Electrical Drive Course

Dr. Raed Alcharea

مقرر القيادة الكهربائية

السنة الثالثة ميكاترونيكس

الكلية التطبيقية في جامعة دمشق

د رائد الشرع

العام الدراسي:2022/2023

أولاً: مفاهيم أولية في الكهرمغنطيسية

Basic Principles in Electro-Magnetism

1 الفيض المغناطيسي Magnetic Flux :

ويرمز له بالحرف اللاتيني ϕ وواحدته الويبر (Wb) وهو عدد خطوط الساحة المغناطيسية التي تصدر عن القطب الشمالي ، وتدخل في القطب الجنوبي للمغناطيس . ويمكن تعريف واحدة الفيض المغناطيسي(Wb) بأنّها الفيض الذي يولد قوة محركة كهربائية قدرها $1(V)$ في ناقل يقطعه خلال ثانية واحدة وذلك حسب العلاقة الآتية:

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

حيث:

e – القوة المحركة الكهربائية التحريضية

ϕ – الفيض المغناطيسي

$\frac{d\phi}{dt}$ – معدل تغير الفيض المغناطيسي بالنسبة للزمن

وإشارة الناقص تدل على أن القوة المحركة الكهربائية التحريضية في الدارة هي في اتجاه بحيث تسعى لمنع تغير الفيض المغناطيسي (قانون لينتز).

2 كثافة الفيض المغناطيسي B أو التحريض المغناطيسي:

Magnetic Density

ويرمز لها بالرمز B وواحدتها Wb/m^2 أو التسلا T وهي عدد خطوط الفيض المغناطيسي المخترقة لواحدة السطوح . وإذا كانت خطوط الفيض المغناطيسي عمودية على السطح ، فإن التحريض المغناطيسي يساوي :

$$B = \frac{\phi}{S} \qquad Wb/m^2 \text{ or } T$$

حيث:

S – المساحة التي يغطيها الفيض المغناطيسي m^2

ϕ – الفيض المغناطيسي (Wb)

3 القوة الممغنطة أو شدة الساحة المغناطيسية:

Magnetic Field Intensity

هي القوة اللازمة للمحافظة على الفيض المغناطيسي ف d نقطة من دارة مغناطيسية ويرمز لها بالرمز H وواحدتها أمبير لفة / متر (AT/m) .

يرتبط كل من شدة الساحة المغناطيسية H والتحريض المغناطيسي B بالعلاقة المعروفة التالية:

$$B = \mu_0 H$$

حيث:

μ_0 – النفوذية أوالسماحية المغناطيسية للفراغ **Permeability of Free Space** وتساوي

$4\pi \times 10^{-7}$ H/m

أما إذا سرى الفيض المغناطيسي ضمن مادة مغناطيسية كالحديد بدلاً من الفراغ أو الهواء فعندها:

$$B = \mu_r \ \mu_0 \ H$$

حيث:

μ_r – السماحية المغناطيسية النسبية للمادة

والسماحية المطلقة هي جداء السماحية النسبية بسماحية الفراغ أي:

$$\mu = \mu_r \ \mu_0$$

وتختلف قيمة السماحية النسبية من مادة لأخرى . وقد تبلغ قيمتها 100000 في بعض خلائط النيكل ، كما تختلف قيمتها بالنسبة لمادة معينة حسب كثافة الفيض المغناطيسي في المادة.

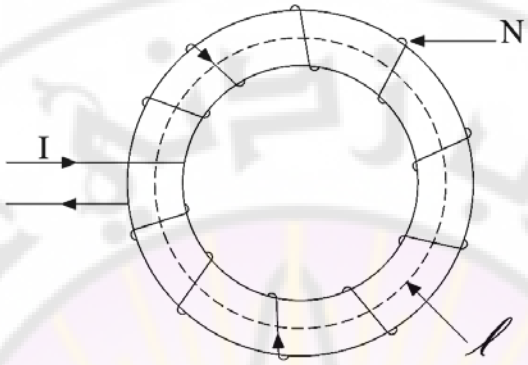
4 – القوة المحركة المغناطيسيةFm

Magneto motive Force m.m.f

وهي الأمبيرلفة (AT).أي أنه إذا كانت شدة التيار المار في وشيعة عدد لفاتها N لفة تساوي $I\,(A)$ فإن القوة المحركة المغنطيسية ويرمز لها بالرمز F_m تساوي $NI(AT)$.

5 المقاومة المغناطيسية Magnetic Reluctance :Rm

لنفرض أن لدينا حلقة حديدية مساحة مقطعها $S(m^2)$ وطول محيطها الوسطي $l(m)$ لفت عليها بانتظام وشيعة ذات N لفة تحمل تياراً شدته $I(A)$ كما في الشكل (1).



الشكل (1) وشيعة حلقية

إن هذا التيار سيولد ساحة مغناطيسية داخل الحلقة، ويمكن تطبيق قوانين كيرشوف للدارة الكهربائية على الدارة المغناطيسية حيث إن المجموع الجبري لجداء القوة الممغنطة بطول كل جزء من أجزاء هذه الدارة المغناطيسية المغلقة يساوي المجموع الجبري للقوى المحركة المغناطيسية في تلك الدارة .

ويمكن التعبير عن هذا بالعلاقة التالية :

$$\Sigma\, m.m.f = \Sigma\, Hl$$

حيث:

H – القوة الممغنطة في الجزء من الدارة

l – طول ذلك الجزء من الدارة

$\Sigma\, m.m.f$ – المجموع الجبري للقوى المحركة المغناطيسية في الدارة كما أنه وباستعمال المفاهيم والرموز السابقة لدينا:

$$\phi = B.S$$

$$F_m = \Sigma\, m.m.f = H.l$$

وبتقسيم هاتين العلاقتين ينتج:

$$\frac{\phi}{F_m} = \frac{BS}{Hl} = \mu\frac{S}{l}$$

ومنه:

$$\phi = \frac{F_m}{l/\mu S}$$

نسمي $l/\mu S$ بالمقاومة المغناطيسية **Magnetic Reluctance** للمسار المغناطيسي ونرمز لها بالرمز R_m حيث تعطى بالعلاقة التالية:

$$R_m = \frac{F_m}{\phi} = \frac{N\,I}{\phi}$$

كما نسمي $\Lambda = \frac{1}{R_m} = \mu\frac{S}{l}$ بالناقلية المغناطيسية **Permeance**.

إن هذه المقاومة تتناسب طرداً مع طول المسار المغناطيسي وعكساً مع مساحة مقطع الدارة المغناطيسية.

عامل التحريض الذاتي للوشيعة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2\phi}{NI} = \frac{N^2\phi}{F_m}[H]$$

6 قانون فاراداي: Faraday's Law

يحدد هذا القانون ظاهرتين أساسيتين في التحريض الكهرمغناطيسي مختلفتين في الشكل متفقتين في الجوهر. تعتمد الظاهرة الأولى على توليد قوة محركة كهربائية في نواقل متحركة في ساحة مغناطيسة ثابتة، تسمى هذه القوة بالقوة المحركة الكهربائية الحركية او الدورانية و تتناسب هذه القوة المحركة طرداً مع طول الناقل وسرعة الناقل و التحريض المغناطيسي للساحة الموجود فيها الناقل و يتحدد اتجاهها بقاعدة اليد اليمنى ، حيث يعتبر الفيض داخلاً إلى راحة اليد و اتجاه السرعة الخطية باتجاه الإبهام، و يحدد اتجاه القوة المحركة الكهربائية باتجاه الأصابع الأربعة الباقية. و على هذا المبدأ تعمل المولدات الكهربائية.

و تعتمد الظاهرة الثانية على توليد قوة محركة كهربائية في ناقل ثابت في ساحة مغناطيسية متغيرة مع الزمن ، و تسمى هذه القوة المحركة عندئذ بالقوة المحركة الكهربائية التحريضية و تعطى بالعلاقة $e = -\frac{d\phi}{dt}$ فهي إذاً متناسبة مع سرعة تغير الفيض المغناطيسي مع الزمن و تحدد إشارة (−) في العلاقة اتجاه القوة المحركة الكهربائية حسب قانون لنز **Lentz's**. وعلى هذا المبدأ تعمل المحولات الكهربائية .

7 -قانون آمبير: **Ampere's Law**

تؤثر في سلك ناقل يمر فيه تيار قدره I و موجود ضمن ساحة مغنطيسية تحريضها B قوة ميكانيكية تتناسب طرداً مع طول الناقل و مع التيار المار فيه و التحريض المغناطيسي للساحة الموجود فيها الناقل ، و يتحدد اتجاه القوة الميكانيكية بقاعدة اليد اليسرى باعتبار أن الفيض يدخل راحة اليد و التيار باتجاه الأصابع الأربعة و القوة الميكانيكية باتجاه الإبهام . و على هذا المبدأ تعمل المحركات الكهربائية.

ثانياً: مراجعة في الدارات الكهربائية للتيار المتناوب

A.C. circuits

1 - القوة المحركة الكهربائية المتحرضة المتحرضة في ملف عدد لفاته N ومغذى بتوتر متناوب

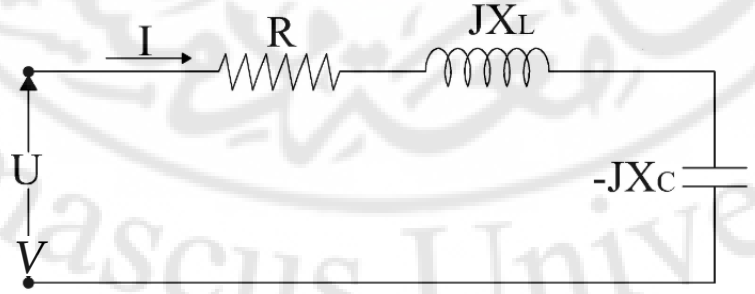
$$e = -N\frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \vec{E} = -j\omega N\phi \Rightarrow |E| = 2\pi f N\phi$$

$$E_{eff} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} fN\phi = 4.44Nf\phi$$

2 - دارة مقاومة ومحارضة ومكثف على التسلسل:

Resistance, inductance and capacitance in series:

يبين الشكل دارة كهربائية مكونة من مقاومة ومحارضة ومكثف موصول على التسلسل ومغذى من خلال منبع توتر متناوب بتطبيق قانون كيرشوف على الدارة نحصل على العلاقات التالية:.



الشكل (2) دارة كهربائية تسلسلية

$$v = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt$$

$$\vec{V} = R\vec{I} + j\omega L\vec{I} + \frac{1}{j\omega C}\vec{I}$$

$$\vec{V} = R\vec{I} + j\omega L\vec{I} - j\frac{1}{\omega C}\vec{I}$$

$$\vec{V} = R\vec{I} + jX_L\vec{I} - jX_C\vec{I} = \vec{I}[R + j(X_L - X_C)]$$

$$Z = \frac{V}{I} = R + j(X_L - X_C)$$

$$Z = |Z|\angle\varphi$$

$$|Z| = \sqrt{[R^2 + (X_L - X_C)^2]}$$

$$\varphi = arctg\frac{X_L - X_C}{R}$$

$$Power\ \ factor\ of\ \ the\ Load: \cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{[R^2 + (X_L - X_C)^2]}}$$

3 – الاستطاعة الفعلية P و الوهمية(التخيلية) Q والاستطاعة الظاهرية S في دارات التيار المتناوب:

Active (P), Reactive (Q) and Apparent (S) Power in A.C. circuits:

$Active\ Power(W)\ \ P = VI\cos\varphi$

$\text{Re}active\ Power(VAR)\ \ Q = VI\sin\varphi$

$Apparent\ Power(VA)\ \ S = VI$

$$S = P + jQ$$

أمثلة محلولة: مثال1:

حلقة حديدية قطرها الوسطي $20cm$ تحوي على فجوة هوائية عرضها $1mm$. إذا كانت مساحة مقطع الحلقة $3.6cm^2$ فحدد قيمة التيار اللازم تمريره في وشيعة تحوي على 1000 لفة تلف حول الحلقة وذلك لتأمين فيض مغناطيسي قدره $5\times10^{-4}Wb$ في الفجوة الهوائية باعتبار السماحية النسبية للحديد 650.

الحل:

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{5\times10^{-4}}{3.6\times10^{-4}} = 1.39Wb/m^2$$

الفجوة الهوائية:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1.39}{4\pi\times10^{-7}} = 1.105\times10^6\ AT/m$$

الأمبير لفة اللازمة في الفجوة الهوائية:

$$AT_{(g)} = H \times l = 1.105 \times 10^{6} \times 10^{-3} = 1105$$

الحلقة الحديدية:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{1.39}{4\pi \times 10^{-7} \times 650} = 1700 AT/m$$

الأمبير لفة اللازمة في الحلقة الحديدية:

طول محيط الحلقة الوسطي يساوي: $20\pi[cm] = 0.2\pi[m]$

$$AT_{(i)} = 1700 \times 0.2\pi = 1069$$

الأمبير لفة الإجمالية اللازمة:

$$1105 + 1069 = 2174$$

وبالتالي التيار اللازم:

$$I = \frac{2174}{1000} = 2.174A$$

مثال2:

حلقة حديدية قطرها الوسطي $30cm$ ومساحة مقطعها $10cm^2$. تلف حولها وشيعة عدد لفاتها 600 لفة.كثافة الفيض المغناطيسي فيها $1Wb/m^2$ حيث تتولد بوساطة ساحة مغناطيسية شدتها $4000AT/m$. تُحدث في الحلقة فجوة بعرض $1cm$ وتبقى كثافة الفيض فيها $1Wb/m^2$، المطلوب حساب التحريض الذاتي للوشيعة.

الحل:

إن عامل التحريض الذاتي للوشيعة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2\phi}{NI} = \frac{N^2\phi}{totalAT}[H]$$

الأمبير لفة اللازمة للمسار ضمن الحلقة تساوي: $400 \times 0.3\pi$

شدة الساحة المغناطيسية Hفي الفجوة:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} = 79.54 \times 10^{4} AT/m$$

الأمبيرلفة اللازمة في الفجوة:

$$AT_{(g)} = H.l = 79.54 \times 10^{4} \times 10^{-2} = 7954$$

الأمبير لفة الإجمالية:

$$TotalAT = 377 + 7.954 = 11.724$$

$$\phi = B \times S = 1 \times 10 \times 10^{-4} = 10^{-3} Wb$$

$$L = \frac{N^2\phi}{totalAT} = \frac{600^2 \times 10^{-3}}{11.724} = 0.0307[H]$$

المحولات الكهربائيةTransformers

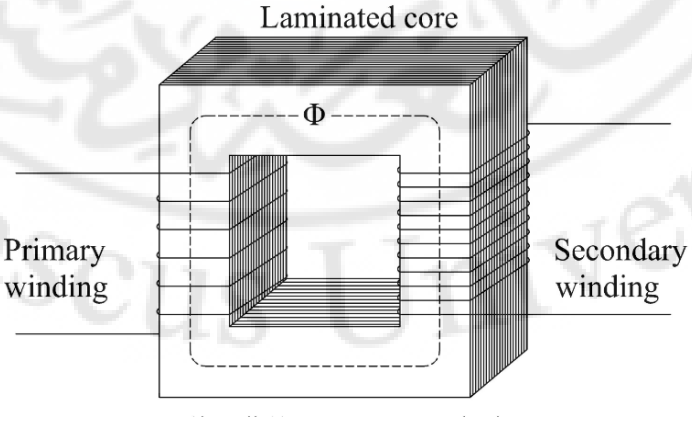
1 تعريف المحولة: Definition of The Transformer

تعرف المحولة بأنها جهاز كهرطيسي (كهرومغناطيسي) ساكن يقوم بتحويل القدرة الكهربائية للتيار المتناوب إلى قدرة كهربائية أخرى مختلفة الصفات والميزات كالتوتر أو التيار أوالتردد أو عدد الاطوار .

تتكون المحولة من دارتين كهربائيتين متداخلتين عن طريق دارة مغناطيسية، إحدى هاتين الدارتين هي ملف التوتر المرتفع أو الملف الأولي **High Voltage or Primary Winding** والأخرى هي ملف التوتر المنخفض أو الملف الثانوي **Voltage or Secondary Low Winding** أما الدارة المغناطيسية فهي عبارة عن النواة الحديدية .

يستقبل ملف التوتر المرتفع أو الملف الأولي الاستطاعة الكهربائية والتي يطلق عليها اسم استطاعة الدخل **Input Power** بينما ملف التوتر المنخفض أو الملف الثانوي فتتدفق من خلاله الاستطاعة الكهربائية و يطلق عليها اسم استطاعة الخرج **Output Power** .وتعتبر المحولة آلة كهربائية ذات مردود عالٍ جداً حيث يمكن الحصول على استطاعة خرج تكاد تكون مساوية لاستطاعة الدخل (إذا أمكن الوصول مثلاً بضياعات الحديد والنحاس إلى 1%).

يبيّن الشكل (1) رسماً مبسطاً لمحولة تتكون من ملف التوتر المرتفع وملف التوتر المنخفض والقلب الحديدي .



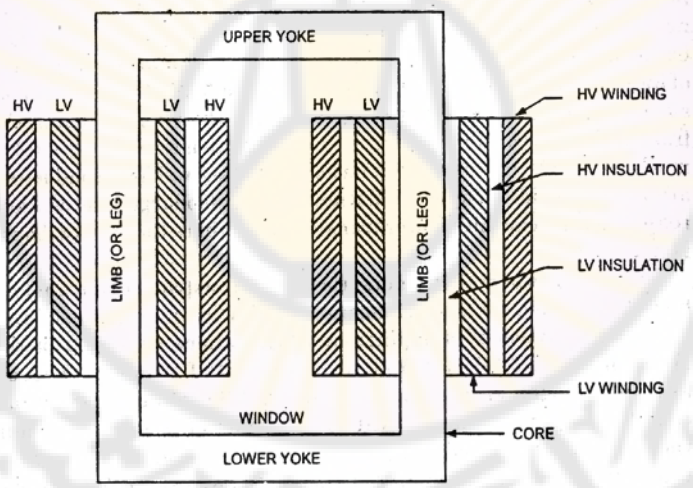
شكل (1) دارة مبسطة للمحولة

2 بنية المحولة: Construction of Transformers

تعتبر النواة والملفات من المكونات الأساسية للمحولات، إذ تمثل النواة الدارة المغناطيسية التي تسمح بمرور الفيض المغناطيسي، بينما تمثل الملفات الدارة الكهربائية التي تسمح بمرور التيارات الكهربائية فيها .

النواة : The Core

تعرف النواة بأنها دارة مغناطيسية مغلقة تسمح بمرور الفيض المغناطيسي ، ويلف ملفا الدارتين الأولية والثانوية المعزولين عن بعضهماعزلاً تاماًعلى هذه النواة وذلك لزيادة الترابط المغناطيسي Coupling Factor
وتقليل السيالة التسربية Leakage Flux وبحيث تقع ملفات التوتر المنخفض قرب النواة بينما ملفات التوتر المرتفع بعيدة عنها وذلك لسهولة عزل هذه الملفات والإقلال من تكاليفها كما هو مبين في الشكل (2).



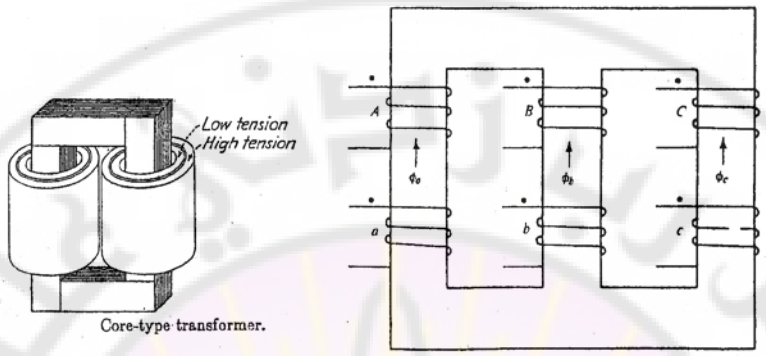
شكل (2)

تصنع النواة المغناطيسية من صفائح **Laminations** رقيقة يتراوح ثخنها بين 0.35-0.50 mm، وتغطى بمادة عازلة تكون إما الطلاء (الورنيش) أو الورق . ويعتبر تقليل الضياعات الحديدية الناشئة عن التيارات الإعصارية **Eddy-Current-Losses** من مميزات استخدام الصفائح في صناعة النواة . وكلما قلت سماكة الصفائح ، كانت الضياعات الحديدية منخفضة ، ولكن يجب مراعاة التوقف عند ثخانة معينة حتى لا تكون الصفائح ضعيفة ميكانيكياً.

ويوجد نوعان من أشكال النواة هما :

1-**النوى ذات القضبان Core-Type Transformers**

في هذا النوع تكون النواة محاطة بالملفات شكل (3) وهو المستخدم في أغلب المحولات بجميع الاستطاعات الأُحادية الطور منها والثلاثية الطور.

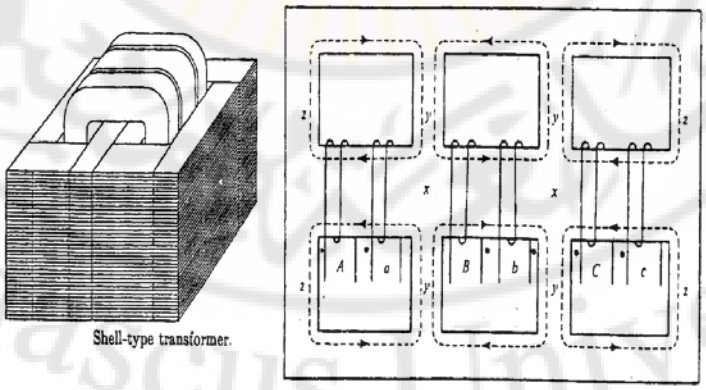


شكل (3) النوى ذات القضبان

يمتاز هذا النوع من النوى بسهولة التصنيع وسهولة الوصول إلى الملفات وإصلاحها، وهي الأكثر استعمالاً وخاصة من أجل التوترات المرتفعة .

2- **النوى المدرعة Shell-Type Transformers**

في هذا النوع من النوى تكون الملفات محاطة بالنواة شكل (4) ويستخدم في المحولات ذات الاستطاعات الصغيرة وتمتاز بالمتانة الميكانيكية بسبب الحماية التي يؤمنها حديد النواة للملفات .

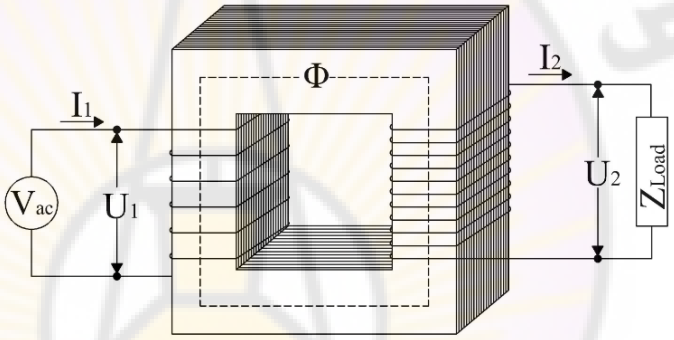


شكل (4) النوى المدرعة

3 نظرية عمل المحولة: Theory of Operation

3-1 المحولة المثالية : Ideal Transformer

تعد المحولة تطبيقاً مباشراً لقانون فاراداي في التحريض الكهرطيسي.لندرس مبدأعمل محولة أحادية الطور عادية حسب الشكل(5) مؤلفة من نواة مغناطيسية حديدية يلف عليها ملفان عدد لفاتهما N_1 و N_2 . لفهم نظرية عمل المحولة ووضع التمثيل الرياضي لها نبدأ أولاً بدراسة عمل المحولة المثالية. نقصد بالمحولة المثالية المحولة التي تكون فيها الضياعات الحديدية والنحاسية مهملة ويتشابك الفيض المغناطيسي المتولد كلياً مع الملفين وينعدم الفيض التسربي أي يكون عامل الترابط المغناطيسي بين الملفين مساوياً الواحد.



شكل (5) المحولة المثالية

إذا وصلنا أحد ملفي هذه المحولة الذي عدد لفاته N_1 وعامل تحريضه الذاتي الكلي L_1 مع منبع تيار متناوب ذي توتر u_1 وتردد f_1 ، فإنه سيمر في هذا الملف تيار كهربائي i_1 الذي بدوره سيولد فيضاً مغناطيسياً ϕ متناوباً تمر جميع خطوطه عبر النواة المغناطيسية ويتشابك مع ملفي المحولة على السواء،

إذا كان التوتر المطبق على المحولة والتيار المار في الملف الأولي جيبيين، يكون الفيض المغناطيسي المتولد ϕ جيبياً أيضاً ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \qquad (1)$$

حيث: ϕ - القيمة اللحظية للفيض المغناطيسي

ϕ_m - القيمة العظمى للفيض المغناطيسي

ω - السرعة الزاوية للتيار المتناوب ذي التردد f

يحرض هذا الفيض بدوره في كل من الملف الأولي والثانوي قوتين محركتين كهربائيتين مختلفتين بالقيمة ومتعلقتين بعدد لفات كل منهما وتعطيان حسب قانون فاراداي في التحريض المغناطيسي بالعلاقات الآتية :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \omega \phi_m \cos \omega t$$
$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \omega \phi_m \cos \omega t \qquad (2)$$

إن القيمة العظمى للقوة المحركة الكهربائية في كلا الملفين تساوي:

$$E_{1m} = N_1 \omega \phi_m = 2\pi \ fN_1 \phi_m$$
$$E_{2m} = N_2 \omega \phi_m = 2\pi \ fN_2 \phi_m \qquad (3)$$

والقيمة الفعالة لهما:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi \ \mathrm{f} N_1 \phi_m = 4.44 \, fN_1 \phi_m$$
$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi \ \mathrm{f} N_2 \phi_m = 4.44 \, fN_2 \phi_m \qquad (4)$$

نسمي نسبة عدد لفات كل من الملف الأولي N_1 والثانوي N_2 بنسبة تحويل المحولة ونرمز لها بالحرف a حيث تساوي إلى نسبة القوتين المحركتين الكهربائيتين في الملف الأولي والثانوي أي:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \qquad (5)$$

تكون نسبة التحويل في المحولة أكبر من الواحد في المحولات الخافضة للتوتر **Step-down Transformers** وأصغر من الواحد في المحولات الرافعة للتوتر **Step-up Transformers** ومساوية الواحد في محولات العزل الخاصة.

لا يمكن للمحولة الكهربائية أن تعمل على منبع تيار مستمر ولا تربط أبداً مع منبع تيار مستمر، لأنه إذا طبق توتر مستمر على الملف الأولي للمحولة، فإن الفيض المغناطيسي المتولد في نواة المحولة لن يكون متغيراً مع الزمن بل يبقى ثابتاً في المطال، وبالتالي لا تتحرض أي قوة محركة كهربائية.

لقد افترضنا أن المحولة مثالية، أي من دون ضياع ومن دون هبوط توتر في المقاومات الأومية الداخلية للملفين الأولي والثانوي. لذلك يمكننا أن نكتب قانون كيرشوف الثاني بالنسبة لدارة الملف الأولي والثانوي كما يلي:

$$U_1 = |E_1| \quad , \quad U_2 = |E_2| \qquad (6)$$

وأن الاستطاعة التي تستجرها المحولة من الشبكة تساوي الاستطاعة التي تقدمها إلى المحولة أي:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \qquad (7)$$

ينتج من هاتين المعادلتين أن:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (8)$$

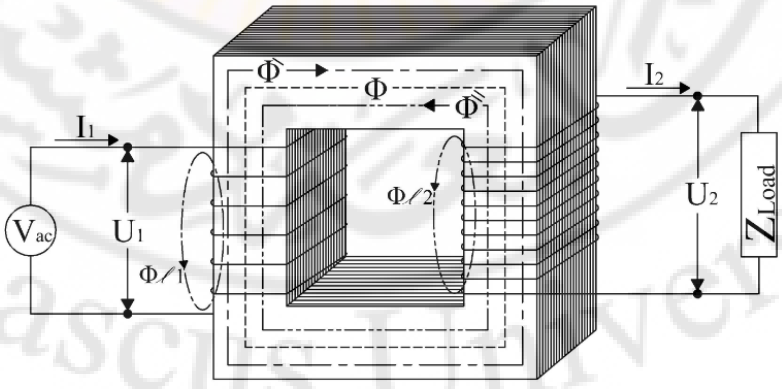
أي أن نسبة التحويل في المحولة المثالية تساوي نسبة توتري الملف الأولي والملف الثانوي وعكساً نسبة التيارين فيهما .

وهكذا تقوم المحولة بتحويل قيمة كل من التوتر والتيار في الطرف الأولي إلى قيم أخرى في الطرف الثانوي مع المحافظة على قيمة ثابتة لاستطاعة المحولة.

2-3 المحولة الحقيقية: Practical Transformer

ننتقل الآن إلى دراسة المحولة العادية الحقيقية والتي تحوي على ملفين أولي وثانوي عدد لفاتهما N_1 و N_2 ولكل منهما مقاومة أومية داخلية قدرها R_1 و R_2 وتحريض ذاتي كلي L_1 و L_2 وتحريض تسربي L_{l1} و L_{l2} وتحريض متبادل M .

نصل الملف الأولي لهذه المحولة بمنبع تيار متناوب ذي توتر u_1 وتردد f ، ونصل الملف الثانوي بحمولة قدرها $Z_L = R_L + jX_L$ وذلك كما هو مبين في الشكل (6) .



شكل(6) المحولة الحقيقية

أن مقاومة الملفات تسبب في هبوط توتر على الملف وينتج عن ذلك:

1- توتر نهاية الملف الثانوي V2 أقل شعاعيا من القوة المحركة الكهربائية المتحرضة e.m.f. E_2 بمقدار $R_2 I_2$.

$$V_2 = E_2 - R_2 I_2$$

2- بشكل مماثل للملف الأولي توتر نهاية الملف الأولي V1 أقل شعاعيا من القوة المحركة الكهربائية المتحرضة e.m.f. E_1 بمقدار $R_1 I_1$.

$$E_1 = V_1 - R_1 I_1$$

إن الملف الأولي سيستجر من المنبع تياراً قدره i_1 الذي بدوره يولد فيضاً مغناطيسيا متناوباً قدره ϕ_1 يتشابك معظم خطوطه ϕ' مع ملفي المحولة الأولي والثانوي بينما يتشابك قسم آخر منه في الهواء مع لفات الملف الأولي فقط ونسميه بالفيض التسربي ونرمز له بـ ϕ_{l1} أي أن:

$$\phi_1 = \phi' + \phi_{l1}$$

كما سيمر تيار آخر i_2 في الملف الثانوي و هذا التيار بدوره سيولد فيضاً مغناطيسياً آخر قدره ϕ_2 يتشابك معظم خطوطه ϕ'' مع ملفي المحولة الثانوي و الأولي بينما يتشابك قسم آخر منه في الهواء مع لفات الملف الثانوي فقط و نسميه بالفيض التسربي و نرمز له بـ ϕ_{l2} أي أن:

$$\phi_2 = \phi'' + \phi_{l2}$$

إن الفيض المغناطيسي ϕ'' سيعاكس الفيض ϕ' المسبب له، أي أنه كما ذكرنا فإن القوة المحركة المغناطيسية $i_2 N_2$ ستعاكس القوة المحركة المغناطيسية $i_1 N_1$ الناتجة عن التيار الأولي وتحاول محوها مما يترتب على ذلك زيادة سحب التيار i_1 من المنبع حتى يعوض الخسارة التي طرأت على قيمة الفيض في الدارة المغناطيسية نتيجة وضع الحمل .أي أن الفيض المغناطيسي الكلي في النواة المغناطيسية للمحولة يبقى ثابتاً ، ومحصلة القوتين المحركتين المغناطيسيتين $i_1 N_1$ و $i_2 N_2$ تساوي نفس القوة المحركة المغناطيسية $i_o N_1$ قبل وضع الحمولة أي أن:

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$$

$$\phi' + \phi'' = \phi$$

وبالتالي:

تولد الفيوض المغناطيسية المتولدة قوى محركة كهربائية تعطى بالعلاقات التالية:

في الملف الأولي :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_{l1} = -N_1 \frac{d\phi_{l1}}{dt}$$

وفي الملف الثانوي :

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_{l2} = -N_2 \frac{d\phi_{l2}}{dt}$$

بتطبيق قانون كيرشوف الثاني على دارتي الملف الأولي و الثانوي نستطيع أن نكتب:

$$u_1 = e_1 + e_{l1} + R_1 i_1$$

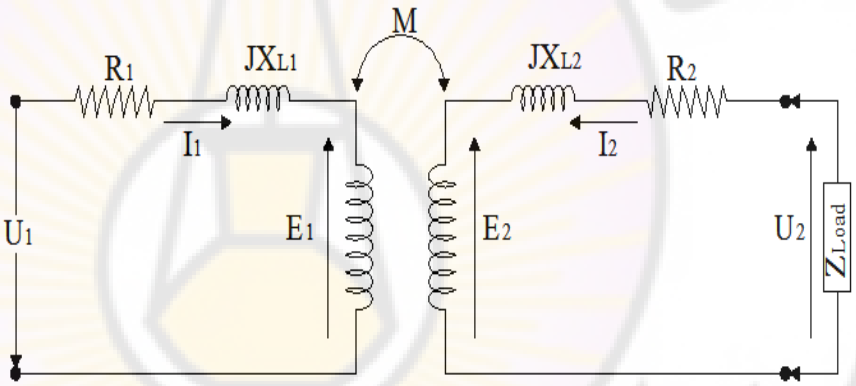
$$e_2 + e_{l2} = u_2 + R_2 i_2$$

بتطبيق قانون كيرشوف الثاني على دارتي الملف الأولي و الثانوي نستطيع أن نكتب:

$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_1)I_1 = E_1 + Z_1 I_1$$
$$E_2 = V_2 + (R_2 + jX_2)I_2 = V_2 + Z_2 I_2 \qquad (9)$$

$$E_2 = V_2 + (R_2 + jX_2)I_2 = V_2 + Z_2 I_2 \qquad (10)$$

عندها تمثل هاتان العلاقتان بالدارة الكهرمغناطيسية المبينة في الشكل (7).



الشكل (7) الدارة الكهرمغناطيسية للمحولة

أمثلة محلولة:

مثال1:

محولة أحادية الطور استطاعتها الاسمية $50KVA$ وتوتراتها الاسمية $20000/400V$.عدد لفات الملف الأولي $N_1 = 4000T$ وسطح مقطع النواة $S = 150cm^2$ والطول الوسطي للمسار المغناطيسي $l_{av} = 1.6m$ وتردد تيار الشبكة $f = 50Hz$. فإذا كانت تستجر من الشبكة في حالة اللاحمل تياراً قدره 0.5A المطلوب حساب القيم المغناطيسية B و H و μ و R_m في نواة المحولة عند التوتر الاسمي ، وكذلك حساب N_2 .

الحل:

لدينا مما سبق العلاقات الآتية التي تربط بين القيم المغناطيسية:

$$B = \mu H \quad ; \quad B = \frac{\phi}{S} \quad ; \quad \phi = \frac{E_1}{4.44 \times N_1 f}$$

و بالتعويض نجد:

$$\phi = \frac{20000}{4.44 \times 4000 \times 50} = 0.023 Wb$$

$$B = \frac{0.023}{150 \times 10^{-4}} = 1.53 Wb/m^2$$

$$H = \frac{N_1 I_o}{l_{av}} = \frac{4000 \times 0.5}{1.6} = 1250 AT/m$$

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{1.53}{1250} = 1.224 \times 10^{-3} H/m$$

$$R_m = \frac{1}{\mu}\frac{l_{av}}{S} = \frac{1}{1.224 \times 10^{-3}} \frac{1.6}{150 \times 10^{-4}} = 8.7 \times 10^4$$

لحساب N_2 :

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{20000}{400} = 50$$

$$N_2 = \frac{N_1}{50} = \frac{4000}{50} = 80T$$

مثال2:

محولة أحادية الطور استطاعتها الاسمية $50KVA$ وتوتراتها الاسمية $1000/400V$ تعمل بتردد $50Hz$.

إذا علمنا أن عدد لفات الملف الأولي $N_1 = 200T$ و سطح مقطع النواة الحديدية $S = 150cm^2$ المطلوب حساب:

1 -تيارات الملف الأولي والثانوي الأسمية.

2 -عدد لفات الملف الثانوي و نسبة التحويل.

3 -الفيض المغناطيسي في نواة المحول.

4 -كثافة الفيض المغناطيسي في النواة.

الحل:

$$I_{nprim.} = \frac{50000}{1000} = 50A$$

$$I_{nsec.} = \frac{50000}{400} = 125A$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow a = \frac{200}{N_2} = \frac{1000}{400} = 2.5 \Rightarrow N_2 = 80 \ Turns$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi \Rightarrow \phi = \frac{E_1}{4.44 f N_1}$$

$$\phi = \frac{1000}{4.44 \times 50 \times 200} = 0.0225 \ Wb$$

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.0225}{150 \times 10^{-4}} = 1.5 \ Wb/m^2$$

تمارين وظيفة:

1 ـ محولة أحادية الطور صمم للحصول على توتر 33Kv للأولي و 6.6Kv للثانوي و يعمل بتردد $50Hz$ .. أذا كانت كثافة الفيض العظمى المسموح بها 1.2Wb/m2 و عدد لفات الملف الأولي $N_1 = 1250T$ المطلوب حساب تيارات الملف الأولي والثانوي الأسمية. و عدد لفات الملف الثانوي وسطح مقطع النواة المغناطيسية.

2 ـ محولة أحادية الطور صمم للحصول على توتر 6000v للأولي و 250 v للثانوي و يعمل بتردد $50Hz$. المطلوب حساب عدد لفات الملف الأولي و الثانوي للحصول على فيض $80 \, mWb$.

بنية آلة التيار المستمر ونظرية عملها

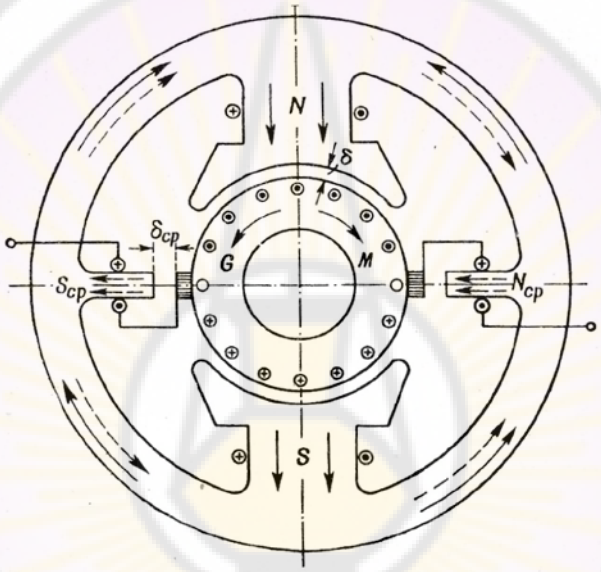
Theory Of Operation Of D.C. Machines and Its Constructions

- بنية آلات التيار المستمر: Construction Of D.C. Machine

تتكون آلة التيار المستمر بشكل عام من جزأين رئيسيين هما :

الجزء الثابت Stator ، و الذي يُسمى عادةً بالمحرض .

الجزء الدوار Rotor ، و الذي يُسمى بالمتحرض .



الشكل (1) أجزاء آلة التيار المستمر

1- المحرض: Stator

و هو عبارة عن الجزء الثابت من الآلة، أو الجزء الكهرومغناطيسي الفعال، و يكون عبارة عن حافظة أو إطار معدني مثبت عليه التجهيزات الآتية:

أقطاب كهرومغناطيسية : يُلف عليها و شائع أو ملفات التحريض (التهييج) و تُسمى أيضاً بالأقطاب الرئيسية . و تكون وظيفتها توليد السيالة المغناطيسية الثابتة، و تُغذى ملفات التحريض حصراً بتيار مستمر . عدد هذه الملفات و مساحة مقطعها يتحدد تبعاً لحالة تحريض الآلة، أي وصل الملفات من أجل تأمين تغذيتها. فإذا كانت الملفات موصولةً على التفرع مع دارة المتحرض، فيكون عدد لفاتها عالٍ نسبياً، و مساحة مقطعها صغيرة، على عكس الملفات

الموصولة على التسلسل مع دارة المتحرض، فهذه ذات عدد لفات قليل نسبياً و مساحة مقطع كبير.

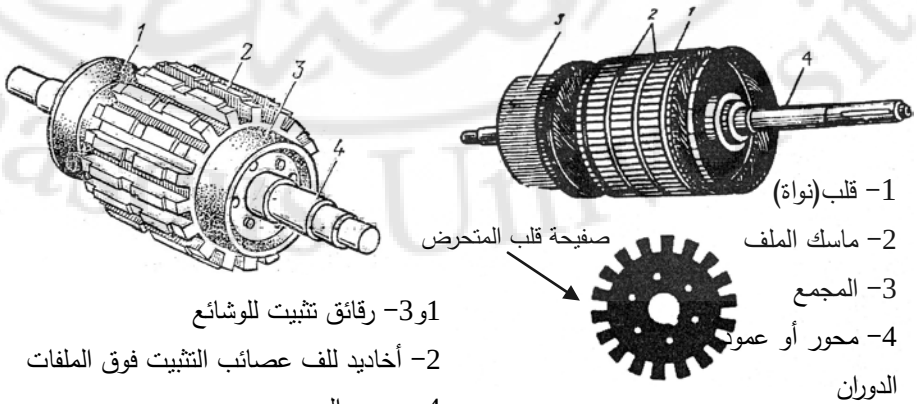
بالإضافة للأقطاب الرئيسية، غالباً ما يحوي الجزء الثابت من الآلة على أقطاب تبديل و تسمى أحياناً بالأقطاب الثانوية، و تكون وظيفتها توليد سيالة مغناطيسية للتغلب على آثار عملية التبديل و المشاركة في مقاومة رد فعل المتحرض، أي الحد من الآثار السلبية لعملية التبديل و ما يرافقها من ظهور شرر كهربائي تحت مسفرات الآلة على المجمع. توصل ملفات التبديل هذه على التسلسل مع ملفات المتحرض ليمر فيها التيار نفسه.

تُصنع الأقطاب الرئيسية عادةً من رقائق فولاذية معزولة عن بعضها بعضاً، بغية التقليل من الضياعات الإعصارية في حذاء القطب. أما الأقطاب الثانوية فتكون إما من الفولاذ المصمت أو من صفائحه الرقيقة.

تُصنع ملفات الأقطاب الرئيسية و الثانوية من نواقل نحاسية معزولة، ذات مقطع دائري أو مربعي الشكل. و تكون وشائع الآلات ذات الاستطاعة الصغيرة صغيرة المقطع. بينما تُصمم ملفات التحريض التسلسلية من نواقل شريطية الشكل، و تُلف على الأقطاب الرئيسية بحيث تُؤخذ فتحات التهوية الموجودة في الأقطاب بالحسبان.

2- المتحرض: Armature

و هو عبارة عن الجزء الدوار من الآلة، و يتكون بشكل عام من نواة مغناطيسية أسطوانية الشكل مصنوعة من صفائح الفولاذ الكهرومغناطيسي، و معزولة عن بعضها بعضاً بغية التقليل من التيارات الإعصارية. الشكل (2) يبين البنية الأساسية لقلب أو جسم المتحرض.

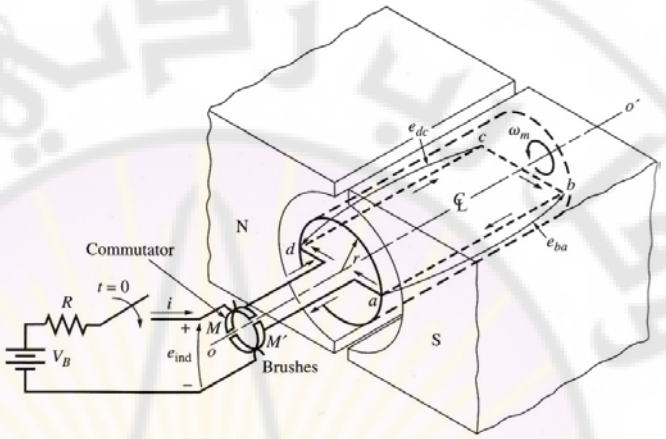


1- قلب(نواة)
2- ماسك الملف
3- المجمع
4- محور أو عمود الدوران

1و3- رقائق تثبيت للوشائع
2- أخاديد للف عصائب التثبيت فوق الملفات
4- محور المجمع

الشكل (2) بنية المتحرض في آلة التيار المستمر

تحتوي نواة المتحرض على مجاري لتتوضع فيها ملفات المتحرض و التي تكون متماثلة.هذه الملفات تكون من النحاس الدائري أو المربعي المقطع، و مسبقة الصنع ملفوفةً بعصائب عازلة، و يتم تركيبها على طبقتين إلى وشيعتين مختلفتين من وشائع المتحرض. توصل نهايات هذه الوشائع مع نصلات المجمع وصلاً كهربائياً محكماً. يبين الشكل التالي بنية مبسطة لآلة تيار



مستمر:

الشكل (3) بنية آلة التيار المستمر

القوة المحركة الكهربائية المتولدة في حلقة الدائر

الجزء ab: $e_{ba} = (\vec{v} \times \vec{B}).l = vBl$

الجزء bc: $e_{cb} = 0$

الجزء cd: $e_{dc} = vBl$

الجزء da: $e_{ad} = 0$

$$e_{ind.} = e_{ba} + e_{cb} + e_{dc} + e_{ad} = 2vBl$$

$$v = \omega.r$$

$$A = 2\pi rl$$

$$A/\,pole = \pi rl$$

$$e_{ind} = 2\omega r \frac{\phi}{A} l = 2\omega r \frac{\phi}{\pi rl} l$$

ومنه:

$$e_{ind} = \frac{2}{\pi}\phi\omega$$

التوتر المتولد في الآلة يساوي جداء فيض الآلة وسرعة دوران الآلة مضروبا بثابت يمثل البنية الميكانيكية للآلة.

العزم المتولد في حلقة الدائر:

الجزء ab:

$$F_{ab} = i(\vec{l} \times \vec{B}) = ilB$$
$$T_{ab} = rF \sin 90 = rilB$$

الجزء bc:

$$T_{bc} = 0$$

الجزء cd:

$$T_{cd} = rilB$$

الجزء da:

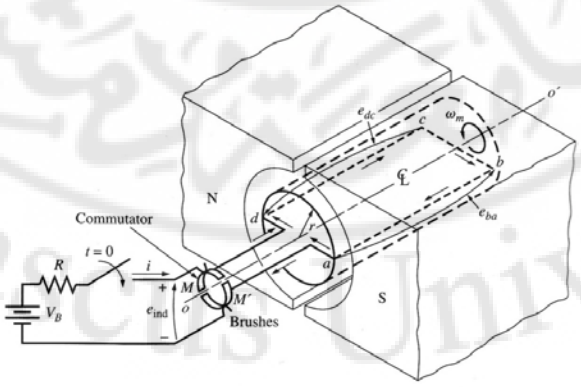
$$T_{da} = 0$$

فيكون محصلة العزم الكلي المتولد في حلقة الدائر:

$$T_{ind} = T_{ab} + T_{bc} + T_{cd} + T_{da}$$
$$T_{ind} = 2rilB = 2ril\frac{\phi}{A} = 2ril\frac{\phi}{\pi rl} =$$
$$T_{ind} = \frac{2}{\pi}\phi i$$

العزم المتولد في الآلة يساوي جداء فيض الآلة وتيار الآلة مضروبا بثابت يمثل البنية الميكانيكية للآلة.

مثال: تدور حلقة بين وجوه قطب منحني كما هو موضح في الشكل التالي.



وبالنظر إلى المعلومات التالية:

$B = 0.8T$

$l = 0.5m$

$r = 0.125m$

$V_B = 24V$

$R = 0.4\Omega$

$\omega = 250rad/\sec$

1- احسب التوتر المتولد في طرفي الحلقة.

2- هل تعمل الآلة كمولد أو محرك اشرح ذلك.

3- احسب قيمة التيار الداخل أو الخارج من الآلة وما هي الاستطاعة الداخلة أو الخارجة من الآلة.

4- اذا تغيرت قيمة سرعة الدوران الى $175rad/\sec$ ماذا يحصل لجريان التيار.

الحل:

$$e_{in} = \frac{2}{\pi}\phi\omega = \frac{2}{\pi}BA\omega = \frac{2}{\pi}B\pi rl\omega$$

1- التوتر المتولد : $e_{in} = 2\times 0.8\times 0.125\times 0.5\times 250 = 25V$

2- طالما $e_{ind} > V_B > 24V$ فأن الآلة تعمل كمولد

3- $I = \frac{25-24}{0.4} = 2.5A$ $\qquad P_{out} = 25\times 2.5 = 62.5W$

4- $e_{ind} = 2\times 0.8\times 0.125\times 0.5\times 175 = 17.5V < 24V < V_B$ وبالتالي تعمل الآلة كمحرك والتيار يدخل الى الآلة.

Motor Principle and Types of dc Motors:

المحرك الكهربائي هو جهاز يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية. يعتمد مبدأ العمل على قانون آمبير الذي ينص: تؤثر في سلك ناقل يمر فيه تيار قدره I و موجود ضمن ساحة مغنطيسية تحريضها B قوة ميكانيكية تتناسب طرداً مع طول الناقل و مع التيار المار فيه و التحريض المغناطيسي للساحة الموجود فيها الناقل ، و يتحدد اتجاه القوة الميكانيكية بقاعدة اليد اليسرى باعتبار أن الفيض يدخل راحة اليد و التيار باتجاه الأصابع الأربعة و القوة الميكانيكية باتجاه الإبهام .

$$F = B.I.l \quad \text{newton}$$

من حيث البنية لا يوجد اختلاف اساسي بين مولدات ومحركات التيار المستمر. نفس آلة التيار المستمر يمكن أن تعمل كمولد أو كمحرك وتسمى بالآلة العكوسة. وكذلك تصنف كما تم تصنيف مولدات التيار المستمر.حسب طريقة تحريضها إلى:

1 ـ محركات ذات تحريض مستقل.

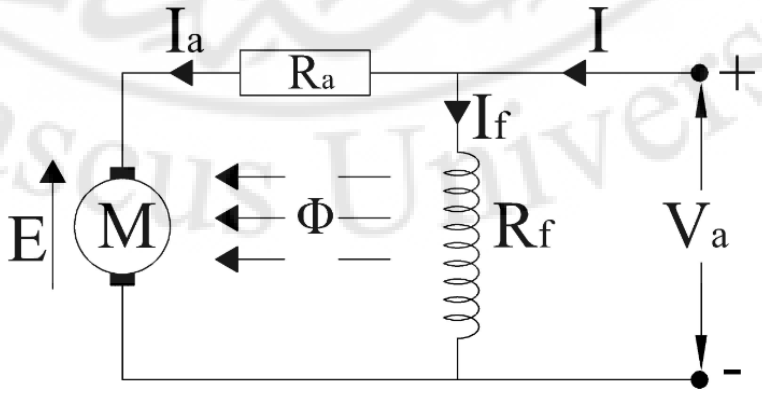
2 ـ محركات ذات تحريض تفرعي.

3 ـ محركات ذات تحريض تسلسلي.

4 ـ محركات ذات تحريض مركب.

1 مخطط الاستطاعات: Power Diagram

تكون دارة التحريض موصولة على التفرع مع دارة المتحرض وتغذى من منبع واحد. كما هو مبين في الشكل التالي:



يبين الشكل (1) مخطط الاستطاعة لمحرك تفرعي، وسنفرض أن المحرك يعمل في حالة مستقرة أي عندما Const = n ، حيث تمثل P_1 الاستطاعة الكهربائية التي يستجرها المحرك من شبكة ذات توتر U وتيار I ، وبالتالي يمكن كتابة معادلة الاستطاعة بالشكل الآتي:

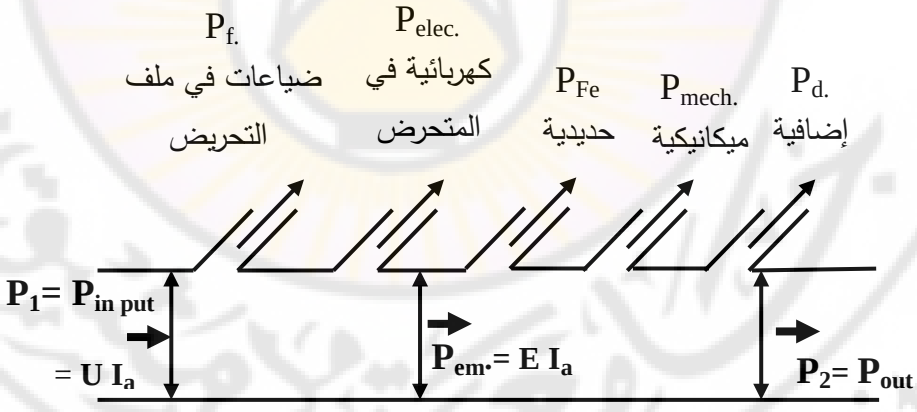
$$P_1 = UI \qquad (1)$$

يغطي جزء من هذه الاستطاعة الضياعات النحاسية في دارة التحريض $P_f = U_f I_f$، وفي دارة المتحرض $P_{elc} = R_a \cdot I_a^2$ ، والجزء الباقي يمثل الاستطاعة الكهرومغناطيسية للمتحرض المبينة بالعلاقة :

$$P_{em} = E \cdot I_a = P_1 - P_f - P_{elc} = U \cdot I - U_f I_f - R_a I_a^{\,2} \qquad (2)$$

وهي تتحول بدورها إلى استطاعة ميكانيكية كلية. الاستطاعة الميكانيكية على محور المحرك تقل عن الاستطاعة الكهرومغناطيسية بمقدار الضياعات الحديدية والإضافية والميكانيكية أي أن:

$$P_2 = P_{em} - (P_{Fe} + P_d + P_{mech}) \qquad (3)$$



الشكل(1)مخطط الاستطاعة للمحرك التفرعي

2 معادلة العزم: Torque Equation

تُعطى معادلة العزم الكهرومغناطيسي لمحركات التيار المستمر بالعلاقة الآتية:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} \qquad (4)$$

هذا العزم هو عزم دوراني يُدير المحرك في اتجاهه المحدد، ويتوازن مع العزوم المضادة الآتية :

1 ـ العزم T_o الموافق للضياعات الحديدية والإضافية والميكانيكية في حالة اللاحمل .

2 ـ عزم الحمل T_C المطبق على محور المحرك من قبل آلة العمل .

3 ـ العزم الديناميكي T_{dyn} .

أي أن :(5) $$T_{em} = T_o + T_c + T_{dyn}$$

أو :(6) $$T_{em} = T_{st} + T_{dyn}$$

حيث: $T_{st} = T_o + T_c$ يمثل العزم الستاتيكي المقاوم للحركة .

في الحالة المستقرة لعمل المحرك عندما n = Const. ، وبالتالي Tdyn = 0 يكون :

$$T_{em} = T_{st} \qquad (7)$$

عادة تكون قيمة T_O صغيرة جداً بالنسبة لـ T_C ، لذلك عند الحالة المستقرة لعمل المحرك يمكن اعتبار :

$$T_{em} = T_c \qquad (8)$$

وهو العزم الدوراني النافع الموجود على محور المحرك، والذي يتوازن مع عزم الحمل المطبق على محوره .

4 معادلة التوتر والتيار : Voltage and Current Equation

يكون اتجاه القوة المحركة الكهربائية في المحركات بعكس اتجاه تيار المتحرض، لذلك تسمى هذه القوة المحركة بالقوة المحركة الكهربائية العكسية ، ويمكن كتابة معادلة التوتر لدارة المتحرض على الشكل الآتي :

$$U = E + R_a \cdot I_a \qquad (9)$$

حيث: Ra المقاومة الكلية لدارة المتحرض.

وبالتالي تصبح قيمة التيار مساوية لـ:(10) $$I_a = \frac{U - E}{R_a}$$ حيث : $E = C_e \cdot \phi \cdot n$

5 الخصائص الرئيسية لمحركات التيار المستمر:

Main D.C. Motor Characteristics .

تصنف الخصائص الرئيسية لمحركات التيار المستمر بشكلين هما :

آ . **الخصائص الكهربائية:** وهي التي تعطى بعلاقة n , T مع تيار المتحرض للمحرك أي :

$$n, T = f(I_a)_{\ U=Const} \qquad (11)$$

ب . الخصائص الميكانيكية: ويقصد بها العلاقة بين سرعة دوران المتحرض وعزم المحرك المتولد فيه أي :

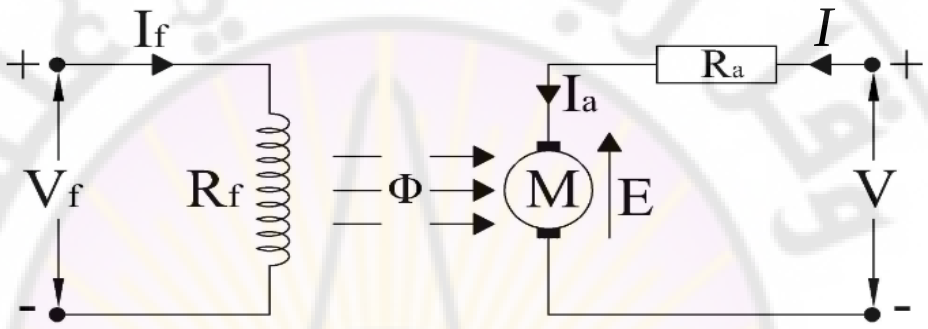
$$n = f(T)_{\ U=Const} \qquad (12)$$

وسندرس هنا بالتفصيل هذه الخصائص لجميع أنواع محركات التيار المستمر .

1 محرك التيار المستمر ذو التهييج المستقل:

d.c. Separately Excited Motor:

يتم تهييج المحرك من منبع مستقل عن منبع دارة المتحرض كما هو مبين في الشكل التالي:



الشكل(2) الدارة المكافئة لمحرك تيار مستمر ذو تهييج مستقل

بما أن الفيض متناسب مع تيار الحقل فيمكن اعتبار الفيض ثابت وبأعتبار ثابت العزم . K_Tو بالتالي العزم يعطى بالعلاقة التالية: $T = K_T \phi I_a$

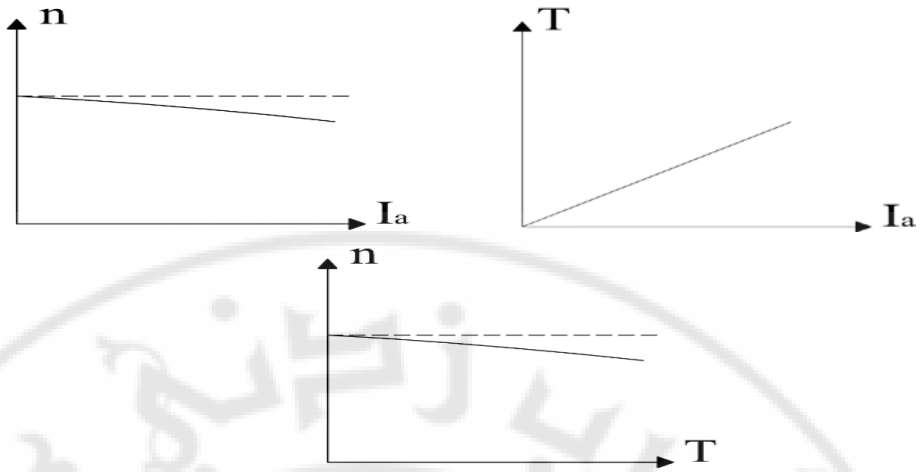
نلاحظ أن العزم يتناسب طرديا مع تيار المتحرض. وتيار المتحرض يعتمد على الفرق بين توتر تغذية دارة المتحرض والقوة المحركة الكهربائية العكسية المتحرضة

$$E = V - R_a I_a \Rightarrow I_a = \frac{V - E_a}{R_a}$$

وكما درسنا سابقا أن القوة المحركة الكهربائية العكسية متناسبة طرديا مع سرعة الدوران:

$$E = K_E \phi n \Rightarrow n = \frac{V - R_a I_a}{K_E \cdot \phi}$$

وبالتالي خصائص محرك التيار المستمر يمكن الحصول عليها كما في الأشكال التالية:



الشكل(3) خصائص محركات التيار المستمر ذو التهييج المستقل

يمكن تغيير تيار التهييج اما باضافة مقاومة متغيرة على التسلسل مع دارة التحريض أو عن طريق تغيير توتر دارة التهييج.

المردود: Efficiency

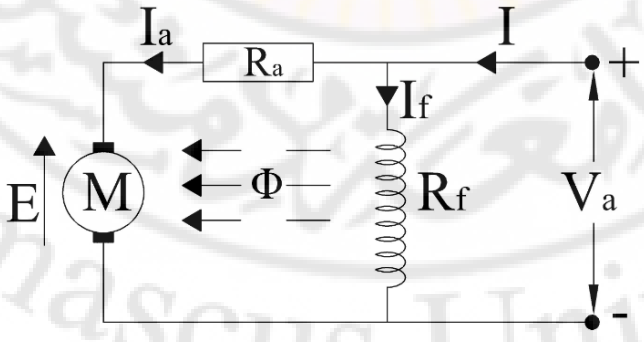
استطاعة دخل المحرك: $P_i = V.I$ Input power to the motor:

استطاعة خرج المحرك: $P_o = \omega T = \frac{2\pi n}{60} T$ Output power from the motor:

Efficiency: $\eta = \frac{Power(out}{Power(in)}) \times 100\% = \frac{2\pi nT / 60}{V.I} \times 100\%$

2- محرك التيار المستمر التفرعي: d.c. Shunt Motor:

تكون دارة التحريض موصولة على التفرع مع دارة المتحرض وتغذى من منبع واحد. كما هو مبين في الشكل التالي:



الشكل(4)الدارة المكافئة للمحرك التفرعي

حيث:

E – is the motional or back EMF

R_f – is the resistance of the field winding

ϕ – is the flux in the armature circuit

القوة المحركة الكهربائية العكسية تتناسب طرديا مع الفيض والسرعة: $E = K_E \phi . n$

حيث n سرعة المحرك و K_E ثابت يتعلق بملفات التهييج. تيار المتحرض يعطى بالعلاقة: $I_a = \frac{V - E}{R_a}$

حيث R_a مقاومة المتحرض و I_a تيار المتحرض.

وبأعتبار ثابت العزم . K_T و بالتالي العزم يعطى بالعلاقة التالية: $T = K_T \phi I_a$

في الحالة المثالية وبأهمال هبوط التوتر على ملف المتحرض $V = E = K_E \phi . n$

نستطيع أن نتعرف على خصائص (السرعة – التيار) من معادلتي القوة المحركة الكهربائية والتوتر :

ومنه : $n = \frac{U - R_a \cdot I_a}{K_E \cdot \phi}$

نلاحظ من هذه العلاقة أن هناك عاملين يؤثران على سرعة المحرك هما :

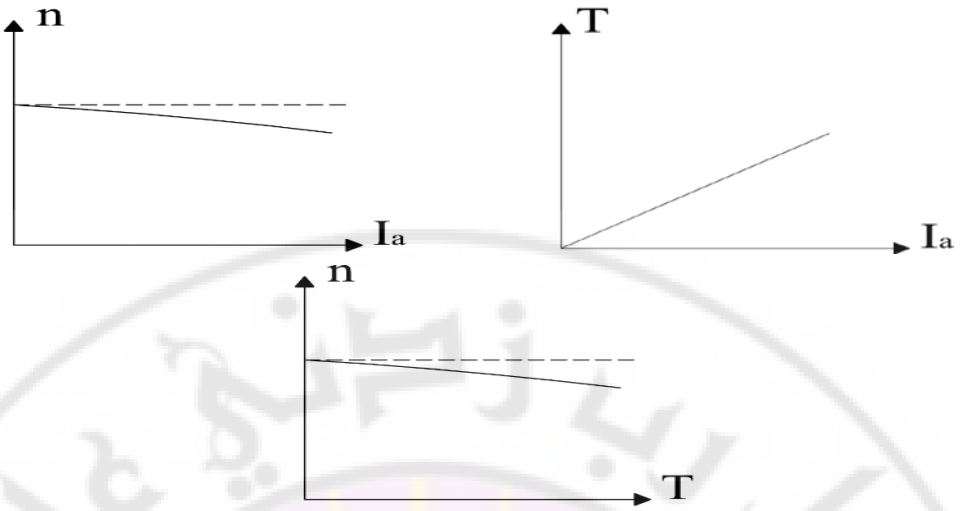
هبوط التوتر $R_a I_a$ ، ورد فعل المتحرض ϕ. كلما زاد عزم الحمل الخارجي المطبق على محور المحرك ازداد التيار Ia وهبوط التوتر $R_a I_a$ ، وبالتالي تنخفض السرعة. من ناحية أخرى كلما ازداد هذا التيار ازداد تأثير رد فعل المتحرض، والذي يؤدي كما رأينا إلى انخفاض السيالة المغناطيسية وبالتالي تزداد السرعة .

أي أن خصائص السرعة تختلف حسب النسبة بين ازدياد هبوطات التوتر الأومية ومقدار انخفاض السيالة المغنطيسية . من معادلة العزم عند الحالة المستقرة لعمل المحرك .

$$T = C_m \cdot \phi \cdot I_a = T_o + T_c \approx T_c$$

نرى أنه من أجل سيالة ثابتة فإن العلاقة بين العزم والتيار عبارة عن خط مستقيم وعندما يعمل المحرك على فراغ Tc=0 يكون : $T = T_o = C_m \cdot \phi \cdot I_o$

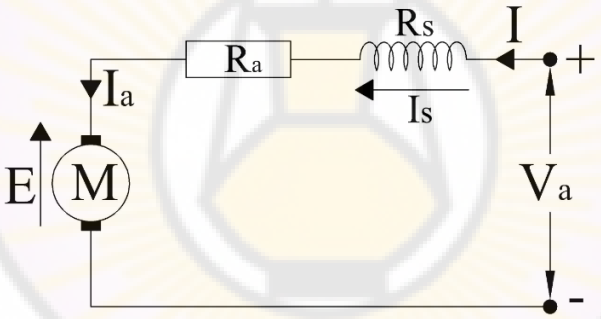
لكن في الحقيقة تنخفض السيالة ϕ قليلاً مع ازدياد التيار بسبب تأثير رد فعل المتحرض، لذلك نرى أن منحني السرعة يزداد بشكل أبطأ من ازدياد التيار .



الشكل(5) خصائص محرك التيار المستمر التفرعي

3- محرك التيار المستمر التسلسلي d.c. Series Motor:

تكون دارة التحريض موصولة على التسلسل مع دارة المتحرض وتغذى من منبع واحد. كما هو مبين في الشكل التالي:



الشكل(6)الدارة المكافئة لمحرك التيار المستمر التسلسلي

حيث:

V – is the voltage applied to the terminals

E – is the motional or back EMF

R_a – is the inherent armature resistance

R_s – is an external resistance added in series with the armature

القوة المحركة الكهربائية العكسية تتناسب طردا مع الفيض والسرعة: $E = K_E \phi . n$

تيار المتحرض يعطى بالعلاقة التالية: $(R_a + R_s) I_a = V - E$

خصائص السرعة – التيار n = f (Ia)

نرى من معادلتي القوة المحركة الكهربائية والتوتر :

$$E = C_e \cdot \phi \cdot n$$

$$U = E + (R_a + R_s) I_a$$

حيث إن :

$$n = \frac{U - (R_a + R_s) I_a}{C_e \cdot \phi}$$

إذا كانت الخواص المغناطيسية للآلة خطية فإن السيالة ϕ تتناسب تقريباً طرداً مع التيار.

$\phi = \propto I$.

وبالتالي يكون :

$$n = \frac{U - (R_a + R_s) I_a}{C_e \cdot \propto \cdot Ia} = \frac{U}{C_e \cdot \propto \cdot I_a} - \frac{(R_a + R_s)}{C_e}$$

إن علاقة السرعة – التيار هي علاقة قطع زائد . تبلغ السرعة قيمة لا نهائية عندما يصل التيار إلى الصفر ، وعليه إذا لم يطبق على محور المحرك حملا ميكانيكا فإن التيار I_a يكون صغيراً ، وبالتالي سرعة الدوران كبيرة جداً وربما تؤدي إلى تطاير أجزاء المحرك لذلك لا يجوز تدوير المحرك التسلسلي في حالة اللاحمل.

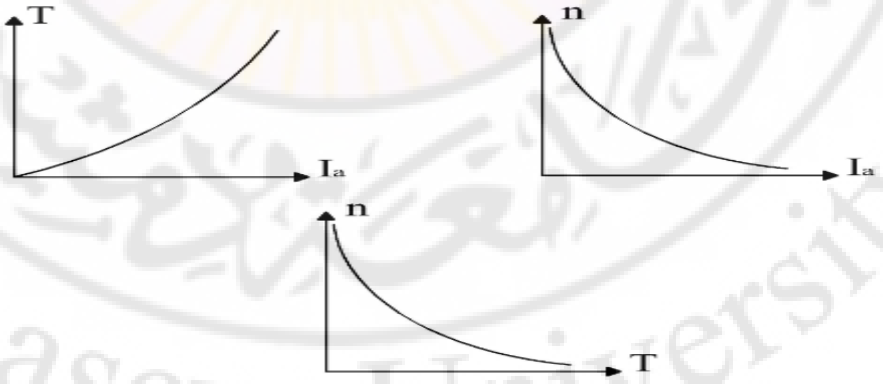
ب . خصائص العزم . التيار T = f (Ia)

لدينا من معادلة العزم

$$T = C_m \cdot \phi \cdot I_a$$

بفرض أن العلاقة بين Ia و ϕ خطية يكون : $T \approx C_m \cdot \propto \cdot I_a^{\,2}$

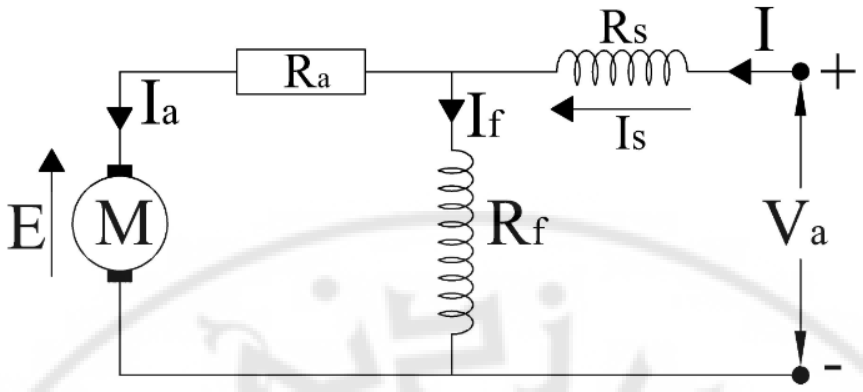
تمتلك المحركات التسلسلية عزم كبير عند سرعات منخفضة وبالتالي فهو مناسب لتطبيقات الجر الكهربائي.



الشكل(7) خصائص محرك التيار المستمر التسلسلي

4- محرك التيار المستمر المركب::d.c. Compound Wound Motor

تتشكل القوة المحركة المغناطيسية في هذه الحالة من مركبتين من الملف التسلسلي والملف التفرعي

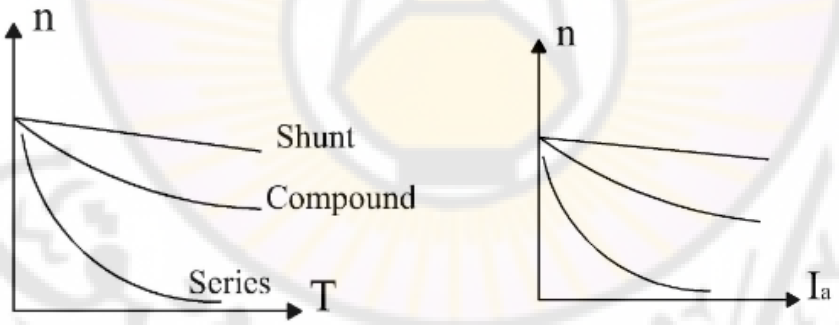


الشكل(8)الدارة المكافئة لمحرك التيار المستمر المركب

بما أن المحرك له ملفان تسلسلي وتفرعي فخصائصه الميكانيكية تقع بين خصائص المحرك التفرعي والتسلسلي .

من الملاحظ أنه كلما كان تأثير الملف التسلسلي أكبر في تشكيل الفيض المغناطيسي كانت خصائص المحرك قريبة من خصائص المحرك التسلسلي .

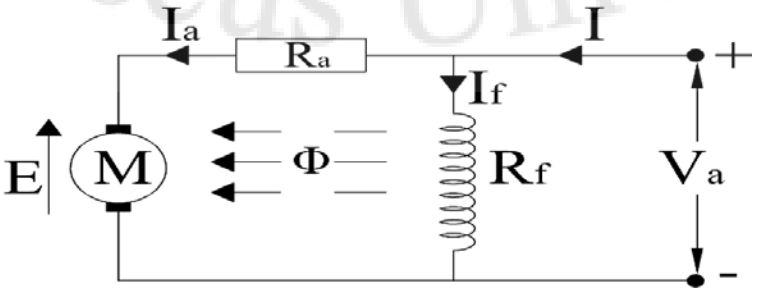
من الناحية النظرية يمكن أن يكون الفيضان المغناطيسيان المتشكلان في الملفين في نفس الاتجاه، أو في اتجاه معاكس لكن عملياً تستخدم فقط الحالة الأولى .



الشكل(9) خصائص محرك التيار المستمر المركب

تمارين:

محرك تيار مستمر تفرعي توترها 220V مقاومة متحرضها 0.5Ω. اذا كان تيار الحمل الكامل 20A . أوجد ال ق م ك المتحرضة .

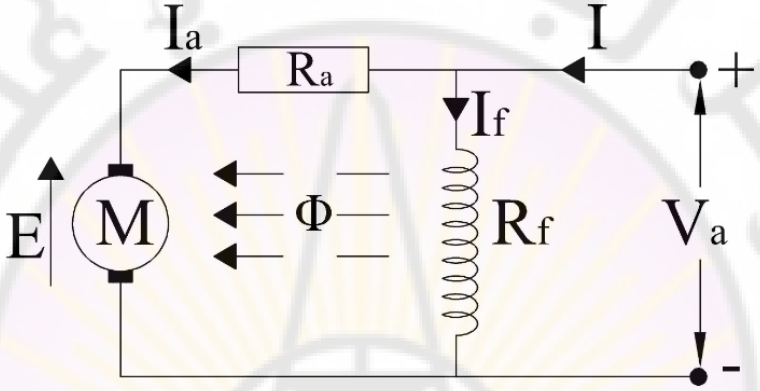


الحل:

$$E = V - R_a I_a = 220 - 0.5 \times 20 = 210V$$

2- محرك تيار مستمر تفرعي استطاعته Kw7.46 و توتره V440 مقاومة المتحرض 0.8Ω ومقاومة ملف التهييج 200Ω. أوجد ال ق م ك المتحرضة عند مردود 85%.

الحل:



Motor input power $P_i = 7.46 \times 1000 / 0.85 = 8776.47W$

Motor input current $I = P_i / V = 8776.47 / 440 = 19.95A$

$$I_f = V / R_f = 440 / 200 = 2.2A$$

$$I_a = I - I_f = 19.95 - 2.2 = 17.75A$$

$$E = V - R_a I_a = 440 - 0.8 \times 17.75 = 425.8A$$

نظم القيادة الكهربائية لمحركات التيار المستمر

1- مقدمة :

يتناول الفصل مواضيع القيادة الكهربائية لمحركات التيار المستمر، التي سبق دراسة مبادئ عملها وخواصها وطرق لفها وأساليب اختباراتها بالتفصيل في مقرر: الآلات الكهربائية

وستشمل مواضيع القيادة التي سندرسها لمثل هذه المحركات الأمور التالية:

1. قيادة الإقلاع لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية والتسلسلية والمختلطة.
2. قيادة الكبح لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية والتسلسلية والمختلطة.
3. قيادة السرعة لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية والتسلسلية والمختلطة.

وتتطلب دراسة مواضيع القيادة من إقلاع وكبح وتنظيم للسرعة إلى ضرورة التعرف على أساليب استنتاج المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر.

وتعرف المميزات الكهروميكانيكية، بأنها تمثل العلاقة بين سرعة دوران المحرك والتيار المار فيه أي :

$$n = f(I) \;\; ; \omega = f(I)$$

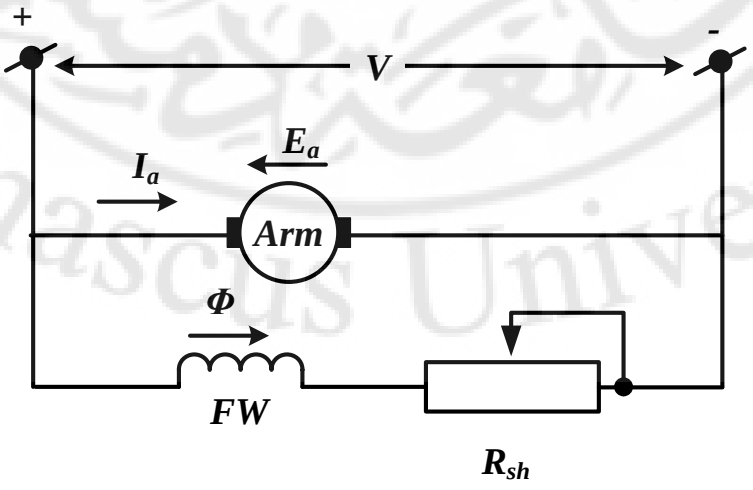
أما العلاقة بين السرعة والعزم المتزايد في المحرك $n = f(T) \;\; ; \omega = f(T)$ فتسمى المميزات الميكانيكية وتختلف هذه المميزات من حيث شكلها وخصائصها ودرجة قساوتها من محرك إلى آخر.

وبما أن المحركات التفرعية تعد حالة خاصة بالنسبة لمحركات التهييج المستقل، حيث أنه في كلا النوعين يكون الفيض المغناطيسي ثابتاً وغير متعلق بتيار الحمل، فإن مميزات المحركات ذات التهييج المستقل، لا تختلف عن مميزات المحركات التفرعية لذا ستتم دراستها سوية.

2- المميزات الطبيعية للمحركات ذات التهييج المستقل أو التفرعية:

Natural Characteristics of Shant Waund D.C. Motors

يبين الشكل (1) الدارة الكهربائية لمحرك تفرعي، حيث يوصل ملف التهييج على التفرع مع المتحرض غير مقاومة R_{sh} تستعمل للتنظيم وتشكل مع ملف التهييج دارة التهييج.



الشكل (1)

واستناداً إلى قانون كيرشوف الثاني، يمكننا استنتاج معادلة التوترات في دارة المتحرض والتي تسمى بالدارة الرئيسة.

$$V = E_a + I_a.R_a \qquad (1)$$

حيث:

V – توتر شبكة التغذية الكهربائية.

E_a – القوة المحركة الكهربائية المتولدة على طرفي ملف المتحرض.

I_a – التيار المار في ملف المتحرض.

R_a – المقاومة الأومية الكلية في المتحرض، وتساوي إلى مجموع المقاومات r_a لملف المتحرض و r_p لملف الأقطاب المساعدة و r_c لملف التعويض.

وتساوي القوة المحركة الكهربائية المتولدة على طرفي المتحرض.

$$E_a = C_m.\phi.\omega \qquad (2)$$

حيث : ϕ – الفيض المغناطيسي المتولد في ملف التهييج.

ω – السرعة الزاوية لمحور المتحرض.

C_m – ثابت التصميم الميكانيكي في المحرك ويساوي.

$$C_m = \frac{P.Z}{2\pi.a} \qquad (3)$$

حيث :P –عدد أزواج الأقطاب.

Z – عدد الموصلات في المتحرض.

a – عدد أزواج الدارات التفرعية في ملف المتحرض.

نستنتج من العلاقتين (1)، (2) مايلي :

$$V = C_m.\phi.\omega + I_a.R_a \qquad (4)$$

ومنه :

$$\omega = \frac{V}{C_m.\phi} - \frac{I_a.R_a}{C_m.\phi} \qquad (5)$$

وتعد العلاقة الأخيرة المميزة الكهروميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل أو التفرعية، وبما أن (ϕ) ثابتاً في هذا النوع من المحركات فيمكننا عد $C_m.\phi$ ثابتاً ويساوي :

$$C_m.\phi = C \qquad (6)$$

وبالتالي تصبح العلاقة (5) مساوية :

$$\omega = \frac{V}{C} - \frac{I_a.R_a}{C} \qquad (7)$$

وتسمى المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية للمحركات ذات التهييج المستقل أو التفرعية والتي تتعلق بخصائص المحرك التصميمية. أما المميزات الميكانيكية الطبيعية لهذه المحركات فيتم الحصول عليها استناداً إلى العلاقة بين العزم الدوراني والتيار المار في المتحرض والفيض المغناطيسي المتولد في ملف التهييج والتي تساوي:

$$T = C_m.\phi.I \qquad (8)$$

أو:

$$T = C.I \qquad (9)$$

ومن العلاقتين (7-6)و (8-6)نستنتج :

$$\omega = \frac{V}{C} - \frac{T.R_a}{C^2} \qquad (10)$$

وهي معادلة المميزات الميكانيكية الطبيعية لهذا النوع من المحركات، وكما نلاحظ من المعادلتين (7)و (8) فإن المميزات الكهروميكانيكية الطبيعية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية هي تمثيل خط مستقيم هابط مع ازدياد التيار أو العزم، حيث تساوي السرعة عندما يكون التيار أو العزم مساوياً الصفر إلى قيمة ثابتة تسمى سرعة اللاحمل المثالي:

$$\omega_0 = \frac{V}{C} \qquad (11)$$

أما الحد الثاني من الطرف الأيمن في المعادلتين (7-6)و (10-6) فيسمى هبوط السرعة للميزات الطبيعية ويساوي بالنسبة للميزات الكهروميكانيكية:

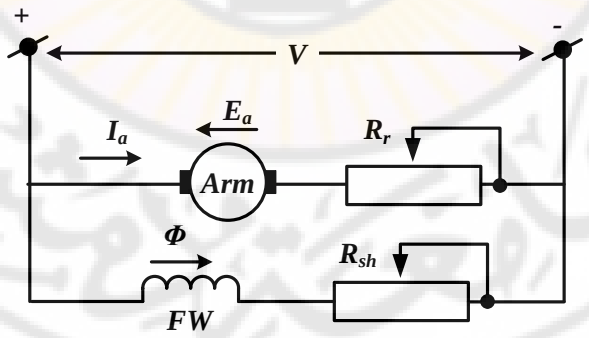
$$\Delta\omega = I\frac{R_a}{C} \qquad (12)$$

وبالنسبة للميزات الميكانيكية:

$$\Delta\omega = T\frac{R_a}{C^2} \qquad (13)$$

3- المميزات الاصطناعية أو الريوستاتية للمحركات ذات التهييج المستقل أو التفرعية:

إذا أضفنا إلى الدارة الرئيسة في المحرك مقاومة خارجية R_r ، كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2)

فإن معادلة التوترات (1) تصبح مساوية :

$$V = E_a + I_a.(R_a + R_r) \qquad (14)$$

وتصبح معادلة المميزات الكهروميكانيكية (7) مساوية:

$$\omega = \frac{V}{C} - \frac{I_a.(R_a + R_r)}{C} \qquad (15)$$

أما معادلة المميزات الميكانيكية (10) فتصبح مساوية:

$$\omega = \frac{V}{C} - \frac{T.(R_a + R_r)}{C^2} \qquad (16)$$

إن العلاقتين (15)و (16-56) تمثلان المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية الاصطناعية، حيث تتعلقان بقيم المقاومات الخارجية في المحرك إضافة إلى خصائص المحرك. ومن هاتين العلاقتين نلاحظ أن قيمة سرعة اللاحمل (ω_0) لا تتأثر بإضافة المقاومات الخارجية وتبقى على حالها كما في المميزات الطبيعية وتساوي:

$$\omega_0 = \frac{V}{C} \qquad (17)$$

أما هبوط السرعة في هذه الحالة فيساوي:

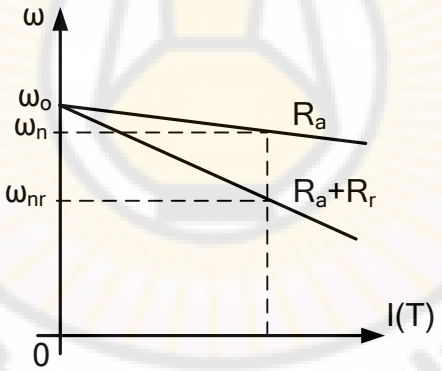
$$\Delta\omega = I_a \frac{R_a + R_r}{C} \qquad (18)$$

وذلك بالنسبة للميزات الكهروميكانيكية.

أما بالنسبة للميزات الميكانيكية فيساوي:

$$\Delta\omega = T \frac{R_a + R_r}{C^2} \qquad (19)$$

ونلاحظ أن هبوط السرعة يزداد بصورة كبيرة مع ازدياد التيار (I_a) والعزم (T)، وتكون المميزات في هذه الحالة أكثر ليونة بالمقارنة مع المميزات الطبيعية، كما هو مبين في الشكل (3).



الشكل (3)

4- إنشاء المميزات الكهروميكانيكية أو الميكانيكية للمحركات ذات التهييج المستقل (التفرعية):

Construction of Shunt Wound D.C. Motors Speed- Torque Characteristics

4-1- إنشاء المميزات الطبيعية:

بما أن العلاقتين (7) و (10)يمثل كل منهما خطاً مستقيماً فيكفي لإنشائهما بيانياً أن نجد إحداثيات نقطتين فقط على هذا الخط المستقيم. ويمكن إيجاد النقطة الأولى بسهولة من معطيات اللوحة الاسمية للمحرك والتي تتحدد عادة بالاستطاعة الاسمية(P_n) وجهد التغذية (V_n) والسرعة الاسمية (n_n) وتيار الحمولة الاسمي (I_n) ويضاف إلى هذه المعطيات أحياناً قيمة المردود من أجل الحمل الاسمي

(η_n). أما العزم الاسمي (T_n) فيمكن حسابه بدلالة (P_n) و (n_n) بوساطة إحدى العلاقتين التاليتين :

$$T_n = 975\frac{P_n(kW)}{n_n(r.p.m)}(kg.m) \qquad (20)$$

$$T_n = 9550\frac{P_n(kW)}{n_n(r.p.m)}(N.m) \qquad (21)$$

من المعطيات أو المواصفات الاسمية للمحرك يمكننا استنتاج النقطة ذات الإحداثيات $(n_n\ ,I_n)$أو $(\omega_n\ ,I_n)$ على المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية. وتكون إحداثيات هذه النقطة بالنسبة للميزات الميكانيكية الطبيعية مساوية$(\omega_n\ ,T_n)$حيث يتم حساب عزم الحمولة الاسمي من العلاقة:

$$T_n = C.I_n \qquad (22)$$

النقطة الثانية فيمكن أن تكون المقابلة لسرعة اللاحمل (w_0) والتي يكون فيها: $(I = o)$ أو $(T = 0)$ويمكننا حساب قيمة(w_0) من العلاقة (11)، ولأن :

$$E_n = C.\omega_n = V_n - I_n.R_a \qquad (23)$$

وبالتالي :

$$C = \frac{V_n - I_n.R_a}{\omega_n} \qquad (24)$$

ومنه نستنتج :

$$\omega_0 = \frac{V_n}{V_n - I_n.R_a}\omega_n \qquad (25)$$

ولكن لوحة المواصفات الفنية الاسمية للمحرك لا تعطي عادة قيمة المقاومة (R_a)، لذلك يتم تحديدها استناداً إلى كون المفاقيد الكلية في المحرك النحاسية في ملفات المتحرض (أي أن المفاقيد النحاسية تساوي المفاقيد الثابتة في المحرك) ومنه :

$$\Delta P = 2.I_n^2.R_a \qquad (26)$$

ومن جهة ثانية :

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = P_{in}(1-\eta_n) \qquad (27)$$

ولكن :

$$P_{in} = U_n.I_n \qquad (28)$$

وبتعويض قيمة (P_{in}) في المعادلة السابقة، فنحصل على:

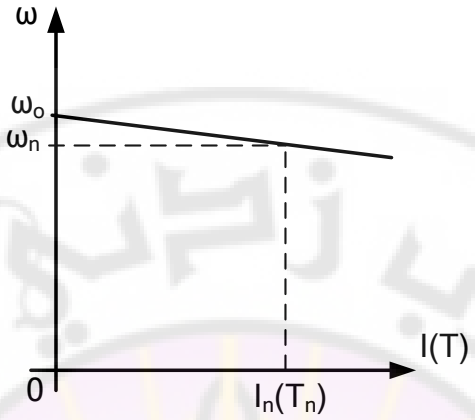
$$\Delta P = 2.I_n^2.R_a = I_n.V_n(1-\eta_n) \qquad (29)$$

$$R_a = 0.5(1-\eta_n)\frac{V_n}{I_n} \qquad (30)$$

ويمكننا استنتاج قيمة المردود الاسمي (η_n) من العلاقة التالية:

$$\eta_n = \frac{P_n}{I_n.V_n} \qquad (31)$$

يوضح الشكل (4) المخطط البياني لإنشاء المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحرك ذي التهييج المستقل أو التفرعي.



الشكل (4)

4-2- إنشاء المميزات الاصطناعية :

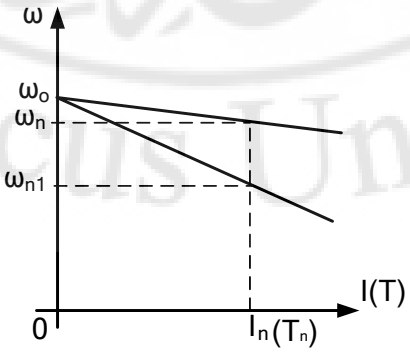
يمكننا إنشاء المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية الاصطناعية بإيجاد نقطتين كما ذكرنا أعلاه، وتكون النقطة الأولى المقابلة لسرعة اللاحمل (ω_0)، حيث يكون $(I=o)$، $(T=o)$. أما النقطة الثانية فيمكننا إيجادها عند الحمل الاسمي، أي من أجل $(I=I_n)$, $(T=T_n)$ حيث تكون السرعة على المميزات الطبيعية مساوية السرعة الاسمية، التي تساوي باعتمادنا على العلاقة (25).

$$\omega_n=\omega_0\left(\frac{V_n-I_n.R_a}{V_n}\right) \qquad (32)$$

أما السرعة على المميزات الاصطناعية من أجل $(I=I_n)$, $(T=T_n)$فتساوي من العلاقة (32-6) بعد إضافة قيم (R_r) إلى (R_a) كمايلي:

$$\omega_{nr}=\omega_0\left[1-\frac{I_n.(R_a+R_r)}{V_n}\right] \qquad (33)$$

يبين الشكل (4-a) المخطط البياني لإنشاء المميزات الكهروميكانيكية الاصطناعية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية.



الشكل (4-a)

4-3- تطبيق :

لدينا مروحة كهربائية صناعية تقاد بوساطة محرك تيار مستمر ي التهييج المستقل، ويملك المواصفات الاسمية التالية:

$$P_n = 65(kW); V_n = 440(V); I_n = 168(A); n_n = 1480(r.p.m)$$

أما معادلة المميزات الميكانيكية للمروحة فتساوي:

$$T_f = 49 + 343\left(\frac{\omega}{\omega_{nf}}\right)^2 \quad (N.m)$$

حيث أن السرعة الاسمية للمروحة تساوي :

$$n_{nf} = 1500(r.p.m)$$

المطلوب :

تعيين السرعة التي تدور عليها المروحة على المميزات الطبيعية للمحرك، والسرعة التي تدور عليها إذا أضفنا إلى دارة المتحرض مقاومة خارجية تساوي:

$$R_r = 0.6\Omega$$

الحل :

ننشئ أولاً المميزات الميكانيكية الطبيعية والاصطناعية للمحرك.

السرعة الزاوية الاسمية :

$$\omega_n = \frac{2\pi.n_n}{60} = \frac{2\times\pi\times1480}{60} = 155 rad/\sec$$

المردود الاسمي :

$$\eta_n = \frac{P_n}{\omega_n \times I_n} = \frac{65\times10^3}{440\times168} = 0.877$$

المقاومة الفعالة لملف المتحرض :

$$R_a = 0.5\frac{V_n}{I_n}(1-\eta_n) = 0.5\frac{440}{168}(1-0.877) = 0.158\Omega$$

سرعة اللاحمل الزاوية :

$$\omega_0 = \omega_n \frac{V_n}{V_n - I_n \times R_a} = 155\frac{440}{440-168\times0.158} = 165 rad/\sec$$

العزم الاسمي :

$$T = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{65\times10^3}{155} = 419.4(N.m)$$

وهكذا نكون قد حددنا نقطتين من نقاط المميزة الطبيعية ذات الإحداثيات: $(\omega_0,0)$ و (ω_n,T_n).

وبوساطتهما ننشئ المميزة الطبيعية للمحرك.

<u>المميزات الاصطناعية :</u>

نحسب قيمة السرعة الزاوية على المميزات الاصطناعية الموافقة للحمل الاسمي (T_n)، وذلك من أجل $(Rr = 0.6)$.

$$\omega_{nr} = \omega_0\left[1 - \frac{I_n(R_a - R_r)}{V_n}\right] = 165\left[1 - \frac{168(0.158 + 0.6)}{440}\right] = 117 rad/\sec$$

وهكذا يمكننا إنشاء المميزة الاصطناعية للمحرك بعد أن حددنا إحداثيات النقطة (ω_{nr}, T_n) إضافة إلى النقطة $(\omega_0, 0)$.

المميزات الميكانيكية للمروحة :

لدينا معادلة المميزات الميكانيكية للمروحة والتي تساوي :

$$T_f = 49 + 343\left(\frac{\omega}{\omega_{nf}}\right)^2$$

حيث:

$$\omega_{nf} = \frac{2\pi . n_{nf}}{60} = \frac{2 \times \pi \times 1500}{60} = 157 rad/\sec$$

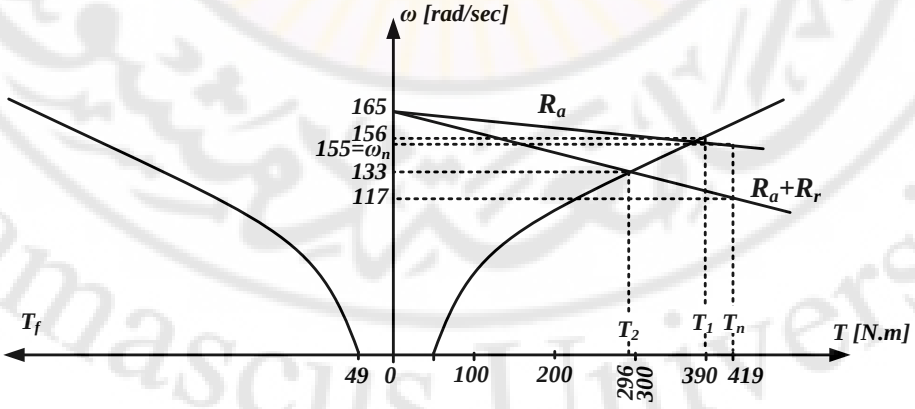
وبالتعويض نجد :

$$T_f = 49 + 0.0139\omega^2$$

نحسب العلاقة $T_f = f(\omega)$ من أجل عدة نقاط ونرتب النتائج في الجدول التالي:

ω	0	78	117	155	165	Rad/sec
T_f	49	130	236	379	423	N.m

ننشئ على المخطط البياني المميزات الميكانيكية للمروحة في الربع الثاني،ونرسم المميزات المناظرة لها في الربع الأول. ونحدد نقطتي تقاطع هذه المميزات الطبيعية والاصطناعية للمحرك والتي تبين السرعة التي تدور عليها المروحة في كلتا الحالتين. كما هو مبين في الشكل (5).



الشكل (5)

قيادة الإقلاع لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل أو التفرعية:

Starting of Shunt Wound D.c Motors

1-تمهيد:

عندما نطبق جهد التغذية على محرك التيار المستمر ذي التهييج المستقل أو التفرعي، فإن قيمة التيار المار عند الإقلاع يمكن تحديدها استناداً إلى المعادلة (1) مع الأخذ بعين الاعتبار أن $E_a = 0$ وذلك لأن المحرك يكون واقفاً، وبالتالي يصبح التيار مساوياً:

$$I_{sc} = \frac{V}{R_a} \qquad (34)$$

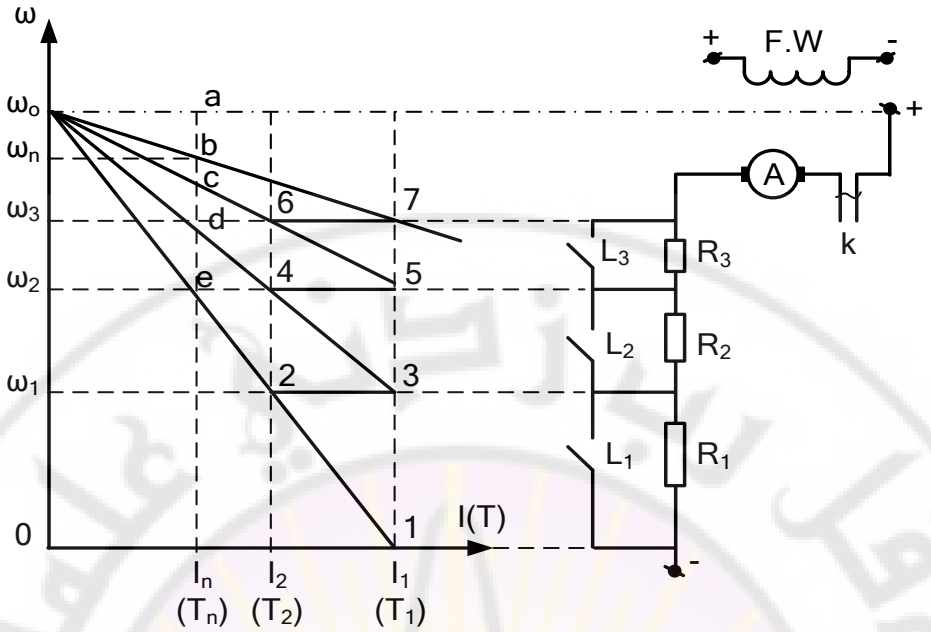
وهو يساوي تيار دارة قصر المتحرض (I_{sc})، وبما أن مقاومة المتحرض (R_a) ذات مقاومة صغيرة جداً، لذا عند وصل المحرك مباشرة مع الشبكة فإننا نلاحظ أن تيار الإقلاع والذي يساوي تيار الدارة القصيرة في هذه الحالة يكون كبيراً جداً بالمقارنة مع التيار الاسمي للمحرك، وتتراوح قيمته بين عشرين ضعفاً وخمسين ضعفاً من التيار الاسمي:

$$I_{st} = I_{sc} = (20-50)I_n$$

إن مثل هذه القيمة الكبيرة لتيار الإقلاع لا تتلاءم مع الشروط الحرارية لعمل المحرك، وبالتالي لا يسمح للتيار المار في المحرك أن يتجاوز القيمة الحدية التي تخل بالشروط الحرارية لعمل المحرك، والتي يجب أن لا تزيد عن ضعفين إلى ضعفين ونصف الضعف قيمة التيار الاسمي.

لذلك لابد من إضافة مقاومة خارجية تحد من قيمة تيار دارة المتحرض عند الإقلاع وتسمى مقاومة الإقلاع (R_{st}) حيث تتصل على التسلسل مع ملف المتحرض وتقسم إلى عدة أجزاء، كما هو مبين على الشكل (6)، حيث يتم إخراجها على مراحل تتحدد قيمتها حسابياً بالطرق البيانية أو التحليلية الرياضية، بحيث يحقق المحرك الشروط الحرارية المطلوبة لعمله ويستجيب لمتطلبات التحكم الآلي لهذه المحركات.

تصنع هذه المقاومات (الريوستات) من أسلاك معدنية، وتستهلك قدرة كهربائية نتيجة مرور التيار فيها لذا فهي تحتاج إلى عملية تبريد ويتم ذلك إما بالهواء أو بالزيت .



الشكل (6)

يبين الجزء الأيسر من الشكل (6) المخطط البياني للميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحرك ذي التهييج المستقل أثناء إقلاعه على ثلاث مراحل . حيث يتم اختيار قيمة المقاومة الكلية للإقلاع $(R_{st} = R_1 + R_2 + R_3)$، بشكل أن تكون قيمة تيار الإقلاع الأعظمي (I_1) محققة للشروط الحرارية ولا تتجاوز عادة : $(2 \div 2.5)I_n$ ويجري اختيار قيمة التيار (I_2)الذي يتم عنده الانتقال إلى المرحلة التالية من مراحل الإقلاع بصورة تحليلية طبقاً لعدد مراحل الإقلاع المطلوبة وتحدد على المخطط البياني قيمة (I_2) بالطريقة التجريبية . وعادة تكون قيمة (T_2) أكبر بـ $(10-25)\%$ من العزم المقاوم للآلية.

وتعد الطرق البيانية لحساب إقلاع المحركات الكهربائية أبسط من الطرق التحليلية وأكثر إيضاحاً كما سنرى لاحقاً.

إن عملية الإقلاع تبتدئ بإغلاق تلامسه القاطع (K)وبوجود مقاومات الإقلاع $(R_1 + R_2 + R_3)$ حيث تكون القواطع $(L_1 + L_2 + L_3)$مفتوحة، وكما هو مبين على الشكل (6) فإن المحرك يقلع على المميزة الاصطناعية أو الريوستاتية لهذه الحالة بدءاً من النقطة ذات السرعة $(\omega = 0)$والتيار $(I = I_1)$وعندما تصل سرعة المحرك إلى القيمة (ω_1) تصبح قيمة التيار مساوية I_2والتي تساوي في هذه الحالة :

$$I_2 = \frac{V - C.\omega_1}{R_a + R_1 + R_2 + R_3} \qquad (35)$$

عند ذلك يتم إغلاق تلامسه القاطع أو المرحلة (الزاجلة) التي تقصر المقاومة (R_1). في هذه الحالة تبقى السرعة مساوية (ω_1) بينما تصبح قيمة التيار مساوية (I_1) والتي تساوي :

$$I_1 = \frac{V - C.\omega_1}{R_a + R_2 + R_3} \qquad (36)$$

حيث ينتقل المحرك إلى العمل على المميزة الكهروميكانيكية الاصطناعية الموافقة للمرحلة الثانية من الإقلاع، وعندما تصل سرعة المحرك إلى القيمة (ω_2) تصبح قيمة التيار مساوية(I_3) التي تساوي :

$$I_2 = \frac{V - C.\omega_2}{R_a + R_2 + R_3} \qquad (37)$$

عند ذلك يتم إغلاق تلامسه الزاجلة (L_2)، التي تقصر المقاومة (R_2) وتقفز قيمة التيار إلى (I_1) الذي يساوي :

$$I_1 = \frac{V - C.\omega_2}{R_a + R_3} \qquad (38)$$

حيث ينتقل المحرك إلى العمل على المميزة الكهروميكانيكية الاصطناعية الموافقة للمرحلة الثالثة من الإقلاع، وعندما تصل سرعة المحرك إلى القيمة (ω_3) تصبح قيمة التيار مساوية(I_2) التي تساوي :

$$I_2 = \frac{V - C.\omega_3}{R_a + R_3} \qquad (39)$$

وعندها يتم إغلاق تلامسه المرحلة (الزاجلة) L_3 التي تقصر المقاومة (R_3) وبالتالي تخرج مقاومة الإقلاع كلية من الدار وبكامل أجزائها (مراحلها) حيث تقفز قيمة التيار إلى (I_1) والتي تساوي :

$$I_1 = \frac{V - C.\omega_3}{R_a} \qquad (40)$$

وينتقل المحرك إلى العمل على المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية، ويستمر في الإقلاع حتى تستقر سرعته عند النقطة الموافقة لتيار الحمولة (I_L)أو (I_s).

يساوي في الحالة المبينة في الشكل (6) التيار الاسمي (I_n).

2- حساب مقاومة الإقلاع ودرجاتها :

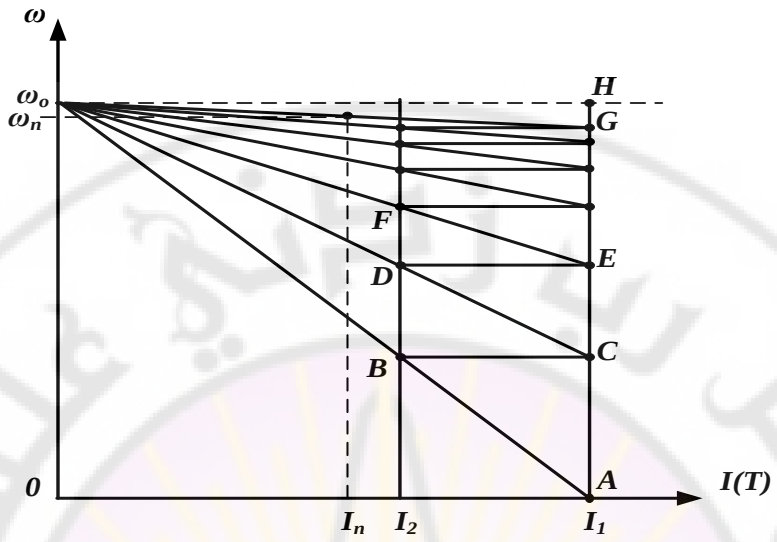
لحساب مقاومة الإقلاع وتدريجاتها لمحرك تيار مستمر ذي التهييج المستقل أو التفرعي نتبع الخطوات التالية:

1 -نرسم منحني المميزة الطبيعية للمحرك $\omega = f(I)$ بمعرفة معطياته الاسمية أو قراءتها من النشرة الفنية الخاصة بالمحرك.

2 -نختار قيمتي التيار العظمى والصغرى للإقلاع حسب الشرطين السابقين، حيث يتأرجح تيار الإقلاع بينما.

3 -نرسم منحني المميزة الاصطناعية المقابلة لحالة إدخال مقاومة الإقلاع بكاملها في الدارة الكهربائية لدائر المحرك، والذي يمر من النقطة (ω_0)ومن النقطة (A) على محور الفواصل (محور التيار أو العزم المقابل للتيار الأعظمي للإقلاع: $I_1 = (I_{st})_{\max}$ ، تكون مقاومة دارة المتحرض الكلية في هذه الحالة مساوية مجموع مقاومة الإقلاع (R_{st})ومقاومة ملف المتحرض الداخلية (R_a). يمر هذا المنحني الاصطناعي الأول إذا بالنقطتين: $(\omega_0,0)$، $(0,I_1)$، انظر الشكل (7). وعند بدء الإقلاع وذلك بعد وصل المحرك بشبكة التغذية الكهربائية، فإن المحرك سيبدأ بالدوران وتزداد سرعته تدريجياً وتنقص قيمة التيار. تتبع تيارات السرعة والتيار القسم (AB) من المنحني الاصطناعي الأول. عند الوصول إلى السرعة الموافقة للنقطة (B)، فإنه لابد من إنقاص قيمة المقاومة كي لا تقل قيمة التيار عن الحد: $I_2 = (I_{st})_{\min}$ ويتم ذلك إما يدوياً أو آلياً.

عند قصر الدرجة الأولى من مقاومة الإقلاع يقفز عمل المحرك إلى منحنى اصطناعي جديد يمر من النقطة (C) المقابلة لقيمة التيار الأعظمي (I_1) ودون أن تتخطاه .



الشكل (7)

4 –نرسم منحني المميزة الاصطناعية الجديد الذي يمر من النقطة (C) ، والتي يتم تحديدها بإمرار مستقيم أفقي من النقطة (B) فيقطع الخط: $I_1 = const$ في تلك النقطة. وتكون المقاومة في هذه الحالة قد نقصت درجة واحدة (مرحلة إقلاع واحدة)، ولتكن قيمة الدرجة من المقاومة المخرجة من الدارة (R_1). يتابع المحرك سرعة دورانه وفقاً للمنحني الاصطناعي الثاني، حتى تصل سرعته إلى النقطة (D)، وهنا وكما في الحالة السابقة ينبغي إخراج درجة أخرى من المقاومة، حيث يتم الانتقال إلى منحن آخر جديد وهكذا دواليك حتى تصل إلى النقطة (G) من المنحني الطبيعي ومن ثم إلى نقطة العمل الاسمية.

5 –نستخدم الطريقة الهندسية لتعيين مقاومة الإقلاع ودرجاتها $(R_1, R_2, R_3, ...R_n)$ ، إذ أن الطول (AH) يتناسب مع المقاومة الكلية لدارة المتحرض $(R_a + R_{st})$، كما أن الطول (AC) يتناسب مع مرحلة الإقلاع الأولى (R_1)وكلك (CE) يتناسب مع مرحلة الإقلاع الثانية (R_2)وهكذا .... وأخيراً يتناسب الطول (GH) مع مقاومة المتحرض (R_a).

لتعليل هذا التناسب نرجع إلى المميزة الاصطناعية الأولى للمحرك.

$$\omega = \omega_0 - I_a \frac{Ra + R_{st}}{C_m.\phi} \qquad (41)$$

فعند ثبات الفيض المغناطيسي المتحرض يكون الفرق $(\omega_0 - \omega)$ متناسباً مع $(R_a + R_{st})$، حيث يكون الفيض في المحرك ذي التهييج المستقل أو التفرعي ثابتاً ، فإذا أخذنا بثبات تيار المتحرض $I_a = I_1 = cte$ فإن الطول (AH) سيكون مساوياً الفرق بين السرعتين $(\omega_0 - \omega)$ ، أي يتناسب مع المقاومة الكلية $(R_a + R_{st})$. وبالمحاكمة نفسها يمكن البرهان على تناسب الأطوال مع قيم الدرجات المناسبة.

نحسب أولاً مقاومة الإقلاع (R_{st})وذلك من معادلة توتر المحرك المقابل للمنحني الاصطناعي المار من النقطة (A)، فيكون لدينا :

$$V = E_a + I_n(R_a + R_{st}) \qquad (42)$$

فعند بدء الإقلاع يكون $(w=0)$وبالتالي $(E_a=0)$ ويكون تيار المتحرض مساوياً القيمة العظمى المختارة له $(I_{st})_{\max}$، من ذلك نحصل على :

$$R_a + R_{st} = \frac{V}{I_1} \qquad (43)$$

ومنها يمكن حساب مقاومة الإقلاع الكلية :

$$R_{st} = \frac{V}{I_1} - R_a \qquad (44)$$

انطلاقاً من قيمة المقاومة الكلية لدارة المتحرض $(R_a + R_{st})$المحسوبة أو لقيمة مقاومة المتحرض الداخلية (R_a) يمكن حساب جميع درجات مقاومة الإقلاع مستعينين بالتناسب المذكور، نكتب :

$$\frac{R_a + R_{st}}{\overline{AH}} = \frac{R_1}{\overline{AC}} = \frac{R_2}{\overline{CE}} = \ldots\ldots = \frac{R_a}{\overline{GH}} \qquad (45)$$

وبقياس كل من الطولين (AC)و (AH أو GH) هندسياً يمكن إيجاد قيمة الدرجة R_1 :

$$R_1 = (R_a + R_{st})\frac{\overline{AC}}{\overline{AH}} = R_a\frac{\overline{AC}}{\overline{GH}} \qquad (46)$$

وبالطريقة نفسها ، نجد:

$$R_2 = (R_a + R_{st})\frac{\overline{CE}}{\overline{AH}} = R_a\frac{\overline{CH}}{\overline{GH}} \qquad (47)$$

وهكذا دواليك ....

قد لا تنطبق (G) على المنحني الطبيعي وعلى الخط $(I_1 = const)$ عند القفز من المنحني الاصطناعي الأخير إلى المنحني الطبيعي، وفي مثل هذه الحالة لابد من تغيير قيمة (I_1)و (I_2)بحيث تبقيان ضمن المجالات المحددة، وإعادة رسم المنحنيات ثانية. قد لا تصيب فنضطر إلى المحاولة من جديد.

يمكن إيجاد علاقة تربط بين عدد درجات المقاومة (m)والقيم (I_1)، (I_2)بحيث إذا حددنا اثنتين منها أمكن حساب القيمة الثالثة. وبشكل تقع معه النقطة (G) على المنحني الطبيعي وكذلك على المستقيم $(I_1 = const)$حتماً . نفترض دوماً ، أنه عند الانتقال من منحن إلى آخر تظل السرعة ثابتة، وبالتالي تظل القوة المحركة الكهربائية للمحرك واحدة أيضاً .

بما أن السرعة عند النقطتين (B) ، (C) هي نفسها ، فيمكننا أن نكتب :

$$E_B = E_C$$
$$V - I_2.(R_a + R_{st}) = V - I_1(R_a + R_{st} - R_1) \qquad (48)$$

ومنه نجد :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a + R_{st} - R_1}{R_a + R_{st}} \qquad (49)$$

وبالطريقة نفسها نجد أيضاً :

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{R_a+R_{st}-R_1-R_2}{R_a+R_{st}-R_1} \qquad (50)$$

وهكذا حتى نصل أخيراً إلى العلاقة بعد (m) مرة :

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{R_a}{R_a+R_{st}-R_1-R_2....R_{m-1}} \qquad (51)$$

وبضرب العلاقات السابقة التي عددها (m) طرفاً بطرف، نجد :

$$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^m=\frac{R_a}{R_a+R_{st}} \qquad (52)$$

أو بالشكل التالي :

$$I_2=I_1\sqrt[m]{\frac{R_a}{R_a+R_{st}}} \qquad (53)$$

باختيار (I_1) نوجد (R_{st}) حسب العلاقة (44-6)، وباختيار عدد درجات المقاومة (m) نحسب قيمة (I_2) من العلاقة (53)، وتكون مقبولة إذا وقعت ضمن المجال المحدد لها، ولا يجب اختيار عدد درجات (m) جديدة وهكذا .

كما يمكن حساب عدد عوامل (m) باعتماد قيمتين مناسبتين لكل من (I_1)، (I_2) حسب الشروط المحدد لهما والمنوه عنا سابقاً استناداً إلى العلاقة(52)، وذلك بأخذ لوغاريتم طرفيها، فنحصل على:

$$m=\frac{I_g\left[\frac{R_a+R_{st}}{R_a}\right]}{I_g\left[\frac{I_1}{I_2}\right]} \qquad (54)$$

3- تطبيق :

احسب مقاومة الإقلاع ودرجاتها لمحرك تيار مستمر تفرعي، إذا كان محملاً بحمولته الاسمية على أن لا يزيد تيار الإقلاع على القيمة الأعظمية $(I_1=2I_n)$. المواصفات الفنية الاسمية للمحرك :

$$P_n=15kW\ ;V_n=220V\ ;I_n=83A\ ;n_n=770(r.p.m)R_a=0.328\Omega$$

الحل :

القيمة العظمى لتيار الإقلاع :

$$I_1=2I_n=2\times83=166\ \text{A}$$

مقاومة الإقلاع :

$$R_{st}=\frac{V}{I_1}-R_a=\frac{220}{166}-0.328=1\Omega$$

نختار عدد درجات مقاومة الإقلاع $(m=3)$ونحسب التيار الأصغري للإقلاع .

$$I_2=I_1\sqrt[m]{\frac{R_a}{R_a+R_{st}}}=166\sqrt[3]{\frac{0.328}{1.328}}=104A$$

نحسب النسبة :

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{104}{83}=1.25$$

حيث يقع التيار الأصغري للإقلاع ضمن المجال المحدد له .

الآن وبعد معرفة المقاومة (R_{st}) تحسب درجاتها بإتباع الخطوات المنوه عنها :

1 –نحسب سرعة المحرك على فراغ باستخدام العلاقة المعروفة .

$$n_0=n_n\frac{V}{V-I_n.R_a}=770\frac{220}{220-83\times0.328}=878(r.p.m)$$

نرسم المنحني المميز الطبيعي للمحرك بمعرفة النقطتين :

$$I_a=0\ ;n=n_0=878(r.p.m)$$

$$I_a=I_n=83A;n_n=770(r.p.m)$$

2 - نرسم المنحنى الاصطناعي الحدي الذي يمر من النقطتين : $I_a=0\ ;n=n_0=878(r.p.m)$

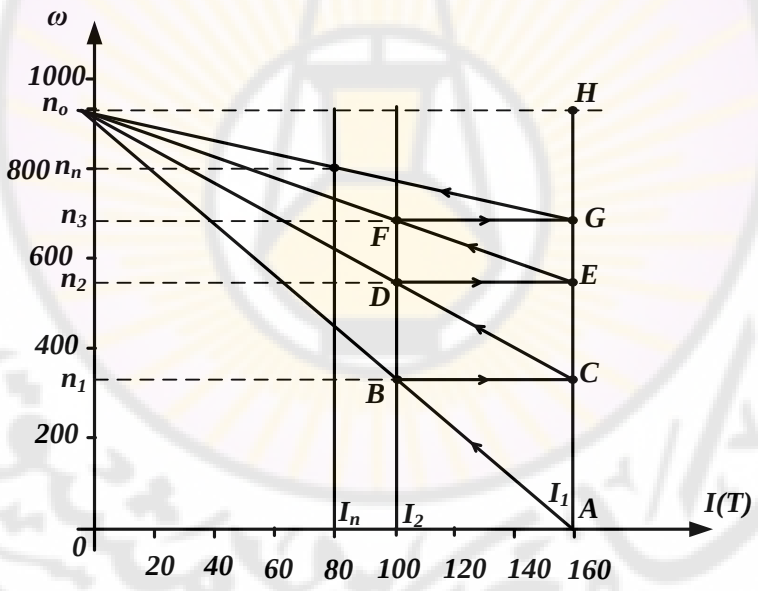
$$I_a=I_1=166A;n=0$$

3 نحدد الخطين :

$$I_a=I_2=const=104A$$

$$I_a=I_1=const=166A$$

ونرسم بقية المنحنيات الاصطناعية ، كما هو مبين على الشكل (8) .



الشكل (8)

4 –نحسب درجات مقاومة الإقلاع كونها متناسبة مع قيم سرعة أو مع الأطوال الموافقة للخط: $(I_1=const)$.

$$R_1=(R_a+R_{st})\frac{\overline{AC}}{\overline{AH}}=1.328\times0.375=0.496\Omega$$

$$R_2=(R_a+R_{st})\frac{\overline{CE}}{\overline{AH}}=1.328\times0.236=0.313\Omega$$

$$R_3=(R_a+R_{st})\frac{\overline{EG}}{\overline{AH}}=R_{st}-(R_1+R_2)=0.191\Omega$$

هذا ويمكن حساب قيمة الدرجة الأولى لمقاومة الإقلاع تحليلياً من العلاقة (49) :

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{R_a+R_{st}-R_1}{R_a+R_{st}}\rightarrow R_2=R_a+R_{st}-R_1-\frac{I_2}{I_1}\left(R_a+R_{st}-R_2\right)$$

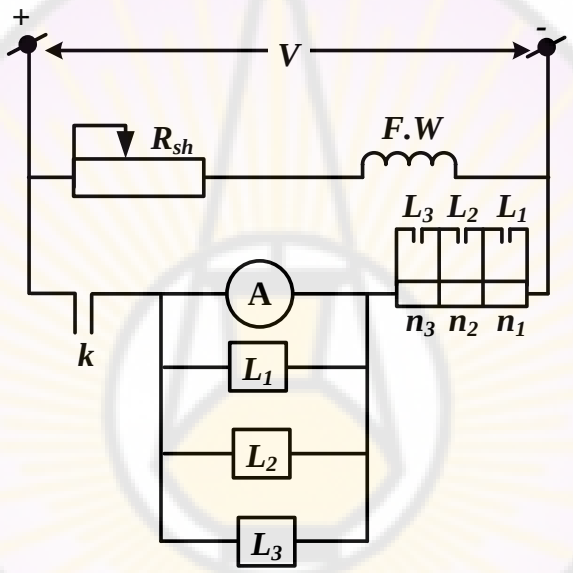
$$=1.328-0.498-\frac{104}{166}\left(1.328\right)=0.498\Omega$$

والدرجة الثانية من الإقلاع من العلاقة (50) :

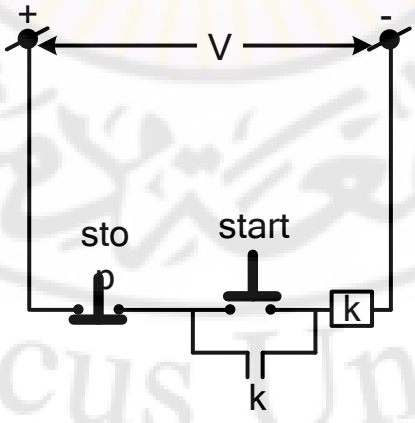
$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{R_a+R_{st}-R_1-R_2}{R_a+R_{st}-R_1}\rightarrow R_2=R_a+R_{st}-R_1-\frac{I_2}{I_1}\left(R_a+R_{st}-R_2\right)$$

$$=1.328-0.498-\frac{104}{166}\left(1.328-0.498\right)=0.314\Omega$$

4- الدارة التحكمية المبسطة لإقلاع محركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية :



(a)



(b)

الشكل (9)

يبين الشكل (9) إحدى دارات التحكم الآلي لإقلاع محرك تيار مستمر تفرعي على ثلاث مراحل، ومن الجدير بالذكر أن المقاومات (R_1).(R_2).(R_3)يتم حسابها حسب الفقرة السابقة بيانياً أو تحليلياً، لكي يتم

الإقلاع وفق المميزات المبينة على الشكل (8) وبالتالي يتم اختيار الحواكم $(L_1).(L_2).(L_3)$وتعييرها بحيث تعمل عند قيم محددة لسرعة المحرك تتوافق ومراحل الإقلاع، لذا تسمى الدارة التحكمية المبينة في الشكل (9) دارة التحكم الآلي لإقلاع محركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل أو التفرعية بتابع السرعة .

عندما تبلغ سرعة المحرك القيمة التي توافق نهاية المرحلة الأولى للإقلاع، تصبح قيمة القوة المحركة الكهربائية المتولدة على طرفي المتحرض مساوية :

$$E_1 = C.\omega_1$$

وعندما تعمل الحاكمة (L_1)التي تجذب تلامسها (L_1)في الدارة الرئيسة حيث تقصر المقاومة(R_1)وبالتالي يتم الانتقال إلى المرحلة الثانية للإقلاع تليها المرحلة الثالثة ، وهكذا .

أما الدارة المساعدة فيتم بوساطتها وصل المتحرض إلى شبكة التغذية عن طريق ضغطنا على زر الإقلاع (START) حيث يمر التيار الكهربائي عبر القاطع (K) وبالتالي يعمل تلامسه (K) في الدارة الرئيسة على وصل المتحرض إلى شبكة التغذية الكهربائية .

ويعمل التلامس الآخر (K) في الدارة المساعدة على قصر زر الإقلاع حيث لا تتأثر دارة القاطع (K) عند إزالة ضغطنا على هذا الزر .

ولإيقاف المحرك يكفي أن نضغط على زر الإيقاف (STOP) وبالتالي يتم فصل دارة القاطع (K) ويفتح تلامسه (K) في الدارة الرئيسة التي تفصل المتحرض عن شبكة التغذية ونلاحظ هنا أن ملف التهييج يبقى دائماً متصلاً مع شبكة التغذية.

6 قيادة الكبح لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل أو التفرعية :

يلعب في الكثير من آلات الإنتاج الكبح أو الفرملة المترافقة مع عكس جهة الدوران دوراً كبيراً في تحقيق إنتاجية أكبر ودقة في العمل أفضل. ويظهر هذا بوضوح في الآلات ذات الإقلاع المتكرر، كما هو الحال في آلات قطع المعادن وآلات الدرفلة والجرافات ووسائط الجر الكهربائية المختلفة وهناك أمثلة أخرى على أنظمة الكبح والفرملة ، نذكر منها:

أ – ضرورة إيقاف المحرك بسرعة خلال فترة زمنية محددة.

ب– ضرورة تغيير سرعة دوران المحرك العالية إلى سرعة منخفضة.

ج – ضرورة الحد من سرعة تزايد سرعة دوران المتحرض عند ظهور عزم دوراني معاكس على محوره (مثلاً سير قاطرة كهربائية، هبوط ثقل في آلة رافعة .... الخ)، أي عندما يطبق على محور المحرك عزم دوراني وليس عزم مقاوم.

يمكن تحقيق كبح محركات التيار المستمر عن طريق الكوابح الميكانيكية أو كهربائياً باستخدام عزم المحرك نفسه وكما لاحظنا سابقاً من دراستنا للمميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية فإن مجال التشغيل ينحصر في الربع الأول حيث يعمل كمحرك. أما في حالات الفرملة والكبح فتكون المميزات في الربع الثاني أو الربع الرابع حيث يعمل كمولد، حيث تتحول الطاقة الكهربائية المتولدة على طرفيه إلى طاقة حرارية أو تعاد إلى شبكة التغذية الكهربائية.

يتميز محرك التيار المستمر ذو التهييج المستقل أو التفرعي بثلاث أنظمة للكبح وهي :

1 –نظام الكبح الديناميكي.

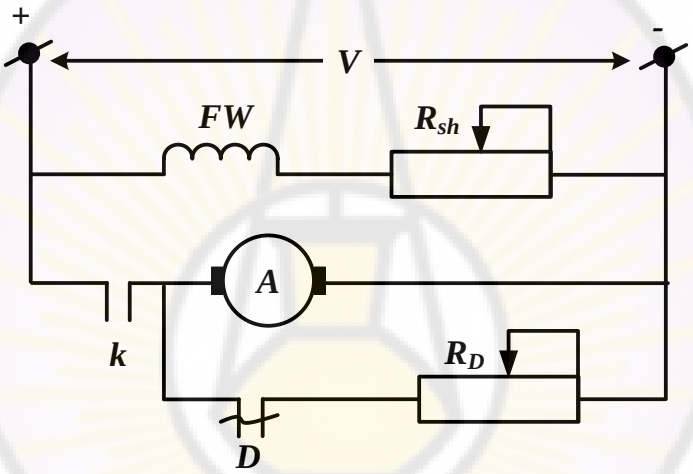
2 –نظام الكبح مع إعادة القدرة إلى شبكة التغذية الكهربائية.

3 –نظام الكبح على التضاد (عكس جهة الدوران) .

6-2- نظام الكبح الديناميكي : Dynamic Braking System

يتحقق الكبح الديناميكي عندما نفصل الدارة الرئيسة للمحرك عن شبكة التغذية ، ونقصر المتحرض عبر مقاومة معينة تسمى بمقاومة الكبح الديناميكي بينما يبقى ملف التهييج موصولاً على الشبكة، كما هو مبين في الشكل (10-6) .

إن الطاقة الميكانيكية المتشكلة على محور المحرك مثلاً، على شكل طاقة حركية تتحول على شكل طاقة كهربائية تتبدد على شكل طاقة حرارية في مقاومات دارة المتحرض .



الشكل (13) دارة قيادة الكبح الديناميكي للمحرك التفرعي

إن معادلة التوترات في دارة المتحرض للمحرك تساوي :

$$\left.\begin{aligned} V &= E_a + I.R_a \\ I &= \frac{V - E_a}{R_a} \end{aligned}\right\} \qquad (65)$$

وبعد فصل المتحرض عن الشبكة وقصره على المقاومة (RD) تصبح معادلة التوترات مساوية :

$$E_a + I(R_a + R_D) = 0 \qquad (66)$$

يساوي التيار المار في المتحرض في هذه الحالة (تيار الكبح الديناميكي : I D)

$$I = I_D = -\frac{E_a}{R_a + R_D} \qquad (67)$$

ونلاحظ من المعادلة (67) أن التيار المار في المتحرض يعكس اتجاهه ، ونلاحظ أيضاً ضرورة إضافة المقاومة (R D) التي تحدد من قيمة التيار (I D) بغية الحفاظ على الشروط الحرارية المطلوبة للمحرك .

أما معادلة المميزات الكهروميكانيكية لهذا المحرك في حالة الكبح الديناميكي، فيمكننا استنتاجها من المعادلة الموافقة لحالة عمله كمحرك في الربع الأول والتي تساوي :

$$w = \frac{V}{C} - \frac{I.R_a}{C} \qquad (68)$$

وذلك بعد أن نفترض (V = 0) وبالتالي تصبح معادلة المميزة الكهروميكانيكية على الشكل التالي :

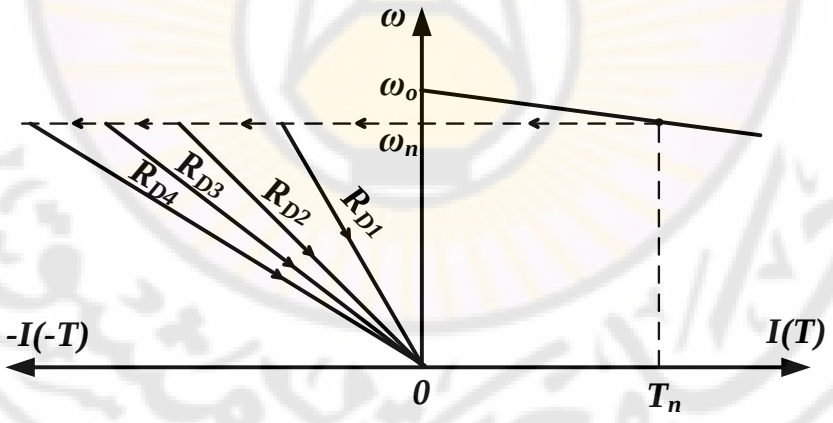
$$w = \frac{-I(R_a + R_D)}{C} \qquad (69)$$

وبطريقة مشابهة نستنتج معادلة المميزات الميكانيكية في حالة الكبح الديناميكي ، والتي تساوي :

$$w = \frac{-T(R_a + R_D)}{C^2} \qquad (70)$$

ويبين الشكل (14) المميزات الكهروميكانيكية في حالة الفرملة الديناميكية .

تستخدم حالة الكبح الديناميكية بصورة واسعة عندما يلزم أن يكون الكبح سريعاً ودقيقاً، حيث يطلب التوقف الكامل للمحرك. وكذلك يستخدم الكبح الديناميكي عندما نريد منع حادث طارئ في الآلة أو مع العاملين عليها ، أو لتجنب عطل مؤثر مباشرة في إنتاجية الآلة. ويعد الكبح الديناميكي اقتصادياً بشكل كافٍ، ولكنه ليس أكثر اقتصادية من الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة، والتي ستلي دراسته في الفقرة القادمة .



الشكل (14)

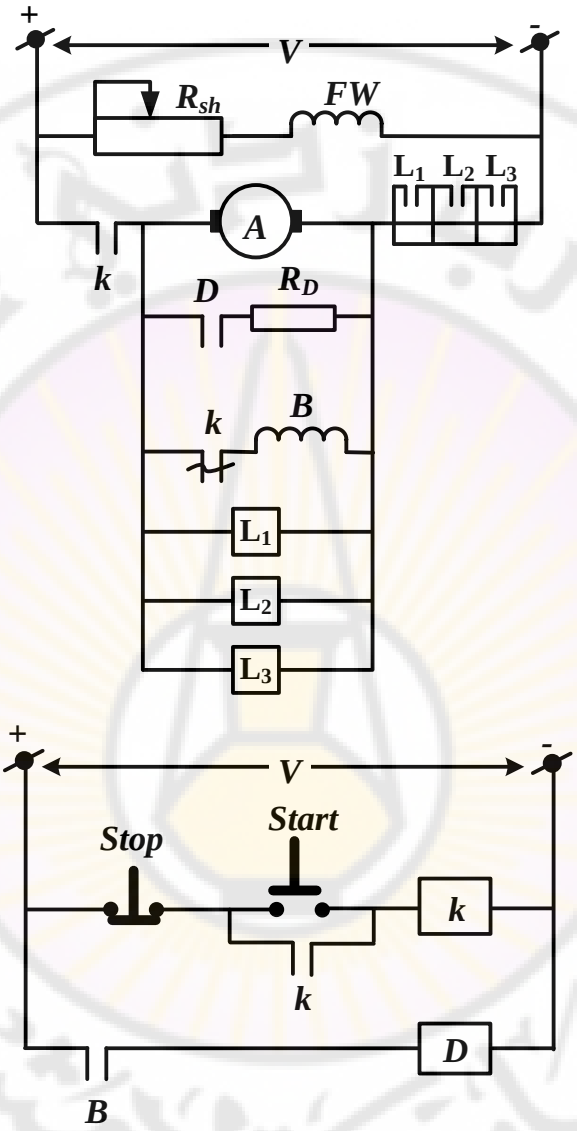
حيث :

$$R_{D_1} > R_{D_2} > R_{D_3} > R_{D_4}$$

الدارة التحكمية للكبح الديناميكي :

يبين الشكل (15) إحدى دارات الإقلاع والكبح الديناميكي لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية. يتحقق الكبح الديناميكي عند ضغطنا على زر الإيقاف (STOP) الذي يفصل المتحرض عن الشبكة بوساطة القاطع (K)، الذي يقوم بفتح تماسه الكائن في الدارة الرئيسة للمحرك. في حين يقوم بإغلاق تماسه الآخر، (K) دارة الحاكمة (B) حيث تعمل مباشرة ويصل تماسها (B) قاطع الكبح

الديناميكي (D) مع شبكة التغذية الكهربائية، وبالتالي يتم قصر المتحرض على مقاومة الكبح الديناميكي (RD) حتى يتوقف المحرك تماماً حيث تفصل الحاكمة (B) بوساطة تماسها دارة القاطع (D) وتحضر دارة المحرك إلى الإقلاع من جديد.



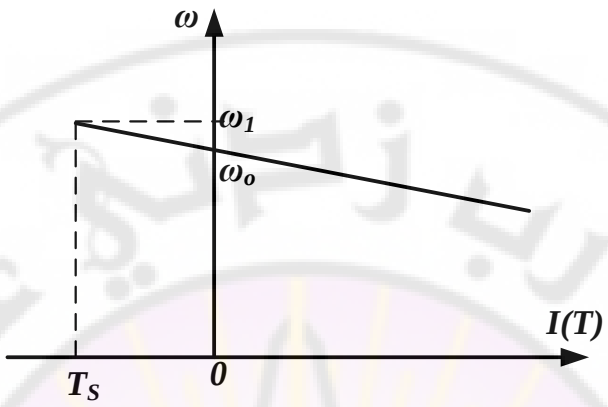
الشكل (15)

6-3- نظام الكبح مع إعادة القدرة إلى شبكة التغذية الكهربائية: Regenerative Braking System

تتحقق هذه الحالة من حالات الكبح عندما تصبح القوة المحركة الكهربائية المتولدة على طرفي المتحرض E_a أكبر من جهد الشبكة $(E_a > V)$.

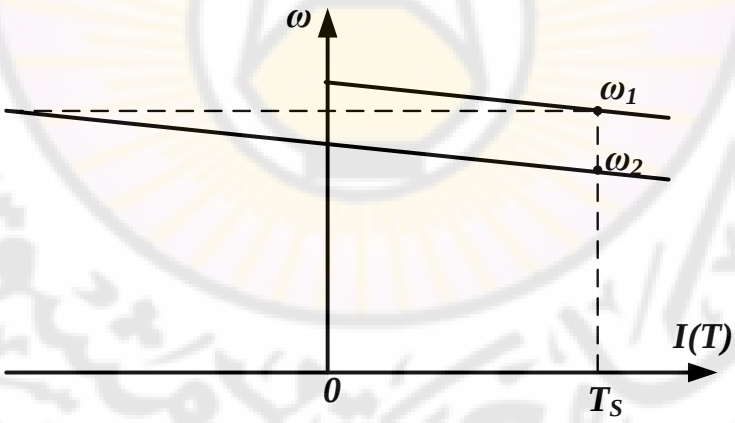
ويتحقق هذا الأمر عند زيادة سرعة المحرك حتى تصل إلى قيمة أكبر من قيمة سرعته في حالة اللاحمل w_0 ، حيث يعمل المحرك في هذه الحلة كمولد كأنه مربوط على التفرع مع شبكة التغذية الكهربائية ويقوم بإعطائها القدرة الكهربائية .

ويتحقق ذلك عملياً، في حلة إنزال حمل بحيث يساعد على إنشاء عزم دوراني على محور المحرك يفوق العزم الدوراني المتولد فيه وعندها يصبح العم الدوراني المتولد في المحرك عزمتً كابحاً، وكما يبين الشكل (13-6) فإن المحرك ينتقل على مميزاته في الربع الثاني.



الشكل (16)

كذلك يمكن تحقيق حالة الكبح مع إعادة القدرة إلى شبكة التغذية عندما يتم تخفيض سرعة المحرك الذي يقود آلة ما، تدور بسرعة معينة إلى سرعة أخفض، حيث ينتقل المحرك للعمل على امتداد مميزاته ذات السرعة الأخفض في الربع الثاني، ويعمل خلال الفترة الزمنية التي تسبق عودته إلى الربع الأول كمولد حيث يعيد الطاقة المتولدة إلى شبكة التغذية، ويبين الشكل (17) الطريق التي تسلكها مميزاته .



الشكل (17)

ونلاحظ في كلا المثالين أن التيار يعكس إشارته خلال الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة، وهذا يمكن استنتاجه من معادلة التوترات للمحرك حيث يكون في حالة العمل كمحرك.

$$I = \frac{V - E_a}{R_a} \qquad (71)$$

وبما أن Ea > V في حالة الكبح المذكور، فإن التيار يصبح مساوياً :

$$I = -\frac{E_a - V}{R_a} \qquad (72)$$

وبالتالي يغير العزم إشارته ويصبح مساوياً :

$$T = -C_m.\phi.I \qquad (73)$$

أما معادلة المميزات الكهروميكانيكية الموافقة لهذه الحالة فتساوي :

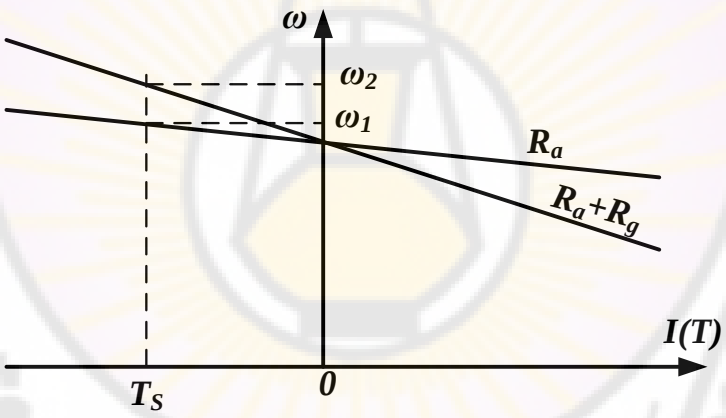
$$w = \frac{V}{C} + \frac{I.R_a}{C} \qquad (74)$$

ومعادلة المميزات الميكانيكية تساوي :

$$w = \frac{V}{C} + \frac{T.R_a}{C^2} \qquad (75)$$

إن طريقة الكبح هذه يمكن تحقيقها على سبيل المثال، في أنظمة القيادة الكهربائية لميكانيزمات الروافع ووسائل النقل الكهربائية عند إنزال الحمولات، وفي بعض حالات تنظيم السرعة عندما ينتقل المحرك للعمل على سرعة أخفض فإن السرعة سوف تمر في القيمة $(w > w_0)$.

إن الكبح مع إعادة القدرة إلى شبكة التغذية الكهربائية يعد اقتصادياً جداً، وذلك لأن المحرك يهمال الضياعات يعيد القدرة إلى الشبكة وذلك من شكلها الميكانيكي الناتج عن محوره. ولكن هذه الطريقة في الكبح قد تتحقق دوماً، نظراً لأنه ليس بإمكان جميع أجهزة التحريك أن تخضع للشرك $(w > w_0)$.



الشكل (18)

ومن الضروري الإشارة إلى أنه كلما كبرت قيمة المقاومة في دارة المتحرض للمحرك كبرت السرعة الزاوية في نظام العمل كمولد مربوط على التفرع مع الشبكة عند عزم الكبح (TS) نفسه .

ويمكن استنتاج المميزة في هذه الحالة استناداً إلى المعادلتين (74) , (75)

$$w = \frac{V}{C} + \frac{T(R_a + R_g)}{C^2} \qquad (76)$$

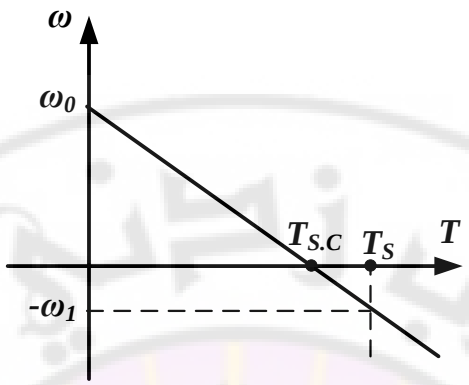
حيث :

R_g : مقاومة الكبح المضافة إلى دارة المتحرض في حالة العمل في نظام الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة.

ويبين الشكل (18) المميزة الميكانيكية للمحرك في حالة عمله في نظام الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة عند إضافة مقاومة خارجية (Rg) إلى دارة المتحرض.

6-4- نظام الكبح بالتوصيل على التضاد (بعكس اتجاه التيار):

عند انتقال المحرك الكهربائي للعمل في نظام الكبح على التضاد، فإنه يصبح كمولد كهربائي متصل على التسلسل مع شبكة التغذية الكهربائية .



الشكل (19)

وتتحقق حالة الكبح على التضاد عندما يدور المحرك بسرعة تعاكس اتجاه عزمه الدوراني، وذلك تحت تأثير عزم الحمولة أو بسبب القدرة الحركية الكامنة فيه. ويتحقق ذلك يصبح عزم دارة القصر $(T_{s.C})$ فيه أثناء عمله على مميزاته في الربع الأول أقل من عزم الحمولة المطبقة T_s على محوره. ويمكن تنفيذ هذه الحالة عملياً عندما يعمل المحرك على مميزاته الاصطناعية حيث تصبح لينة وذلك من أجل إنزال حمولات كبيرة بسرعات منخفضة، حيث تستقر سرعة المحرك على امتداد هذه المميزات في الربع الرابع، كما هو مبين على المخطط البياني في الشكل (19) .

ففي هذه الحالة يسعى المحرك لرفع الحمل المطبق على محور المحرك، بينما ينزل الحمل تحت تأثير عزم الحمولة بسرعة معاكسة لسرعة الدوران التي يسعى المحرك لتوليدها .

كذلك يمكن تحقيق حالة الكبح على التضاد عندما يقود المحرك الكهربائي آلة ميكانيكية ويديرها بسرعة معينة، ونقوم بتغيير إشارة جهد شبكة التغذية، ففي هذه الحالة تصبح إشارة (V) سالبة وينتقل المحرك للعمل على مميزاته كمحرك أيضاً ولكن في الربع الثالث كما هو مبين في الشكل (20). ولكن عطالة المحرك والآلة، والقدرة الحركية الكامنة فيما لا تسمح بالانتقال المفاجئ إلى العمل في الربع الثالث وإنما ينتقل المحرك إلى العمل على امتداد هذه المميزات في الربع الثاني، ثم تناقص سرعته بشكل سريع حتى تنتهي إلى قيمة كبيرة من الصفر حيث تقوم كوابح ميكانيكية خاصة بتثبيت المحرك في حالة الوقوف، فيما إذا رغبنا بذلك، وإلا فإن المحرك سيغير اتجاه دورانه حتى تستقر سرعته في الاتجاه المعاكس عند نقطة تقاطع عزم الحمولة مع المميزات الميكانيكية للمحرك في الربع الثالث.

ومن معادلة التوترات الكهربائية يصبح التيار مساوياً :

$$I = \frac{-V - E_a}{R_a} = -\frac{V + E_a}{R_a} \qquad (77)$$

ومن هذه المعادلة نلاحظ أن قيمة التيار تقفز فجأة وتصبح كبيرة بحيث تخالف الشروط الحرارية المطلوبة للمحرك، لذلك لابد من إدخال مقاومة خارجية إلى دارة المتحرض خلال الكبح على التضاد،

ويجب أن تكون ذات قيمة أكبر من قيمة مقاومة الإقلاع وتسمى مقاومة الكب على التضاد R_P ،
ويصبح التيار عندئذ مساوياً :

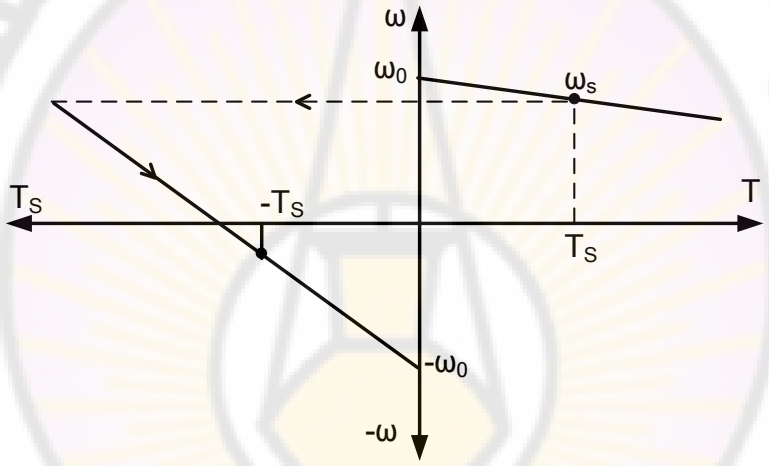
$$I_P = -\frac{V + E_a}{R_a + R_P} \qquad (78)$$

ومن العلاقة الأخيرة نلاحظ أن التيار يغير اتجاهه وتصبح معادلة المميزات الكهروميكانيكية مساوية :

$$w = -\frac{V}{C} + \frac{I.(R_a + R_P)}{C} \qquad (79)$$

أما معادلة المميزات الميكانيكية فتساوي :

$$w = -\frac{V}{C} + \frac{T.(R_a + R_P)}{C^2} \qquad (80)$$

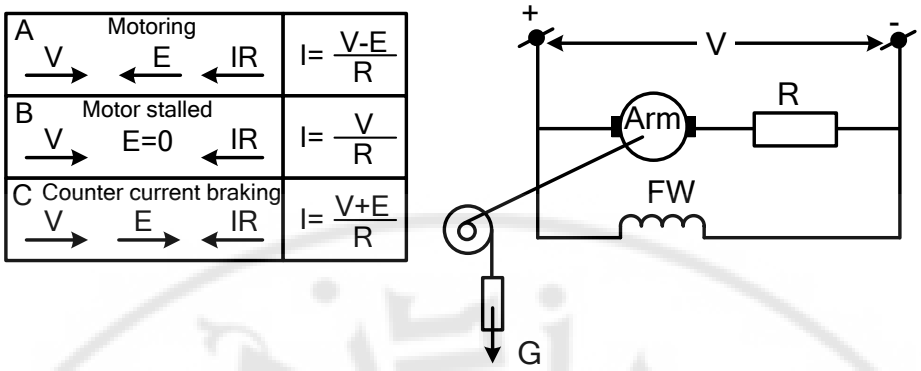


الشكل (20)

ويبين الشكل (21) مثالاً عملياً لرافعة تقوم بتنزيل أحمال (G) عند سرعة ثابتة لهبوط الحمل. ويبين الجدول المرفق في الشكل نفسه أسهم اتجاه القوة المحركة الكهربائية وهبوط الجهد، وكذلك العلاقة بين تيارات المتحرض في حالة عمل الآلة كمحرك وفي حالة عملها في نظام القصر وكذلك في حالة نظام الكبح من أجل قيمة واحدة (R) لمقاومة المتحرض .

حيث :

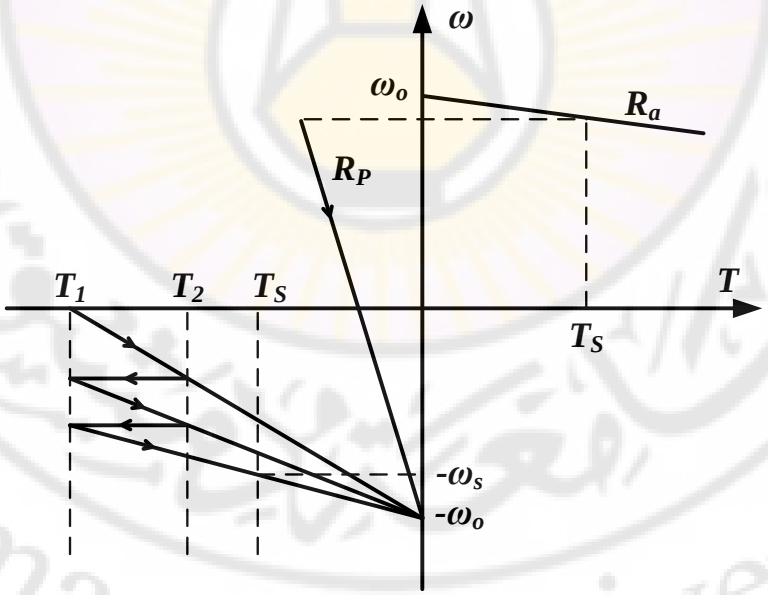
$$R = R_a + R_P$$



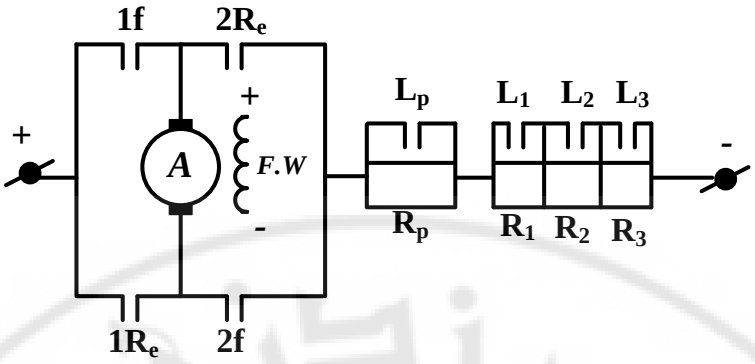
الشكل (21)

6- عكس جهة الدوران في محركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتفرعية :

يتم عكس جهة الدوران في هذه الحالة باستخدام حالة الكبح على التضاد حيث نقوم بعكس إشارة جهد التغذية وعندها ينتقل، المحرك للعمل على امتداد مميزاته في الربع الثاني كما بينا سابقاً. وعندما تصل سرعة المحرك إلى الصفر لا نسعى لإيقافه بوساطة كوابح خاصة، وإنما نتركه للإقلاع في الاتجاه المعاكس ويتم ذلك عادة بإضافة مقاومات خاصة لإقلاعه بعد قصر مقاومة الكبح على التضاد. ويبين الشكل (22) المخطط البياني لميزاته أثناء عكس دورانه على عدة مراحل للإقلاع بينما يبين الشكل (23) الدارة التحكمية المبدئية لتحقيق ذلك.



الشكل (22)



الشكل (23)

6-6- تطبيق أول:

لدينا محرك تيار مستمر ذي التهييج المستقل يملك الواصفات الاسمية التالية :

$$P_n = 32(KW); V_n = 220(V), I_n = 172(A),\ n_n = 1000(r.p.m)$$
$$R_a = 0.062(\Omega)$$

المطلوب :

1 -إنشاء المميزات الكهروميكانيكية الطبيعية .

2 -حساب قيمة المقاومة (R_D) التي يعمل عليها المحرك في حالة الكبح الديناميكي ، علماً بأن مميزاته الكهروميكانيكية تمر من النقطة الموافقة لتيار الكبح الديناميكي $(I_d = -I_n)$ والسرعة $(w_1 = 0.5w_n)$ مع إنشاء الميزات الموافقة لهذه الحالة.

3 -حساب قيمة المقاومة (R_P) التي تضاف إلى دارة المتحرض في حالة الكبح على التضاد، حيث يدور المحرك على سرعة تساوي (n = 600 r.p.m) عند تيار حمولة يساوي: (I_p = - 110 A) مع إنشاء المميزات الموافقة لهذه الحالة.

4 -حساب قيمة المقاومة (R_g) الواجب إضافتها إلى دارة المتحرض في حالة الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة، حيث يدور المحرك على سرعة (n= 1250 r.p,m)، عند تيار حمولة (I_g =- 172A) مع إنشاء الموافقة لهذه الحالة.

الحل :

1 -ننشئ أولاً المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية للمحرك وذلك بإتباع مايلي :

نحسب قيمة السرعة الزاوية الاسمية :

$$w_n = \frac{2.\pi.n}{60} = \frac{2.\pi.1000}{60} = 105(rad/\sec)$$

$$w_0 = w_n.\frac{V_n}{V_n - I_n.R_a} = 105 \times \frac{220}{220 - 172 \times 0.062} = 110(rad/\sec)$$

2 -نحسب قيمة المقاومة R_D :

من معادلة التيار في حالة الكبح الديناميكي :

$$I_D = -\frac{E_a}{R_a + R_D}$$

نستنتج :

$$R_D = \frac{E_1}{I_n} - R_a$$

حيث

$$I_d = -I_n$$

أما E_1 فتساوي :

$$E_1 = C.w_1$$

$$C = \frac{V_n}{w_0} = \frac{220}{100} = 2$$

$$E_1 = 0.5 \times 105 \times 2 = 105(V)$$

$$R_D = \frac{105}{172} - 0.062 = 0.55\Omega$$

ثم ننشئ المميزة الكهروميكانيكية كما هو مبين في الشكل حيث تمر في نقطتين ، الأولى نقطة الصفر، والثانية القطة ذات الإحداثيات :

$$w_1 = 0.5 \times 105 = 52.5(rad/\sec), I_d = -172(A)$$

3 – نحسب قيمة المقاومة R_P :

من معادلة التيار الموافقة لحالة الكبح على التضاد :

$$I_P = -\frac{V+E}{R_a + R_P}$$

$$110 = \frac{220 + E_2}{0.06 + R_P}$$

$$E_2 = C.w_2$$

$$w_2 = \frac{2\pi \times 600}{60} = 62.8(rad/\sec)$$

$$E_2 = 2 \times 62.8 = 125.6(V)$$

$$R_P = \frac{220 + 125.6}{110} - 0.062 = 3.08(\Omega)$$

ننشئ المميزات في حالة الكبح على التضاد والتي تمر من النقطة الموافقة لـ $(-w_0)$، والنقطة الموافقة لـ $(I = -110A)$، $(w_2 = 62.8rad\sec)$ كما هو مبين في الشكل (24) .

4 –نحسب قيمة المقاومة R_g بالمعادلة :

$$R_g = \frac{E_g - V}{I_n} - R_a$$

حيث :

$$E_g = C.w_g$$

$$w_g = \frac{2\pi \times 1250}{60} = 130.9$$

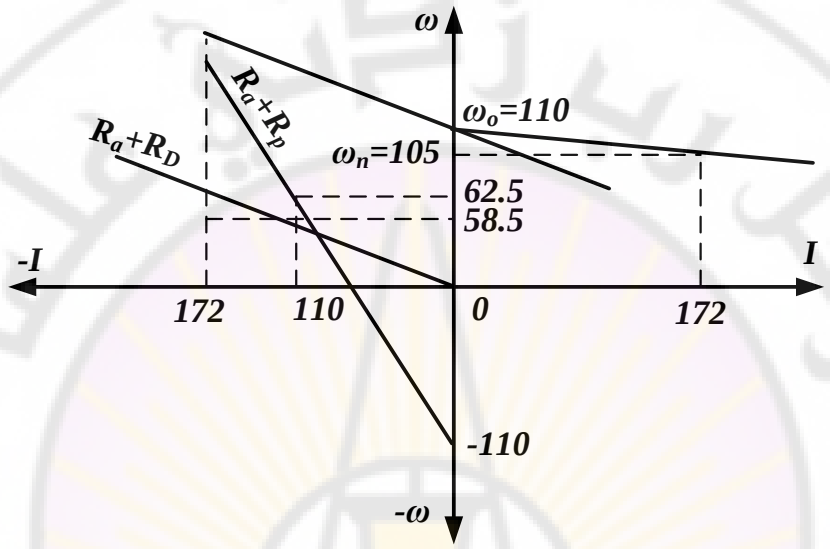
ومنه :

$$E_g = 2\times 130.9 = 261.8(V)$$

إذاً ، وبعد تعويض قيم E_g و V و I_n في معادلة R_g نجد :

$$R_g = 0.181(\Omega)$$

ثم نقوم بإنشاء المميزات الموافقة لهذه الحالة. والتي تمر من النقطة الموافقة لـ $(+w_0)$ ، والنقطة الموافقة لـ (I_g = -172) و(W_g = 130.9) ، كما هو مبين على الشكل (24).



الشكل (24)

6-7- تطبيق ثاني:

لدينا محرك تيار مستمر تفرعي يملك المواصفات الاسمية التالية :

$$P_n = 7.25(KW); V_n = 220(V), I_n = 38(A),\ n_n = 1000(r.p.m)$$

والمطلوب :

1) احسب مقاومة الكبح الديناميكي الواجب إضافتها في دارة المتحرض، وكذلك العزم المقاوم الناتج على محور المحرك، وذلك عند السرعة $n_D = 500(r.p.m)$ الموافقة لتيار الحمولة الاسمية للمحرك.

2) حدد في حالة كبح هذا المحرك على التضاد (بعكس التيار) وعند السرعة $n_P = 600(r.p.m)$ والموافقة لتيار المتحرض 25(A) كل من: المقاوم المضافة إلى دارة المتحرض والعزم الناتج على محور المحرك، وحدد كل من القدرة المستجرة من منبع التغذية الكهربائية، والقدرة الناتجة (المأخوذة) على محور المحرك (وذلك بإهمال ضياعات اللاحمل)، وكذلك حدد الاستطاعة الضائعة في مقاومات دارة المتحرض.

3) حدد في حالة كبح المحرك مع إعادة القدرة إلى الشبكة سرعة دوران هذا المحرك إذا كان تيار المتحرض $I_a = 30(A)$ ، حيث : $(R_g = 0)$.

الحل :

نقوم أولاً بحساب ثوابت المحرك، وهي C_E : عامل القوة المحركة الكهربائية، ويساوي : $(C_E = C_e.\phi)$

حيث:

C_e : الثابت الكهربائي للمحرك ويعطى بالعلاقة :

$$C_e = \frac{P.Z}{60.a}$$

ومن علاقة ق.م.ك ، نجد :

$$E_n = C_e.\phi.n = C_E.n_n = V_n - I_n R_a$$

$$C_E = \frac{V_n - I_n R_a}{n_n}$$

ونحسب قيمة R_a بالعلاقة :

$$R_a = 0.5\frac{V_n}{I_n}(I - \eta_n)$$

$$\eta_n = \frac{P_n}{I_n V_n} = \frac{7.25\times10^3}{38\times220} = 0.867$$

إذاً :

$$R_a = 0.5\frac{220}{38}(1 - 0.867) = 0.38(\Omega)$$

وبالتعويض نحدد قيمة C_E :

$$C_E = \frac{220 - 38\times0.38}{1000} = 0.206(V/r.p.m)$$

أما عامل عزم المحرك C_T فيساوي :

$$C_T = C_m.\phi$$

حيث:

C_m : الثابت التصميمي الميكانيكي للمحرك ويحدد بالعلاقة :

$$C_m = \frac{P.Z}{2\pi.a}$$

كما يمكن حساب الثابت C_T تبعاً للعامل C_E بالعلاقة :

$$C_T = 9.55\times C_E = 9.55\times0.206 = 1.96(N.m/A)$$

عزم المحرك الكهرومغناطيسي من أجل التيار الاسمي :

$$(T_e.m)_n = C_T.I_n = 1.96\times38 = 74.64 \quad (N.m)$$

العزم الاسمي للمحرك :

$$T_n = \frac{9.55\times10^3 P_n}{n_n} = \frac{9.55\times10^3\times7.25}{1000} = 69.25 \qquad (N.m)$$

العزم الضائع على فراغ :

$$T_0 = T_{em} - T_n = 74.64 - 69.25 = 5.39(N.m)$$

العزم الناشئ على محور المحرك في حالة كبح المحرك ديناميكياً :

$$(T_{in})_D = (T_{e\cdot m})_n + T_0 = 74.64 + 5.39 = 80.03(N.m)$$

المقاومة الكلية لدارة المتحرض في حالة الكبح الديناميكي :

$$R_{(a+D)} = R_a + R_D = \frac{E_D}{I_D} = \frac{C_E.n_D}{I_n} = \frac{0.206\times 500}{38} = 2.7\Omega$$

ومنه :

$$R_D = R_{(a+D)} - R_a = 2.7 - 0.38 = 2.32\Omega$$

ثانياً : في حالة الكبح بالتوصيل على التضاد :

المقاومة الكلية للمتحرض :

$$R_{(a+p)} = R_a + R_p = \frac{V_n + C_E.n_p}{I_p} = \frac{220 + 0.206\times 600}{25} = 13.732\Omega$$

إذا مقاومة الكبح بالتوصيل على التضاد تساوي :

$$R_p = R_{(a+p)} - R_a = 13.732 - 0.38 = 13.355\Omega$$

عزم المحرك الكهرومغناطيسي في حالة الكبح بالتوصيل على التضاد :

$$(T_{em})_P = C_T.I_P = 1.96\times 25 = 49(N.m)$$

العزم الناشئ على محور المحرك في حالة كبحه على التضاد :

$$(T_{in})_P = (T_{em})_P + T_0 = 49 + 5.39 = 54.39(N.m)$$

القدرة المستجرة من الشبكة في حالة الكبح على التضاد :

$$(P_1)_P = \frac{V_n.I_p}{1000} = \frac{220\times 25}{1000} = 5.5(kW)$$

القدرة الضائعة في مقاومات دارة المتحرض في نظام الكبح على التضاد :

$$(P_1)_P + (P_2)_P = \frac{I^2.R_{(a+p)}}{1000} = \frac{25^2\times 13.732}{1000} = 8.582(kW)$$

القدرة الميكانيكية الناتجة من محور المحرك مع إهمال الضياعات على فراغ :

$$(P_2)_P = 8.582 - 5.5 = 3.082(kW)$$

ثالثاً : في حالة الكبح مع إرجاع القدرة إلى شبكة التغذية:

$$n = \frac{V_n}{C_E} + \frac{I_g.R_a}{C_E}$$

$$= \frac{220}{0.206} + \frac{30\times 0.38}{0.206} = 1123.3(r.p.m)$$

7- المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التسلسلي والمختلط:

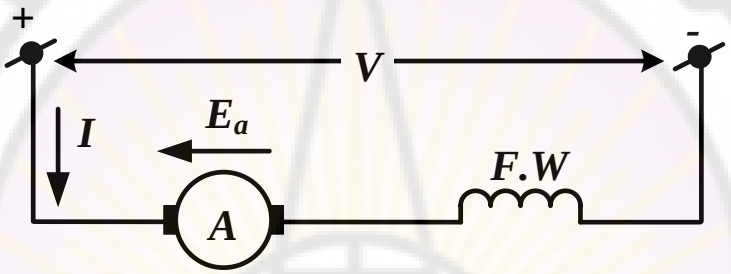
Electromechanical & Mechanical Characteristics of Series and Compound – Wound D.C Motors

مقدمة :

تعد المحركات التسلسلية وذات التهييج المختلط (المركب) من أهم المحركات الكهربائية التي تستخدم في الرافعات وآليات الجر الكهربائي لقطارات المترو وحافلات الترام والباصات الكهربائية، حيث تتميز بعزم إقلاعها الكبير وبسرعتها الكبيرة عند الحمولة الصغيرة، وتختلف عن محركات التهييج المستقل والتفرعية في تصميم داراتها الكهربائية، إذ يعد الفيض المغناطيسي فيها غير ثابت لتعلقه بتيار تغير الحمولات الكهربائية .

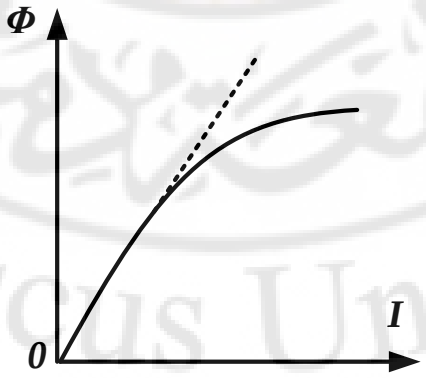
7-1- المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية الطبيعية للمحركات التسلسلية :

ويبين الشكل (25) المخطط الكهربائي لمحرك التيار المستمر ذي التهييج التسلسلي :



الشكل (25) الدارة الكهربائية للمحرك ذي التهييج التسلسلي

فبمرور التيار الكهربائي (I) في دارة المتحرض (A) وملف التهييج يتولد فيض مغناطيسي يتناسب طرداً مع قيمة التيار في مجال معين يتحدد بالإشباع المغناطيسي للمثلث، كما هو مبين على المخطط البياني في الشكل (26) الذي يعطينا مثالاً على العلاقة بين الفيض المغناطيسي (ϕ) والتيار (I) وهي علاقة لا خطية وتعد معقدة نسبياً، لذا نعتمد الخط المنقط في مجال محدود ونفترض العلاقة خطية لتبسيط الحسابات الهندسية .



الشكل (26)

من الدارة الكهربائية للمحرك التسلسلي نكتب معادلة التوترات حسب القانون الثاني ليكرشوف :

$$V = E_a + I.R_m \qquad (81)$$

حيث :

$$R_m = R_a + R_f \qquad (82)$$

حيث :

R_a : المقاومة الفعالة لملف المتحرض.

R_f : المقاومة الفعالة لملف التهييج .

E_a :القوة المحركة الكهربائية المتولدة على طرفي المتحرض والتي تساوي :

$$E_a = C_m.\phi.W \qquad (83)$$

ومنه نستنتج :

$$W = \frac{V}{C_m.\phi} - \frac{I.R_m}{C_m.\phi} \qquad (84)$$

وهي معادلة المميزات الكهروميكانيكية للمحرك التسلسلي والتي بتغير الفيض المغناطيسي (Φ) تتغير قيمة السرعة (W) بشكل عكسي، إذن فهي معادلة لا خطية.

أما معادلة المميزات الميكانيكية فنستنتجها من المعادلة (84) مع الأخذ بعين الاعتبار أن العزم في هذا المحرك، يساوي :

$$T = C_m.\phi.I \qquad (85)$$

وبما أن الفيض المغناطيسي يتناسب مع التيار، ولأن العلاقة خطية في مجال العمل النظام للمحرك، فيمكننا أن نكتب:

$$T \approx \alpha.C_m.I^2 \qquad (86)$$

حيث :

$$\phi = \alpha.I \qquad (87)$$

من العلاقات (84) و (86) و (87) نستنتج :

$$W = \frac{V}{\propto \alpha.C_m\sqrt{\frac{T}{\alpha.C_m}}} - \frac{R_m}{\alpha.C_m} \qquad (88)$$

وهي معادلة المميزات الميكانيكية الطبيعية للمحرك التسلسلي. ولأن العناصر: C_m و R_m هي ذات قيم ثابتة، فيمكننا عد المعادلة (88) مساوية :

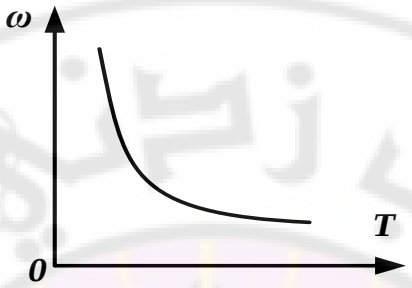
$$W = \frac{A}{\sqrt{T}} - B \qquad (89)$$

حيث :

A و B ثوابت، ويساويان :

$$A = \frac{V}{C_e}\sqrt{\frac{C_m}{\alpha}} \quad \text{و} \quad B = \frac{R_a + R_f}{C_e.\alpha}$$

نستنتج من المعادلة (89) أن معادلة المميزات الميكانيكية هي معادلة قطع زائد، حيث تكون السرعة فيها كبيرة عند الحمولات الصغيرة. وكما هو مبين في الشكل (27) فإن محاور الإحداثيات تمثل خطوط المقاربة لمنحني هذه المميزات.

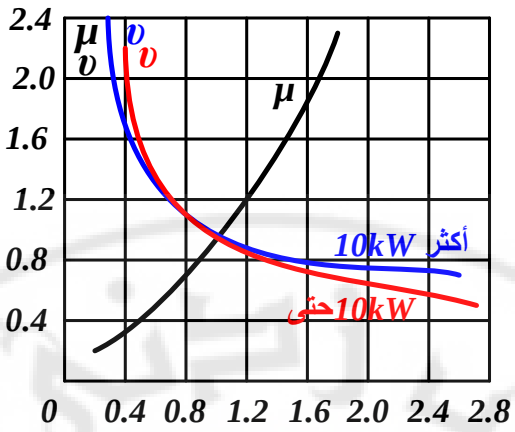


الشكل (27)

يبين الشكل (27) أن المميزات الميكانيكية وكذلك الكهروميكانيكية تنحدر بشدة كلما ازدادت قيمة عزم الحمولة، وتزداد سرعة المحرك كلما قلت الحمولة حيث تكون قيمتها كبيرة عند الحمولات الصغيرة، ولا يسمح بان يعمل المحرك التسلسلي في حالة اللاحمل حيث يؤدي ذلك إلى خروج المحرك عن مجال عمله الطبيعي وبالتالي إلى إتلافه.

وتجدر الإشارة هنا إلى أن منحني المميزات الذي تم استنتاجه على أساس المعادلة (88) لا يمكن استخدامه لغاية حسابية لأن المميزات الحقيقة لهذا المحرك تختلف عن هذا المنحني بشكل ملحوظ نتيجة للإشباع المغناطيسي، لذلك نلجأ عادة لطريقة التحليل البياني لإنشاء هذه المميزات والتي تستند إلى معطيات محددة بالعلاقة: $w = f(i)$ أو $n = f(i)$ والعلاقة $T = f(i)$ والمبينة على مخططات بيانية أو على شكل جداول في النشرات الفنية الخاصة بهذه المحركات تبعاً لتصميمها واستطاعتها. حيث يستحصل على هذه المخططات البيانية أو الجداول من قبل الشركات الصانعة لهذه المحركات بوساطة التجارب المجراة على هذه المحركات وذلك بعد الانتهاء من تصنيعها، ومن ثم تدون النتائج التجريبية في النشرة الخاصة بها على شكل أرقام وقيم نسبية منسوبة للقيم الاسمية للمحرك. وكمثال على ذلك يبين الشكل (4-7) المخطط البياني لهذه المميزات من أجل تصميم محدد للمحركات الكهربائية التسلسلية وذلك بالقيم الواحدية :

$\gamma = f(i)$
$\mu = f(i)$



الشكل (28)

حيث :

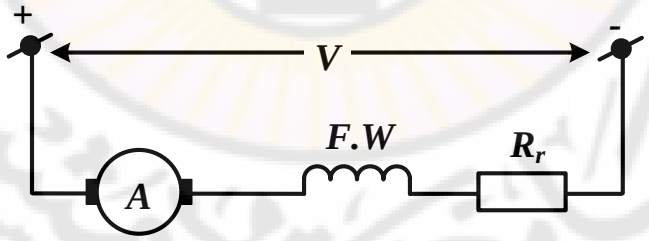
$\gamma = \frac{W}{W_0}$: السرعة النسبية ، بالقيم الواحدية.

$\mu = \frac{T}{T_n}$: العزم النسبي ، بالقيم الواحدية.

$i = \frac{I}{I_n}$: التيار النسبي ، بالقيم الواحدية.

7-2- المميزات الاصطناعية أو التنظيمية للمحركات التسلسلية:

للتحكم بقيم السرعة من أجل حمولة محددة نضيف مقاومة خارجية إلى دارة المتحرض وملف التهييج، كما هو مبين في الشكل (29) ، والتي يمكن استخدامها كمقاومة إقلاع على مرحلة أو أكثر.



الشكل (29)

ولإنشاء المميزات الاصطناعية للمحرك التسلسلي نستند إلى معادلة المميزات الطبيية والتي تساوي :

$$W_{nat} = \frac{V}{C_m.\phi}.\left(1 - \frac{I.R_m}{V}\right) \qquad (92)$$

حيث:

W_{nat} : قيمة السرعة على المميزة الطبيعية للمحرك.

وبإضافة المقاومة الخارجية والمسماة الريوستاتية R_r تصبح المعادلة (7-11) مساوية :

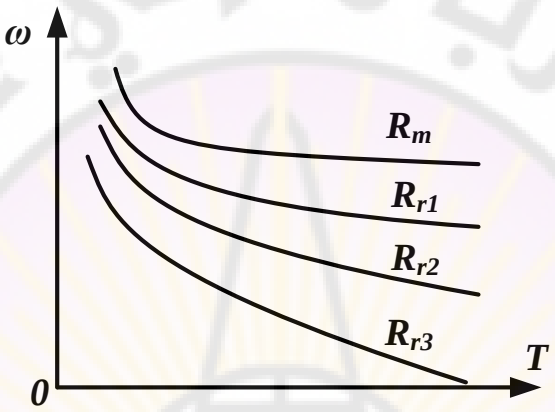
$$W_r = \frac{V}{C_m.\phi}.\left[1 - \frac{I.(R_m + R_r)}{V}\right] \qquad (93)$$

حيث:

W_r : قيمة السرعة على المميزة الاصطناعية للمحرك، من أجل المقاومة لدارة المحرك R_r . وبقسمة المعادلة (93) على (92)،وبعد إجراء الاختصارات اللازمة، نحصل على :

$$W_r = W_{nat} \cdot \frac{V - I.(R_m + R_r)}{V - I.R_m} \qquad (94)$$

ويبين الشكل (30) المميزات الميكانيكية الطبيعية والاصطناعية للمحرك التسلسلي، من أجل عدة قيم للمقاومة الخارجية (R_r) المضافة لدارة المحرك الكهربائي.



الشكل (30)

نلاحظ من الشكل (30) أن المميزات الاصطناعية أقل ليونة من المميزات الطبيعية، وتزداد درجة انحدارها كلما ازدادت قيمة تيار الحمولة وعزمها .

ويمكن مقارنة أداء عمل المحركات التسلسلية مع المحركات التفرعية أو ذات التهييج المستقل، بالاعتماد على المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية المستنتجة لكل منها، كمايلي:

بما أنه في المحركات التفرعية، لدينا $T = C_m \phi . I_a$ أي : $T \sim I_a$ ، وفي المحركات التسلسلية يكون لدينا $T \sim I_a^2$. وبما أن تيار الإقلاع المسموح به هو بحدود $(2 \div 2.5) I_n$. لذلك نستنتج أن المحركات التسلسلية تولد عزوم إقلاع كبيرة بالمقارنة مع المحركات التفرعية وذات التهييج المستقل .

إضافة إلى ذلك، ففي المحركات التفرعية وذات التهييج المستقل فإن السرعة تعد تقريباً ثابتة، أي $n \approx const$. أما في المحركات التسلسلية فإن السرعة لا تبقى ثابتة بتغير الحمولة المطبق على المحرك، بل تساوي تقريباً: $n \approx \frac{V}{\sqrt{T}}$. وبناءً على ذلك فإن الاستطاعة المنتجة في المحركات التفرعية وذات التهييج المستقل تتناسب مع العزم ، أي:

$$P_2 = W.T = 2\pi.n.T \sim T$$

أما في المحركات التسلسلية وعند تغيير الحمل في مجالات واسعة، فإن الاستطاعة المنتجة تتغير في مجالات أقل مما هي عليه في المحركات التفرعية، أي :

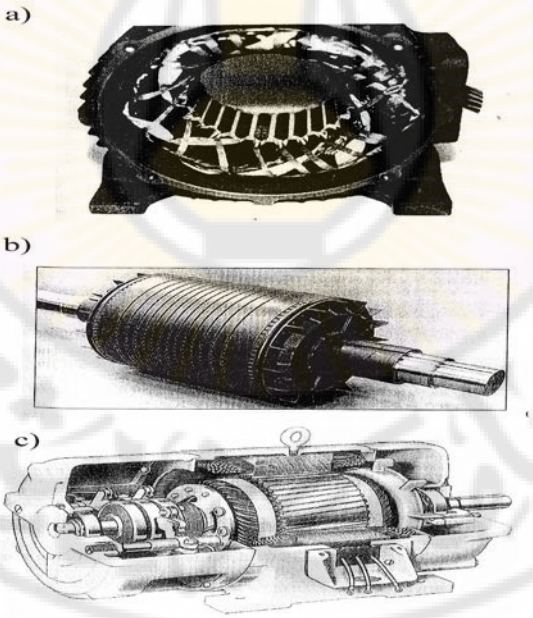
$$P_2 = W.T = 2\pi.n.T \sim \sqrt{T}$$

ولذلك تكون الحمولات الزائدة في العزم للمحركات التسلسلية أقل خطراً منها في المحركات التفرعية.
وبالتالي فإن المحرك التسلسلي مناسب للاستعمال في الحالات التي تتطلب عزماً كبيراً عند الإقلاع كما في الروافع والقاطرات الكهربائية، وما شابه ذلك في الآلات ذات الظروف الصعبة عند الإقلاع.

محركات التيار المتناوب

تعريف وبنية المحرك التحريضي الثلاثي الطور:

يعتبر المحرك التحريضي الثلاثي الطور من أكثر المحركات الكهربائية استخداماً وذلك نظراً لرخص ثمنه وبساطة تركيبه وسهولة صيانته كما أنه لا يحتاج إلى ملفات تهييج كما في محركات التيار المستمر والمحركات التزامنية. ويتألف المحرك التحريضي 3φ من قسمين كما في الشكل (1): الجزء الثابت (stator) والجزء المتحرك (rotor) حيث يتم تصنيعها من صفائح الصلب الكهرومغناطيسي صغير المقاومة المغناطيسية وعالي النفاذية وذلك بسماكة حوالي 0.5mm وتعزل هذه الصفائح بمادة عازلة للتقليل من الضياعات الناتجة عن التعويق المغناطيسي والتيارات الإعصارية. أما في الآلات ذات الاستطاعات العالية يتم تشكيل المتحرك (الدائر) من صفائح تصل سماكتها إلى 2 mm كما أنه هناك توجُه لصناعة الجزء الدائر من الحديد المصمت وذلك للمحركات ذات الاستطاعات الضخمة وللسرعات العالية بحدود 2950 r.p.m. يفصل بين الثابت والمتحرك ثغرة هوائية بحدود أجزاء من الميليمتر للآلات الصغيرة وإلى عدة ميليمترات (حوالي 3 mm) في الآلات الكبيرة.



الشكل (1) صور لأجزاء محرك تحريضي ثلاثي الطور

a -منظر للثابت stator وترى الملفات بداخله

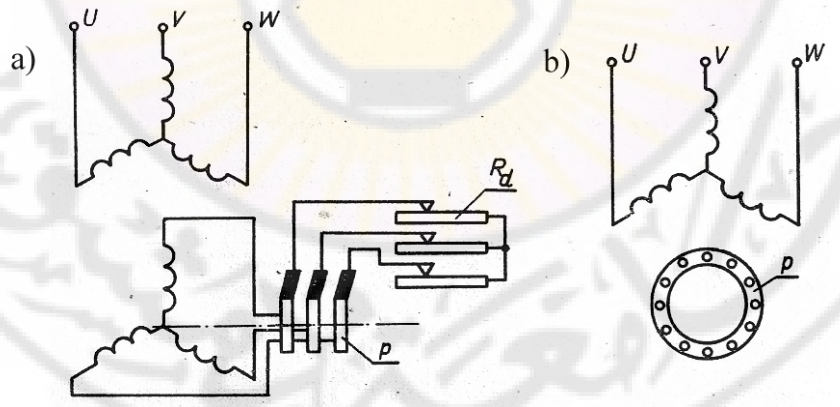
b –دائر ذو قفص سنجابي c– مقطع في محرك تحريضي ذو دائر ملفوف يظهر في الثابت والدائر

يتم تشكيل الجزء الثابت بحيث يحتوي على مجموعة من المجاري Z محفورة في سطحه الداخلي بحيث يتم توزيع الملفات المصنوعة من النحاس والمعزولة بداخل هذه المجاري وتوصل نهايات هذه الملفات على شكل دارة ثلاثية الطور موصولة بشكل نجمي (λ) أو مثلثي (Δ) حسب تصميم المحرك (وهناك أيضاً محركات أحادية الطور كما سنرى لاحقاً).

أما بالنسبة للدائر في المحرك التحريضي فيمكن أن يُشكل بطريقتين:

الطريقة الأولى:

ويسمى فيها المحرك بمحرك ذو دائر ملفوف (slip–ring rotor)، ويتم تشكيل الدائر بطريقة شبيهة بالثابت بحيث يتم توزيع الملفات النحاسية والمعزولة بداخل المجاري المحفورة على السطح الخارجي للدائر، ويتم توصيلها كما في الثابت، على شكل ثلاثة أطوار تُربط بشكل نجمي λ. ويمكن أن توصل أيضاً بشكل مثلثي Δ للحد من ارتفاع التوتر بين حلقات الانزلاق بحيث لا تزيد عن V (2200 ÷ 800) عند السكون وذلك للمحركات ذات الاستطاعات الضخمة. أما الأطراف السائبة لتوصيلة النجمة فتوصل إلى حلقات الانزلاق المركبة على محور الدوران والموصولة بالمقاومات Rd وذلك لاستخدامها عند الإقلاع كما سنرى لاحقاً. وطريقة توصيل هذا النوع من المحركات موضح بالشكل (2a – 4).



الشكل (2) ملفات المحرك التحريضي ثلاثي الطور

a ذو دائر ملفوف مع مقاومات إقلاع

b ذو فقص سنجابي

الطريقة الثانية

ويتم تشكيل الدائر في المحرك التحريضي الثلاثي الطور عن طريق ملء المجاري في الدائر بقضبان من النحاس أو الألمنيوم غير معزولة ومقصورة معاً عند أطرافها بحلقتين من نفس مادة

القضبان. ويمكن عزل هذه القضبان في المحركات ذات الاستطاعة الكبيرة ويجب الانتباه إلى تثبيت هذه القضبان بشكل جيد داخل المجاري وذلك تجنباً لضررها نتيجة الاهتزاز الناتج عن دوران المحرك. ويسمى هذا النوع من المحركات بالمحركات ذات القفص السنجابي (squirrel– cage rotor) ويمكن ملاحظة رخص هذا النوع بالمقارنة مع المحرك ذو الدائر الملفوف، الشكل (2b).

عند لف المحرك التحريضي تتوضع موصولات الملف الواحد في المجاري على مسافة معينة من بعضها البعض وتسمى هذه المسافة بالخطوة القطبية τ بحيث تشكل أقطاباً مغناطيسية متتابعة (شمالي – جنوبي – شمالي – ...)، وتعرف الخطوة القطبية بأنها المسافة الفاصلة بين ضلعي الملف الواحدة والمشكلين لقطبين مغناطيسيين مختلفين ويجدر الذكر هنا بأن الأقطاب المغناطيسية في المحركات التحريضية هي أقطاب خيالية (في الآلات التزامنية هي أقطاب حقيقية كما سنرى لاحقاً) وتعطى الخطوة القطبية بالعلاقة التالية:

$$\tau = \frac{\pi D}{2P} \text{ [m] or [cm]} \qquad (1)$$

حيث: D: القطر الداخلي للجزء الثابت أو الخارجي للجزء الدائر (m | or | cm).

2P: عدد الأقطاب في الجزء الثابت أو الدائر.

ويمكن أن تعطى أيضاً بدلالة عدد الأسنان أو المجاري.

$$\tau = \frac{Z}{2P} \quad \text{[slots/pole]}$$

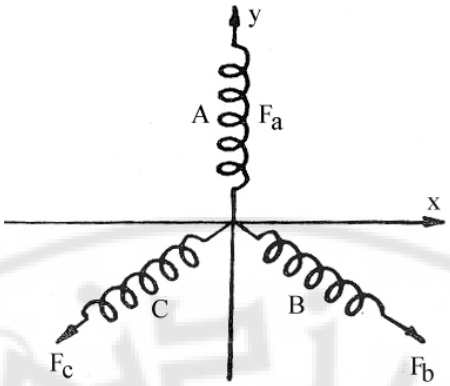
أو بالدرجات الميكانيكية: $\left[\frac{mech.\deg rees}{pole}\right]$ $\tau = \frac{2\pi}{2P} = \frac{360}{2P}$

أو بالدرجات الكهربائية: $\left[\frac{elec.\deg rees}{pole}\right]$ $\tau = \frac{360P}{2P} = 180$

2- الساحة المغناطيسية الدوارة:

قبل شرح مبدأ عمل المحرك التحريضي الثلاثي الطور لا بد من التطرق إلى كيفية تشكل الساحة المغناطيسية الدوارة الناشئة عن تطبيق توتر متناوب على ثلاث ملفات مربوطة بشكل نجمي، على سبيل المثال:

لنفرض أنه لدينا ثلاثة ملفات متماثلة مربوطة كما في الشكل (3).



الشكل (3)

وبتطبيق توتر متناوب جيبي على الملفات الثلاث سيمر في الملفات التيارات التالية:

$$i_a = I_{\max}\cos\omega t \qquad (2)$$

$$i_b = I_{\max}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \qquad (3)$$

$$i_c = I_{\max}\cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \qquad (4)$$

مما سينتج عنه قوى محركة مغناطيسية تشكل فيما بينها زوايا 120° كما يلي:

$$F_a = F_{\max}\cos\omega t \qquad (5)$$

$$F_b = F_{\max}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \qquad (6)$$

$$F_c = F_{\max}\cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \qquad (7)$$

وبإسقاط هذه القوى على المحاور X و jY نحصل على:

محصلة القوى على المحور X:

$$F_{ax} = F_a\cos\frac{\pi}{2} = 0 \qquad (8)$$

$$F_{bx} = F_b\cos\frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2}F_b \qquad (9)$$

$$F_{cx} = -F_c\cos\frac{\pi}{6} = -\frac{\sqrt{3}}{2}F_c \qquad (10)$$

ومنه مجموع هذه القوى على المحور X يكون:

$$F_x = 0 + \frac{\sqrt{3}}{2}F_b - \frac{\sqrt{3}}{2}F_c$$

وبتعويض قيم Fb وFc من العلاقات (6) و(7) نحصل على:

$$F_x = \frac{3}{2} F_{\max} \sin \omega t \qquad (11)$$

أما على المحور jY:

$$F_{ay} = jF_a \qquad (12)$$

$$F_{by} = -jF_b \cos\frac{\pi}{3} = -\frac{j}{2} F_b \qquad (13)$$

$$F_{cy} = -jF_c \cos\frac{\pi}{3} = -\frac{j}{2} F_c \qquad (14)$$

ومجموع هذه القوى على المحور jY:

$$F_y = jF_a - \frac{j}{2} F_b - \frac{j}{2} F_c$$

وبتعويض قيم Fa و Fb و Fc من العلاقات (5)، (6)، (7)

نحصل على:

$$F_y = j\frac{3}{2} F_{\max} \cos \omega t \qquad (15)$$

ومنه نجد أن:

$$F = F_x + F_y$$
$$= \frac{3}{2} F_{\max} \sin \omega t + j\frac{3}{2} F_{\max} \cos \omega t$$

ومنه:

$$F = j.\frac{3}{2}.F_{\max}.e^{-j\omega t} \qquad (16)$$

من العلاقة (16) نجد أن محصلة المجالات المغناطيسية الثلاثة هي مجال مغناطيسي دوار ذو قيمة عظمى مقدارها $\frac{3F_{\max}}{2}$ ويدور بالنسبة للمحور y بسرعة زاوية ثابتة مقدارها:

$$\left| \frac{d \propto}{dt} \right| = |-\omega| \qquad (17)$$

حيث

$\propto$: مقدار الزاوية عند أية لحظة t.

ومن الملاحظ هنا أن تغيير موضعي أي طورين من الأطوار الثلاثة سنحصل على سرعة زاوية مقدارها:

$$\left| \frac{d \propto}{dt} \right| = |+\omega| \qquad (18)$$

مما سبق نستنتج أنه يمكن عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسي بتبديل أي طورين مما سيؤدي إلى تغيير اتجاه دوران المحرك وبناءً على ما سبق سوف تعمل المحركات التحريضية.

3- مبدأ عمل المحرك التحريضي الثلاثي الطور:

عند تطبيق توتر ثلاثي الطور على ملفات الجزء الثابت ونتيجة مرور التيار الكهربائي في هذه الملفات فإنه يتشكل حقل مغناطيسي دوار (بالأخذ بعين الاعتبار التوافقية الأولى فقط) يدور بسرعة:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{P} \qquad [r.p.m] \qquad (19)$$

حيث:

n1: سرعة دوران الساحة المغناطيسية.

f1: تردد التوتر المطبق على ملفات الثابت.

P: عدد أزواج الأقطاب المتشكلة في الجزء الثابت.

وتسمى هذه السرعة بالسرعة التزامنية. وبما أن هذه الساحة المغناطيسية تقطع ملفات الجزء المتحرك أيضاً فسوف تتولد في هذه الملفات قوة محركة كهربائية وبما أن هذه الملفات تشكل دارة مغلقة فسوف يمر تيار يولد بدوره ساحة مغناطيسية أخرى، ونتيجة لتشابك هاتين الساحتين فسوف يتولد عزم كهربائي تتوقف قيمته على قيمة التيار المار في المتحرك وعلى السيالة المغناطيسية في الثغرة الهوائية وكذلك على الزاوية بينهما مما يؤدي إلى دوران المحرك بسرعة n حيث n < n1.

إن قيمة القوة المحركة الكهربائية المتشكلة في ملفات الثابت للطور الواحدة E1 تعطى بالعلاقة:

$$E_1 = 4{,}44.\Phi_m.f_1.N_1.Ku_1 \qquad [v/phase] \qquad (20)$$

وعندما يكون الدائر في حالة سكون (n = 0) فتتولد فيه ق.م.ك E_{20}.

$$E_{20} = 4{,}44.\Phi_m.f_1.N_2.Ku_2 \qquad [v/phase] \qquad (21)$$

حيث:

Φ_m: القيمة العظمى للفيض المغناطيسي.

N1: عدد لفات الطور الواحد في الجزء الثابت.

N2: عدد لفات الطور الواحد في الجزء المتحرك.

Ku1: معامل اللف في الجزء الثابت.

Ku2: معامل اللف في الجزء المتحرك.

f1: تردد منبع التغذية.

ويجب الإشارة هنا إلى أنه في المحرك التحريضي ذو القفص السنجابي فإن $K_{u2}=1$، وعدد لفات الطور الواحد مساوٍ لنصف لفة، وعدد الأقطاب مساوٍ لعدد أقطاب الجزء الثابت أما عدد الأطوار فهو مساوٍ لعدد المجاري.

فعند n = 0 فإنه تتولد ق.م.ك في الجزء الدائر E_{20} بتردد مساوٍ لتردد الجزء الثابت f_1.

إذا كانت دارة الجزء المتحرك مفتوحة لسبب ما فإن قيمة التيار في الدارة ستكون معدومة $I_2=0$ ومنه لن يكون هناك عزم دوراني. أما إذا كانت دارة الدائر مغلقة فسوف يمر تيار I_2 وسوف يتولد عزم دوران كما شرحنا بداية الفقرة وسوف يدور المحرك بسرعة n أصغر من n1 ومنه:

$$n2 = n1 - n \qquad (22)$$

حيث n2: هي السرعة التي تقطع بها ملفات الجزء المتحرك السيالة المغناطيسية الدوارة. وتسمى نسبة n2 إلى n1 بالانزلاق.

$$S = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \qquad (23)$$

ويمكن أن يعطى الانزلاق كنسبة مئوية:

$$S\% = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}\% \qquad (24)$$

ومنه فعندما يكون المحرك في حالة سكون n = 0 ينتج أن S = 1

أما إذا دار المحرك بسرعة n = n1 ينتج أن S = 0

ومن العلاقة (23) يمكن كتابة سرعة المحرك التحريضي n بدلالة S كما يلي:

$$n = (1 - S)\, n1 \qquad (25)$$

إن تردد الـ ق.م.ك المتولدة في ملفات الجزء المتحرك يتناسب مع السرعة n2 ويعطى بالعلاقة:

$$f_2 = p.n_2 \qquad (26)$$

ومنه:

$$f_2 = P(n_1 - n) = P\left(\frac{n_1 - n}{n_1}\right)n_1$$
$$= P.n_1.S$$
$$f_2 = S.f_1 \qquad (27)$$

إن الـ ق.م.ك المتحرضة في ملفات الجزء الدائر E_2 عند أية قيمة لـn تعطى بالعلاقة:

$$E_2 = 4{,}44.\Phi_m.f_2.N_2.Ku_2$$
$$= 4{,}44.\Phi_m.f_1.S.N_2.Ku_2$$

ومنه:

$$E_2 = S.E_{20} \qquad (28)$$

ومما سبق نجد: $n + n_2 = n_1 (1 - S) + n_1S$

أي: $n1 = n + n2$

أي أن الأقطاب المغناطيسية المتشكلة في الثابت والدائر تكون ثابتة بالنسبة لبعضها البعض ولأية سرعة للدائر وهذه قاعدة عامة بالنسبة لكل الآلات الكهربائية وتصاغ كما يلي (في الحالات المستقرة لعمل الآلة تكون الأقطاب ثابتة بالنسبة لبعضها البعض).

ويمكن أن نميز هنا مجموعة من الحالات وذلك حسب سرعة المحرك:

1- عند $n = 0$ أي $S = 1$:

$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{N_1Ku_1}{N_2Ku_2} = v_u \qquad (29)$$

وهذه الحالة شبيهة بحالة المحول حيث v_u هي نسبة تحويل التوتر والفارق الوحيد هنا هو استخدام عامل اللف في المحركات نظراً لعدم تركز ملفات المحرك في مجرى واحد.

2- عند $n = n_1$ أي $S = 0$:

$$E_2 = S.E_{20} = 0 \qquad (30)$$

وفي هذه الحالة فإن ملفات الجزء الدائر لا تقطع الساحة المغناطيسية للجزء الثابت ولن يكون هناك تيار في الجزء الدائر وأيضاً لن يتولد عزم دوران.

3- في الحالة العامة لدوران المحرك بسرعة n فإن:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1.f_1.Ku_1}{N_2.f_2.Ku_2} \qquad (31)$$

وبما أن $f_2 = Sf_1$ ينتج: (32)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{v_u}{S}$$

4- الدارة المكافئة للمحرك التحريضي 3φ:

كما في المحولات فإنه يمكن أن نوجد الدارة المكافئة للمحرك التحريضي 3φ بحيث نسهل دراسة هذا النوع من المحركات مع فارق أنه في حالة المحرك التحريضي تختلف قيمة التردد وطبيعة تغير الطاقة بالإضافة إلى التوتر والتيار، بحيث أنه في المحرك التحريضي 3φ تكون قيمة التيارات والتوترات متساوية بالقيمة المطلقة في جميع الأطوار ومزاحة عن بعضها بزاوية 120 درجة كهربائية وذلك بالنسبة للثابت والمتحرك ولذلك يمكن تمثيل المحرك التحريضي بالدارة المكافئة كما في الشكل (4a) وذلك للطور الواحد.

ومنه يمكن كتابة معادلات توتر الثابت والمتحرك كما يلي:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j\underline{I}_1 X_1 \quad \text{بالنسبة للثابت} \qquad (33)$$

$$0 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 R_2 - j\underline{I}_2 X_2 \quad \text{بالنسبة للمتحرك} \qquad (34)$$

ويمكن كتابة العلاقة (34) كما يلي: (35)

$$0 = S\underline{E}_{20} - \underline{I}_2 R_2 - jS\underline{I}_2 X_{20}$$

حيث:

$$E_2 = S.E_{20}$$

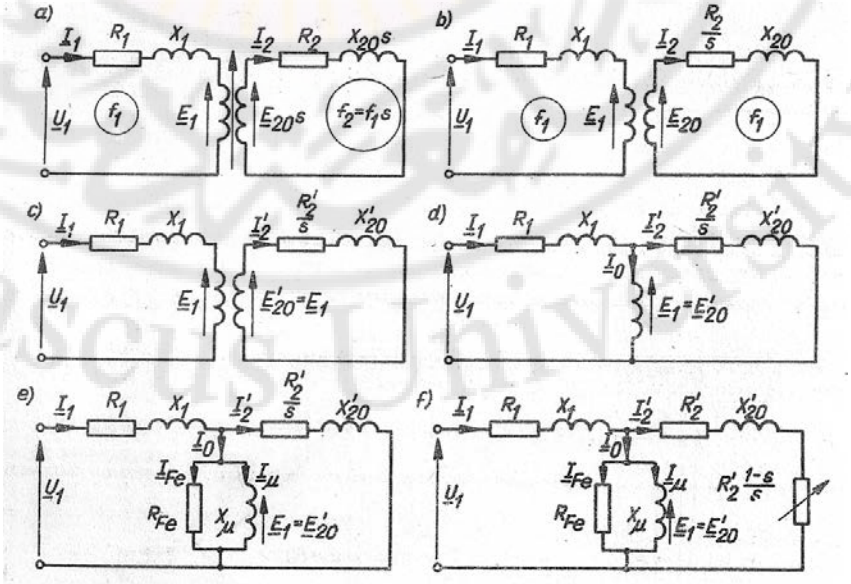
$$X_2 = \omega_2 . l_2 = 2.\pi . f_2 . l_2 = 2.\pi . f_1 . S . l_2 = SX_{20}$$

X_{20}: مفاعلة الجزء الدائر للطور الواحد عند n = 0 في حالة السكون.

وبتقسيم العلاقة (35) على الانزلاق S نجد: (36)

$$0 = \underline{E}_{20} - \underline{I}_2 \frac{R_2}{S} - j\underline{I}_2 X_{20}$$

كما في الشكل (4b).



الشكل (4) الدارة المكافئة لمحرك تحريضي 3φ (طور واحد)

وبنسب الدائر للثابت:

$$\underline{E}_1 = \underline{E}'_{20} = \underline{I}'_2 \frac{R'_2}{S} + j\underline{I}'_2 X'_{20} \qquad (37)$$

حيث:

$$E'_{20} = \nu_u . E_{20}$$
$$R'_2 = \nu_\Omega . R_2$$
$$X'_{20} = \nu_\Omega . X_{20}$$
$$I'_2 = \frac{I_2}{\nu_i}$$

$\nu_\Omega = \nu_u . \nu_i$ نسبة تحويل الممانعة

ν_i نسبة تحويل التيار

ν_u نسبة تحويل التوتر

الشكل (4 c , d).

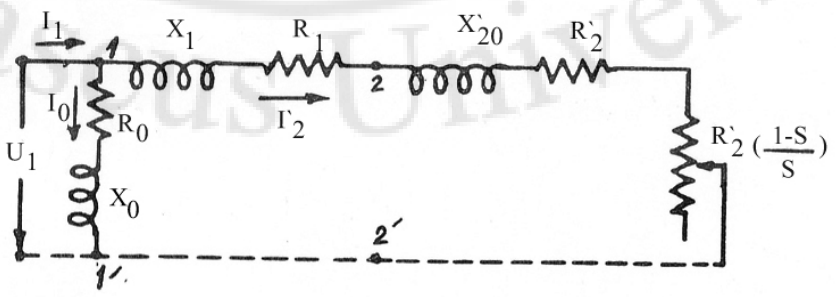
ومن ثم يمكن تحويل الدارة المكافئة إلى الأشكال (4-e-f) حيث تم فصل $\frac{R'_2}{S}$ إلى جزئين R`2 و $R'_2(\frac{1-S}{S})$ وهذا الشكل الأخير مقابل للدارة المكافئة للمحول حيث الحمولة معبراً عنها بدلالة الانزلاق S وبحيث أن:

$\underline{I}_0 = \underline{I}_{Fe} + j\underline{I}_\mu$ تيار اللاحمل

$Z_0 = R_{Fe} + jX_\mu$ ممانعة اللاحمل

كما يمكن رسم الدارة المكافئة للمحرك التحريضي كما هو مبين بالشكل (5).

حيث يتم إهمال تأثير تيار اللاحمل I_0 على ملفات الجزء الثابت نظراً لصغر قيمته مع العلم أن قيمة تيار اللاحمل I_0 في المحرك التحريضي أكبر من قيمته في المحول ففي المحركات ذات الاستطاعات الكبيرة والمتوسطة: (20 = $I_{1n} \div I_0$ % (30



الشكل (5) الدارة المكافئة Γ للمحرك التحريضي 3φ لطور واحد

أما في المحركات الصغيرة:

$I_0 = (40 \div 50)\ \%\ I_{1n}$

أما في المحولات: $I_0 = (5 \div 15)\ \%\ I_{1n}$

مسألة (1):

محرك تحريضي ثلاثي الطور فيه ملف الثابت موصول بشكل مثلثي (Δ) وكل طور يحتوي على 240 ناقل للطور الواحد وملف الدائر فيه موصول بشكل نجمي (λ) ويحتوي على 48 ناقل للطور الواحد وبفرض أن: $R_1 = 0.013[\Omega / phase]$ ومفاعلته $X_{20} = 0.048[\Omega / phase]$ عند التوقف بتوتر تغذية 400 V وعامل اللف $K_{u1}=K_{u2}=0.96$ والمطلوب حساب ما يلي :

1. الفيض القطب الواحد ϕ_m عند تردد f = 50 Hz.
2. الـ ق.م.ك بالطور الواحد في الدائر عند الوقوف وحين تكون دارة الدائر مفتوحة.
3. الـ ق.م.ك بالطور الواحد في الدائر عند S = 0.04.
4. الزاوية بين التوتر والتيار في الدائر عند الوقوف وعند S = 0.04.

الحل:

1. تحسب ϕ_m من العلاقة:

$$U_1 \approx E_1 = 4{,}44.f_1.\phi_m.N_1.Ku_1$$

ومنه:

$$\phi_m = \frac{U_1 \approx E_1}{4{,}44.f_1.N_1.Ku_1}$$
$$= \frac{400}{4.44 \times 50 \times 120 \times 0.96} = 0.01564[Wb]$$

2. وكذلك نحسب E_{20} من نفس العلاقة:

$$E_{20} = 4{,}44.f_2.\phi_m.N_2.Ku_2$$
$$= 4.44 \times 50 \times 0.01564 \times 24 \times 0.96 = 80[V]$$

أو من العلاقة:

$$E_{20} = E_1 \frac{N_2}{N_1}$$
$$= 400 \frac{24}{120} = 80[V]$$

3. نحسب الـ ق.م.ك E2 من العلاقة:

$E_2 = S\ E_{20}$

أي:

$$E_2 = 0.04 \times 80$$
$$= 3.2[V]$$

4. أ- عند الوقوف:

$$\varphi = tg^{-1}\frac{X_{20}}{R} = tg^{-1}\frac{0.048}{0.013} = 75^{\circ}$$

ب – عند S = 0.04:

$$\varphi = tg^{-1}\frac{X_2}{R_2} = tg^{-1}\frac{0.04 \times 0.048}{0.013} = 8.4^{\circ}$$

-5- مخطط الاستطاعة وعزم ومردود المحرك التحريضي 3φ:

إن الاستطاعة التي يستجرها المحرك التحريضي 3φ من الشبكة تتحول إلى استطاعة ميكانيكية وخلال هذه العملية فإن قسماً من هذه الاستطاعة يتحول إلى حرارة ضمن الآلة وملحقاتها فإذا كانت الاستطاعة المستجرة من الشبكة P1 فإن قسماً منها يضيع في الثابت كضياعات نحاسية ΔPcu1 وكذلك ضياعات حديدية ΔPFe والمتبقي من P1 ينتقل إلى الجزء الدائر Pw ومن ثم يتحول قسم من هذه الاستطاعة إلى حرارة في ملفات الجزء الدائر ΔPcu2 والباقي يتحول إلى استطاعة ميكانيكية Pmech. ونحصل على الاستطاعة الصافية P2a بعد طرح ضياعات الاحتكاك على محور المحرك من الاستطاعة Pf.

فعند سرعة زاوية ميكانيكية تزامنية Ω_1 للساحة المغناطيسية وعزم دوران M فإن الاستطاعة المنتقلة من الثابت إلى المتحرك هي:

$$P_W = M.\Omega_1 \qquad (38)$$

وكذلك يمكن كتابة الاستطاعة الميكانيكية بالعلاقة:

$$P_{mech} = M.\Omega \qquad (39)$$

حيث Ω السرعة الزاوية الميكانيكية للمحرك ومنه:

$$\frac{P_w}{P_{mech}} = \frac{M.\Omega_1}{M.\Omega} \qquad (40)$$

لكن لدينا:

$$\frac{\Omega}{\Omega_1} = \frac{n}{n_1} = (1-S) \qquad (41)$$

ومنه نحصل على:

$$Pmech = Pw(1-S) \qquad (42)$$

أما الضياعات النحاسية في الدائر ΔPcu2 فتحسب من العلاقة:

$$\begin{aligned} \Delta P_{cu_2} &= P_w - P_{mech} \\ &= P_w - P_w(1-S) = S.P_w \\ \Delta P_{cu_2} &= S.P_w \end{aligned} \qquad (4-43)$$

أما الاستطاعة المستجرة من الشبكة P1:

$$P_1 = m_1.U_1.I_1.\cos\varphi \qquad (44)$$

حيث:

I1: تيار الطور (آمبير)

U1: توتر الطور (فولت)

m1: عدد أطوار الثابت

$\cos\varphi$: عامل الاستطاعة

ومن ثم فإن الاستطاعة الضائعة في ملفات الجزء الثابت:

$$\Delta P_{cu1} = m_1.I_1^2.R_1 \qquad (45)$$

حيث R1: المقاومة الأومية للطور الواحد في الجزء الثابت.

أما الاستطاعة المنتقلة إلى الجزء المتحرك فيمكن أن تكتب كما يلي:

$$P_w = P_1 - \Delta P_{cu1} - \Delta P_{Fe} \qquad (46)$$

حيث ΔPFe تمثل الاستطاعة المغناطيسية المفقودة في حديد الجزء الثابت.

ويمكن أن نحسب الاستطاعة Pw كما يلي:

$$P_w = m_1.I_2'^2.\frac{R_2'}{S} \qquad (47)$$

وأيضاً:

$$\Delta P_{cu2} = m_2.I_2^2.R_2$$
$$= m_1.I_2'^2.R_2' \qquad (4-48)$$

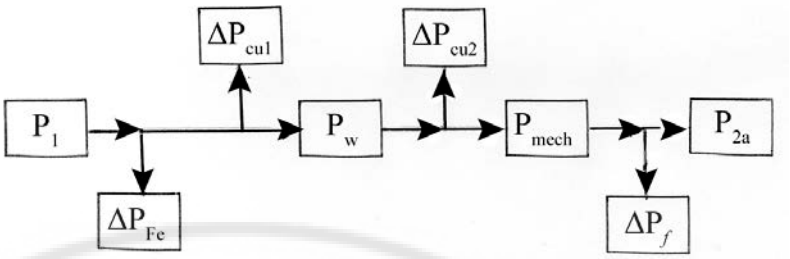
وبمقارنة (30) مع (31) ينتج:

$$P_w = \frac{\Delta P_{cu2}}{S} \qquad (4-49)$$

وهي نفسها العلاقة (43) وبناء عليه فإن الاستطاعة الميكانيكية:

$$P_{mech} = P_w - \Delta P_{cu2} = P_w - S.P_w$$
$$= P_w(1-S) \qquad (4-50)$$

وهي نفسها العلاقة (42). وكذلك يجب التنويه هنا إلى الاستطاعة الضائعة نتيجة الاحتكاك على مضاجع الآلة ΔPf. والشكل (7) يبين مخطط الاستطاعة.



الشكل (7) مخطط الاستطاعة في المحرك التحريضي 3φ

أما مردود المحرك التحريضي 3φ فيحسب من العلاقة:

$$\eta\% = \frac{P_{2a}}{P_1} \times 100$$

حيث: $P1 = P2a + \Delta P$

ΔP: مجموع الضياعات في المحرك.

P2a: استطاعة الخرج الميكانيكية الصافية.

P1: الاستطاعة المستجرة من الشبكة.

ويكون المردود في المحركات التحريضية 3φ بحدود $\eta\% = (70 \div 95)\%$ حيث القيمة الكبيرة تخص المحركات ذات الاستطاعات الكبيرة والصغيرة تخص المحركات ذات الاستطاعات الصغيرة.

أما عزم المحرك التحريضي 3φ فيعطى بالعلاقة:

$$M = \frac{P_{mech}}{\Omega} = \frac{P_{mech}}{\Omega_1(1-S)} = \frac{m_1 . I_2'^2 . R_2'/S}{2.\pi.n_1/60}$$

$$= \frac{P_w}{\Omega_1} \qquad [N.m] \qquad (4-52)$$

حيث:

$$\Omega_1 = \frac{2.\pi.n_1}{60}$$

$$\Omega = \frac{2.\pi.n}{60} = (1-S)\Omega_1$$

$$P_{mech} = P_w(1-S)$$

ومنه:

$$M = K.U_1^2 . \frac{R_2'/S}{\left(R_1 + R_2'/S\right)^2 + (X_1 + X_{20}')^2} \qquad [N.m] \qquad (53)$$

كما يمكن كتابة علاقة العزم كما يلي:

$$M = K.I_2'^2.\frac{R_2'}{S} \qquad \text{[N.m]} \qquad (54)$$

$$K = \frac{30m_1}{\pi n_1}$$

حيث:

لإيجاد علاقة العزم الأعظمي Mmax (الاستطاعة Pw max) نشتق العلاقة (53) بالنسبة للانزلاق ونساوي المشتق للصفر، أي:

$$\left(\frac{dM}{dS}\right) = 0$$

فنحصل على قيمة الانزلاق Smax المقابل للعزم الأعظمي:

$$S_{\max} = \pm\frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \qquad (55)$$

وبالتعويض بالعلاقة (35-4) نحصل على:

$$M_{\max} = \pm\frac{K}{2}.\frac{U_1^2}{\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \qquad (56)$$

أما بالنسبة للاستطاعة المنقولة Pw max فتعطى كما يلي:

$$P_{w\max} = \pm\Omega_1.M_{\max} \qquad (57)$$

أما قيمة Pmech max فتحسب كما يلي: $\frac{dP_{mech}}{dS} = 0$

$$S_{P\max} = \frac{R_2'}{R_2' \pm Z_{eq}}$$

ومنه: (58)

$$Z_{eq} = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X'_{20})^2}$$

حيث:

$$P_{mech.\max} = \pm\frac{m_1.U_1^2}{2}.\frac{1}{\pm(R_1 + R_2')^2 + Z_{eq}}$$

ومنه نحصل على: (59)

في المحركات التحريضية 3φ إن قيمة R1 أقل بكثير من (X1 + X ' 20) بحيث يمكن أن نكتب: $R_1 = (10 \div 15)\%(X_1 + X'_{20})$

ومنه يمكن إهمال R1 أمام (X1 + X ' 20) :

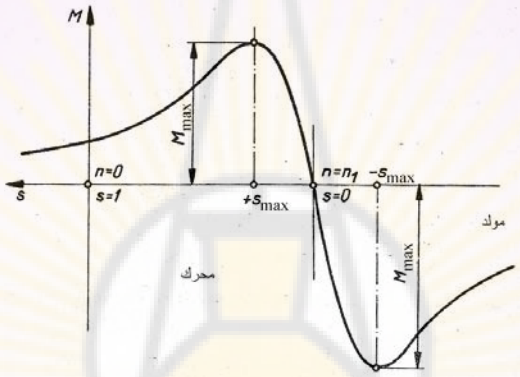
$$M_{\max} \approx \pm \frac{K}{2} \cdot \frac{U_1^2}{X_1 + X'_{20}} \qquad (60)$$

$$S_{\max} \approx \pm \frac{R'_2}{X_1 + X'_{20}} \qquad (61)$$

بحيث الإشارة (+) تناسب عمل الآلة كمحرك

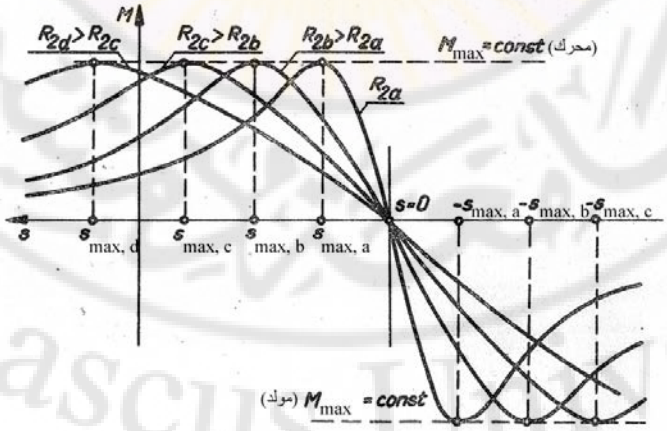
و الإشارة (−) تناسب عمل الآلة كمولد

نلاحظ من العلاقات (56) و(60) أن العزم الأعظمي لا يتعلق بالمقاومة R2 (المقاومة المادية لملفات الجزء الدائر). مميزة العزم M بدلالة الانزلاق S للمحرك التحريضي 3φ (المميزة الميكانيكية) موضحة بالشكل (8).



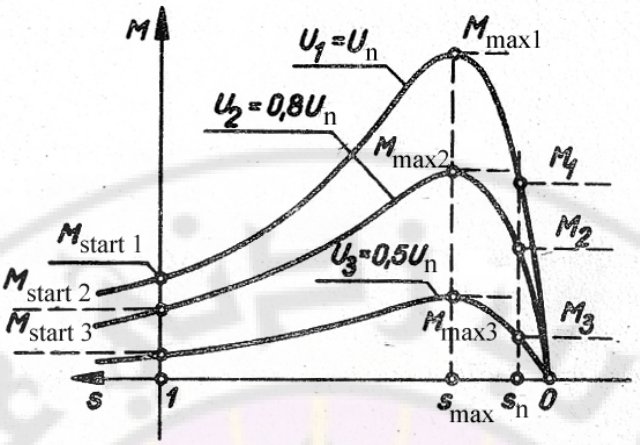
الشكل (8) مميزة M = f(S) لمحرك تحريضي 3φ

كما يبين الشكل (9) تأثير مقاومة الدائر على الميزة الميكانيكية للمحرك التحريضي 3φ



الشكل (9) تأثير مقاومة الدائر على المميز الميكانيكية للمحرك التحريضي 3φ

والشكل (10) يبين تأثير تغير توتر التغذية U1 على المميزة الميكانيكية للمحرك التحريضي 3φ



الشكل(10) تأثير تغيير التوتر على المميزة الميكانيكية للمحرك التحريضي 3φ

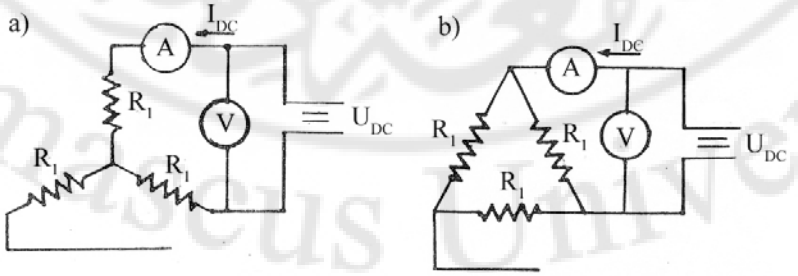
اختبارات المحرك التحريضي ثلاثي الطور:

إن الغاية من اختبار المحرك التحريضي 3φ (أو أية آلة كهربائية أخرى) هو دراسة خواص هذا المحرك في حالات مختلفة من حالات التشغيل كحالة اللاحمل وحالة القصر وحالة التشغيل العادي على حمولة اسمية. ويمكن من هذه الاختبارات تشكيل فكرة كاملة عن سلوك وخواص هذا المحرك مما يفيد في استخدام هذا النوع من المحركات بالشكل الأفضل. وقبل البدء بدراسة اختبارات المحرك لا بد من إعطاء فكرة عن كيفية قياس المقاومة الأومية لملفات الجزء المتحرك والثابت وهنا يمكن أن نميز حالتين:

حالة التوصيل النجمي λ.

حالة التوصل المثلثي Δ.

كما في الشكل (11).



الشكل (11-4)

توصيل نجمي λ

توصيل مثلث Δ

من الشكل (11) وفي حالة التوصيل النجمي يمكن أن نكتب:

$$2R_1 = \frac{U_{DC}}{I_{DC}} \qquad (62)$$

ومنه مقاومة الطور الواحد:

$$R_1 = \frac{U_{DC}}{2.I_{DC}} \quad [\Omega / phase \quad] \qquad (63)$$

أما في حالة التوصيل المثلثي Δ فتكون قيمة مقاومة الطور الواحد:

$$R_1 = \frac{3}{2}\frac{U_{DC}}{I_{DC}} \quad [\Omega / phase \quad] \qquad (64)$$

كما أنه يجب التنويه إلى أن المقاومة في حالة استخدام التيار المتناوب تتأثر بالظاهرة القشرية وارتفاع درجة الحرارة لذلك تؤخذ كما يلي: $R_{\sim} = (1.2 \div 1.4)R_{DC}$

حيث:

R1: مقاومة الطور الواحد وتقاس بالأوم

UDC: التوتر المستمر ويقاس بالفولط

IDC: التيار المستمر ويقاس بالآمبير

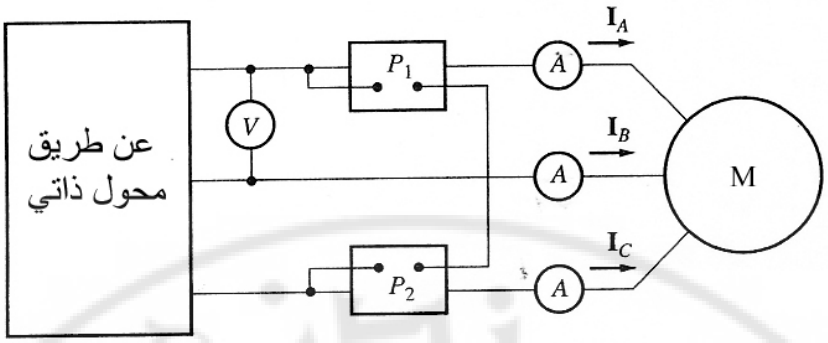
R ~: المقاومة عند تطبيق توتر متناوب وتقاس بالأوم

RDC: المقاومة عند تطبيق توتر مستمر وتقاس بالأوم

1- تجربة اللاحمل: No-load Test:

إن تجربة اللاحمل للمحرك التحريضي 3φ تمكننا من قياس الضياعات الناتجة في حالة اللاحمل والمقصود بها الضياعات الحديدية حيث يمكننا قياس ضياعات اللاحمل، I0 وعامل الاستطاعة $\cos\varphi$ واستطاعة اللاحمل وأيضاً تعطينا فكرة عن مفاقيد الاحتكاك.

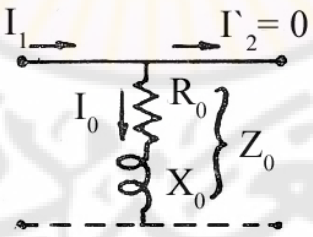
والشكل (12) يبين شكل دارة التوصيل في حالة اللاحمل.



الشكل (12) توصيل تجربة اللاحمل

حيث تحتاج هذه التجربة لثلاث مقاييس تيار ومقياس فولط (توتر) ومقياسي استطاعة لتربط مع المحرك التحريضي المغذى من منبع ثلاثي الطور. ويجب الانتباه هنا إلى وضع مقاييس التيار أقرب ما يمكن للمحرك حتى تستطيع قياس التيار المستجر بدقة كافية نظراً لصغر قيمته مقارنة بالتيار الاسمي (عند التحميل الاسمي). من التجربة يمكن الملاحظة بأنه عند تطبيق توتر اسمي على ملفات الثابت للمتحرك والمحرك يعمل على الفراغ (حالة اللاحمل) فإن الاستطاعة المستجرة من الشبكة والمقاسة بمقاييس الاستطاعة تعبر عن الضياعات الحديدية (مع إهمال تأثير التيار I0 على ملفات الجزء الثابت).

وفي هذه الحالة تكون سرعة دوران المحرك n قريبة من السرعة التزامنية n1 ولذلك تكون قيمة الانزلاق S صغيرة جداً والشكل (13) يبين الدارة المكافئة للمحرك التحريضي 3φ (لطور واحد) في حالة اللاحمل.



الشكل (13) الدارة المكافئة للمحرك التحريضي 3φ في حالة اللاحمل (لطور واحد)

بتطبيق توتر اسمي U1 على ملفات الجزء الثابت للمحرك يمكن حساب استطاعة اللاحمل P0 كما يلي:

$$P0 = P1 + P2 \qquad [Watt] \qquad (66)$$

وكذلك يمكن حساب عامل الاستطاعة $\cos\varphi_0$ وذلك بإهمال ضياعات الاحتكاك ΔPf كما يلي:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{m_1.U_1.I_1} \qquad (67)$$

حيث m1: عدد أطوار الثابت وهو في هذه الحالة 3 = m1.

ويجب الإشارة هنا إلى أن قيمة عامل الاستطاعة $\cos\varphi_0$ في المحرك التحريضي تكون أقل من قيمته في المحول نتيجة وجود الثغرة الهوائية والتي تتطلب تياراً ردياً Iμ أكبر لإنتاج السيالة اللازمة لتغلب على المفاعلة المغناطيسية للثغرة الهوائية.

كما أنه يجدر الملاحظة بأن عامل الاستطاعة في المحرك التحريضي $\cos\varphi_0$ في حالة اللاحمل ينقص مع زيادة عدد أقطاب الآلة (أي مع نقصان سرعة الدوران) وكذلك يمكن الملاحظة بأن عامل الاستطاعة ينقص كلما قل الحمل المطبق على المحرك.

لذلك ينصح بعدم تشغيل المحركات التحريضية على الفراغ في المصانع وذلك لتأثيرها السيئ على عامل الاستطاعة الكلي في المصنع.

من استطاعة اللاحمل والتي تكون بحدود %(4 ÷ 2) من الاستطاعة الاسمية للمحرك يمكن الحصول على R0، X0، Z0 كما يلي:

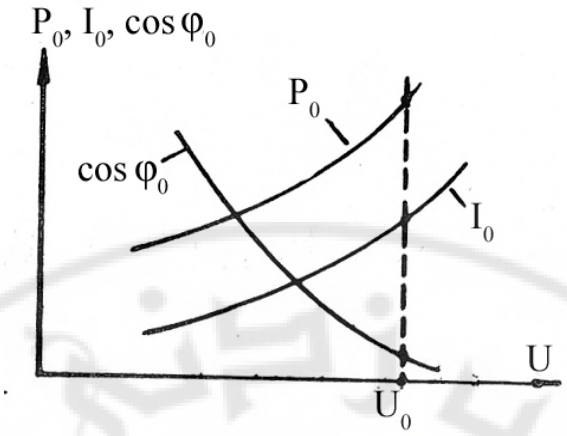
$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} \quad [\Omega / phase] \qquad (68)$$

$$R_0 = \frac{P_0}{m_1.I_0^2} \quad [\Omega / phase] \qquad (69)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad [\Omega / phase] \qquad (70)$$

حيث Z0 = R0 + j X0 الممانعة المغناطيسية للمحرك.

منحنيات P0 و I0 و $\cos\varphi_0$ بدلالة التوتر المطبق على ملفات الجزء الثابت موضحة بالشكل(14).



الشكل (14) منحنيات تجربة اللاحمل بدلالة U

أما الاستطاعة المفقودة بالنواة الحديدية والاحتكاك فتعطى بالعلاقة:

$$P'_0 = P_0 - 3I_0^2 R_1 = \Delta P_f + \Delta P_{Fe} \quad (71)$$

حيث:

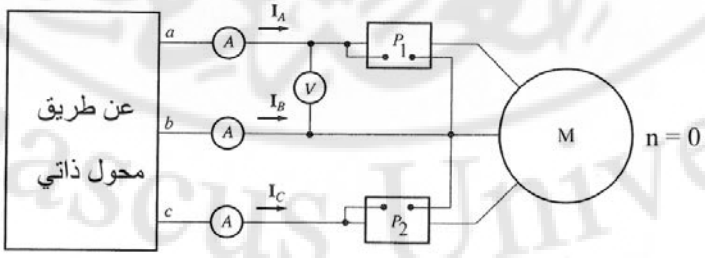
ΔPf: ضياعات الاحتكاك وتمثل كفاءة المضاجع والرولمانات

ΔPFe: الضياعات الناتجة عن التعويق المغناطيسي والتيارات الإعصارية ولها علاقة بنوع المعدن وسماكة الرقائق المصنوع منها المحرك

وتكون النسبة الأكبر ΔPFel (75%) بسبب التيارات الإعصارية أما النسبة الباقية فتتولد بسبب التعويق المغناطيسي.

2- تجربة القصر: Short-circuit Test:

ويمكن من هذه التجربة الحصول على تيار القصر واستطاعة القصر وأيضاً معامل الاستطاعة عند التوتر الاسمي ويتم توصيل الدارة كما في الشكل (15)



الشكل (15) دارة توصيل تجربة القصر في المحرك التحريضي 3φ ثلاثي الطور

حيث يتم إيقاف المحرك عن الدوران (أي n=0) بواسطة أداة ميكانيكية عند توتر تغذية لملفات الجزء الثابت تسمح بمرور التيار الاسمي للمحرك I1n (في هذه التجربة لا يطبق التوتر الاسمي الكلي). ومن ثم تتم قراءة المقاييس الموصولة إلى هذه الدارة وهي مقاييس التوتر والتيار والاستطاعة.

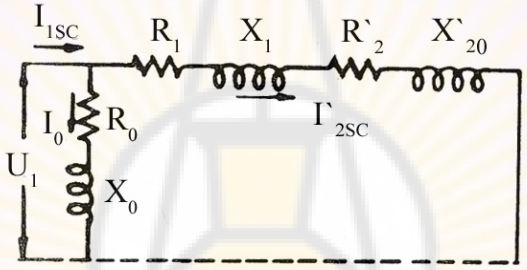
فعند سرعة n = 0 أي S = 1 وعند مرور التيار الاسمي في ملفات الثابت فيكون

f2 = f1

وأيضاً:

$$R'_2\left(\frac{1-S}{S}\right)=0$$

وهذه الحالة مشابهة لحالة القصر في المحول والشكل (16) يبين الدارة المكافئة للمحرك التحريضي 3φ في حالة القصر (لطور واحد).



الشكل (16) الدارة المكافئة للمحرك في حالة القصر

وبفرض تطبيق التوتر الاسمي U1n على ملفات الثابت فسوف يكون تيار القصر I1SC كبير وتكون قيمته بحدود (4 ÷ 7) مرات من قيمة التيار الاسمي للمحرك حيث القيمة الصغرى تخص المحركات ذات الاستطاعات الصغيرة والكبرى تخص المحركات ذات الاستطاعات الكبيرة وتكون الاستطاعة المستجرة في هذه الحالة وهي استطاعة القصر PSC مع إهمال تيار اللاحمل I0 نظراً لصغر قيمته كما يلي:

$$PSC = P1 + P2 \quad [Watt] \qquad (72)$$

ويمكن كتابة المقاومة الأومية المكافئة والممانعة المكافئة كما يلي:

$$R_{eq}=\frac{P_{SC}}{m_1.I_{1SC}^2} \quad [\Omega/phase] \qquad (73)$$

$$Z_{eq}=\frac{U_{1SC}}{I_{1SC}} \quad [\Omega/phase] \qquad (74)$$

ومنه يمكن حساب Xeq المفاعلة الردية كما يلي:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \qquad (75)$$

حيث:

$$R_{eq} = R_1 + R'_2$$
$$X_{eq} = X_1 + X'_{20}$$

كما أنه يمكن أن نكتب العلاقة التقريبية التالية:

$$\frac{X_1}{R_1} \approx \frac{X'_{20}}{R'_2} \approx \frac{X_{eq}}{R_{eq}} \qquad (76)$$

أما قيمة عامل الاستطاعة $\cos\varphi_{SC}$ فتحسب كما يلي:

$$\cos\varphi_{SC} = \frac{P_{SC}}{m_1.U_{1SC}.I_{1SC}} \qquad (77)$$

أو:

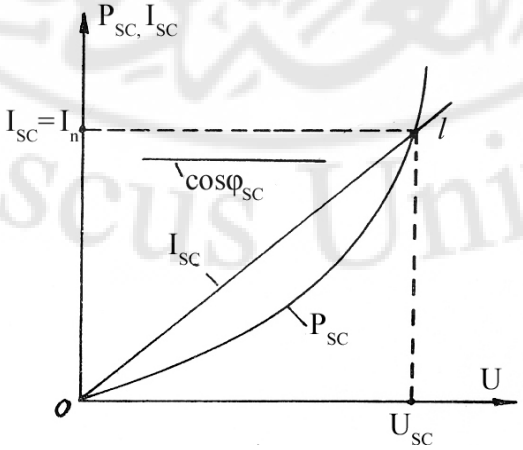
$$\cos\varphi_{SC} = \frac{R_{eq}}{Z_{eq}} \qquad (78)$$

وتكون قيمة عامل الاستطاعة في هذه الحالة $\cos\varphi_{SC}$ أكبر من قيمته في حالة اللاحمل $\cos\varphi_0$ حيث تصل قيمته إلى $\cos\varphi_{SC} = 0.4$.

كما أن استطاعة القصر كنسبة لاستطاعة الخرج الاسمية Pmech.n تعطى كما يلي:

$$P_{SC}\% = \frac{P_{SC}}{P_{mech.n}} \times 100 = (4 \div 10)\%$$

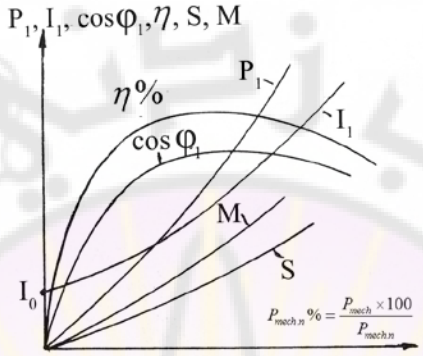
ويبين الشكل (17) منحنيات الاستطاعة والتيار بدلالة التوتر المطبق على ملفات الجزء الثابت في تجربة القصر:



الشكل (17) منحنيات PSC ، ISC مع USC

3- تجربة التحميل: Load Test:

والغاية من هذه التجربة هو إيجاد منحنيات التحميل للآلة ويتم ذلك بتحميل المحرك باستطاعات مختلفة ويتم عندها قياس التوتر والاستطاعة والانزلاق ... وترسم منحنياتها بدلالة الاستطاعة الميكانيكية المربوطة على محور الآلة كما في الشكل (18).



الشكل (18) منحنيات التشغيل للمحرك التحريضي 3φ

طرق إقلاع المحرك التحريضي الثلاثي الطور:

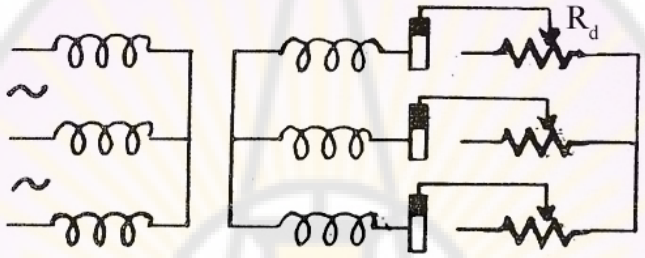
تختلف ظروف إقلاع المحرك التحريضي 3φ وذلك بسبب مجموعة من العوامل المؤثرة والتي تلعب دوراً كبيراً في اختيار طريقة الإقلاع المناسب للمحرك . ضمن هذه العوامل المؤثرة نذكر أولاً نوع المحرك التحريضي هل ذو دائر ملفوف أم ذو قفص سنجابي وكذلك استطاعة المحرك حيث يمكن تصنيف المحركات حسب استطاعتها كما يلي؛ استطاعات صغيرة حتى 25 KW، استطاعات متوسطة حتى 150 KW، واستطاعات كبيرة حتى 1000 KW وأيضاً استطاعات ضخمة ولا بد هنا من الإشارة إلى التوتر المصمم عليه المحرك حيث تعتبر التوترات حتى 3 KV توترات منخفضة وحتى 6 KV توترات متوسطة وحتى 15 KV توترات عالية.

ومن العوامل الأساسية المؤثرة على إقلاع المحركات التحريضية لا بد أن نذكر ظروف إقلاع هذه المحركات أي هل سيقلع المحرك بدون حمل ومن ثم يطبق الحمل تدريجياً حيث في هذه الحالة لا تظهر أية مشاكل أثناء الإقلاع أم أن المحرك سيقلع تحت الحمل وفي هذه الحالة لا بد للمحرك أن يملك العزم الكافي للإقلاع مع المحافظة على قيمة التيار المستجر ضمن الحدود المسموح بها مما يتطلب استخدام طرق معينة أثناء الإقلاع كما أن أنواع الأحمال التي يقودها المحرك وكذلك نوع منبع التغذية هل هو شبكة كبيرة أم مجموعة توليد يلعب دوراً هاماً في اختيار طريقة الإقلاع.

1- إقلاع المحرك التحريضي ذو الدائر الملفوف:

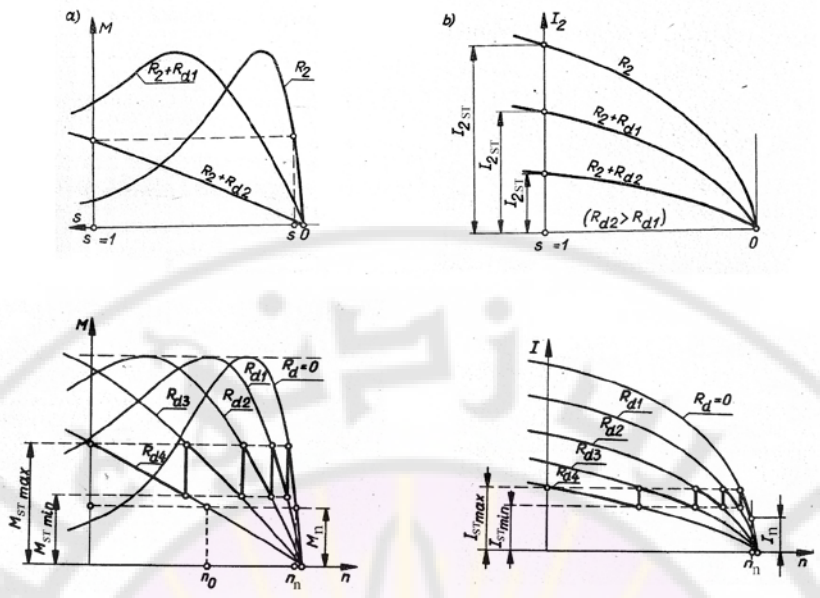
يكون المحرك في حالة إقلاع في الفترة الواقعة بين لحظة تطبيق التوتر على ملفات الثابت إلى لحظة وصوله للسرعة الاسمية.

ففي هذا النوع من المحركات وللمحافظة على قيمة التيار المستجر من الشبكة أثناء الإقلاع ضمن الحدود المسموح بها يمكن إقلاع المحرك عن طريق إدخال مقاومات إضافية موصولة على التسلسل مع ملفات الدائر حيث يتم إنقاص قيمة هذه المقاومات حتى نصل إلى السرعة الاسمية للمحرك عندها تكون المقاومة الإضافية قد فصلت عن الدائر والشكل (19) يبين طريقة توصيل المقاومات الإضافية Rd مع ملفات الدائر.



الشكل (19) توصيل مقاومات الإقلاع مع ملفات الدائر

كما نلاحظ من الشكل (20) عند بداية الإقلاع (S = 1) تكون قيمة عزم الإقلاع صغيرة ولكنها تزداد عند وصل المقاومات الإضافية Rd على التسلسل مع ملفات الدائر بينما تكون قيمة تيار الإقلاع كبيرة عند (S = 1) ولكنها تقل عند إضافة المقاومات Rd. أي إن إضافة المقاومات Rd بهذه الطريقة تقلل من قيمة تيار الإقلاع وتزيد عزم إقلاع المحرك وهذا هو المطلوب من المحرك أي يكون ذو عزم إقلاع كبير وتيار إقلاع صغير.



الشكل (20) تأثير وصل المقاومات Rd

a. علاقة العزم مع الانزلاق والسرعة – b. علاقة التيار مع الانزلاق والسرعة

ويتم ذلك بإدخال كامل المقاومة Rd عند بداية الإقلاع ويتم إخراجها على مراحل حتى يصل المحرك إلى السرعة الاسمية. وتكون هذه المقاومات مصممة لتتحمل تيار الإقلاع (فقط خلال فترة الإقلاع) وتكون عادة قيمة هذا التيار مساوية لضعف التيار الاسمي للمحرك. ويتم عادةً وضع هذه المقاومات الإضافية ضمن وعاء زيت وذلك لتبريدها.

من العلاقة (53) ومن الدارة المكافئة للمحرك وعند الإقلاع حيث S = 1 نكتب علاقة عزم الإقلاع وتيار الإقلاع كما يلي:

$$M_{ST}=\frac{K.U_1^2.R_2'}{(R_1+R_2')^2+(X_1+X_{20}')^2}\ \text{[N.m]} \qquad (79)$$

$$I_{ST}=\frac{U_1}{\sqrt{(R_1+R_2')^2+(X_1+X_{20}')^2}} \qquad (80)$$

وبعد إضافة المقاومات Rd على التسلسل مع ملفات الدائر نحصل على:

$$M_{ST}'=\frac{K.U_1^2.(R_2'+R_d')}{(R_1+R_2'+R_d')^2+(X_1+X_{20}')^2} \qquad (81)$$

و:

$$I'_{ST} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_d)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (82)$$

ومن العلاقات الأربع السابقة يمكن أن نكتب:

$$\frac{I'_{ST}}{I_{ST}} = \sqrt{\frac{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}{(R_1 + R'_2 + R'_d)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (83)$$

و:

$$\frac{M'_{ST}}{M_{ST}} = \frac{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}{(R_1 + R'_2 + R'_d)^2 + (X_1 + X'_{20})^2} \frac{R'_2 + R'_d}{R'_2} \quad (84)$$

ويمكن أن نكتب العلاقة الأخيرة بالشكل:

$$\frac{M'_{ST}}{M_{ST}} \approx \frac{R_2 + R_d}{R_2} \quad (85)$$

من ميزات هذه الطريقة:

نعومة الإقلاع (يعتمد على عدد مراحل الإقلاع).

زيادة عزم الإقلاع وعامل الاستطاعة مع نقصان تيار الإقلاع.

التخفيف من الصدمة الكهربائية على الشبكة المغذية وخاصة بالنسبة للمحركات ذات الاستطاعات الكبيرة.

التخفيف من الصدمة الميكانيكية على الحمل الميكانيكي.

يستخدم هذا النوع من المحركات في إدارة الأحمال الكبيرة وخاصة الروافع بسبب ما تؤمنه من عزم إقلاع كبير وتيار إقلاع صغير.

2- إقلاع المحرك التحريضي ذو القفص السنجابي:

يمكن إقلاع المحركات التحريضية ذات الاستطاعات الصغيرة وحتى المتوسطة أحياناً بالطريقة المباشرة أي بوصلها مباشرة إلى منابع التغذية ولكن يجب الانتباه هنا إلى التيار الكبير الذي سيستجره المحرك من الشبكة أثناء فترة الإقلاع وهو بحدود (4÷7) مرات من التيار الاسمي لذلك سيؤدي إلى ظهور هبوط توتر كبير تؤدي في النتيجة إلى إعاقة إقلاع المحرك نفسه وأيضاً إلى الإضرار بالأجهزة والآلات الأخرى المربوطة على الشبكة نفسها، لذلك يتم عادةً تحديد الاستطاعات والتوترات ونوعية الأحمال التي يسمح بإقلاعها بهذه الطريقة دون استخدام وسائل إقلاع ولكن لا بد من تحقق شرطين أساسيين وهما:

أن لا يزيد هبوط التوتر في الشبكة الناتج عن إقلاع المحرك عن 15% أثناء فترة الإقلاع.

أن لا يؤثر هذا الإقلاع على استقرار الشبكة ولا على أداء الأحمال المربوطة عليها.

وتستخدم هذه الطريقة عادة لإقلاع محركات باستطاعات حتى 100 KW وبتوترات (6÷15) KV وذلك عندما يراد الحصول على عزم إقلاع كبير. هذا ويجب الانتباه إلى أن استطاعة الشبكة ومهما اختلفت ظروف الإقلاع يجب ألا تقل عن (2÷1.4) مرة من استطاعة المحرك فيما عدا ذلك يتم إقلاع المحركات التحريضية ذات القفص السنجابي باستخدام وسائل مساعدة للإقلاع وهي:

طريقة الإقلاع (نجمي – مثلثي).

طريقة إدخال مقاومة (مفاعلة) على التسلسل مع ملفات الجزء الثابت.

طريقة الإقلاع عن طريق محول ذاتي.

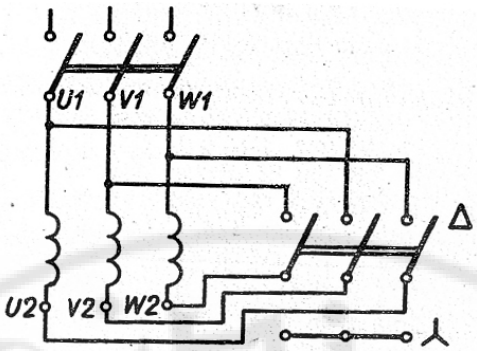
طرق أخرى.

1- طريقة إقلاع (نجمي – مثلثي):

تعتبر هذه الطريقة من أبسط طرق إقلاع المحركات التحريضية 3φ ذات القفص السنجابي.

والشكل (21) يبين مخطط توصيل هذه الطريقة.

وتستخدم هذه الطريقة إذا كانت ملفات الجزء الثابت في المحرك موصولة بشكل مثلثي عند عمل المحرك ولذلك يمكن أن نقلع المحرك عن طريق ربط ملفات الثابت بشكل نجمي حيث يتم تخفيض توتر الطور الواحد بمقدار $\sqrt{3}$ بينما تهبط قيمة العزم بمقدار 3 مرات حيث أن العزم يتناسب مع مربع التوتر. وكذلك تهبط قيمة التيار بالطور بمقدار $\sqrt{3}$ حيث أن تيار الخط في توصيله Δ يكون أكبر من تيار الطور بمقدار $\sqrt{3}$ ($I_L = \sqrt{3}I$) وهذا يعني أن التيار المستجر من الشبكة في توصيله λ (IL = I) يكون أصغر بثلاث مرات من التيار المسحوب في توصيلة Δ وبسبب الإشباع في حديد المحرك تكون قيمة هبوط العزم وتيار الخط أقل من 3 مرات.

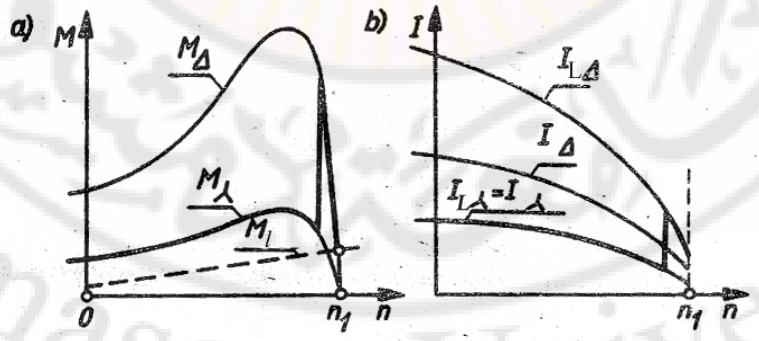


الشكل (21) طريقة توصيل دارة إقلاع Δ / λ لمحرك تحريضي 3φ ذو قفص سنجابي

ويجب التأكيد هنا على أن هذه الطريقة تستخدم إذا كان توتر التغذية هو التوتر الاسمي لعمل المحرك بتوصيلة Δ. فمثلاً إذا كان مذكوراً في اللوحة الاسمية للمحرك أن توتر التغذية هو 380/220 هذا يعني أن المحرك في الظروف العادية يعمل بتوتر 380 بتوصيلة λ وتوتر 220 بتوصيلة Δ.

لذلك فإن طريقة الإقلاع نجمي – مثلثي لهذا المحرك يمكن أن تتم إذا كان توتر التغذية 220 V 3φ. أما إذا أردنا إقلاع محرك بتوتر تغذية 380 V بطريقة Δ / λ فيجب أن يذكر في لوحته الاسمية أن توتر التغذية 380 V / 660 – Δ / λ كما أنه يمكن أن يذكر فقط 380 V – Δ.

الشكل (22) يبين منحنيات عزم وتيار الإقلاع مع السرعة بطريقة Δ / λ. وتستخدم هذه الطريقة لإقلاع المحركات ذات الاستطاعات الخفيفة ، بتوترات منخفضة وأحمال ذات عزوم خفيفة .



الشكل (22) منحنيات العزم والتيار بدلالة السرعة n لمحرك تحريضي ثلاثي الطور

حيث IL تيار الخط و I تيار الطور

2- طريقة إدخال مقاومة (مفاعلة) على التسلسل مع ملفات الثابت:

إن إدخال مقاومة أو مفاعلة على التسلسل مع ملفات الجزء الثابت في هذا النوع من المحركات عند الإقلاع يمكن اعتباره تكبير لممانعة المحرك مما يؤدي إلى تصغير قيمة التيار المستجر عند الإقلاع، وفي نفس الوقت يظهر هبوط للتوتر على المقاومة (المفاعلة) المضافة مما يؤدي إلى إنقاص قيمة التوتر المطبق على ملفات المحرك وبالتالي تقليل قيمة عزم الإقلاع للمحرك. ومع زيادة سرعة المحرك فإن التيار المستجر يصغر وبالتالي يقل هبوط التوتر على المقاومة (المفاعلة) المضافة مما يؤدي إلى زيادة التوتر المطبق على ملفات الثابت. وعند وصول المحرك إلى السرعة الاسمية تقتصر المقاومة (المفاعلة) المضافة وتخرج من الدارة.

ففي حالة إضافة مقاومة أومية يكون:

$$\frac{I'_{ST}}{I_{ST}} = \sqrt{\frac{{R_{eq}}^2 + {X_{eq}}^2}{(R_{eq}+R)^2 + {X_{eq}}^2}} < 1 \qquad (86)$$

وأيضاً:

$$\frac{M'_{ST}}{M_{ST}} = \frac{{R_{eq}}^2 + {X_{eq}}^2}{(R_{eq}+R)^2 + {X_{eq}}^2} < 1 \qquad (87)$$

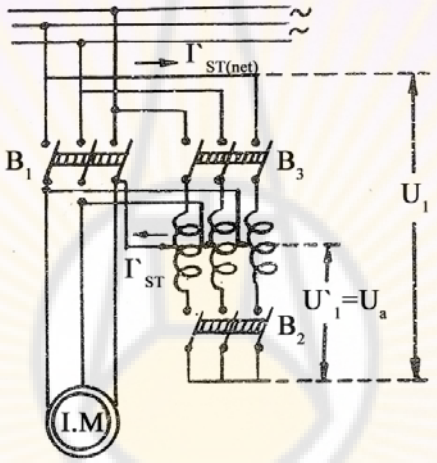
وبشكل مشابه يمكن أن نحصل على العلاقات الخاصة بحالة توصيل مفاعلة X على التسلسل مع ملفات الثابت. حيث تستخدم هذه الطريقة لإقلاع محركات ذات استطاعات كبيرة وتوترات عالية لإقلاع أحمال ذات عزوم خفيفة أما طريقة إضافة مقاومة R على التسلسل مع ملفات الثابت فهي أفضل من سابقتها نظراً لارتفاع عامل الاستطاعة مما يزيد عزم الإقلاع لنفس التيار المستجر وتستخدم هذه الطريقة (توصيل R) في حالات الاستطاعات الصغيرة نظراً للضياعات الكهربائية فيها.

3- طريقة استخدام محول ذاتي في الإقلاع:

تستخدم هذه الطريقة بشكل قليل وعندما لا يمكن استخدام طرق أبسط وأرخص في الإقلاع، ويتناسب تيار الإقلاع هنا مع توتر التغذية مع ضرورة الانتباه إلى أن المحول الذاتي يسحب تيار إضافي من الشبكة وهو تيار المغنطة.

عند بداية الإقلاع تتم تغذية المحرك عن طريق المحول حتى يصل إلى سرعة قريبة من سرعته الاسمية عندها نحول ملفات المحول لتعمل بشكل ملفات تعويق موصولة على التسلسل مع ملفات الثابت في المحرك مما يؤدي إلى ازدياد التوتر المطبق على المحرك وبالتالي العزم. يفصل بعدها المحول بشكل كامل.

وتستخدم هذه الطريقة لإقلاع المحركات ذات الاستطاعات العالية وأحمال ذات عزوم كبيرة نسبياً، هذا مع العلم أن المحول يستخدم في هذه الحالة كخافض للتوتر والشكل (23–4) يبين طريقة الإقلاع حسب هذه الطريقة ويجب الملاحظة هنا أنه عند نسبة تحويل $Ka = \sqrt{3}$ تكون هذه الطريقة مشابهة لطريقة نجمي – مثلثي.



الشكل (23) طريقة إقلاع محرك تحريضي 3φ باستخدام محول ذاتي

تنظيم سرعة المحرك التحريضي ثلاثي الطور:

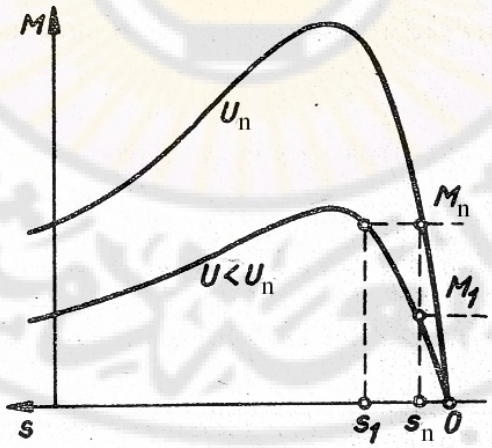
عند تغير قيمة عزم الحمولة المطبق على محور المحرك فإن سرعة دوران هذا المحرك تتغير ومع أن هذا التغيير يكون صغيراً ضمن مجال عمل الآلة المستقر فإنه من الضروري أن يتم تنظيم سرعة المحرك عند عزم حمولة ثابت أو متغير بعلاقة السرعة. وكما مر معنا سابقاً فإن سرعة المحرك تعطى بالعلاقة:

$$n = n_1(1-S) = \frac{60\,f_1}{P}(1-S) \qquad (88)$$

ومنه فإن سرعة دوران المحرك تعتمد على التردد f1 (تردد منبع التغذية) وعلى عدد الأقطاب 2P وعلى الانزلاق S. حيث يمكن التحكم بالانزلاق عن طريق تغيير توتر التغذية أو بإدخال عناصر تنظيم مع ملفات الدائر.

1- تأثير التوتر على عمل المحرك التحريضي:

إن عزم دوران المحرك التحريضي 3φ عند سرعة معينة يتناسب مع مربع توتر التغذية كما مر سابقاً معنا. الشكل (24) يبين منحن علاقة العزم مع التوتر في هذا النوع من المحركات عند توترين مختلفين.



الشكل (24) تأثير التوتر على سرعة وزيادة تحميل محرك تحريضي 3φ عند عزم حمولة ثابت

مع ذلك فإن سرعة دوران الحقل المغناطيسي ومنه السرعة التزامنية n1 تبقى ثابتة لأنه لا علاقة لها بالتوتر بل بالتردد وعدد الأقطاب. ومنه فعند تخفيض قيمة توتر التغذية وعند عزم حمولة ثابت فإن سرعة دوران المحرك تقل.

يمكن الحصول على سرعة الدوران الجديدة وذلك بحساب أولاً العزم M1 على مميزة ميكانيكية جديدة للمحرك وعند الانزلاق الاسمي ومنه يمكن حساب الانزلاق الجديد.

بفرض أن المميزة المغناطيسية خطية فعند عزم ثابت وتوتر مخفض فإن الاستطاعة المعطاة تكون ثابتة عملياً (لا تتغير) ومنه فالاستطاعة المستجرة تتغير بشكل بسيط. وكذلك التيار المستجر من الشبكة يزداد مما يؤدي إلى زيادة الضياعات في ملفات الثابت (ضياعات حرارية) مما يؤثر على عازلية الثابت وكذلك في نفس الوقت تقل قيمة الضياع في القلب الحديدي.

2- تنظيم السرعة عن طريق تغيير التردد:

من العلاقة (88) نرى تأثير التردد على سرعة دوران الحقل المغناطيسي ومنه على السرعة التزامنية n1 للمحرك وكذلك كما مر معنا سابقاً وبإهمال قيمة المقاومة R1 يمكن أن نكتب علاقة العزم الأعظمي كما يلي:

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 . U_1^2}{2\Omega_1 (X_1 + X'_{20})}$$

$$= \pm \frac{m_1 . U_1^2}{2\Omega_1 . X_{eq}} \qquad (4-95)$$

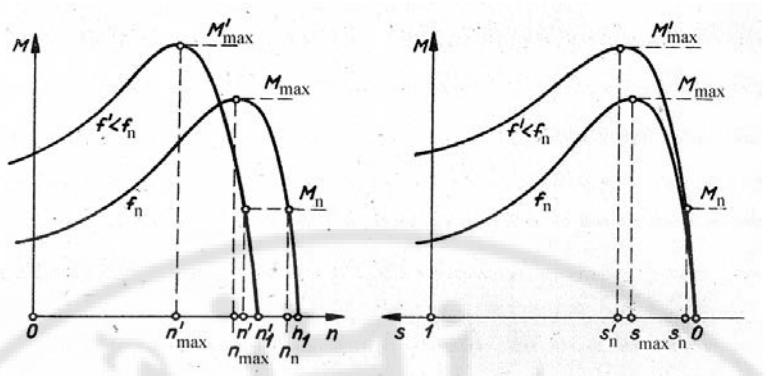
وبما أن Ω_1 و Xeq تتناسب مع التردد فمن العلاقة الأخيرة نجد أن العزم الأعظمي يتناسب عكساً مع التردد وكذلك الانزلاق حيث:

$$S_{\max} = \pm \frac{R'_2}{(X_1 + X'_{20})}$$

$$S_{\max} = \pm \frac{R'_2}{X_{eq}} \qquad (4-96)$$

أي أن تخفيض قيمة التردد f1 (تردد التغذية) وعند توتر تغذية ثابت سوف يؤدي إلى انخفاض سرعة المحرك .

والشكل (25) يوضح منحنيات M = f (n) و M = f (S) عند التردد الاسمي وعند تردد مخفض.



الشكل (26) تأثير تغيير تردد التغذية على السرعة والانزلاق وكذلك العزم الأعظمي لمحرك تحريضي 3φ عند f < fn

وعند تخفيض التردد فإن الفيض المغناطيسي يزداد، إذاً بثبات التوتر المغذي يمكن أن نحصل بالتقريب على الـ ق.م.ك المتحرضة في الثابت من العلاقة:

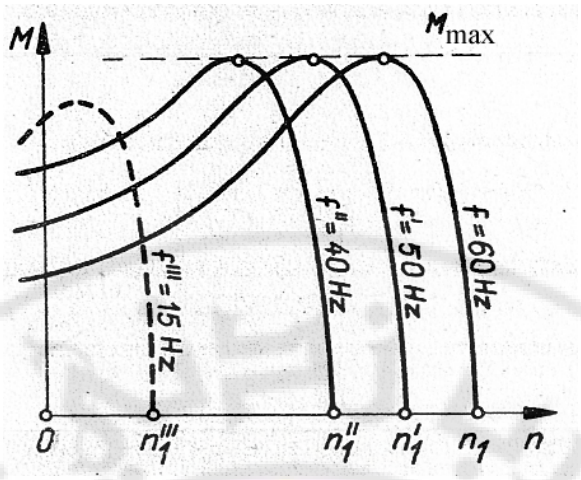
$$E_1 = 4{,}44.\phi_m.N_1.Ku_1.f_1 \qquad (4\text{-}97)$$

من العلاقة السابقة نجد أن $f_1.\phi_m$ يجب أن تبقى ثابتة مع تخفيض التردد f1 مما سيؤدي إلى زيادة ϕ_m ومنه سيؤدي إلى زيادة الضياعات في القلب الحديدي.

إن تنظيم سرعة المحرك عن طريق تغيير التردد تتم في نفس الوقت مع تغيير توتر التغذية (الذي يتغير بالتناسب مع التردد).

وبفرض إهمال التغييرات الكبيرة والصغيرة جداً للتردد وعند شرط $\frac{U}{f} = const$ يمكن أن نقول أن الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية يبقى ثابتاً. فمن العلاقة (95) نستنتج أن قيمة العزم الأعظمي Mmax تبقى ثابتة.

وبفرض أن تغير التردد يتناسب مع تغير التوتر فإن المميزة الميكانيكية تتغير كما في الشكل (27) مع ملاحظة أنه عند تخفيض التوتر بشكل كبير يظهر تأثير المقاومة R1 المهملة في العلاقات السابقة وتتغير قيمة العزم الأعظمي.



الشكل (27) المميزة الميكانيكية للمحرك التحريضي 3φ

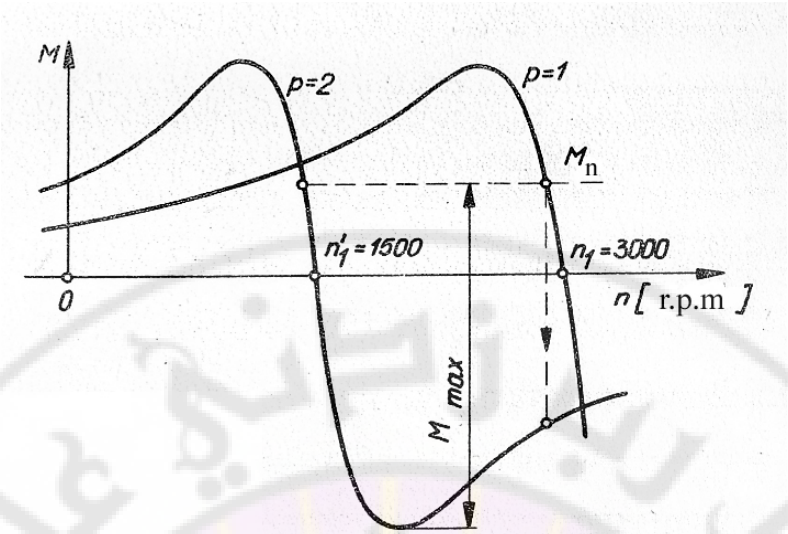
عند تغيير التردد مع $\frac{U}{f}=const$

3- تنظيم السرعة عن طريق تغيير عدد أزواج الأقطاب:

إن تغيير السرعة عن طريق تغيير عدد أزواج الأقطاب في المحرك التحريضي 3φ يستخدم فقط في المحركات التحريضية ذات القفص السنجابي حيث يكفي أن نغير عدد أزواج الأقطاب 2P في الثابت فقط وعددها في الدائر يتناسب تلقائياً مع عددها في الثابت.

حيث تتم هذه الطريقة في المحركات ثنائية وثلاثية السرعات حيث تتوضع الملفات في المجاري نفسها ويبقى أحد هذه الملفات غير فعال. فإذا دار المحرك بسرعة مقابلة لعدد أزواج من الأقطاب أقل فعند الانتقال إلى عدد أزواج أقطاب أكبر فإنه ينتقل إلى مجال عمل الآلة كمولد وإلى مميزة ميكانيكية جديدة كما في الشكل (28) مما يسبب كبح قوي لعزم الحمولة وللعزم الكهرومغناطيسي للمحرك وخاصة أن العزم الأعظمي للعمل كمولد يكون أكبر منه مما هو في حالة عمل الآلة كمحرك.

إن المحركات المتعددة السرعات تلقى رواجاً كبيراً وخاصة في المخارط مما يساعد في تخفيض الكلفة الميكانيكية للآلة والاستغناء عن تغيير السرعة بواسطة التروس.



الشكل (28) المميزة الميكانيكية للمحرك التحريضي الثلاثي الطور عند الانتقال من سرعة إلى سرعة أصغر عن طريق تغيير عدد أزواج الأقطاب

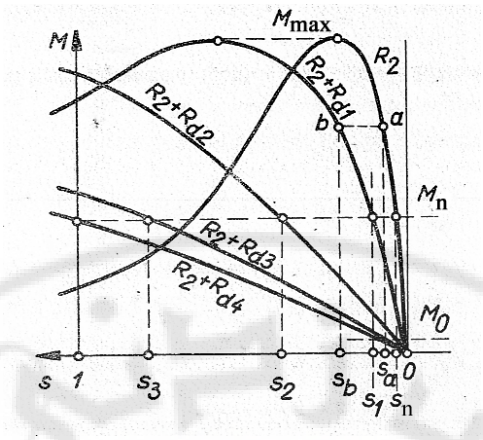
4- تنظيم السرعة عن طريق تغيير مقاومة الدائر:

وتستخدم هذه الطريقة في المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف. إن نقطة العمل الاسمية الواقعة المميزة الطبيعية كما في الشكل (29) تغير وضعها بحيث عند عزم حمولة ثابت تتحقق العلاقة:

$$\frac{R_2}{S_n} = \frac{R_2 + R_{d1}}{S_1} \qquad (98)$$

وبنفس الطريقة عند M = const فإن كل نقطة من المميزة الميكانيكية تنتقل إلى نقطة أخرى بحيث تتحقق العلاقة:

$$\frac{R_2}{S_a} = \frac{R_2 + R_{d1}}{S_b} \qquad (4-99)$$



الشكل (29) تنظيم سرعة محرك تحريضي ثلاثي الطور عن طريق إدخال مقاومة في ملفات الثابت

إن مسألة تنظيم السرعة عن طريق إدخال مقاومة إضافية Rd مع ملفات الجزء الدائر يمكن أن تدرس بمراقبة مجموعة ظواهر تظهر في المحرك عند زيادة مقاومة الدائر.

فعندما يكون المحرك محملاً بعزم معين ويعمل عند انزلاق صغير S، عندها يمكن القول أن عزم المحرك يتناسب مع تيار الدائر، حيث أن الفيض ثابت والزاوية بين $\underline{E}_2$ و $\underline{I}_2$ صغيرة جداً. ففي اللحظة الأولى لإضافة المقاومة Rd مع ملفات الدائر وبسبب عزم عطالة الدائر فإن سرعة المحرك لا تتغير ولا تتغير E2. بل يتغير التيار مما يؤدي إلى إنقاص عزم المحرك، ومنه فعند عزم كبح ثابت فإن سرعة المحرك تقل ويزداد الانزلاق S، وعلى أثر ذلك تزداد قيمة E2 = E20 . S ومنه يزداد تيار المحرك ومن ثم يزداد العزم أيضاً.

إن نقصان سرعة المحرك n وزيادة الـ ق.م.ك E2 وتيار الدائر I2 والعزم يمتد لفترة حتى يصبح عزم المحرك مساوٍ لعزم الحمولة.

باختيار قيم معينة لمقاومة الدائر يمكن الحصول على قيم مختلفة للسرعة وبالتالي للانزلاق S عند عزم حمولة ثابت كما في الشكل (29). إن مجال تنظيم السرعة لهذه الطريقة وبساطة النظام يعتبران من أهم ميزات هذه الطريقة.

إن نظام ربط المقاومات مع الدائر مرت معنا في فقرة إقلاع المحرك التحريضي ذو الدائر الملفوف مع فارق بسيط أن عناصر المنظم في هذه الحالة يجب أن تكون مصممة للعمل فترات طويلة على عكس حالة دارة الإقلاع فعمل المنظم فقط خلال فترة الإقلاع.

فعند عمل المحرك بدون مقاومات إضافية Rd تكون الضياعات النحاسية كما يلي:

$$\Delta P_{cu2} = m_2 . I_2^2 . R_2 \qquad (100)$$

أما بإضافة المقاومة Rd تصبح على الشكل:

$$\Delta P_{cu2} = m_2 . I_2^2 . (R_2 + R_d) \qquad (101)$$

فعند تنظيم السرعة باتجاه السرعة الأقل فإن المفاقيد الحرارية في الدائر تزداد وبإهمال مفاعلة الدائر فيمكن القول أن تيار الدائر يبقى كما هو عندما تبقى قيمة مقاومة الدائر في الدارة المكافئة ثابتة أي:

$$\frac{R_2}{S_n} = \frac{R_2 + R_d}{S_1} \qquad (102)$$

أما بالنسبة للاستطاعة Pw (استطاعة الحقل الدوار):

$$P_w = m_2 . I_2^2 . \frac{R_2}{S} \qquad (103)$$

أما بإضافة المقاومة Rd مع الدائر:

$$P_w = m_2 . I_2^2 . \frac{R_2 + R_d}{S_1} \qquad (104)$$

أي أن الاستطاعة Pw لا تتغير بتغير مقاومة الدائر. أما من نتائج زيادة الانزلاق S هو نقصان الاستطاعة الميكانيكية Pmech:

$$P_{mech} = P_w (1 - S) \qquad (105)$$

حيث تزداد الاستطاعة الضائعة في المقاومة (R2 + Rd).

بإهمال الضياعات في القلب الحديدي والضياعات الحرارية ΔPcu1 في الثابت وكذلك بإهمال ΔPf (الضياعات الميكانيكية) يمكن أن نكتب علاقة المردود كما يلي:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_1} \approx \frac{P_{mech}}{P_w} = \frac{P_w (1 - S)}{P_1} \qquad (4\text{-}106)$$

أي:

$$\eta = 1 - S = \frac{n}{n_1} \qquad (107)$$

وهذا يعني أنه في هذه الحالة يمكن اعتبار المردود مساو لحاصل قسمة سرعة المحرك على السرعة التزامنية.

إن هذه الطريقة تستخدم في حال الحاجة لتقليل سرعة المحرك لفترات قصيرة. وكذلك نستنتج من الشكل السابق أنه في حالة تحميل المحرك يمكن الحصول على مجال كبير للتنظيم أما في حالة اللاحمل فإن السرعة تتغير بشكل بطيء.

وتعتبر هذه الطريقة هي الطريقة الأساسية المستخدمة لتنظيم السرعة في المحركات ذات الدائر الملفوف برغم كل مساوئها.

المراجع:

1 -كتاب آلات التيار المستمر. تأليف د.عباس صندوق و د علي الجازي

2 -كتاب المحولات الكهربائية. تأليف د.هاكوب بوغوص و د هاشم ورقوزق

3 -كتاب المحركات اللاتزامنية (التحريضية) تأليف د.هاكوب بوغوص و د رائد الشرع