्त व्हॅल्यू (Peaks - Maximum Values) आणि सहा वेळा किमान व्हॅल्यू (Troughs - Minimum Values) गाठते. हे असे होते कारण रोटरचे पोल्स एकमेकांपासून 60 डिग्री (60° Apart) असतात.

याच्या विरुद्ध, स्टेटरचे पोल्स (Stator Poles) हे 45 डिग्री (45° Apart) असल्यामुळे इतर फेजेसच्या इंडक्टन्स प्रोफाइलमध्ये एक फेज शिफ्ट (Phase Shift) दिसून येतो:

फेज 2 (Phase 2) ची इंडक्टन्स प्रोफाइल फेज 1 प्रमाणेच आहे, परंतु ती 15 डिग्रीनी (15°) हलवलेली आहे.

यानुसार, फेज 3 आणि फेज 4 (Phase 3 And Phase 4) यांची इंडक्टन्स प्रोफाइल फेज 1 च्या तुलनेत अनुक्रमे 30 डिग्री (30°) आणि 45 डिग्रीनी (45°) पुढे सरकवलेली आहे.

ही फेज डीस्प्लेसमेंट (Phase Displacement) हे सुनिश्चित करते की सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर मध्ये स्मूथ आणि कंटिन्युअस टॉर्क (Smooth and Continuous Torque Production) निर्माण होतो, जो मोटरच्या कामगिरीसाठी अत्यंत महत्त्वाचा आहे.

अशा प्रकारे, सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर मध्ये इंडक्टन्स आणि रोटर पोझिशन यांच्यातील हे रिलेशन मोटरच्या ऑपरेशनमध्ये एक मुख्य भूमिका बजावतो आणि विविध फेजेसमधील इंडक्टन्स वेव्हफॉर्म्स मधील शिफ्टिंग टॉर्क प्रोडक्शन कन्सिस्टंट ठेवते.

सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरचे ॲडवांटेजेस (Advantages of Synchronous Reluctance Motor):

1. **हाय एफिशियन्सी (High Efficiency):** सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर्स (Synchronous Reluctance Motors) हाय एफिशियन्सी (High Efficiency) दृष्टीने विशेषतःपारशियल लोड्सवर (Partial Loads) उत्कृष्ट असतात. कारण यामध्ये रोटर कॉपर लॉसेस (Rotor Copper Losses) होत नाहीत कारण रोटरमध्ये वायंडिंग (Windings) नसतात आणि याचे डिझाईन लो कोअर लॉसेस (Low Core Losses) सुनिश्चित करते. त्यामुळेया मोटर्स एनर्जी इफिशियंट (Energy-Efficient)आणि लॉंग टर्म मध्ये किफायतशीर (Cost-Effective in the Long Run) असतात.
2. **परमनंट मॅग्नेट्सची नीड नाही (No Permanent Magnets Required):** या मोटरचा सर्वात मोठा फायदा म्हणजे सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरला रेअर अर्थ परमनंट मॅग्नेट्स (Rare-Earth Permanent Magnets) लागणार नाहीत, जे महाग असतात आणि ज्यांच्या सप्लाय चेन मध्ये अडचणी असतात. त्यामुळे ही मोटर इकोनॉमिकल (Economical) आणि पर्यावरणपूरक (Environmentally Sustainable) असते, परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर्स (Permanent Magnet Synchronous Motors) च्या तुलनेत.
3. **सिंपल अँड रग्ड रोटर कन्स्ट्रक्शन (Simple And Rugged Rotor Construction):** सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरमधील रोटर हा लॅमिनेटेड स्टीलचा (Laminated Steel) बनलेला असतो आणि त्यामध्ये वाइंडिंग्स (No Windings) आणि मॅग्नेट्स (Magnets) नसतात. त्यामुळे प्रोडक्शन प्रक्रिया सोपी होते, बिघाडाची शक्यता कमी होते, आणि मोटर मेकॅनिकल दृष्ट्या मजबूत आणि विश्वसनीय (Mechanically Robust and Reliable) बनते अगदी डिमांडिंग इंडस्ट्रियल एन्व्हायर्नमेंट्स (Demanding Industrial Environments) मध्येही.
4. **लो मेंटेनेंस (Low Maintenance):** यामध्ये ब्रशेस (Brushes),स्लिप रिंग्ज (Slip Rings), रोटर वायंडिंग (Rotor Windings), आणि मॅग्नेट्स नसल्यामुळे सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरला मिनिमल मेंटेनन्स (Minimal Maintenance)लागतो. यामुळे ऑपरेशनल कॉस्ट (Operational Cost) कमी होते आणि सर्व्हिस इंटरव्हल्स (Service Intervals) जास्त असतात जेथे डाउन टाईम कॉस्टली (Down Time is Costly)आहे अशा ॲप्लिकेशन्ससाठी हे फार उपयुक्त ठरते.
5. **हाय रिलायबिलिटी (High Reliability):** सिंपल डिझाईन आणि वेअरप्रोन कॉम्पोनंट्स (Wear-Prone Components) नसल्यामुळे रिलायबिलिटी (Reliability) वाढते.सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर हे कमी फेल होतात आणि कठीण परिस्थितीत सुद्धा बेटर परफॉर्मन्स देतात.
6. **गुड थर्मल परफॉर्मन्स (Good Thermal Performance):** रोटर लॉसेस (Rotor Losses) नसतात, त्यामुळे हिट मुख्यतः स्टेटर (Stator) मध्ये निर्माण होते जी कूल करणे सोपे असते. त्यामुळे मोटरची थर्मल स्टॅबिलिटी (Thermal Stability) सुधारते आणि पॉवर कॅपॅसिटीचा अधिक चांगला वापर (Better Use of Power Capacity) होतो.

7. **स्टँडर्ड ड्राइव्सशी कम्पॅटिबल (Compatible With Standard Drives):** सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरला स्टँडर्ड व्हेरीएबल फ्रिक्वेन्सी ड्राइव्ज (Standard Variable Frequency Drives) वापरून चालवता येते, फक्त योग्य कंट्रोल अल्गोरिदम्स (Control Algorithms) लागतात. त्यामुळे ती एक्झिस्टिंग ऑटोमेशन व मोटर कंट्रोल सिस्टीम्स (Existing Automation And Motor Control Systems) मध्ये सहज इंटिग्रेट (Integrate) करता येते.
8. **इन्व्हायर्नमेंटली फ्रेन्डली (Environmentally Friendly):** यामध्ये रेअर अर्थ मटेरियल्स (Rare-Earth Materials) किंवा हेवी मेटल्स (Heavy Metals) वापरले जात नाहीत, त्यामुळे सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर अधिक इकोफ्रेंडली (Eco-Friendly) असतात आणि सस्टेनेबल डिझाईन व मॅन्युफॅक्चरिंग प्रॅक्टिसेस (Sustainable Design and Manufacturing Practices) शी सुसंगत असतात.
9. **हाय पॉवर डेन्सिटी (High Power Density):** समान आकाराच्या तुलनेत, सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरअधिकपॉवर डिलिव्हर (Power Deliver) करू शकते विशेषतः ऑप्टिमाइझ्ड डिझाईन्स (Optimized Designs) मध्ये. त्यामुळे ही मोटर स्पेस कनस्ट्रेन्ड ऍप्लिकेशन्स (Space Constrained Applications) साठी योग्य ठरते.

सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरचे डिसऍडवांटेजेस (Disadvantages of Synchronous Reluctance Motor):

1. **लो स्टारटिंग टॉर्क (Low Starting Torque):** सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर (Synchronous Reluctance Motor) ला सामान्यतः सेल्फ स्टार्टिंग कॅपॅबिलिटी (Self Starting Capability) नसते. इंडक्शन मोटर प्रमाणे (induction motor) ती स्टार्टिंग टॉर्क (starting torque) तयार करू शकत नाही. तिला एक्स्टर्नल कंट्रोलर किंवा इन्व्हर्टर (external controller or inverter) ची गरज असते, जे रोटेशन सुरू करण्यासाठी (to initiate rotation) आवश्यक असते. त्यामुळे ती डायरेक्ट ऑन लाईन (direct on line) स्टार्टिंग ऍप्लिकेशन्स (direct-on-line starting applications) साठी योग्य नाही.
2. **कॉम्प्लेक्स कंट्रोल सिस्टीम रिक्वायर्ड (Complex Control System Required):**सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरला योग्य कार्यासाठी सोफिस्टिकेटेड कंट्रोल टेक्निक्स (sophisticated control techniques) लागतात, जसे की फिल्ड-ओरिएंटेड कंट्रोल (Field Oriented Control)किंवा डायरेक्ट टॉर्क कंट्रोल (Direct Torque Control).यामुळे ड्राईव्ह सिस्टम (drive system) अधिक कॉम्प्लेक्स होते आणि स्पेशलाइज्ड इन्व्हर्टर्स (specialized inverters) तसेच अचूक रोटर पोझिशन सेन्सिंग (rotor position sensing) ची गरज भासते.
3. **टॉर्क रिपल आणि नॉईज (Torque Ripple and Noise**): सॅलियंट पोल डिझाईन (Salient Pole Design)आणि मॅग्नेटिक रिलक्टन्स मधील अचानक बदलांमुळे (Abrupt Changes in Magnetic Reluctance),सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरमध्ये विशेषतः कमी स्पीडवर हाय टॉर्क रिपल (High Torque Ripple) दिसून येतो. यामुळे ऑडिबल नॉईज (Audible Noise) आणि व्हायब्रेशन

(Vibration) निर्माण होतात, जे सेन्सेटिव्ह किंवा प्रिसिजन ॲप्लिकेशन्स (Sensitive or Precision Applications) साठी त्रासदायक ठरू शकतात.

4. **लो पॉवर फॅक्टर (Lower Power Factor):** परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर्स (Permanent Magnet Synchronous Motors) किंवा इंडक्शन मोटर्स (Induction Motors) च्या तुलनेत सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर सामान्यतः लो पॉवर फॅक्टर (Lower Power Factor) सह कार्य करते. यामुळे रिॲक्टिव्ह पॉवर कंझम्प्शन (Reactive Power Consumption) वाढते, ज्यामुळे सिस्टमची एकूण एफिशियन्सी (Overall System Efficiency) घटते जोपर्यंत एक्सटर्नल उपायां द्वारे सुधारणा केली जात नाही.
5. **लिमिटेड ओव्हरलोड कॅपॅसिटी (Limited Overload Capacity):** रोटरची मॅग्नेटिक सॅच्युरेशन (Magnetic Saturation of Rotor) मोटरच्या हाय टॉर्क लोडला लांब कालावधीसाठी हाताळण्याच्या क्षमतेवर मर्यादा घालते. म्हणून, सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरची ओव्हरलोड टॉलरन्स (Overload Tolerance) कमी असते, ज्यामुळे हेवी ड्युटी किंवा हायली डायनॅमिक लोड कंडीशन्स (Heavy-Duty or Highly Dynamic Load Conditions)साठी ती योग्य ठरत नाही, जो पर्यंत विशेष डिझाईन विचारात घेतले जात नाहीत.
6. **सर्व ॲप्लिकेशन्ससाठी सूटेबल नाही (Not Suitable For All Applications):** अचूक नियंत्रण आणि स्टारटिंग टॉर्कवरील मर्यादा (Limitations In Torque At Startup) यामुळे, सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर त्या ॲप्लिकेशन्स साठी योग्य नाही जिथे वारंवार स्टॉप-स्टार्ट सायकल्स (Frequent Stop-Start Cycles), डायरेक्ट ग्रीड कनेक्शन (Direct Grid Connection), किंवा अचानक लोड बदल (Abrupt Load Changes) होतात ॲडव्हान्स मोटर कंट्रोलर्स (Advanced Motor Controllers) नसताना.
7. **लेस मॅच्युअर टेक्नॉलजी (Less Mature Technology):** जरी याची लोकप्रियता वाढत असली तरीही, सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर अजूनही इंडस्ट्रीत पूर्णतः प्रस्थापित नाही (Less Mature in Terms Of Industrial Adoption) इंडक्शन मोटर्स किंवा पर्मनेंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरच्या तुलनेत. यामुळे स्पेअर पार्ट्सची मर्यादित उपलब्धता, कमी प्रशिक्षित तंत्रज्ञ, आणि हायर इनिशियल सेटअप कॉम्प्लेक्सिटी (Higher Initial Setup Complexity) असे मुद्दे उद्भवू शकतात.
8. **हाय इनिशियल कॉस्ट फॉर कंट्रोल इक्विपमेंट (High Initial Cost for Control Equipment):** जरी सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरचे रोटर कन्स्ट्रक्शन सिंपल आणि इकोनोमिकल (Simple Rotor Construction And Economical) असली तरी, ॲडव्हान्स ड्राईव्ह इलेक्ट्रॉनिक्स (Advanced Drive Electronics) आणि पोजिशन सेन्सर्स (Position Sensors) यांची आवश्यकता असल्यामुळे एकूण सिस्टिमचा ओवरऑल कॉस्ट (Initial Cost of the Overall System)वाढतो.

सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरचे ॲप्लिकेशन्स (Applications of Synchronous Reluctance Motor):

1. **पंप्स अँड फॅन्स (Pumps and Pumps):** सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर हे सेंट्रिफ्यूगल पंप्स (Centrifugal Pumps),एचव्हीएसी फॅन्स (HVAC Fans),आणि ब्लोअर्स (Blowers) मध्ये मोठ्या प्रमाणावर वापरले जातात, जिथे लोड सतत किंवा स्लोली बदलतो. यांचा हाय एफिशन्सी (High Efficiency) आणि लो मेंटेनेन्स (Low Maintenance) यामुळे हे कंटिन्युअस ड्युटी अप्लिकेशन्स (Continuous-Duty Applications)साठी खूप उपयुक्त ठरतात, विशेषतः अशा उद्योगांसाठी जे एनर्जी सेव्हिंग (Energy Saving) वर लक्ष केंद्रित करतात.
2. **इंडस्ट्रियल ऑटोमेशन (Industrial Automation):** ऑटोमेटेड मॅन्युफॅक्चरिंग सिस्टिम्स (Automated manufacturing systems) मध्ये सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर वापरले जातात कन्वेअर्स (Conveyors), ॲक्च्युएटर्स (Actuators),आणि रोबोटिक आर्म्स (Robotic Arms) च्या अचूक नियंत्रणासाठी. यांचा फास्ट रिस्पॉन्स (Fast Response) आणि रिलायबल टॉर्क कंट्रोल (Reliable Torque Control) हे त्यांना मॉडर्न कंट्रोल सिस्टिम्स (Modern Control Systems) आणि पीएलसी-बेस्ड ऑटोमेशन (PLC-based automation) मध्ये सहज इंटिग्रेट (Integrate) करता येण्या जोगं बनवतो.
3. **टेक्सटाईल मशिनरी (Textile Machinery):** ही मोटर्स स्पिनिंग (Spinning), वीव्हिंग (Weaving), आणि डायिंग मशीनस (Dyeing Machines) मध्ये वापरली जातात कारण त्या स्मूथ ऑपरेशन्स (Smooth Operation), कॉम्पॅक्ट साईझ (Compact Size), आणि एनर्जी एफिशियन्सी (Energy Efficiency) देतात. कमी नॉईज (Noise) आणि व्हायब्रेशन (Vibration) स्तरामुळे उत्पादनाची गुणवत्ता राखली जाते आणि ऑपरेटरला आरामदायक कामकाजाचा अनुभव मिळतो.
4. **सीएनसी मशिन्स अँडमशिन टूल्स (CNC Machines And Machine Tools):** हाय प्रेसिजन ॲप्लिकेशन्स जसे की सीएनसी लेथ्स (CNC lathes), मिलिंग मशीनस (Milling Machines),आणि ग्राइंडर्स (Grinders) मध्ये सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर वापरले जातात कारण त्यामध्ये अचूक स्पीड (Speed) आणि टॉर्क कंट्रोल (Torque Control) मिळतो, जो टाईट मशीनींग टोलरन्सेस (Tight Machining Tolerances) आणि रिपीटबिलिटी (Repeatability) साठी आवश्यक असतो.
5. **कंप्रेसर्स (Compressors):** सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटरचा वापर वाढत्या प्रमाणात रेफ्रिजरेशन (Refrigeration) आणि एअर कंप्रेशन सिस्टिम्स (Air Compression Systems) मध्ये होतो, जिथे व्हेअरिएबल स्पीड ऑपरेशन (Variable-Speed Operation) मुळे वेगवेगळ्या लोड परिस्थितीत ही एफिशियन्सीने काम करता येते. पार्टिअल लोड एफिशियन्सी (Partial load efficiency) ही अशी प्रणालींमध्ये एक मोठा फायदा आहे.
6. **इलेक्ट्रिक व्हेइकल्स (Electric Vehicles):** जरी हे परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर्स इतके सामान्य नसले तरी, सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर चा वापर इलेक्ट्रिक व्हेइकल्स (Electric Vehicle) आणि हायब्रिड व्हेइकल्स (Hybrid Vehicles) मध्ये होऊ लागला आहे कारण त्यांना हाय एफिशियन्सी (High

Efficiency) ,रेअर-अर्थ मटेरियल-फ्री डिझाईन (Rare-Earth Material-Free Design), आणि योग्य कंट्रोल सिस्टिम्स (Control Systems) सह चांगली कामगिरी करता येते.

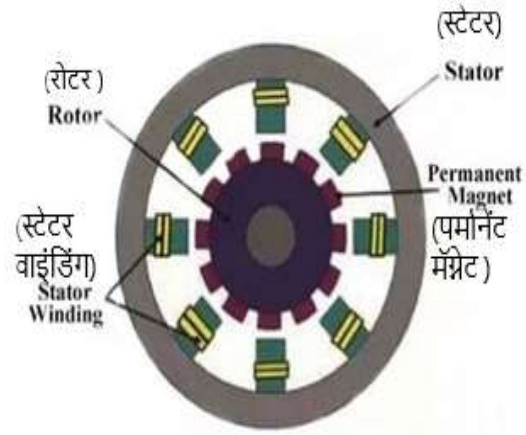
7. **वॉटर ट्रीटमेंट प्लांट्स (Water Treatment Plants):** म्युनिसिपल (Municipal) आणि इंडस्ट्रियल वॉटर ट्रीटमेंट फॅसिलिटीज (Industrial Water Treatment Facilities) मध्ये सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर वापरले जातात पंप्स (Pumps), ॲजिटेटर्स (Agitators), आणि ब्लोअर्स (Blowers) चालवण्यासाठी. या मोटर्सची रेलियबिलिटी (Reliability) आणि लो मेंटेनन्स (Low Maintenance) हे अशा क्रिटिकल इन्फ्रास्ट्रक्चर (Critical Infrastructure) मध्ये फार महत्त्वाचे असते.
8. **ॲग्रिकल्चरल इक्विपमेंट (Agricultural Equipment):** इरिगेशन पंप्स (Irrigation Pumps), ग्रेन हँडलिंग सिस्टिम्स (Grain Handling Systems), आणि ऑटोमेटेड फीडर्स (Automated Feeders) मध्ये सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर वापरले जातात.
9. **फूड ॲन्ड बेव्हरेज इंडस्ट्री (Food and Beverage Industry):** पॅकेजिंग (Packaging), बॉटलिंग (Bottling),आणि प्रोसेसिंग लाइन्स (Processing Lines) मध्ये सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर वापरले जातात कारण त्यांचे हायजेनिक डिझाईन (Hygienic Design), क्वायट ऑपरेशन (Quiet Operation), आणि प्रिसीजन कंट्रोल सिस्टिम्स (Precision Control Systems) शी कंपॅटिबल इंडस्ट्रीसाठी फायदेशीर असते.
10. **एनर्जी सेंसिटिव्ह इंडस्ट्रीज (Energy-Sensitive Industries):** डेटा सेंटर्स (Data centers), ग्रीन बिल्डिंग्स (Green Buildings), आणि फार्मास्युटिकल मॅन्युफॅक्चरिंग (Pharmaceutical Manufacturing) सारख्या एनर्जी कन्झर्वेशन (Energy Conservation) वर लक्ष देणाऱ्या उद्योगां मध्ये सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर चा वापर वाढतो आहे कारण ते ऑपरेशनल कॉस्ट्स (Operational Costs) कमी करतात आणि सस्टेनेबिलिटी गोल्स (Sustainability Goals) साध्य करण्यात मदत करतात.

5.1.3 पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Permanent Magnet Synchronous Motors – PMSM):

पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (PMSM) ही एक टाइपची सिंक्रोनस एसी मोटर (Synchronous AC Motor) आहे, ज्यामध्ये रोटर (Rotor) मध्ये वाइंडिंग्स (Windings) ऐवजी पर्मनंट मॅग्नेट्स (Permanent Magnets) असतात. हे मॅग्नेट्स एक स्थिर मॅग्नेटिक फील्ड (Constant Magnetic Field) तयार करतात, तर स्टेटर (Stator) मध्ये तीन-फेज वाइंडिंग (Three-Phase Winding) असते जी एसी सप्लाय (AC Supply) ने चालते. ही मोटर सप्लाय फ्रिक्वेन्सीशी सिंक्रोनाइज (in Synchronism with the Supply Frequency) होते, म्हणजेच स्टेटर फील्ड आणि रोटरमध्ये स्लिप (No Slip) होत नाही. पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर ची वैशिष्ट्ये म्हणजे हाय एफिशियन्सी (Efficiency), हाय पॉवर डेंसिटी (Power Density),आणि अचूक स्पीड (Speed)व पोजिशन कंट्रोल (Position Control),ज्यामुळे या मोटर्सचा वापर डायनॅमिक परफॉर्मन्स (Dynamic Performance) आवश्यक असलेल्या ॲप्लिकेशन्स मध्ये केला जातो. उदाहरणार्थ, इलेक्ट्रिक व्हेइकल्स (Electric Vehicles),रोबोटिक्स (Robotics), एरोस्पेस सिस्टम्स (Aerospace Systems),आणि औद्योगिक ऑटोमेशन (Industrial Automation).

पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरचे दोन मेन टाइप आहेत:

1. **सर्फेस-माउंटेड पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर(Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors):** मॅग्नेट्स रोटरवर माउंट केलेले असतात.
2. **इंटीरियॉर पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Interior Permanent Magnet Synchronous Motors) :** मॅग्नेट्स रोटरच्या आत वाउंड असतात, ज्यामुळे हाय स्पीड आणि टॉर्कसाठी (Torque) अधिक चांगली एफिशियन्स मिळते. पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरला एक इन्व्हर्टर (Inverter) आणि कंट्रोलर (Controller) ची आवश्यकता असते, ज्याद्वारे एसी पुरवठ्याचे व्यवस्थापन आणि मोटरच्या कार्यप्रणालीचे नियंत्रण (Operation Control) केले जाते.



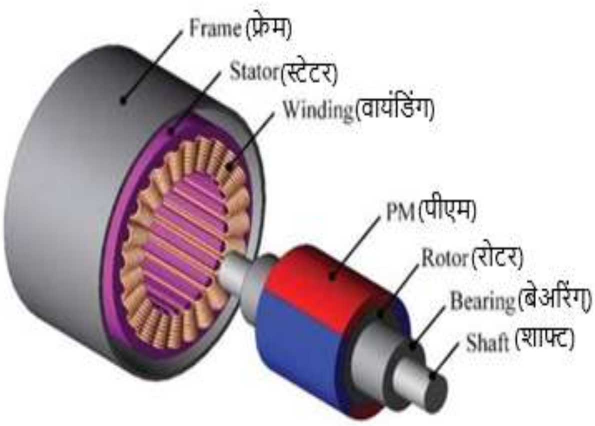


Fig.5.3 पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Permanent Magnet Synchronous Motor)

पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरचे कन्स्ट्रकशन (Construction of a Permanent Magnet Synchronous Motor):

पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Permanent Magnet Synchronous Motor) चे कन्स्ट्रकशन कॉन्व्हेंशिअल सिंक्रोनस मोटरशी खूप समान असते, परंतु एक महत्त्वाचा फरक असतो तो म्हणजे रोटरचे कन्स्ट्रकशन. कॉन्व्हेंशिअल सिंक्रोनस मोटर्समध्ये रोटरवर फील्ड वायंडिंग्स (Field Windings) असतात, तर पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मध्ये पर्मनंट मॅग्नेटस चा (Permanent Magnets) वापर रोटरची मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण करण्यासाठी केला जातो.

पर्मनंट मॅग्नेटस मुळे एक्स्टर्नल एक्सायटेशन (External Excitation) आणि स्लिप रिंग्स (Slip Rings)ची आवश्यकता नसते. हे पर्मनंट मॅग्नेटस सामान्यतः हाय पर्मिअबिलिटी (High Permeability) असलेल्या मटेरियल्स पासून तयार केले जातात, जसे की सॅमॅरियम-कोबॅल्ट (Samarium-Cobalt) किंवा नियोडिमियम-आयरन-बोरॉन (Neodymium-Iron-Boron). यांपैकी, नियोडिमियम-आयरन-बोरॉन हे सर्वात सामान्यपणे वापरले जाते कारण त्याची किमत कमी आहे, मॅग्नेटिक स्ट्रेंथ जास्त असते आणि ते सहजपणे उपलब्ध

होते.पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरमध्ये, पर्मनेंट मॅग्नेटस रोटरवर बसवले जातात, आणि हे मॅगनेट कसे ठेवले जाते यावरून या मोटरचे कन्स्ट्रकशन दोन प्रमुख प्रकारात विभागले जाते:

1. **सर्फेस-माउंटेड पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor):** या प्रकारातील मॅग्नेट रोटरच्या आउटर सर्फेस वर बसवले जातात. ही रचना अधिक साधी असते आणि ती त्या ॲप्लिकेशन्स मध्ये वापरली जाते जेथे स्मूथ (Smooth)आणि एफिशंट ऑपरेशन (Efficient Operation) आवश्यक असते.
2. **इन्टिरीअर पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोन समोटर (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor):**या प्रकारातील मॅग्नेट रोटर कोअरच्या आत समाविष्ट केले जातात. या रचनेमुळे मेकॅनिकल स्ट्रेंग्थ (Mechanical Strength) वाढते, फील्ड कमी करण्याच्या कार्याची (Field Weakening Operation) क्षमता मिळते, आणि अधिक टॉर्क डेन्सिटी (Torque Density)प्राप्त होते, ज्यामुळे ती हाय परफॉर्मन्स अप्लिकेशन्स साठी, जसे की इलेक्ट्रिक वाहनांसाठी (Electric Vehicles),अत्यंत उपयुक्त बनते.पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनसमोटर च्या या दोन्ही प्रकारांमध्ये, पर्मनंट मॅग्नेटचा वापर मोटरच्या कार्यक्षमतेला अधिक सुधारतो, ज्यामुळे ही मोटर अधिक विश्वसनीय, मजबूत आणि कार्यक्षम बनते.

परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरचे कन्स्ट्रक्शन पार्ट्स (Construction Parts of Permanent Magnet Synchronous Motor):

1. **स्टेटर(Stator):**

फंक्शन (Function): थ्री फेज एसी सप्लाय दिल्यावर रोटेटिंग मॅग्नेटिक फिल्ड (Rotating Magnetic Field) तयार होते.

कन्स्ट्रक्शन (Construction):

a) एडी करंट लॉसेस (Eddy Current Losses)कमी करण्यासाठी लेमिनेटेड आयर्न कोर (Laminated Iron Core) चा वापर केला जातो.
b) थ्री फेज वाइंडिंग (Three-Phase Winding) स्टेटर स्लॉट्स मध्ये बसवलेली असते.
c) इंडक्शन मोटर प्रमाणेच (Induction Motor) स्टेटरची रचना असते.

2. **रोटर विथ परमनंट मॅग्नेट्स (Rotor With Permanent Magnets):**

फंक्शन (Function):कॉन्स्टंट मॅग्नेटिक फिल्ड (Constant Magnetic Field) निर्माण करते.

कन्स्ट्रक्शन (Construction):

a) लॉसेस कमी करण्यासाठी लेमिनेटेड स्टीलचा रोटर कोर (Laminated Steel Rotor Core) वापरला जातो.
b) परमनंट मॅग्नेट्स (Permanent Magnets) रोटरवर फिक्स असतात.

टाइप्स (Types):

a) सर्फेस माउंटेड पर्मनेंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor): मॅग्नेट्स रोटरच्या पृष्ठभागावर बसवलेले असतात.

b) इंटीरियर पर्मनेंट मॅग्नेट सिंक्रोनसमोटर (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor): मॅग्नेट्स रोटरच्या आत बसवलेले असतात, ज्यामुळे टॉर्क (Torque) चांगला मिळतो.

3. **शाफ्ट (Shaft):**

फंक्शन (Function): मेकॅनिकल एनर्जी (Mechanical Energy) लोडकडे पोहोचवतो.

कन्स्ट्रक्शन (Construction): सॉलिड स्टील शाफ्ट (Solid Steel Shaft) रोटरला जोडलेला असतो.

4. **कूलिंग सिस्टम (Cooling System):**

फंक्शन (Function): स्टेटर व रोटरमधून निर्माण होणारी हीट (Heat) दूर करतो.

टाइप्स (Types):

a) एअर कूल्ड (Air-Cooled): कमी ते मध्यम पॉवर मोटर्ससाठी.

b) लिक्विड-कूल्ड (Liquid-Cooled): हाय कार्यक्षमतेसाठी किंवा औद्योगिक वापरासाठी.

5. **बेअरिंग्स (Bearings):**

फंक्शन (Function): रोटर शाफ्टला सपोर्ट देतात व फिरण्यास मदत करतात.

कन्स्ट्रक्शन (Construction): मोटर हाउझिंगच्या दोन्ही टोकांवर प्रिसीजन बॉल किंवा रोलर बेअरिंग्स (Precision Ball or Roller Bearings) लावले असतात.

6. **फ्रेम किंवा हाउझिंग (Frame or Housing):**

फंक्शन (Function):इंटर्नल पार्ट्सना प्रोटेक्ट करतो.

कन्स्ट्रक्शन (Construction): कास्ट आयर्न, स्टील किंवा ॲल्युमिनियम पासून बनवलेले; कधी कधी पॅसिव्ह कूलिंगसाठी फिन्स (Fins)असतात.

7. **सेन्सर (Sensor):**

फंक्शन (Function): रोटरची पोझिशन (Rotor Position) शोधतो आणि फीडबॅक कंट्रोलसाठी वापरला जातो.

टाइप्स (Types):

a) एन्कोडर (Encoder)

b) रिझॉल्वर (Resolver)

पर्मनेंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरच वर्किंग प्रिंसिपल (Working Principle of Permanent Magnet Synchronous Motor):

पर्मनेंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरही एक कन्वेन्शनल सिंक्रोनस मोटर (Conventional Synchronous Motor) प्रमाणेच बेसिक प्रिंसिपलवर काम करते. या मोटरचं फंक्शनिंग स्टेटर (Stator) मध्ये निर्माण होणाऱ्या रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Rotating Magnetic Field) वर अवलंबून असतं. हे रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड एक एलेक्ट्रोमोटिव्ह फोर्स (Electromotive Force) निर्माण करतं आणि त्या जोरावर मोटर सिंक्रोनस स्पीड (Synchronous Speed) वर चालते.

जेव्हा थ्री-फेज एसी सप्लाय (Three-Phase AC Supply) हा स्टेटर वायंडिंग्स (Stator Windings) ला दिला जातो, तेव्हा स्टेटरआणि रोटर यांच्या मधल्या एअर गॅपमध्ये एक रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण होते. हि फिरणारी मॅग्नेटिक फील्ड रोटर वरील पर्मनेंट मॅग्नेट नी तयार झालेल्या कॉनस्टंट मॅग्नेटिक फील्ड सोबत इंटरॅक्ट होते. या इंटरॅक्शन मधून एक टॉर्क निर्माण होतो.रोटरचे मॅग्नेटिक पोल्स हे स्टेटरच्या रोटेटिंग मॅग्नेटिक फील्ड सोबत लॉक होतात आणि त्याच वेगात फिरायला लागतात. त्यामुळे रोटर आणि स्टेटर हे दोघंही सिंक्रोनायझेशनमध्ये फिरतात. पण, पर्मनेंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर ही एक नॉन-सेल्फ-स्टार्टिंग (Non-Self-Starting)मोटर आहे. म्हणजेच ती स्वतःहून सुरू होत नाही. म्हणूनच, या मोटरला एक एक्स्टर्नल कंट्रोलर (External Controller) लागतो जो व्हेरिएबल फ्रिक्वेन्सी पॉवर सप्लाय (Variable Frequency Power Supply) पुरवतो. हा कंट्रोलर स्टेटरला दिल्या जाणाऱ्या इनपुट पॉवर ची फ्रिक्वेन्सी स्लोली वाढवत जातो, ज्या मुळे रोटर स्लोली स्पीड पकडतो आणि शेवटी तो सिंक्रोनस स्पीड वर लॉक होतो.

ही संपूर्ण प्रक्रिया स्मूथ ॲक्सेलरेशन (Smooth Acceleration) साठी अत्यावश्यक असते आणि ह्यामुळे पर्मनेंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरला जिथे प्रिसाईज कंट्रोल (Precise Control),हाय एफिशियन्सी,आणि कन्सिस्टन्ट टॉर्क (Consistent Torque) लागतो,अशा इंडस्ट्रियल,ऑटोमोटिव्ह, आणि रोबोटिक्स सारख्या हाय परफॉर्मन्स ॲप्लिकेशन्समध्ये मोठ्या प्रमाणावर वापर केला जातो.

परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरचे ऍडवांटेजेस (Advantages of Permanent Magnet Synchronous Motor):

1. **हाय एफिशियंसी (High Efficiency):** परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर्स खूपच एफिशियंट असतात कारण रोटरमध्ये करंट इंड्यूस होत नाही, त्यामुळे रोटर मध्ये कॉपर लॉसेस (Rotor Copper Losses) होत नाहीत. कमी व जास्त लोड दोन्ही परिस्थितीत इंडक्शन मोटर्स (Induction Motors) पेक्षा चांगली एफिशियंसी मिळते.
2. **हाय पॉवर डेनसिटी (High Power Density):** कमी साईज व वजनात जास्त टॉर्क (Torque) मिळतो, जे इलेक्ट्रिक व्हेईकल्स (Electric Vehicles) आणि रोबोटिक्स (Robotics) सारख्या स्पेस कॉनस्ट्रेन्ड अप्लिकेशन्ससाठी महत्त्वाचे आहे.
3. **लो स्पीडवर बेटर परफॉर्मन्स (Better Performance at Low Speeds):** परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर्स कमी स्पीडवर सुद्धा हायटॉर्क देतात, गिअर रिडक्शन शिवाय, ज्यामुळे कंट्रोल व रिस्पॉन्सिव्हनेस सुधारतो.
4. **हाय टॉर्क टू इनर्शिया रेशो (High Torque-to-Inertia Ratio):**यामुळे डायनॅमिक रिस्पॉन्स फास्ट होतो आणि एक्सेलेरेशन/डीसेलेरेशन लवकर होते, जे प्रिसिजन मोशन कंट्रोल सिस्टम्स (Precision Motion Control Systems) मध्ये उपयुक्त आहे.
5. **प्रिसाइज आणि स्मूथ कंट्रोल (Precise and Smooth Control):** अचूक स्पीड आणि पोझिशन कंट्रोल (Speed and Position Control) लागणाऱ्या अप्लिकेशन्ससाठी आदर्श जसे की सीनसी मशीन, रोबोटिक्स, आणि एलिवेटर्स (Elevators).

6. **लोअर मेंटेनन्स (Lower Maintenance):** यामध्ये ब्रशेस किंवा कम्युटेटर्स (Brushes or Commutators) नसतात, त्यामुळे झिज कमी होते आणि मेंटेनन्स कमी लागतो.
7. **बेटर थर्मल परफॉर्मन्स (Better Thermal Performance):** रोटर करंट लॉसेस नसल्यामुळे हीट कमी जनरेट होते, त्यामुळे थर्मल एफिशियंसी (Thermal Efficiency) वाढते आणि साधे कूलिंग सिस्टिम (Cooling System) पुरेसे असते.
8. **क्वायट ऑपरेशन (Quiet Operation):** परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर्स सामान्यतःकमी नॉइज आणि वायब्रेशन (Noise and Vibration) निर्माण करतात, त्यामुळे एच व्ही एसी सिस्टम्स, इलेक्ट्रिक व्हेईकल्स यांसारख्या शांतता आवश्यक असलेल्या ठिकाणी उपयुक्त आहेत.

परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरचे डिसऍडवांटेजेस (Disadvantages of Permanent Magnet Synchronous Motor):

1. **हाय इनिशियल कॉस्ट (High Initial Cost):** परमनंट मॅग्नेट्स (Permanent magnets) विशेषतःरेअरअर्थ टाइप्स (rare-earth types) (उदा.निओडिमियम - neodymium) महाग असतात. एकूण मोटर कॉस्ट ही इंडक्शन मोटर्स किंवा ब्रश्ड डीसी मोटर्स पेक्षा जास्त असते.
2. **डिमॅग्नेटायझेशन ची रिस्क (Risk of Demagnetization):** जास्त करंट (Current) किंवा खूप हाय टेंपरेचर (High Temperatures) मुळे रोटर मॅग्नेट्स डिमॅग्नेट होऊ शकतात, ज्यामुळे परफॉर्मन्स लॉस कायम स्वरूपी होतो. त्यामुळे खूप उष्ण वातावरणात वापर करताना थर्मल मॅनेजमेंट काळजी पूर्वक करावे लागते.
3. **कॉम्प्लेक्स कंट्रोल सिस्टिम्स (Complex Control Systems):** परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरला चालवण्यासाठी फील्ड-ओरिएंटेड कंट्रोल (Field-Oriented Control) किंवा सेन्सर/सेन्सरलेस अल्गोरिदम्स (Algorithms) लागतात, ज्यामुळे ड्राइव्ह सिस्टिम अधिक कॉम्प्लेक्स व महाग होते.
4. **मॅग्नेट सप्लाय इश्यूज(Magnet Supply Issues):** रेअर अर्थ मॅग्नेट्सची उपलब्धता (Availability) आणि किमती जिओपोलिटिकल आणि सप्लाय चेन इश्यूज मुळे प्रभावित होऊ शकतात, कारण बहुतेक सप्लाय काही ठराविक देशांमध्ये केंद्रित आहे.
5. **डायरेक्ट मेन्सवर स्टार्टिंग शक्य नाही (No Direct Starting From Mains):**काही इंडक्शन मोटर्सप्रमाणे,परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरला थेट एसी मेन्स (Mains)वरून सुरू करता येत नाही. यासाठी इन्व्हर्टर/ड्राइव्ह (Inverter/Drive)आवश्यक असतो.
6. **रोटरमध्ये ओव्हरहीटिंग रिस्क (Risk of Overheating in Rotor):** जरी रोटर लॉसेस कमी असले तरी परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरमध्ये रोटरची कूलिंग चांगली नसते कारण मॅग्नेट्स बंदिस्त असतात आणि हीट कंडक्ट चांगली करत नाहीत.
7. **स्ट्राँग मॅग्नेट्समुळे सेफ्टी कन्सर्न्स (Safety Concerns with Strong Magnets):** परमनंट मॅग्नेट्स मुळे मॅन्युफॅक्चरिंग व मेंटेनन्स दरम्यान धोका निर्माण होतो. हे मॅग्नेट्स फेरोमॅग्नेटिक टूल्स किंवा धातूच्या तुकड्यांना अनपेक्षितपणे आकर्षित करू शकतात.

परमनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटरचे अप्लिकेशन्स (Applications of Permanent Magnet Synchronous Motor):

1. **इलेक्ट्रिक अॅन्ड हायब्रिड व्हेइकल्स (Electric & Hybrid Vehicles):**
   PMSMs हाय टॉर्क डेन्सिटी (Torque Density) आणि एफिशियन्सी (Efficiency) एका कॉम्पॅक्ट स्वरूपात देतात, ज्यामुळे ते EVs (Electric Vehicles) आणि हायब्रिड वेहिकल साठीआदर्श आहेत.
2. **इंडस्ट्रियल ऑटोमेशन अॅन्ड रोबोटिक्स (Industrial Automation & Robotics):**
   प्रिसाईज स्पीड (Precise Speed) आणि पोजिशन कंट्रोल (Position Control) मिळते, जे CNC मशीन्स (CNC Machines) आणि रोबोटिक आर्म्स (Robotic Arms) साठी आवश्यक आहे.
3. **मशीन टूल्स (Machine Tools):**
   PMSMs वेगवेगळ्या स्पीड्स (Varying Speeds) वर स्मूथ आणि अचूक ऑपरेशन सक्षम करतात, जे लाथ्स (Lathes) आणि मिलिंग मशीन्स (Milling Machines) साठी योग्य आहे.
4. **एचव्हीएसी सिस्टिम्स (HVAC Systems):**
   एनर्जी एफिशियन्सी (Energy Efficiency) आणि क्वायट परफॉर्मन्स (Quiet Performance) मुळे,HVAC युनिट्समधील कंप्रेसर्स (Compressors), फॅन्स (Fans), आणि पंप्स (Pumps) साठी योग्य आहेत.
5. **एलिव्हेटर्स अॅन्ड एस्केलेटर्स (Elevators and Escalators):**
   PMSMs स्मूथ, रिलायबल आणि क्वायट ऑपरेशनसह प्रिसाईज स्पीड कंट्रोल (Precise Speed Control) देतात, जे एलिव्हेटर्स (Elevators) आणि एस्केलेटर्स (Escalators) साठी आवश्यक आहे.
6. **रिन्युएबल एनर्जी सिस्टिम्स (Renewable Energy Systems):**
   विंड टर्बाइन्स (Wind Turbines) आणि हायड्रो जनरेटर्स (Hydro Generators) मध्ये हाय एफिशियन्सी (Efficiency) आणि डायरेक्ट-ड्राइव्ह (Direct-Drive) क्षमतांसाठी वापरली जाते.
7. **एरोस्पेस अॅन्ड डिफेन्स (Aerospace and Defence):**
   हलके (Lightweight) आणि रिलायबल PMSMs UAV प्रोपल्शन (UAV propulsion) आणि एअरक्राफ्ट अॅक्चुएटर्स (Aircraft Actuators) मध्ये वापरले जातात, जे कठीण कंडीशन्स (Demanding Conditions) मध्ये काम करतात.
8. **रेल अॅन्ड इलेक्ट्रिक ट्रॅक्शन (Rail and Electric Traction):**
   PMSMs हाय टॉर्क (Torque) देतात आणि रीजेनरेटिव्ह ब्रेकिंग (Regenerative Braking) ला सपोर्ट करतात, जे इलेक्ट्रिक ट्रेन (Electric Trains), ट्रॅम्स (Trams), आणि मेट्रो सिस्टीम्स (Metro Systems) मध्ये वापरले जातात.
9. **होम अप्लायन्सेस (Home Appliances):**

लो नॉइज (Low Noise) आणि एनर्जी एफिशियंट (Energy-Efficient) PMSMs वॉशिंग मशीन्स (Washing Machines), फ्रिज (Refrigerators), आणि एयर कंडिशनर्स (Air Conditioners) मध्ये परफॉर्मन्स सुधारतात.

10. मेडिकल डिव्हाइसेस (Medical Devices):

प्रिसाईज आणि क्वायट ऑपरेशनमुळे PMSMs MRI मशीन्स (MRI machines), सर्जिकल रोबोट्स (Surgical Robots), आणि व्हेंटिलेटर्स (Ventilators) मध्ये वापरले जातात.

5.1.4. स्टेपर मोटर (Stepper Motor):

स्टेपर मोटर (Stepper Motor) ही एक टाइपची ब्रशलेस (Brushless), सिंक्रोनस (Synchronous) इलेक्ट्रिक मोटर (Electric Motor) आहे, जी इलेक्ट्रिकल पल्सेस (Electrical Pulses) यांना प्रिसाईज मेकॅनिकल मूव्हमेंट मध्ये (Precise Mechanical Movement) कन्वर्ट करते. कन्वेन्शनल मोटर (Conventional Motors) सतत फिरतात, परंतु स्टेपर मोटर (Stepper Motor) डिस्क्रीट स्टेप्स (Discrete Steps) मध्ये फिरते, ज्यामुळे पोझिशन (Position), स्पीड (Speed), आणि ॲक्सेलेरेशन (Acceleration) यांचे अचूक नियंत्रण (Accurate Control) करता येते, तसेच फीडबॅक सिस्टीम (Feedback Systems) ची गरज लागत नाही.

प्रत्येक इलेक्ट्रिकल पल्स (Electrical Pulse) दिल्यानंतर, तिचा शाफ्ट (Shaft) एका निश्चित कोनाने (Fixed Angle) फिरतो, ज्याला स्टेप (Step) म्हणतात. त्यामुळे, ही स्टेपर मोटर (Stepper Motor) 3D प्रिंटर्स (3D Printers), CNC मशीन (CNC Machines), रोबोटिक्स (Robotics), आणि ऑटोमेटेड इंस्ट्रुमेंटेशन (Automated Instrumentation) सारख्या अचूक पोझिशनिंग (Precise Positioning) आणि पुनरावृत्ती (Repeatability) आवश्यक असलेल्या क्षेत्रांमध्ये उपयोगी पडते.

ही स्टेपर मोटर (Stepper Motor) इलेक्ट्रोमॅग्नेटिझम (Electromagnetism) च्या तत्त्वावर कार्य करते, जिथे स्टेटर (Stator) मधील कॉइल्स (Coils) विशिष्ट अनुक्रमाने (Specific Sequence) एनेर्जाइज (Energized) केल्या जातात, ज्यामुळे टुथेड रोटर (Toothed Rotor) चे दात आकर्षित होतात. तिची हालचाल स्टेपर ड्रायव्हर (Stepper Driver) या उपकरणाद्वारे कंट्रोल केली जाते, जो स्टेपिंग सिक्वेन्स (Stepping Sequence) आणि स्पीड (Speed) ठरवतो.

स्टेपर मोटरच्या अनेक टाइप आहेत, जसे की:

1. पर्मनंट मॅग्नेट (Permanent Magnet - PM) स्टेपर मोटर
2. व्हेरिएबल रिलक्टन्स (Variable Reluctance - VR) स्टेपर मोटर
3. हायब्रिड (Hybrid) स्टेपर मोटर (जी PM आणि VR दोन्हींचे वैशिष्ट्ये एकत्रित करतात)

इन्कोडर्स (Encoders) किंवा फीडबॅक सेन्सर्स (Feedback Sensors) शिवाय ओपन-लूप नियंत्रण (Open-Loop Control) देण्याच्या क्षमतेमुळे, स्टेपर मोटर्स अनेक मोशन कंट्रोल सिस्टम्ससाठी (Motion Control Systems) किफायतशीर (Cost-Effective) उपाय आहेत.

स्टेपर मोटर ही एक इलेक्ट्रोमेकॅनिकल (Electromechanical) इक्विपमेंट आहे, जी इलेक्ट्रिकल पल्सेस (Electrical Pulses) ला डिस्क्रीट मेकॅनिकल स्टेप्स (Discrete Mechanical Steps) मध्ये कन्वर्ट करते. तिची रचना अँग्युलर (Angular) प्रिसाईज मेकॅनिकल मूव्हमेंट (Precise Control) शक्य करण्यासाठी केली जाते.

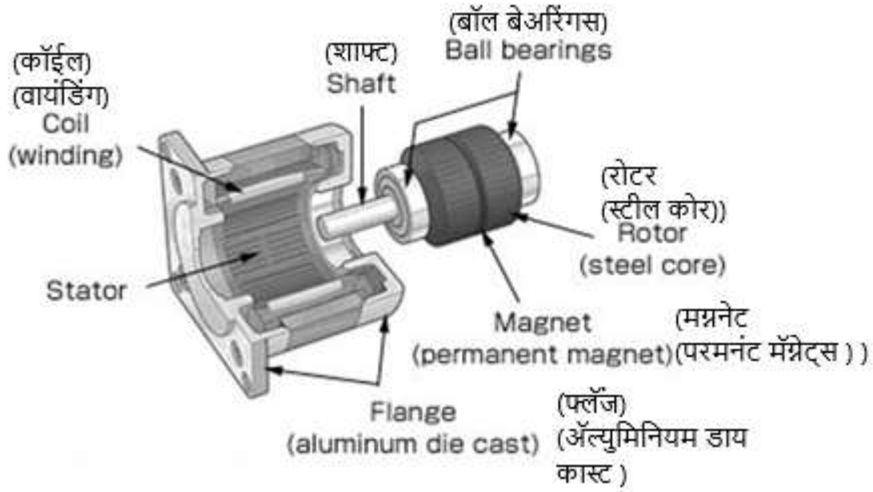


Fig.5.4: स्टेपर मोटर (Stepper Motor)

स्टेपर मोटरमध्ये खालील पार्टस समाविष्ट असतात:

1. **स्टेटर (Stator):** स्टेटर हा मोटरचा एक्सटर्नल स्टेशनरी पार्ट असतो. यात अनेक इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक विंडिंग्ज (Electromagnetic Windings / Coils) गोलाकार मेथडने मांडलेल्या असतात. या विंडिंग्ज विशिष्ट अनुक्रमाने (Specific Sequence) एनेर्जाइज (Energized) केल्या जातात ज्यामुळे फिरणारे मॅग्नेटिक फिल्ड (Rotating Magnetic Field) तयार होते. स्टेटर पोल्स (Stator Poles) आणि विंडिंग्जची संख्या मोटरच्या स्टेप अँगल (Step Angle) आणि रिझोल्यूशन (Resolution) ठरवते.
2. **रोटर (Rotor):** रोटेटिंग पार्ट रोटर हा शाफ्टवर (Shaft) बसलेला असतो. स्टेपर मोटरच्या प्रकारानुसार रोटरची तीन प्रकारे रचना असते:
   a) **पर्मनंट मॅग्नेट (Permanent Magnet - PM) रोटर:** यात पर्मनंट मॅग्नेट्स (Permanent Magnets) असतात जे स्टेटर पोल्सशी मजबूत मॅग्नेटिक संरेखन (Magnetic Field Alignment) करतात.
   b) **व्हेरिएबल रिलक्टन्स (Variable Reluctance - VR) रोटर:** हा सोफ्ट आयर्नचा (Soft Iron) असून टुथेड (Toothed) असतो, पण त्यात मॅग्नेट्स नसतात; तो कमी रिलक्टन्स (Minimum Reluctance) च्या तत्त्वावर संरेखित होतो.
   c) **हायब्रिड (Hybrid) रोटर:** यात PM आणि VR दोन्ही प्रकारांच्या वैशिष्ट्यांचा समावेश असतो; पर्मनंट मॅग्नेट्स आणि टुथेड रचना अधिक अचूकता (Precision) आणि टॉर्क (Torque) देण्यासाठी.
3. **बेअरिंग्ज (Bearings) ॲन्ड शाफ्ट (Shaft):** रोटरला दोन्ही टोकांवर बेअरिंग्ज (Bearings) दिलेले असतात ज्यामुळे फ्रीक्शन कमी होते आणि फिरणे सुरळीत होते.शाफ्ट (Shaft) रोटरशी जोडलेला असून मेकॅनिकल मोशन (Mechanical Motion) लोडकडे (Load) जसे की गिअर (Gear), पुल्ले (Pulley) किंवा लीड स्क्रू (Lead Screw) कडे पाठवतो.

4. **एंड बेल्स (End Bells) ऑर कव्हर्स (Covers):** मोटरला संरक्षक कवचात (Protective Housing) बंद केलेले असते, ज्यात रोटर, स्टेटर, आणि बेअरिंग्ज असतात. हे कवच मोटरला माउंट (Mount) करण्यास मदत करते आणि आतील भागांना धूळ किंवा नुकसानापासून प्रोटेक्शन देते.

स्टेपर मोटरचे वर्किंग (Working of Stepper Motor):

स्टेपर मोटर (Stepper Motor) ही दोन मेन पार्ट्सपासून बनलेली असते: स्टेटर (Stator – स्थिर एक्सटर्नल पार्ट) आणि रोटर (Rotor – आतील रोटेटिंग पार्ट जो शाफ्टशी जोडलेला असतो). स्टेटरमध्ये इलेक्ट्रोमॅग्नेट्स (Electromagnets) असतात, जे फेजेस (Phases) ग्रुपमध्ये असतात. सामान्यतः टू किंवा फोर फेज कॉन्फिगरेशन्स (Two or Four-Phase Configurations) वापरल्या जातात. रोटर हा आउटपुट शाफ्टशी (Output Shaft) जोडलेला असतो आणि त्यात पर्मनंट मॅग्नेट्स (Permanent Magnets) किंवा मॅग्नेटिक पोल पीसेस (Magnetic Pole Pieces) असतात.

जेव्हा एखादी फेज (Phase) एनेर्जाइज (Energize) केली जाते, तेव्हा ती एक मॅग्नेटिक फिल्ड (Magnetic Field) तयार करते, ज्यामुळे रोटर त्या डायरेक्शनने किंचित फिरतो. जेव्हा प्रत्येक फेज विशिष्ट अनुक्रमाने (Specific Sequence) एनेर्जाइज होते, तेव्हा रोटर डिस्क्रीट स्टेप्स (Discrete Steps) मध्ये फिरत राहतो.

फेज एनेरजायझेशनची क्रमवारी आणि टाईम कंट्रोल करून खालील गोष्टी शक्य होतात:

1. फिरण्याची डायरेक्शन (Direction of Rotation) उलटी किंवा सरळ केली जाऊ शकते.
2. स्टेप साइज (Step Size – म्हणजे प्रत्येक पल्समागे होणारी अँग्युलर मूव्हमेंट) समायोजित करता येते.
3. प्रत्येक रोटेशनमध्ये अधिक स्टेप्स घेतल्यास पोजिशन रिझोल्यूशन (Position Resolution) सुधारते, आणि मोटरच्या हालचालीवर अधिक अचूक कंट्रोल मिळवता येते.

एडव्हांटेजेस (Advantages):

1. **अचूक पोझिशन कंट्रोल (Precise Position Control):** स्टेपर मोटर डिस्क्रीट स्टेप्स (Discrete Steps) मध्ये फिरते, त्यामुळे फीडबॅक सिस्टीमशिवाय अचूक मुवमेंट मिळते.
2. **ओपन-लूप कंट्रोल (Open-Loop Control):** सेन्सर्स किंवा इन्कोडर्सची गरज नाही
3. **हाय टॉर्क कमी स्पीडवर (High Torque at Low Speed):** 3D प्रिंटर आणि CNC मशीनसारख्या ॲप्लिकेशन्ससाठी उपयुक्त.
4. **रीपीटबिलिटी (Repeatability):** मोटर पुन्हा-पुन्हा एकाच लोकेशनवर अचूक परत येते – रोबोटिक्ससाठी फायदेशीर.
5. **डिजिटल सिस्टीम्ससह सहज इंटरफेस (Digital Compatibility):** मायक्रोकंट्रोलर, Arduino, PLC इत्यादींसोबत सहज कनेक्ट करता येते.

डिसएडव्हांटेजेस (Disadvantages):

1. **जास्त हिट निर्माण होते (Heat Generation):** स्टेशनरी असतानाही करंट घेतल्यामुळे ओवर हिट होते.
2. **कमी इफिशन्सी (Lower Efficiency):** सातत्याने करंट घेतल्यामुळे इलेक्ट्रिसिटी वापर अधिक असतो.

3. **हाय-स्पीडवर टॉर्क कमी होतो (Low High-Speed Performance):** जास्त स्पीडला टॉर्क कमी होत जातो.
4. **रेझोनन्स व व्हायब्रेशन (Resonance Issues):** विशिष्ट स्पीड रेंजमध्ये रेझोनन्स व व्हायब्रेशन प्रॉब्लेम निर्माण होऊ शकते.
5. **ओव्हरलोड केल्यास स्टेप मिस होऊ शकतो (No Overload Protection):** फीडबॅक नसल्यामुळे स्टेप्स स्किप होण्याची शक्यता असते.

अप्लिकेशन्स: (Applications):

1. **CNC मशीन आणि 3D प्रिंटर्स (CNC Machines and 3D Printers):** टूल्स (Tools) किंवा प्रिंट हेड्स (Print Heads) चे अचूक पोझिशनिंग (Positioning) संगणक-कंट्रोल प्रक्रियांसाठी.
2. **प्रिंटर्स आणि स्कॅनर्स (Printers and Scanners):** प्रिंट हेड (Print Head) किंवा पेपर फीड मिकॅनिझम (Paper Feed Mechanism) ची अचूक हालचाल कंट्रोल करण्यासाठी.
3. **रोबोटिक्स (Robotics):** जॉइंट्स (Joints), आर्म्स (Arms), ग्रिपर्स (Grippers) आणि कन्वेयर सिस्टीम्स (Conveyor Systems) मध्ये हालचालीसाठी.
4. **कॅमेरा कंट्रोल सिस्टीम्स (Camera Control Systems):** पॅन-टिल्ट माउंट्स (Pan-Tilt Mounts), झूम (Zoom) आणि फोकस (Focus) साठी अचूक आणि पुनरावृत्ती होणारी हालचाल.
5. **मेडिकल उपकरणे (Medical Devices):** सिरिंज पंप्स (Syringe Pumps), ब्लड ॲनालायझर्स (Blood Analyzers), आणि डेंटल टूल्स (Dental Tools) मध्ये सूक्ष्म हालचालींसाठी.

विविध टाइपच्या मोटर्सची कॉम्पॅरिजन (Comparison of different Special Purpose Motors):

Table 5.1: विविध टाइपच्या मोटर्सची कॉम्पॅरिजन (Comparison of different Special Purpose Motors)

फीचर्स (Feature)	युनिव्हर्सल मोटर (Universal Motor)	सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर (Synchronous Reluctance Motor)	पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM)	स्टेपर मोटर (Stepper Motor)
(Type)	एसी/डीसी मोटर (AC/DC Motor – Single-phase)	सिंक्रोनस एसी मोटर (Synchronous AC Motor)	सिंक्रोनस एसी मोटर (Synchronous AC Motor)	सिंक्रोनस डिजिटल मोटर (Synchronous Digital Motor)
रोटर रचना (Rotor Construction)	वाउंड रोटर – कम्युटेटर व ब्रशेससह (Wound rotor with commutator + brushes)	सॅलियंट रोटर – रिलक्टन्स व्हेरिएशनसह (Salient rotor with reluctance variation)	पर्मनंट मॅग्नेट्स असलेला रोटर (Rotor with permanent magnets)	टुथ किंवा मॅग्नेट्ससह रोटर (Rotor with multiple teeth or magnets)

फीचर्स (Feature)	**युनिव्हर्सल मोटर (Universal Motor)**	**सिंक्रोनस रिलक्टन्स मोटर (Synchronous Reluctance Motor)**	**पर्मनंट मॅग्नेट सिंक्रोनस मोटर (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM)**	**स्टेपर मोटर (Stepper Motor)**
पॉवर सोर्स (Power Source)	एसी किंवा डीसी (AC or DC)	एसी – बहुधा 3-फेज (AC, typically 3-phase)	एसी – बहुधा 3-फेज (AC, typically 3-phase)	डीसी – कंट्रोलरद्वारे (DC via controller/driver)
स्पीड कंट्रोल (Speed Control)	एसीसह खराब, डीसीसह चांगले (Poor with AC, good with DC)	मर्यादित (Limited)	उत्कृष्ट – इन्व्हर्टर/इन्कोडरसह (Excellent via inverter/encoder)	उत्कृष्ट – ओपन/क्लोज लूप (Excellent – open/closed loop)
पोझिशन कंट्रोल (Position Control)	अशक्य (Not suitable)	अशक्य (Not suitable)	इन्कोडर आवश्यक (Requires encoder for precise control)	इंट्रीसिक स्टेप-बेस्ड कंट्रोल (Intrinsic step-based control)
इफिशन्सी (Efficiency)	लो (Low)	मोडरेट ते जास्त (Moderate to High)	जास्त (High)	लो ते मोडरेट (Low to Moderate)
टॉर्क वैशिष्ट्ये (Torque)	हाय प्रारंभिक टॉर्क (High starting torque)	मोडरेट टॉर्क (Moderate torque)	हाय टॉर्क (High torque)	कमी स्पीडवर हाय टॉर्क (High torque at low speed)
ब्रशेस (Brushes)	होय – मेंटेनन्स लागतो (Yes – wear and maintenance needed)	नाही (No)	नाही (No)	नाही (No)
मेंटेनन्स (Maintenance)	हाय (High)	लो (Low)	लो (Low)	लो (Low)
ॲप्लिकेशन (Applications)	हँड टूल्स, ब्लेंडर, व्हॅक्युम क्लीनर (Hand tools, blenders, vacuum cleaners)	पंप, फॅन, इंडस्ट्रियल ड्राइव्ह्ज (Pumps, fans, industrial drives)	EVs, रोबोटिक्स, HVAC, CNC (EVs, robotics, HVAC, CNC machines)	3D प्रिंटर्स, CNC, रोबोटिक्स (3D printers, CNC, robotics)
कॉस्ट (Cost)	लो (Low)	मोडरेट (Moderate)	जास्त (High)	लो ते मोडरेट (Low to Moderate)
नॉइज व व्हायब्रेशन (Noise & Vibration)	हाय (High)	लो ते मोडरेट (Low to Moderate)	लो (Low)	कधी जास्त (Can be high – depends on control)

5.2 कन्स्ट्रक्शनल डीटेल्स अॅन्ड वर्किंग प्रिन्सिपल ऑफ लिनीयर इंडक्शन मोटर (Constructional Details and Working Principle of Linear Induction Motor):

लिनीयर इंडक्शन मोटर ही एक टाइपची अल्टरनेटिंग करंट (ए.सी.) मोटर आहे जी रोटेशनल मोशनच्या (Rotational Motion) ऐवजी लिनीयर मोशन (Linear Motion) निर्माण करते. ही मोटर कन्वेन्शनल रोटरी इंडक्शन (Rotary Induction) मोटर प्रमाणेच मूलभूत तत्त्वावर कार्य करते, पण ती अनरोल्ड(Unrolled) केलेली असते म्हणजेच तिचे कन्स्ट्रक्शनल स्वरूप लिनीयर मोशन करण्यासाठी बदललेले असते.

लिनीयर इंडक्शन मोटर मध्ये स्टेटर, ज्याला प्रायमरी म्हटले जाते, फ्लॅट कंडक्टिव प्लेट (Flat Conductive Plate) बसवलेला असतो आणि त्याला इलेक्ट्रिक सप्लाय दिल्यानंतर तो ट्रॅवलिंग मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण करतो. रोटर, ज्याला सेकंडरी म्हटले जाते, हा सामान्यतः एक फ्लॅट कंडक्टिव प्लेट (जसे की अॅल्युमिनियम) असतो आणि तो प्रायमरीजवळ ठेवलेला असतो.

जेव्हा मॅग्नेटिक फील्ड प्रायमरीच्या बाजूने पुढे सरकतो, तेव्हा तो सेकंडरीमध्ये इंड्यूस्ड करंट्स निर्माण करतो. हे करंट्स आणि मॅग्नेटिक फील्ड यांच्यामध्ये लिनीयर फोर्स (Linear Force) होऊन एक लिनिअर मोशन तयार होते, जे सेकंडरीला लिनीयर मोशनने पुढे ढकलते.

या मोटरचे मेन पार्ट्स खालीलप्रमाणे आहेत:

1. **प्रायमारी (स्टेटर) (Primary (Stator Equivalent):**
   a) हे रोटरी इंडक्शन मोटर मधील स्टेटर प्रमाणे वर्क करते.
   b) स्ट्रक्चर (Structure): यामध्ये लॅमिनेटेड आयर्न कोअर्स असतात, ज्यामध्ये कॉपर किंवा अॅल्युमिनियम वाइंडिंग्ज बसवलेले असतात.
   c) फंक्शन (Function) : जेव्हा याला थ्री-फेज ए.सी दिला जातो, तेव्हा ते त्याच्या लांबीवर लिनीयर मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण करते.
   d) आकार: सामान्यतः हे फ्लॅट किंवा थोडे कर्व स्ट्रक्चर असते.
2. **सेकंडरी(रोटरी) (Secondary(Rotor Equivalent)):**
   a) समानता: हे रोटरी इंडक्शन मोटर मधील रोटर प्रमाणे असते.
   b) स्ट्रक्चर (Structure): सामान्यतः हे एक फ्लॅट कंडक्टिव प्लेट असते, जे अॅल्युमिनियम किंवा कॉपर पासून बनवलेले असते. कधी कधी याच्या मागे फेरोमॅग्नेटिक मटेरियल (जसे की स्टील) लावलेले असते जेणेकरून मॅग्नेटिक एफिशियन्सी वाढेल.
   c) फंक्शन (Function): सेकंडरी मध्ये निर्माण होणारे एडी करंट्स, मॅग्नेटिक फील्ड बरोबर इंटरअॅक्शन करून लिनिअर थ्रस्ट निर्माण करतात.
3. **एअर गॅप (Air Gap):**
   a) प्रायमरी व सेकंडरी मध्ये इक़्वल एअर गॅप ठेवलेला असतो.

b) एअर गॅप कमी असल्यास एफिशियन्सी आणि मॅग्नेटिक कपलिंग (Magnetic Coupling) सुधारते.

c) विशेषता रोटरी मोटर्स मधील एअर गॅपपेक्षा हे सहसा मोठे असते, ज्यामुळे एफिशियन्सी कमी होऊ शकते.

4. पॉवर सप्लाय(Power Supply):

a) एलआयएम (LIM) ला थ्री-फेज ए.सी. पुरवठा केला जातो, जो कन्वेन्शनल इंडक्शन मोटर्स प्रमाणेच असतो.

b) फ्रीक्वेन्सी आणि व्होल्टेज यावर मोटरचा स्पीड आणि थ्रस्ट अवलंबून असतो.

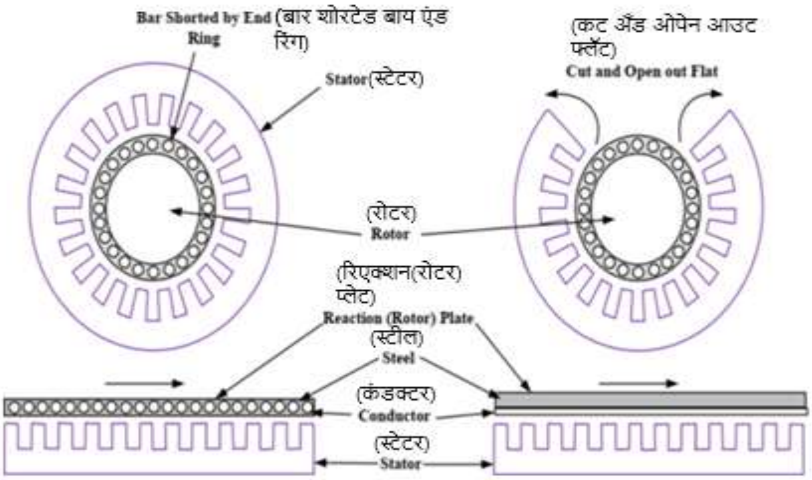


Fig.5.5:लिनीयर इंडक्शन मोटरचे कन्स्ट्रक्शन (Construction of Linear Induction Motor)

लिनीयर इंडक्शन मोटरची वर्किंग (Working of Linear Induction Motor): ही इलेक्ट्रोमॉगनेटिक इंडक्शनवर (Electromagnetic Induction) आधारित कार्य करणारी मोटर आहे, जी रोटेशनल मोशन ऐवजी थेट लिनियर (Linear) मोशन निर्माण करते. लिनीयर इंडक्शन मोटरही कन्वेन्शनल इंडक्शन मोटर (Induction Motor) प्रमाणेच असते, पण ती जणू काही अनरोल (Unrolled) करून फ्लॅट (Flat), लिनियर स्ट्रक्चरने (Linear Structure) बदललेली असते.

लिनीयर इंडक्शन मोटरमध्ये दोन मुख्य भाग असतात: प्रायमरी (Primary) आणि सेकंडरी (Secondary). प्रायमरी हा कन्वेन्शनल मोटरमधील स्टेटर (Stator) प्रमाणे कार्य करतो, तर सेकंडरी हा रोटर (Rotor) सारखा काम करतो. प्रायमरीमध्ये लॅमिनेटेड आयर्न कोर (Laminated Iron Core) असतो, ज्यामध्ये थ्री-फेज वाइंडिंग (Three-Phase Windings) बसवलेले असतात. जेव्हा या वाइंडिंगना थ्री-फेज एसी (Three-Phase AC) पुरवठा केला जातो, तेव्हा प्रायमरीच्या लांबीवर एक तर ट्रॅवलिंग मग्नेनेटिक फील्ड (Traveling Magnetic Field) तयार होते.

ही ट्रॅवलिंग मग्नेनेटिक फील्ड प्रायमरी व सेकंडरी यांच्यातील एअर गॅप (Air Gap) क्रॉस करते आणि सेकंडरीमध्ये प्रवेश करते. सेकंडरी सहसा अॅल्युमिनियम किंवा कॉपरपासून बनवलेली एक फ्लॅट कंडक्टिव प्लेट (Flat Conductive Plate) असते. फॅराडेज लॉं ऑफ इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शन लॉ प्रमाणे (Faraday's Law

of Electromagnetic Induction), हे मग्नेनेटिक फील्ड बदलते. मग्नेनेटिक फील्ड मुळे सेकंडरीमध्ये एडी करंट्स (Eddy Currents) फ्लो होतात.

हे एडी करंट्स सेकंडरीमध्ये स्वतःचे एक मग्नेनेटिक फील्ड तयार करतात, जे प्रायमरीमधून निर्माण होणाऱ्या मेन ट्रॅवलिंग मग्नेनेटिक फील्डशी परस्पर क्रिया करते. लॉरेन्ट्झ फोर्स प्रिन्सिपलनुसार (Lorentz Force Principle), या परस्पर क्रियेच्या परिणाम स्वरूप सेकंडरीवर एक लिनियर थ्रस्ट फोर्स (Linear Thrust Force) निर्माण होतो. . या फोर्स मुळे सेकंडरी ट्रॅवलिंग मग्नेनेटिक फील्डच्या डायरेक्शनने स्ट्रेट फिरू लागते.

जोपर्यंत एसी पुरवठा चालू असतो, तोपर्यंत ही प्रक्रिया सुरू राहते आणि सेकंडरीची सातत्यपूर्ण लिनियर मोशन होते. या गतीचा स्पीड एसी पुरवठ्याच्या फ्रिक्वेन्सीवर (Frequency) आणि मोटरमधील पोल्सच्या (Poles) संख्येवर अवलंबून असतो.

हे लक्षात घेणे महत्त्वाचे आहे की सेकंडरीचा गती स्पीड नेहमीच ट्रॅवलिंग मग्नेनेटिक फील्ड च्या वेगापेक्षा थोडा कमी असतो. या वेगातील फरकाला स्लिप (Slip) म्हणतात.

5.3 सिंगल आणि डबल साइडेड लिनिअर इंडक्शन मोटर (Single and Double Sided Linear Induction Motor):

5.3.1 सिंगल साइडेड लिनिअर इंडक्शन मोटर (Single Sided Linear Induction Motor):

सिंगल साइडेड लिनिअर इंडक्शन मोटर ही एक विशेष टाइपची मोटर आहे जी इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शन या तत्त्वाचा वापर करून डायरेक्ट लिनियर मोशन निर्माण करते. कन्वेन्शनल रोटरी मोटरच्या विपरीत, सिंगल साइडेड लिनिअर इंडक्शन मोटर मध्ये रोटरी मोशन मेकॅनिकल मेथडने लिनियर मोशनमध्ये (Linear Motion) कन्वर्ट केली जात नाही, तर स्ट्रेट-लाइन फोर्स (Straight Line Force) प्राप्त केली जाते.

सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटरची वर्किंग (Working of Single-Sided Linear Induction Motor): सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर ही इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनच्या प्रिन्सिपलवर कार्य करते, जे कन्वेन्शनल रोटरी इंडक्शन मोटरप्रमाणेच असते. मात्र, हे रोटेटिंग मोशन न देता डायरेक्ट लिनीअर मोशन तयार करते.

a) **प्रायमरीला पॉवर सप्लाय देणे (Power Supply to the Primary):** जेव्हा मोटरला थ्री-फेज अल्टरनेटिंग करंट दिला जातो, तेव्हा प्रायमरी वायंडिंग मध्ये करंट फ्लो होतो. प्रायमरी सहसा फ्लॅट, लॅमिनेटेड आयर्न कोअर असतो ज्यामध्ये कॉपर किंवा ॲल्युमिनियम वायंडिंग असते. जेव्हा या वायंडिंगमधून एसी फ्लो होतो, तेव्हा एक ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार होते जे स्टेटरच्या लांबीवर सरकत जाते.

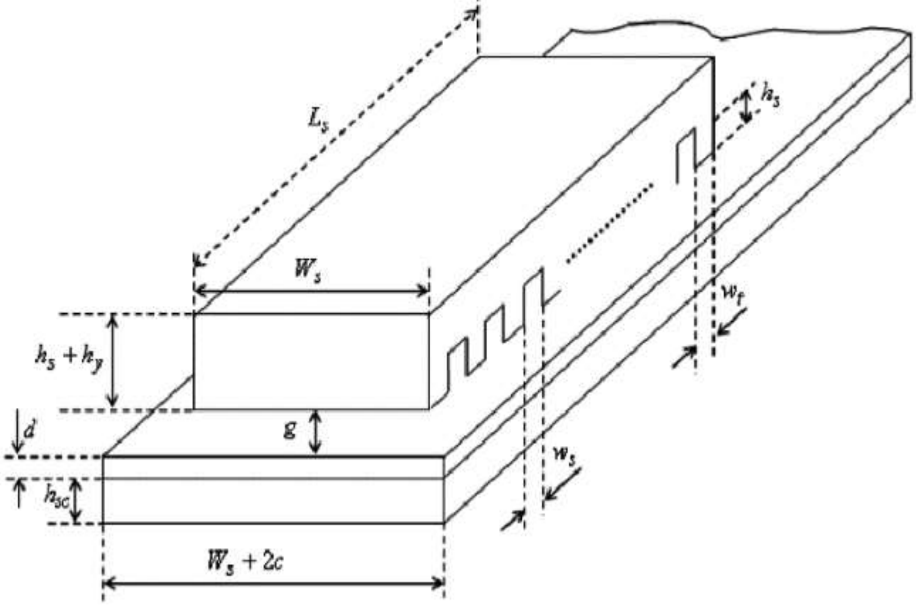


Fig.5.6 सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटरचे स्ट्रक्चर (Structure of Single Sided Linear Induction Motor)

b) **ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्डची क्रिएशन(Creation of a Traveling Magnetic Field) :** थ्री-फेज करंट प्रायमरीच्या पृष्ठभागावर लिनीअरली मूव्ह होणारे मॅग्नेटिक फील्ड तयार करतो. हे मॅग्नेटिक फील्ड सिंक्रोनस स्पीड ने सरकते, जे सप्लाय फ्रीक्वेन्सी व वायंडिंगच्या पोल पिच वर अवलंबून असते. हे फील्ड फिरत नाही, तर मोटरच्या लिनीअर ॲक्सिसवरून सरकत जाते.

c) **सेकंडरी (रिॲक्शन प्लेट) इंटरॲक्शन (Interaction with the Secondary (Reaction Plate)) :** स्टेटरच्या समोर सेकंडरी असते, जी सामान्यतः ॲल्युमिनियम किंवा कॉपरची फ्लॅट कंडक्टिव्ह प्लेट असते, आणि काही वेळा मागे स्टील शीट असते जेणेकरून मॅग्नेटिक एफिशियन्सी वाढेल. या सेकंडरीमध्ये वायंडिंग किंवा इलेक्ट्रिकल कनेक्शन नसते. जेव्हा स्टेटरमधून तयार झालेले ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड सेकंडरीच्या पृष्ठभागावरून सरकते, तेव्हा सेकंडरी प्लेटमध्ये इलेक्ट्रिक करंट्स (एडी करंट्स) इंड्यूस होतात. हे फॅराडे'ज लॉ ऑफ इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शन नुसार घडते म्हणजे बदलणारे मॅग्नेटिक फील्ड जवळच्या कंडक्टरमध्ये करंट तयार करते.

d) **लिनीअर फोर्सची प्रोडक्शन (Production of Linear Force):** जेव्हा सेकंडरीमध्ये एडी करंट्स तयार होतात, तेव्हा ती स्वतःचे मॅग्नेटिक फील्ड तयार करतात. लेन्झ लॉ नुसार, हे मॅग्नेटिक फील्ड मूळ फील्डला विरोध करतात. स्टेटरकडून येणाऱ्या ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड आणि सेकंडरीमध्ये इंड्यूस झालेल्या फील्ड यांच्यातील इंटरॲक्शनमुळे एक लॉरेंझ फोर्स निर्माण होतो. हा लॉरेंझ फोर्स सेकंडरी प्लेटवर कार्य करतो आणि तिला ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्डच्या डायरेक्शनने ढकलतो, अशा प्रकारे लिनीअर मोशन निर्माण होते.

e) **स्लिप व मोशन (Slip and Motion):** खऱ्या ऑपरेशनमध्ये सेकंडरी मॅग्नेटिक फील्डच्या स्पीडपेक्षा थोडी कमी स्पीडने सरकते. या स्पीडमधील फरकाला स्लिप म्हणतात. हा स्लिप करंट सतत इंड्यूस

होण्यासाठी आवश्यक असतो. लोड कंडिशन्स बदलल्यावर स्लिप ॲडजस्ट होतो आणि आवश्यक थ्रस्ट टिकवून ठेवतो.

f) **कंटिन्युअस मोशन (Continuous Motion):** जोपर्यंत एसी पॉवर स्टेटरला दिली जाते, तोपर्यंत ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड सतत चालू राहते. त्यामुळे सेकंडरीमध्ये सतत करंट इंड्यूस होतो आणि त्यामध्ये सततचा लिनीअर मोशन निर्माण होते.

सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटरचे ऍडवांटेजेस (Advantages of Single-Sided Linear Induction Motor):

1. **डायरेक्ट लिनीअर मोशन (Direct Linear Motion):** सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटरमध्ये अतिरिक्त मेकॅनिकल कॉम्पोनंट्स (जसे लीड स्क्रू (Lead Screws) किंवा रोटरी-टू-लिनीअर कन्व्हर्टर्स (Rotary-To-Linear Converters)) ची गरज नसते, कारण ते थेट लिनीअर मोशन देतात. हे कन्वेअर सिस्टिम्स (Conveyor Systems), मॅग्लेव ट्रेन्स (Maglev Trains), आणि लिनीअर ॲक्ट्युएटर्स (Linear Actuators) यांसारख्या ॲप्लिकेशन साठी आदर्श आहेत.
2. **सिम्पल मेकॅनिकल कन्स्ट्रक्शन (Simple Mechanical Construction):** कमी मूविंग पार्ट्स असल्यामुळे झिज कमी होते, मेकॅनिकल कॉम्प्लेक्सइटी (Mechanical Complexity) कमी होते, आणि मेंटेनन्स कॉस्ट कमी होते.सेकंडरी (रिऍक्शन प्लेट) साधी, फ्लॅट मेटल शीट असते यात वायंडिंग किंवा कॉम्प्लेक्स रचना नसते.
3. **हाय रिलायबिलिटी व ड्युरॅबिलिटी (High Reliability and Durability):** कन्वेन्शनल डीसी मोटर्स प्रमाणे ब्रशेस, कम्युटेटर्स, किंवा मेकॅनिकल कॉन्टॅक्ट पार्ट्स नसल्यामुळे फेल्युअरचा धोका कमी होतो. झिज (Wear) व फ्रिक्शन (Friction) मुळे होणारी मेकॅनिकल बिघाडाची शक्यता कमी असते.
4. **फास्ट आणि प्रिसाईज ॲक्सेलरेशन (Fast and Precise Acceleration):** सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर मध्ये हाय ॲक्सेलरेशन (High Accelerationand) आणि डीॲक्सेलरेशन रेट्स (Deceleration Rates) पटकन मिळवता येतात. हाय स्पीड शटल्स (High-Speed Shuttles) व इंडस्ट्रियल ऑटोमेशन (Industrial Automation) यांसारख्या अचूक व जलद हालचाल गरजेच्या सिस्टिममध्ये उपयुक्त.
5. **लो मेंटेनन्स (Low Maintenance):**गिअर्स किंवा बेल्ट्स सारखे कॉन्टॅक्ट-बेस्ड कॉम्पोनंट्स (Contact-Based Components) नसल्यामुळे मेंटेनन्स आवश्यकताच कमी होते. डर्टी किंवा हार्श (Dirty or Harsh), किंवा इंडस्ट्रियल वातावरणात मेकॅनिकल सिस्टम्स झपाट्याने खराब होतात; तिथे सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर फायदेशीर ठरते.
6. **कायेट ऑपरेशन (Quiet Operation):** सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटरअत्यंत शांततेत कार्य करते, त्यामुळे जिथे नॉईज रिडक्शन गरजेचे आहे (जसे हॉस्पिटल, एअरपोर्ट, ऑफिस बिल्डिंग्स) अशा ठिकाणी उपयुक्त.

7. **फ्लेक्सिबल डिझाईन व स्केलेबिलिटी (Flexible Design and Scalability):** सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर ला विविध ॲप्लिकेशनसाठी आवश्यक असलेल्या लेन्थ (Length) , पॉवर लेव्हल (Power Level), आणि लोड कपॅसिटी (Load Capacity) नुसार डिझाईन करता येते. मोठ्या ट्रॅकसाठी किंवा जास्त स्पीडसाठी सहज स्केलअप (Scale Up) करता येते.
8. **सूटेबल फॉर कॉन्टॅक्टलेस ऑपरेशन (Suitable for Contactless Operation):**मॅग्लेव (मॅग्नेटिक लेव्हिटेशन) सारख्या ॲप्लिकेशनमध्ये सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटरथेट मेकॅनिकल कॉन्टॅक्ट शिवाय काम करू शकते, त्यामुळे फ्रिक्शन आणि एनर्जी लॉस कमी होतो.
9. **रॅपिड रिस्पॉन्स टाईम (Rapid Response Time):** इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक फोर्स जनरेशनमुळे सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर त्वरित कंट्रोल इनपुट्स ला प्रतिसाद देते, ज्यामुळे ऑटोमेशन सिस्टिममध्ये कामगिरी सुधारते.
10. **ॲबिलिटी टू ऑपरेट इन हार्श कंडिशन्स (Ability to Operate in Harsh Conditions):** सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर डस्टी, वेट, किंवा करोसिव्ह (Dusty, Wet, or Corrosive) वातावरणासाठी अत्यंत उपयुक्त आहे, जिथे कन्वेन्शनल मोटर्स अपयशी ठरतात.

सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर चे डिसऍडवांटेजेस (Disadvantages of Single-Sided Linear Induction Motor):

1. **लोअर एफिशियन्सी (Lower Efficiency):** सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर ची एफिशियन्सी सामान्यतः रोटरी इंडक्शन मोटर्सच्या तुलनेत कमी असते कारण यामध्ये ओपन मॅग्नेटिक सर्किट असते.मॅग्नेटिक फ्लक्सपैकी मोठा भाग हवेत हरवतो, ज्यामुळे लीकेज फ्लक्स वाढतो व एनर्जी वेस्ट होते.
2. **हाय रिऍक्टिव्ह पॉवर कंझम्प्शन (High Reactive Power Consumption):** मॅग्नेटिक फील्ड तयार करण्यासाठी विशेषतः मोठ्या एअर गॅप्स असताना भरपूर रिऍक्टिव्ह पॉवर लागते.यामुळे पॉवर फॅक्टर खराब होतो आणि ऑपरेशन कॉस्ट वाढतो, जर तो कंपेन्सेट (Compensated) केला नाही तर.
3. **नॉर्मल फोर्सचा प्रेझेन्स(Presence of Normal Force):** प्रायमरी आणि सेकंडरी यांच्यामध्ये एक मजबूत ॲट्रॅक्टिव्ह फोर्स (नॉर्मल फोर्स) तयार होतो, जो नॉन लेव्हिटेटेड (Non-Levitated) सिस्टिम्स मध्ये फ्रिक्शन किंवा विअर वाढवू शकतो.त्यामुळे अतिरिक्त सपोर्ट किंवा सस्पेन्शन (Suspension) सिस्टिम्स लागू शकतात.
4. **एअर गॅप सेन्सिटिव्हिटी (Air Gap Sensitivity):** सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर ची कामगिरी प्रायमरी आणि सेकंडरी यांच्यातील एअर गॅप वर अत्यंत अवलंबून असते. जर एअर गॅप मोठा किंवा अनियमित असेल तर थ्रस्ट कमी होतो आणि लॉसेस वाढतात, ज्यासाठी अचूक अलाइन्मेंट आवश्यक असते.
5. **नो रीजेनरेटिव्ह ब्रेकिंग (No Regenerative Braking):** रोटरी इंडक्शन मोटर्स प्रमाणे, सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर मध्ये सहज रीजेनरेटिव्ह ब्रेकिंग (Regenerative Braking) (म्हणजे काइनेटिक

एनर्जी (Kinetic Energy) परत इलेक्ट्रिकल एनर्जी मध्ये कन्व्हर्ट करणे) शक्य होत नाही. त्यामुळे डीअॅक्सेलरेशन (Deacceleration) दरम्यान एनर्जी एफिशियन्सी मर्यादित राहते.

6. **हीटिंग इश्यूज (Heating Issues):** प्रायमरी वायंडिंगस मध्ये सतत करंट फ्लो होत असल्यामुळे हीट जनरेशन होते. योग्य प्रकारे कूलिंग न केल्यास थर्मल एक्सपान्शन (Thermal Expansion), इन्स्युलेशन ब्रेकडाऊन (Insulation Breakdown), किंवा मोटर लाईफ कमी होण्याचा धोका असतो.
7. **अॅक्टिव्ह ट्रॅकचा कॉस्ट (Cost of Active Track):** प्रायमरी (अॅक्टिव्ह) भाग ज्यामध्ये वायंडिंगस आणि लॅमिनेशन्स असतात हा संपूर्ण ट्रॅक लांबीवर बसवला जातो. त्यामुळे विशेषतः लाँग डिस्टन्स अॅप्लिकेशन्स (उदा. मॅग्लेव ट्रेन्स) मध्ये इनिशियल कॉस्ट वाढते.
8. **हाय स्पीडवर थ्रस्ट ड्रॉप (Thrust Drops at High Speeds):** खूप जास्त स्पीडवर, सेकंडरी मध्ये तयार होणाऱ्या एडी करंट्स मागे पडतात, त्यामुळे थ्रस्ट कमी होतो. त्यामुळे सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर अल्ट्रा-हाय-स्पीड ट्रॅव्हलसाठी योग्य ठरत नाही, जोपर्यंत अॅडव्हान्स्ड कंट्रोल स्ट्रॅटेजीज वापरल्या जात नाहीत.
9. **कॉम्प्लेक्स कंट्रोल रिक्वायरमेंट्स (Complex Control Requirements):** काही अॅप्लिकेशन्समध्ये, विशेषतः ऑटोमेशन किंवा रोबोटिक्स मध्ये, सिंगल साईडेड लिनीअर इंडक्शन मोटर साठी अचूक पोजिशन आणि स्पीड रेग्युलेशन साठी कॉम्प्लेक्स कंट्रोल सिस्टिम्स आवश्यक असतात.
10. **नॉट ईझिली रिव्हर्सिबल (Not Easily Reversible):** मोशनचा डायरेक्शन बदलणे शक्य आहे, पण त्यासाठी फेज सिक्वेन्स रिव्हर्स करावी लागते किंवा कंट्रोल सिस्टिम अॅडजस्ट करावी लागते जे एक सामान्य डीसी मोटर रिव्हर्स करण्यापेक्षा अधिक कॉम्प्लेक्स आहे.

5.3.2 डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर (Double Sided Linear Induction Motor): डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर ही एक टाइपची लीनिअर मोटर आहे जी इलेक्ट्रिकल एनर्जिचे (Electric Energy) थेट लिनीयर मेकॅनिकल मोशनमध्ये (Mechanical Motion) रूपांतर करते, आणि हे इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनच्या प्रिन्सिपल वर आधारित असते. कन्वेन्शनल रोटरी मोटर्सप्रमाणे यामध्ये गती फिरण्याऐवजी स्ट्रेट लाइन निर्माण होते आणि त्यामुळे गिअर्स (Gears), स्क्रूज (Srews) किंवा बेल्ट्सची (Belts) गरज भासत नाही. डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर मध्ये सेकंडरी (जे सहसा एक कंडक्टिव प्लेट असते) दोन प्रायमरीजच्या मध्ये ठेवलेली असते. या प्रायमरीजना थ्री फेज अॅल्टरनेटिंग करंट ने एनर्जि दिली जाते. या प्रायमरीज द्वारे सेकंडरीच्या दोन्ही बाजूंनी प्रवास करणारी मॅग्नेटिक फील्ड्स तयार होतात, ज्यामुळे मॅग्नेटिक कपलिंग (Magnetic Coupling) अधिक चांगले होते आणि फ्लक्स लीकेज (Flux Leakage) कमी होते.

या प्रवास करणाऱ्या मॅग्नेटिक फील्ड्स आणि सेकंडरीमध्ये निर्माण होणाऱ्या इंड्यूस्ड करंट्स (Induced Current) यांच्यातील परस्परसंवादामुळे एक मजबूत आणि बॅलन्स्ड लीनिअर थ्रस्ट (Balanced Linear Thrust) तयार होतो. त्यामुळे डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर हे हाय फोर्स (High Force), स्मूथ लिनियर मोशन (Smooth Linear Motion) आणि नॉन कॉंटॅक्ट ऑपरेशन (Non-Contact Operation)आवश्यक असलेल्या उपयोगांमध्ये अतिशय उपयुक्त ठरते. याचे प्रमुख अॅप्लिकेशन मॅग्लेव ट्रेन्स

(Maglev Trains), इंडस्ट्रियल ऑटोमेशन (Industrial Automation), आणि हाय-स्पीड ट्रान्सपोर्ट सिस्टीम्स (High-Speed Transport Systems) यामध्ये होतो.

डबल-साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटरचे कन्स्ट्रक्शन (Construction of Double-Sided Linear Induction Motor):

डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर ही एक लीनिअर मोटर आहे जी इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शनचा उपयोग करून थेट लिनीयर मोशन निर्माण करण्यासाठी डिझाइन केलेली असते. ही प्रोसेस कन्वेन्शनल रोटरी इंडक्शन मोटरसारखीच असली तरी डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर मध्ये गतीशील मॅग्नेटिक फील्ड सेकंडरीच्या दोन्ही बाजूंना कार्य करते, ज्यामुळे अधिक थ्रस्ट, चांगली एफिशियन्सी आणि बॅलन्स्ड मॅग्नेटिक अ‍ॅट्रॅक्शन(Balanced Magnetic Attraction) मिळते.

डबल-साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर चे मुख्य घटक:

1. **प्रायमरी (स्टेटर्स) – टू ॲक्टिव साइड्स (Primary (Stators) – Two Active Sides):** डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर मध्ये दोन प्रायमरी वायंडिंगस असतात ज्या सेकंडरी (रिॲक्शन प्लेट)च्या दोन्ही बाजूंना ठेवलेल्या असतात.या प्रायमरीज सहसा लॅमिनेटेड आयर्न कोअर्समध्ये बसवलेल्या असतात, आणि त्यात थ्री-फेज वायंडिंगस (कॉपर किंवा ॲल्युमिनियम) असतात. हे दोन स्टेटर्स एकाच थ्री-फेज एसी पॉवर सप्लायला जोडलेले असतात आणि सिंक्रोनाइझ्ड पणे (Synchronized) कार्य करतात ज्यामुळे एक ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड तयार होते. दोन्ही बाजूंमधून तयार होणारी मॅग्नेटिक फील्ड एकत्र येते आणि सेकंडरीमधून प्रवाहित होते.
2. **सेकंडरी (रिॲक्शन प्लेट) (Secondary (Reaction Plate)):** दोन प्रायमरीजच्या मध्ये ठेवलेली सेकंडरी ही एक फ्लॅट कंडक्टिव प्लेट (Flat Conductive Plate) असते, जी सहसा ॲल्युमिनियम किंवा कॉपरची बनवलेली असते. चांगली मॅग्नेटिक परफॉर्मन्स आणि मेकॅनिकल स्ट्रेन्थ (Mechanical Strength) मिळवण्यासाठी सेकंडरीच्या मागे सहसा स्टील प्लेट किंवा आयर्न कोअर दिला जातो. ही एक पॅसिव्ह घटक असते, म्हणजे यामध्ये कोणतेही वायंडिंगस किंवा इलेक्ट्रिकल कनेक्शन्स नसतात. जेव्हा दोन्ही स्टेटर्समधून मॅग्नेटिक फील्ड लांबीच्या डायरेक्शनने प्रवास करते, तेव्हा सेकंडरीमध्ये एडी करंट्स (Eddy Current) निर्माण होतात.
3. **सपोर्ट स्ट्रक्चर (Support Structure):** मोटरचे सर्व घटक एका मजबूत फ्रेमवर बसवलेले असतात जेणेकरून अचूक अलायन्मेंट (Alignment) राखली जाऊ शकेल.प्रत्येक प्रायमरी आणि सेकंडरी यांच्यात एअर गॅप्स असू शकतात; हे गॅप्स लहान आणि समान ठेवणे महत्त्वाचे असते जेणे करून इफिशियंट ऑपरेशन (Efficient Operation) योग्य राहील.
4. **मॅग्नेटिक सर्किट (Magnetic Circuit):** डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर मध्ये मॅग्नेटिक सर्किट बंद किंवा जवळपास सीमेट्रिकल (Symmetrical) असते, कारण दोन्ही प्रायमरीज एकत्र कार्य करतात.यामुळे

मॅग्नेटिक लॉसेस कमी होतात, थ्रस्ट एफिशियन्सी (Thrust Efficiency) वाढते आणि बाजूला जाणाऱ्या अनावश्यक फोर्सेस (जे व्हायब्रेशन किंवा मिसअलायन्मेंट (Misalignment) निर्माण करू शकतात) कमी होतात.

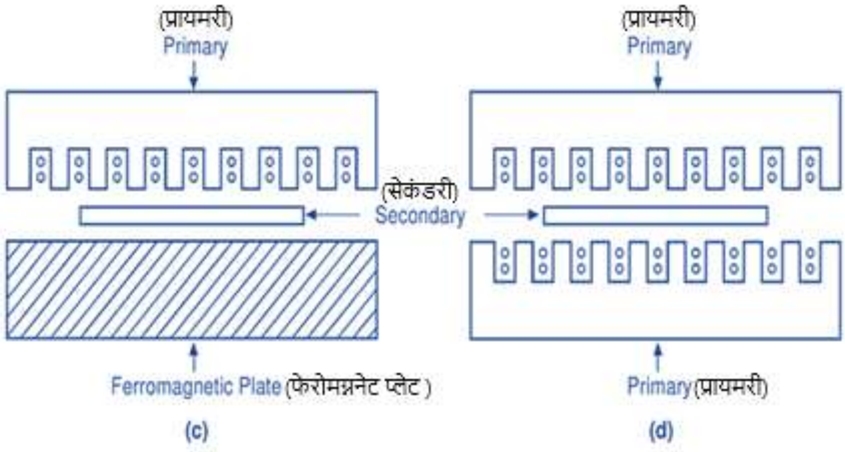


Fig.5.7: डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर (Double-Sided Linear Induction Motor)

डबल-साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटरचे वर्किंग प्रिन्सिपल (Working Principle of Double-Sided Linear Induction Motor) : डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटर ही दोन मेन पार्ट्सनी बनलेली असते जी सेकंडरीच्या दोन्ही बाजूंना ठेवलेली असतात (जे सहसा एक कंडक्टिव रिॲक्शन प्लेट (Conductive Reaction Plate) असते.दोन प्रायमरी वायंडिंगस (स्टेटर्स) ज्या सेकंडरीच्या दोन्ही बाजूंना एकमेकांसमोर असतात. एक सेकंडरी (रिॲक्शन प्लेट), जी सहसा ॲल्युमिनियम किंवा कॉपरची बनवलेली असते आणि कन्वेन्शनल रोटरी इंडक्शन मोटरमधील रोटरप्रमाणे कार्य करते.

a) **प्रायमरी वायंडिंग एसी सप्लाय (AC Supply to Primary Windings):** दोन्ही बाजूंच्या प्रायमरी वायंडिंगसना थ्री फेज ॲल्टरनेटिंग करंट दिला जातो. या वायंडिंगसमधून प्रवाहित होणाऱ्या करंटमुळे प्रायमरी आणि सेकंडरीमधील एअर गॅपमध्ये एक ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड निर्माण होते.

b) **इंड्यूस्ड करंट्स इन सेकंडरी (Induced Currents in Secondary):** ही ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड (Traveling Magnetic Field), फॅराडे'ज लॉ ऑफ इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक इंडक्शननुसार (Faraday's law of Electromagnetic Induction) सेकंडरी रिॲक्शन प्लेटमध्ये एडी करंट्स निर्माण करते.हे एडी करंट्स स्वतःची एक मॅग्नेटिक फील्ड तयार करतात जी प्रायमरीच्या मॅग्नेटिक फील्डशी इंटरकरते.

c) **थ्रस्ट फोर्स जनरेशन (Generation of Thrust Force):** प्रायमरीच्या ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्ड आणि सेकंडरीच्या इंड्यूस्ड मॅग्नेटिक फील्ड यांच्यातील परस्पर संवादामुळे एक लीनिअर थ्रस्ट फोर्स तयार होतो. हा थ्रस्ट सेकंडरी (किंवा त्यावर जोडलेला लोड) मोटरच्या लांबीच्या डायरेक्शनने स्ट्रेथ लाइन ढकलतो.

डबल साइडेड लिनिअर इंडक्शन मोटरचे ॲडवांटेजेस (Advantages of Double-Sided Linear Induction Motor):

1. **हाय थ्रस्ट फोर्स डेन्सिटी (High Thrust Force Density):** मोटरमध्ये सेकंडरीच्या दोन्ही बाजूंना प्रायमरी वायंडिंगस असल्यामुळे मॅग्नेटिक फ्लक्स अधिक इफेक्टीवली (Effectively) वापरला जातो. यामुळे एकाच आकाराच्या तुलनेत सिंगल-साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटरच्या तुलनेत अधिक थ्रस्ट फोर्स प्राप्त होतो.
2. **बॅलन्स्ड मॅग्नेटिक फोर्सेस (Balanced Magnetic Forces):** डबल-साइडेड कॉन्फिगरेशनमुळे सेकंडरी प्लेटवर बॅलन्स्ड मॅग्नेटिक फोर्सेस निर्माण होतात, ज्यामुळे नॉर्मल फोर्सेस कमी होतात. यामुळे मेकॅनिकल स्ट्रेस कमी होतो आणि मूव्हिंग पार्टचे अलायन्मेंट टिकवून ठेवणे सोपे जाते, ज्याचा परिणाम म्हणजे अधिक स्मूथ चालणार ऑपरेशन .
3. **रिड्यूस्ड लीकेज फ्लक्स (Reduced Leakage Flux):** मॅग्नेटिक फ्लक्स लाईन्स मुख्यतः प्रायमरीस आणि सेकंडरीच्या मध्ये मर्यादित राहतात, त्यामुळे मॅग्नेटिक लीकेज कमी होते आणि मोटरची एकूण एफिशियन्सी वाढते.
4. **लोवर एंड इफेक्ट्स (Lower End Effects):** ही सिमेट्रिकल (Symmetrical) डिझाईन एंड इफेक्ट्स (End Effects) मोटरच्या टोकांवर होणारे नुकसान आणि फोर्स फ्लक्च्युएशन्स (Fluctuations) कमी करते, ज्यामुळे परफॉर्मन्स सुधारतो आणि मोटरच्या संपूर्ण लांबीवर एकसमान थ्रस्ट प्राप्त होतो.
5. **कॉन्टॅक्टलेस ऑपरेशन (Contactless Operation):** सर्व लीनिअर इंडक्शन मोटर्सप्रमाणेच, डबल साइडेड लीनिअर इंडक्शन मोटरदेखील सेकंडरी आणि स्टेशनरी प्रायमरीज यांच्यात कोणताही प्रत्यक्ष स्पर्श न होता कार्य करते. यामुळे मेकॅनिकल वियर अॅन्ड टिअर टाळला जातो, मेंटेनन्स आवश्यकतेत घट होते आणि संपूर्ण प्रणालीचे लाइफसपॅन (Lifespan) वाढतो.
6. **हाय-स्पीड कॅपेबिलिटी (High-Speed Capability):** ही मोटर ट्रॅव्हलिंग मॅग्नेटिक फील्डच्या साहाय्याने हाय स्पीड लीनिअर मोशन तयार करू शकते, त्यामुळे ती वेगवान लिनियर मोशन आवश्यक असलेल्या ॲप्लिकेशनसाठी योग्य ठरते.
7. **फ्लेक्सिबल डिझाईन (Flexible Design):** या मोटरची लांबी प्रायमरी वायंडिंगस वाढवून सहजतेने बदलता येते.

डबल साइडेड लिनिअर इंडक्शन मोटरचे डिसॲडवांटेजेस (Disadvantages of Double-Sided Linear Induction Motor):

1. **कॉम्प्लेक्स आणि कॉस्टली कन्स्ट्रक्शन (Complex and Costly Construction):** डबल साइडेड डिझाईनमध्ये सेकंडरीच्या दोन्ही बाजूंना दोन वेगळ्या प्रायमरी वायंडिंगस आवश्यक असतात. यामुळे

मॅन्युफॅक्चरिंग (Manufacturing) आणि असेंब्ली (Assembly) अधिक कॉम्प्लेक्स (Complex) होते, आणि याचा परिणाम म्हणजे सिंगल साइडेड किंवा रोटरी मोटर्सच्या तुलनेत सुरुवातीचा कॉस्ट अधिक येतो.

2. **इन्क्रिज्ड वेट अॅन्ड साइज (Increased Weight and Size):** दोन प्रायमरीज असल्यामुळे संपूर्ण मोटर असेंब्ली (Assembly) जास्त बल्की (Bulkier) आणि हेवी होते. ज्या ठिकाणी स्पेस (Space) किंवा वेट (Weight) ही महत्त्वाची अट असते, तिथे हा एक मोठा मर्यादा ठरू शकतो.
3. **एअर गॅप सेंसिटिव्हिटी (Air Gap Sensitivity):** डबल साइडेड डिझाईनचे परफॉर्मन्स हे प्रायमरी वायंडिंगस आणि सेकंडरी प्लेट (Secondary Plate) यांच्यातील एअर गॅपच्या (Air Gap) लेनथवर खूप अवलंबून असते. दोन्ही बाजूंना एकसमान आणि कमी एअर गॅप राखणे कठीण असते आणि त्यासाठी अचूक मेकॅनिकल कंट्रोलची (Mechanical Control) गरज भासते.
4. **एंड इफेक्ट्स आणि एफिशियन्सी लॉसेस (End Effects And Efficiency Losses**): जरी डबल साइडेड डिझाईनमुळे सिंगल साइडेडच्या तुलनेत एंड इफेक्ट्स कमी होतात, तरीही ते पूर्णपणे संपुष्टात येत नाहीत, विशेषतः लहान मोटर लेनथमध्ये. यामुळे नॉन-युनिफॉर्म थ्रस्ट (Non-Uniform Thrust) आणि एफिशियन्सी लॉसेस (Efficiency Losses) होऊ शकतात.
5. **लोअर पॉवर फॅक्टर (Lower Power Factor):** इतर लीनिअर इंडक्शन मोटर्सप्रमाणेच डबल साइडेड डिझाईनमध्येही मॅग्नेटायझिंग करंटमधील (Magnetizing Current) मोठ्या रिऍक्टिव्ह कॉम्पोनन्टमुळे (Reactive Component) सहसा पॉवर फॅक्टर (Power Factor) कमी असतो, जो इलेक्ट्रिकल एफिशियन्सीवर (Electrical Efficiency) परिणाम करू शकतो.
6. **हीट डिसिपेशन चॅलेंजेस (Heat Dissipation Challenges):** दोन प्रायमरीज सतत हीट निर्माण करतात आणि सेकंडरी एक पॅसिव्ह घटक असल्यामुळे हीट डिसिपेशन प्रभावीपणे करणे आवश्यक असते, विशेषतः कॉन्टिन्युअस हाय-पॉवर ॲप्लिकेशन्समध्ये (High-Power Applications). यासाठी विशेष कूलिंग अरेंजमेंट्स (Cooling Arrangements) लागतात.
7. **नॉईज आणि व्हायब्रेशन (Noise And Vibration):** जरी कॉन्टॅक्टलेस ऑपरेशनमुळे (Contactless Operation) मेकॅनिकल वियर (Mechanical Wear) कमी असतो, तरी इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक फोर्सेसमुळे नॉईज आणि व्हायब्रेशन निर्माण होऊ शकते. हे प्रिसीजन ॲप्लिकेशन्समध्ये (Precision Applicatio) अतिरिक्त डॅम्पिंग मेझर्सद्वारे (Damping Measures) कंट्रोल करावे लागते.

5.4 लिनिअर इंडक्शन मोटरचे ॲप्लिकेशन्स (Application of Linear Induction Motor):

a) **मॅग्लेव ट्रेन्स (Maglev Trains):** मॅग्नेटिक (Magnetic) लेव्हिटेशन (Levitation) ट्रेन्सना (Trains) प्रोपेल (Propel) करण्यासाठी आणि हवेत लेव्हिटेट (Levitate) ठेवण्यासाठी वापरले जाते, ज्यामुळे हाय वेगाने आणि फ्रिक्शनलेस ट्रान्सपोर्टेशन (Frictionless Transportation) शक्य होते.

b) **कन्व्हेयर सिस्टिम्स (Conveyor Systems):** मटेरियल हँडलिंग (Material Handling) आणि ऑटोमेटेड कन्व्हेयर बेल्ट्ससाठी (Automated Conveyor Belts) योग्य, विशेषतः मॅन्युफॅक्चरिंग (Manufacturing) आणि पॅकेजिंग इंडस्ट्रीजमध्ये (Packaging Industries) वापरले जाते.

c) **ऑटोमेटेड गाईडेड व्हेईकल्स (Automated Guided Vehicles):** वेअरहाऊस (Warehouses) आणि फॅक्टरीजमध्ये (Factories) वापरल्या जाणाऱ्या ऑटोमेटेड गाईडेड व्हेईकल्स (Automated Guided Vehicles) साठी स्मूथ आणि कॉन्टॅक्टलेस प्रोपल्शन (Contactless Propulsion) प्रदान करते.

d) **थीम पार्क राइड्स (Theme Park Rides):** रोलर कोस्टर्स (Roller Coasters) आणि इतर राइड्समध्ये (Rides) गतीचे अचूक आणि स्मूथ नियंत्रण मिळवण्यासाठी वापरले जाते.

e) **लॉन्च सिस्टिम्स (Launch Systems):** एअरक्राफ्ट कॅटपल्ट्स (Aircraft Catapults) आणि मिसाईल लॉन्च सिस्टिम्समध्ये (Missile Launch Systems) वेगाने अ‍ॅक्सेलरेशन (Acceleration) देण्यासाठी वापरले जाते.

f) **रोबोटिक्स अ‍ॅन्ड ऑटोमेशन (Robotics And Automation):** रोबोटिक आर्म्स (Robotic Arms) आणि असेंब्ली लाइन्समध्ये (Assembly Lines) अचूक लीनिअर पोझिशनिंग (Linear Positioning) आणि स्पीड साठी वापरले जाते.

g) **इंडस्ट्रियल मशिनरी (Industrial Machinery):** सीएनसी मशिन्स आणि इतर इंडस्ट्रियल इक्विपमेंटमध्ये (Industrial Equipment) कंट्रोल्ड लीनिअर मोशन (Controlled Linear Motion) आवश्यक असणाऱ्या लीनिअर अ‍ॅक्चुएटर्सना (Linear Actuators) चालवण्यासाठी वापरले जाते.

h) **एलिवेटर्स अ‍ॅन्ड एस्कलेटर्स (Elevators And Escalators):** काही प्रगत सिस्टिम्समध्ये स्मूथ, एफिशियन्ट् व्हर्टिकल (Efficient Vertical) किंवा इन्क्लाइन्ड मूव्हमेंटसाठी (Inclined Movement) वापरले जाते.

***

स्वाध्याय (Exercise):

1. स्टेपर मोटर (Stepper Motor) च्या कोणत्याही चार अ‍ॅप्लिकेशन्सची लिस्ट करा.

   (List any four applications of stepper motor.)

2. सिन्क्रोनस रिलक्टन्स मोटर (Synchronous Reluctance Motor) चे वर्किंग, डायग्राम(neat diagram) सह डीसक्राइब करा .

   (Describe the working of synchronous reluctance motor with the help of neat diagram.)

3. युनिव्हर्सल मोटर (Universal Motor) चे कन्स्ट्रक्शन व वर्किंग एक्सप्लेन करा .

   (Explain the construction and working of Universal Motor.)

4. लिनीअर इंडक्शन मोटर (Linear Induction Motor) चे ॲप्लिकेशन्स लिहा.
   (List the application of Linear Induction Motor)
5. पर्मनंट मॅग्नेट सिन्क्रोनस मोटर (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) चे कन्स्ट्रक्शन व वर्किंग एक्सप्लेन करा.
   (Explain the construction and working of permanent magnet synchronous motors (PMSM).)

Suggested Learning Materials / Books:

Sr.No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	Theraja B. L., Theraja A. K.	A Textbook of Electrical Technology Vol II	S. Chand and Co. New Delhi ISBN10: 8121924375
2	Ashfaq Husain	Electric Machine	Dhanpat Rai & co. ISBN13: 978-8177001662
3	Kothari D. P. and Nagrath I. J.	Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9352606405
4	Bhattacharya S. K.	Electrical Machines	Tata McGraw Hill, New Delhi ISBN13: 978-9332902855
5	Dr. P. S. Bimbhra	Electrical Machinery	Khanna Publication ISBN13:978-9389139105
6	Mittle V. N., Arvind Mittle	Design of Electrical Machines	McGraw Hill, New Delhi, ISBN: 9788180141263, 9788180141263
7	Samarjit Ghosh	Electrical Machines	Pearson Education India, 2012; 9788131776025

Learning Websites and Portals:

Sr. No	Link / Portal	Description
1	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/speed-control-slip-ring/	Speed Control of Slip Ring Induction Motor (VLAB)
2	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/106/108106072/	Operation of Induction Machine and Synchronous Machine
3	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/105/108105131/	Construction of Three Phase Induction Motor
4	https://archive.nptel.ac.in/courses/108/102/108102146/	Electromechanical Energy Conversion and Synchronisation of Alternators

Sr. No	Link / Portal	Description
5	https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/lab-equipment-familiarizati on/index.html	Familiarization of the electrical machine laboratory apparatus (VLAB)