

قوى كهربائية

الآلات الكهربائية

كهر ١٥٣



مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التتموي؛ لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية "الآلات الكهربائية" لمتدربي قسم "القوى الكهربائية" للكلية التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

بسم الله الرحمن الرحيم

تمهيد

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على سيد المرسلين نبينا محمد صلى الله عليه وسلم أما بعد :
تعتبر الآلات الكهربائية جزءا أساسيا لا يمكن الاستغناء عنه في جميع المجالات الصناعية. لذا فإنه من
الضروري جدا تعلم الآلات الكهربائية من حيث التركيب والتشغيل والاختيار المناسب لدعم المجالات
الصناعية و تطويرها.

و نقدم هذه الحقيبة في مجال الآلات الكهربائية لتكون جزءا مهما في دعم بناء النهضة الصناعية.
وتحتوي هذه الحقيبة على آلات التيار المستمر، و المحولات، و آلات التيار المتغير.

ونتمنى لمتدربينا الكرام النجاح، والله ولي التوفيق.

تمهيد

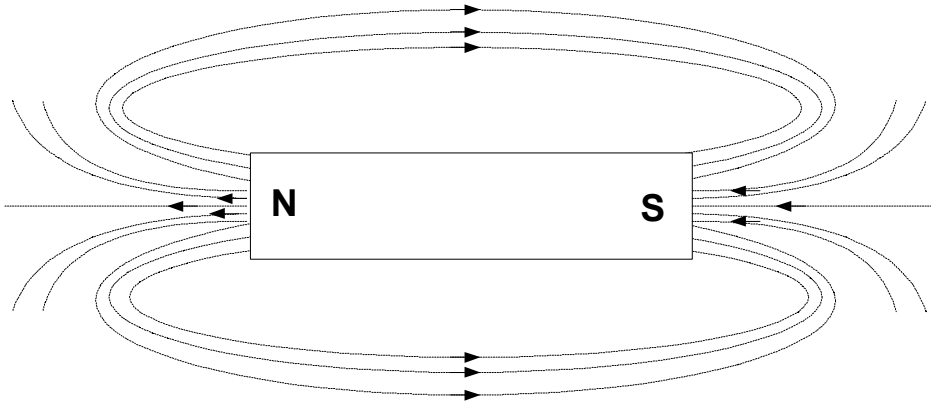
المواد المغناطيسية تشكل جزءا هاما في تركيب الآلات الكهربائية فهي تشكل وتوجه المجالات المغناطيسية التي تمثل الوسط الذي تتم فيه عملية تحويل الطاقة من طاقة ميكانيكية إلى طاقة كهربائية في حالة فعل المولد و العكس صحيح في حالة فعل المحرك .

ففي المحولات تكون الدائرة المغناطيسية مغلقة بينما في الآلات الكهربائية الدوارة تحتوي على عنصرين أساسيين هما العضو الثابت و العضو الدائر منفصلين بثغرة هوائية .

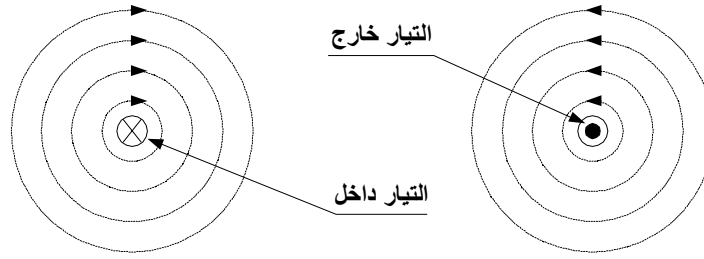
في معظم الآلات الكهربائية ما عدا ذات المغناطيس الدائم ، يتم توليد المجال المغناطيسي بتمرير تيار كهربائي في ملف ملفوفا على مادة حديدية مغناطيسية .

بعض التعريفات الهامة في علم المغناطيسية :

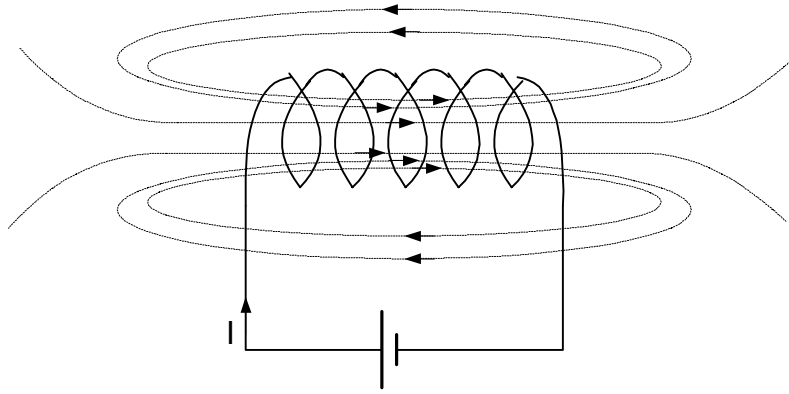
- ١ - المجال المغناطيسي : هو المنطقة الموجودة حول قطعة حديدية ذات مغناطيس دائم أو حول موصل يمر فيه تيار كهربائي حيث يتعرض أي قطب مغناطيسي إذا ما وجد فيها إلى قوة ميكانيكية يسببها المغناطيس الدائم أو التيار .
 - ٢ - المغناطيس الدائم : تولد المادة المكون منها المغناطيس الدائم حولها مجالا مغناطيسيا بدون الحاجة إلى الاستثارة بتمرير تيار في ملف .
 - ٣ - خطوط القوى : هي خطوط المجال المغناطيسي حيث المماس عند أي نقطة على هذا الخط يعطي اتجاه شدة المجال المغناطيسي أو القوة الممغنطة عند هذه النقطة .
- خطوط القوى هي خطوط صورية في المجال المغناطيسي ، تساعد على تصور توزيع هذا المجال وكثافته . كل خط من هذه الخطوط يشكل مسارا مغلقا . الخطوط لا تتقاطع أبدا و لها دائما اتجاه معين ، وتكون دائرية حول موصل طويل و مستقيم عندما يمر فيه تيار كهربائي . انظر الأشكال ١ إلى ٣



شكل ١ : خطوط القوى لمغناطيس دائم

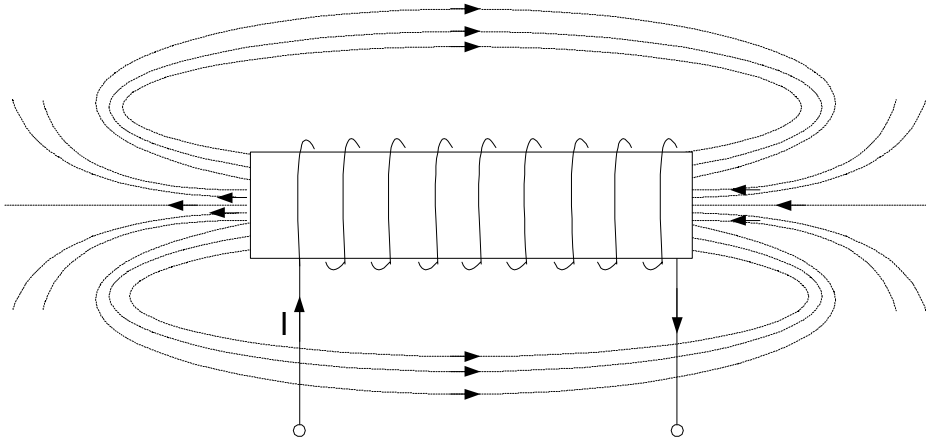


شكل ٢ : خطوط القوى لمجال حول موصل يمر فيه تيار



شكل ٣ : خطوط القوى لمجال ملف يمر فيه تيار

يعطى اتجاه خطوط المجال بقاعدة اليد اليمنى بحيث إذا مسكنا الموصل أو الملف باليد اليمنى تكون الأصابع الأربعة تشير إلى التيار و الإبهام هو الذي يشير إلى القطب الشمالي .
يمكن تقوية شدة مجال الملف باستخدام بعض المواد المغناطيسية داخل الملف كالحديد ، و الصلب ، و الكوبالت فنحصل على ما نسميه بالمغناطيس الكهربائي



شكل ٤ : خطوط القوى لمجال مغناطيس كهربائي

٤ - التدفق المغناطيسي : هو عدد خطوط المجال المغناطيسي الموجودة في الدائرة المغناطيسية و يتم قياسه بالويبر (Waber) .

يحافظ التدفق المغناطيسي على قيمته خلال أي جزء مستقيم في الدائرة المغناطيسية فهو مماثل للتيار في الدوائر الكهربائية .

٥ - شدة المجال المغناطيسي H : يمكن حسابها في الدوائر المغناطيسية البسيطة بتطبيق نظرية أمبير والتي تقول بأن التكامل الخطي لشدة المجال المغناطيسي H حول مسار مغلق يساوي التيار الكلي داخل هذا المسار .

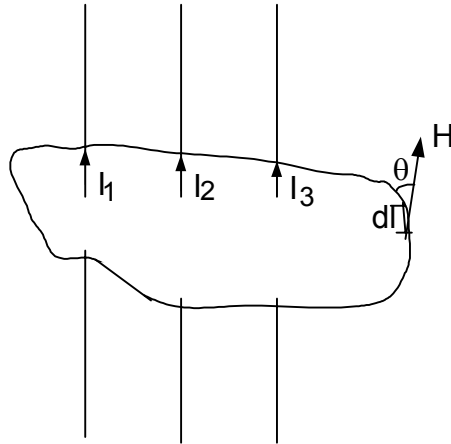
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (1)$$

إذا كان المسار هو خط من خطوط المجال المغناطيسي بحيث $\vec{H}$ مماس على هذا المسار يبسط قانون أمبير

إلى : $\oint H \cdot dl = \sum I$ ، زيادة على هذا إذا كانت الدائرة مكونة من أجزاء متطابقة يكتب قانون أمبير على

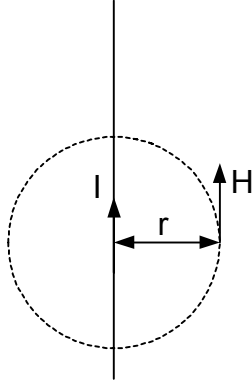
النحو التالي :

$$\sum H.l = \sum I$$



الشكل ٥ : توضيح نظرية أمبير

مثال ١: تعيين شدة المجال المغناطيسي حول موصل يمر فيه تيار كهربائي:



الشكل ٦: تعيين شدة المجال حول موصل يمر فيه تيار

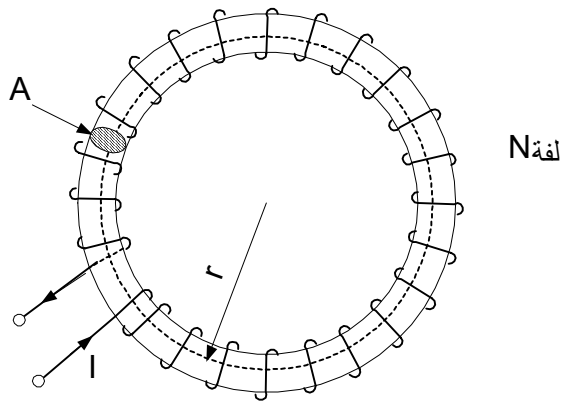
$$H.l = I$$

l هو محيط الدائرة نصف قطرها r , إذا $l = 2\pi r$:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{A/m})$$

تتعلق H بطول المسار المغناطيسي l و بالمصدر المغناطيسي (مغناطيس كهربائي أو مغناطيس دائم)

مثال 2 : عندما يمر تيار خلال ملف له N لفة ملفوفة على قلب حديدي دائري يكون المجال المغناطيسي محصورا في المادة الحديدية , و المجال المغناطيسي خارجها و يسمى بالمجال المتسرب الذي غالبا ما يكون مهملا .



الشكل ٧: شدة المجال لمغناطيس كهربائي على شكل حلقة

الشكل يبين حلقة حديدية ملفوفة عليها ملف عدد لفاته N و يمر فيه تيار I , ليكن مسار مغناطيسي دائري ومتوسط نصف قطره r , شدة المجال المغناطيسي على هذا المسار هي H و من قانون أمبير :

$$\sum H.l = \sum I$$

التيارات داخل المسار المغلق هي NI و طول المسار المغناطيسي هو محيط دائرة نصف قطرها r أي $l = 2\pi r$ لذا نكتب قانون أمبير على النحو التالي :

$$Hl = NI \quad \text{أو} \quad H = \frac{NI}{2\pi r}$$

يسمى المقدار NI القوة الدافعة المغناطيسية وحدتها عدد اللفات بالأمبير .

العلاقة $H = \frac{NI}{l}$ تبين أن شدة المجال المغناطيسي غير متعلقة بنوعية مادة القلب الحديدي وإنما بعدد لفات الملف N , تيار الاستثارة I و الطول المتوسط للمادة المتكون منها هذا القلب الحديدي .

٦ - كثافة التدفق المغناطيسي (أو الحث المغناطيسي) B : هي كمية التدفق المغناطيسي Φ التي تعبر مساحة معينة A تكون عمودية على خطوط المجال المغناطيسي أي إن :

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (٢)$$

وحدتها $\frac{Wb}{m^2}$ أو Tesla

كما يمكن القول أيضا أن الشدة H للمجال المغناطيسي أينما وجد تنتج كثافة تدفق مغناطيسي B التي تمثل التأثيرات الحساسة , غالبا ما تكون على شكل ميكانيكي كقوة لابلاس و العزم الكهرومغناطيسي و العلاقة التي تربطها هي :

$$B = \mu H \quad (٣)$$

و التي تبين أن كثافة التدفق المغناطيسي متعلقة بشدة المجال و بالوسط المتواجد فيه (حديد أو فراغ) .

تسمى μ النفاذية المغناطيسية و هي خاصية كل وسط به مجالا مغناطيسيا .

B و H متناسبان في الهواء و في الفراغ حسب القانون : $B = \mu_0 H$ حيث $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ معال نفاذية الفراغ أو النفاذية المطلقة و يكون منحني الخاصية المغناطيسية $B = f(H)$ خطا مستقيما . تقوى كثافة التدفق المغناطيسي في الأوساط الحديدية المغناطيسية طبقا للعلاقة :

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (٤)$$

حيث μ_r هي معامل النفاذية النسبي للمادة.

$\mu_r = 1$ لأي وسط غير مغناطيسي كالفراغ , و الموصلات (النحاس , و الألمنيوم) , و العوازل.

μ_r تكون ثابتة إلا للمواد غير المتشعبة .

٧ - الممانعة (أو المقاومة) المغناطيسية R_m : تعرف بأنها النسبة ما بين القوة الدافعة المغناطيسية NI و التدفق المغناطيسي Φ :

$$R_m = \frac{NI}{\Phi} \quad (٥)$$

و تعبر هذه العلاقة عن قانون أوم للدائرة المغناطيسية و لمسار مغناطيسي طوله l و يمكن كتابتها أيضا على الشكل التالي :

$$R_m = \frac{NI}{\Phi} = \frac{NI}{BH} = \frac{NI}{\mu HA} = \frac{l}{\mu A}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (٦)$$

هي المقاومة المغناطيسية لدائرة مغناطيسية طولها l ومساحة مقطعها A و نفاذية وسطها $\mu = \mu_r \mu_0$, وحدتها $\frac{At}{Wb}$ أو $(henry)^{-1}$, R_m مماثلة للمقاومة $R = \frac{l}{\sigma A}$ في الدائرة الكهربائية بحيث :

- كلاهما متعلقة بالطول l و مساحة المقطع A
- تعوض الناقلية σ بالنفاذية μ
- تستعمل نفس قوانين التجميع :

- المقاومة المغناطيسية المكافئة لعدة مقاومات مغناطيسية على التوالي تساوي مجموع هذه المقاومات :

$$R_{meq} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots \quad (٧)$$

- المقاومات المغناطيسية على التوازي تكافئها مقاومة مغناطيسية حسب القاعدة هذه :

$$\frac{1}{R_{meq}} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} + \frac{1}{R_{m3}} + \dots \quad (٨)$$

يمكن إعادة كتابة قانون أمبير $\sum H.l = \sum NI$ مع إظهار التدفق المغناطيسي Φ :

$$H_1 l_1 = \frac{B_1}{\mu_1} l_1 = \frac{l_1}{\mu_1 A_1} \cdot \Phi_1 = R_{m1} \cdot \Phi_1$$

لذا لأي دائرة مغناطيسية مغلقة :

$$\sum R_m \cdot \Phi = \sum NI \quad (٩)$$

حيث R_m هي المقاومة المغناطيسية لأي جزء من الدائرة المغناطيسية .

٨- الدائرة المغناطيسية المكافئة

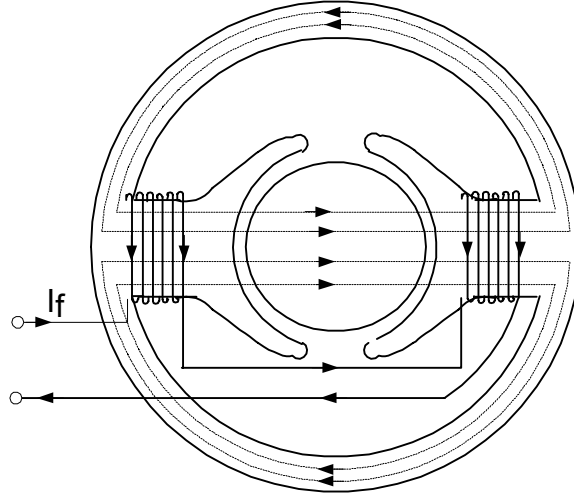
الدائرة المغناطيسية هي عبارة عن مسارات يمر فيها التدفق المغناطيسي تماما , كما أن الدائرة الكهربائية تنشئ مسارات لمرور التيار الكهربائي . و تستخدم الدوائر المغناطيسية في المحولات و الآلات الكهربائية .

القوة الدافعة المغناطيسية NI تنتج تدفقا مغناطيسيا Φ ضد مقاومة مغناطيسية R_m حسب قانون :

$NI = \Phi R_m$ الذي ماهو إلا قانون أوم للدوائر المغناطيسية .

الدائرة المغناطيسية التي تحتوي على ثغرة هوائية :

في الآلات الكهربائية يكون العضو الدائر معزولا فيزيائيا عن العضو الثابت بالثغرة الهوائية كما هو مبين في الشكل (٨) :



الشكل ٨: آلة التيار المستمر

هذه الدائرة التي لها وسطان (الأقطاب من الحديد و الثغرة الهوائية) تسمى بالدائرة المغناطيسية المركبة .
في هذه الدائرة نمثل زيادة على القوة الدافعة المغناطيسية NI مقاومتين :

$$- \text{ في الحديد } R_c = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} , \text{ في الثغرة الهوائية } R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

يعطى التدفق المغناطيسي بالعلاقة : $\Phi = \frac{NI}{R_c + R_g}$ حيث إن $NI = H_c l_c + H_g l_g$ مع العلم أن l_c هو

طول المسار المغناطيسي المتوسط في القلب الحديدي و l_g هو طول الثغرة الهوائية .

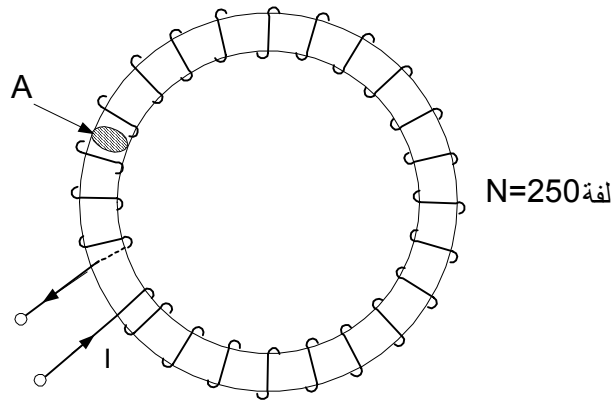
$$\text{كثافة التدفق المغناطيسي في الحديد : } B_c = \frac{\Phi}{A_c} , \text{ كثافة التدفق المغناطيسي في الهواء : } B_g = \frac{\Phi}{A_g}$$

$$\text{نفترض : } A_c \cong A_g \text{ و بالتالي نتحصل على العلاقة : } B_g = B_c = \frac{\Phi}{A_c}$$

٩- مقارنة بين الدائرة الكهربائية و الدائرة المغناطيسية

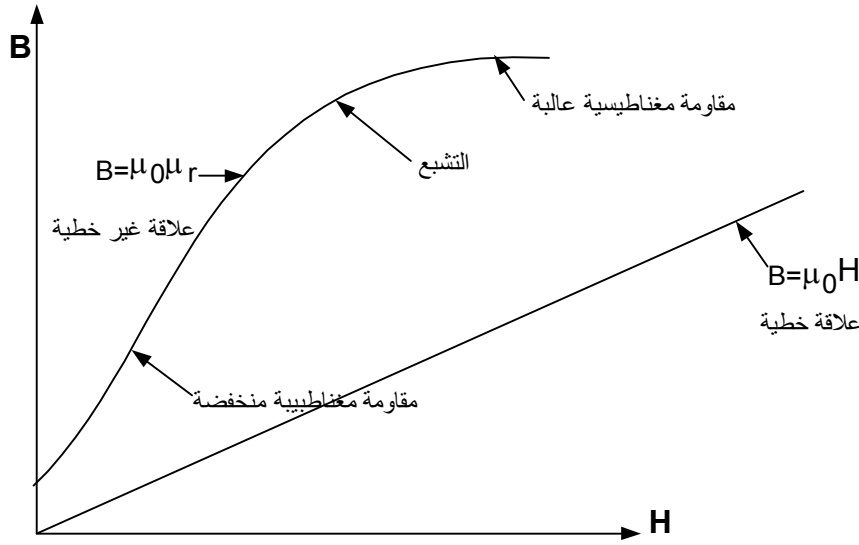
الدائرة المغناطيسية	الدائرة الكهربائية
- القوة الدافعة المغناطيسية ($F = NI$) الوحدة ($A \cdot t$) - التدفق المغناطيسي $\Phi = \frac{NI}{R_m}$ الوحدة ($Waber$) - المقاومة المغناطيسية $R_m = \frac{l}{\mu A}$ الوحدة ($henry^{-1}$) - كثافة المغناطيس $B = \frac{\Phi}{A}$ الوحدة ($Tesla$)	- القوة الدافعة الكهربائية E الوحدة ($Volt$) - التيار الكهربائي $I = \frac{V}{R}$ الوحدة (A) - المقاومة الكهربائية $R = \frac{l}{\sigma A}$ الوحدة (Ω) - كثافة التيار $J = \frac{I}{A}$ الوحدة ($\frac{A}{m^2}$)

١٠ - منحنى التمرغظ :



الشكل ٩ : دائرة مغناطيسية على شكل حلقة

الشكل ٩ يبين دائرة مغناطيسية بسيطة , قلبها الحديدي على شكل حلقة و ملفوف عليه ملف له N لفة.



الشكل ١٠ منحنى التمهيد

إذا تزايدت شدة المجال المغناطيسي H بزيادة التيار I الذي يمر في الملف فإن كثافة التدفق المغناطيسي B تتغير على النحو التالي :

تزيد كثافة التدفق المغناطيسي B تقريبا خطيا في بداية المنحنى الذي تكون فيه شدة المجال المغناطيسي H منخفضة بينما عند القيم العالية لشدة المجال تغير الكثافة يصبح غير خطي بسبب ظاهرة تشبع الحديد ، و منحنى $B = f(H)$ يسمى منحنى التمهيد .

المقاومة المغناطيسية R_m للمسار المغناطيسي تتعلق بكثافة التدفق المغناطيسي B فهي تكون ضعيفة عندما تكون الكثافة ضعيفة و عالية عندما تكون الكثافة عالية .

في الوسط الهوائي يكون منحنى التمهيد خطا مستقيما .

١١ - المفايد الحديدية :

تنتج المفايد الحديدية تحت تأثير مغناطيسي دوري عن سببين مختلفين :

(أ) التخلف المغناطيسي أو هستريسيس (كلمة إغريقية تعني أن المادة الحديدية تحتفظ بما كانت عليه في الحالة السابقة) .

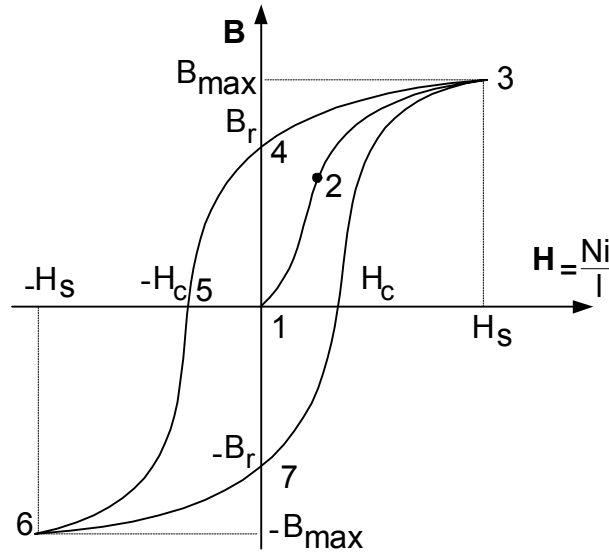
(ب) التيارات الإعصارية أو الدوامية .

١,١١ - التخلف المغناطيسي :

في الدائرة المغناطيسية المبينة في الشكل (٩) نفترض أن القلب الحديدي لم يكن أصلا ممغنطا أي

$B = 0$ عند $H = 0$ (أو $I = 0$) . فإذا زادت شدة المجال الآن نتيجة لزيادة التيار I ، كثافة التدفق

المغناطيسي ستتغير حسب المنحنى 1 - 2 في الشكل (١١) .



الشكل ١١ : حلقة هستريزيس

النقطة 2 تناظر قيمة معينة لشدة المجال H_1 مثلا (نتيجة لمرور التيار I_1 في الملف) إذا زدنا شدة المجال فوق هذا نحصل على القيمة H_s , يستمر المنحنى حتى النقطة 3 . عندما يحدث التشبع , و تصل كثافة التدفق المغناطيسي إلى قيمتها العظمى B_m : أي زيادة إضافية الآن في التيار خلال الملف (أي زيادة H) ما ينتج عنها إلا زيادة قليلة في كثافة التدفق B .

بعد هذا إذا خفضنا H للصفر بتخفيض التيار للصفر سيأخذ المنحنى مسارا مختلفا 3-4 وعندما تكون $H = 0$ تحتفظ المادة بكثافة تدفق تسمى بكثافة التدفق المغناطيسي المتبقي B_r , هذه الكثافة هي التي تسمح بتكوين المغناطيس الدائم . فإذا نزعنا الملف عن القلب الحديدي , سيحتفظ هذا الأخير بخصائص مغناطيسية تعينها كثافة التدفق المتبقي .

إذا عكسنا التيار الآن ($-H$) ستتأقصر B مع زيادة التيار إلى أن تصل إلى الصفر ($B = 0$) و عندما تصل شدة المجال إلى القيمة $-H_c$ والمنحنى يأخذ المسار 4-5 , شدة المجال هذه $-H_c$ - اللازمة لإزالة كثافة التدفق تسمى بشدة المجال القهري .

عند تزايد شدة المجال في الاتجاه المعاكس حتى تصل إلى التشبع ثم تعكس مرة ثانية و تخفض إلى الصفر المنحنى يأخذ المسار 5-6-7 و إذا تزايدت شدة المجال الآن في الاتجاه الموجب ($+H$) المنحنى يأخذ المسار 7-3 . المنحنى الكلي 3-7-6-5-4-3 يسمى بمنحنى التخلف المغناطيسي أو حلقة هستريزيس للمواد الحديدية المغناطيسية . نلاحظ تأخر كثافة التدفق B عن شدة المجال H خلال الرسم

البياني الكلي للمنحنى : عندما تكون $H = 0$, $B \neq 0$ لكن تبدأ في التناقص , بعد هذا تكون H قد مرت بالصفر و أصبحت تساوي $H_e -$ حينئذ تصل B في النهاية إلى الصفر .

- مفايد التخلف المغناطيسي :

نتحصل على منحنى التخلف المغناطيسي بتغير التيار قليلا عبر الملف عند دورة واحدة . فعندما يتغير التيار في دورة واحدة خلال مجال زمني معين تتدفق الطاقة من المصدر إلى الملف الملفوف على القلب الحديدي وفي مجال زمني آخر ترجع الطاقة إلى المصدر , إلا أنه يمكن ملاحظة أن الطاقة التي يسحبها الملف من المصدر أكبر من تلك التي يعيدها إليه . إذا خلال تغير التيار الممغنط I (و بالتالي H) خلال دورة واحدة , هناك تدفق صاف للطاقة من المصدر إلى مجموعة الملف و القلب . هذه الطاقة تظهر على شكل حرارة في القلب . هذا الفقد للقدرة في القلب نتيجة للتخلف المغناطيسي يسمى بفقد التخلف المغناطيسي . كما يمكن تبيان أن مساحة منحنى التخلف متناسبة مع فقد التخلف المغناطيسي و يستهلك الدوران في حلقة التخلف المغناطيسي طاقة تتناسب مع المساحة المحاطة بهذه الحلقة . و هذه الطاقة تسمى فقد التخلف المغناطيسي . عند مغنطة القلب الحديدي باستخدام التيار المتغير يحدث فقد في القدرة (يسمى فقد التخلف المغناطيسي) بطريقة دورية مما يتسبب في رفع درجة حرارة القلب الحديدي . لهذا فإن القلب الحديدي للآلات التي تعمل بالتيار المتغير تستخدم صفائح الحديد المطاوع و صفائح الصلب السيليكوني التي لها حلقة تخلف مغناطيسي ذات مساحة صغيرة , و ذلك للتقليل من فقد التخلف المغناطيسي .

و للتقليل من مفايد التخلف المغناطيسي تستخدم المواد المغناطيسية ذات حلقة تخلف مغناطيسي ضيقة .

٢,١١ - مفايد التيارات الإعصارية

يحدث نوع آخر لفقد الطاقة في القلب الحديدي عندما تتغير كثافة التدفق المغناطيسي بسرعة في القلب . تتولد قوة دافعة كهربائية داخل هذا القلب بسبب التغير الزمني للتدفق المغناطيسي , فينشأ مرور تيار في شكل دوامات يسمى بالتيار الدوامي أو الإعصاري j_e , و بما أن القلب الحديدي له مقاومة كهربائية R يؤدي مرور التيار الإعصاري j_e إلى فقد في القدرة قيمته $j_e^2 R$ حيث R هي مقاومة المسار و يظهر هذا الفقد على شكل حرارة في القلب .

و للتقليل من التيارات الإعصارية في المادة التي تحمل تدفق مغناطيسي متغير , يلزم جعل مقاومة القلب الكهربائية كبيرة فتقل شدة التيار الإعصاري و بالتالي يقل فقد التيارات الإعصارية . ولهذا الغرض تستعمل طريقتين :

- تستخدم المواد المغناطيسية ذات مقاومة نوعية عالية , إضافة قيمة مئوية حوالي (4%) من مادة السيليكون للحديد تزيد في مقاومته النوعية زيادة ملحوظة .

- يستخدم قلب مكون من صفائح الصلب الرقيقة و المعزولة عن بعضها حيث تكون التيارات الإعصارية محصورة في مساحات ضيقة يقل فيها تأثيرها على الخصائص المغناطيسية .

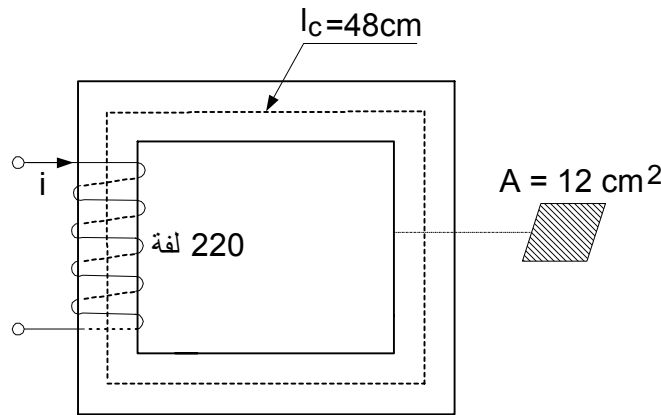
ملحوظة :

فقد التخلف المغناطيسي وفقد التيارات الاعصارية , كلاهما يسبب في إرتفاع درجة حرارة القلب الحديدي , لذا يجب أخذهما بعين الإعتبار عند تصميم أي آلة كهربائية أو محول , و ما دام يحدثان داخل المادة المكون منها القلب الحديدي , تجمع عادة مع بعضها ويطلق عليها اسم المفقودات الحديدية

و يرمز إليها بـ P_c لذا فإن : $P_c = p_h + p_e$
١٢- أسئلة محلولة في الدوائر المغناطيسية :

السؤال الأول :

دائرة مغناطيسية مكونة من قلب حديدي مستطيل الشكل , طول مساره المتوسطي يساوي $48cm$ و مساحة مقطعه $12cm^2$ ملفوف عليه ملف عدد لفاته 220 . النفاذية النسبية للحديد تساوي 200 و النفاذية المطلقة للفراغ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$.



شكل ١٢ : ملف حول قلب مستطيل الشكل

١ - احسب :

١,١ - المقاومة المغناطيسية للقلب الحديدي , R_c

٢,١ - شدة التيار اللازم I_1 لتوليد تدفق مغناطيسي كثافته $1.1T$

٢ - إذا أحدثت ثغرة هوائية في القلب الحديدي طولها $1cm$ و بافتراض عدم تقوس خطوط المجال فيها , احسب :

1.2 المقاومة المغناطيسية الكلية في الحديد و في الهواء R_{total}

2.2 الشدة الجديدة I_2 للتيار اللازم لتوليد نفس كثافة التدفق المغناطيسي في الحديد .

الحل :

$$1.1 \text{ المقاومة المغناطيسية في الحديد : } R_{c1} = \frac{l_{c1}}{\mu_r \mu_0 A_c}$$

$$= 1591549 \text{ At/Wb} = \frac{0.48}{200 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 10^{-4}}$$

٢,١ شدة التيار اللازم لتوليد كثافة التدفق المغناطيسي $B_c = 1.1T$ في الحدي، تعطى بقانون أوم للدوائر

المغناطيسية :

$$\begin{aligned} \frac{B_c \cdot A_c \cdot R_{c1}}{N} N I_1 &= \Phi \cdot R_{c1} \Rightarrow I_1 = \frac{\Phi \cdot R_{c1}}{N} \\ &= 9.55 A = \frac{1.1 \times 12 \times 10^{-4} \times 1591549}{220} \end{aligned}$$

2.1 المقاومة المغناطيسية الجديدة في الحديد :

$$R_{c2} = \frac{l_{c2}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c}, \quad R_{c2} = \frac{0.47}{200 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 10^{-4}} = 1558392 \text{ A} \cdot t / \text{Wb}$$

حيث l_{c2} هو طول المسار المغناطيسي الجديد في الحديد $l_{c2} = 0.48 - 0.01 = 0.47m$ إذا :

المقاومة المغناطيسية في الثغرة الهوائية :

$A_g = A_c$ لأن تقوس خطوط المجال المغناطيسي في الثغرة الهوائية مهملة

l_g هو طول الثغرة الهوائية و يساوي $0.01m$ هذا يعطي :

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_g} \Rightarrow R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_c}, \quad R_g = \frac{0.01}{4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 10^{-4}} = 6631456 \text{ A} \cdot t / \text{Wb}$$

- المقاومة المغناطيسية الكلية في الحديد وفي الهواء :

$$R_{total} = R_{c2} + R_g = 1558392 + 6631456 = 8189848 \text{ A} \cdot t / \text{Wb}$$

2.2 شدة التيار الجديد اللازم لتوليد نفس كثافة التدفق المغناطيسي في الحديد :

$$I_2 = \frac{\Phi \cdot R_{total}}{N} = \frac{B_c \cdot A_c \cdot R_{total}}{N} = \frac{1.1 \times 12 \times 10^{-4} \times 8189848}{220} = 49.14 A$$

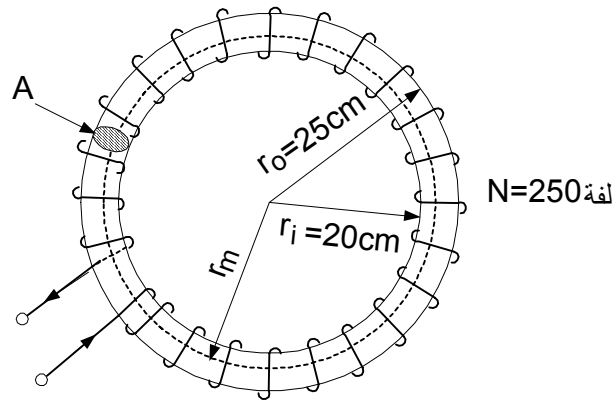
ملحوظة :

- القوة الدافعة المغناطيسية في الحالة الأولى : $N I_1 = 220 \times 9.55 = 2101 A \cdot t$

- القوة الدافعة المغناطيسية في الحالة الثانية : $N I_2 = 220 \times 49.14 = 10811 A \cdot t$

يمكننا الملاحظة إذا أن لتوليد نفس كثافة التدفق المغناطيسي يلزمنا قوة دافعة مغناطيسية أكبر و
جلها تضيق في الثغرة الهوائية .

السؤال الثاني :



شكل ١٣ : ملف حول حلقة .

ملف 250 لفة ملفوفة على حلقة مصنوعة من الصلب الممزوج بالسيليكون كما هو مبين في الشكل ١٣,١
نصف القطر الداخلي $r_i = 20cm$, و نصف القطر الخارجي $r_o = 25cm$. للقلب الحديدي مساحة مقطع
دائرية و نفاذيته النسبية تساوي 2204 و النافذية المطلقة للفراغ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$.

إذا كانت شدة التيار الذي يمر في الملف تساوي $2.5A$, أوجد :

- 1- كثافة التدفق المغناطيسي عند نصف القطر المتوسط للقلب الحديدي .
- 2- محاثة الملف بافتراض أن كثافة التدفق المغناطيسي منتظمة و تساوي قيمتها عند نصف القطر المتوسط .

الحل :

1- تعطى شدة المجال المغناطيسي H عند نصف القطر المتوسط r_m بالعلاقة التالية :

$$H = \frac{NI}{l}$$

حيث N هو عدد لفات الملف, $N = 250$, l هو طول المسار المغناطيسي المتوسط وهو محيط لدائرة نصف

$$r_m = \frac{1}{2}(r_i + r_o) = \frac{1}{2}(0.25 + 0.20) = 0.225m \quad l = 2\pi r_m$$

لذا $H = \frac{250 \times 2.5}{2\pi \times 0.225} = 442.3 A \cdot t/m$, وكثافة التدفق المغناطيسي B المناظرة لشدة المجال هي :

$$B = \mu_r \mu_0 H = 2204 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 442.3 = 1.225T$$

2- محاطة الملف $L = \frac{N\Phi}{I}$, $\Phi = B \cdot A_c$, هي المساحة الدائرية لمقطع الحلقة و r نصف قطر قلب الحلقة و يساوي $r = \frac{1}{2}(r_o - r_i) = \frac{1}{2}(0.25 - 0.20) = 0.025m$ $A_c = \pi r^2 = 625\pi \times 10^{-6} m^2$ $\Phi = 1.225 \times 625\pi \times 10^{-6} = 24.04 \times 10^{-4} Wb$,
لذا تكون محاطة الملف : $L = \frac{250 \times 24.04 \times 10^{-4}}{2.5} = 0.2404H = 240.4mH$

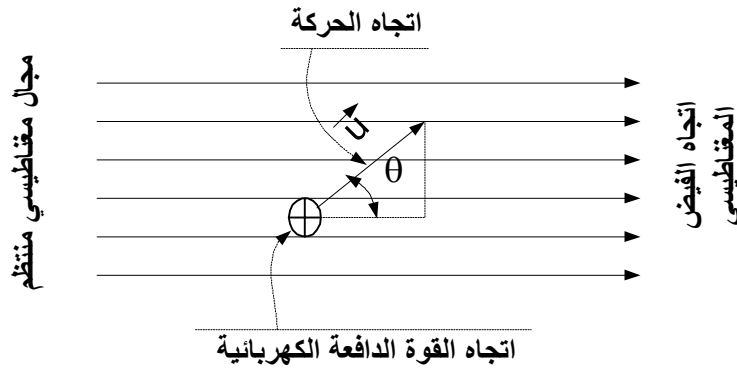
١٣ - القوة الدافعة الكهربائية e :

عندما يتحرك موصل طوله l في مجال مغناطيسي منتظم , كثافته B و قاطعا خطوط المجال بالزاوية θ فإن قوة دافعة كهربائية حثية تتولد في الموصل حسب العلاقة :

$$e = Blu \sin \theta \text{ (V)} \quad (10)$$

θ هي الزاوية بين الموصل و اتجاه المجال المغناطيسي .

إذا كانت $\theta = 90^\circ$, $e = Blu$ أي الحركة عمودية على اتجاه المجال .



شكل ١٤ : القوة الدافعة الكهربائية.

نلاحظ أن مركبة السرعة العمودية على اتجاه المجال هي التي يعتمد عليها في توليد القوة الدافعة الكهربائية التي يمكن معرفة اتجاهها باستخدام قاعدة اليد اليمنى لفلمنج : إذا كان إصبع السبابة يشير إلى اتجاه كثافة الفيض المغناطيسي و كان اتجاه الإبهام يشير إلى اتجاه الحركة فإن الإصبع الوسطى يشير إلى اتجاه القوة الدافعة الكهربائية الحثية بحيث يكون كل إصبع عموديا على الإصبعين الآخرين .

١٤ - القوة الكهرومغناطيسية F و العزم الكهرومغناطيسي T :

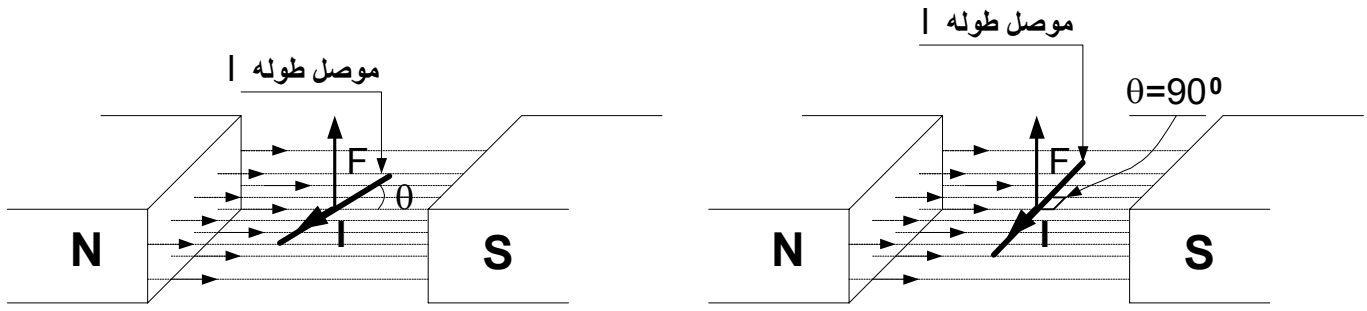
١,١٤ - القوة المؤثرة على موصل يمر فيه تيار كهربائي و متواجد في مجال مغناطيسي .

عندما يمر تيار في موصل متواجد في مجال مغناطيسي، يتحرك الموصل في اتجاه السهم (الشكل ١٥,١) هذه الحركة سببها قوة ميكانيكية F عمودية على كل من التيار و المجال و تعطى بالعلاقة التالية :

$$F = Bil \sin \theta \quad (N) \quad (١١)$$

θ هي الزاوية بين الموصل و اتجاه المجال المغناطيسي

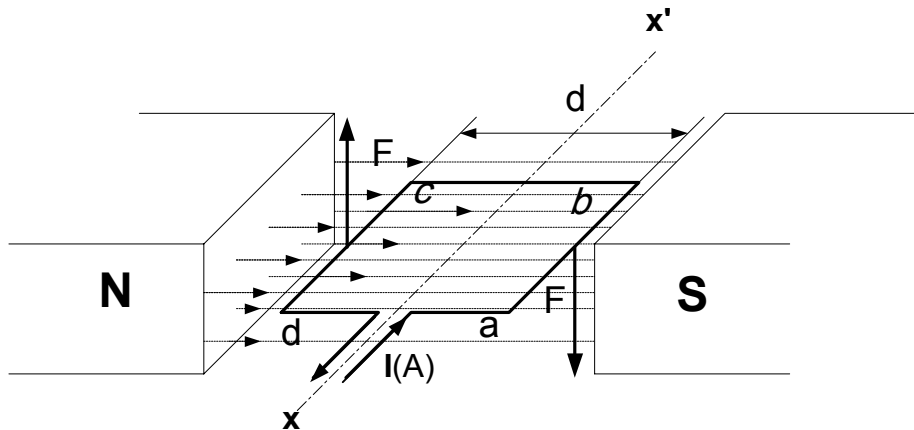
إذا كانت $\theta = 90^\circ$, $\sin \theta = 1$, $\theta = (\vec{l}, \vec{B})$ $F = Bil \quad (N)$



شكل ١٥ : القوة الكهرومغناطيسية المؤثرة على الموصل

يعطى اتجاه القوة F بقاعدة اليد اليسرى لفلمنج: إذا كان إصبع السبابة يشير إلى اتجاه كثافة الفيض المغناطيسي و الإصبع الوسطى يشير إلى اتجاه التيار الكهربائي فإن إصبع الإبهام يشير إلى اتجاه القوة الكهرومغناطيسية مع الملاحظة أن كل إصبع يجب أن يكون متعامدا على الإصبعين الآخرين .

٢,١٤ - القوة المؤثرة على ملف يمر فيه تيار كهربائي و متواجد وسط مجال مغناطيسي .



شكل ١٦ : القوة الكهرومغناطيسية المؤثرة على الملف.

الجانبان (ab) و (cd) للملف عموديان على المجال و تؤثر عليهما القوى الكهرومغناطيسية .
الجانبان (ad) و (bc) موازيان للمجال و لا تؤثر عليهما أي قوى كهرومغناطيسية .

٣,١٤ - العزم

القوتان المؤثرتان على الجانبين (ab) و (cd) تعملان كزوج من القوى (الشكل ١٦) .

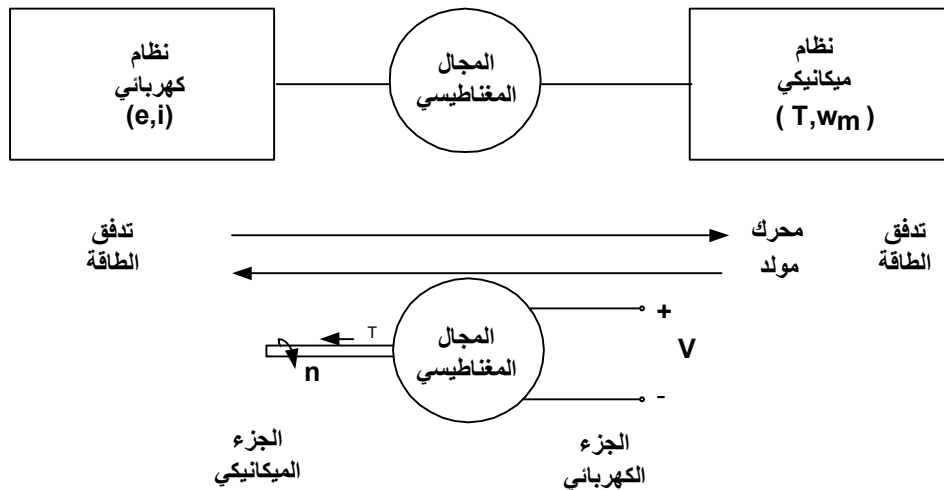
التأثير الناتج عن ازدواج القوى يسمى العزم (T) ويعبر عنه بحاصل ضرب قيمة إحدى قوتي الازدواج F في المسافة d بين القوتين . وحدة قياس العزم هي نيوتن. متر ويرمز لها بالرمز (Nm)

$$T = Fd = BIl d \quad (\text{Nm}) \quad (12)$$

إذا كانت (θ) الزاوية بين الموصل و المجال المغناطيسي فإن العزم يكون كما يلي : $T = FBll \cos \theta$

١٥ - تحويل الطاقة :

آلات التيار الكهربائي هي إما مولدات تحول الطاقة الميكانيكية عند الدخول إلى طاقة كهربائية ناتجة عن تيار كهربائي (مستمر أو متردد) عند الخرج و إما محركات تحول الطاقة الكهربائية من مصدر تيار (مستمر أو متردد) عند الدخول إلى طاقة ميكانيكية عند الخرج . و بما أن أي آلة كهربائية يمكنها أن تحول الطاقة في أي اتجاه فالآلة الكهربائية قابلة للعمل كمولد أو كمحرك و تحويل الطاقة من شكل إلى آخر يتم عن طريق المجال المغناطيسي . الآلة الكهربائية هي إذا همزة وصل ما بين نظام كهربائي الممثل في الجهد (e) و التيار (i) و نظام ميكانيكي ممثل في العزم (T) والسرعة (n) , فكما نلاحظ فإن النظامين مختلفان في طبيعتهما .



الشكل ١٦ : عملية تحويل الطاقة الكهروميكانيكية

في الآلات الكهربائية تحويل الطاقة الكهربائية إلى ميكانيكية أو العكس يتم عن طريق ظاهرتين كهرومغناطيسيتين :

❖ عندما يتحرك موصل كهربائي في مجال مغناطيسي ، يتولد داخله جهد و هذا مبدأ عمل المولدات ❖
عندما يمر تيار كهربائي في موصل موضوع داخل مجال مغناطيسي ، يتحرك الموصل نتيجة لقوى ميكانيكية (قوة كهرومغناطيسية) .

الشيء الذي تجدر الإشارة إليه هنا هو أن الظاهرتين تحصلان في آن واحد كلما حدث تحويل للطاقة من الشكل الكهربائي إلى الميكانيكي أو العكس .

في عمل الآلة كمحرك ، النظام الكهربائي يمرر تيارا خلال الموصلات التي تكون موضوعة داخل مجال مغناطيسي ، تتولد في كل موصل من هذه الموصلات قوة ميكانيكية بحيث إذا كانت الموصلات محمولة على هيكل معدني قابل للدوران بحرية ، يتولد عزم كهرومغناطيسي يحاول دفع الهيكل للدوران بسرعة معينة و الآن زيادة على هذا يتولد جهد في الموصلات المتحركة يعاكس جهد المصدر للتقليل من التيار الذي يسحبه المحرك من هذا المصدر .

و في عمل الآلة كمولد تتعكس العملية ، في هذه الحالة يدفع العضو الدائر للحركة بواسطة آلة ثانية (قد تكون محرك ديزل ، أو تربين بخارية أو حتى محرك كهربائي) يتولد إذا جهد في الموصلات التي يحملها العضو الدائر . إذا ما وصلنا الآن حمل كهربائي للملف المكون من هذه الموصلات سيمر تيار يعطي قدرة كهربائية للحمل ، و زيادة على هذا يتفاعل التيار الذي يمر في الموصلات مع المجال المغناطيسي فينتج عنه عزم معاكس لعزم الآلة الثانية المحركة

الآلات الكهربائية

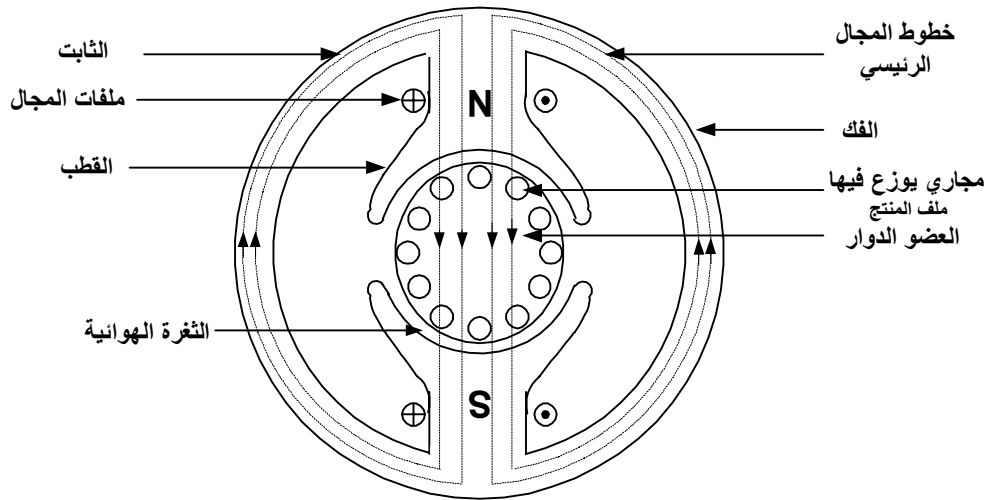
آلات التيار المستمر



الوحدة الأولى : آلات التيار المستمر

1- تركيب آلات التيار المستمر :

تحتوي آلات التيار المستمر على عنصرين أساسيين هما العضو الثابت و العضو الدائر , مفصولين بثغرة هوائية كما هو مبين في الشكل (١,١), زيادة على عناصر أخرى كما سيأتي .



الشكل ١,١ : تركيب آلة التيار المستمر

١,١ - الثابت (stator) : هذا الجزء من الآلة لا يتحرك و يكون عادة الهيكل الخارجي للآلة , تركيب عليه من الداخل أقطاب المجال بعدد زوجي . وتحمل ملفات تسمى ملفات الاستثارة أو ملفات المجال . ليس من الضروري أن تصنع الأقطاب من صفائح الصلب نظرا لأن ملفات المجال تحمل تيارا مستمرا إلا أنها تصنع عادة من هذه الصفائح و ذلك ليسهل تجميعها وتركيبها .

٢,١ - العضو الدائر أو عضو الاستنتاج (rotor or armature) : هذا الجزء من الآلة يكون حرا للدوران و يتكون من عمود الإدارة مصنوع من الصلب و يركب عليه قلب أسطواني من صفائح الصلب الذي يوجد على سطحه الخارجي و على طوله مجار توزع فيها و بصفة منتظمة ملفات تسمى ملفات المنتج أو ملفات الاستنتاج بكونها هي الملفات التي تتولد فيها القوة الدافعة الكهربائية . و العضو الثابت و العضو الدائر المفصولان بثغرة هوائية يشكلان معا الدائرة المغناطيسية للآلة . تخرج خطوط قوى المجال المغناطيسي من الأقطاب الشمالية و تمر على الثغرتين الهوائيتين عبر العضو الدائر و تدخل في الأقطاب الجنوبية لتتغلق على نفسها عبر الفك كما هو مبين في الشكل (١,١)

٣,١ - عضو التوحيد أو المبدل (commutator) : يركب هذا العضو على عمود الإدارة أمام المنتج و يصنع من قطع النحاس الأحمر المسحوب و المعزولة عن بعضها بالميكانيكا من جهة و عن عمود الإدارة من جهة

ثانية و تشكل أسطوانة فارغة تنزلق عليها الفرش الكربونية . توصل كل بداية و نهاية ملفات عضو الاستنتاج بقطعة من قطع المبدل بواسطة اللحام و ذلك حسب نوعية اللف . و يوحد المبدل التيار المتردد في ملفات المنتج إلى تيار مستمر في دائرة الحمل الخارجية عبر الفرش .

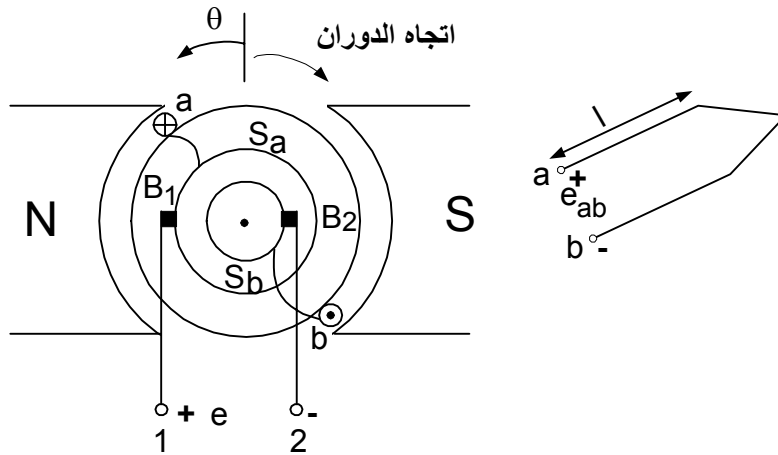
٤,١ - الفرش الكربونية (brushes) : هي قطع من الكربون موضوعة على السطح الخارجي للمبدل و يؤخذ منها التيار المستمر بعد توحيد إلى الدائرة الخارجية , و لا يمكن أن يقل عددها عن فرشتين في المولد .

٥,١ - أعضاء أخرى (ميكانيكية)

مهمة هذه الأعضاء تكمن في قدرتها على تثبيت الأعضاء المغناطيسية بالنسبة للأعضاء الكهربائية و تسهيل و تركيز عملية الدوران من بينها مبيت العضو الساكن مع أرجل و درعان واقيان واحد من جهة عمود الإدارة و الثاني من جهة المبدل تحقق الوقاية الميكانيكية للآلة و توجه هواء التبريد , و منها أيضاً كراسي تحميل العضو الدائر , و تربينة التبريد , و صندوق توصيل أطراف الملفات , حاملان للفرش , حلقة لرفع الآلة .

٢ - مبدأ عمل المبدل :

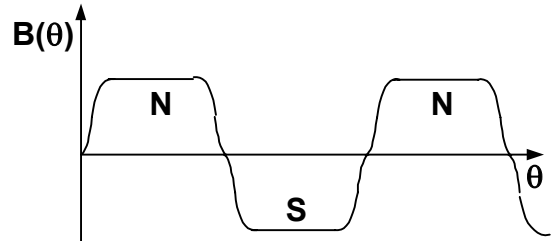
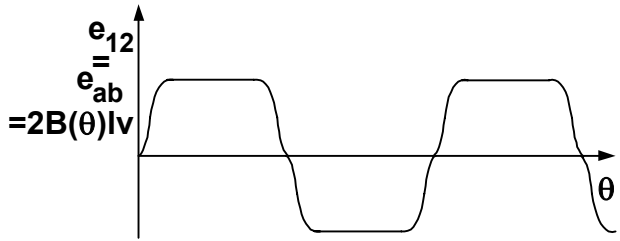
لتكن آلة تيار مستمر كما هي مبينة في الشكل (٢,١)



الشكل ٢,١ : آلة تيار مستمر بقطعتين دائرتين و فرشتين

يبين الشكل (٣,١) تغير كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية نتيجة للتناوب الطبيعي للأقطاب . الموصلان a و b طولهما l , يكونان طرفي لفة واحدة و موضوعان في مجريين متعاكسين قطريا على العضو الدائر . يوصل طرفا اللفة إلى حلقتي انزلاق Sa و Sb . الفرشتان الساكنتان B1 و B2 تضغطان على حلقتي الانزلاق و تسمحان بالوصول إلى اللفة الدائرة . فالجهد المتولد في اللفة ناتج أساسا عن والجهد المتولد في طرفي اللفة تحت الأقطاب $e = B(\theta)lu$. و باستعمال قاعدة قطع الموصلات لخطوط قوى

المجال , الجهد في كل طرف يساعد الآخر و بالتالي هما على التوالي : $e_{ab} = 2B(\theta)lv$. الجهد المتولد في اللفة e_{ab} هو نفس الجهد على طرفي الفرشتين , بطبيعته متردد و شكله هو نفس شكل كثافة التدفق المغناطيسي في الفضاء الذي يعتبر موجة متغيرة بسبب التتابع الطبيعي للأقطاب المختلفة (شمال N و جنوب S) .



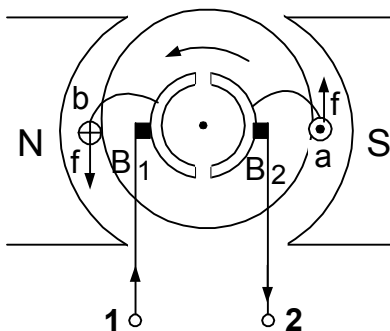
الشكل ٤,١ : القوة الدافعة الكهربائية

المتريدة و المتولدة في لفة واحدة

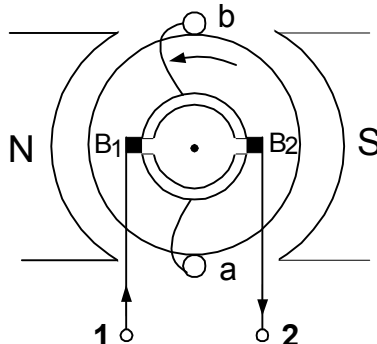
الشكل ٣,١ : توزيع كثافة التدفق

المغناطيسي في الثغرة الهوائية

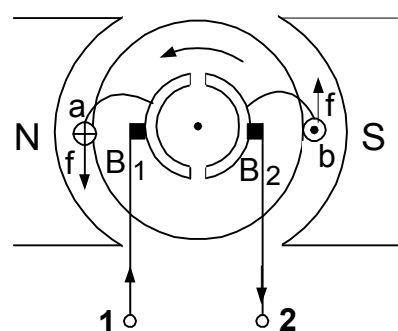
الآن بدلا من استخدام حلقتي انزلاق , تستخدم واحدة منقسمة إلى نصفين C_a و C_b و هما قطعتان نحاسيتان معزولتان عن بعضهما و تتزلق عليهما فرشتان B_1 و B_2 كما هو مبين في الشكل (٥,١). توصل القطعة C_a إلى طرف اللفة a بينما يوصل الطرف b إلى القطعة C_b . إذا كانت حركة العضو الدائر في الإتجاه المعاكس لدوران عقارب الساعة , فالطرف المتواجد تحت القطب الشمالي N يكون موجبا نسبة إلى الطرف المتواجد تحت القطب الجنوبي S و بالتالي فإن الفرشة B_1 تكون دائما موصلة إلى النهاية الموجبة للفة (أو للملف) و الفرشة B_2 للنهاية السالبة للفة (أو للملف) . و يمكن استنتاج التالي : رغم أن الجهد المتولد في اللفة e_{ab} هو جهد متردد , و الجهد على طرفي الفرشتين e_{12} موحد الاتجاه كما هو مبين في الشكل (٦,١) و له قيمة متوسطة تختلف عن الصفر



(ج)



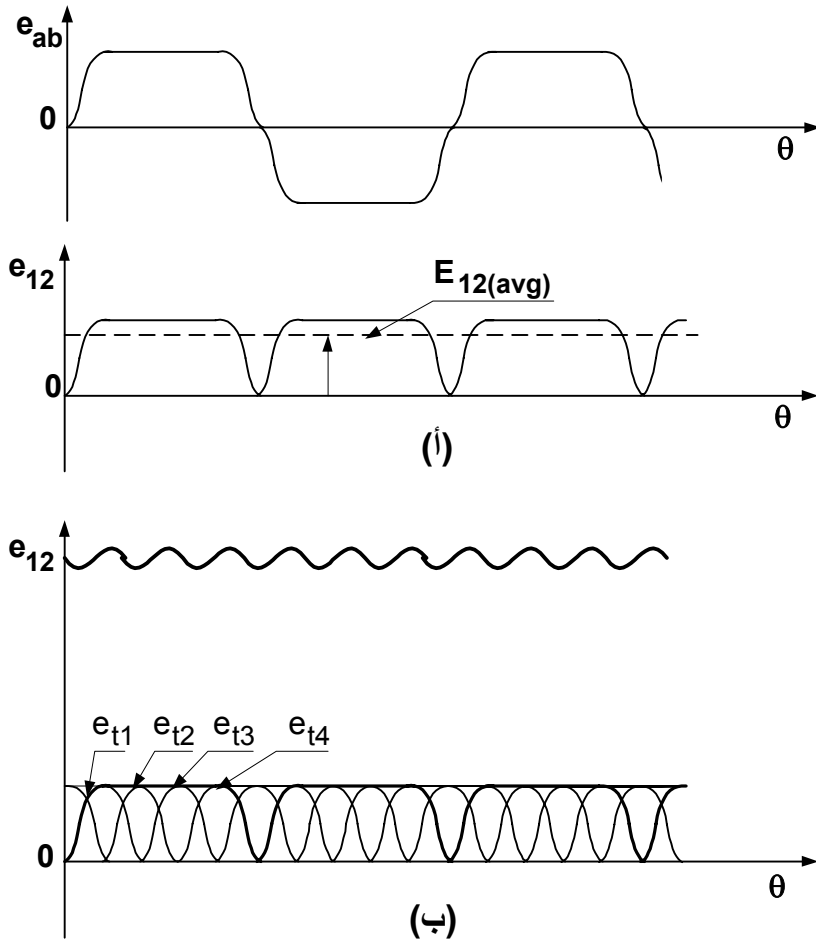
(ب)



(ا)

الشكل ٥,١: مبدأ عمل المبدل

توحيد الجهد باستعمال المبدل و الفرش لا يخلو من التشوهات (ripple) . في الآلة الحقيقية يستعمل عدد كبير من اللفات التي توضع في مجار حول السطح الخارجي للعضو الدائر , فبتوصيل هذه اللفات على التوالي بواسطة قطع المبدل (لتشكيل ملفات عضو الاستنتاج) يمكن الحصول على جهد مستمر جيد خال من التشوهات على طريفي الفرشتين كما هو مبين في الشكل (٦,١).



شكل ٦,١ : توحيد الجهد بالمبدل والفرش.

(أ) آلة بلفة واحدة . (ب) آلة متعددة اللفات.

٣ - معادلة القوة الدافعة الكهربائية (E (electromotive force (e.m.f) equation

عندما يدور عضو الاستنتاج في المجال المغناطيسي الناتج عن أقطاب الثابت يتولد جهد في ملفات الاستنتاج , هذا الجهد متعلق بثلاثة عوامل هي :

- 1- التدفق المغناطيسي Φ للآلة
- 2- سرعة العضو الدائر ω_m
- 3- ثابت k_a يتعلق بتركيب الآلة

تجدر الإشارة أن القوة الدافعة الكهربائية E_a لآلة التيار المستمر هي الق.د.ك المتولدة في دائرة توازي واحدة من دوائر عضو الإستنتاج و التي رمز عددها (A) .

تعطى القوة الدافعة الكهربائية لآلة التيار المستمر بالعلاقة العامة التالية :

$$E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m \quad (1,1)$$

الوحدات المستعملة : $E_a (Volt)$, $\Phi (waber)$, $\omega_m \left(\frac{radians}{seconds} \right)$, k_a بدون وحدة

حيث $k_a = \frac{NP}{\pi A} = \frac{ZP}{2\pi A}$ هو ثابت يحدد بتركيب الآلة

N هو العدد الكلي لللفات عضو الإستنتاج و A عدد الدوائر على التوازي في عضو الإستنتاج

$Z = 2N$ العدد الكلي لموصلات عضو الإستنتاج , P عدد أقطاب الآلة

Φ الفيض المغناطيسي لكل قطب و وحدته الوبير (wb)

$\omega_m = 2\pi \frac{n}{60} \text{ rad/s}$ السرعة الزاوية للآلة و n عدد اللفات في الدقيقة

٤ - العزم الكهرومغناطيسي (electromagnetic torque equation) : T_e

هناك عدة طرق للحصول على معادلة عزم آلة التيار المستمر أي العزم المتولد في موصلات ملفات عضو الإستنتاج المتواجدة في المجال المغناطيسي الناتج عن أقطاب الثابت و عندما يمر فيها تيار كهربائي , لكن الطريقة البسيطة هي استعمال مدلول القوة الكهرومغناطيسية .

يمكن كتابة معادلة العزم الكهرومغناطيسي على النحو التالي: (٢,١) $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a$

تبين المعادلة أن تفاعل التيار الكهربائي مع التدفق المغناطيسي يولد عزمًا .

في حالة المحرك القدرة الكهربائية الداخلة $(E_a \cdot I_a)$ و التي يزودها النظام الكهربائي للمجال المغناطيسي يجب أن تساوي القدرة الميكانيكية الخارجة من عضو الإستنتاج $(T_e \cdot \omega_m)$ و التي يسحبها النظام الميكانيكي الممثل في الحمل من عضو الإستنتاج بواسطة عمود الإدارة (shaft) . و العملية

العكسية صحيحة أيضا بالنسبة لفعل المولد : (3.1) $E_a I_a = k_a \Phi \omega_m I_a = T_e \omega_m$

٥ - مسائل محلولة :

المسألة الأولى : آلة تيار مستمر بأربعة أقطاب لها عضو استنتاج طوله 25cm و نصف قطره 12.5cm . تغطي

الأقطاب إلا 75% من مساحة سطح عضو الإستنتاج. تتكون دائرة المنتج من 33 ملف , كل ملف يحتوي

على 7 لفات مدفونة في 33 مجرى . القيمة المتوسطة لكثافة التدفق المغناطيسي تساوي 0.75T .

١ - إذا كان عدد الدوائر على التوازي في المنتج يساوي 4 , أوجد كلا من الآتي :

(أ) ثابت المنتج k_a

(ب) الجهد المتولد في المنتج E_a عندما يدور هذا الأخير بسرعة 1000 لفة في الدقيقة

(ج) التيار الذي يمر في ملفات المنتج I_c و العزم الكهرومغناطيسي الناتج عندما يكون تيار

$$I_a = 400A \text{ المنتج}$$

(د) القدرة الخارجة P_a من عضو الإستنتاج

٢ - إذا كان عدد الدوائر على التوازي في المنتج يساوي 2 أعد حساب الأجزاء (من أ إلى د) . التيار

الذي يمر في ملفات المنتج يجب أن يبقى مساويا لقيمته في الحالة الأولى .

الحل :

1- عدد الدوائر على التوازي يساوي $A = 4$:

(أ) ثابت المنتج $k_a = \frac{ZP}{2\pi A}$, $P = 4$ عدد الأقطاب , $A = 4$ عدد دوائر المنتج على التوازي , Z عدد

موصلات ملفات المنتج , إذا كان c عدد ملفات المنتج , t عدد اللفات في الملف الواحد فإن

$$k_a = \frac{462 \times 4}{2\pi \times 4} = 73.53 \text{ ثابت} , Z = 2ct = 2 \times 33 \times 7 = 462$$

(ب) الجهد المتولد في المنتج $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m$, السرعة الزاوية ω_m و التدفق المغناطيسي لكل قطب

$$\Phi = A_p \times B , A_p = \text{مساحة عضو الإستنتاج التي يغطيها القطب} , \omega_m = 2\pi \times \frac{n}{60} = 2\pi \times \frac{1000}{60} = 104.72 \frac{rd}{s}$$

$$A_p = \frac{2\pi r l}{P} \times 0.75 = \frac{2\pi \times 12.5 \times 10^{-2} \times 25 \times 10^{-2}}{4} \times 0.75 = 36.8 \times 10^{-3} m^2 \text{ الواحد :}$$

$$\Phi = 36.8 \times 10^{-3} \times 0.75 = 0.0276 Wb \text{ التدفق المغناطيسي لكل قطب :}$$

$$E_a = 73.53 \times 0.0276 \times 104.72 = 212.5 Volt \text{ لذا يكون الجهد المتولد في المنتج :}$$

$$I_c = \frac{I_a}{A} = \frac{400}{4} = 100 A \text{ (ج) التيار الذي يمر في ملفات المنتج :}$$

$$T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a = 73.53 \times 0.0276 \times 400 = 811.8 N \cdot m \text{ العزم الكهرومغناطيسي :}$$

$$P_a = E_a \cdot I_a = 212.5 \times 400 = 85000 W = 85 Kw \text{ (د) القدرة الخارجة من عضو الإستنتاج :}$$

$$P_a = T_e \cdot \omega_m = 811.8 \times 104.72 = 85000 W = 85 Kw \text{ يمكن حساب هذه القدرة أيضا كالتالي :}$$

2- عدد الدوائر على التوازي في المنتج يساوي $A = 2$:

$$k_a = \frac{ZP}{2\pi A} = \frac{462 \times 4}{2\pi \times 2} = 147.06 \text{ (أ) ثابت الآلة :}$$

$$E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m = 147.06 \times 0.0276 \times 104.72 = 425 Volt \text{ (ب) الجهد المتولد في المنتج :}$$

$$I_c = 100 A \text{ (ج) التيار الذي يمر في ملفات المنتج :}$$

التيار الذي يخرج من عضو الإستنتاج إلى الدائرة الخارجية : $I_a = A I_c = 2 \times 100 = 200 A$

العزم الكهرومغناطيسي : $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a = 147.06 \times 0.0276 \times 200 = 811.8 N \cdot m$

(د) القدرة الخارجة من عضو الإستنتاج : $P_a = E_a \cdot I_a = 425 \times 200 = 85000 W = 85 Kw$

المسألة الثانية : آلة تيار مستمر لها 12 قطب و عدد الدوائر على التوازي في المنتج يساوي ٢ , تتكون دائرة المنتج من 144 ملف و كل ملف يحتوي على 10 لفات . مقاومة كل لفة 0.011Ω , التدفق المغناطيسي لكل قطب 0.05 Wb و تدور الآلة بسرعة 200 لفة في الدقيقة .

(أ) احسب الجهد المتولد في منتج هذه الآلة .

(ب) ما هو مقدار مقاومة ملفات المنتج الفعلية .

(ج) إذا تم توصيل حمل مكون من مقاومة مقدارها $1 K\Omega$ على طرفي هذا المولد أوجد العزم

الكهرومغناطيسي المقاوم المطبق على عمود دوران الآلة (مع إهمال المقاومة الداخلية للملفات المنتج) .

الحل :

(أ) عدد موصلات المنتج : $Z = 2ct = 2 \times 144 \times 10 = 2880$ ثابت الآلة : $k_a = \frac{ZP}{2\pi A} = \frac{2880 \times 12}{2\pi \times 2} \approx 2750$

السرعة الزاوية : $\omega_m = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi \times \frac{200}{60} = 20.94 \text{ rds/sec}$

الجهد المتولد في المنتج : $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m = 2750 \times 0.05 \times 20.94 \approx 2880 \text{ Volt}$

(ب) هناك مساران متوازيان في دائرة عضو الإستنتاج كل منهما يحتوي على $\frac{144}{2} = 72$ ملف و في كل

ملف 10 لفات لذا يكون عدد اللفات في المسار الواحد : $N = 72 \times 10 = 720$

ما دام هناك مساران فإن المقاومة الفعلية للمنتج هي :

و بالتالي مقاومة الملفات في كل مسار : $R_1 = R_2 = 720 \times 0.011 = 7.92 \Omega$

$$R_a = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{2} = \frac{7.92}{2} = 3.96 \Omega$$

(د) إذا ما تم توصيل حمل مقاومته $R_L = 1000 \Omega$ على طرفي المولد و إذا ما أهملنا مقاومة المنتج

الداخلية R_a فسيمر تيار في الحمل مقداره : $I_a = \frac{E_a}{R_L} = \frac{2880}{1000} = 2.88 A$

يكون إذا العزم الكهرومغناطيسي : $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a = 2750 \times 0.05 \times 2.88 = 396 N \cdot m$

٦ - أنواع آلات التيار المستمر

يمكننا الحصول على المجال المغناطيسي باستخدام أقطاب مغناطيسية ثابتة أو دائمة و لكن عيب هذه الطريقة :

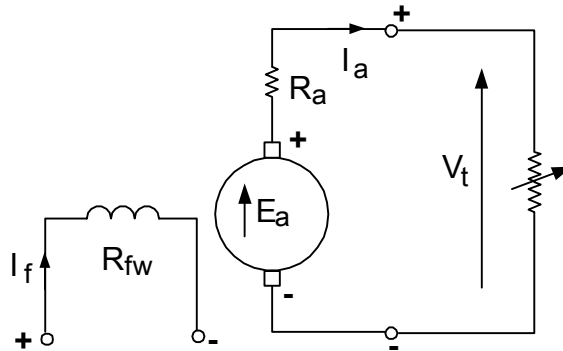
(أ) نحتاج إلى مغناطيس حجمه كبير جدا لكبر المجال المطلوب .

(ب) المجال في هذه الأحوال يضعف مع مرور الوقت مما يؤدي إلى نقصان الق.د.ك. و قد أدى ذلك إلى استخدام الأقطاب الدائمة في الآلات الكهربائية في أغراض محدودة فقط مثل المحركات الصغيرة المستعملة في لعب الأطفال .

والطريقة الثانية الأكثر شيوعا للحصول على المجال المغناطيسي اللازم في الآلات الكهربائية تكون باستخدام المغناطيسيات الكهربائية وهي تتكون من أقطاب مغناطيسية تحمل ملفات يمر فيها تيار كهربائي يعمل على استثارة المجال المغناطيسي بالشدة اللازمة و يطلق على هذه الملفات اسم ملفات الاستثارة أو ملفات المجال كما أن التيار الذي يمر في هذه الملفات يسمى بتيار الإستثارة أو تيار المجال I_f توصل ملفات المجال لملفات المنتج حسب طرق عدة مما يعطي للآلة خصائص أداء مختلفة الشيء الذي يعتبر من مزايا آلات التيار المستمر .

طرق الحصول على تيار الإستثارة I_f :

١,٦ - مصدر كهربائي خارجي ومستقل عن الآلة و يطلق عليها اسم الإستثارة المستقلة أو المنفصلة (separate excitation) الممثلة في الشكل (٧,١) . تسمى الآلة في هذه الحالة ذات إستثارة منفصلة



كل ٧,١: مولد إستثارة منفصلة

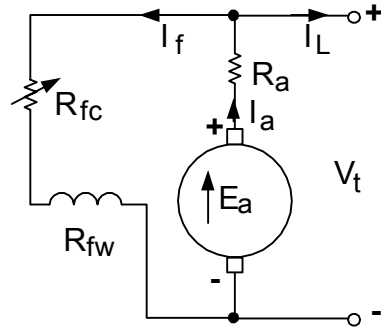
٢,٦ - من الآلة الكهربائية نفسها و يقال في هذه الحالة أن الآلة ذات إستثارة ذاتية .

(self-excitation) . و تعتمد هذه الطريقة على المغناطيسية المتبقية Φ_{res} في الأقطاب المغناطيسية حتى يمكن البدء في تكوين المجال المغناطيسي في الآلة بعملية تعاقبية و استطردادية و تؤدي فيها زيادة شدة المجال إلى توليد القوة الدافعة الكهربائية المطلوبة في الآلة .

و تختلف عملية الإستثارة الذاتية في آلات التيار المستمر باختلاف طرق توصيل ملفات الإستثارة مع ملفات عضو الإستنتاج (أ أو طرفي الآلة) و تنقسم إلى ثلاثة أقسام وهي :

١,٢,٦ - إستثارة توازي : (shunt-excitation)

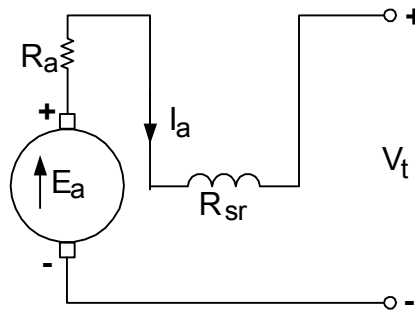
في هذه الحالة توصل ملفات المجال على التوازي مع ملفات المنتج و تسحب ملفات المجال قدرتها مباشرة من طرفي عضو الإستنتاج في الآلة (الشكل ٨,١) .



شكل ٨,١: مولد استثارة توازي

٢,٢,٦ - إستثارة توالي : (series excitation)

توصل ملفات المجال على التوالي مع ملفات المنتج .



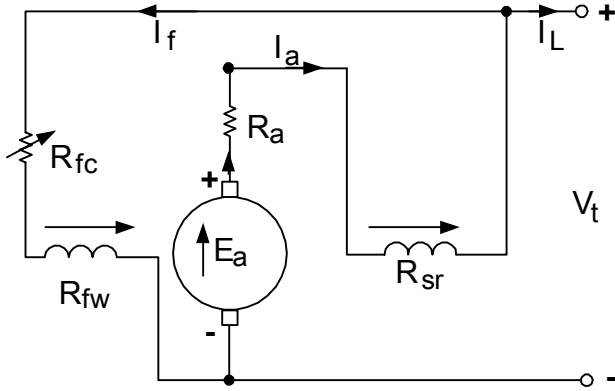
الشكل ٩,١ مولد لاستثارة توالي

ملحوظة : يكون ملفات التوازي عدد لفات أكبر من ملفات التوالي لكنها تسحب تيار قليل (أقل من 5% من تيار المنتج الاسمي) بينما ملفات التوالي يكون عدد لفاتها أقل و تحمل تياراً أكبر .

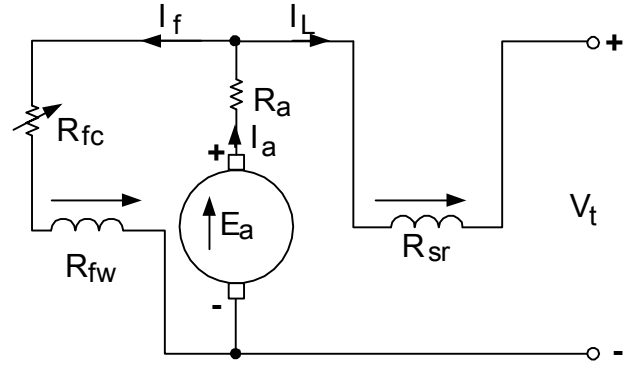
٣,٢,٦ - إستثارة مركبة : (compound excitation)

هذا النوع من الإستثارة يستعمل ملفين (توازي و هو الملف الرئيس و توالي و هو ملف إضافي) لإستثارة المجال المغناطيسي . يتم لف ملف التوالي فوق ملف التوازي . إذا ما تم توصيل ملف التوازي مباشرة على التوازي مع المنتج تسمى الآلة ذات تركيب قصير بينما إذا كان على التوازي مع الدائرة المكونة من ملفات المنتج على التوالي مع ملفات التوالي تسمى الآلة ذات تركيب طويل . ليس هناك أي فرق معتبر ما بين التوصيلين . في الآلة ذات الإستثارة المركبة مجال ملف التوالي إما يساعد مجال ملف التوازي الرئيس و

يسمى هذا التركيب تراكمي (cummulatively compounded excitation) ويكون إما قصيرا أو طويلا .

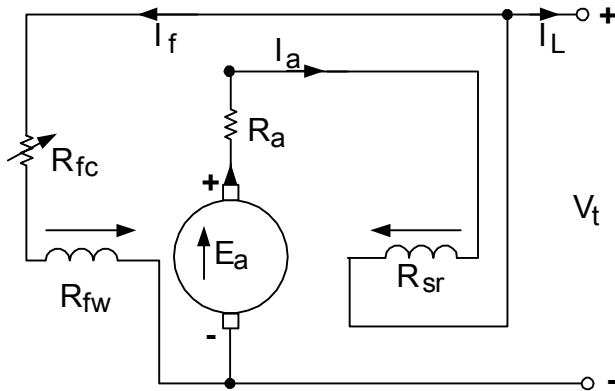


الشكل ١١,١: مولد مركب طويل تراكمي

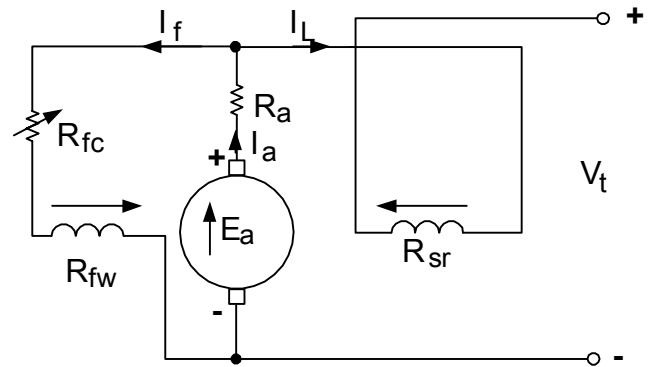


شكل ١٠,١: مولد مركب قصير تراكمي

و إما يعاكس مجال ملف التوالي مجال ملف التوازي و يسمى هذا التركيب تفاضلي أو فرقي (differentially compounded excitation) و يكون أيضا إما قصيرا أو طويلا .



الشكل ١٣,١: مولد مركب طويل تفاضلي



الشكل ١٢,١: مولد مركب قصير تفاضلي

ينتج عن هذه الأنواع العدة للاستشارة خصائص أداء مختلفة للآلة .

٧ - تدفق القدرة , مفايد و كفاءة آلات التيار المستمر :

عندما تشتغل آلة التيار المستمر كمولد تكون قدرة دخلها القدرة الميكانيكية التي يعطيه لها المحرك الميكانيكي الأولي (prime mover) . فجزء من قدرة الدخل يبذل كمفايد دوارة لازمة لإدارة الآلة ضد الاحتكاك و مقاومة الهواء (مفايد ميكانيكية) , كما يدخل من ضمنها المفايد الحديدية .

الجزء الباقي من قدرة الدخل يحول إلى قدرة كهربائية متولدة $E_a I_a$ و التي كمية منها تضيع كمفاقد نحاسية في مقاومات الملفات حسب قانون مربع التيار $I^2 R$. القدرة الكهربائية المتبقية تمثل قدرة خرج المولد و التي يمكن سحبها من أطرافه عند التحميل . بينما عند التشغيل كمحرك تكون قدرة الدخل القدرة الكهربائية التي يسحبها من الشبكة الكهربائية و قدرة الخرج المقدار الصافي للقدرة الميكانيكية المتولدة و التي يمكن سحبها من عمود الإدارة .

١,٧ - المفاقد في آلات التيار المستمر :

يمكن تقسيم المفاقد في آلات التيار المستمر سواء كانت مولدات أو محركات إلى خمسة أنواع أساسية

❖ مفاقد كهربائية أو نحاسية (مفاقد $I^2 R$) ❖ مفاقد تلامس الفرش

❖ مفاقد القلب الحديدي ❖ مفاقد ميكانيكية

و تتحول هذه المفاقد إلى حرارة تعمل على رفع درجة حرارة الآلة مما قد يتسبب عنه تلف المواد العازلة و حدوث دوائر قصر بين الملفات مما قد يدمر الآلة نفسها و لذلك يجب الحد من قيمة هذه المفاقد ولهذا السبب بالذات و كذلك لكي نحصل على معامل جودة (كفاءة) مرتفع يعمل على خفض تكاليف تشغيل الآلة .

١,١,٧ - المفاقد النحاسية (copper losses) : المفاقد النحاسية هي مفاقد تحصل عند مرور تيار

في ملفات مجال الأقطاب (توالي و توازي) و منتج الآلة و ملفات الأقطاب المساعدة (أقطاب التبديل) و الملفات الإضافية (ملفات التعويض) إن وجدت .

و حسابها يكون بضرب مقاومة الملفات المعنية بمربع التيار الذي يمر فيها , مثلا تكون المفاقد النحاسية

$$P_F = I_f^2 R_{fw} \text{ و } P_A = I_a^2 R_a \text{ في ملفات مجال التوازي}$$

حيث I_a و R_a تيار و مقاومة ملفات المنتج , I_f و R_{fw} تيار و مقاومة ملفات مجال التوازي .

و القيمة المستعملة في هذه الحسابات للمقاومة تكون عند حرارة التشغيل العادية . و المفاقد النحاسية تتغير مع تغير تيار المنتج و المجال .

٢,١,٧ - مفاقد تلامس الفرش (brush losses) : فقد تلامس الفرش هو فقد القدرة الذي ينشأ

عن مقاومة تلامس فرش و التي يمكن اعتبارها مع مقاومة المنتج .

٣,١,٧ - مفاقد القلب الحديدي (core losses) : تتكون مفاقد القلب الحديدي من مفاقد

التخلف المغناطيسي ومفاقد التيارات الإعصارية وتوجد في أجزاء من الآلة التي تتعرض لمجال مغناطيسي متغير مع الزمن وينصب هذا على عضو الإستنتاج في آلة التيار المستمر نتيجة لدورانه في مجال الأقطاب .

تتوقف مفاقد القلب الحديدي على تيار الإستثارة فإن كان ثابتا تكون هي الأخرى تقريبا ثابتة .

٤,١,٧ - المفاقد الميكانيكية (mechanical losses) :

تنشأ هذه المفاقد عن التأثيرات الميكانيكية وهي نوعان أساسيان : احتكاك و مقاومة الهواء .
و تتعلق المفاقد الميكانيكية بسرعة الآلة التي في حالة المولد تكون ثابتة باستمرار .

٢,٧ - حساب الكفاءة (أو الجودة) (efficiency)

تعرف كفاءة آلات التيار المستمر بالمعادلة : (٤,١)
$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

الفرق ما بين قدرة دخل و قدرة خرج الآلة هو المفاقد الكلية التي تحصل داخلها و بالتالي يمكن إعادة

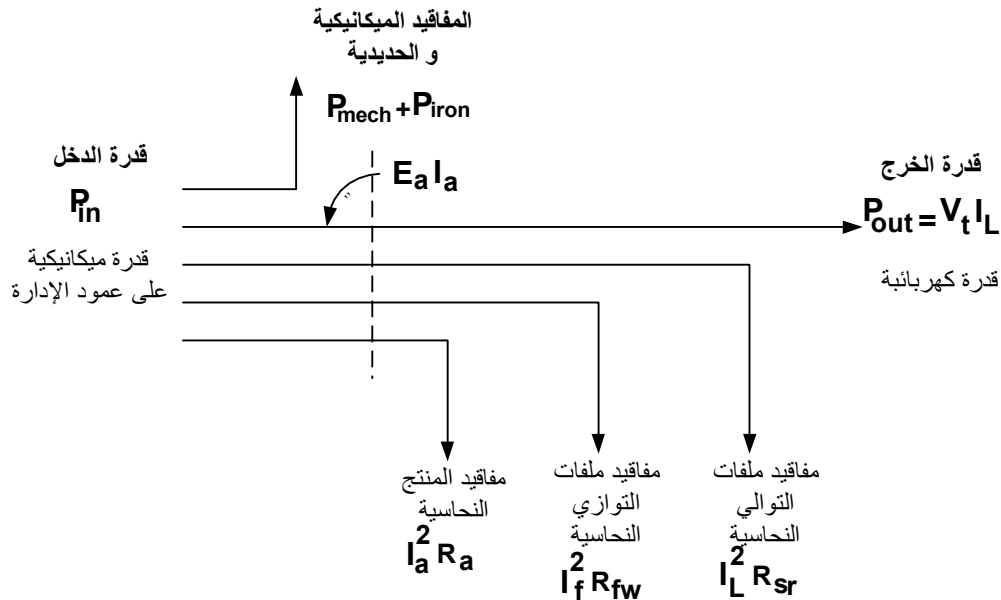
كتابة معادلة الكفاءة : (٥,١)
$$\eta\% = \frac{P_{in} - \sum P_{losses}}{P_{in}} \times 100$$

أو بشكل آخر : (٦,١)
$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100$$

يمكن استخدام أي من القوانين الثلاثة لحساب كفاءة آلات التيار المستمر .

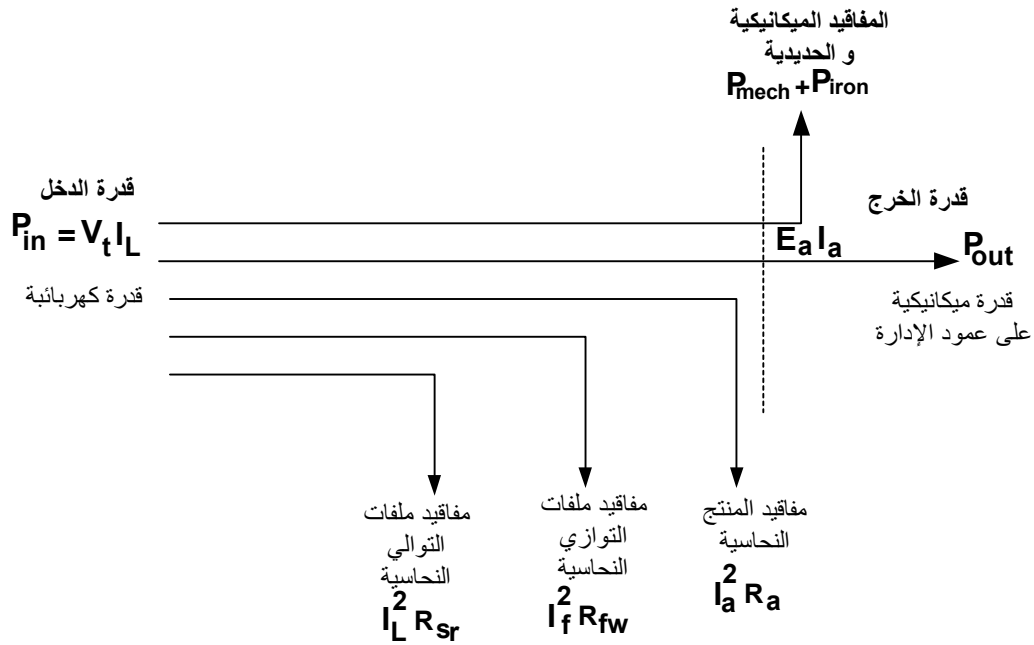
٣,٧ - مخطط تدفق القدرة (power-flow diagram)

مخطط تدفق القدرة هو واحد من أنسب التقنيات في الأخذ بعين الاعتبار مفاقد القدرة في آلة التيار المستمر . يبين الشكل (١٤,١) مخطط تدفق القدرة في مولد التيار المستمر و الشكل (١٥,١) مخطط تدفق القدرة في محرك التيار المستمر .



الشكل ١٤,١ : مخطط تدفق القدرة في مولد مركب قصير

في حالة المحرك يعكس مخطط تدفق قدرة المولد السابق الشكل (١٥,١)



الشكل ١٥,١ مخطط تدفق القدرة في محرك مركب قصير .

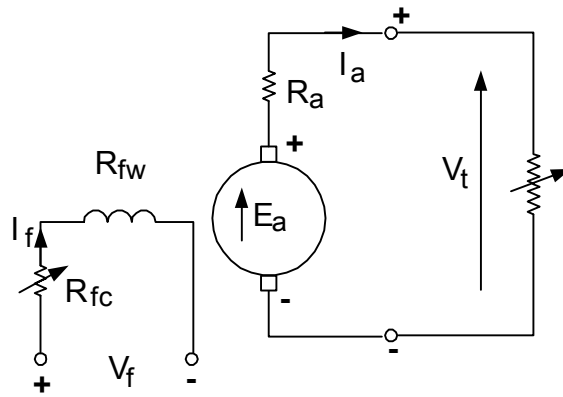
٢.١ - مولدات التيار المستمر

آلة التيار المستمر التي تعمل كمولد تديرها آلة ثنائية (محرك ديزل ، أو تربينة بخارية أو محرك كهربائي) و بسرعة ثابتة ويوصل طرفا عضو الإستنتاج للحمل . في كثير من التطبيقات التي تستعمل مولدات التيار المستمر يكون من المهم معرفة تغير جهد الأطراف بتيار الحمل ، و تسمى هذه الخاصية بالخاصية الخارجية

١ - مولدات التيار المستمر ذات الإستثارة المنفصلة :

في الإستثارة المنفصلة توصل ملفات المجال أو الإستثارة إلى مصدر قدرة (تيار مستمر) منفصل و خارجي عن الآلة. هذا المصدر قد يكون مولد تيار مستمر آخر ، أو مبدل تيار متردد إلى مستمر المستعمل لإلكترونيات القدرة أو حتى بطاريات .

الشكل (١٦,١) يبين الدائرة الكهربائية المكافئة لمولد التيار المستمر ذي الإستثارة المنفصلة .



الشكل ١٦,١ : مولد إستثارة منفصلة عند التحميل

R_{fc} مقاومة التحكم المستعملة في دائرة المجال ، R_{fw} مقاومة ملفات المجال

$R_f = R_{fc} + R_{fw}$ المقاومة الكلية لدائرة المجال ، R_L مقاومة الحمل

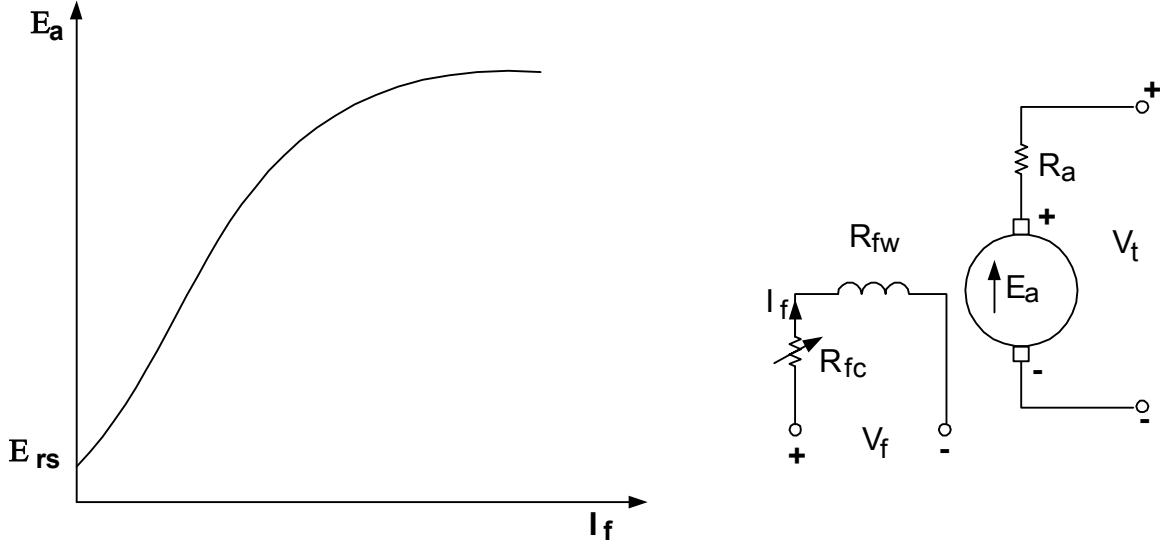
I_f تيار المجال، I_a تيار المنتج، I_L تيار الحمل، V_f جهد الإستثارة، V_L أو V_t جهد الأطراف الخارجية

١,١ - المعادلات التي تعرف مولد التيار المستمر ذي الإستثارة المنفصلة :

$$I_a = I_L \quad (٩,١) \quad E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m \quad (٧,١)$$

$$V_f = I_f R_f \quad (١٠,١) \quad V_t = E_a - I_a R_a \quad (٨,١)$$

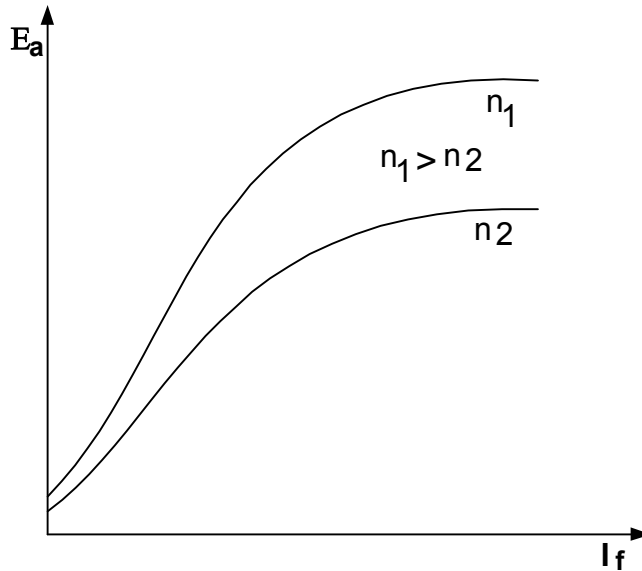
٢,١ - خصائص مولد التيار المستمر ذي الإستثارة المنفصلة :



الشكل ١٧,١ : مولد إستثارة منفصلة عند اللاحمل الشكل ١٨,١ : خاصية اللاحمل

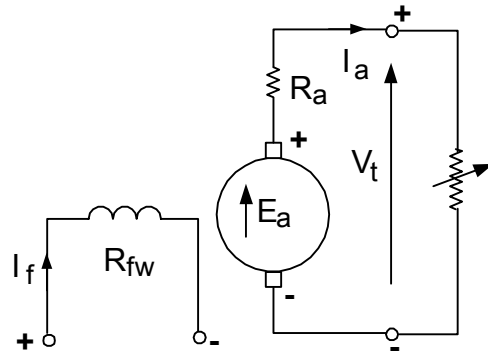
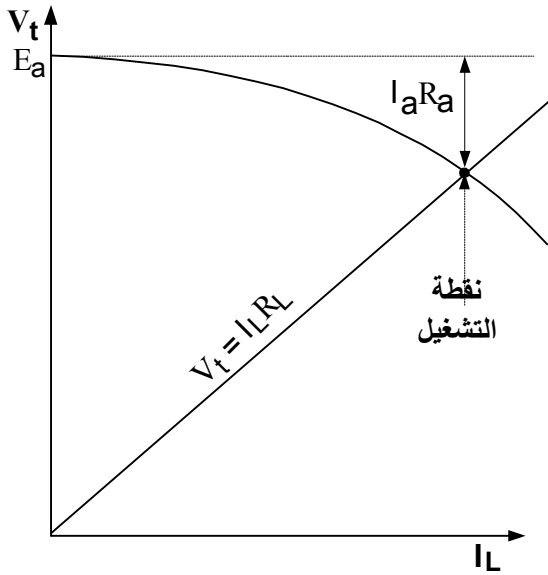
١,٢,١ - منحنى خاصية اللاحمل $V_{L,0} = E_{a,0} = f(I_f)$ عند سرعة ثابتة :

المنحنى يوضح العلاقة بين E_a و I_f عند اللاحمل و منه نجد في حالة ما I_f يساوي صفرا فإن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة تكون لها قيمة نتيجة المغناطيسية المتبقية , و بزيادة تيار المجال تزيد الق.د.ك خطيا إلى أن تحدث حالة التشبع بعدها تستقر الق.د.ك عند مقدار معين مهما زاد تيار المجال . فعند تيار إستثارة معين و ثابت تكون الق.د.ك متناسبة مع سرعة الدوران حسب العلاقة $E_{a,0} = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m$, $\omega_m = 2\pi \frac{n}{60} \text{ rds/sec}$ السرعة الزاوية و n عدد اللفات/دقيقة . و نحصل على عدة منحنيات اللاحمل بتغيير سرعة الدوران.(الشكل (١٩,١)



الشكل ١٩,١ : تأثير السرعة على خاصية اللاحمل

٢,٢,١ - منحني الخاصية الخارجية $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة , تيار مجال ثابت و تيار حمل متغير إذا كانت سرعة المولد ثابتة $n = constant$ و تيار المجال I_f معين فإن الخاصية الخارجية و هي الجهد على الأطراف الخارجية للمولد V_L بدلالة تيار الحمل I_L و الذي يساوي في هذه الحالة تيار المنتج I_a .
قانون كرشوف لمجموع الجهود حول الحلقة يعطي : $V_L = E_{a,0} - I_a R_a$



الشكل ٢١,١ : الخاصية الخارجية

الشكل ٢٠,١ : مولد إستثارة منفصلة

لمولد الإستثارة المنفصلة

عند التحميل

عند تزايد تيار الحمل , الجهد على طرفي المولد ينخفض بسبب الهبوط في الجهد في مقاومة المنتج $I_a R_a$ هذا الهبوط في الجهد يكون في الحقيقة ضعيفا لأن مقاومة دائرة المنتج R_a صغيرة . لذا فإن الجهد على طرفي مولد التيار المستمر بإثارة منفصلة و عند الحمل يكون تقريبا ثابتا.

أهمية الخاصية الخارجية تكمن في تحديد التشغيل عند التحميل على أي جهاز استقبال معروف

٣,١ - التحكم في جهد خرج المولد ذي الإستثارة المنفصلة :

يمكن التحكم في جهد خرج المولد ذي الإستثارة المنفصلة بتغيير الجهد الداخلي المتولد E_a في الآلة . فمن معادلة الجهود $V_L = E_a - I_a R_a$ يمكن ملاحظة أنه إذا تزايدت E_a ستزيد تبعاً لها V_L و كذلك إذا تناقصت E_a سيتناقص معها V_L . كون الجهد المتولد يعطى بالمعادلة $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m$ فإن هناك طريقتين للتحكم في جهد خرج هذا المولد .

١,٣,١ - تغيير سرعة الدوران ω_m

إذا زادت سرعة التدوير ω_m تزيد E_a و بالتالي يزيد أيضا الجهد على طرفي المولد V_L

٢,٣,١ - تغيير تيار الإستثارة I_f

إذا انخفضت مقاومة دائرة المجال R_f يزيد تيار الإستثارة تبعاً لقانون أوم $I_f = \frac{V_f}{R_f}$ حيث V_f مصدر جهد مستمر منفصل يغذي ملفات المجال ، فيتولد تدفق مغناطيسي Φ أكبر . وعندما يزيد هذا الأخير يرفع معه الجهد المتولد E_a و بالتالي يزيد جهد الأطراف V_L حسب العلاقات السابقة .
ففي كثير من التطبيقات العملية مجال تغير سرعة الآلة المحركة للمولد يكون محدوداً لذا طريقة التحكم في جهد أطراف المولد الأكثر شيوعاً هي بواسطة تغيير تيار الإستثارة .

٤,١ - مسألة محلولة :

مولد تيار مستمر من نوع الإستثارة المنفصلة يدور عند سرعة 1200 لفة/دقيقة و يغذي حملاً ثابت المقاومة بتيار قدره 200 A عند جهد 125 V ، مقاومة ملفات عضو الإستنتاج 0.04Ω .

١ - احسب : القوة الدافعة الكهربائية و مقاومة الحمل .

٢ - إذا انخفضت الآن السرعة إلى 1000 لفة/دقيقة و مع اعتبار عدم تغيير تيار المجال ، جد :
القوة الدافعة الكهربائية الجديدة و التيار الجديد الذي يغذي به المولد الحمل .
الحل :

١ - معادلة الجهود لمولد التيار المستمر باستثارة منفصلة هي :

$$E_a = V_L + I_a R_a \quad E_a = 125 + 200 \times 0.04 = 133V$$

تحسب مقاومة الحمل R_L من قانون أوم $V_L = I_L R_L$ إذا $R_L = \frac{V_L}{I_L}$ أو $R_L = \frac{125}{200} = 0.625 \Omega$

٢ - تنخفض السرعة الآن إلى 1000 لفة / دقيقة و مع ثبات تيار المجال :

تعطى السرعة الأصلية بالمعادلة $E_{a1} = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_{m1}$ حيث $\omega_{m1} = 2\pi \times \frac{n_1}{60}$ السرعة الزاوية و n_1 عدد اللفات

لكل دقيقة ، السرعة الجديدة $E_{a2} = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_{m2}$ مع $\omega_{m2} = 2\pi \times \frac{n_2}{60}$ و n_2 السرعة الجديدة ، يمكن

كتابة النسبة التالية $\frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{k_a \Phi \frac{2\pi \times n_2}{60}}{k_a \Phi \frac{2\pi \times n_1}{60}} = \frac{n_2}{n_1}$ ما دام k_a و Φ ثابتين .

لذا تكون الق.د.ك الجديدة $E_{a2} = E_{a1} \times \frac{n_2}{n_1} = 133 \times \frac{1000}{1200} = 110.8V \cong 111V$

تيار الحمل الجديد : $I_{a2} = \frac{E_{a2}}{R_a + R_L} = \frac{111}{0.04 + 0.625} = 166.9 \cong 167 A$

٢ - مولدات الإستثارة الذاتية :

في هذه الطريقة تغذي الآلة نفسها ملفات مجالها بالتيار المستمر وهذا لا يكون ممكنا إلا بعدما يتم تدوير عضو الإستنتاج و وجود المغناطيسية المتبقية Φ_{res} في أقطاب الآلة . فإن كانت آلة جديدة خارجة من المصنع لأول مرة تدار الآلة و تغذى ملفات مجالها بتيار إستثارة خارجي لتوليد المغناطيسية المتبقية الضرورية للإستثارة الذاتية . وهنا تجدر الإشارة إلى أنه في حالة التشغيل، عندما يكون الفيض الناتج عن مرور تيار في ملفات المجال والفيض المتبقي في اتجاه معاكس، لا يتولد جهد بين طرفي عضو الاستنتاج. في هذه الحالة لتوليد الجهد يجب: إما عكس اتجاه تيار ملفات المجال أو عكس اتجاه دوران المحرك الذي يدير عضو الاستنتاج.

و تبعا لطريقة توصيل ملفات المجال بدائرة المنتج تنقسم مولدات الإستثارة الذاتية إلى :

١,٢ - مولد التوازي :

في هذا النوع من المولدات توصل ملفات المجال مباشرة على التوازي مع ملفات المنتج بحيث يغذي الجهد المتولد في المنتج ملفات المجال بتيار الإستثارة I_f

٢,١,٢ - المعادلات التي تتحكم في تشغيل مولدات التيار المستمر ذي الإستثارة توازي

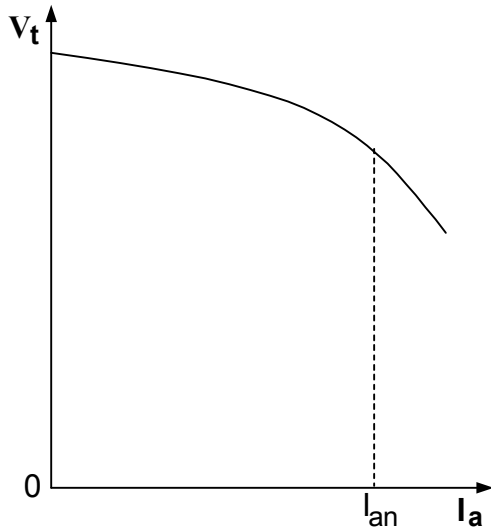
الشكل (٢٢,١) يبين الدائرة المكافئة لمولد التوازي عند التحميل .

المعادلات التي تصف لنا تشغيل المولد التوازي في الحالة المنتظمة عند الحمل هي :

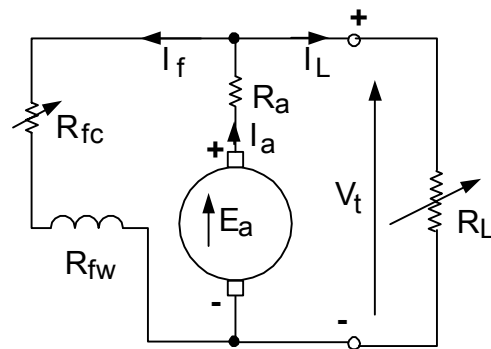
$$I_a = I_f + I_L \quad (١٢,١) \quad V_L = E_a - I_a R_a \quad (١١,١)$$

$$V_L = I_f (R_{fw} + R_{fc}) = I_f R_f \quad (١٣,١)$$

٢,١,٢ - الخاصية الخارجية $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة، مقاومة دائرة المجال ثابتة و تيار حمل متغير



الشكل ٢٣,١ الخاصية الخارجية



الشكل ٢٢,١ مولد إستثارة توازي

عند التحميل

لمولد توازي

الخاصية الخارجية لمولد التوازي تختلف عن نظيرتها لمولد الإستثارة المنفصلة بسبب أن مقدار تيار المجال في المولد التوازي متعلق بالجهد على طرفي المنتج (جهد الحمل) V_L . و لفهم الخاصية الخارجية لمولد التوازي نلاحظ ماذا يحصل للآلة من حالة اللاحمل إلى زيادات متتالية للتحميل آخذين بالحسبان قانون كرشوف : $V_L = E_a - I_a R_a$

في مولد التوازي عندما ينخفض الجهد V_L ينخفض معه تيار المجال ويكون سببا في هبوط الجهد E_a . الشكل (٢٣،١) يوضح أنه في حالة اللاحمل يكون الجهد على طرفي المولد مساو للـ $E_{a,0}$ المتولدة لكن سرعان ما يهبط هذا الجهد نتيجة لهبوط الجهد الداخلي . من الواضح أيضا أن انخفاض الجهد على طرفي مولد التوازي مع تيار المنتج أسرع على ما هو عليه في مولد الإستثارة المنفصلة ، و السبب هو أن في مولد التوازي ، عندما يهبط جهد الأطراف عند زيادة الحمل ينخفض معه أيضا تيار المجال مما ينتج عنه جهداً متولداً أقل بينما في مولد الإستثارة المنفصلة تيار المجال و بالتالي الجهد المتولد غير متأثرين بالحمل .

٣،١،٢ - التحكم في جهد خرج مولد التوازي

كما كان الشأن بالنسبة لمولد الإستثارة المنفصلة فإن هناك طريقتين للتحكم في جهد خرج مولد التوازي :

١،٣،١،٢ - تغيير سرعة عمود إدارة المولد w_m

٢،٣،١،٢ - تغيير مقاومة دائرة المجال R_f : يتم توصيل مقاومة متغيرة R_{fc} على التوالي مع ملفات المجال فيمكن بواسطتها تقليل أو زيادة الجهد المتولد .

إن تغيير مقاومة دائرة المجال هي الطريقة الرئيسة للتحكم في جهد خرج المولد التوازي V_L . فإذا انخفضت مقاومة دائرة المجال R_f ، $(R_f = R_{fw} + R_{fc})$ ، R_{fw} مقاومة ملفات المجال ، R_{fc} المقاومة المتغيرة ، يزيد تيار المجال $I_f = \frac{V_L}{R_f}$ و عندما يزيد هذا الأخير ، يزيد تبعاً له التدفق المغناطيسي Φ في الآلة مسبباً بذلك ارتفاع الجهد الداخلي $E_a = k_a \Phi w_m$ و الآن ارتفاع E_a يسبب أيضاً ارتفاع الجهد على طرفي المولد $V_L = E_a - I_a R_a$ و العكس صحيح .

٤،١،٢ - استخدام مولد التوازي :

- يستخدم في المجالات التي تتطلب جهداً تقريباً ثابتاً ومنها شحن البطاريات .
- في محطات القوى الكهربائية .
- يغذي أقطاب مولدات التيار المتردد المتزامنة .

- يغذي أجهزة التسخين و الإنارة .

٥,١,٢ - مسألة محلولة :

عضو الإستنتاج لمولد تيار مستمر توازي يعطي تيار $100A$, له 200 موصل و يدور بسرعة 500 لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار فيضه 0.025 Wb ,

للمولد 4 أقطاب , وعدد الدوائر على التوازي في المنتج $A=2$.

مقاومة ملفات عضو الإستنتاج $0.1\ \Omega$ و مقاومة ملفات المجال $80\ \Omega$. إذا كانت المفايد الحديدية و الميكانيكية تساوي 1660 W و مع إهمال رد فعل المنتج , احسب ما يلي :

- ١ - القوة الدافعة الكهربائية المتولدة
- ٢ - الجهد على الأطراف الخارجية للمولد
- ٣ - تيار المجال
- ٤ - تيار الحمل
- ٥ - القدرة التي يعطيها المولد للخارج (قدرة خرج المولد)
- ٦ - الفقد النحاسي
- ٧ - الكفاءة

الحل :

١ - القوة الدافعة الكهربائية E_a تعطى بالعلاقة $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m$

$$k_a = \frac{ZP}{2\pi A} = \frac{264 \times 4}{2\pi \times 2} = 84.03$$

ثابت الآلة

$$\omega_m = 2\pi \times \frac{n}{60} = 2\pi \times \frac{500}{60} = 52.36\text{ rad/sec}$$

السرعة الزاوية

$$E_a = 110V \text{ أو } E_a = 84.03 \times 0.025 \times 52.36$$

لذا تكون الق.د.ك المتولدة في المنتج

٢ - الجهد على الأطراف الخارجية لمولد التوازي V_L

$$V_L = 100V \text{ أو } V_L = 110 - 100 \times 0.1, V_L = E_a - I_a R_a$$

$$I_f = 1.25A \text{ أو } I_f = \frac{100}{80}, I_f = \frac{V_L}{R_{fw}}$$

٣ - تيار المجال I_f

$$I_L = 98.75A \text{ أو } I_L = 100 - 1.25, I_L = I_a - I_f$$

٤ - تيار الحمل I_L

$$P_{out} = 9875W \text{ أو } P_{out} = 100 \times 98.75, P_{out} = V_L \times I_L$$

٥ - القدرة التي يعطيها المولد للحمل:

$$P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a$$

٦ - الفقد النحاسي :

$$P_{cu} = 1125W \text{ أو } P_{cu} = (1.25)^2 \times 80 + (100)^2 \times 0.1$$

$$\sum P_{losses} = P_{iron} + P_{mech} + P_{cu}, \eta\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100$$

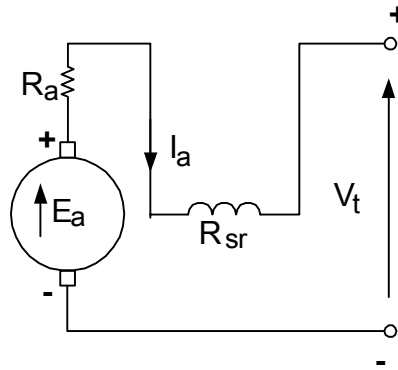
٧ - الكفاءة :

$$\eta\% = 78\% \text{ أو } \eta\% = \frac{9875}{9875 + 1660 + 1125} \times 100$$

٢,٢ - مولد التوالي :

في هذا النوع تكون ملفات المجال موصلة بالتوالي مع ملفات المنتج أي يمر فيها تيار المنتج كله . ما دام التيار الذي يمر في ملفات المنتج أكبر بكثير من ذلك في ملفات مجال مولد التوازي فإن ملفات التوالي لا تحتوي إلا على بعض اللفات من موصل مساحة مقطعه أكبر من مساحة مقطع ملف مجال التوازي . و القوة الدافعة المغناطيسية تعطى بالعلاقة $F = NI$, لذا نفس الق.د.ك التي ينتجها عدد قليل من اللفات بتيار عال , يمكن أن تولدها لفات كثيرة بتيار قليل . و مادام تيار الحمل الكامل يمر في ملفات مجال التوالي يجب أن يصمم هذا الأخير بأقل مقاومة ممكنة .

يبين الشكل (٢٤,١) الدائرة المكافئة لمولد تيار مستمر من نوع الإستثارة توالي



الشكل ٢٤,١ مولد توالي

ملفات التوالي تولد التدفق المغناطيسي للآلة إلا عندما يمر فيها تيار المنتج , يمكن الملاحظة أن في هذا النوع , (تيار المنتج I_a , و تيار المجال I_f , و تيار الحمل I_L) كلها لها نفس القيمة ($I_a = I_f = I_L$) , كما لا تغلق دائرة المجال (حتى يمر فيها بالطبع التيار الكهربائي) إلا إذا تم توصيل حمل على أطراف المولد .

١,٢,٢ - المعادلات التي تتحكم في تشغيل مولد التوالي عند الاستقرار :

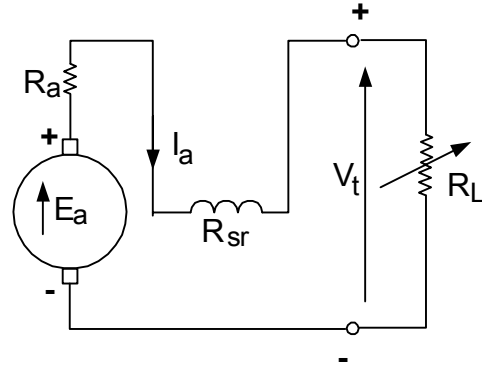
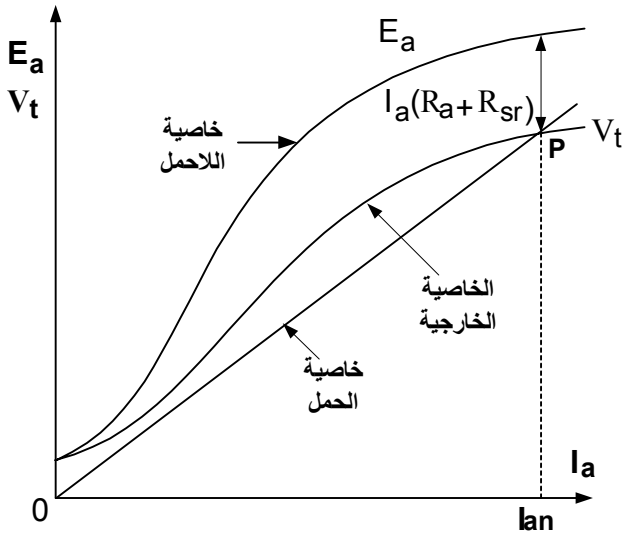
$$V_L = E_a - I_a(R_a + R_s) \quad (١٤,١) \quad \text{بدون رد فعل المنتج} \quad (١٥,١) \quad I_a = I_f = I_L$$

٢,٢,٢ - خاصية اللاحمل (أو منحنى التمهبط) $E_a = f(I_f)$ عند سرعة ثابتة:

منحنى التمهبط لمولد التوالي مماثل لمنحنى التمهبط لأي مولد آخر . عند اللاحمل , لا يمر تيار في ملفات المجال و بالتالي ينحصر جهد الأطراف V_L في قيمة صغيرة $E_{a(res.)}$ و تكون ناتجة عن التدفق المغناطيسي المتبقي Φ_{res} .

و يمكن الحصول على منحنى التمهبط لمولد التوالي بتغذية ملف المجال من مصدر جهد مستمر خارج عن الآلة (إستثارة منفصلة) .

٣,٢,٢ - الخاصية الخارجية $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة :



الشكل ٢٦,١ الخاصية الخارجية لمولد التوالي

الشكل ٢٥,١ مولد توالي عند التحميل

إذا كان الحمل عبارة عن مقاومة قيمتها R_L , تكون خاصية الحمل $V_L = I_L R_L$ خط مستقيم ميله R_L . نقطة التشغيل P (الشكل ٢٦,١) لهذا الحمل تكون نقطة تقاطع منحنى خاصية الحمل مع منحنى الخاصية الخارجية. يمكن الملاحظة أنه إذا كانت المقاومة R_L كبيرة , فإن الجهد على الأطراف يكون قليلا جدا أي إن مولد التوالي لا يولد أي جهد معتبر .

٤,٢,٢ - استخدام مولد التوالي :

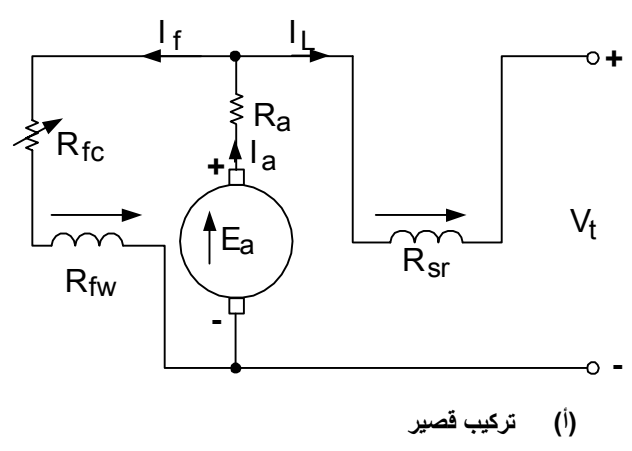
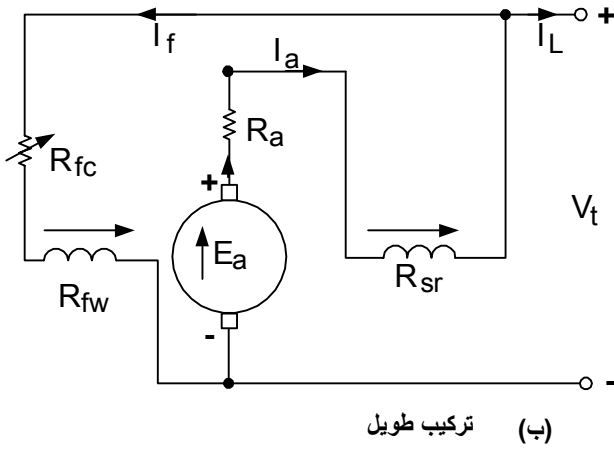
يستخدم مولد التوالي في بعض التطبيقات الخاصة التي تستعمل فيها خاصية زيادة الجهد المتولد بزيادة تيار الحمل , واحدة من هذه التطبيقات العملية هي اللحام الكهربائي .

٣,٢ - مولدات التيار المستمر المركبة :

كثير من التطبيقات العملية تتطلب أن جهد الأطراف يبقى ثابتا عند تغير الحمل , لكن عندما تعطي مولدات التيار المستمر تيارا ينخفض جهد الأطراف بسبب الهبوط الداخلي للجهد $(I_a R_a)$ و إضعاف تيار المجال (في المولد استثارة توازي).

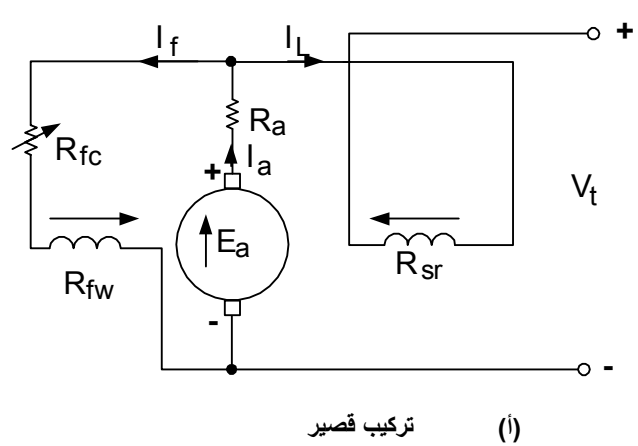
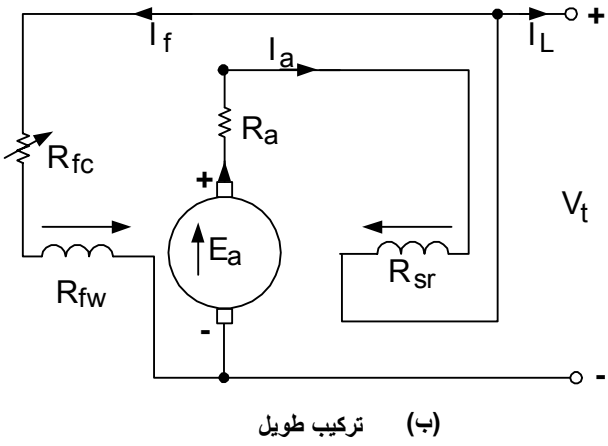
للقضاء على تأثيرات هبوط الجهد الداخلي و إضعاف المجال , يمكن تركيب ملف على أقطاب المجال فوق ملف مجال التوازي الأصلي و تسمى الآلة في هذه الحالة آلة مركبة . هذا الملف الإضافي و الذي يعرف بملف التوالي , يوصل إما حسب التركيب القصير

(الشكل ٢٧,١ أ و ٢٨,١ أ) و إما حسب التركيب الطويل (الشكل ٥٩,١ ب و ٦٠,١ ب) كما سبق تعريفه . فعند مرور تيار في ملف التوالي الإضافي يولد تدفقا مغناطيسيا Φ_{ser} إما يساعد التدفق المغناطيسي Φ_{sh} ملف التوازي و تكون الآلة من النوع التراكمي (cumulative compound machine)



الشكل ٢٧,١ مولد مركب تراكمي

و إما يعاكسه و تكون الآلة من النوع التفاضلي أو الفرقي (differential compound machine)



الشكل ٢٨,١ مولد مركب تفاضلي

في الآلة المركبة يكون ملف مجال التوازي هو ملف المجال الرئيس الذي يولد أكبر مقدار لمجال الآلة . و يتكون ملف التوازي من عدة لفات بمساحة مقطع أصغر و يمر فيه تيار أقل مقارنة مع المنتج . بينما ملف التوالي عدد لفات أقل و مساحة مقطع أكبر و يحمل تيار المنتج . و يستعمل ملف التوالي أساسا لتعويض الهبوط الداخلي للجهد .

١,٣,٢ - التركيب القصير (short shunt connection)

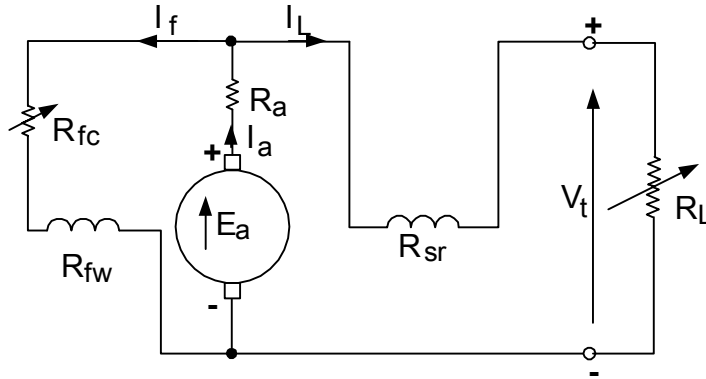
الشكل (٢٩,١) يبين الدائرة المكافئة لمولد تيار مستمر من نوع التركيب القصير , و فيه يوصل ملف التوازي مباشرة على المنتج .

المعادلات التي تتحكم في أداء مولد التركيب القصير في الحالة المنتظمة و المستقرة هي :

$$I_a = I_L + I_f \quad (١٧,١)$$

$$V_L = E_a - I_a R_a - I_L R_{sr} \quad (١٦,١)$$

$$R_f = R_{fc} + R_{fw}, \quad I_f = \frac{E_a - I_a R_a}{R_f} \quad (١٨,١)$$



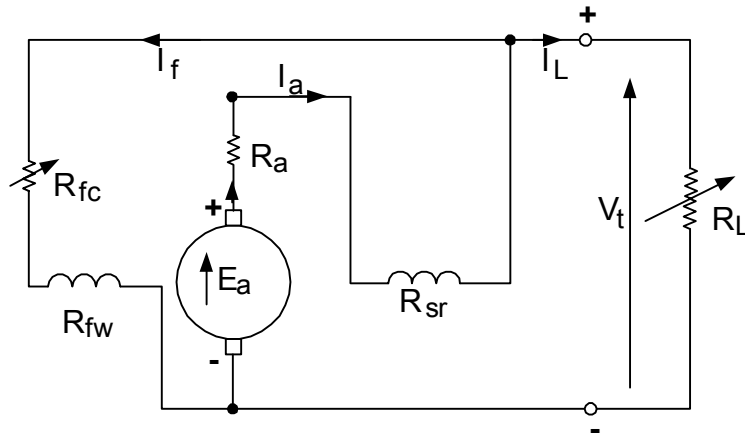
الشكل ٢٩,١ مولد مركب قصير عند التحميل

٢,٣,٢ - التركيب الطويل (long shunt connection)

الدائرة المكافئة لمولد التيار المستمر من نوع التركيب الطويل مبينة في الشكل (٣٠,١), وفيه يوصل ملف التوازي على الدائرة المكونة من ملف التوالي الموصل على التوالي مع المنتج .

و المعادلات التي تتحكم في الأداء المنتظم و المستقر لمولد التيار المستمر من النوع التركيب الطويل هي

$$I_a = I_f + I_L \quad (٢١,١) \quad I_f = \frac{V_L}{R_f} \quad (٢٠,١) \quad V_L = E_a - I_a (R_a + R_{sr}) \quad (١٩,١) \quad \text{كالاتي :}$$



الشكل ٣٠,١ مولد مركب مركب طويل عند التحميل

٣,٣,٢ - المجال الفعلي في التركيبين القصير والطويل

يمكن كتابة المعادلة التالية للقوة الدافعة الكهربائية لكل من التوصيلين إذا ما افترضنا علاقة خطية للتدفق المغناطيسي مع تيار المجال :

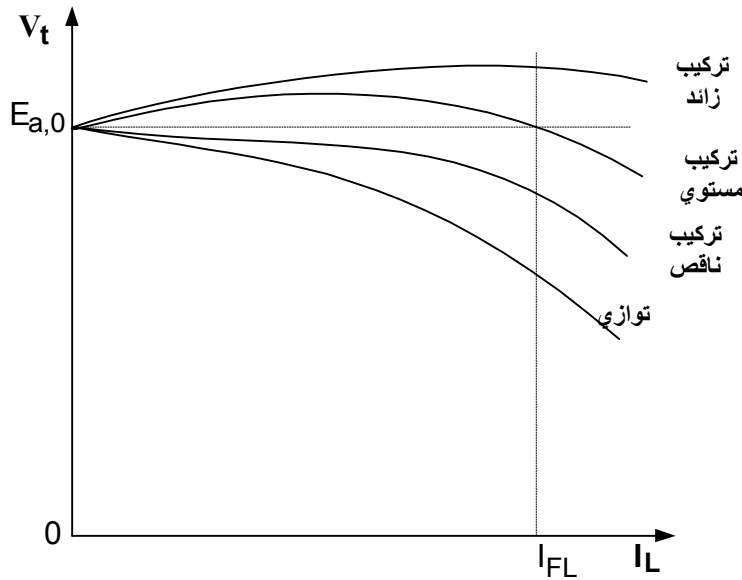
$$E_a = k_a (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr}) \omega_m$$

التدفق المغناطيسي لكل قطب و الناتج عن ملف التوازي

تكون إشارة + عندما يساعد مجال التوالي مجال التوازي في الآلة المركبة من النوع التراكمي
تكون إشارة - عندما يعاكس مجال التوالي مجال التوازي في الآلة المركبة من النوع التفاضلي .

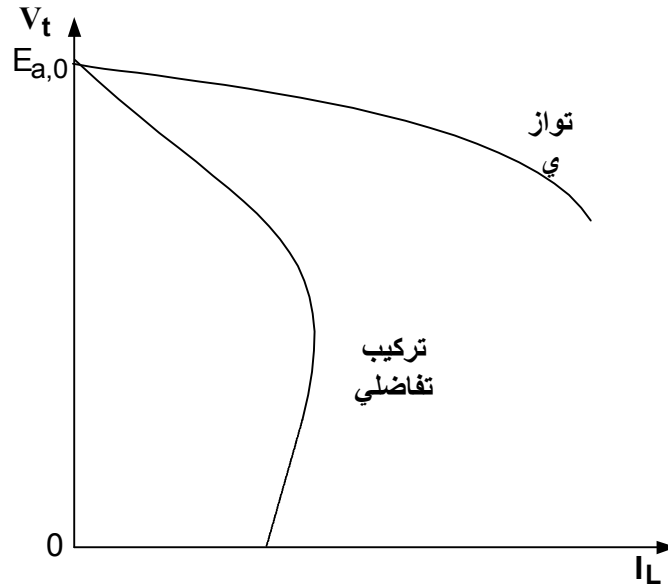
٤,٣,٢ - منحنيات الخواص الخارجية للمولدات المركبة $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة :

منحنيات الخواص الخارجية للمولدات المركبة مبينة في الشكل (٣١,١) .
في النوع التراكمي عند زيادة تيار المنتج , جهد أطراف المولدات المركبة إما يرتفع عن جهد الحمل الكامل و تسمى الحالة تركيباً زائداً (overcompound) أو ينخفض عن جهد الحمل الكامل و تسمى الحالة تركيب ناقص (undercompound) أو يساوي جهد الحمل الكامل و تسمى الحالة تركيباً مستوياً (flat compounding) . هذا متعلق كله بدرجة التركيب أي بعدد لفات ملف التوالي .



الشكل ٣١,١ الخاصية الخارجية للمولد المركب التراكمي

و في النوع التفاضلي و بسبب معاكسة مجال التوالي لمجال التوازي يهبط جهد الأطراف بسرعة عند زيادة تيار المنتج الشكل (٣٢,١) خاصية التيار المحدود للمولدات التفاضلية تجعلها مناسبة للحام الكهربائي .



الشكل ٣٢,١ الخاصية الخارجية للمولد المركب التفاضلي

٥,٣,٢ - مسائل محلولة :

عضو الاستنتاج لمولد تيار مستمر من نوع التركيب الطويل له 476 موصل و يعطي تيار 101.3 A عندما يدور بسرعة 1800 لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار تدفقه 0.015Wb , عدد الدوائر على التوازي في عضو الاستنتاج A=2 , ومقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.1 Ω , ومقاومة ملفات التوازي 150 Ω ومقاومة ملفات التوالي 0.04 Ω . إذا كانت المفاقد الحديدية و الميكانيكية تساوي 1827 W احسب :

- ١ - الق.د.ك المتولدة في المنتج
- ٢ - الجهد على الأطراف الخارجية للمولد
- ٣ - تيار مجال ملف التوازي
- ٤ - تيار الحمل
- ٥ - قدرة الخرج التي يعطيها المولد لهذا الحمل
- ٦ - المفاقد الكلية
- ٧ - كفاءة هذا المولد

الحل :

$$١ - \text{الق.د.ك تعطى بالعلاقة } E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m, \quad k_a = \frac{PZ}{2\pi A} = \frac{Z}{2\pi}, \quad \omega_m = 2\pi \times \frac{n}{60}, \quad E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m$$

$$\text{ثابت الآلة } k_a = \frac{476}{2\pi} = 75.75, \quad \text{السرعة الزاوية } \omega_m = 2\pi \times \frac{1800}{60} = 188.5 \text{ rad/sec}$$

$$E_a = 214.2V \text{ أو } E_a = 75.75 \times 0.015 \times 188.5$$

$$٢ - \text{جهد خرج المولد } V_L = E_a - I_a(R_a + R_{sr}), \quad V_L = 214.2 - 101.3 \times (0.1 + 0.04), \quad \text{أو } V_L = 200V$$

$$٣ - \text{تيار مجال ملف التوازي } I_f = \frac{V_L}{R_{fw}} = \frac{200}{150} = 1.3A, \quad I_f = \frac{V_L}{R_{fw}}$$

$$٤ - \text{تيار الحمل } I_L = I_a - I_f = 101.3 - 1.3 = 100A, \quad I_L = I_a - I_f$$

$$٥ - \text{قدرة خرج المولد } P_{out} = V_L \times I_L = 200 \times 100 = 20000W = 20Kw, \quad P_{out} = V_L \times I_L$$

$$٦ - \text{مفاقد المولد الكلية } \sum P_{losses} = P_{iron} + P_{mech} + P_{cu}$$

$$\text{المفاقد الحديدية و الميكانيكية } P_{iron} + P_{mech} = 1827W$$

$$\text{المفاقد النحاسية } P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 (R_a + R_{sr}), \quad P_{cu} = (1.3)^2 \times 150 + (101.3)^2 \times (0.1 + 0.04), \quad P_{cu} = 1703W$$

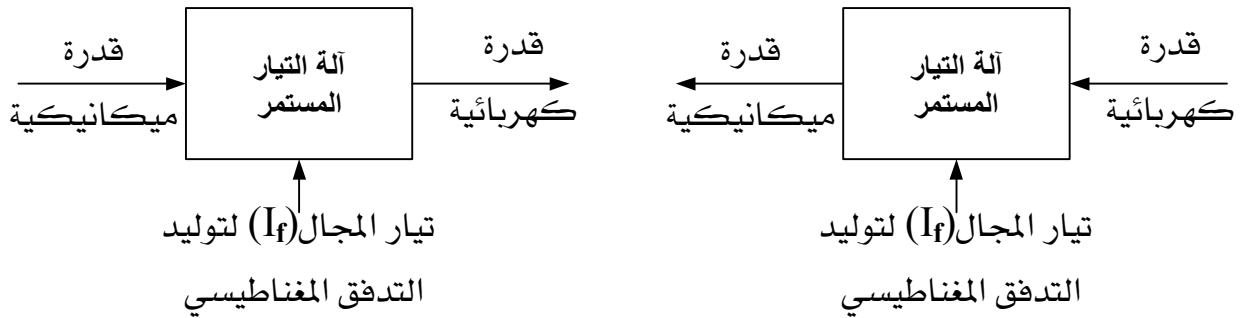
$$\sum P_{losses} = 1827 + 1703 = 3530W \text{ إذا}$$

$$٧ - \text{كفاءة المولد } \eta\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100 = 85\%, \quad \eta\% = \frac{20000}{20000 + 3530} \times 100 = 85\%$$

٣,١ محركات التيار المستمر

١ - مقدمة

من مميزات آلات التيار المستمر أنها قابلة للعمل كمولد أو كمحرك و هذا مبين في الشكل (٣٣,١).
المسألة كلها متعلقة باتجاه تدفق القدرة خلال الآلة.



الشكل ٣٣,١ تحويل القدرة الكهروميكانيكية

تستخدم الآن آلات التيار المستمر أكثر كمحركات و هذا لعدة أسباب منها :

- ١ - الشبكات الكهربائية بالتيار المستمر لازالت مستعملة في السيارات و كذلك الرافعات و الجرافات , والطائرات , و البواخر , فيكون من المعقول إذا استخدام محركات التيار المستمر .
 - ٢ - الحالات التطبيقية والتي تتطلب مجالا عريضا للتغيير الدقيق للسرعة.
- تغذى محركات التيار المستمر من مصدر تيار مستمر , لذا نفترض أن جهد تغذية محرك التيار المستمر ثابت إلا في حالة ما تم تحديد غير ذلك . هذا الافتراض سيسهل تحليل المحركات و المقارنة ما بين أنواعها.

هناك خمسة أنواع أساسية لمحركات التيار المستمر المستعملة :

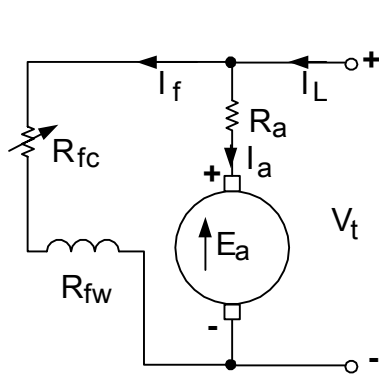
- ١ - محرك التيار المستمر ذو الإستثارة المنفصلة
- ٢ - محرك التيار المستمر ذو الإستثارة توازي
- ٣ - محرك التيار المستمر ذو الإستثارة توالي
- ٤ - محرك التيار المستمر ذو الإستثارة المركبة
- ٥ - محرك التيار المستمر ذو المغناطيسية الدائمة

في كلا الحالتين تشغيل آلة التيار المستمر (مولد أو محرك) فإن ملفات المنتج تدور في مجال مغناطيسي و تحمل تيار كهربائي . و تبعا لذلك فإن المعادلتين الأساسيتين : $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m$ و $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a$ تستعملان للمولد و المحرك .

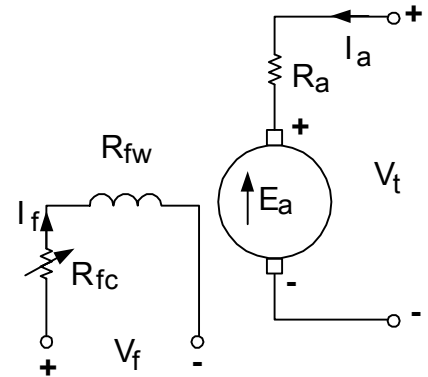
مرور التيار في ملفات المنتج يكون خارجا من المولد و داخلا في المحرك و يجب مراعاة ذلك عند كتابة معادلات قانون كرشوف للجهود :

٢ - محركات التيار المستمر ذات الإستثارة توازي و الإستثارة منفصلة :

محرك التيار المستمر ذو الإستثارة المنفصلة هو محرك تغذى دائرة مجاله من مصدر جهد مستمر ثابت بينما في المحرك التوازي توصل ملفات المجال إلى طرفي عضو الإستتاج , فعندما يكون جهد تغذية محرك التوازي ثابتا لا يوجد هنالك أي اختلاف عملي في أداء المحركين, فتغذية ملفات المجال مستقلة عن المنبع. إن لم يتم تخصيص غير ذلك , كل وصف لأداء محرك التوازي يعني كذلك محرك الإستثارة المنفصلة . لذا نكتفي بتحليل محرك التوازي فقط . الدائرة المكافئة لمحرك التوازي مبينة في الشكل ٣٤,١



الشكل ٣٥,١ محرك إستثارة توازي



الشكل ٣٤,١ محرك الإستثارة المنفصلة

الدائرة المكافئة لمحرك التوازي مبينة في الشكل ٣٥,١ و فيها توصل ملفات المنتج و المجال على التوازي على طرفي مصدر جهد مستمر ذي قيمة V_t .

١,٢ - المعادلات التي تتحكم في تشغيل محرك التوازي في حالة الاستقرار هي كالاتي :

$$(٢٥,١) \quad I_L = I_a + I_f \quad (٢٤,١) \quad I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad (٢٣,١) \quad V_t = E_a + I_a R_a \quad (٢٢,١)$$

$$T_m = k_a \cdot \Phi_0 \cdot I_a \quad \text{العزم المتولد وهو العزم الكلي والذي يمكن حسابه كذلك بالمعادلة} \quad T_m = \frac{P_m}{\omega_m}$$

حيث $P_m = T_m \omega_m = E_{a,L} I_a$ (٢٦,١) هي القدرة الميكانيكية الكلية المحولة

ملحوظة مهمة : تيار المنتج I_a و سرعة المحرك ω_m متعلقان بالحمل الميكانيكي الموصل لعمود الدوران.

٢,٢ - خواص محركات التوازي (أو محركات الإستثارة المنفصلة)

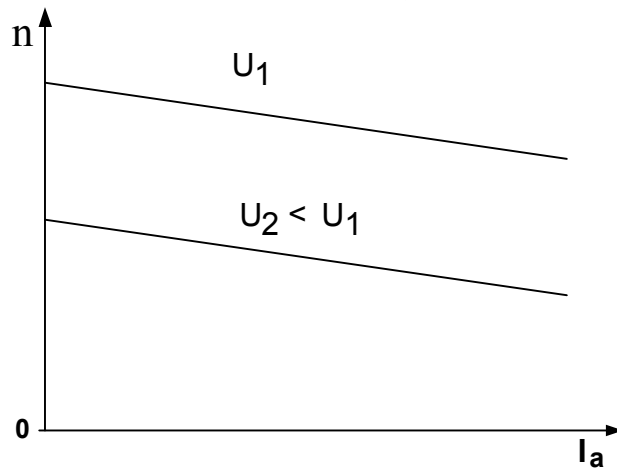
الخواص هي المنحنيات التي تعبر بيانها عن العلاقات بين المتغيرات التالية : التيار الذي يسحبه المحرك من المصدر , سرعة و عزم المحرك . تختلف هذه الخواص بتغير نوع الإستثارة .

• في حالة محرك الإستثارة المنفصلة , يجب تغذية دائرة المجال قبل تغذية دائرة المنتج .

• في حالة محرك التوازي , تغذية دائرة المنتج يجب أن تكون تدريجيا .

عند الظروف العادية للاستخدام، هذه المحركات تمتلك خواص المحرك ذي التدفق المغناطيسي الثابت.

٢,٢,٢ - خاصية سرعة المحرك عند التحميل : $n = f(I_a)$ مع ثبات V_t (و بالتالي I_f و Φ_0 ثابتان)
تعطى سرعة المحرك عند التحميل بالعلاقة $w_m = \frac{V_t - I_a R_a}{k_a \Phi_0}$ أو $(27,1)$ $n = \frac{V_t - I_a R_a}{k_1 \Phi_0}$ و من الواضح أنها تتناقص مع التيار الذي يسحبه المنتج إلا أن تناقصها عن قيمتها عند اللاحمل بسبب زيادة هبوط الجهد $(I_a R_a)$ في مقاومة المنتج عند التحميل يبقى طفيفا لأن $I_a R_a$ حتى لتيار الحمل الكامل يكون دائما ضعيفا كقيمة نسبية مقارنة مع V_t . (انظر الشكل ٣٦,١)
لذا يمكن القول أن سرعة محرك التوازي تبقى تقريبا ثابتة نسبيا مهما كان الحمل .
يتسارع محرك التوازي في حالة تخفيض أو قطع تيار الإستثارة.



الشكل ٣٦,١ : تغير سرعة محرك التوازي مع تيار المنتج

٣,٢,٢ - خاصية العزم : $T_m = f(I_a)$

يعطى العزم الكهرومغناطيسي (أو الميكانيكي الكلي) بالعلاقة : $T_m = k_a \cdot \Phi_0 \cdot I_a$ و الذي يعطى كذلك بالعلاقة : $T_m = \frac{E_{a,L} I_a}{w_m}$. مادام التدفق المغناطيسي Φ_0 ثابتا يكون العزم الكهرومغناطيسي

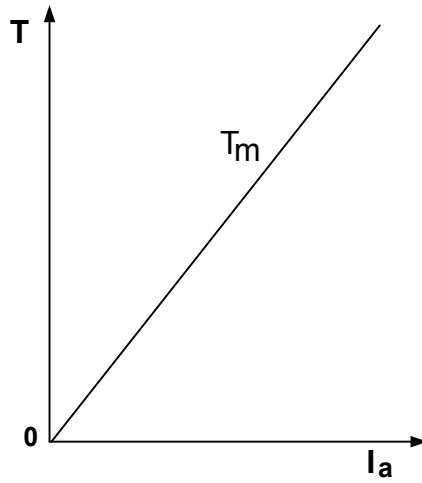
متناسبا طردا مع تيار المنتج : $T_m = k_a \Phi_0 I_a = K I_a$ (٢٨,١)

عند تيار المنتج I_a معين يتناقص العزم عندما ينخفض التدفق المغناطيسي Φ_0 لزيادة السرعة .

❖ عزم المفايد (الميكانيكية و الحديدية) $T_f = \frac{P_{mech} + P_{iron}}{w_m} \cong \frac{V_t I_{a,0}}{w_m}$ يكون تقريبا ثابتا ، $I_{a,0}$

التيار الذي يسحبه المحرك عند اللاحمل.

❖ علاقة العزم المفيد أو النافع T_2 على عمود الدوران : $T_2 = T_m - T_f$ ، $(T_2 < T_m)$.



الشكل ٣٧,١ : تغير عزم محرك التوازي مع تيار المنتج

٣,٢ - التحكم في سرعة المحرك التوازي :

يعتبر محرك التوازي من المحركات التي سرعته تقريبا ثابتة مع كل الأحمال ابتداء من اللاحمل وحتى عند الحمل الكامل , و بذلك يمكن إهمال الهبوط الطفيف الذي يقع للسرعة . إذا أردنا تغيير السرعة تغيرا ملحوظا و التحكم فيها يجب استعمال إحدى الطرق التالية التي نستنتجها من المعادلة (٢٧,١) .

١,٣,٢ - تغيير جهد تغذية المحرك V_f

٢,٣,٢ - التحكم في التدفق المغناطيسي Φ_0 بتوصيل مقاومة متغيرة R_{fc} على التوالي مع دائرة المجال .

٣,٣,٢ - توصيل مقاومة متغيرة على التوالي مع دائرة المنتج فتزيد في مقاومتها . في هذه الحالة إذا كان تيار المجال I_f ثابتا لا تنخفض السرعة عند اللاحمل لكن يكون هبوطها أسرع عند التحميل .

٤,٢ - استخدام محرك التوازي :

يستخدم محرك التوازي في الحالات التي تحتاج إلى سرعة تقريبا ثابتة أو التي يمكن أن تهبط فيها السرعة إلا هبوطا طفيفا مع ازدياد الحمل مثل آلات الغزل و النسيج , و المخارط , و المقاشط , والفرايز , و المثاقيب , و إدارة المراوح و الدرافيل , و ماكينات صناعة الورق , و ماكينات صناعة الأخشاب .

و لا يستعمل محرك التوازي في الحالات التي يكون فيها المحرك موصل بالحمل مباشرة لأن عزم دورانه صغير عند بدء الحركة . أخيرا غالبا ما يستبدل محرك التوازي بمحرك الحث الثلاثي الأوجه .

٥,٢ - عكس اتجاه محرك التوازي :

تعكس الحركة بعكس اتجاه مرور التيار في عضو الإستنتاج و ذلك بتبديل الطرفين على حامل الفرش (أو باستعمال مفتاح عاكس في دائرة المنتج) أو بعكس تيار المجال بتبديل طرفي ملفات المجال .

٦,٢ - تأثير فتح دائرة المجال على سرعة محرك التوازي :

إذا زادت مقاومة دائرة المجال انخفض تيار المجال عند جهد تغذية طبعاً ثابتاً فيقل التدفق المغناطيسي وتبعاً لذلك تزيد السرعة $(n = \frac{V_t - I_a R_a}{k_1 \Phi_0})$. وإذا فتحت دائرة المجال كلية، يهبط التدفق المغناطيسي إلى التدفق المغناطيسي المتبقي Φ_{res} فتقل القوة الدافعة المغناطيسية إلى القيمة $E_a = k_a \Phi_{res} \omega_m$ هذا سيسبب ارتفاعاً عالياً في قيمة تيار المنتج و العزم المتولد و بالتالي العزم المفيد الذي يصبح أكبر من عزم الحمل T_r مما يجعل المحرك يجمع و تظل سرعته في زيادة قد تشكل خطراً عليه إن لم تدمره بكامله .

٧,٢ - مسائل محلولة :

المسألة الأولى : محرك تيار مستمر توازي ، له أربعة أقطاب و أربعة دوائر على التوازي في عضو استنتاجه و يسحب تيار خط 63 A من مصدر جهد قدره 120 V عند الحمل الكامل ، مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.12Ω و عدد موصلاته 338 ، و مقاومة ملفات المجال 40Ω و التدفق المغناطيسي يساوي 0.02 Wb لكل قطب .

احسب عند الحمل الكامل :

- ١ - تيار الإستثارة I_{f1}
- ٢ - تيار المنتج I_{a1} . ٣ - القوة الدافعة الكهربائية المضادة E_{a1}
- ٤ - سرعة المحرك n_1
- ٥ - عزم المحرك T_1

الحل :

الحساب عند الحمل الكامل :

$$I_{f1} = \frac{V_t}{R_{fw}} = \frac{120}{40} = 3 \text{ A} \quad - \quad ١$$

$$I_{a1} = I_{L1} - I_{f1} = 63 - 3 = 60 \text{ A} \quad - \quad ٢$$

$$E_{a1} = V_t - I_{a1} R_a = 120 - 60 \times 0.12 = 112.8 \text{ V} \quad - \quad ٣$$

$$k_a = \frac{ZP}{2\pi A} = \frac{338 \times 4}{2\pi \times 4} = 53.79 \quad - \quad ٤ \quad \text{ثابت المحرك}$$

$$\omega_{m1} = \frac{E_{a1}}{k_a \Phi} = \frac{112.8}{53.79 \times 0.02} = 104.85 \text{ rad/sec} \quad \text{السرعة الزاوية}$$

$$n_1 = \frac{\omega_{m1} \times 60}{2\pi} = \frac{104.85 \times 60}{2\pi} = 1000 \text{ لفة/دقيقة} \quad \text{سرعة المحرك}$$

المسألة الثانية : محرك تيار مستمر توازي 12 Kw ، يغذى من مصدر جهد مستمر قيمته 100 V . مقاومة ملفات المنتج تساوي 0.1Ω و مقاومة ملفات المجال 80Ω . عند اللاحمل ، يدور المحرك بسرعة 1000 لفة/دقيقة و منتجه يسحب تيار 6 A من المصدر . منحنى التمهبط لهذا المحرك عند السرعة 1000 لفة/دقيقة يعطى في الجدول التالي :

$I_f(A)$	0	0.2	0.4	0.6	0.83	0.86	0.99	1.2	1.32	1.4
$E_a(V)$	8.5	31.4	65	77.1	93.5	94.4	99.4	108.5	110	114.2

١ - أوجد قيمة مقاومة التحكم في المجال (R_{fc})

٢ - أوجد المفايد الدوارة (المفايد الميكانيكية و الحديدية) عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة

٣ - احسب السرعة , و العزم الكهرومغناطيسي (الميكانيكي الكلي) و العزم النافع على عمود الإدارة و كفاءة المحرك عندما يمر التيار الإسمي (تيار الحمل الكامل) في ملفات المنتج عندما يحافظ التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية على نفس قيمته عند اللاحمل.

٤ - احسب عزم بدء الحركة إذا كان تيار المنتج عند الابتداء يساوي 150% من قيمته الاسمية فالحالة

الحل :

١ - عند اللاحمل (No-Load) , تيار المنتج $I_{a,0} = 6A$

القوة الدافعة الكهربائية المضادة : $E_{a,0} = V_t - I_{a,0} R_a = 100 - 6 \times 0.1 = 99.4V$

من جدول منحني التمكنظ , توليد ق.د.ك مضادة $E_{a,0} = 99.4V$ عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة يتطلب تيار مجال $I_f = 0.99A$.

مقاومة دائرة المجال الكلية : $R_f = R_{fc} + R_{fw} = \frac{V_t}{I_f} = \frac{100}{0.99} = 101\Omega$

لذا تساوي مقاومة التحكم في المجال : $R_{fc} = 101 - R_{fw} = 101 - 80 = 21\Omega$

٢ - عند اللاحمل تبدد القدرة الكهرومغناطيسية كمفايد دوارة (ميكانيكية و حديدية) في الآلة :

$$P_{mech} + P_{iron} = E_{a,0} I_{a,0} = 99.4 \times 6 = 596.4W$$

٣ - عند اللاحمل : $E_{a,0} = 99.4V$

عند الحمل الكامل: (Full-Load) , $\Phi_0 = \Phi_{F.L}$

تيار المنتج يساوي قيمته الاسمية : $I_a = I_{a|rated} = \frac{P_{a|rated}}{V_{t|rated}} = \frac{12000}{100} = 120A$

عند الحمل الكامل : $E_{a|F.L} = V_t - I_{a|F.L} R_a = 100 - 120 \times 0.1 = 88V$

سرعة المحرك : $\frac{E_{a|F.L}}{E_{a,0}} = \frac{k \Phi_{F.L} n_{F.L}}{k \Phi_0 n_0}$ لأن $n_{F.L} = n_0 \times \frac{E_{a|F.L}}{E_{a,0}} = 1000 \times \frac{88}{99.4} = 885.3r.p.m$

السرعة الزاوية : $\omega_{m,F.L} = 2\pi \times \frac{n_{F.L}}{60} = 2\pi \times \frac{885.3}{60} = 92.71rd/sec$

$$T_m = k_a \Phi_{F.L} I_{a|F.L} = \frac{E_{a|F.L} I_{a|F.L}}{w_{m,F.L}} = \frac{88 \times 120}{92.71} = 113.9 N.m \text{ العزم الكهرومغناطيسي}$$

$$T_f = \frac{P_{mech} + P_{iron}}{w_{m,F.L}} = \frac{596.4}{92.71} = 6.43 N.m \text{ عزم المفايد الميكانيكية و الحديدية يساوي}$$

$$T_2 = 113.9 - 6.43 = 107.47 N.m, T_2 = T_m - T_f \text{ العزم النافع على عمود الإدارة :}$$

$$P_2 = E_{a|F.L} I_{a|F.L} - (P_{mech} + P_{iron}) = 88 \times 120 - 596.4 = 9963.6 W \text{ قدرة الخرج على عمود الإدارة :}$$

$$P_2 = T_2 w_{m,F.L} = 107.47 \times 92.47 = 9963.6 W \text{ أو بطريقة ثانية :}$$

قدرة الدخل (القدرة التي يسحبها المحرك من المصدر) :

$$P_1 = V_t I_L = V_t (I_{a|F.L} + I_f) = 100(120 + 0.99) = 12099 W$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{9963.6}{12099} \times 100\% = 82.35\% \text{ كفاءة المحرك :}$$

٤ - حساب عزم بدء الحركة إذا كان تيار المنتج عند الابتداء يساوي 150% من قيمته الاسمية $I_{a|F.L}$ التدفق المغناطيسي عند التحميل يساوي قيمته عند اللاحمل .

$$k_a \Phi_{F.L} = k_a \Phi_0 = 0.949 V / rad / sec \text{ فنستنتج إذا } E_{a,0} = 99.4 = k_a \Phi_0 w_{m,0} = k_a \Phi_0 \times 104.72$$

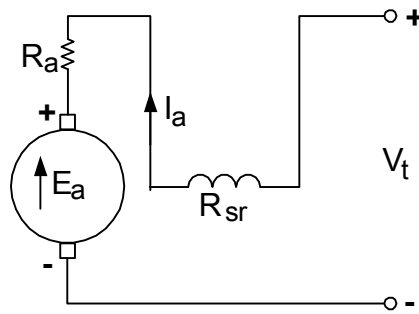
$$I_{a|start} = 1.5 \times I_{a|F.L} = 1.5 \times 120 = 180 A \text{ تيار المنتج عند الابتداء :}$$

$$T_{m|start} = k_a \Phi_{F.L} I_{a|start} = 0.949 \times 180 = 170.82 N.m \text{ عزم بدء الحركة :}$$

٣ - محرك التيار المستمر التوالي

١,٣ - مقدمة :

في هذا المحرك توصل ملفات المجال على التوالي مع دائرة المنتج كما هو مبين في الدائرة المكافئة التالية :



الشكل ٣٨,١ : مولد الإستثارة توالي

في محرك التوالي تيار المنتج I_a , تيار المجال I_f يساوي تيار الخط I_L الذي يسحبه المحرك من المصدر ($I_a = I_f = I_L$) , يتغير التدفق المغناطيسي إذا مع التحميل ولهذا السبب لمحرك التوالي خصائص معاكسة لمحرك التوازي (أو محرك الإستثارة المنفصلة) . يجمع هذا المحرك عند بدء الحركة بدون

حمل ويأخذ سرعة قد تشكل خطرا عليه , و بالتالي عند توصيله مباشرة للمصدر , يجب تحميله بآلة يكون لها عزم مقاوم معتبرا (في المختبر قد تكون مولد إستثارة منفصلة أو مكبح كهرومغناطيسي).
في الاستخدام العادي يعطي هذا المحرك قدرة ميكانيكية تقريبا ثابتة , تهبط سرعته بقوة عند التحميل بينما يتغير العزم بصفة معاكسة لتغير التيار .

٢,٣ - المعادلات التي تتحكم في محرك التوالي

العلاقتان $E_a = k_a \Phi \omega_m$ و $T_m = k_a \Phi I_a$ صالحتان كذلك لمحرك التوالي , Φ ناتج عن تيار المنتج الذي يمر في ملفات المجال .

معادلة قانون كرشوف لمجموع الجهود لهذا المحرك : (٢٩,١) $V_t = E_a + I_a(R_a + R_{sr})$

التدفق المغناطيسي متناسب طردا مع تيار المنتج إذا افترضنا أن العلاقة المغناطيسية خطية و إلا على الأقل قبل الوصول إلى مرحلة التشبع : $k_a \Phi = k_{sr} I_a$

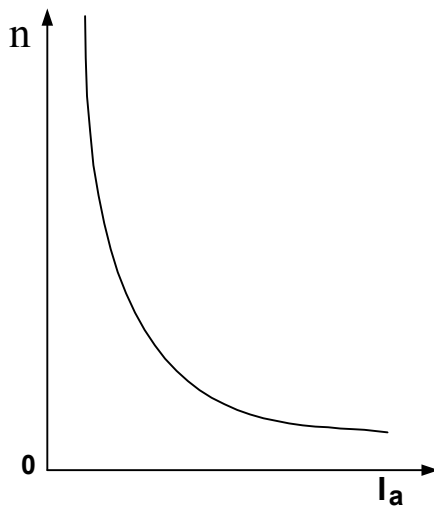
يمكن إعادة كتابة علاقة العزم الكهرومغناطيسي المتولد $T_m = k_a \Phi I_a$ بتعويض $k_a \Phi = k_{sr} I_a$ فنحصل على المعادلة التالية : (٣٠,١) $T_m = k_{sr} I_a^2$, ثابت محرك التوالي .

كل التيارات متساوية في محرك التوالي (٣١,١) $I_a = I_f = I_L$

معادلة السرعة (٣١,١) $\omega_m = \frac{V_t - I_a(R_a + R_{sr})}{k_a \Phi}$ أو $n = \frac{V_t - I_a(R_a + R_{sr})}{k_{sr} I_a}$

٣,٣ - خواص محرك التوالي :

١,٣,٣ - خاصية السرعة $n = f(I_a)$, ثابت V_t



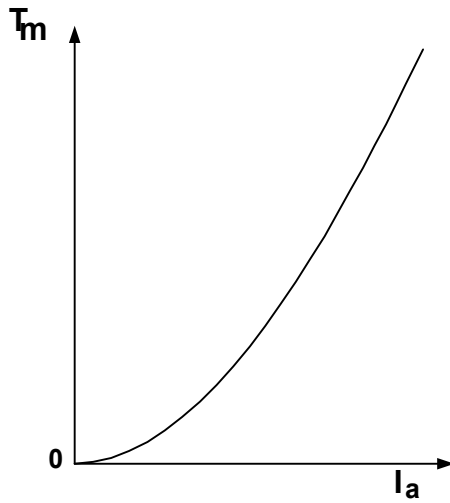
الشكل ٣٩,١ : تغير سرعة محرك التوالي مع تيار المنتج

تعطى سرعة محرك التوالي بالعلاقة لفة / دقيقة $n = \frac{V_t - I_a(R_a + R_{sr})}{k_{sr} I_a}$ والتي تبين أن سرعة محرك

التوالي متناسبة عكسيا مع التيار I_a الذي يسحبه من المصدر لأن هبوط الجهد في مقاومتي ملفات المنتج

و المجال ضعيف جدا لذا أنه كلما ازداد الحمل يسحب المحرك تيار أكبر من المصدر فتنخفض السرعة بقوة (الشكل ٣٩,١) . نلاحظ أيضا أن لمحرك التوالي سرعة متغيرة جدا فهو يجمع عند اللاحمل (يتسارع بقوة) و سرعته تكون أكبر من تلك التي يمكن أن يتحملها ميكانيكيا . لذا يجب تفادي تشغيل المحرك بدون حمل , كما لايسمح أيضا أن يكون بين محرك التوالي و الآلة التي يدورها وسيلة نقل للقدرة يمكن أن تتفصل أو تنزلق .

٢,٣,٣ - خاصية العزم $T_2 = f(I_a)$, $T_m = f(I_a)$



الشكل ٤٠,١ : تغير عزم محرك التوالي مع تيار المنتج

إن خاصية العزم لمحرك التوالي تختلف كثيرا عن نظيرتها في محرك التوازي .

العزم الكهرومغناطيسي لمحرك التوالي يعطى بالمعادلة : $T_m = k_{sr} I_a^2$, هذه المعادلة تبين أن محرك التوالي سينتج عزمًا موحد الاتجاه للتيار المستمر و المتردد , وهو متناسب مع مربع تيار المنتج . كما أن المعادلة تظهر و بوضوح تام أن محرك التوالي يعطي عزمًا لوحدة التيار أكبر من أي عزم في أي محرك آخر خاصة عند الإبتداء .

٤,٣ - تنظيم سرعة محرك التوالي

يمكن تنظيم سرعة محرك التوالي بإحدى الطرق الآتية :

١,٤,٣ بتوصيل مقاومة متغيرة R_1 على التوالي مع دائرة المحرك (الجهد V_t ثابت)

إضافة مقاومة على التوالي مع دائرة المحرك تقنية مبددة للقدرة وهي تستخدم في المراحل المؤقتة عند بدء حركة بعض المحركات , و خارج عملية بدء الحركة تستخدم بعض الأحيان في المحركات الصغيرة للحصول على تعدد السرعة عند التحميل .

٢,٤,٣ - بتغير جهد تغذية المحرك V_t (باستخدام إلكترونيات القدرة)

٣,٤,٣ - بتوصيل مقاومة على التوازي مع ملفات المجال (الجهد V_t ثابت)

لتخفيض التدفق المغناطيسي لكل قطب و بالتالي زيادة السرعة حسب نسب معتبرة , يمكن توصيل مقاومة R_h على التوازي مع ملفات المجال ذات المقاومة R_{sr} , يمر في هذه الأخيرة التيار I_a و يكون يساوي : $I_a \frac{R_h}{R_{sr} + R_h}$, يجب أن لا تنزل R_h إلى الصفر و إلا $\Phi = 0$ و يجمع المحرك .

إن هذه الطريقة تشكل الطريقة الطبيعية لتنظيم سرعة محرك التوالي إلا أن زيادة السرعة تكون على حساب العزم الذي يولده المحرك .

٥,٣ - عكس حركة محرك التوالي

يمكن عكس اتجاه دوران محرك التوالي بعكس اتجاه التيار في عضو الإستنتاج أو عكس اتجاه تيار ملفات المجال .

٦,٣ - استخدام محركات التوالي

تستخدم محركات التيار المستمر ذات الإستثارة توالي في الأحمال التي تتطلب عزمًا دورانيًا كبيراً عند بدء الحركة و التي يكون فيها الحمل متصلًا مباشرة بعمود الإدارة كما في القطارات الكهربائية , و محركات بدء حركة السيارات , و في الأوناش و الرافعات و المصاعد و الطاحونات .

٧,٣ - مسائل محلولة :

المسألة الأولى : محرك تيار مستمر من نوع إستثارة توالي , عدد أقطابه ٢ , عدد الدوائر على التوازي في المنتج ٢ و موصل على مصدر جهد مستمر قدره 500 V . يسحب هذا المحرك تيار 60 A من المصدر و عند الحمل الكامل . مقاومة ملفات عضو الإستنتاج تساوي 0.15Ω و عدد موصلاته الفعالة ٤٠٠ , مقاومة ملفات المجال 0.1Ω , التدفق المغناطيسي 0.0255 Wb لكل قطب .

احسب عند الحمل الكامل :

١ - القوة الدافعة المغناطيسية المضادة E_{al} ٢ - سرعة المحرك n_1

٣ - عزم المحرك الكلي T_{m1}

الحل :

١ - الق.د.ك المضادة : $E_{al} = V_t - I_{a1}(R_a + R_{sr}) = 500 - 60 \times (0.1 + 0.15) = 485V$

٢ - ثابت محرك التوالي : $k_a = \frac{ZP}{2\pi A} = \frac{400 \times 2}{2\pi \times 2} = 63.66$, عدد دوائر ملفات المنتج على التوازي $A=2$

السرعة الزاوية : $\omega_{m1} = \frac{E_{al}}{k_a \Phi} = \frac{485}{63.66 \times 0.0255} = 298.77 \text{ rad/sec}$

سرعة المحرك : $n_1 = \frac{60 \omega_{m1}}{2\pi} = \frac{60 \times 298.77}{2\pi} = 2853 \text{ r.p.m}$

٣ - عزم المحرك الكلي : $T_{m1} = k_a \Phi I_{a1} = 63.66 \times 0.0255 \times 60 = 97.4 N.m$

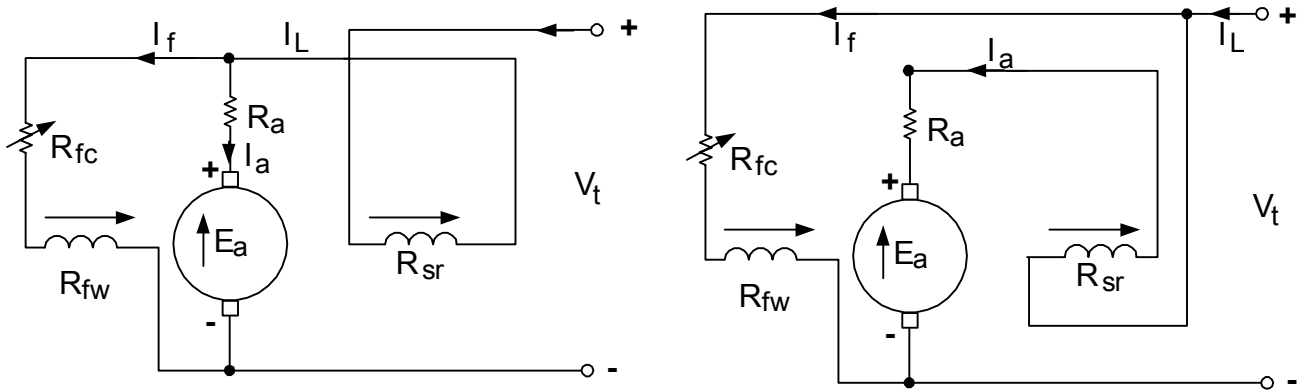
٤ - محركات التيار المستمر المركبة

١,٤ - مقدمة :

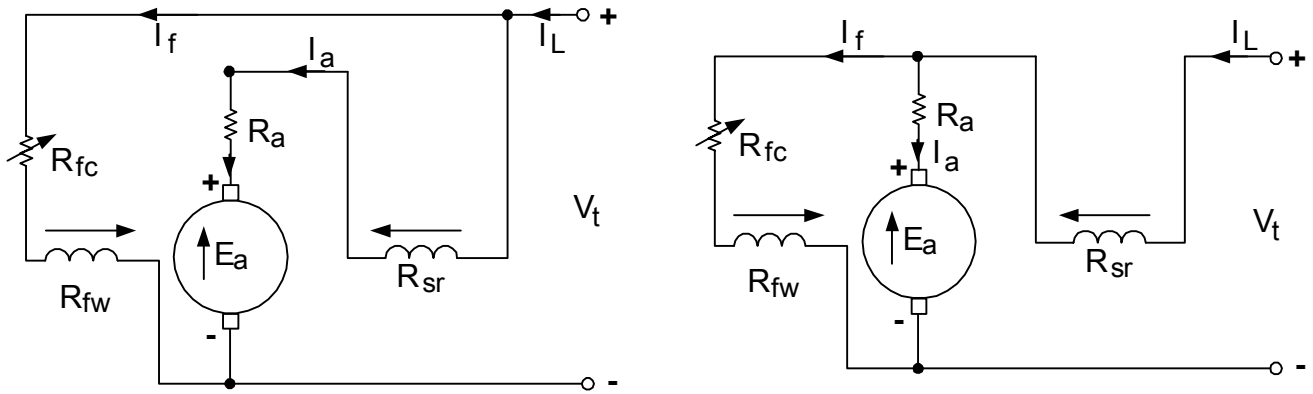
لإعطاء محرك التوازي قليلاً من محاسن محرك التوالي (استقرار أفضل , و عزم بدء الحركة أكبر) يمكن إضافة ملفات توالي على الأقطاب و نحصل بهذا على المحرك المركب . لهذا المحرك إذا ملفان (توازي و توالي) لتوليد المجال المغناطيسي و هو في الأساس محرك توازي و المجال المغناطيسي الرئيس هو مجال ملفات التوازي . و توصل ملفات التوالي بحيث تكون محركاً مركباً طويلاً أو محركاً مركباً قصيراً كما هو مبين في الشكلين ٤١,١ و ٤٢,١ .

ينقسم المحرك المركب من حيث المجال المغناطيسي إلى نوعين :

- أ - محرك مركب تراكمي و فيه يزيد التدفق الكلي و الصافي Φ_{net} بزيادة التحميل حيث يساعد تدفق ملفات التوالي Φ_{sr} التدفق الأصلي لملفات التوازي Φ_r (الشكل ٤١,١) .
- ب - محرك مركب فرقي أو تفاضلي و فيه يعاكس تدفق ملفات التوالي تدفق ملفات التوازي فينقص التدفق الصافي عند زيادة التحميل (الشكل ٤١,١) .



الشكل ٤١,١ : المحرك المركب التراكمي (طويل و قصير)



الشكل ٤٢,١ : المحرك المركب التفاضلي (طويل , قصير)

ملحوظة : يمكن أن تولد ملفات التوالي تدفقا تحافظ به على قيمة ثابتة لتدفق التوالي و ذلك مهما تغير الحمل .

٢,٤ - معادلات المحرك المركب :

١,٢,٤ - محرك التركيب الطويل

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad (٣٣,١) \quad V_t = E_a + I_a (R_a + R_{sr}) \quad (٣٢,١)$$

٢,٢,٤ محرك التركيب القصير

$$V_f = I_f R_f = E_a + I_a R_a = V_t - I_L R_{sr} \quad (٣٥,١) \quad V_t = E_a + I_a R_a + I_L R_{sr} \quad (٣٤,١)$$

المعادلات المماثلة في كلا الحالتين :

$$T_2 = T_m - T_f, \quad T_m = k_a \cdot \Phi_{net} \cdot I_a, \quad I_L = I_a + I_f \quad (\Phi_{net} = \Phi_f \pm \Phi_{sr}) \quad E_a = k_a \cdot \Phi_{net} \cdot \omega_m$$

حيث $I_{sr} = I_a$ في التركيب الطويل و $I_{sr} = I_L$ في التركيب القصير

الإشارة + تكون للنوع التراكمي بينما الإشارة - للنوع التفاضلي

٣,٤ - خواص محرك التركيب الطويل التراكمي

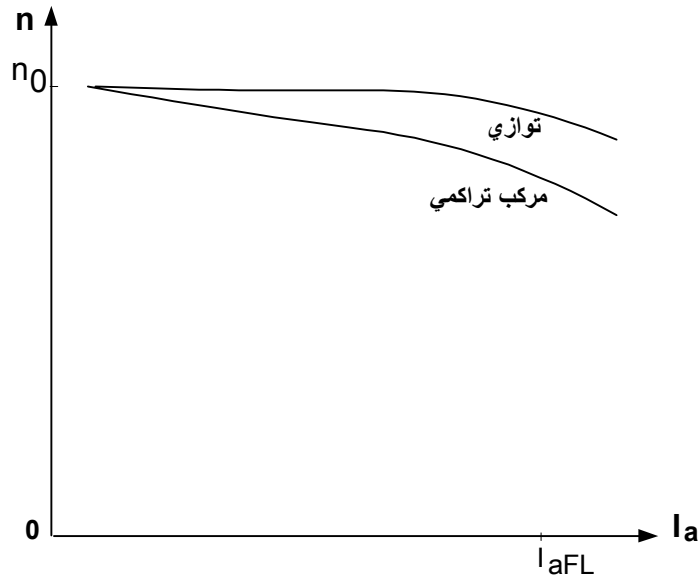
في المحرك المركب الطويل التراكمي للتدفق المغناطيسي Φ_{net} مركبتان , مركبة ثابتة Φ_f و أخرى Φ_{sr} متناسبة مع تيار المنتج و بالتالي مع الحمل بحيث $\Phi_{net} = \Phi_f + \Phi_{sr}$ إذا كان رد فعل المنتج مهملًا .

١,٣,٤ - خاصية $n = f(I_a)$ ثابت V_t

يزيد التدفق المغناطيسي Φ_{net} لتيار مجال I_f معين (V_t ثابت) بزيادة الحمل بسبب تدفق ملفات التوالي

الخاصية $n = f(I_a)$ تبدأ تقريبا من نفس القيمة n_0 لكن هبوطها يكون أسرع , عند زيادة التيار I_a ,

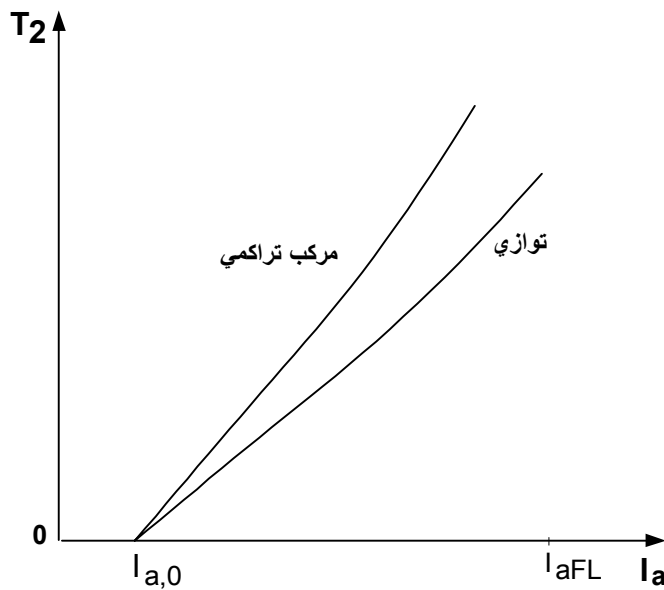
على ما هو عليه في محرك التوالي (الشكل ٤٣,١)



الشكل ٤٣,١ : تغير سرعة المحرك المركب التراكمي مع تيار المنتج

٢,٣,٤ - خاصية العزم : $T_m = f(I_a)$

يزيد العزم عند زيادة التدفق المغناطيسي فالخاصية $T_m = f(I_a)$ تبين زيادة أسرع على ما هو عليه في محرك التوازي (الشكل ٤٤,١) عند بدء الحركة , يولد المحرك المركب التراكمي عزمًا أقوى من الذي يولده محرك التوازي (الذي تدفقه المغناطيسي ثابت) , لكن عزمه أضعف من الذي يولده محرك التوالي (الذي تدفقه المغناطيسي متناسب كلية مع تيار المنتج) . المحرك المركب التراكمي يجمع إذا ما بين أحسن خواص المحركين التوازي و التوالي فهو مثل محرك التوالي له عزم فائض عند بدء الحركة و مثل محرك التوازي لا يجمع



الشكل ٤٤,١ : تغير عزم المحرك التراكمي مع تيار المنتج

عند اللاحمل (لا يصل إلى سرعة مرتفعة جدا تكون خطرة عليه) .

عند الأحمال الخفيفة , يكون لمجال التوالي تأثير ضعيف جدا بحيث يصبح المحرك المركب التراكمي يعمل تقريبا كمحرك التوازي . و عند الأحمال العالية , يكون مجال التوالي مهما جدا بحيث تماثل الخاصية الميكانيكية للمحرك المركب التراكمي الخاصية الميكانيكية لمحرك التوالي .

٤,٤ - تنظيم سرعة المحرك المركب التراكمي :

كل الطرق التي أستخدمت لتنظيم سرعة محرك التوازي صالحة أيضا لتنظيم سرعة المحرك المركب التراكمي , من بينها الطريقة الأنسب إضافة مقاومة متغيرة R_H مع ملفات التوالي و أخرى R_h مع ملفات التوازي .

٥,٤ - استخدام المحرك المركب التراكمي :

يستخدم المحرك المركب التراكمي في الحالات التي تتطلب عزم بدء الحركة لا بأس به و سرعة تقريبا ثابتة و المحرك لا يجمع عند اللاحمل كماكينات قص الحديد , و الرافعات .

٦,٤ - المحرك المركب التفاضلي :

في المحرك المركب التفاضلي , يطرح تدفق ملفات التوالي Φ_{sr} من تدفق ملفات التوازي Φ_f , و بالتالي يمكن للتدفق الصافي الحاصل Φ_{net} أن يساوي صفرا فيسبب في جمح المحرك .

عند زيادة التحميل , يزيد تيار المنتج فيهبط التدفق المغناطيسي الحاصل مما يسبب في ارتفاع سرعة المحرك . هذا الارتفاع في السرعة يسبب في حد ذاته زيادة إضافية في الحمل التي بدورها ترفع تيار المنتج فينخفض التدفق الحاصل مرة أخرى مما يزيد أيضا في سرعة المحرك . النتيجة هي أن المحرك المركب التفاضلي غير مستقر , سرعته في ازدياد متواصل قد تؤدي به إلى الجمح ولهذا فهو غير مناسب لأي تطبيق عملي .

٥ - بدء حركة المحركات :

إذا تم توصيل محرك التيار المستمر مباشرة لمصدر قدرة مستمرة , يمر تيارا كبيرا جدا في ملفات عضو الإستنتاج يسمى بتيار بدء الحركة $I_{a|start}$, و في جميع الأحوال تزيد قيمة هذا التيار عن عشرة أمثال تيار الحمل الكامل $I_{a|F.L}$, قد يؤدي إلى تلف ملفات المنتج حتى و لو كان مروره لعدة لحظات فقط.

في محركات الإستثارة المنفصلة أو التوازي مثلا , يعطى تيار المنتج بالعلاقة : $I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a}$.

عند بدء التشغيل أو عند لحظة البدء , يكون المحرك في حالة سكون أي السرعة صفر , و على ذلك تكون القوة الدافعة الكهربائية المضادة $(E_a = k_a \cdot \Phi \cdot \omega_m)$ صفرا لحظيا .

لذا يعطى تيار بدء الحركة بالمعادلة التالية : (٣٦,١) $I_{a|start} = \frac{V_t}{R_a}$, مادامت مقاومة ملفات المنتج صغيرة , و تيار بدء الحركة يكون كبيرا جدا . و للحد من قيمة هذا التيار و تخفيضه إلى قيمة آمنة لا تكون فيها خطورة على ملفات المنتج , نستعمل إحدى الطريقتين :

١ - إضافة مقاومة خارجية , R_{ae} على التوالي مع ملفات المنتج عند الابتداء فيخفض تيار المنتج عند بدء الحركة إلى القيمة (٣٧,١) $I_{a|start} = \frac{V_t}{R_a + R_{ae}}$.

٢ - استخدام جهد تغذية (V_t) منخفض عند بدء الحركة , طبعا هذا يتطلب مصدر جهد متغير .

الآلات الكهربائية

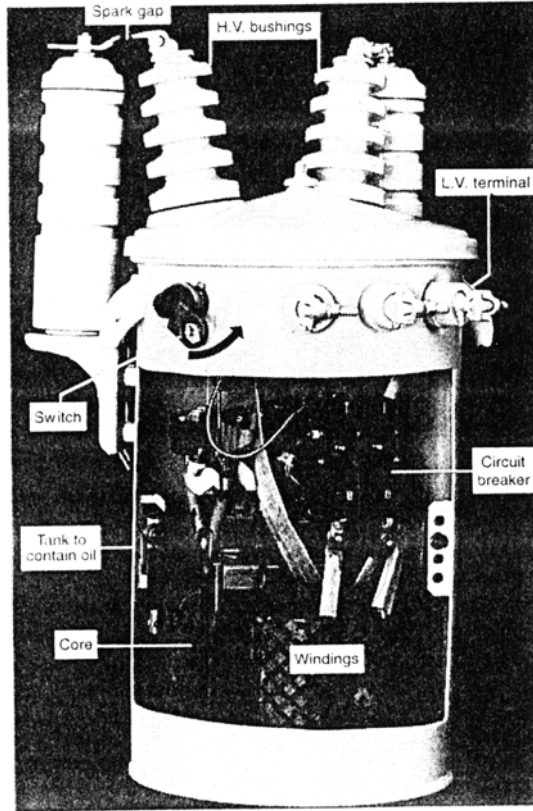
المحولات الكهربائية



الوحدة الثانية : المحولات الكهربائية TRANSFORMERS

مقدمة :

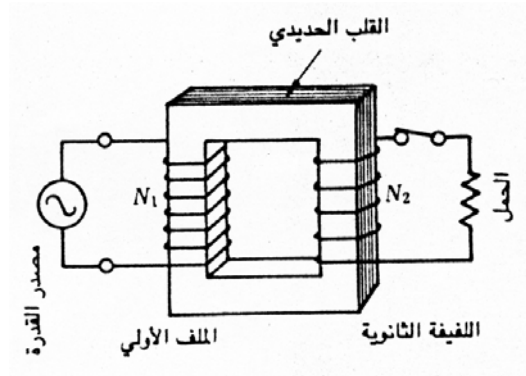
المحولات الكهربائية أجهزة ثابتة (غير دواره) تستطيع رفع أو خفض الجهد و التيار المتردد بواسطة الحث الكهرومغناطيسي. وهذا يسمح بنقل القدرة بكفاءة ، وبالتالي فإن المحولات هي المعدة الأساسية التي لا يمكن الاستغناء عنها لنقل القدرة وتوزيعها. وفي هذه الوحدة سيتم استعراض التركيب ، و الدائرة المكافئة ، و الخصائص و التوصيلات للمحولات .



شكل ٢ - ١ : محول توزيع وجه واحد

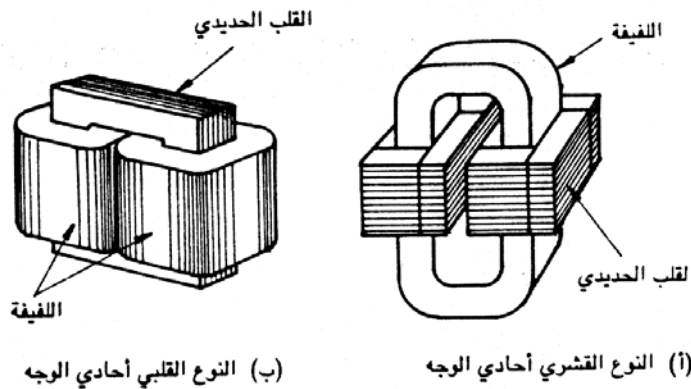
٢- ١ تركيب المحولات TRANSFORMER CONSTRUCTION

يستخدم المحول لتغيير الجهد باستخدام الحث المتبادل ويحوي الملف الابتدائي والملف الثانوي لسريان التيار وقلب حديدي لتيسير تدفق الفيض المغناطيسي . يتكون المحول من الملفات الابتدائية والملفات الثانوية و يصنع من قلب تلف حوله ملفات كما هو موضح في شكل (٢-٢) .



شكل ٢ - ٢ دائرة تركيب المحول

وعند لف أسلاك حول القلب ، فإنه من حيث التركيب يوجد نوعان : النوع القلبي ، والنوع القشري المبينان في الشكل (٢ - ٣) أ ، ب.



شكل (٢ - ٣) أنواع المحولات تبعاً لطريقة تركيب لفات الأسلاك

في حالة النوع القلبي تفصل اللفائف إلى اثنتين ، فيكون العزل أسهل ، وبالتالي فإن النوع القلبي مناسب للجهد العالي و السعة الكبيرة ، والنوع القشري يستخدم للجهد المنخفض ، مثل المحولات الصغيرة . ففي صناعة القلب ترص مجموعة من صفائح الصلب السليكوني و التي تحتوي على ٣٪ من السليكون و ٩٧٪ من الصلب. و تتميز بخصائص مغناطيسية ممتازة وفقد حديدي منخفض .

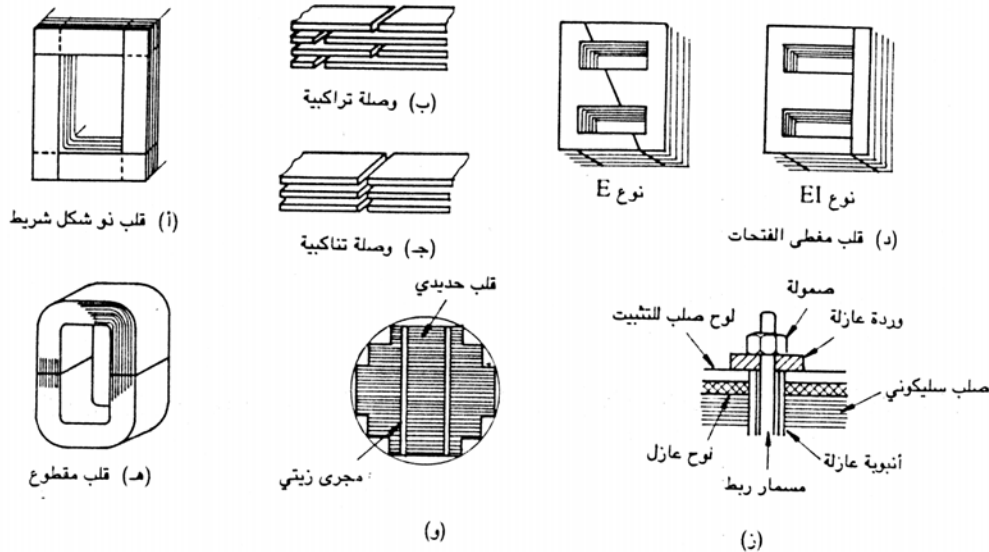
٢- ١- ١- القلب CORE

لعمل قلب المحول تستخدم مادة ذات كثافة فيض مغناطيسي عالية و معامل نفاذية مغناطيسي عال و فقد حديدي صغير.

والمادة المستخدمة على نطاق واسع هي من طبقة G العازلة ، وهي صفائح الصلب السليكوني التي تحتوى على نسبة ٣,٥ ٪ من السليكون لخفض فقد التخلف المغناطيسي. وتلك المادة لها موجهية حيث إن الفيض المغناطيسي يمكن أن يمر بسهولة في اتجاه واحد فقط ، كما أن الطلاء العازل المستخدم على سطح كل صفيحة من الصلب السليكوني يمنع سريان التيارات الدوامية .

● **معامل الفراغ :** يغطى سطح صفيحة الصلب السليكوني بمادة عازلة ، و بالتالي فعند عمل القلب ذي الطبقات ترصّ صفائح الصلب السليكوني كما هو مبين في الشكل (٢-٣) أ، ب. و المساحة المقطعية الفعالة للقلب لتمرير الفيض المغناطيسي تختلف عن المساحة المشغولة بالفعل . وتسمى النسبة بين تلك المساحتين بمعامل الفراغ ، وهي عادة حوالي ٩٦٪.

● **تركيب القلب :** بالنسبة لقلوب المحولات العادية ، فإن صفائح الصلب السليكوني المشكلة على هيئة شرائط ترصّ لتشكّل قلباً ذا طبقات ، ويجمع القلب كما هو مبين في الشكل (٢-٤) أ . ولتوصيل القلب تستخدم وصلة تناكبية أو وصلة تراكبية كما هو مبين في الشكل (٢-٤) ب ، ج .



شكل (٢-٤) القلوب الحديدي

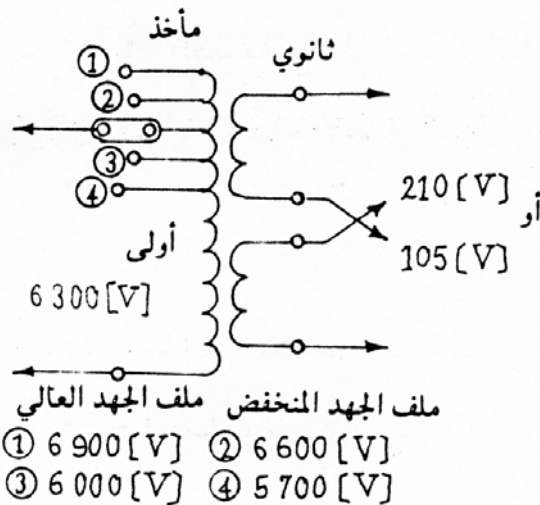
يستعمل القلب مسدود الفتاحات للمحولات الصغيرة المستخدمة في معدات الاتصال ، وغالبا ما تثقب ألواح الصلب كما هو مبين في الشكل (٢ - ٤) د . و القلب ذو اللفائف هو النوع ذو الموجهية من نوع شريط الصلب السليكوني غير الملحوم ، وهو مبين في الشكل (د) . وبالمقارنة بالقلب ذي الشكل الشريطي فإن تيار الإثارة وفقد الحديد يمكن أن يكون أصغر ، و يمكن أن يكون القلب أقل وزنا . ويستخدم هذا النوع أساساً للمحولات الصغيرة .

و الشكل (هـ) هو مثال للقلب ذي اللفائف ، وفي هذه الحالة فإن كل القلب يلصق براتنج مخلق ويقطع عند مكانين ، وتغمر اللفائف ثم يوصل الاثنان كجسم موحد بوصلة تناكبية باستخدام الضغط وهذا ما يعرف بالقلب المقطوع .

ويسخن المحول بسبب فقد الحديد وفقد النحاس ، لذلك فإنه يغمر الجسم الرئيس للمحول في الزيت لأغراض التبريد في أحيان كثيرة . وفي حالة المحولات ذات الحجم الكبير يزود القلب أحيانا بمجار زيتية للسماح بحركة أسرع للزيت خلال القلب كما هو في شكل (و) . ولأجل جعل القلب ذي الطبقات جسماً موحدا تثبت صفائح الصلب السليكوني بصفائح ماسكة ومسامير ربط ، ولكن تعزل المسامير كهربائياً لمنع سريان التيارات الدوامية خلال مسامير التثبيت أو الصفائح الماسكة . كما أن عدد المسامير المستخدمة يقل بلصق صفائح الصلب السليكوني باستخدام مادة لاصقة .

٢ - ١ - ٢ اللفائف Windings

كما هو مبين في الشكل (٢ - ٥) ، عادة ما تستخدم لفائف جهد عال ولفائف جهد منخفض . ولعمل تلك اللفائف فإن أسلاك النحاس اللدنة تستخدم كمادة موصلة ، وتستخدم الأسلاك المستديرة و الأسلاك المستطيلة تبعاً لشكل المحول .

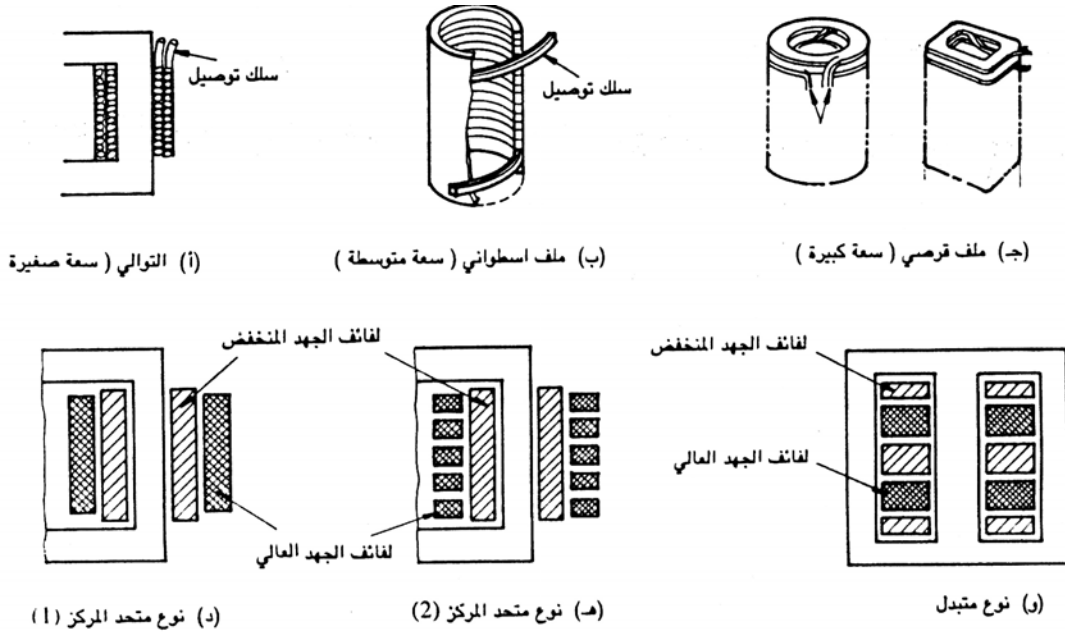


شكل (٢ - ٥) مثال لمحول (النوع ذو القطب المركب)

وكطريقة لعمل اللفائف ، فإنه بعد تطبيق العزل على القلب تلف اللفائف مباشرة حول القلب بالنسبة للمحولات الصغيرة ولكن العمل ليس بالسهل في هذه الطريقة عندما تزداد السعة .

ففي حالة المحولات المتوسطة وكبيرة الحجم يتم عمل الملفات الأسطوانية أو الملفان القرصية أولاً كما هو مبين في الشكل (٢ - ٦) ب ، ج ثم يوضع القلب في الملفات .

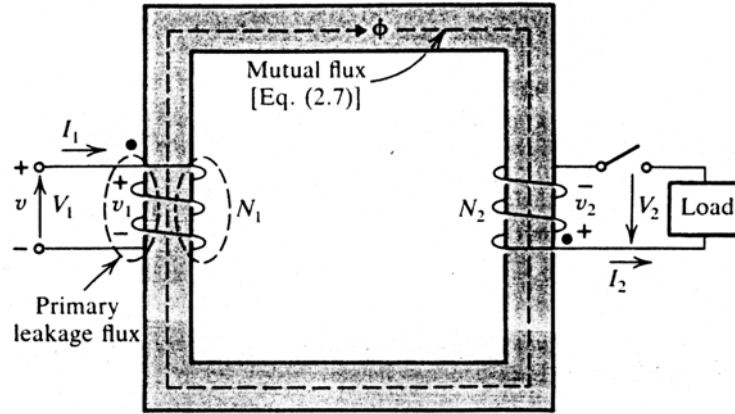
و عند ترتيب هذه الأنواع من اللفائف للقلوب ، يتم تقسيم اللفائف أو يتم وضع الجانب منخفض الجهد من اللفائف بجانب القلب كما هو مبين في الشكل (٢ - ٦) د ، هـ ، و . وللعزل بين الملف الأولي و الملف الثانوي أو بين اللفائف والقلب تستخدم أسطوانة عازلة مصنوعة من ورق الكرافت الملفوف ومثبتة براتنج افينول ، وذلك للأنواع متحدة المحور كما في الشكل (٢ - ٦) ج ، هـ أما للأنواع المترددة في الشكل (٢ - ٦) د فإن ألواح الورق المضغوط المعاملة بالورنيش ترص في طبقات عديدة



شكل (٢ - ٦) اللفائف وترتيبها

٢ - ٢ محولات الوجه الواحد Single- Phase Transformers

كما هو مبين بالشكل (٢ - ٧) ، المحوّل ذو الوجه الواحد عادة له لفائف دخل ولفائف خرج تعرف بالملفات الابتدائية والملفات الثانوية .



(٢ - ٧) المحوّل ذو الوجه الواحد

وهذه الملفات لا يوجد بينها اتصال كهربائي ولكن يكون اتصالها مغناطيسيا . الملف الابتدائي يسحب الطاقة من جهد المصدر بينما ينقل الملف الثانوي الطاقة للحمل . والمحولات تقوم بتحويل أو بتغيير الجهد أو التيار المسلط على الملفات الابتدائية من مستوى إلى آخر . والمحولات ليست مكبرات قدرة ولكن عند استخدامها لجميع الأغراض فإن القدرة الظاهرية S في الملفات الابتدائية تساوي القدرة الظاهرية المنقولة للحمل بواسطة الملفات الثانوية . أو بمعنى آخر أن حاصل ضرب الجهد والتيار في الملف الابتدائي يساوي حاصل ضرب الجهد والتيار في الملف الثانوي ، ويمكن التعبير عن ذلك رياضياً كما يلي :

$$|S| = V_1 I_1 \approx V_2 I_2 \quad (١ - ٢)$$

نظرية عمل المحوّل

فكرة عمل المحوّل ذي الوجه الواحد (وبقية المحولات) تعتمد على نظرية الحث المغناطيسي . وفقاً لقانون فاراداي للحث فإنه عندما يمر فيض مغناطيسي في ملفات القلب الحديدي فإنه يتولد جهد (أو قوة دافعة كهربائية ق . د . ك .) في كل لفة من ملفات القلب ، ويتناسب هذا الجهد مع معدل تغير الفيض المغنطيسي بالنسبة للزمن . ويمكن الحصول على هذا الجهد من العلاقة التالية :

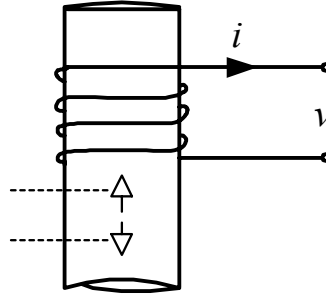
$$V = \frac{d\Phi}{dt} \quad (١ - ٢)$$

حيث إن Φ تمثل الفيض المغنطيسي .

وإذا كان القلب له عدد لفات N لفة ويمر بها نفس الفيض المغنطيسي Φ فإن الجهد المتولد يكون :

$$V = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (٢ - ٣)$$

ووفقاً لقانون لينز فإن الجهد المستحث في موصل مقفل (أي إنه يتم توصيل نهايات الملف مع بعضها) كما في الشكل (٢ - ٨)



شكل ٢ - ٨ توضيح لقانون لينز

وهذا الجهد بدوره يولد تياراً والتيار بدوره يولد فيضاً مغناطيسياً معاكساً للفيض المسبب للتيار (الفيض الأصلي).

وبالتالي فإنه يمكن كتابة معادلة (٢ - ٣) كالتالي:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (٢ - ٤)$$

وبذلك فإن قانون لينز مفيد جداً لتحديد القطبية للجهد المتولد على أطراف الملف الثانوي.

ويمكن الحصول على العلاقة بين الجهد المتولد والفيض المولد له من المعادلة التالية :

$$V = 4.44 f N \Phi_m \quad (٢ - ٥)$$

حيث إن V هي القيمة الفعالة لجهد الدخل (rms) ، f التردد بالهيرتز و Φ_m القيمة العظمى للفيض المغناطيسي .

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة القوة الدافعة المغناطيسية أو معادلة المحول العامة .

بذلك فإن الجهد المتولد على أطراف الملف الثانوي للمحول يمكن الحصول عليه من المعادلة ٢ - ٥ .

كما إنه يمكن إيجاد العلاقة بين الجهود و عدد لفات الملفات من المعادلة (٢ - ٢) كالتالي :

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (٢ - ٦)$$

$$v_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (٢ - ٧)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (٢ - ٨)$$

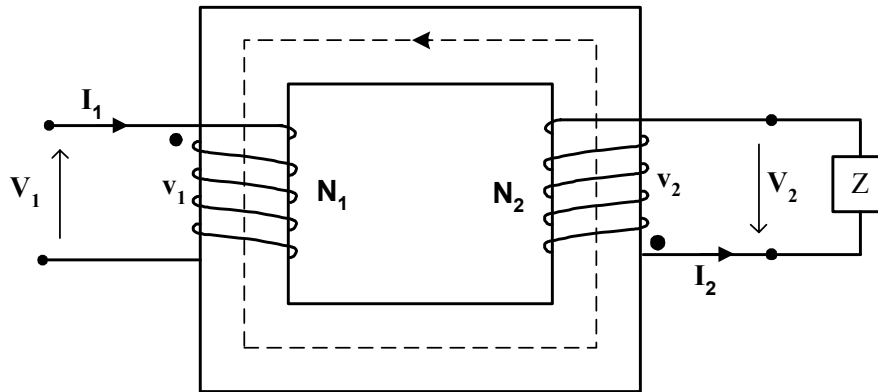
حيث إن a هي نسبة اللف أو نسبة التحويل.

ويمكن تمثيل المعادلة (٢ - ٨) بصيغة rms كالتالي :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (٢ - ٩)$$

٢ - ٤ المحول المثالي The Ideal Transformer

لمعرفة العلاقة بين الملفات الثانوية والابتدائية للمحول بصفة عملية , فإننا سوف ندرس هذه العلاقة أولاً بالنسبة للمحول المثالي. المحول المثالي تكون المفاقيد الحديدية به تساوي صفراً , و مقاومة الملفات تساوي صفراً (مهملة) وليس به تسرب مغناطيسي . وبالنظر للشكل (٢ - ٩) فإنه يمكن إيجاد مكونات الدائرة على النحو التالي:



شكل (٢ - ٩) المحول المثالي

$$v_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (٢ - ١٠)$$

$$v_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (٢ - ١١)$$

من المعادلات (٢ - ١٠) و (٢ - ١١) فإنه يمكن إيجاد v_2 كما يلي :

$$v_2 = v_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (٢ - ١٢)$$

وبما أن المحول مثالي فإن

$$v_2 = V_2 \quad \text{و} \quad v_1 = V_1$$

و بذلك فإن :

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (٢ - ١٣)$$

كما إنه يمكن استنتاج أن

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} \quad (٢ - ١٤)$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad (٢ - ١٥)$$

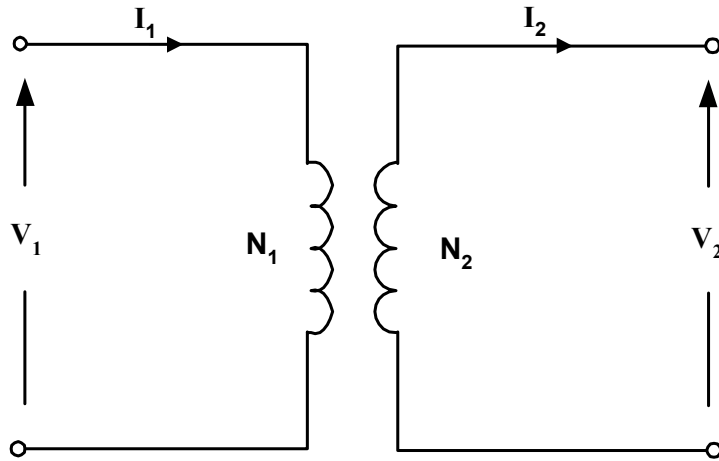
$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (٢ - ١٦)$$

حيث أن Z_1 و Z_2 ليست معاوقة الملفات ولكنها المعاوقة التي ترى من جهة الملف الابتدائي و الثانوي على التوالي.

ومن المعادلات (٢ - ١٣) و (٢ - ١٤) يمكن الحصول على خاصية المعاوقة للمحول كالتالي :

$$Z_1 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (٢ - ١٧)$$

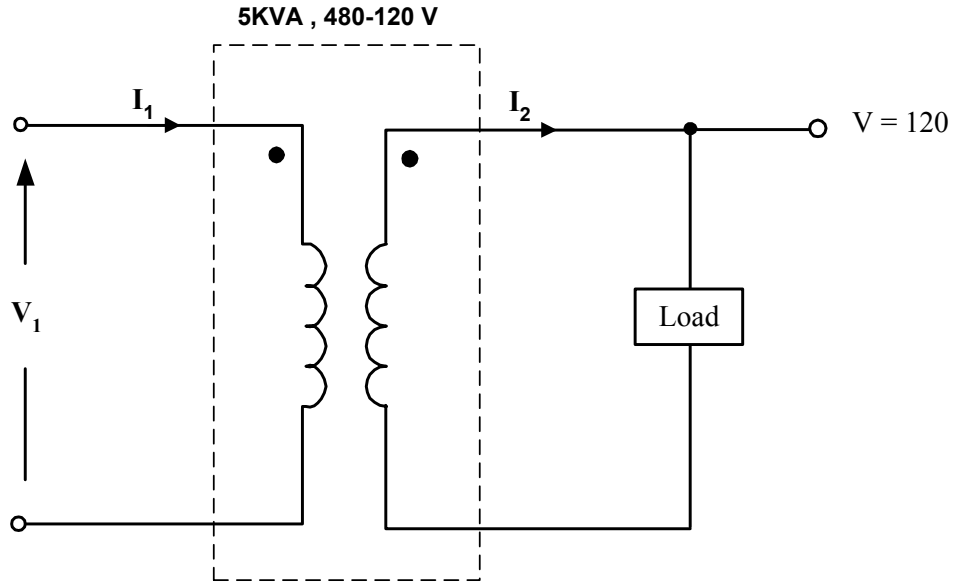
ملحوظة : المعادلات (٢ - ١٢) , (٢ - ١٤) و (٢ - ١٧) تطبق فقط على المحول المثالي .
ويمكن تمثيل الدائرة المكافئة للمحول المثالي كما في شكل (٢ - ١٠).



شكل (٢ - ١٠) الدائرة المكافئة للمحول المثالي

مثال ٢ - ١ :

محول وجه واحد 5KVA-480-120 v , موضح بالشكل (٢ - ١١) ينقل تيار أسمياً لحمل جهده 120 v . بإهمال المفايد احسب تيار المحوّل و الجهد المغذي له ؟



شكل (٢- ١١)

الحل:

أولا نحسب التيار عبر الملفات الثانوية (I_2)

$$I_2 = \frac{|S|}{V} = \frac{5000}{120} = 41.67 A$$

ويمكن الحصول على نسبة اللف عن طريق نسبة الجهود كالتالي :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{480}{120} = 4$$

ويمكن الحصول على التيار في الملفات الابتدائية من المعادلة رقم ٢ - ١٤ كالتالي:

$$I_1 = \frac{1}{4}(41.67) = 10.42 A$$

والجهد المغذي للمحول هو 480V.

مثال ٢ - ٢:

احسب عدد اللفات الابتدائية والثانوية لمحول $60\text{Hz} - 240 / 120\text{V}$ إذا كان الفيض المغناطيسي في القلب لا يزيد عن 6 m wb ؟

الحل:

من المعادلة ٢ - ٥ عدد اللفات في الملف الابتدائي هي:

$$N_1 = \frac{V_1}{4.44 f \Phi_m} = \frac{240\text{V}}{(4.44)(60\text{Hz})(5 \times 10^{-3})} = 180 \text{ لفة}$$

و بنفس الطريقة يمكن إيجاد N_2

$$N_2 = \frac{V_2}{4.44 f \Phi_m} = \frac{120\text{V}}{(4.44)(60\text{Hz})(5 \times 10^{-3})} = 90 \text{ لفة}$$

أو

$$N_2 = \frac{N_1}{a} = \frac{180}{2} = 90 \text{ لفة}$$

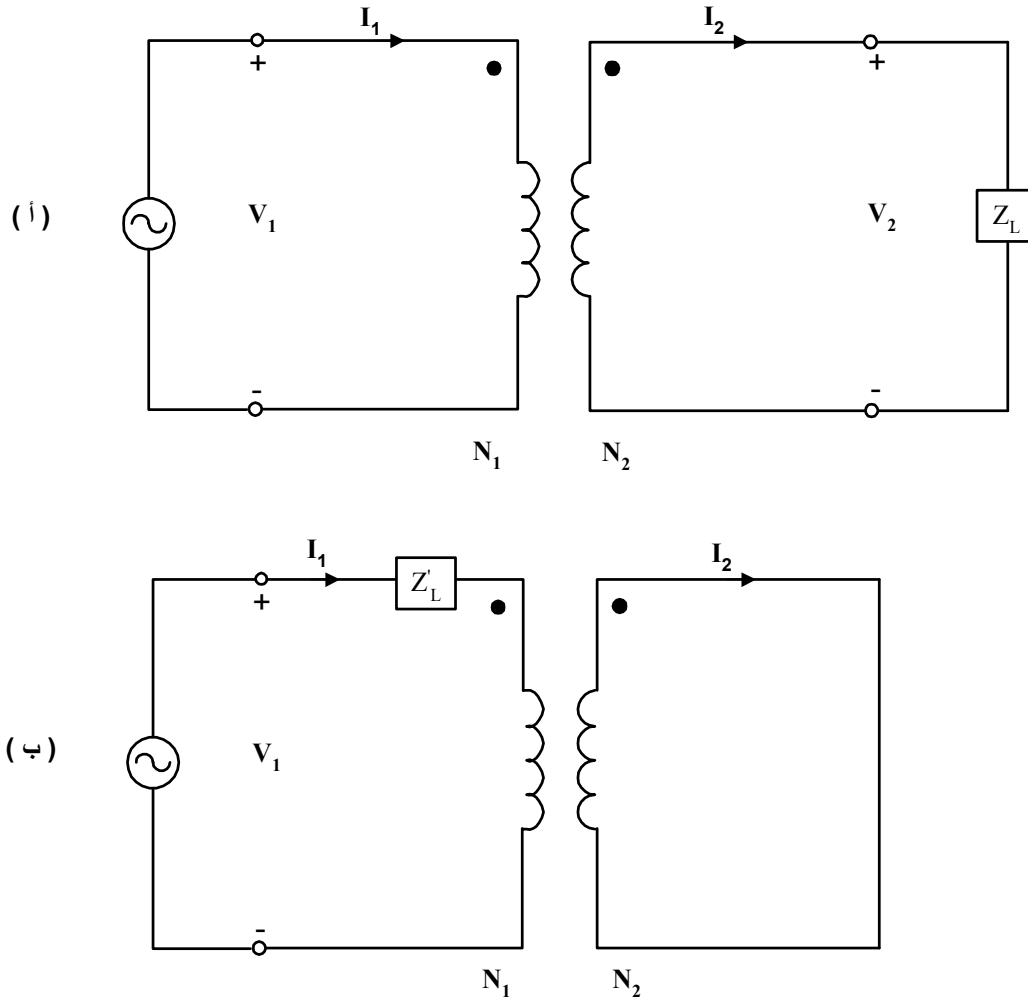
$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{240}{120} = 2$$

حيث أن

نقل المعاوقة في المحولات

نقل المعاوقة من الجانب الثانوي إلى الجانب الابتدائي أو العكس مفيد في تبسيط الدائرة من دائرة كهربائية مزدوجة إلى دائرة مفردة وبالتالي تسهل عملية الحسابات .

في الشكل (٢ - ١٢) أ يمكن نقل معاوقة الحمل Z_L الموصلة على الجانب الثانوي إلى الجانب الابتدائي .



شكل (٢ - ١٢) نقل معاوقة الحمل Z_L
الموصلة على الجانب الثانوي إلى الجانب الابتدائي

بافتراض أن كل المتغيرات معطاة في النظام الوجهي (Phasors) ، إذا يمكن تعريف معاوقة الحمل Z_L كالتالي :

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} \quad (٢ - ١٨)$$

ومن الشكل ٢ - ١٢ (ب) يمكن إيجاد المعاوقة في الجانب الابتدائي كالتالي :

$$Z'_L = \frac{V_1}{I_1} \quad (٢ - ١٩)$$

حيث أن

$$V_1 = aV_2 \quad (٢ - ٢٠)$$

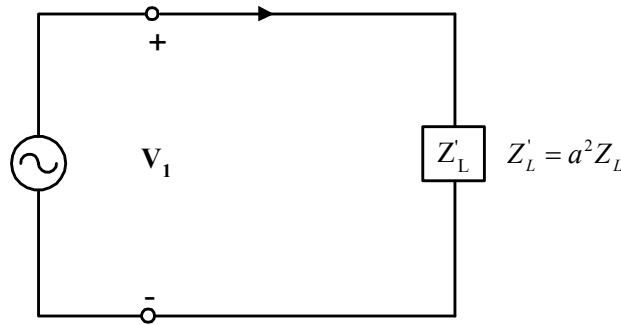
$$I_1 = \frac{I_2}{a} \quad (٢- ١٢)$$

بتعويض المعادلتين (٢- ٢٠) و (٢- ٢١) في المعادلة (٢- ١٩) تكون المعادلة الظاهرية في الجانب الابتدائي هي :

$$Z'_L = \frac{V_1}{I_1} = \frac{aV_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} \quad (٢- ٢٢)$$

$$Z'_L = a^2 Z_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_L \quad (٢- ٢٣)$$

الشكل (٢- ١٣) يبين الدائرة المكافئة لهذه النتيجة .



شكل (٢- ١٣) الدائرة المكافئة

وبنفس الطريقة يمكن نقل المعادلة من الجانب الابتدائي إلى الجانب الثانوي كالتالي :

$$Z'_1 = \frac{Z_1}{a^2} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 Z_1 \quad (٢- ٢٤)$$

مثال ٢- ٣ :

24000/240 v , 250 KVA , 60 Hz

محول توزيعي مثالي له البيانات التالية :

احسب ما يلي :

أ - نسبة التحويل (اللف) a .

ب - قيمة معاوقة الحمل المتصلة بالجانب الثانوي .

ج - قيمة التيار في الجانب الابتدائي I_1

د - قيمة معاوقة الحمل إذا نقلت إلى الجانب الابتدائي .

الحل

أ .

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2400}{240} = 10$$

ب . بما أن المحوّل مثالي فليس به مفاقيد إذا :

$$S = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{250000}{240} = 1041.67 A$$

ج . التيار في الملف الابتدائي هو :

$$I_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{1041.67}{10} = 104.167 A$$

أو

$$I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{250000}{2400} = 104.167 A$$

د . قيمة معاوقة الحمل في الجانب الابتدائي يمكن حسابها كالتالي :

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} = \frac{240V}{1041.67 A} = 0.2304 \Omega$$

$$Z'_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_L = a^2 Z_L = 10^2 \times 0.2304 = 23.04 \Omega$$

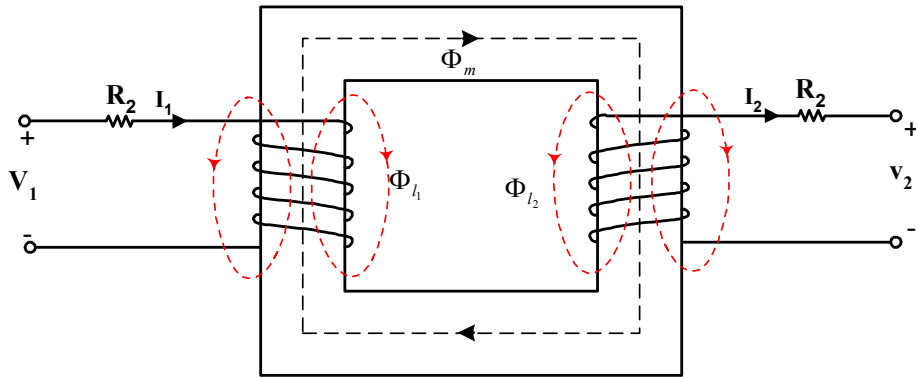
المحوّل الفعلي (غير المثالي) The Real Transformer

المحوّل الفعلي أو غير المثالي يختلف عن المحوّل المثالي في عدة أوجه . منها على سبيل المثال كما يبين الشكل (٢ - ١٤) أ .

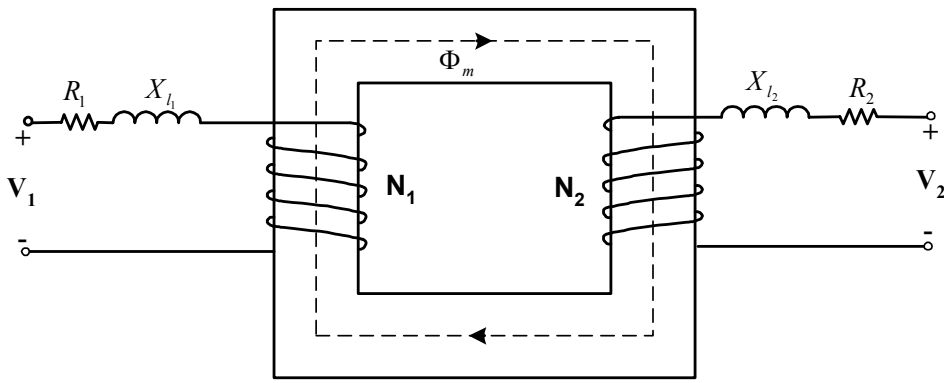
- مقاومة الملف الابتدائي والثانوي R_1 و R_2 ليست مهملة .
- وجود الفيض المغناطيسي المتسرب ϕ_{L_1} و ϕ_{L_2} في الملف الابتدائي والثانوي على التوالي .
- المفاقيد الحديدية غير مهملة .
- نفاذية مادة القلب ليست مالانهاية بما يؤدي إلى وجود فيض تبادلي ϕ_m في القلب .

ويوضح الشكل (٢ - ١٤) ب تمثيل المحوّل الفعلي .

حيث أن X_{L_1} و X_{L_2} هما مفاعلة الفيض المغناطيسي المتسرب في الملف الابتدائي والثانوي على التوالي .



(أ)



(ب)

شكل (٢ - ١٤) تمثيل المحوّل الفعلي

ومن الشكل (٢ - ١٥) يتضح لنا أن التيار I_1 يساوي :

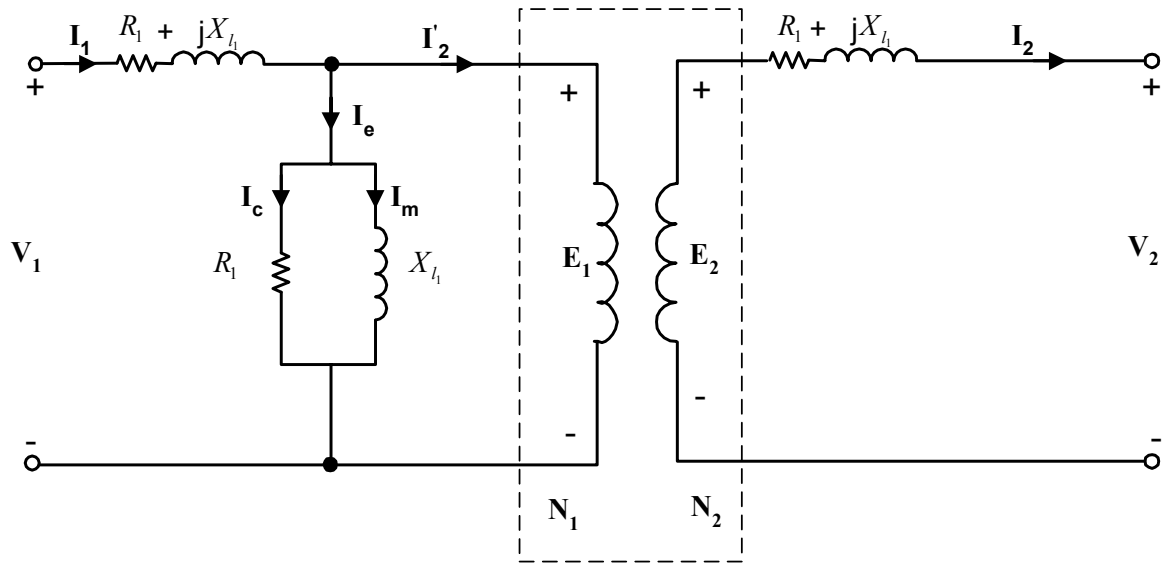
$$I_1 = I_2' + I_e \quad (٢ - ٢٥)$$

حيث أن :

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{a} \quad (٢ - ٢٦)$$

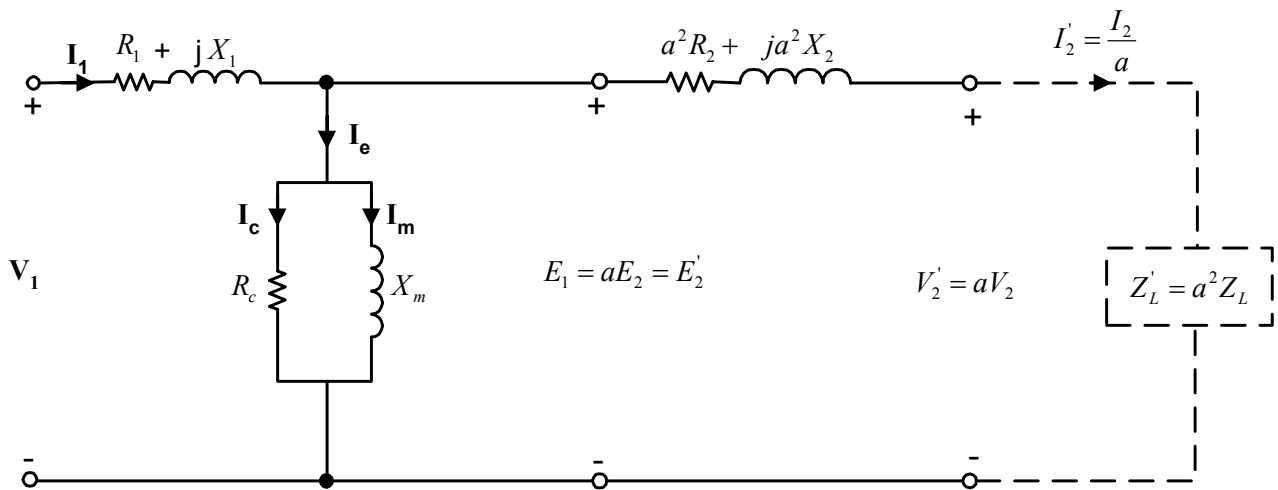
وهو عبارة عن تيار الملف الثانوي محوّل للملف الابتدائي.

و I_e هو تيار الاستثارة ويمكن فصله إلى مركبتين : الأولى هي I_c لها نفس وجه الجهد V_1 والثانية I_m لها نفس وجه الفيض المغناطيسي ϕ_m في القلب ويعرف التيار I_c بتيار فقد الحديد ، بينما يعرف التيار I_m بتيار المغناطيسية . وعند سريان التيارات I_c و I_m إلى دائرة الاستثارة فإن الشكل (٢ - ١٥) يبين الدائرة المكافئة لدائرة استثارة المحوّل وتعرف R_c بمواصلة الاستثارة (مقاومة مكافئة للمفاقيد الحديدية) و X_m بتقابلية الاستثارة (ممانعة التمعنط) .



شكل (٢ - ١٥) الدائرة المكافئة لدائرة استثارة المحوّل

يمكن حذف المحوّل المثالي في الشكل (٢ - ١٥) بتحويل مكوّنات الجانب الثانوي للجانب الابتدائي كما هو مبين في الشكل (٢ - ١٦)



شكل (٢ - ١٦) الدائرة المكافئة لدائرة استثارة المحوّل بعد حذف المحوّل المثالي

حيث أن :

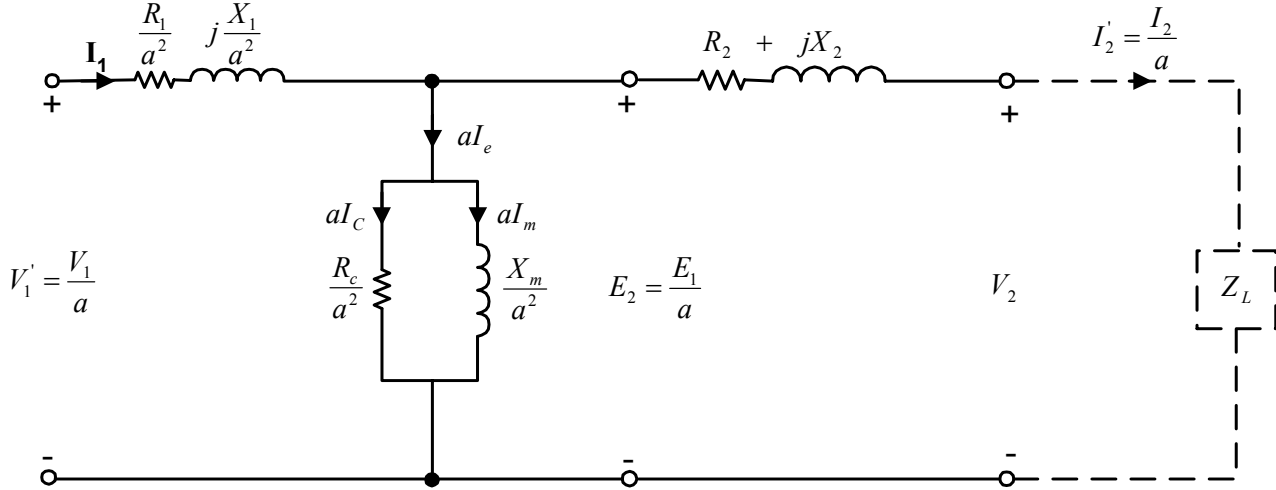
$$V'_2 = aV_2 \quad \text{الجهد الثانوي محوّل للابتدائي}$$

$$E'_2 = aE_2 \quad \text{القوة الدافعة الكهربائية محوّلة للابتدائي}$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{a} \quad \text{التيار الثانوي محوّل للابتدائي}$$

المعاوقة الثانوية محوّل له للابتدائي $a^2 R_2 + ja^2 X_2$

كما أنه يمكن حذف المحوّل المثالي أيضاً بتحويل مكوّنات الجانب الابتدائي إلى الجانب الثانوي كما هو موضح بالشكل (٢- ١٧).



شكل (٢- ١٧) تحويل مكوّنات الجانب الابتدائي إلى الجانب الثانوي

حيث أن :

$$V_1' = \frac{V_1}{a} \quad \text{الجهد الابتدائي محوّل للثانوي}$$

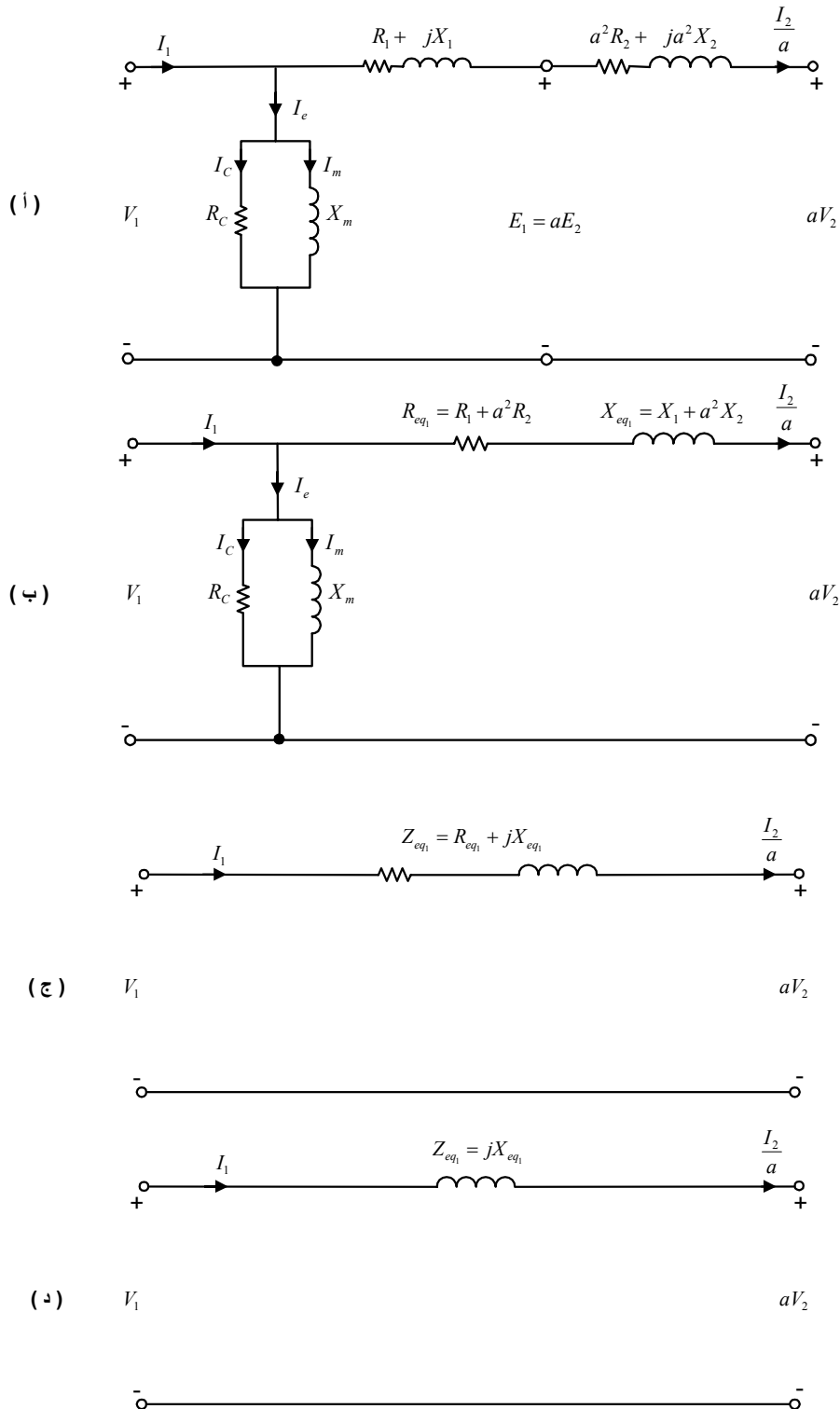
$$\frac{R_1}{a^2} + j \frac{X_1}{a^2} \quad \text{المعاوقة الابتدائية محوّل للثانوي}$$

$$I_1' = aI_1 \quad \text{التيار الابتدائي محوّل للثانوي}$$

$$aI_e = aI_c + aI_m \quad \text{تيار الاستثارة محوّل للثانوي}$$

٢- ٧ الدائرة المكافئة للمحوّل الفعلي (The Equivalent Circuit of A Real Transformer)

الدوائر المكافئة التي تم شرحها في الجزء السابق (الجزء ٢- ٦) في الشكل (٢- ١٦) والشكل (٢- ١٧) دقيقة بنسبة كبيرة في الحياة العملية ، ولكن في تطبيقات القدرة الكهربائية فإن تيار الاستثارة I_e صغير جداً مقارنة مع تيار الحمل للمحوّل ، وبالتالي فإن الجهد المتولد عنه في الملفات الابتدائية $(R_1 + jX_1)$ جهد صغير . مما يمكننا من نقل الدائرة التي يمر بها التيار I_e على يسار أو يمين مكوّنات الدائرة كما يبين الشكل (٢- ١٨) أ مما يسهل جمع الممانعات والمقاومات كما في الشكل (٢- ١٨) ب .



شكل (٢ - ١٨) الدائرة المكافئة للمحول الفعلي

في حالة ما تكون مقاومة الملف الثانوي منقولة للملف الابتدائي كما بالشكل (٢ - ١٨) ب فإن :

$$Z_{eq_1} = R_{eq_1} + jX_{eq_1} \quad (٢٧ - ٢)$$

$$R_{eq_1} = R_1 + a^2 R_2 \quad (٢٨- ٢)$$

$$X_{eq_1} = X_1 + a^2 X_2 \quad (٢٩- ٢)$$

وفي حالة ما تكون مقاومة الملف الابتدائي منقولة للملف الثانوي كما بالشكل (٢- ١٩) فإن :

$$Z_{eq_2} = R_{eq_2} + jX_{eq_2} \quad (٣٠- ٢)$$

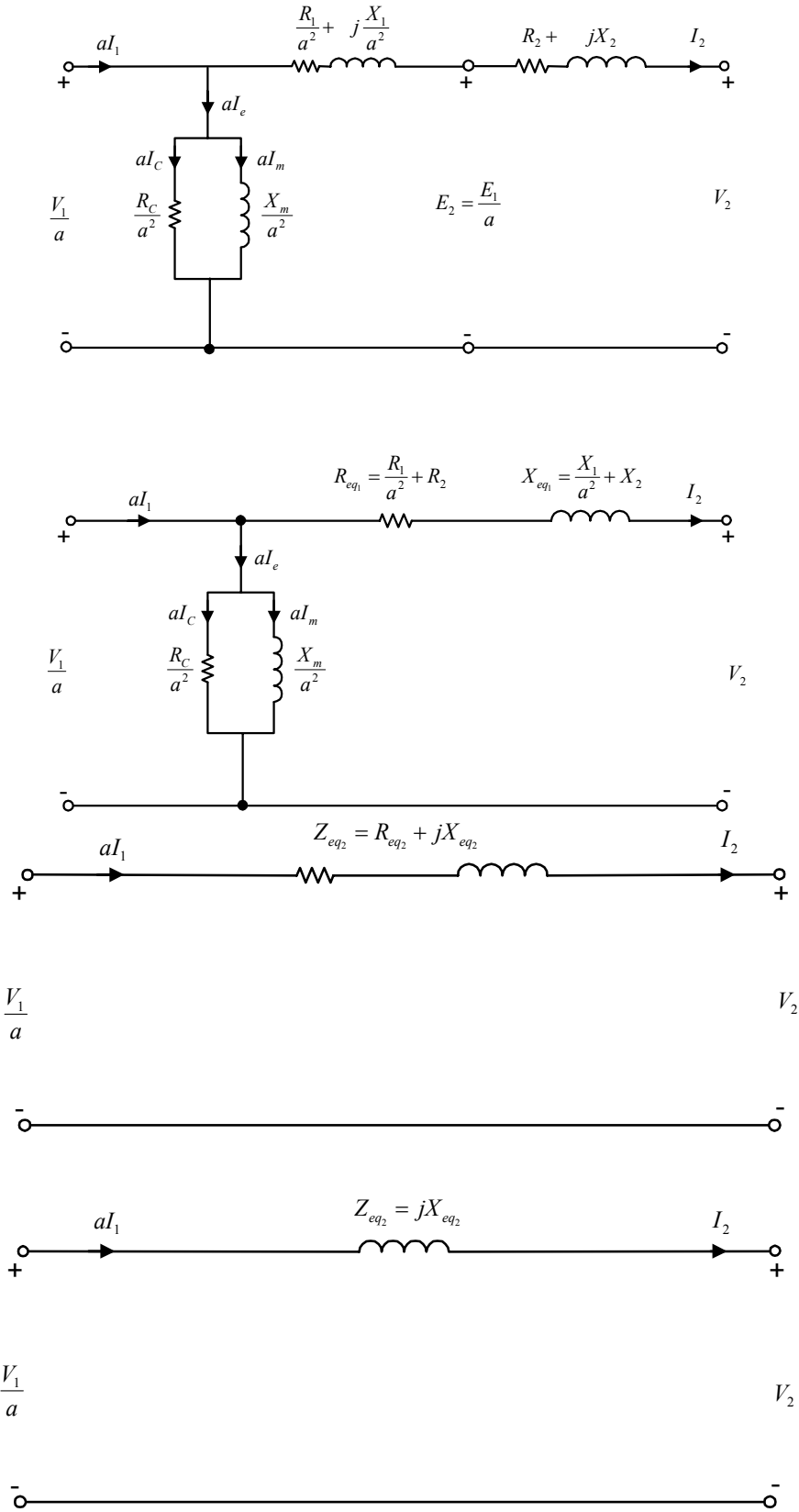
$$R_{eq_2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2 \quad (٣١- ٢)$$

$$X_{eq_2} = \frac{X_1}{a^2} + X_2 \quad (٣٢- ٢)$$

ويمكن أيضاً تبسيط الدائرة المكافئة للمحوّل الفعلي أيضاً بحذف دائرة الاستثارة حيث إن التيار I_e صغير جداً كما يبين الشكل (٢- ١٨) ج وشكل (٢- ١٩) ج .
وفي محوّل القدرة فإن المقاومة R_{eq} صغيرة جداً مقارنة بالمفاعلة X_{eq} وعلى ذلك فإن المحوّل قد يتم تمثيله بالمفاعلة X_{eq} فقط وإهمال R_{eq} كما يبين الشكل (٢- ١٨) د والشكل (٢- ١٩) د ومنها فإن المقاومة الكلية تكون :

$$Z_{eq_1} = jX_{eq_1} \quad (٣٣- ٢)$$

$$Z_{eq_2} = jX_{eq_2} \quad (٣٤- ٢)$$



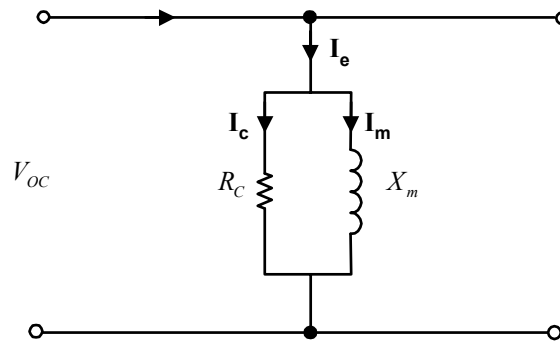
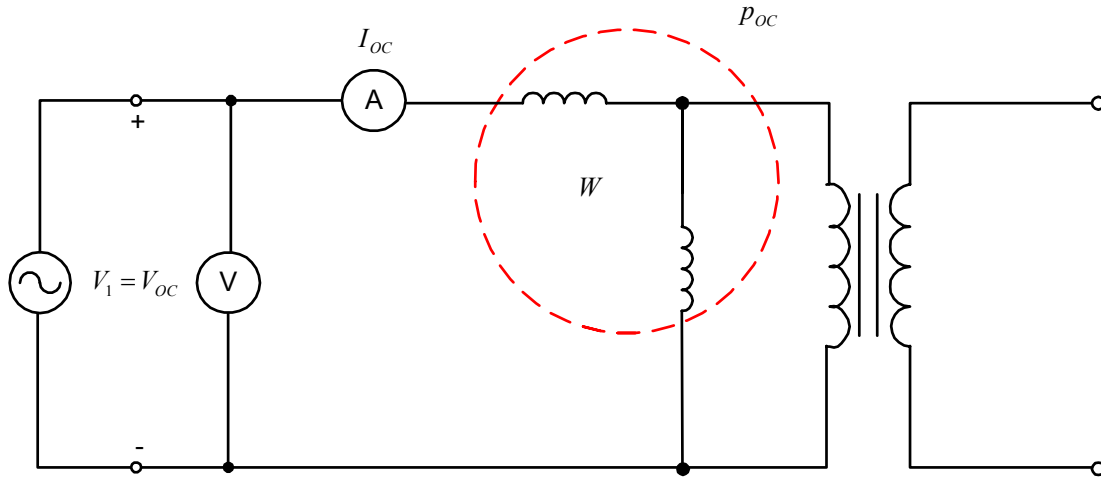
شكل (٢ - ١٩) الدائرة المكافئة لمحول فعلي مقاومة الملف الابتدائي منقولة للملف الثانوي

حساب مكونات الدائرة المكافئة

يكون من الصعب معرفة جميع مكونات الدائرة المكافئة ماعدا لمن قام بتصميم هذه المحولات . عند ذلك فإنه يتوجب إيجاد طرق لمعرفة بعض مكونات الدائرة المكافئة لمعرفة خصائص المحول وحساب هذه المكونات . ويتم ذلك بإجراء اختبارين هما اختبار الدائرة المفتوحة واختبار الدائرة المقصورة .

٢- ٨- ١ اختبار الدائرة المفتوحة The Open-Circuit Test

الغرض من هذا الاختبار هو حساب سماحية الاستثارة $Y_e(\frac{1}{R_e - jX_m})$ ، و مفاقيد اللاحمل ، و تيار الاستثارة عند اللاحمل (عدم التحميل) ومعامل القدرة عند عدم التحميل ، ويتم هذا الاختبار بتوصيل جانب المحول الابتدائي لمصدر الجهد وترك الجانب الثانوي مفتوحاً أو العكس . ويتم قياس التيار والقدرة المسحوبة من مصدر الجهد كما يبين الشكل (٢- ٢٠) أ .



شكل (٢- ٢٠) اختبار الدائرة المفتوحة

بذلك تكون مكونات الدائرة كالتالي :

$$\cos \theta_{oc} = PF_{oc} = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}} \quad (٢- ٣٥)$$

حيث أن :

PF_{oc} هو معامل القدرة لاختبار الدائرة المفتوحة

θ_{oc} هي زاوية سماحية الاستثارة

$$Y_e = Y_{oc} = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\theta_{oc} = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m} \quad (٢- ٣٦)$$

حيث أن Y_e هي سماحية الاستثارة أو سماحية اختبار الدائرة المفتوحة

$$R_c = \frac{1}{G_c} \quad (٢- ٣٧)$$

$$X_m = \frac{1}{B_m} \quad (٢- ٣٨)$$

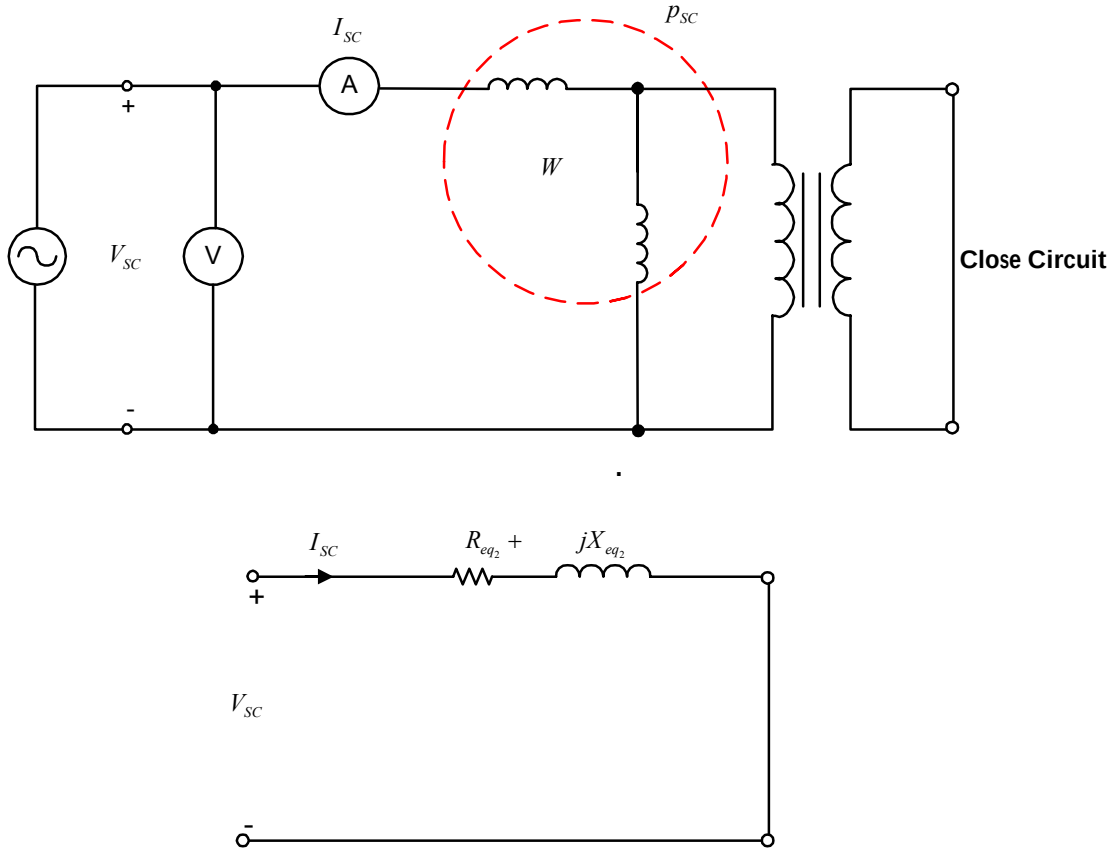
حيث أن :

$$G_c \cong G_{oc} = \frac{P_{oc}}{V_{oc}^2} \quad \text{موصلية مفايد الحديد} \quad (٢- ٣٩)$$

$$B_m \cong B_{oc} = (Y_{oc}^2 - G_{oc}^2)^{1/2} \quad (٢- ٤٠)$$

٢- ٨- ٢ اختبار الدائرة المقصورة The Short Circuit Test

يتم هذا الاختبار بقصر إحدى طرفي الملف وعادة ما يكون جانب الجهد المنخفض وتسلط جهد منخفض على جانب الجهد العالي وهو عبارة عن نسبة من الجهد المقنن للمحول على جانبيه الابتدائي ، وعادة ما يكون ٢٪ إلى ١٢٪ من الجهد المقنن للمحول . ويتم زيادة هذا الجهد حتى يصل التيار في ملفات الدائرة المقصورة إلى القيمة المقننة كما يبين الشكل (٢- ٢١) أ .



شكل (٢ - ٢١) اختبار الدائرة المقصورة

الغرض من هذا الاختبار هو حساب المقاومة والمفاعلة المكافئة للمحول كما يلي :

$$Z_{SC} = Z_{eq1} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (٢ - ٤١)$$

$$PF_{SC} = \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (٢ - ٤٢)$$

حيث أن :

$$Z_{eq1} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \theta_{SC} = R_{eq1} + jX_{eq1} \quad (٢ - ٤٣)$$

و

$$R_{eq1} = R_1 + a^2 R_2 \quad (٢ - ٤٤)$$

$$X_{eq1} = X_1 + a^2 X_2 \quad (٢ - ٤٥)$$

وبذلك فإنه :

$$R_{eq1} \cong R_{SC} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} \quad (٢-٤٦)$$

$$X_{eq1} \cong X_{SC} = (Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)^{1/2} \quad (٢-٤٧)$$

ومن هذه الحالة فإن المقاومة والممانعة في الجانب الثانوي نقلت للجانب الابتدائي وبذلك فإن :

$$R_1 = a^2 R_2 = \frac{R_{eq1}}{2} \quad (٢-٤٨)$$

$$X_1 = a^2 X_2 = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (٢-٤٩)$$

مثال ٢ - ٤ :

محول توزيع 60 Hz - 7500/480V , 15 KVA . تم إجراء اختبار الدائرة المفتوحة (O.C.T) واختبار الدائرة المقصورة (S.C.T) على الجانب الابتدائي وتم أخذ القراءات التالية :

	اختبار الدائرة المقصورة	اختبار الدائرة المفتوحة على الجانب الابتدائي
Voltmeter	$V_{SC} = 366V$	$V_{OC} = 7500V$
Ammeter	$I_{SC} = 2A$	$I_{OC} = 0.2006A$
Wattmeter	$P_{SC} = 300W$	$P_{OC} = 180W$

احسب قيمة المقاومة المكافئة في الجانب الابتدائي .

معامل القدرة في حالة اختبار الدائرة المفتوحة يمكن حسابه كالتالي :

$$PF_{OC} = \cos \theta_{OC} = \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} = \frac{180}{7500 \times 0.2006} = 0.1196 \quad \text{متأخر}$$

ومن ثم يمكن حساب سماحية الاستثارة من المعادلة ٢ - ٣٦ كالتالي :

$$Y_e = Y_{OC} = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\cos^{-1} PF_{OC}$$

$$Y_e = \frac{0.2006}{7500} \angle -\cos^{-1}(0.1196)$$

$$= 0.0000267 \angle -38.129 \quad S$$

$$= 0.0000032 - j0.0000265 \quad S$$

$$= \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_m}$$

وبذلك فإن :

$$R_C = \frac{1}{0.0000032} = 312500 \, \Omega \cong 312.5k\Omega$$

$$X_m = \frac{1}{0.0000265} = 37735.85 \, \Omega \cong 37.736k\Omega$$

ومعامل القدرة في اختبار الدائرة المقصورة هو :

$$PF_{SC} = \cos \theta_c = \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}}$$

$$= \frac{300}{366 \times 2} = 0.41 \text{ متأخر}$$

∴ المقاومة المكافئة من المعادلة (٢-٤٣) هي :

$$Z_{eq1} = Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \cos^{-1} PF$$

$$= \frac{366}{2} \angle \cos^{-1} 0.41 = 183 \angle 65.81 \, \Omega$$

$$= 75 + j166.93 \, \Omega$$

كفاءة المحوّل Transformer Efficiency

كفاءة أي جهاز كهربائي تعرف كنسبة القدرة الخارجة إلى القدرة الداخلة وبذلك فإن :

$$\zeta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$= \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{loss}}$$

(٢-٥٠)

حيث أن :

- P_{out} القدرة المعطاة من المحوّل
- P_{in} القدرة التي يستهلكها المحوّل
- P_{loss} القدرة المفقودة

ويمكن كتابه المعادلة (٢- ٥٠) كالتالي :

$$\begin{aligned}\zeta &= \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \\ &= 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}}\end{aligned}\quad (٢- ٥١)$$

حيث أن القدرة في المحوّل هي عبارة عن المفاقيد في القلب الحديدي والمفاقيد النحاسية وبذلك فإن P_{in} هي

$$P_{in} = P_{out} + P_{core} + P_{Cu} \quad (٢- ٥٢)$$

حيث أن :

- P_{core} المفاقيد في القلب الحديدي
- P_{Cu} المفاقيد النحاسية

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos \theta = S_{out} \cos \theta \quad (٢- ٥٣)$$

حيث $\cos \theta$ هو معامل القدرة للحمل
وبذلك فإن كفاءة المحوّل :

$$\zeta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta}{V_2 I_2 \cos \theta + P_{core} + P_{Cu}} \quad (٢- ٥٤)$$

حيث أن :

$$\begin{aligned}P_{Cu} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \\ &= I_1^2 R_{eq_1} \\ &= I_2^2 R_{eq_2} = P_{SC}\end{aligned}\quad (٢- ٥٥)$$

و

$$P_{core} = P_{OC} \quad (٢- ٥٦)$$

ويمكن الحصول على أعلى كفاءة للمحوّل عندما تكون $P_{core} = P_{OC}$

٢- ١٠ معامل تنظيم الجهد للمحول Voltage Regulation of a Transformer

معامل تنظيم الجهد للمحول ما هو إلا معدل التغير في قيمة الجهد على أطراف الملفات الثانوية من حالة عدم التحميل إلى حالة التحميل الكامل ، وعندما يكون الجهد على أطراف الملفات الابتدائية ثابت . ودائماً يعبر عنه بنسبة مئوية من قيمة التحميل الكامل للمحول.

$$\% \text{ Voltage Regulation} = \frac{V_2(\text{no load}) - V_2(\text{full load})}{V_2(\text{full load})} \times 100 \quad (٢- ٥٧)$$

$$V_2(\text{no load}) = \frac{V_1}{a} \quad \text{وبما أنه عند عدم التحميل يكون}$$

فإن معامل التنظيم يكون

$$\% \text{ Voltage Regulation} = \frac{\frac{V_1}{a} - V_2(\text{full load})}{V_2(\text{full load})} \times 100 \quad (٢- ٥٨)$$

وعندما تكون مقاومة الملف الثانوي منقولة لجهد الملف الابتدائي فإنه يمكن حساب الجهد على أطراف الملف الابتدائي من المعادلة التالية :

$$V_1 = aV_2 + I_1 Z_{eq1} \quad (٢- ٥٩)$$

$$V_1 = aV_2 + I_1 R_{eq1} + jI_1 X_{eq1} \quad (٢- ٦٠)$$

وعندما تكون مقاومة الملف الابتدائي منقولة لجهد الملف الثانوي فإن الجهد على أطراف الملف الابتدائي يمكن حسابه كالتالي :

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 Z_{eq2} \quad (٢- ٦١)$$

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 R_{eq2} + jI_2 X_{eq2} \quad (٢- ٦٢)$$

ملحوظة: يكون معامل التنظيم صفراً عند معامل القدرة يساوي الواحد وسالب عند معامل القدرة المتقدم وموجب عند معامل القدرة المتأخر .

مثال ٢- ٥ :

محول 100KVA , 200/240V-60Hz . أجريت عليه اختبارات الدائرة المغلقة والمفتوحة وتم تسجيل البيانات التالية :

	اختبار الدائرة المفتوحة على الجانب الابتدائي	اختبار الدائرة المغلقة (على الابتدائي)
Voltmeter	$V_{OC} = 7500V$	$V_{SC} = 250V$
Ammeter	$I_{OC} = 0.65A$	$I_{SC} = 13.889A$
Wattmeter	$P_{OC} = 425W$	$P_{SC} = 1420W$

بافتراض أن المحوّل يعمل عند الحمل الكامل بمعامل قدرة متأخر ٠,٩ ، احسب :

أ - المقاومة المكافئة ومقاومة المحوّل منقولة للجزء الابتدائي .

ب - المقاومة الكلية عند الحمل الكامل .

ج - كفاءة المحوّل .

د - معامل تنظيم الجهد للمحوّل .

الحل : أ .

$$Z_{eq1} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{250}{13.889} = 18 \Omega$$

$$R_{eq1} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} = \frac{1420}{(13.889)^2} = 7.36 \Omega$$

$$X_{eq1} = (Z_{SC}^2 - R_{SC}^2)^{1/2} = (18^2 - 7.36^2)^{1/2} = 16.43 \Omega$$

ب. تيار الحمل الكامل يمكن حسابه كالتالي :

$$I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{100000VA}{7200V} = 13.89 A$$

من المعادلة رقم (٢ - ٥٢) يمكن حساب مفايد النحاس كالتالي :

$$P_{Cu} = I_1^2 R_{eq1} = 13.89^2 \times 7.36 = 1419.98 W$$

ومن المعادلة (٢ - ٥٦) فإن :

$$P_{core} = P_{OC} = 425 W$$

∴ جميع المفايد الكلية تكون :

$$P_{loss} = P_{Cu} + P_{core}$$

$$= 1419.98 + 425 = 1844.98 W$$

ج. من المعادلة (٢ - ٥٣) فإن القدرة P_{out} الخارجة من المحوّل هي :

$$P_{out} = S \cos \theta = 100KVA \times 0.9 = 90kW$$

من المعادلة (٢ - ٥٢) فإنه :

$$P_{in} = 90000 + 1844.95 = 91844.98W$$

والآن يمكن حساب كفاءة المحوّل من المعادلة (٢ - ٥١) :

$$\zeta = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{1844.98}{91844.98} = 0.9799$$

د. باستخدام المعادلة (٢ - ٦٠) فإن الجهد على أطراف الملف الابتدائي هو :

$$\begin{aligned} V_1 &= aV_2 + I_1(R_{eq1} + jX_{eq1}) \\ &= 7200 \angle 0^\circ + (13.89 \angle -25.84^\circ)(7.36 + j16.43) \\ &= 7393.19 \angle 1.25^\circ V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \%V_{Reg} &= \frac{V_1 - aV_2}{aV_2} \times 100 \\ &= \frac{7393.19 - 7200}{7200} \times 100 = 2.68 \end{aligned}$$

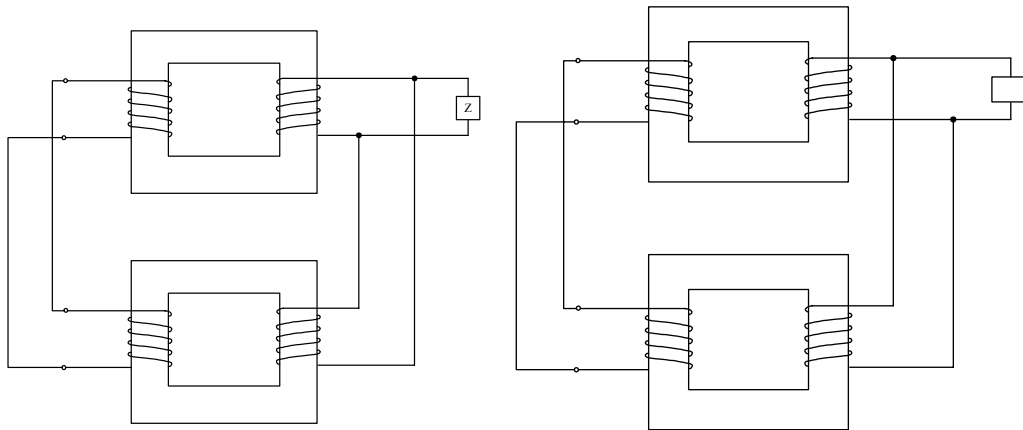
$$V_{Reg} = 2.68 \% \quad \text{أو}$$

المحوّلات ثلاثية الأوجه

عندما تحدث توسعات في التحميل فإنه يجب إضافة محوّلات لأن أجهزة تحويل القدرة الموجودة ستحتاج إلى سعة أكبر ، وفي هذه الحالة يجب توصيل مجموعة من المحوّلات معاً.

٢ - ١١ - ١ طرق التوصيل للمحوّلات (التشغيل على التوازي) :

في الحمل المغذى بالقدرة من محوّل واحد ، إذا زاد الحمل فإن سعة المحوّل تصبح في بعض الأحيان غير كافية ، وإذا كانت الحالة هكذا يتم إقامة محوّل آخر بسعة تستطيع الاستجابة للحمل المتوسع ويوصل على التوازي مع المحوّل الموجود كما هو مبين في الشكل (٢ - ٢٢) ، وهذا يسمى بالتشغيل على التوازي



(أ)

(ب)

شكل ٢ - ٢٢ توصيل التوازي لمحوّل أحادي الوجه

وعندما توصل المحوّلات على التوازي فإن التوصيل يجب عمله بحيث يصبح اتجاه اللف للملف المحوّل الذي نعتبره كما هو

مبين في الشكل ٢- ٢٢ (أ) ، وإذا كان اتجاه الملف للمحولات عند الجانب الثانوي معاكس كل منهما للآخر كما هو مبين في الشكل ٢- ٢٢ (ب) فإن الجانب الثانوي سيتم قصر دائرته ويسري تيار دوراني كبير جداً يمكن أن يحرق الملفات .

٢- ١١- ٢ شروط التشغيل على التوازي :

عند إجراء التشغيل على التوازي بتوصيل محوّلين فإن كل محوّل يجب أن يشارك بتيار لا يزيد على مواصفات كل محوّل ، ولهذا الغرض فإنه يجب الوفاء بالمتطلبات الآتية :

١. يجب أن تتطابق القطبية لكلا المحوّلين .
٢. يجب أن تكون نسبة اللف متساوية لكلا المحوّلين.
٣. يجب أن تتساوى نسبة مقاومة اللفائف إلى المفاعلة المتسرية R/X لكلا المحوّلين .
٤. يجب أن تتساوى المعاوقة لكلا المحوّلين

إذا لم يتم الوفاء بالمتطلب الثالث فإن الجهد عند كل محوّل يكون مختلفاً ، وبالتالي سيكون غير متوازن . و المتطلب الرابع مهم وذلك لتوزيع تيار متناسب مع الخرج المقدر لكل محوّل .

٣,١١,٢ - توصيل المحوّلات ثلاثية الأوجه :

في أنظمة القدرة ثلاثية الأوجه من الضروري رفع أو خفض الجهد في مواضع مختلفة من النظام ، وهذا يتم إما عن طريق محوّلات ذات وجه واحد متطابقة بحيث يتم توصيل محوّل واحد لكل وجه أ. استخدام محوّل ثلاثي الأوجه ، وفي كل حالة فإن كل وجه له ملف ابتدائي وملف ثانوي ، وتلك الملفات يتم توصيلها إما دلتا (Δ) أو نجمة (Y) . وتوجد

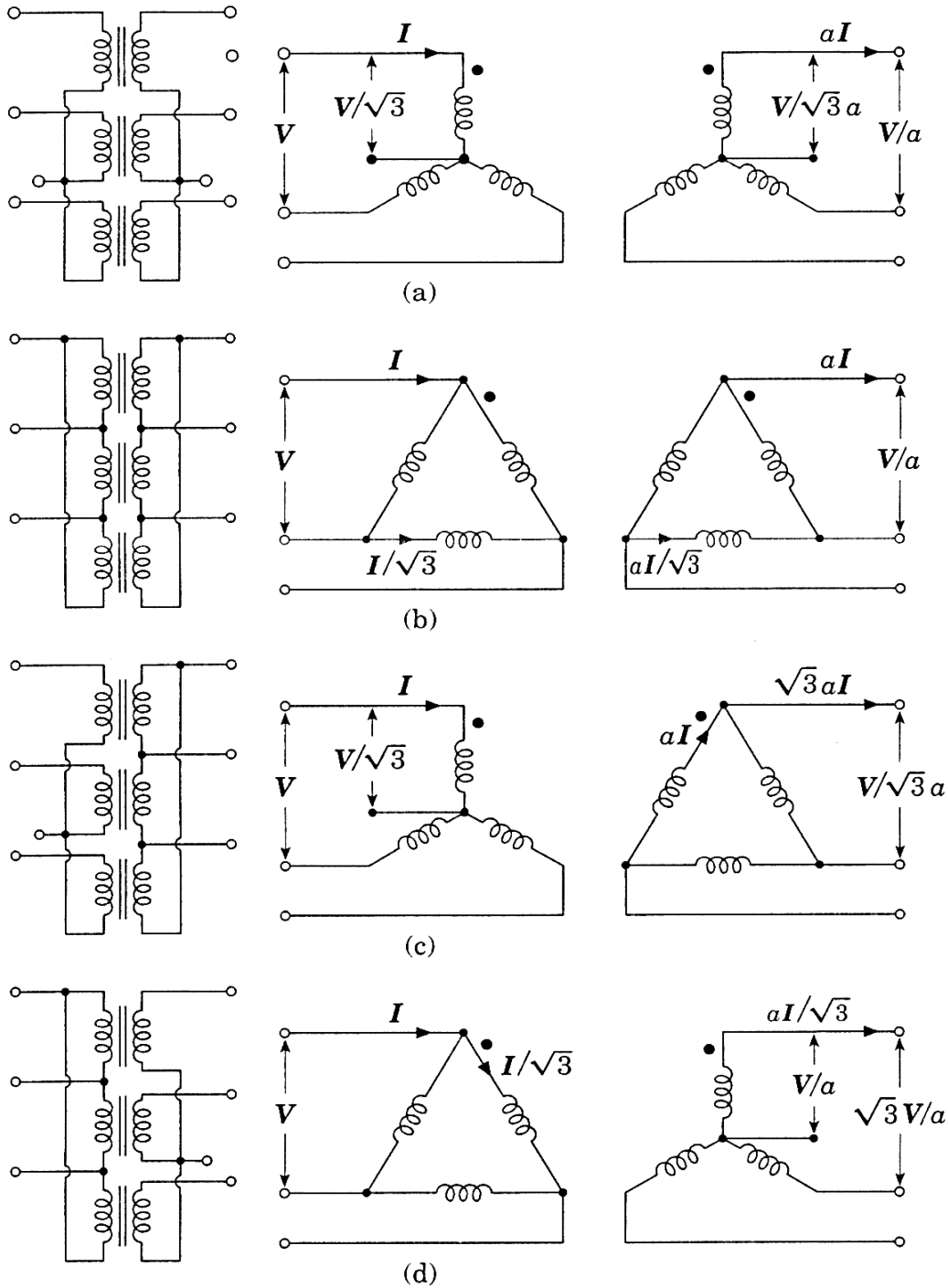
أربعة طرق ممكنة للتوصيل كما بالشكل (٢- ٢٣) وهي :

(a) $Y-Y$ نجمة نجمة كما في الشكل (٢- ٢٣)

(b) $\Delta-\Delta$ دلتا دلتا كما في الشكل (٢- ٢٣)

(c) $Y-\Delta$ نجمة دلتا كما في الشكل (٢- ٢٣)

(d) $\Delta-Y$ دلتا نجمة كما في الشكل (٢- ٢٣)



شكل (٢ - ٢٣) توصيل محوّل ثلاثي الأوجه

ويتميز توصيل المحوّل بطريقة نجمة (Y) أنه يوفر خط التعادل (N) وبذلك يمكن الحصول على جهد وجه واحد .

• توصيلة نجمة - نجمة (Y-Y)

في توصيلة $Y-Y$ للمحول يتم عمل توصيلة Y عند كل من الجانبين الأولي والثانوي لكل محول .
وتيار الاستثارة لكل محول يحتوي على التوافقية الثالثة بالإضافة إلى الموجة الأساسية ، وهذه التوافقية الثالثة لها نفس الوجه لكل زاوية وجهية ، وبالتالي فليست هناك دائرة لجريان التوفيقات الثلاث في توصيل $Y-Y$ ؛ ولذا يتشوه الشكل الموجي للجهد وذلك يتسبب في حدوث اضطراب ضجيجي في خطوط الاتصالات المجاورة ، ولهذا السبب فإن توصيل $Y-Y$ يستخدم فقط في حالات خاصة بالرغم من أن له بعض المزايا مثل سهولة طريقة العزل للمحولات مقارنة بالطرق الأخرى.

• توصيله دلتا - دلتا $\Delta-\Delta$

توصيله $\Delta-\Delta$ تجعل جهد الخط مساوياً لجهد ملفات المحول ؛ وبالتالي فإنه غير موات للعزل ، لذلك لا يستخدم للجهد العالي ولكن يستخدم لمحولات التوزيع التي تعمل عند جهود تحت 60KV .

• توصيلة نجمة - دلتا $Y-\Delta$

وفيها يتم توصيل Y عند الجانب الأولي وتوصيل Δ عند الجانب الثانوي كما في شكل (٢-٢٣) ج .
ويكون الجهد على الجانب الثانوي مساوياً لجهد الخط (جهد الوجه) .
وتستخدم توصيلة $Y-\Delta$ عند تخفيض الجهد مثل طرف الاستقبال في نهاية خط نقل القدرة الكهربائية .

• توصيله دلتا - نجمة $\Delta-Y$

توصيلة $\Delta-Y$ لها تقريباً نفس مميزات توصيله نجمة - دلتا . ويتخلف جهد الملف الثانوي عن الابتدائي بزاوية 30° . وتستخدم هذه التوصيلة رفع الجهد .

• توصيلة الحمل نجمة

في حالة ما يكون الحمل موصل دلتا فإن جهد الوجه وجهد الخط يكونا متساويين بينما يكون تيار الخط متأخر عن تيار الوجه بمقدار 30° .

$$V_{L-L} = V_{P-P} \quad (٢-٦٣)$$

$$(٢-٦٤)$$

$$I_L = \sqrt{3} I_P \quad \angle -30$$

حيث أ ، الرمز P يمثل الوجه و L يمثل الخط.

• توصيلة الحمل دلتا

في حالة توصيل الحمل دلتا فإن تيار الخط وتيار الوجه متساويان بينما يتقدم جهد الخط على جهد الوجه ب 30°

$$I_L = I_P \quad (٢- ٦٥)$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3} V_{L-N} \angle 30^\circ \quad (٢- ٦٦)$$

• القدرة في المحرك ثلاثي الوجه :

تكون القدرات المسحوبة بواسطة حمل ثلاثي الأوجه متزن كالتالي :

$$P = \sqrt{3} V_{L-L} I_L \cos \theta \quad \text{القدرة الفعالة}$$

$$Q = \sqrt{3} V_{L-L} I_L \sin \theta \quad \text{القدرة غير الفعالة}$$

$$S = \sqrt{3} V_{L-L} I_L^* \quad \text{القدرة الظاهرية}$$

حيث أن :

$$V_{L-L}(rms) \quad \text{الجهد بين خطين}$$

$$I_L(rms) \quad \text{تيار الخط}$$

$$\theta \quad \text{زاوية الوجه لممانعة الحمل}$$

$$I_L^* \text{ Is the conjugate of } I_L$$

- مسائل -

مسألة (١) :

محول وجه واحد 240-120 V , 5KVA ينقل تيار أسمياً لحمل عند جهد 120 V .

احسب قيمة معاوقة الحمل بالجانب الابتدائي ؟

مسألة (٢) :

محول خفض يستخدم لتحويل الجهد من 13.8 KV إلى 2.4 KV وذلك عند الحمل

الكامل عندما ينقل قدرة قدرها 100 KVA.

احسب ما يلي :

أ - نسبة اللف .

ب - التيار الاسمي للملفات الابتدائية والثانوية .

ج - معاوقة الحمل منقولة للجانب الابتدائي.

د - معاوقة الحمل منقولة للجانب الثانوي .

مسألة (٣):

محول توزيع 2400/240 , 75KVA – 60Hz له معاوقة مكافئة على الجانب الثانوي

$$Z_{eq1} = 0.009318 + j0.058462 \Omega$$

احسب معامل التنظيم للمحول في الحالات التالية :

- أ - عند معامل قدرة متأخر 0.85
- ب - عند معامل قدرة يساوي الواحد .
- ج - عند معامل قدرة متقدم 0.85..

محول توزيع وجه واحد 500KVA , 2300-208 V , 60 Hz أخذت له القراءات التالية :

	اختبار الدائرة المفتوحة	اختبار الدائرة المقصورة
Voltmeter	208 V	95 V
Ammeter	85 A	217.4 A
Wattmeter	1800 W	8200 W

احسب ما يلي :

- أ - مكونات الدائرة المكافئة منقولة للجانب الابتدائي .
- ب - الجهد على الجانب الابتدائي عندما ينقل المحول تياراً أسمياً عند معامل قدرة 0.8 لحمل حتي جهده 208V.
- ج - كفاءة المحول معامل التنظيم للمحول .

مسألة (٤):

محول توزيع 2400/240 , 75KVA – 60Hz له معاوقة مكافئة على الجانب الثانوي

$$Z_{eq1} = 0.009318 + j0.058462 \Omega$$

احسب معامل التنظيم للمحول في الحالات التالية :

- أ - عند معامل قدرة متأخر 0.85
- ب - عند معامل قدرة يساوي الواحد .
- ج - عند معامل قدرة متقدم 0.85.

مسألة (٥) :

محول توزيع ثلاثي الأوجه $15 \text{ MVA } 138/13.8 \text{ KV}$ يستخدم كمحول خفض.

احسب نسبة اللف (التحويل) للمحول في حالات التوصيل التالية :

١ - نجمة - دلتا

٢ - دلتا - نجمة

الآلات الكهربائية

المحركات التآثرية



الوحدة الثالثة : المحركات التأثيرية Three Phase Induction Motors

٣ - ١ المقدمة

تستخدم هذه المحركات التأثيرية بكثرة في الصناعة لبساطة تركيبها وسهولة تشغيلها وكفاءتها العالية. حيث إن المحرك التأثيري يحتاج لمنبع تيار متردد ثلاثي الأوجه يوصل إلى العضو الثابت فقط ، أما العضو الدائر لا يوصل بأي مصدر ومغلق على نفسه ويتولد به قوة دافعة كهربية بالتأثير ، لذلك سمى بالمحرك التأثيري وسرعة هذا المحرك لا تتغير كثيراً مع زيادة الحمل إلا في حدود ٥% مما يجعل هذا المحرك شائع الاستعمال .

٣ - ٢ التركيب:

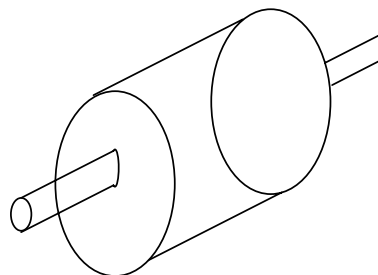
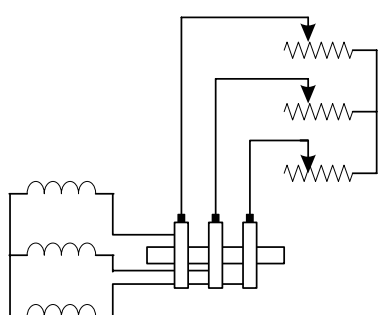
يتركب المحرك التأثيري من عضو ثابت وعضو متحرك وكلاهما مصنوع من رقائق الحديد المعزولة لتقليل التيارات الإعصارية في الحديد ومن ثم تقليل الفاقد الحديدية .

يوجد بالعضو الثابت مجار بها ثلاثة ملفات من النحاس موزعة على المجاري بطريقة لف معينة بحيث يكون بين كل ملف والآخر ١٢٠ درجة كهربية وتعطي مجالاً مغناطيسياً عبارة عن أقطاب مغناطيسية ، عدد هذه الأقطاب يتوقف عليه سرعة المحرك كما تبين ذلك نظرية العمل ، وتوصل الملفات الثلاثية بمنبع تيار متردد ثلاثي الأوجه أما العضو الدائر فيوجد منه نوعان في تكوينه بينهما تتقارب الخواص الكهربائية لهما ويسمى المحرك باسم عضوه الدائر للتمييز بين النوعين وهما المحركات ذات العضو الدائر الملفوف (ذو حلقات الانزلاق) والمحركات ذات القفص السنجاب .

أما النوع الأول للعضو الدائر الملفوف فيتكون من جسم أسطواني من رقائق الحديد المعزولة وبعضها على سطحها يوجد مجاري ويشبه منتج آلات التيار المستمر وتحتوي المجاري على ملفات ثلاثية الأوجه وتشبه ملفات العضو الثابت وتوصل هذه الملفات مع بعضها على شكل دلتا أو نجمة حسب ظروف التشغيل وفي الحالتين توصل أطراف الملفات على حلقات انزلاق ثلاث مركبة على نفس عمود الدوران وبذلك يمكن توصيل هذه الملفات بدائرة خارجية عن طريق ثلاث فرش مركبة على حلقات الانزلاق وهذا ما يتم في حالة توصيل الملفات بدائرة خارجية من مقاومة تساعد في بدء الحركة وكذلك تنظيم سرعة المحرك كما سوف يوضح فيما بعد ، ويوضح شكل (١ - أ) هذه الملفات وتوصيلها بحلقات الانزلاق . ولذلك فيتميز هذا النوع بإمكانية تغير خواص تشغيله على نطاق واسع عن طريق الدائرة الخارجية.

أما النوع الثاني فهو القفص السنجاب ويتكون هذا النوع من جسم أسطواني من رقائق أيضا وبه مجار ولكن بدلاً من الملفات توضع قضبان من النحاس أو الألمنيوم وتتصل من الناحيتين عن طريق حلقتين من نفس نوع معدن القضبان .

ويوضح شكل (٣ - ١ - ب) هذا النوع من المحركات ويلاحظ أنه لا يمكن اتصال هذا النوع من العضو الدائر بأي دائرة خارجية ولذلك لا يمكن عن طريقه بدء الحركة أو حتى تنظيم السرعة.



عضو دائر ملفوف ومتصل
بمقاومة بدء الحركة وتنظيم السرعة
(٣ - أ)

عضو دائر من النوع قفص السنجاب
(٣ - ب)

شكل ٣ - ١

ولكن لا تختلف نظرية التشغيل وكذلك الخواص الكهربائية لكلا المحركين سواء عضو دائر ملفوف أو قفص السنجاب نظراً لأنهما مقصوران ويتلاءم مع أي عدد من الأقطاب على العضو الثابت وكذلك عدد الأوجه مما يجعل خواص التشغيل متشابهة تماماً .

٣- ٣ المجال المغناطيسي الدوار Rotating Magnetic Field

عند توصيل ملفات ثلاثية ملفوفة بحيث تفصل بينها زاوية في الفراغ مقدارها ١٢٠ درجة كهربية بتيار متغير ثلاثي الأوجه " **Three Phase Supply** " يفصل بينها زاوية مرحلية زمنية تساوي ١٢٠ درجة كهربية أيضاً فإنه ينشأ مجال مغناطيسي يطلق عليه مجال مغناطيسي دوار ويمكن برهان هذا المجال باستخدام حساب المثلثات كالاتي :

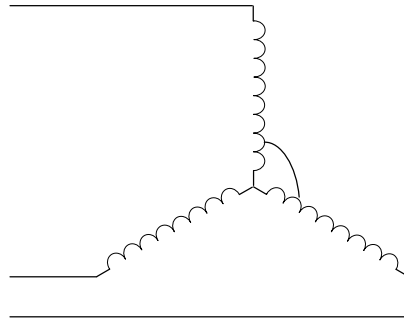
المنبع الثلاثي الأوجه له ثلاثة جهود متساوية في المقدار ومختلفة في الزمن وهذه الجهود تولد تياراً كهربياً يأخذ نفس المعادلة وكذلك التيار يولد مجالاً مغناطيسياً . فيمكن وصف المجال الثلاثي الأوجه بالمعادلات التالية :

$$\phi_1 = \phi_m \cos \omega t$$

$$\phi_2 = \phi_m \cos(\omega t - 120)$$

$$\phi_3 = \phi_m \cos(\omega t - 240)$$

وبما أن هذه المجالات الثلاثة موزعة على ثلاثة ملفات بين كل ملف والآخر ١٢٠ درجة في الفراغ فإذا رمزنا لزاوية الفراغ بالرمز θ فإن محصلة المجال المغناطيسي الكلي للثلاثة ملفات يكون كالتالي: -



$$\phi_t = \phi_m \cos \omega t \cos \theta$$

$$+ \phi_m \cos(\omega t - 120) \cos(\theta - 120)$$

$$+ \phi_m \cos(\omega t + 120) \cos(\theta + 120)$$

ولنتمكن من جمع هذه المعادلات نستخدم العلاقة المثلثية الآتية

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A - B) + \frac{1}{2} \cos(A + B)$$

وبتطبيق ذلك على معادلة المجال نجد أن المحصلة الكلية تكون :

$$\phi_t = \frac{3}{2} \phi_m \cos(\omega t - \theta)$$

والقيمة العظمى لهذه المعادلة عندما تكون الزاوية تساوي صفراً

$$\omega t - \theta = 0$$

$$\omega t = \theta$$

بما أن ωt تزيد مع الزمن ، إذن θ تزيد بنفس المعدل لذلك نقول أن القيمة العظمى للمجال المغناطيسي تدور حول المحيط بنفس سرعة ωt .

وهذا يكافئ تأثير مجال مغناطيسي من أقطاب تدور بسرعة ثابتة تتوقف على عدد هذه الأقطاب وكذلك تردد المنبع الثلاثي الأوجه الموصل إليه الملفات الثلاثية وتسمى هذه السرعة بسرعة التزامن n_s . Synchronous Speed

ويربطها مع التردد وعدد الأقطاب العلاقة :

$$f = P \frac{n_s}{60} \quad c/s \quad \text{حيث : (٣ - ١)}$$

f التردد للمنبع

P عدد أزواج الأقطاب

n_s سرعة التزامن

ويمكن كتابتها بصورة أخرى

$$n_s = \frac{60f}{P} \quad rpm \quad \text{(٣ - ٢)}$$

ويكون هذا المجال متشابكاً أو متقاطعاً مع كل ملفات العضو الثابت والعضو الدائر في نفس الوقت وهذا يشبه المجال المغناطيسي المتبادل بين الملف الابتدائي والثانوي في حالة المحول .

وتتوقف قيمة القوة الدافعة المغناطيسية " التي يتوقف عليها المجال " على القيمة الفعالة للتيار لكل وجه وعدد لفات الوجه الواحد وعدد الأقطاب وكذلك معامل اللف والذي يتوقف على طريقة لف ملفات العضو الثابت وتعطي هذه القوة الدافعة المغناطيسية الأمبير لفات من المعادلة

$$AT = 1.35 \frac{T_{ph}}{P} I_{ph} K_w \quad \text{Amper })turn / pole \quad \text{(٣ - ٣)}$$

ويلاحظ أن قيمة هذه القوة الدافعة المغناطيسية ثابتة في المقدار وتساوي مرة ونصف المرة القوة الدافعة المغناطيسية لوجه واحد . وتدور بسرعة هي سرعة التزامن التي سبق الإشارة إليها والتي تعطى من المعادلة (٣ - ٢) .

٣ - ٤ نظرية عمل المحرك :

أ - المحرك عند الوقوف " لحظة بدء التشغيل "

بمقارنة تركيب المحرك والذي سبق توضيحه بتركيب المحول يلاحظ أنهما متشابهان تماماً إلا في اختلاف الدائرة المغناطيسية وهي تحتوي في حالة المحرك على ثغرة هوائية كبيرة وهي تلك التي توجد بين العضو الثابت والعضو الدائر.

وفي هذه الحالة تشبه ملفات العضو الثابت في المحرك الملفات الابتدائية وهي التي توصل بالمنبع الثلاثي الأوجه وملفات العضو الدائر هي الملفات الثانوية والتي تكون مقصورة على نفسها ويمكن بذلك اعتبار المحرك يعمل على نمط محول دائرته الثانوية مقصورة .

و عند توصيل ملفات العضو الثابت إلى بمنبع ثلاثي الأوجه جهده موجة جيبية فإنه يمر تيار في هذه الملفات يكون أيضاً على شكل موجة جيبية وينشأ عن مرور هذا التيار فيض مغناطيسي تقريباً ذو موجة جيبية تدور في اتجاه الموجب وسرعة تزامن n_s لفة/دقيقة .

ويتشابك هذا الفيض المغناطيسي الدوار مع ملفات كل من العضو الثابت والعضو الدائر وقيمه ϕ_m وبر لكل قطب وهذه القيمة ثابتة المقدار ولا تتأثر بمقدار الحمل على المحرك .

و نتيجة لقطع المجال للملفات العضو الثابت يتولد ق.ع.ك (٣ - قوة دافعة كهربية مضادة) E_1 لكل وجه وتكون معادلتها مثل نظريتها في حال المحول كما يلي :

$$E_1 = 4.44 f_1 \phi_m N_1 \quad \text{Volts} \quad (٣ - ٤)$$

حيث

f_1 تردد المنبع الموصل عليه المحرك

N_1 عدد لفات العضو الثابت لكل وجه

وحيث أن العضو الدائر في حالة سكون فإن المجال الدوار يقطع ملفات العضو الدائر بنفس التردد أي بنفس السرعة فيتولد فيها ق.ع.ك في هذه اللحظة E_{20} وتعطى من المعادلة

$$E_{20} = 4.44 f_1 \phi_m N_2 \quad \text{Volts} \quad (٣ - ٥)$$

حيث تردد هذا الجهد هو نفسه تردد المجال الدوار أو بمعنى آخر تردد المنبع

و عدد لفات العضو الدائر لكل وجه N_2

ونظراً لأن ملفات العضو الدائر مقصورة فيمر فيها تيار يعطى عند هذه اللحظة من المعادلة

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{Z_{20}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} \quad (3 - 6)$$

وعندما يمر هذا التيار في موصلات العضو الدائر في نفس الوقت الذي يوجد فيه هذا الموصل في مجال مغناطيسي فينشأ عزم دوران على هذا العضو فيدفعه إلى الدوران في نفس اتجاه المجال الدوار وتتوقف قيمة العزم على التيار المار في موصلات العضو الدائر وكذلك على مقدار الفيض المغناطيسي الموجود في هذا العضو .

من المعادلة (3 - 5) ، (3 - 6) يمكن استنتاج علاقة الجهد لحظة بدء التشغيل بين الجهد الابتدائي والثانوي المتولد لكل وجه

$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3 - 7)$$

ب - المحرك عند الدوران بدون حمل :

عندما يدور العضو الدائر في اتجاه المجال المغناطيسي الدوار كما سبق توضيحه فإن سرعة قطع المجال الدوار للملفات العضو الدائر تقل أو تنقص سرعة القطع وتكون السرعة النسبية للمجال المغناطيسي الدوار بالنسبة للملفات العضو الدائر عندما يدور بسرعة n هي ما يسمى سرعة الانزلاق " Slip Speed " .

$$\text{Slip speed} = n_s - n \quad (3 - 8)$$

وهذه السرعة منسوبة لـ سرعة التزامن تعطي معاملأ هاماً وهو معامل الانزلاق ويرمز له بالرمز " S Slip " ويعطى من المعادلة

$$S = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$S\% = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (3 - 9)$$

ويلعب هذا المعامل دوراً هاماً جداً في تحديد خواص تشغيل المحرك كما سوف يوضح فيما بعد . وعندما تصل سرعة قطع المجال الدوار للعضو الدائر إلى سرعة الانزلاق فإن ق.ك المتولدة فيه تنقص بنفس النسبة فإذا رمزنا لهذه ق.ك عند الدوران بالرمز E_2 فإن قيمتها وكذلك ترددها يتغير وفقاً للمعادلات

$$E_2 = 4.44 f_2 \phi_m N_2 \quad (3 - 10)$$

ويعطى التردد من المعادلة

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_s - n}{n_s} = S \quad (3 - 11)$$

$$\therefore f_2 = Sf_1 \quad (3 - 12)$$

ترتبط ق.ء.ك عند بدء التشغيل بالعلاقة :

$$\frac{E_2}{E_{20}} = \frac{n_s - n}{n_s} = S \quad (3 - 13)$$

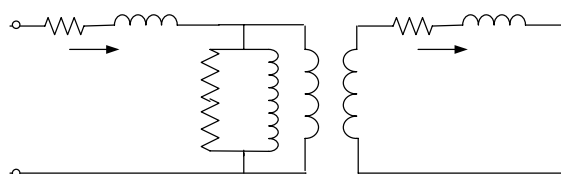
$$\therefore E_2 = SE_{20} \quad (3 - 14)$$

ومن هذه المعادلة التوضيحية يتضح أن العضو الدوار يدور بسرعة قريبة من سرعة التزامن عند اللاحمل بالقدر المكافئ لتوليد ق.ء.ك وتيار في ملفات الثانوي يكفي لتوليد العزم المطلوب عند اللاحمل ويكون الانزلاق في حالة اللاحمل قريباً جداً من الصفر (٠,١ % ، ٠,٢ %) وقد يصل في المحركات الكبيرة إلى ٠,٥ % . وتقل السرعة عند تحميل المحرك حيث يكون معامل الانزلاق عند الحمل الكامل ما بين ٣% إلى ٥% .

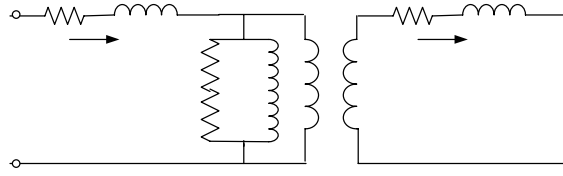
وتكون دائرة المحرك المكافئة التي تشبه إلى حد كبير دائرة المحول المكافئة كما هو موضح بالشكل (٣ - ٢) فيما عدا أن الدائرة الثانوية دائماً مقصورة عند لحظة البدء . ويكون التيار في الدائرة الثانوية تقريباً صفراً وذلك لاقتراب السرعة من سرعة التزامن . وشكل (٣ - ٣) يوضح الدائرة المكافئة في هذه الحالة (حالة اللاحمل) .

ملحوظة :

لو حدث ووصلت سرعة العضو الدائر إلى سرعة التزامن فإنه في هذه اللحظة يكون المحرك في حالة انعدام العزم تماماً ، وعندها يكون التيار وكذلك ق.ء.ك في الدائرة الثانوية صفراً وعندما ينعدم العزم لتقل السرعة . وعند هذا يزيد التيار فينشأ عزم ، وهكذا يحافظ المحرك دائماً على سرعة مناسبة لتوليد ق.ء.ك وكذلك تيار في الدائرة الثانوية ومن ثم عزم دوران يتناسب مع مقدار الحمل المحمل به المحرك ، وهذا يوضح أهمية ما يسمى بمعامل الانزلاق S .

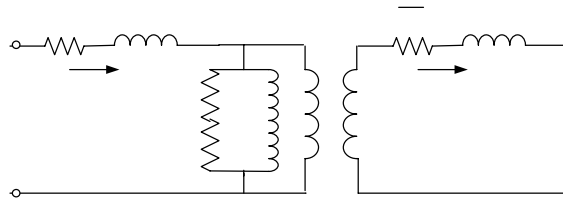


شكل (٣ - ٢) في حالة السكون



شكل (٣- ٣) في حالة اللاحمل

وعند أي سرعة للمحرك n منازرة لمعامل الانزلاق S فإن ق.ء.ك تتغير إلى $E_2 = SE_{20}$ وتشبه الدائرة المكافئة تلك التي يوضحها شكل (٣ - ٣) فيما عدا أن $I_2 \neq 0$ ويمكن رسم هذه الدائرة بطريقة أخرى كما في شكل (٣ - ٤) . حيث قسمت كل مكونات الدائرة الثانوية على S لتصبح مشابهة لتلك في شكل (٣ - ٤)



V_1

شكل (٣- ٤) في حالة الحمل الكامل

وكما هو الحال في حالة المحول تكون العلاقات لكل من الجهود والتيارات والمقاومات كما يلي :

$$\frac{I_2^1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (٣ - ١٥)$$

$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (٣ - ١٦)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2^1 + \bar{I}_o \quad (٣ - ١٧)$$

$$\bar{I}_o = \bar{I}_\mu + \bar{I}_m \quad (٣ - ١٨)$$

$$I_\mu = I_o \cos \phi_o \quad (٣ - ١٩)$$

$$I_\mu = I_o \sin \phi_o \quad (٣ - ٢٠)$$

وكذلك كل من R_o ، X_o الممثلين للدائرة المكافئة للدائرة المغناطيسية قيمتها كما يلي لكل وجه

$$R_o = \frac{V_1}{I_m} \quad (٣ - ٢١)$$

$$X_o = X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad (٣ - ٢٢)$$

ويمكن أيضاً نسب مكونات الدائرة الثانوية إلى الدائرة الابتدائية حيث $a = \frac{N_1}{N_2}$ نسبة التحويل

$$R_2^1 = R_2 \cdot a^2 \quad (٣ - ٢٣)$$

$$X_2^1 = X_2 \cdot a^2 \quad (٣ - ٢٤)$$

$$I_2^1 = I_2 \cdot \frac{1}{a} \quad (٣ - ٢٥)$$

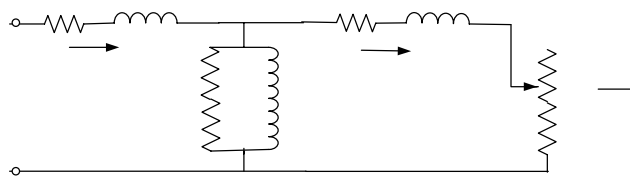
$$E_{20}^1 = E_1 \quad (٣ - ٢٦)$$

وفي نفس الدائرة المكافئة سوف تقسم المقاومة $\frac{R_2^1}{S}$ إلى مقاومتين مجموعهما $\frac{R_2^1}{S}$ كما يلي

$$\begin{aligned} \frac{R_2^1}{S} &= \frac{R_2^1}{S} + R_2^1 - R_2^1 \\ &= R_2^1 + R_2^1 \left(\frac{1}{S} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$\frac{R_2^1}{S} = R_2^1 + R_2^1 \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (٣ - ٢٧)$$

وتوضح هذه الدائرة المكافئة في شكل ٥ (كما هو الحال في حالة المحول مع ملاحظة أن الدائرة المكافئة والقيم بالنسبة لكل وجه)



شكل (٣-٥) الدائرة المكافئة منسوبة لدائرة الابتدائي عند تحميل المحرك

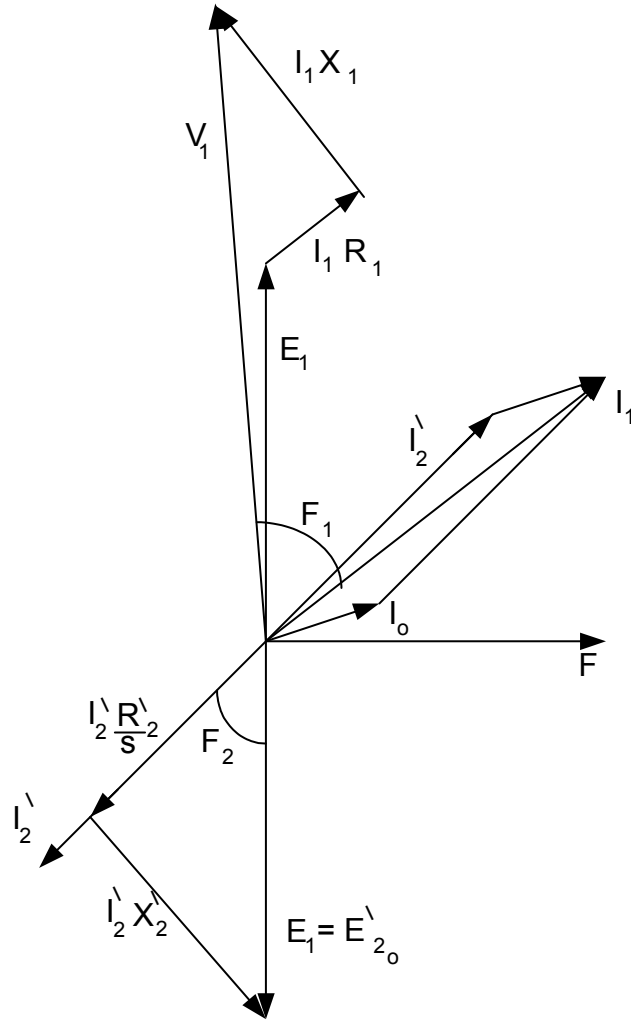
يكون مخطط المتجهات للمحرك عند الدوران كما هو في شكل ٦ حيث

$$I_2^1 = \frac{E_1 = E_{20}^1}{\sqrt{(R_2^1/s)^2 + (X_2^1)^2}} \quad (٣ - ٢٨)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2^1 + I_o \quad (٣ - ٢٩)$$

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1 \bar{Z}_1$$

$$I_o = \sqrt{I_\mu^2 + I_m^2} \quad (٣ - ٣٠)$$



شكل (٣-٦) مخطط المتجهات عند أي معامل انزلاق S

Power Relations For I.M.

٣ - ٥ علاقات القدرة في المحرك :

من الواضح أن القدرة التي يأخذها المحرك من المنبع ويرمز لها بالرمز " P_1 " تتوقف على مقدار الحمل الممثل في التيار ومعامل القدرة وتعطي هذه القدرة بالمعادلة

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (٣ - ٣١)$$

حيث V_1 ، I_1 هما الجهد والتيار لكل وجه في الدائرة للعضو الثابت .

وكما هو الموضح من الدائرة المكافئة فإن جزءاً من القدرة الداخلة يفقد في دائرة ملفات العضو الثابت " R_1 " على شكل مفقودات نحاسية والتي تتحول إلى طاقة حرارية وهي

$$P_{cu1} = 3I_1^2 R_1 \quad (٣ - ٣٢)$$

كما يبدد جزء آخر من القدرة على شكل مفقودات حديدية في الدائرة المغناطيسية للمحرك والتي تمثل في الدائرة المكافئة بالمقاومة R_o التخيلية ويرمز لها بالرمز P_i ومجموع هذه المفاقد مع المفاقد النحاسية في ملفات العضو الثابت تسمى بمفاقد العضو الثابت " P_{st} "

$$P_{st} = P_{cu1} + P_i \quad (٣ - ٣٣)$$

وعند طرح هذه المفاقد من قدرة المدخل P_1 نحصل على القدرة التي تتسبب إلى المجال المغناطيسي الدائر ويطلق عليها اسم قدرة الثغرة الهوائية وتسمى بالقدرة المنقولة من العضو الثابت إلى العضو الدائر وتعطى من المعادلة

$$P_{12} = P_1 - P_{st} \quad (٣ - ٣٤)$$

وعندما تنتقل القدرة إلى دائرة العضو الدائر فإنه يفقد جزء في صورة مفقودات نحاسية في ملفات العضو الدائر وهي P_{cu2} وتعطى من المعادلة

$$P_{cu2} = 3\bar{I}_2^2 R_2 \quad (٣ - ٣٥)$$

ويتحول الجزء الباقي من القدرة إلى قدرة ميكانيكية P_m وهي

$$P_m = P_{12} - P_{cu2} \quad (٣ - ٣٦)$$

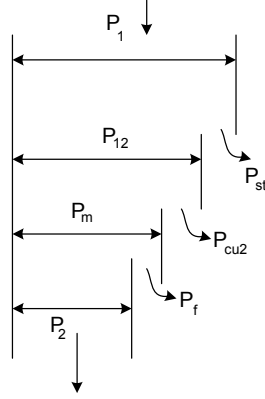
ويطلق على القدرة P_m بالقدرة الميكانيكية الكلية المحولة أو تسمى بالقدرة الميكانيكية المتولدة ويفقد جزء من هذه القدرة في صورة مفاقد ميكانيكية واحتكاك والجزء الأكبر منها هو الذي يستفاد به كقوة ميكانيكية خارجة أو مستفادة P_2 وتعطى من المعادلة

$$P_2 = P_m - P_F \quad (٣ - ٣٧)$$

حيث P_F هي القدرة المفقودة في الاحتكاك

ويوضح الشكل (٣ - ٧) شكل أو معدل انسياب القدرة بالنسبة للمحرك ويمكن إيجاد العلاقة بين هذه القدرات كما يلي :

أولاً : القدرة P_{12} يمكن حسابها من الدائرة المكافئة في شكل (٣ - ٥) كما يلي :



شكل (٣ - ٧) توزيع القدرة

$$P_{12} = 3I_2^1 E_1 \cos \phi_2 \quad (٣ - ٣٨)$$

ومن مخطط

$$\cos \phi_2 = \frac{I_2^1 R_2^1 / s}{E_1} \quad (٣ - ٣٩)$$

وبالتعويض في المعادلة (٣ - ٣٨)

ومنها فإن

$$P_{12} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (٣ - ٤٠)$$

و بالتعويض من المعادلة (٣ - ٣٥) ، (٣ - ٣٦) نجد :

$$P_m = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} - 3I_2^2 R_2$$

$$P_m = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-S)}{S} \quad (٣ - ٤١)$$

ومن المعادلات ٤٠ ، ٣٥ ، ٤١ ، يمكن المقارنة كالاتي :

$$P_{12} : P_m : P_{cu2}$$

$$3I_2^2 \frac{R_2}{S} : 3I_2^2 \frac{R_2}{S} (1-S) : 3I_2^2 R_2 \quad (٣ - ٤٢)$$

$$1 : 1-S : S$$

ويتضح أن المعامل S الانزلاق يلعب دوراً هاماً جداً في تحديد نسبة فقد النحاس في العضو الدائر والجزء الذي يحول إلى قدرة ميكانيكية ولذلك فإن معامل الانزلاق يجب أن يكون صغيراً لكي يكون معامل الكفاءة عال ولذلك تكون S صغيرة وتصل إلى ١٪ في المحركات الكبيرة في بعض الأحيان .

٣- ٦ عزم الدوران Torque

يتولد عزم الدوران الكلي " Total Torque " بواسطة المجال المغناطيسي الدوار بسبب القدرة الحمول لقدرة ميكانيكية ويعطى العزم من المعادلة

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m}{2\pi \frac{n}{60}} \quad N.m \quad (٣ - ٤٣)$$

Or

$$T = \frac{P_{12}}{\omega_s} = \frac{P_{12}}{2\pi \frac{n_s}{60}} \quad N.m \quad (٣ - ٤٤)$$

وبالتعويض عن القدرة P_{12} من المعادلة (٣ - ٣٨)

$$T = \frac{3E_1 I_2 \cos \phi_2}{2\pi \frac{n_s}{60}} \quad N.m \quad (٣ - ٤٥)$$

$$I_2^1 = \frac{E_1}{\sqrt{(R_2^1/s)^2 + (X_2^1)^2}} \quad (٣ - ٤٦)$$

$$\cos \phi = \frac{R_2/s}{\sqrt{(R_2^1/s)^2 + (X_2^1)^2}} \quad (٣ - ٤٧)$$

وبالتعويض من (٣ - ٤٦) ، (٣ - ٤٧) في المعادلة (٣ - ٤٥)

$$T = \frac{3E_1^2 \cdot R_2^1/s}{2\pi \frac{ns}{60} \left[\left(\frac{R_2^1}{s} \right)^2 + (X_2^1)^2 \right]} \quad N.m \quad (٣ - ٤٨)$$

$$\alpha = \frac{R_2^1}{X_2^1} \quad \text{وبفرض أن}$$

فإن المعادلة (٣ - ٤٨) يمكن إعادة كتابتها على الصورة

$$T = \frac{3E_1^2}{2\pi \frac{ns}{60} \cdot X_2^1} \times \frac{S \alpha}{S^2 + \alpha^2} \quad N.M \quad (٣ - ٤٩)$$

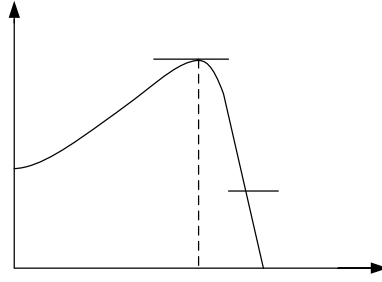
$$T = K_T \times \frac{S \alpha}{S^2 + \alpha^2} \quad (٣ - ٥٠)$$

حيث K_T ثابت يعطى من المعادلة

$$K_T = \frac{3E_1^2}{2\pi \frac{ns}{60} \cdot X_2^1} \quad (٣ - ٥١)$$

ويتضح من المعادلة مدى تأثير وتناسب العزم للمحرك مع معامل الانزلاق S وذلك باعتبار $V_1 \cong E_1$ وهو مقدار ثابت لثبوت الجهد الموصل عليه المحرك .

ويمكن رسم العلاقة التي تحدد العزم مع معامل الانزلاق ويمكن اعتبار أن K_T ، α ثابتان كما هو موضح بالشكل ٨.



شكل ٨

ويمكننا تغيير منحنى العزم وذلك باعتبار ∞ متغير حيث يتغير قيمة R_2^1

$$\infty = \frac{R_2^1}{X_2^1}$$

يمكن تغير العزم ويتم هذا التغير بإضافة مقاومات على التوالي في حالة المحركات ذات حلقات الانزلاق ولذلك يستخدم فقط مع المحركات ذات العضو الدائر الملفوف .

ولكي يمكن رسم منحنى عزم الدوران شكل ٨ لأي محرك يجب معرفة قيمتين للعزم هامتين وهما :

١ - عزم بدء الدوران T_{st} والتي عندها $S = 1$ وبالتعويض في المعادلة (٣ - ٥٠)

$$T_{st} = K_T \times \frac{\infty}{1 + \infty^2} \quad (٣ - ٥٢)$$

٢ - عزم الدوران الأقصى والسرعة التي يحدث عندها T_{max} . وللحصول على هذه القيمة نفاضل

معادلة العزم (٣ - ٥٠) بالنسبة للانزلاق وتساوى بالصفر

$$\frac{dT}{dS} = 0 = K_T \frac{(S^2 + \infty^2)\infty - \infty s 0.25}{(S^2 + \infty^2)^2} \quad (٣ - ٥١)$$

ومنها فإن القيمة العظمى للعزم تحدث عندها

$$S_m^2 = \infty^2 \quad (٣ - ٥٢)$$

$$\therefore S_m = \pm \infty \quad (٣ - ٥٣)$$

وبالتعويض في معادلة العزم (٣ - ٥٠) فإن

$$T_{\max} = K_T \frac{S_m \omega}{S_m^2 + \omega^2} = K_T \times \frac{\omega^2}{\omega^2 + \omega^2}$$

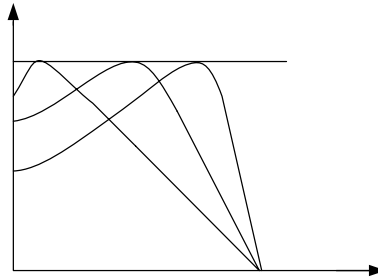
$$T_{\max} = K_T \times \frac{1}{2} \quad (3 - 54)$$

وتقسم قيمة العزم الأقصى إلى جزأين الجزء الأول من $n = n_s$ عند اللاحمل وحتى S_m ، T_m عند سرعة $(1 - S) n = n_s$ وهذا الجزء يسمى بمنطقة التشغيل المتزن للمحرك " Stable Operation " أما الجزء الثاني فهو من سرعة $n = n_s(1 - S)$ وهي سرعة الوقوف $S = 1$ ، $n = 0$ وتسمى هذه المنطقة منطقة التشغيل غير المتزن أو منطقة التشغيل غير المستقر . " Unstable Operation " .

وجرت العادة على أن يكون عزم الحمل الكامل عند التصميم في حدود نصف العزم الأقصى

$$T_{F.L} = \frac{1}{2} T_{\max}$$

ويجب أن يكون عزم الحمل الكامل أقل من عزم بدء الدوران حتى يستطيع المحرك أن يبدأ حركته والحمل محمل عليه ويمكن أيضاً التحكم في عزم البدء حسب الطلب حيث يتحكم فيه عن طريق تغيير المقاومة المضافة لملفات العضو الدائر الملفوف ويوضح شكل (3 - 9) تغير منحنى العزم مع تغيير R_2^1 .



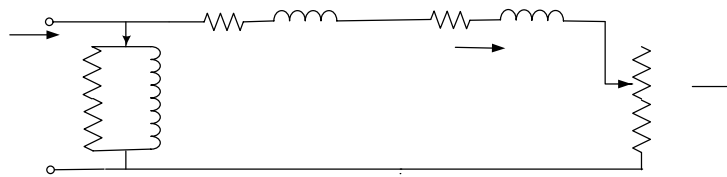
شكل (3 - 9)

ملحوظة :

بتغيير مقاومة ملفات العضو الدائر تتغير فيه $\propto$ وبالتالي عزم بدء الدوران وفيه السرعة التي يحدث عندها العزم الأقصى مع ثبوت قيمة العزم الأقصى دون تغيير وذلك لأن من المعادلة (٣ - ٥٤) نجد أن العزم الأقصى ثابت لا يتأثر بقيمة R_2^1 .

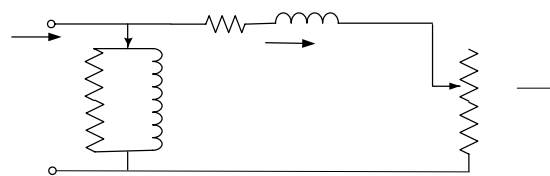
٣- ٧ الدائرة المكافئة للمحرك الثلاثي الأوجه :

سبق ووضحنا في شكل ٥ الدائرة المكافئة لكل وجه للمحرك الثلاثي الأوجه . ويمكن تبسيط هذه الدائرة بدائرة أخرى تقريبية وذلك بنقل الدائرة الممثلة للدائرة المغناطيسية إلى ناحية جهد الابتدائي V كما في شكل (٣ - ١٠) والذي يحتوي على دائرة مكافئة متصلة .



شكل (٣ - ١٠) الدائرة المكافئة التقريبية

ويمكن تبسيط هذه الدائرة أكثر كما في شكل (٣ - ١١)



شكل (٣ - ١١)

حيث

$$R_{eq} = R_1 + R_2^1$$

$$= R_1 + R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (٣ - ٥٥)$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2^1$$

$$= X_1 + X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (٣ - ٥٦)$$

ويمكن هذا التبسيط الوصول إلى دائرة مكافئة تقريبية تشبه إلى حد كبير تلك التي في المحول فيما عدا المقاومة $R_2^1 \frac{(1-s)}{s}$ والتي يمكن تشبيهها بالحمل وتكون القدرة المفقودة فيها هي القدرة الميكانيكية المتولدة .

٣ - ١- تعيين ثوابت الدائرة المكافئة من تجارب المحرك

كما سبق دراسته في المحولات الكهربائية يمكن تعيين ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية وذلك بإجراء تجارب على المحركات .

أ - تجربة اللاحمل No-load Test

بمراجعة الدائرة المكافئة التقريبية شكل (٣ - ١١) فإن معنى لاحمل يعني أن المقاومة على العضو الدائر = ما لا نهاية .

وهذا معناه أن $S = 0$ أو صغيرة جداً وهذا يحدث فقط عندما يدور المحرك عند سرعة = سرعة التزامن أو قريبة جداً منها التي يمكن أن تعتبر دائرة المحرك المكافئة دائرة مفتوحة عند هذه السرعة . ويوصل المحرك في هذه الحالة إلى منبع التشغيل العادي أو جهد المحرك المقنن ثم يوصل معه أجهزة لقياس الجهد - و التيار - و القدرة وتسمى هذه القراءات بقراءات اللاحمل عندما تكون السرعة هي سرعة التزامن أو قريبة جداً منها حيث إن القدرة باستخدام واتميتران تكون:

$$P_o = W_1 + W_2$$

ويمكن من نتائج هذه التجربة تحديد مكونات الدائرة المغناطيسية كما يلي مع مراعاة أن قيم الجهد والتيار للوجه .

$$P_o = 3V_o I_o \cos \phi_o \quad (٣ - ٥٧)$$

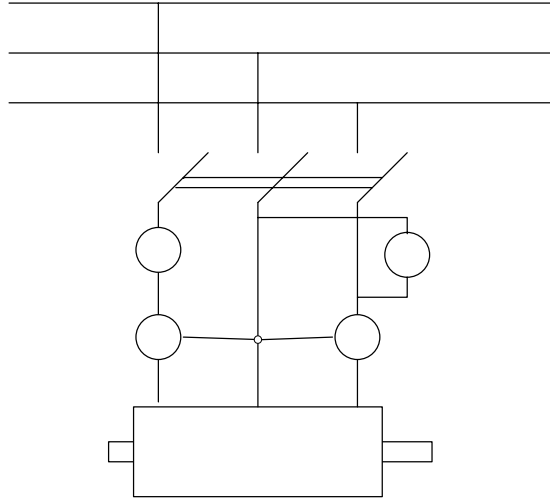
$$\therefore \cos \phi_o = \frac{P_o}{3V_o I_o} \quad (٣ - ٥٨)$$

$$I_\eta = I_o \cos \phi_o \quad (٣ - ٥٩)$$

$$I_m = I_o \sin \phi_o \quad (٣ - ٦٠)$$

$$\therefore R_o = \frac{V_o}{I_\mu} \quad (٣ - ٦١) \text{ ومنها}$$

$$X_o = \frac{V_o}{I_m} \quad (٣ - ٦٢)$$



شكل (٣ - ١٢)

ملحوظة :

يدار المحرك في هذه الحالة عند اللاحمل أي عند سرعة قريبة من سرعة التزامن أو تدار بآلة خارجية عند سرعة التزامن نفسها وفي هذه الحالة الأخيرة تكون القدرة هي قدرة المفاقيد الحديدية .
عند دوران المحرك عند اللاحمل فإن القدرة المقاسة تحتوي على مفاقيد نحاسية في ملفات العضو الثابت نتيجة لمرور تيار اللاحمل وجزء آخر كمفاقيد احتكاك ولكن هذه المفاقيد صغيرة يمكن إهمالها ونعتبر أن القدرة المقاسة تقريباً هي المفقودات الحديدية .

Short Circuit Test

ب - تجربة القصر

يسمى هذا الاختبار في بعض الأحيان باختبار العضو الدائر المسوك أو الممنوع من الحركة " Blocked Rotor Test " وذلك لأن بالنظر إلى الدائرة المكافئة التقريبية شكل (٣ - ١١) فإن القصر معناه أن المقاومة

$$R_2^1 \frac{(1-S)}{S} = 0$$

و هذا الشرط يتحقق عندما تكون $S = 1$ وهذا معناه الدائرة مقصورة في حالة ما يكون العضو الدائر في حالة سكون $n = 0$.

وعلى ذلك فإن تجربة القصر تجرى على المحرك وهو ممنوع من الحركة ويتم ذلك بربطه بفرملة ميكانيكية . وحيث أن المقاومة في دائرة العضو الدائر تساوي صفراً تقريباً . فإن توصيل المحرك على الجهد المقنن سوف يتسبب في مرور تيار كبير جداً قد يتلف الملفات للمحرك . ولذلك تستخدم جهداً منخفضاً - بحيث يراعى أن يكون تيار القصر مساوياً لتيار الحمل الكامل للمحرك . وتوصل الدائرة كما في شكل (٣ - ١٢) ومن قراءات هذه التجربة تحسب R_{eq} ، X_{eq} كما يلي حيث

$$P_{s.c} = 3I_{s.cph}^2 \cdot R_{eq} \quad (٣ - ٦٣)$$

وجميع القيم للوجه الواحد

$$\therefore R_{eq} = \frac{P_{s.c}}{3I_{s.cph}^2} \quad (٣ - ٦٤)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{s.c}}{I_{s.c}} \quad (٣ - ٦٥)$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}$$

$$\therefore X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (٣ - ٦٦)$$

وبذلك أمكن تحديد المعلومات أو بيانات أو مكونات الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك من تجربتي اللاحمل والقصر وكذلك أمكن تحديد قيمة كل من المفاقيد الثابتة والأخرى المتغيرة P_o ، $P_{s.c}$ والتي تحسب على أساسها كفاءة المحرك أو جودته حيث

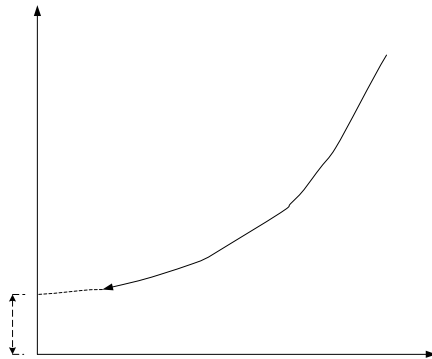
$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_2 + P_o + P_{s.c}} \times 100 \quad (٣ - ٦٧)$$

ويجب ملاحظة أن تكون المفاقيد المتغيرة محسوبة عند الحمل الذي تحسب عنده الكفاءة أو تضرب في مربع نسبة الحمل حيث تتناسب مع مربع التيار .

ج - تعيين مفاقيد الاحتكاك

تجرى تجربة اللاحمل العادي عند الجهد الكامل وتقاس القدرة الداخلة للمحرك والسرعة . ثم ينقص جهد المنبع وتكرر القياسات هكذا حتى نجد أن السرعة بدأت في الانخفاض نوقف القياس ونرسم العلاقة بين القدرة والجهد كما هو موضح بالشكل ثم نمذ المنحنى حتى تتقاطع مع الرأسي فيحدد قيمة القدرة المفقودة في الاحتكاك P_F وذلك عند جهد يساوي صفراً أي إنه لا وجود لمفاقيد حديدية ولا نحاسية .



٣- ٩ أمثلة محلولة :

مثال ١ :

محرك تأثيري (حثي) ٦٠ C /S أربعة أقطاب سرعته عند الحمل الكامل ١٧٤٠ r.p.m
احسب سرعة الانزلاق ومعامل الانزلاق عند الحمل الكامل.

الحل :

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 60}{2} = 1800 \quad rpm$$

$$n = 1740 \quad rpm$$

سرعة الانزلاق

$$\Delta n = n_s - n$$

$$= 1800 - 1740 = 60 \quad rpm$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{60}{1800} = 0.033$$

$$= 3.3\%$$

مثال ٢

محرك تأثيري ٦ أقطاب تردده ٥٠ C/S القوة الدافعة الكهربائية في العضو الدائر لها تردد ٢,٥ C/S احسب معامل الانزلاق وكذلك سرعة العضو الدوار .

$$S = \frac{f_2}{f_1} = \frac{2.5}{50} = 0.05 \quad \text{الحل :}$$

$$n = n_s(1 - S)$$

$$n_s = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \quad rpm$$

$$n = 1000 \times (1 - 0.05)$$

$$= 950 \quad rpm$$

مثال ٣

محرك تأثيري ثلاثي الوجه ٦ أقطاب ٧٤٤٠ V ، ٥٠ c/s القدرة الداخلة إلى العضو الدائر ٨٠ Kw تردد العضو الدائر ١٠٠ c/m (ذبذبة/دقيقة) احسب :

أ - الانزلاق ب - سرعة لعضو الدائر

ج - القدرة الميكانيكية المتولدة د - القدرة المفقودة في ملفات العضو الدائر (المفاقد النحاسية)

هـ - مقاومة ملفات العضو الدائر لكل وجه إذا كان تيار العضو الدائر ٦٥ أمبير .

الحل :

$$S = \frac{f_2}{f_1} = \frac{100}{60 \times 50} = 0.033$$

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \quad rpm$$

$$n = n_s(1 - S)$$

$$= 1000 \times (1 - 0.033) = 967 \quad rpm$$

$$P_{cu2} = sP_{12} = 0.033 \times 80$$

$$= 2.67 \quad Kw$$

$$P_m = 80 - 2.67 = 77.33 \quad Kw$$

$$P_{cu2} = 3I_2^2 R_2$$

$$\therefore R_2 = \frac{P_{cu2}}{3I_2^2} = \frac{2.67 \times 10^3}{3 \times (65)^2} \cong 0.2 \quad \Omega$$

مثال ٤

محرك تأثيري ثلاثي الأوجه ذو سرعة تزامن ١٠٠٠ r.p.m يعطي قدرة ميكانيكية مقدارها hp٥

(حصان) عند سرعة ٩٣٥ r.p.m

احسب قدرة المدخل لهذا المحرك إذا كانت مفقودات العضو الثابت ٤٠٠ W .

الحل :

$$P_m = 5 \times 746 = 3730 \quad W$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 935}{1000} = 0.065$$

$$P_m = P_{12}(1 - S)$$

$$\begin{aligned} \therefore P_{12} &= \frac{P_m}{1 - S} = \frac{3730}{1 - 0.065} = \frac{3730}{0.935} \\ &= 3990 \quad W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore P_1 &= P_{12} + P_{st} \\ &= 3990 + 400 = 4390W \\ \eta &= \frac{P_m}{P_1} = \frac{3730}{4390} = 0.85 \end{aligned}$$

مثال ٥ :

محرك تأثيري ثلاثي الأوجه يعمل على جهد ٧٥٠٠ وتردد ٥٠ C/S وله ٦ أقطاب يعطي قدرة ميكانيكية فرملية ٢٠ hp عند سرعة ٩٥٠ r.p.m وعندما يكون معامل القدرة ٠,٨٦ والمفقودات الميكانيكية ١ hp

احسب عند الحمل الكامل :

- أ - معامل الانزلاق
ب - مفقودات النحاس في العضو الدائر
ج - قدرة المدخل للمحرك علماً بأن المفقودات في العضو الثابت هي ١٥٠٠ W
د - تيار الخط الداخل للمحرك .

الحل :

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \quad rpm$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{50}{1000} = 0.05$$

$$P_2 = 20 \times 746 = 14920 \quad W$$

$$P_m = P_2 + P_f = 21 \times 746 = 15666 \quad W$$

$$P_{12} = \frac{P_m}{1-s} = \frac{15666}{0.95} = 16500 \quad W$$

$$\begin{aligned} \therefore P_1 &= P_{12} + P_{st} \\ &= 16500 + 1500 = 18000 \quad W \end{aligned}$$

$$P_{cu2} = sP_{12} = 0.05 \times 16500 = 825 \quad W$$

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}VI \cos \phi \\ \therefore I &= \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \phi} = \frac{18000}{\sqrt{3} \times 500 \times 0.86} = 24.15 \quad A \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{14920}{18000} = 0.83$$

مثال ٦ :

قدرة المدخل لمحرك تأثيري ثلاثي الأوجه هي Kw٤٠ عندما يكون دائر بسرعة ٩٧٥ r.p.m وينبع على منبع جهده ٥٠٠ V وتردد ٥٠ c/s فإذا كان المحرك له ٦ أقطاب ومفقودات العضو الثابت ١ Kw والمفقودات الميكانيكية ٢ Kw احسب عند الحمل الكامل

- أ - معامل الانزلاق ب - القدرة الميكانيكية بالحصان الفرمل
ج - مفقودات النحاس في العضو الدائر د - معامل الكفاءة (الجودة) للمحرك

الحل

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \quad rpm$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 975}{1000} = 0.025 \quad 2.5\% \quad \text{أ -}$$

$$\begin{aligned} P_{12} &= P_1 - P_{st} \\ &= 40 - 1 = 39 \quad Kw \end{aligned}$$

$$P_{cu2} = sP_{12} = 0.025 \times 39 = 0.975 \quad \text{ج -}$$

$$P_m = P_{12} - P_{cu2}$$

$$= 39 - 0.975 = 38.025 \quad Kw$$

$$P_2 = P_m - P_f$$

$$= 38.025 - 2 = 36.025$$

$$P_2 (hp) = \frac{36025}{746} \cong 50 \quad hp \quad \text{ب - بالحصان}$$

$$\eta = \frac{36.025}{40} = 0.90 \quad 90\% \quad \text{د -}$$

مثال ٧:

محرك تأثيري ثلاثي المراحل موصل نجمة له ٢٤ pole يعمل على منبع جهده ٧٣٠٠٠ وتردده ٥٠ c/s. العضو الدائر الملفوف مقاومة مادية ٠,٠١٦ أوم وممانعة حثية في حالة السكون ٠,٢٦٥ أوم لكل وجه. يحصل من هذا المحرك على عزم دوران الحمل الكامل عندما يكون دائر بسرعة ٢٤٧ r.p.m. احسب النسبة بين النهاية العظمى لعزم الدوران و عزم دوران الحمل الكامل وكذلك السرعة التي يحدث عندها العزم الأقصى T_{max} .

الحل :

$$2P = 24 \quad Poles \quad f = 50 \quad c/s$$

$$R_2 = 0.016 \quad \Omega \quad X_2 = 0.265 \quad \Omega \quad n = 247$$

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{12} = 250 \quad rpm$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{250 - 247}{250} = 0.012$$

$$S_{f.l} = 1.2\%$$

$$T_{f.l} = K_T \frac{\infty S_{f.l}}{\infty^2 + S_{f.l}^2}$$

$$T_{max} = K_T \cdot \frac{1}{2}$$

$$\frac{T_{\max}}{T_{f.l}} = \frac{K_T \cdot \frac{1}{2}}{K_T \cdot \frac{\omega S_{f.l}}{\omega^2 + S_{f.l}^2}} = \frac{\omega^2 + S_{f.l}^2}{2 \omega S_{f.l}}$$

$$\omega = \frac{R_2}{X_2} = \frac{0.016}{0.265} = 0.06$$

$$= \frac{(0.06)^2 + (0.012)^2}{2 \times 0.06 \times 0.012} \cong 2.5$$

$$\begin{aligned} n_m &= n_s (1 - S_m) \quad \text{السرعة عند العزم الأقصى} \\ &= 250 \times (1 - 0.06) \\ &= 235 \quad rpm \end{aligned}$$

ما هي قيمة المقاومة الخارجية اللازم توصيلها للحصول على أعلى عزم في البداية ؟

$$\begin{aligned} \omega = 1 &= S_{\max} \\ \therefore \frac{R_2 + R_{ext}}{X_2} &= 1 & R_2 + R_{ext} &= X_2 \\ R_{ext} &= X_2 - R_2 \\ &= 0.265 - 0.016 \\ &= 0.249 \end{aligned}$$

مثال ٨ :

محرك تأثيري ثلاثي الأوجه ثمانية أقطاب ٦٠٠ hp ، ٥٠ c/s اختبر فأعطى النتائج الآتية :

اللاحمل : W_{20000} ، A_{14} ، V_{6000}

القصر : W_{30500} ، A_{70} ، V_{1000}

مقاومة العضو الثابت $R_1 = R_2^1$ ونسبة التحويل $\frac{N_1}{N_2} = 4$. احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا

المحرك إذا كانت $X_1 = X_{20}^1$ والمحرك موصل دلتا .

الحل :

$$P_o = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \phi_o \quad \text{تجربة اللاحمل}$$

$$\therefore \cos \phi_o = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 6000 \times 14} = 0.138$$

$$\therefore \phi_o = 82.07 \quad \therefore \sin \phi_o = 0.99$$

$$I_\mu = I_o \cos \phi_o = \frac{14}{\sqrt{3}} \times 0.138 = 1.12 \text{ Amp}$$

$$I_m = I_o \sin \phi_o = \frac{14}{\sqrt{3}} \times 0.99 = 8 \text{ Amp}$$

$$R_o = \frac{V}{I_\mu} = \frac{6000}{1.12} = 5357 \quad \Omega$$

$$X_o = \frac{V}{I_m} = \frac{6000}{8} = 750 \quad \Omega$$

$$Z = \frac{V}{I_2} = \frac{1000}{\frac{70}{\sqrt{3}}} = 24.7 \quad \Omega \quad \text{تجربة القصر}$$

$$R_{eq} = \frac{30500}{3 \times \left(\frac{70}{\sqrt{3}} \right)^2} = 6.22 \quad \Omega$$

$$\therefore X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{(24.7)^2 - (6.22)^2} = 23.94 \quad \Omega$$

$$\therefore R_1 = R_2^1 = \frac{R_{eq}}{2} = 3.11 \quad \Omega$$

$$X_1 = X_2^1 = \frac{X_{eq}}{2} = \frac{23.94}{2} = 11.97 \quad \Omega$$

$$X_2 = \frac{X_2^1}{a^2} = \frac{11.97}{(4)^2} = 0.748 \quad \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_2^1}{a^2} = \frac{3.11}{(4)^2} = 0.194 \quad \Omega$$

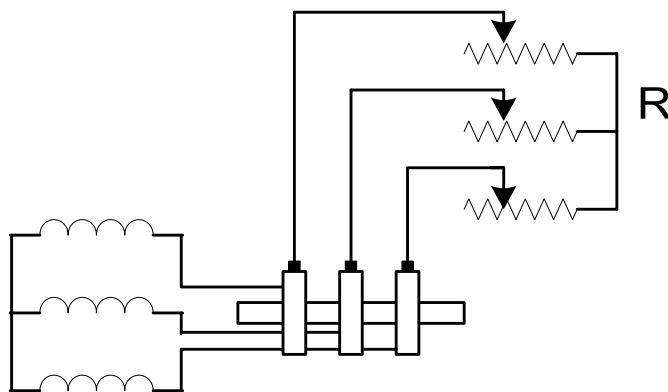
٣- ١٠ طرق بدء حركة المحركات التأثيرية :

اتضح من الدراسة السابقة أن تيار البدء يتناسب طردياً مع الجهد وعكسياً مع المعاوقة للدائرة المكافئة للمحرك الذي سبق بيانها . وعندما يوصل المحرك مباشرة بالمنبع يسحب تيار هو تيار القصر عند البدء وقيمة هذا التيار كبيرة عدة مرات تيار الحمل الكامل للمحرك ويعتبر المحرك في حالة القصر حيث إن $S = 1$ وعلى ذلك فإن $Z_2 = R_2 + jX_2$ ولذلك لابد من طريقة تستخدم عند بدء تشغيل المحرك لتقليل هذا التيار ونذكر منها الطرق الآتية :

المحركات ذات العضو الدائر الملفوف باستخدام مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الدائر يحد استخدام هذه المقاومة من تيار بدء التشغيل لكل وجه إلى قيمة تتوقف على قيمة المقاومة التي توصل على التوالي مع ملفات كل وجه شكل (٣ - ١٣) . وتقلل التيار وفقاً للمعادلة الآتية

$$I_{st} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2^1 + R_{st})^2 + (X_1 + X_2^1)^2}} \quad (٣ - ٦٨)$$

وبزيادة المقاومة في العضو الدائر فإن العزم يزيد نظراً لأن



شكل (٣ - ١٣)

$$\propto = \frac{R_2 + R_{st}}{X_{20}} \quad (٣ - ٦٩)$$

وبزيادة ∞ معناها زيادة عزم الدوران عند البدء ويمكن الحصول على عزم الدوران الأعظم عند البدء إذا تحقق شرط

$$S_m = 1 = \infty = \frac{R_2^1 + R_{st}}{X_{20}^1} \quad (٣ - ٧٠)$$

أي إذا كانت المقاومة المضافة تعطى بالمعادلة

$$R_{st} = X_2^1 - R_2^1 \quad (٣ - ٧١)$$

والتي عندها $S_m = 1 = \infty$

والسبب في زيادة العزم في هذه الحالة رغم نقصان التيار هو زيادة معامل القدرة عند بدء التشغيل . وبعد أن تصل سرعة المحرك إلى قرب سرعته المعتادة تفصل هذه المقاومة لبدء الحركة تدريجياً إلى أن تخرج كاملة من الدائرة لأن وجودها يسبب زيادة المفاوיד عند التحميل ونقصان الجودة أو الكفاءة بدون داعي .

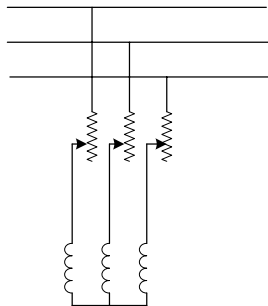
طرق بدء حركة المحرك ذي القفص السنجابي (أو العضو الملفوف) :

ويتم بدأ الحركة لمحركات القفص السنجابي (أو العضو الدائر الملفوف) بإحدى الطرق الآتية :

١ - وضع مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الثابت

توضع مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الثابت بحيث يمكن خفض قيمة الجهد الموصل إلى الملفات ، ويلاحظ وجود مفاوיד في مقاومة البدء في هذه الحالة مما يجعل هذه الطريقة غير مناسبة للاستخدام .

ويوضح شكل ١٤ توضيح هذه الطريقة



شكل (٣ - ١٤)

٢ - استخدام المحول الذاتي Auto Transformer

يوصل المحرك عند البدء إلى محول أوتو (ذاتي) ثلاثي الوجه ويصل إلى ملفات العضو الثابت جزء من جهد المنبع الكلي يتناسب مع التيار المسموح بمروره عند البدء . وبعد أن يصل المحرك إلى السرعة المطلوبة يغير وضع المفتاح إلى التشغيل العادي على المنبع مباشرة وبذلك يتم فصل المحول الذاتي تماماً وذلك لتوفير تشغيله للبدء فقط.

٣ - استخدام مفتاح التحويل نجمة / دلتا Star/ Delta Switch

تستخدم هذه الطريقة مع المحركات التي على توصيلة دلتا في حالة التشغيل العادي ونتيجة للتوصيل نجمة ينخفض الجهد إلى $\frac{1}{\sqrt{3}}$ وينخفض تيار الخط إلى $\frac{1}{3}$ التيار الذي يمر في حالة الدلتا وبعد أن تصل السرعة إلى السرعة العادية يفصل من توصيله النجمة ويوصل دلتا .

٣- ١١ طرق التحكم في سرعة المحرك التأثيري :

يوصف المحرك التأثيري ثلاثي الأوجه بأنه يدور بسرعة ثابتة تقريباً ، فسرعة المحرك في حالة اللاحمل تختلف اختلافاً طفيفاً جداً من سرعة التزامن كما سبق أن بينا تنخفض السرعة انخفاضاً صغيراً عند التحميل وهذا النقص يتناسب مع معامل الانزلاق وذلك من مميزات هذا النوع من المحركات أما التحكم في السرعة فقد وجد بعض الطرق للتحكم فيها ومن أهمها :

٣- ١١- ١ استخدام مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الدائر

الملفوف :

تستخدم هذه الطريقة بطبيعة الحال مع المحركات ذات حلقات الانزلاق حيث توضع مقاومة متغيرة على التوالي مع ملفات العضو الدائر ، بتغير قيمتها فيمكن تغيير سرعة المحرك . باعتبار أن قدرة المدخل للشغرة الهوائية P_{12} وبالتالي قدرة المدخل للمحرك ثابتة على وجه التقريب . فإذا تغيرت مقاومة العضو الدائر فإن P_{cu2} تتغير مما ينشأ عنه تغيير في النسبة $\frac{S}{1-S}$ أو بمعنى أصح في معامل الانزلاق مما ينشأ عنه تغيير في السرعة .

وتستخدم هذه الطريقة في حالة تنظيم السرعة في حدود ١٠ % - ١٥ % من السرعة المقننة فقط وذلك لأن استخدام مقاومة مع ملفات العضو الدائر تبديد جزءاً من الطاقة الكهربائية الداخلة للمحرك في صورة مفايد نحاسية .

٣- ١١- ٢ تغير السرعة في المحركات ذات القفص السنجابي :

أ - بتخفيض جهد المنبع :

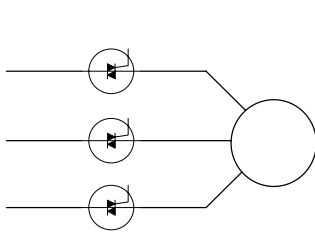
ويتم ذلك باستخدام عدة وسائل منها :

بتوصيل مقاومة متغيرة بالتوالي مع المنبع .

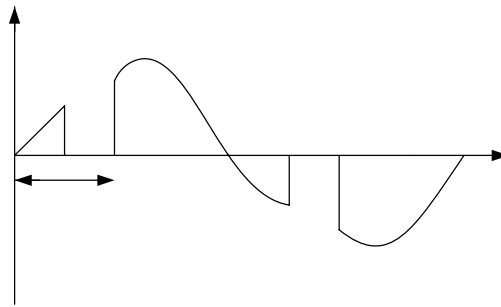
بتوصيل ممانعة متغيرة بالتوالي مع المنبع كما هو الحال في مفتاح تشغيل المراوح الكهربائية .

بتوصيل محول ذاتي بالتوالي مع المنبع .

باستخدام الجوامد (الترياك أو الثايرستور) .



شكل B



شكل C

واستخدام الترياك أصبح شائع الاستعمال لخص تكاليفه وخفة وزنه وقلة المفايد الكهربائية .

ومن عيوبه توليد التوافقيات في التيار والجهد (Harmonics) وهذا يؤدي إلى توليد العزم المتردد وبعض المفايد الكهربائية ، والعزم المتردد يسبب بعض الاهتزازات والضوضاء ، وبالرغم من ذلك مزايا الترياك أكثر من عيوبه .

وطريقة تخفيض جهد المنبع عموماً تستخدم في الأحمال الخفيفة والتي لا تحتاج لعزم بدء مرتفع مثل المراوح الكهربائية ، ومنحنى العزم مع السرعة عند جهد منبع مختلف مبين في شكل A .

ب - بتغيير عدد الأقطاب

بمراجعة المعادلة

$$n_s = \frac{60f}{P}$$

حيث أن n_s السرعة المتزامنة - f الترددذبذبة/ثانية - P عدد أزواج الأقطاب .

ويمكن تغيير السرعة للعضو الدائر $n \cong n_s$ عن طريق تغيير التردد أو تغيير عدد الأقطاب .
في حالة تغيير عدد الأقطاب ويتم ذلك عن طريق تغيير طريقة توصيل الملفات من عدد معين من الأقطاب إلى النصف أو الضعف ويطلق على هذا الأسلوب أو الطريقة في تغيير التوصيلات اسم (توصيلات دالندر)

"Dahlander Connection"

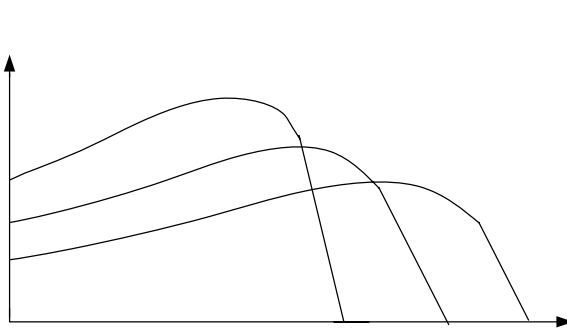
ويوضح الشكل طريقة تغيير عدد الأقطاب مرة ثمانية أقطاب ومرة أخرى أربعة أقطاب . وهذا معناه أن السرعة تتغير إلى حالتين فقط .

ج - بتغيير التردد

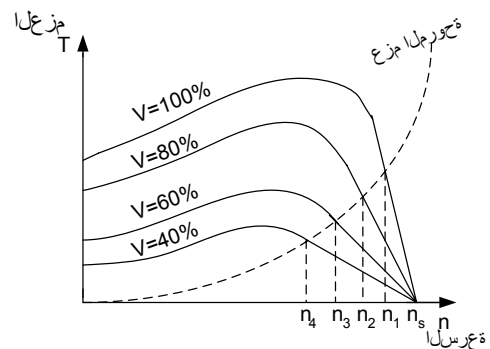
في حالة تغيير التردد فإنه كان يستخدم مولد خاص ذو تردد يمكن التحكم فيه ويتغير التردد فيمكن الحصول على سرعات مختلفة . ولكن حالياً تستخدم الجوامد مثل موحد وعاكس (Converter Inverter)، الموحد يحول التيار المتردد إلى مستمر وجهد مختلف والعاكس يحول

التيار المستمر إلى متردد بتردد مختلف وذلك بالتحكم في زمن الدورة T حيث التردد $f = \frac{1}{T}$ وهذه الطريقة يمكن بها التحكم في الجهد والتردد معاً وهذا يساعد على تثبيت النسبة $\frac{V}{f}$ ثابتة للمحافظة على عزم ثابت .

وعلاقة العزم والسرعة في حالة تغير التردد موضحة بالشكل D حيث تتغير موضع n_s .



شكل د تغير السرعة مع التردد



شكل ج تغير السرعة مع الجهد

كلما زاد التردد زادت السرعة .

٣- ١٢ تشغيل المحرك الثلاثي الأوجه على تردد يختلف عن تردده الأصلي:

إن الترددین الشائع استخدامهما في العالم في التيار المتغير هما ٥٠ ذبذبة/ثانية، ٦٠ ذبذبة/ثانية. وقد يلزم اتخاذ بعض الإجراءات عند استخدام آلة على تردد مختلف.

بالنسبة للمحركات التي تصمم على ٦٠ ذبذبة وتستخدم على تردد ٥٠ ذبذبة فهي الحالة الأبسط

$$E_1 = 4.44 f_1 \phi_m N_1 \quad \text{حيث إن}$$

فإذا اعتبرنا أن جهد المنبع $E_1 = V_1$ فإن استخدام ٥٠ ذبذبة بدلاً من ٦٠ ذبذبة يلزم تخفيض الجهد بنفس النسبة أي استخدام ١٠٠ فولت بدلاً من ١١٥ فولت للتأكد من سلامة المحرك . ويمكن أن يتم ذلك عن طريق استخدام محول أوتو (محول ذاتي) معد خصيصاً لهذا الغرض .

في حالة تشغيل محرك مصمم على ٥٠ ذبذبة على تردد ٦٠ ذبذبة حيث تزيد قدرة المدخل للمحرك ويزداد معامل القدرة وتؤدي عمومًا إلى نقص في قيمة كثافة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية ويسحب تيار أكبر بناءً على ذلك .

وكذلك نتيجة لزيادة السرعة من $n_s = \frac{60 \times 50}{P}$ إلى $\frac{60 \times 60}{P}$ فإن هذا يعادل عن طريق زيادة

$$T = \frac{P}{\omega}$$

القدرة بزيادة جهد المنبع وذلك للمحافظة على العزم أو الحمل الثابت حيث ω .

الآلات الكهربائية

الآلات التزامنية



الوحدة الرابعة : الآلات التزامنية Synchronous Machines

٤ - ١ المقدمة والتركيب :

يتم توليد معظم الطاقة الكهربائية المستخدمة في الحياة العملية عن طريق المولدات المتزامنة الثلاثية الوجه ولذلك سوف نركز في هذه الوحدة عليها . أما المولدات الأحادية الوجه فتستخدم في حالات خاصة . ومن البديهي أن تدور هذه الآلة بسرعة ثابتة وهي سرعة التزامن أو التوافق Synchronous Speed وتتوقف هذه السرعة على الآلة المحركة للمولد ولكن لا بد أن تكون ثابتة حتى نحصل على قوة دافعة كهربية ذات تردد ثابت حيث يرتبط التردد والسرعة وعدد الأقطاب بالعلاقة

$$f = \frac{pn_s}{60} \quad (٤ - ١)$$

حيث n_s هي سرعة التزامن لفة/دقيقة

P عدد أزواج الأقطاب

f هو التردد ذبذبة /ثانية

فمثلاً للحصول على تردد ٥٠ ذبذبة/ثانية . فإن السرعة يجب أن تكون ٣٠٠٠ ، ١٥٠٠ ، ١٠٠٠ لعدد الأقطاب ٢ ، ٤ ، ٦ على الترتيب .

وتختلف السرعة وفقاً لنوع الآلة المديرة فمثلاً في المحطات المائية تكون السرعة منخفضة وتستخدم السرعات العالية في حالة المحطات البخارية أو الغازية وعموماً فإن المهم هو ثبوت السرعة حتى نحصل على تردد ثابت على الدوام . وفي الآلات المتزامنة يمثل المنتج العضو الثابت للآلة عادة (Stator) على عكس ما هو مألوف في آلات التيار المستمر حيث يكون المنتج هو العضو الدائر . ويحتوي المنتج على عدد معين من المجاري (S) وهي التي ترتب فيها الملفات الكلية للآلة N_t وتعطى من

$$N_t = \frac{Z}{2} \quad (٤ - ٢)$$

حيث Z هي عدد الموصلات الكلية على المنتج

وإذا فرضنا أن عدد الملفات C فإن :

$$C = \frac{N_t}{N} = \frac{Z}{2N} \quad (٤ - ٣)$$

حيث N عدد لفات الملف الواحد

ويمكن أن تكون الملفات أحادية الطبقة أي يوجد بكل مجرى جانب ملف أو تكون مزدوجة الطبقة أي تحتوي كل مجرى على جانبين ملفين مختلفين .

أما الأقطاب فعادة تكون على العضو الدائر في الآلات المتزامنة وهي أحد نوعين :

١ - أقطاب بارزة : Salient Pole

وتكون فيها الثغرة الهوائية بين العضو الثابت والدائر غير منتظمة وتشبه أقطاب آلة التيار المستمر .

٢ - أقطاب غير بارزة (أسطوانية) : Non Salient Pole

وتكون فيها الثغرة الهوائية ثابتة وشكل العضو الدائر أسطواني كما في حالة المحرك الاستتاجي .
ويختلف النوعان من حيث المنتجات والخواص والممانعة المغناطيسية للثغرة الهوائية وكذلك طريقة حساب التنظيم في الجهد لكل نوع .

٤ - ٢ ملفات المنتج في آلات التيار المتغير :

تتكون ملفات المنتج من ملفات ثلاثية الأوجه (المراحل) (٣ Phase) لذلك فإن المجاري تنقسم إلى ثلاثة أجزاء بحيث يخص كل وجه نفس العدد من المجاري وبالتالي من الملفات تحت كل قطب من أقطاب الآلة البالغ عددها " 2P " فإذا رمزنا لعدد المجاري لكل وجه تحت كل قطب بالرمز q فإن

$$q = \frac{S}{3 \times 2P} \quad (٤ - ٤)$$

وكذلك عدد لفات كل وجه T_{ph} تعطي

$$T_{ph} = \frac{Z}{2 \times 3} = \frac{N_t}{3} \quad (٤ - ٥)$$

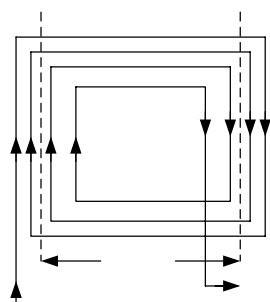
ومن واقع التوزيع الفراغي لكثافة الخطوط المغناطيسية عبارة عن منحني جيبي على مدى الخطوة القطبية بحيث تكون قيمة الكثافة في نهايتها العظمى عند منتصف القطب وصفرًا عند خط التعادل بين كل قطبين . وبناء على ذلك فإن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في جوانب الملفات تختلف عن بعضها مرحلياً على موقعها في المجاري .

ويجب أن تكون المسافة بين بداية ونهاية الملف نفسه هي خطوة قطبية أي ١٨٠ درجة كهربية بقدر الإمكان . كما يجب أن تكون الزاوية بين الأوجه ١٢٠ درجة كهربية .

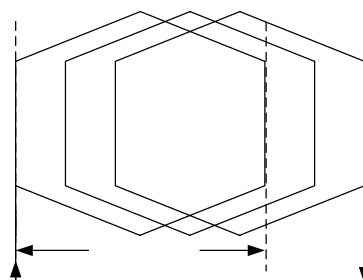
ويمكن تقسيم الملف إلى نوعين أساسيين من أنواع الملفات وهما :

أ - الملفات المتمركزة : Concentric Coils

تكون الملفات في هذه الحالة مستطيلة الشكل ويكون اتساع الملفات مختلف بالنسبة لملفات المجموعة الواحدة بشرط أن يكون الاتساع بالنسبة للمجموعة بأكملها هو الاتساع المطلوب أي خطوة قطبية كاملة كما في الشكل (٤ - ١)



شكل (٤-١) لف متمركز



شكل (٤-٢) لف شبكي

ب - الملفات الشبكية :

وهذه الملفات تشبه ملفات آلة التيار المستمر وتكون الملفات ذات اتساع واحد وممتاثلة في الشكل كما في شكل ٢ .

ثم توصل بعد ذلك الملفات مع بعضها بطريقة ما بحيث تتصل ملفات كل وجه على التوالي مع بعضها بحيث تتفق مع أقطاب الآلة . ثم توصل الأوجه مع بعضها بطريقة دلتا (Δ) أو النجمة (γ) كآلة ثلاثية الوجه . مع ملاحظة أن طريقة توزيع الملفات تؤثر في قيمة القوة الدافعة الكهربائية المستنتجة في ملفات المولد . وفي بعض الحالات قد تتفصل ملفات كل وجه في أكثر من دائرة واحدة أو في عدد من دوائر التوازي يتوقف على قيمة التيار لكل وجه يكون المسار الواحد I_c .

$$I_c = \frac{I_a}{2a}$$

حيث $2a$ عدد دوائر التوازي لكل وجه . مع ملاحظة أن تكون القوة الدافعة الكهربائية المستنتجة لكل وجه متساوية تماماً .

مثال : منتج مولد تيار متغير يحتوي على ٢٤ مجرى أربعة أقطاب فإذا لف هذا العضو لفاً متمركزاً Concentric Winding ثلاثة أوجه .

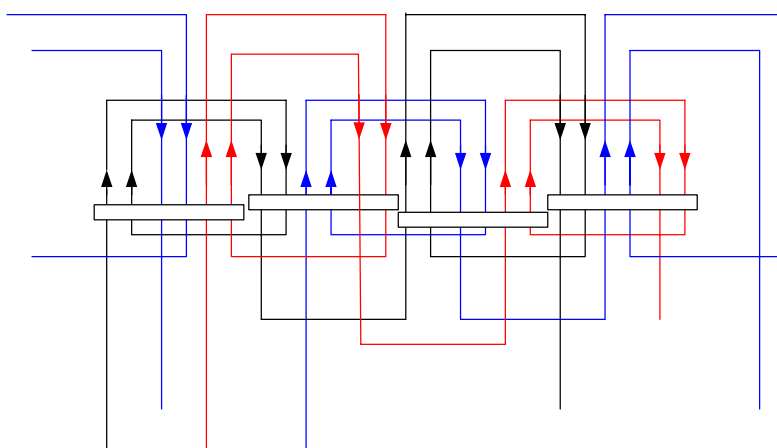
أوجد شكل اللف وطريقة توصيل الملفات .

$$y = \frac{s}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$q = \frac{s}{3 \times 2P} = \frac{24}{3 \times 4} = 2$$

الحل
Pole pito

أي إنه يخص كل وجه تحت كل قطب مجريين أو جانبي ملف فقط . وحيث أن الملف مركزي فإن الوجه الأول يخص المجري ١، ٢، ٧، ٨، ١٣، ١٤، ١٩، ٢٠ ويوضح شكل (٤-٣) تنظيم اللف وطريقة التوصيل الملفات بحيث تكون لفات كل وجه متصلة على التوالي .



شكل (٤ - ٣) طريقة اللف

٤ - ٣ القوة الدافعة الكهربائية في ملفات آلات التيار المتغير :

بافتراض أن منحني كثافة خطوط الفيض المغناطيسية لكل قطب على مدى الخطوة القطبية ذا شكل جيبي فإن القوة الدافعة الكهربائية الناتجة عن كل موصل تتغير على منحني جيبي مع الزمن وذلك بسبب الحركة النسبية بين هذه الموصلات والمجال المغناطيسي وتكون القوة الدافعة الكهربائية لكل موصل كما سبق شرحه في آلات التيار المستمر هي

$$e_c = 22.2P \frac{n}{60} \phi \quad (٤ - ٦)$$

$$f = \frac{pn}{60} \quad \text{حيث إن} \quad (٤ - ٧)$$

$$e_c = 4.44 f \phi \quad \text{Volt / turn}$$

وحيث أن الموصلات موزعة على مجاري عضو الاستنتاج فإن القوة الدافعة الكهربائية لكل وجه ليست على استقامة واحدة ولذلك لا تستطيع الحصول على القوة الدافعة الكهربائية للوجه بالضرب في عدد اللفات في المعادلة (٤ - ٦) إلا إذا استخدمنا عامل تصحيح تتوقف قيمته على طريقة اللف ويطلق عليه اسم معامل اللف (Winding Factor) ويرمز له بالرمز K_w وقيمتها دائماً أقل من الواحد وعلى ذلك تكون معادلة القوة الدافعة الكهربائية

$$E_{ph} = 4.44 f \phi \text{ Volt / turn} \quad (٤ - ٨)$$

وينقسم معامل اللف إلى جزأين أساسيين:

معامل التوزيع K_d وهذا المعامل ينتج لتوزيع موصلات الوجه تحت القطب في أكثر من مجرى ويعطى من المعادلة

$$K_d = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin(\alpha/2)} \quad (٩ - ٤)$$

حيث q عدد المجاري لكل وجه تحت كل قطب
 S عدد المجاري

α زاوية المجرى وتحسب من القانون

$$\alpha = \frac{2p \times 180}{S}$$

معامل التقصير K_c وهذا المعامل ينتج عندما تكون خطوة اللف ليست عدداً صحيحاً من المجاري أي كسر فتكون خطوة اللف أقل من أو أكثر من ١٨٠ درجة كهربية وينتج عن هذا تغير في القوة الدافعة الكهربائية بمقدار المعامل K_c ويعطى من المعادلة

$$K_c = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (١٠ - ٤)$$

حيث θ هي زاوية التقصير أي الفرق بين الخطوة الفعلية لل ملف والخطوة القطبية له . ويكون معامل التقصير $K_c = 1$ في حالة الخطوة القطبية = خطوة اللف .

ويكون معامل اللف K_w يعطى من المعادلة

$$K_w = K_c \cdot K_d \quad (١١ - ٤)$$

مثال ١

مولد ثلاثي الوجه من النوع التوافقي له ١٦ قطب ، ١٤٤ مجرى وكل مجرى به ١٠ موصلات . الفيض المغناطيسي هو ٠,٠٣ ويبر وموزع على شكل منحنى جيبي ويدور المولد بسرعة ٣٧٥ لفة/دقيقة . احسب جهد الوجه المتولد e.m.f وجهد الخط لهذا المولد إذا كان المولد عضواً استنتاجه موصل نجمة . ارسم شكلاً كروكياً لل ف عضو الاستنتاج .

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{8 \times 375}{60} = 50 \quad C/S$$

$$q = \frac{144}{16 \times 3} = 3$$

مجرى لكل وجه تحت كل قطب

$$\infty = \frac{360P}{S} = \frac{360 \times 8}{144} = 20^\circ$$

درجة كهربية لكل مجرى

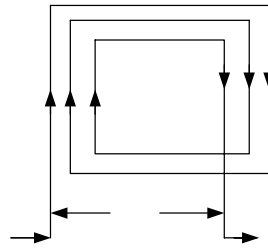
$$\therefore K_d = \frac{\sin \frac{q}{2}}{q \sin \frac{\infty}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \sin \frac{20^\circ}{2}}$$

$$\therefore K_d = \frac{\sin 30^\circ}{3 \sin 10^\circ} = 0.96$$

أي إن

$$y = \frac{144}{2P} = \frac{144}{16} = 9$$

١ - ١٠ خطوة اللف



$$K_c = 1.0$$

$$\cos 0 = 1$$

$$\therefore K_w = K_c K_d = 0.96 = K_d$$

عدد لفات كل وجه باعتبار أن كل الموصلات للوجه متصلة على التوالي

$$T_{ph} = \frac{Z}{2 \times 3} \quad \text{حيث } Z \text{ عدد الموصلات الكلية بالمنتج}$$

$$Z = S \times Z_{slot} = 144 \times 10 = 1440$$

$$T_{ph} = \frac{1440}{2 \times 3} = 240 \text{ turn} \quad (\text{لفه})$$

$$E_{ph} = 4.44 F \phi T_{ph} K_w$$

$$= 4.44 \times 50 \times 0.03 \times 240 \times 0.96$$

$$E_{ph} = 1534 \text{ volt}$$

$$E_{line} = \sqrt{3} E_{ph} = \sqrt{3} \times 1534$$

$$= 2655 \text{ volt}$$

٤ - ٤ رد فعل عضو الاستنتاج للآلات التوافقية :

يؤدي مرور التيار في ملفات عضو الاستنتاج إلى ظهور تأثيرات مغناطيسية حولها هي ما أصفح على تسميته برد فعل المنتج كما سبق شرحه في آلات التيار المستمر مع اختلاف وهو أن الآلات المتزامنة ذات

ثلاث أوجه حيث يوجد اختلاف ١٢٠ درجة كهربية بين كل وجه والوجه الذي يليه . وبالتالي التيارات المارة في هذه الملفات هي الأخرى ثلاثية الوجه متغيرة مع تغير الزمن .

وينتج عن مرور هذا التيار في هذه الملفات رد فعل للمنتج ذي عدد أقطاب يساوي عدد أقطاب الآلة $2P$ وتدور هذه الأقطاب المكافئة لرد فعل عضو الاستنتاج بسرعة تساوي سرعة التزامن وفي نفس اتجاه دوران العضو الدوار الذي يدور هو الآخر بسرعة التزامن .

وتكون القوة الدافعة المغناطيسية الكلية هي محصلة جمع القوة الدافعة المغناطيسية لملفات التتبيه على الأقطاب الرئيسية وتلك الناشئة عن ملفات المنتج عند كل نقطة في الثغرة الهوائية جمعاً اتجاهياً .

وتكون القوة الدافعة الكهربائية المرحلية نتيجة للقوة الدافعة المغناطيسية المرحلية ، ويطلق على المجال المغناطيسي المكافئ لرد فعل عضو الاستنتاج بالمجال المغناطيسي الدائر (Rotating Field)

وقيمة هذه القوة الدافعة المغناطيسية المكافئة لرد فعل عضو الاستنتاج تعطى بالمعادلة

$$m.m.f_{av} = 1.35 \frac{T_{ph}}{p} I_a K_w \quad (٤ - ١٢)$$

٤- ٥ نظرية تشغيل الآلات المتزامنة (التوافقية) :

يتضح من تأثير رد فعل عضو الاستنتاج أنه عند وجود حمل على الآلة يتمثل في تيار لكل وجه (I_a) ويمر هذا التيار في ملفات المنتج أيضاً لاستكمال الدائرة الكهربائية فإذا كان عدد لفات الوجه T_{ph} فإن ق.د.م. للمنتج تكون

$$m.m.f_a = 1.35 \frac{T_{ph}}{p} I_a K_w \quad (٤ - ١٣)$$

وتكون مضاعفة لتلك الناتجة عن الأقطاب الأساسية $m.m.f_p$

والتي تعطى بالمعادلة

$$m.m.f_p = N_f I_f$$

وعلى ذلك فإن

$$m.m.f_{total} = \bar{m}.\bar{m}.f_a + m.m.f_p$$

وبجمع المركبتين جمعاً اتجاهياً لكي نحصل على القوة الدافعة المغناطيسية الكلية للآلة التي ينشأ عنها الفيض المغناطيسي المحصل ϕ_R في الثغرة الهوائية التي تحسب على أساسه قيمة القوة الدافعة الكهربائية لكل وجه E_{ph} .

ويكون جهد الأطراف V وهبوط الجهد في كل من المقاومة المرحلية (لكل وجه) R_a وممانعة التسرب لكل وجه X_l (Phase Leakage Reactance) عندما يمر تيار لكل وجه I_a لذلك فإن

$$\bar{E}_{ph} = \bar{V}_{ph} + \bar{I}_a (R_a + jX_l) \quad (٤ - ١٤)$$

مع ملاحظة أن هذا الجمع جمعاً اتجاهياً .

وعند رفع الحمل فإن التيار يصبح صفراً ويتلاشى رد فعل عضو الاستنتاج ويصبح الفيض فقط بسبب الأقطاب الأساسية ويكون جهد الأطراف هو نفسه الجهد المتولد عند هذه الحالة E_o وتعطى من المعادلة

$$E_o = 4.44 f T_{ph} \phi \cdot K_w \quad (٤ - ١٥)$$

وهذا يعني أن جهد الآلة عند الأطراف تغير من V إلى E_o ويطلق على النسبة في تغير الضغط على طرفي الآلة

$$\text{اسم معامل تنظيم الجهد للآلة المتزامنة ويرمز له بالرمز } \xi \quad \frac{E_o - V}{V} \quad (٤ - ١٦)$$

$$\text{معامل التنظيم} \quad \xi = \frac{E_o - V}{V}$$

لتوضيح نظرية تشغيل الآلات المتزامنة وتأثير وجود رد فعل عضو الاستنتاج سوف نعتبر الآلة من النوع ذي العضو الدائر الأسطواني ويحمل عضوه الثابت الملفات الثلاثية وبالإضافة إلى هذا سنفرض ما يأتي:

١ - الموجة المغناطيسية الناشئة من الأقطاب الرئيسة موجة جيبيية .

٢ - رد فعل عضو الاستنتاج يكون أيضاً موجة جيبيية (أي لا يوجد توافقيات فيها) .

٣ - إهمال التشبع وكذلك تأثير التيارات الإعصارية والتعويق المغناطيسي .

٤ - الثغرة الهوائية ثابتة الطول أي إهمال تأثير وجود المجاري .

بعد هذه الفروض سوف نتعرض لحالات المولدات كما يلي :

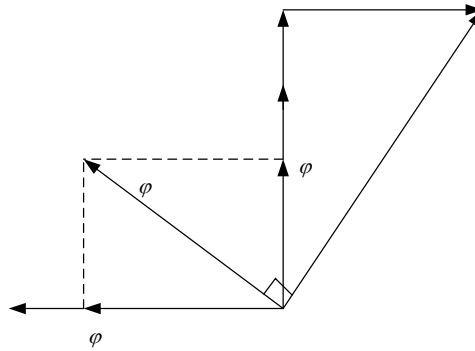
سوف نفرض في الشكل (٤ - ١) أن التيار للحمل في نفس اتجاه القوة الدافعة الكهربية أي

معامل القوة = ١ فإن المحصلة الكلية للقوة الدافعة الكهربية

$$\bar{E}_t = \bar{E} + \bar{E}_a \quad (٤ - ١٧)$$

هي المجموع الاتجاهي وتكون متعامدة على ϕ_F

حيث ϕ_t هي المحصلة الكلية لفيض الأقطاب الأساسية والفيض الناتج عن مرور تيار الحمل ϕ_a .



شكل (٤-٤) مخطط المتجهات للفيض المغناطيسي والق د ك

يتضح من الشكل (٤-٤) أن القوة الدافعة الكهربائية في الثغرة الهوائية هي محصلة للقوة الدافعة الكهربائية الناتجة عن الفيض الأصلي بالإضافة إلى القوة الدافعة الكهربائية E_a الناشئة عن مرور تيار I_a وتكون متقدمة عن I_a بمقدار 90° درجة.

$$E_a \propto I_a \quad (4-18)$$

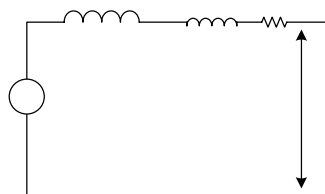
وبذلك يمكن تمثيل رد فعل عضو الاستنتاج وكذلك الجهد E_a الناتج عن جهد ضائع (مفقود) في ممانعة حثية مقدارها يتوقف على مقدار تأثير رد فعل عضو الاستنتاج والتيار المار من الآلة إلى الحمل وذلك لأن الجهد المفقود في ممانعة حثية يتقدم عن التيار بمقدار 90° درجة وتسمى هذه الممانعة بممانعة رد فعل المنتج X_a .

وكما يوضح شكل (٤-٢) باعتبار أن ملفات الآلة لها مقاومة مادية R_a وممانعة حثية X_a فإن الآلة المتزامنة يمكن تمثيلها بالدائرة المكافئة الموضحة.

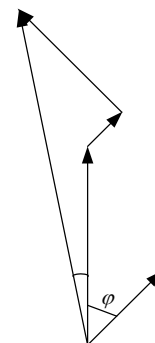
$$\begin{aligned} Z_s &= r_a + j(x_a + X_a) \\ &= r_a + jX_s \end{aligned} \quad (٤ - ١٩)$$

حيث أن

$$X_s = x_a + X_a \quad (٤ - ٢٠)$$



شكل (٤-٦) الدائرة الكهربائية



شكل (٤-٥) مخطط المتجهات

F_f

ويمثل شكل (٤ - ٥) مخطط المتجهات للآلة المتزامنة التي يوضحها شكل (٤ - ٦) ويمكن تبسيط الدائرة أكثر باعتبار عدم وجود E_t وتكون العلاقة فقط بين V ، E باعتبار X_s هي الممانعة المتزامنة .

$$X_s = X_a + x_a \quad (٤ - ٢١)$$

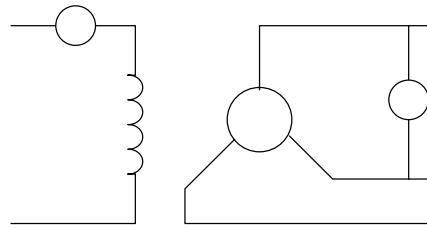
ويكون مقدار التنظيم في الجهد

$$\xi\% = \frac{E - V}{V} \times 100 \quad (٤ - ٢٢)$$

٤- ٦ منحنيات الآلة المتزامنة (التوافقية)

أ - منحنى اللاحمل No Load Test

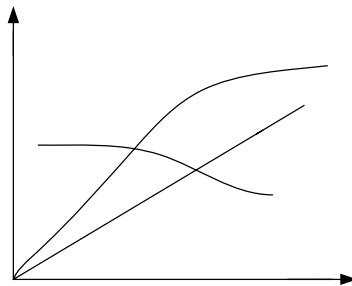
ويمكن إجراء تجربة اللاحمل على المولد المتزامن وذلك عن طريق إدارة المولد عند اللاحمل (الدائرة المفتوحة) وأخذ قراءة الجهد الطرقي مع تيار التنبية الذي تغذى به الآلة كما هو مبين بالشكل (٤-٧)



شكل (٤-٧) الدائرة المفتوحة (اللاحمل)

ويزاد في هذه التجربة تيار التنبية تدريجياً وتؤخذ قيمة الجهد والتيار التنبية وتقاس كذلك القدرة اللازمة لإدارة الآلة عند كل قيمة من قيم التيار والجهد . ويوضح شكل (٤ - ٨) منحنى اللاحمل لمولد متزامن

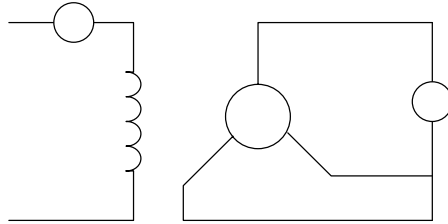
" Open Circuit Charact " (O.C.C)



شكل (٤ - ٨) منحنى خواص اللاحمل والقصر

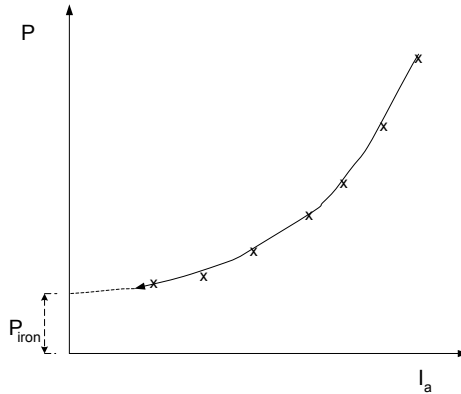
ب - تجربة القصر Short Cir. Test

في هذه الحالة ترتبط الأطراف الثلاثة عن طريق أميتر ثم يزداد التيار للمفات التثبيته تدريجياً وتؤخذ قراءة تيار التثبيته و تيار المنتج كما في شكل (٤ - ٩). ويلاحظ أن العلاقة في هذه الحالة سوف تكون علاقة خطية .



شكل (٤ - ٩) تجربة القصر

ومن هاتين التجريبتين يمكن استنتاج المعاوقة المتزامنة Z_s وذلك عن طريق قسمة $\frac{E}{I_a}$ عند كل قيمة من قيم I_F ونظراً لوجود التشبع يجب ملاحظة أن Z_s تتغير كما هو موضح في شكل (٤ - ٨) ويمكن في حالة تجربة القصر تحديد القدرة المفقودة عند كل قراءة ومن القدرة المفقودة في حالتي اللاحمل والقصر يمكن تحديد منحني المفايد مع تيار المنتج والذي يوضحه شكل (٤ - ١٠) .



شكل (٤ - ١٠)

وينقسم فاقد الحديد إلى قسمين :

فاقد الإعصار + فاقد التعويض

كما يجب ملاحظة أن مقاومة عضو الاستنتاج صغيرة ولذلك يمكن إهمالها (حوالي ١٪ من قيمة Z_s) واعتبار أن $X_s = Z_s$ وعلى ذلك يكون تيار القصر متأخر عن الجهد بمقدار ٩٠ درجة . ويكون رد فعل عضو الاستنتاج مضاداً تماماً للمجال الأصلي للأقطاب .

معامل التنظيم للجهد Voltage Regulatim

يعتبر معامل التنظيم من المعاملات الهامة والأساسية في الآلات المتزامنة التي نحتاج إليها كثيراً وخصوصاً فيما يتعلق بتنظيم الجهد أو لتعيين طرق الحماية لهذه المولدات " Protection " أو تشغيلها على التوازي (Parallel Operation) مع مولدات أخرى .

وتختلف طرق تعيين التنظيم أو معامل التنظيم على حسب المعلومات المتوفرة لدينا عن الآلات والتي تكون عادة بيانات التصميم الواردة مع الآلة أو نتيجة للاختبارات التي أجريت عليها . ويعرف معامل التنظيم بأنه النسبة لتغيير الضغط على طرفي الآلة من اللاحمل إلى الحمل الكامل . ويعطى معامل التنظيم المثوي من المعادلة

$$\xi\% = \frac{E_o - V}{V} \times 100 \quad (٢٣ - ٤) \quad \text{معامل التنظيم}$$

حيث E_o هو الجهد عند الأطراف عند اللاحمل

V هو الجهد عند الأطراف عند الحمل الكامل

يعطينا معامل التنظيم فكرة واضحة عن مدى التغير الذي يحدث في قيمة الجهد على طرفي الآلة عند تغيير الأحمال في حدود واسعة وعند رفعه أو وضعه . وهذا يساعد المهندس بالمحطة لرفع جهد التوليد عند زيادة الأحمال حتى يصل إلى المستهلك جهد ثابت بقدر الإمكان . وفيما يلي عرض للطرق المستخدمة لتحديد معامل التنظيم أو لتعيينه باستخدام بيانات التصميم أو نتائج الاختبارات أو كليهما ومن أهم هذه الطرق :

١ - طريقة المعاوقة المتزامنة Syn.Impedence Method

تستخدم هذه الطريقة مع مولدات ذات أقطاب من النوع الأسطواني ذات الشفرة الهوائية الثابتة ونحتاج لمعرفة R_a ، Z_s ومنها نحسب

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$$

ويوضح الشكل (٤ - ١) كيفية الحصول على الجهد المتولد E في حالة التحميل بتيار I ومنها يمكن حساب التنظيم أو معامل التنظيم من المعادلة

$$\xi\% = \frac{IR_a \cos \phi + IX_s \sin \phi}{V} \times 100 \quad (٢٤ - ٤)$$

• طريقة الأمبيرلفات Ampere-turn Method

تحتاج هذه الطريقة لمعرفة منحنى اللاحمل وقيمة الأمبيرلفات اللازمة لرد فعل عضو الاستنتاج ومعامل القدرة والتيار . وسنكتفي بالطريقة السابقة.

٤- ٧ العزم والقدرة في الآلات المتزامنة :

في آلة متزامنة تغذي حمل معين بتيار I القدرة التي نحصل عليها من هذه الآلة تعطى من المعادلة

$$P_0 = 3VI \cos \phi \quad (٤ - ٢٦)$$

حيث I ، V هما الجهد والتيار لكل وجه .

إذا كانت E هي القوة الدافعة الكهربائية المتولدة فإن الزاوية بين I ، E هي $(\phi + \delta)$ وتكون القدرة الكلية التي تعطيها الآلة هي

$$P_1 = 3EI \cos(\phi + \delta) \quad (٤ - ٢٧)$$

و معروف أن الفرق بين القدرتين هو المفقود في النحاس في R_a

$$P_1 = 3EI \cos(\phi + \delta) = 3I(V \cos \phi + IR_a) \quad (٤ - ٢٨)$$

$$= 3[VI \cos \phi + I^2 R_a]$$

وغالباً ما يكون المقدار $I^2 R_a$ صغيراً وبذلك تكون تقريباً (لتسهيل الحساب)

$$P_1 \cong P_0 \quad (٤ - ٢٩)$$

ويمكن كتابة هذه المعادلة بطريقة أخرى

$$P_1 = \frac{3EV}{X_s} \sin \delta \cong P_0 \quad (٤ - ٣٠)$$

وعند استخدام الآلة المتزامنة كمحرك فإن استنتاج العزم يكون هاماً ويمكن الحصول عليه من المعادلة

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (٤ - ٣١)$$

وحيث أن ω للمحرك ثابتة وهي سرعة التزامن أي (ω_s)

$$\therefore T = \frac{3EV}{X_s} \sin \delta \cdot \frac{1}{\omega_s} \quad (٤ - ٣٢)$$

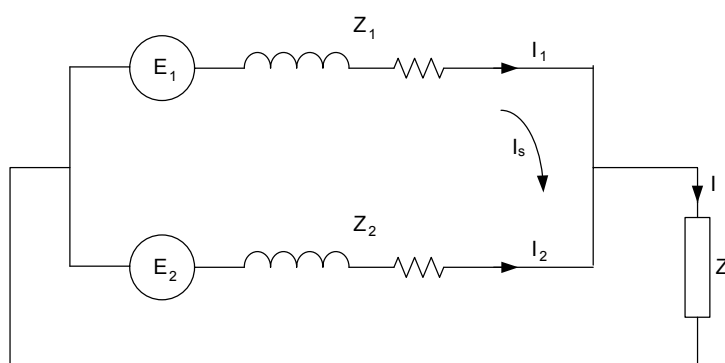
وتسمى الزاوية δ بزاوية القدرة أو العزم لأنه تتوقف عليها قيمة القدرة أو العزم اللذين تعطيها الآلة التوافقية .

فمن المعادلة (٤ - ٣٠) ، (٤ - ٣٢) يتضح أنه عند ثبوت E أو ما يسمى الجهد المتولد أو جهد التنبية فإن P ، T يتناسبان مع $\sin \delta$ ويكون منحنى القدرة والعزم على شكل منحنى جيبي.

تشغيل المولدات المتزامنة على التوازي Parallel Operation of S.M.

٤- ٨ تشغيل المولدات المتزامنة على التوازي Parallel Operation of S.M.

عند توصيل مولدين على التوازي على حمل ذي معاوقة Z حيث إن E_1 ، Z_1 هي القدرة الدافعة الكهربائية المتولدة ومعاوقة التزامن للآلة الأولى ، E_2 ، Z_2 هي القوة الدافعة الكهربائية المتولدة والمعاوقة للآلة الثانية والتيار I_1 ، I_2 هي نصيب كل آلة من التيار الكلي للحمل I كما في شكل (٤ - ١١) .



شكل (٤ - ١١) توصيل مولدين على التوازي

أولا عند تساوي القوة الدافعة الكهربائية أي

$$E_1 = E_2 , \quad z_1 = Z_2$$

فإن التيارات

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

وعلى ذلك يكون توزيع الحمل بالتساوي بين الآلتين ، إذا تساوت E_1 ، E_2 أما إذا لم يتساوى كل Z_1 فإن

$$\bar{V} = \bar{E}_1 - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 \bar{Z}_2 \quad E_1 = E_2 = E$$

$$\therefore \bar{V} = \bar{E} - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{E} - \bar{I}_2 \bar{Z}_2$$

$$\bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{I}_2 \bar{Z}_2 \quad \bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$$

$$\therefore \bar{I}_1 = \bar{I} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (٤ - ٣٣)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I} \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (٤ - ٣٤)$$

ولذلك فإن قبل توصيل المولدات التوافقية على التوازي يجب أن تراعى العوامل الآتية :

- أن يكون الجهد عند اللاحمل متساو في الآلتين وكذلك تماثل المعاوقات المتزامنة .

- يجب أن يكون التردد متساو .

- أن يكون التتابع متوافراً (التوافر الوجهي A مع A¹ ، B مع B¹ ، C مع C¹) .

- تجانس أو تماثل القطبية (Phase Shift) .

وأي عدم توافر لهذه الشروط أو بعضها يسبب مشاكل عند التوصيل لهذه المولدات وربما يحول إحدهما للعمل كمحرك ليكون حمل على المولد الآخر وقد يتسبب اختلاف الجهد إلى مرور تيار دائر بين المولدين يسمى التيار الدائر

I_s ويكون لهذا التيار تأثير سيئ على ملفات المولد خصوصاً الذي يزيد تياره عند تيار الحمل الكامل. والقدرة الناتجة عن هذا التيار تسمى بقدرة التوافق (Synch. power) وهي تمثل القدرة التي تسري بين منتجي لإعادتها إلى حالة التوازن الأصلية .

$$P_s \cong E_1 I_s \cong E_2 I_2 \quad (٤ - ٣٥)$$

وتزداد هذه القدرة بزيادة درجة الخلل بين المولدات .

وعند تقسيم الحمل الذي يوصل على مولدين فإنهما يتقاسما الحمل وفقاً لفيض ق.ء.ك وكذلك X_s لكل منهما كما هو موضح شكل (٤ - ١١)

$$I = I_1 + I_2 \quad \text{حيث}$$

مع ملحوظة أن المولدين لابد أن يعملوا على سرعة تزامن واحدة .

ويكون التيار الدائر I_s يعطي من المعادلة

$$I_s = \frac{F_1 - E_2}{Z_1 + Z_2}$$

حيث معاوقة كل من المولدين ١ ، ٢ هما Z_1 ، Z_2

٤ - ٩ توصيل الآلات المتزامنة على قضبان لا نهائية :

A Synchronous Machine On Infinite Bus-Bars

تعتبر عملية المولدات على قضبان لا نهائية من أهم العمليات اللازمة في حالة الشبكات الكهربائية للمتخصصين في التمديدات والشبكات الكهربائية .

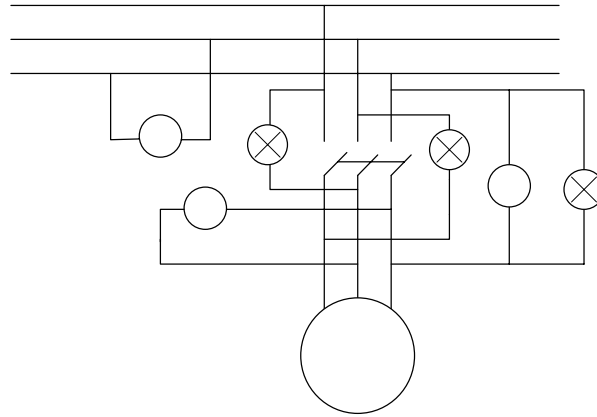
ولإجراء عملية التوصيل من آلة قضبان لا نهائية يجب أن تتوافر الشروط الآتية :

١ - أن يكون الجهد متساو .

٢ - التردد متساو تماماً .

٣ - القطبية متجانسة .

٤ - التتابع واحد .



شكل (٤ - ١٢) طريقة اللمبات

ويتم ذلك عملياً بطرق مختلفة منها :

١ - بطريقة توصيل اللمبات أو المصابيح المضئية وتوصل فيه ثلاث لمبات كما في الشكل (٤ - ١٢) بين القضبان وبين الآلة بحيث تصل اللمبة ١ بين القضيبي رقم ١ وطرف الآلة رقم ١ ثم توصل اللمبة ٢ بين القضيبي ٢ وطرف الآلة ٣ وكذلك لمبة ٣ بين القضيبي ٣ والطرف ٢ للآلة .

ويقال **3** المصباح الأول متصل اتصالاً مباشراً بينما يتصل المصباح ٢ ، ٣ اتصالاً منقطعاً وتبدأ عملية التزامن بضبط قراءة الأجهزة

$$V_m = V_b \text{ وكذلك } V_s = 0$$

وتحدد **1** حالتان عند محاولة ضبط السرعة . إما أن تضيء جميعاً بطريقة غير منتظمة أو أن تضيء وتطفأ بالتتابع بطريقة دورية منتظمة .

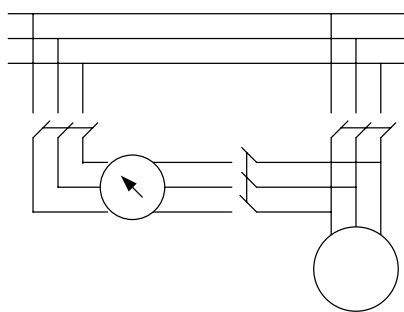
في الحالة الأولى يكون التعاقب للأوجه مختلفاً ولذلك يلزم فقط استبدال أي طرفين من أطراف المولد الثلاثة لكي يصبح التعاقب متشابهاً للقضبان الرئيسة .

أما في الحالة الثانية فمعنى أن التعاقب متماثل . ولكن كل ما في الأمر هو أن سرعة التزامن وبالتالي التردد لم تصل إلى السرعة المطلوبة ويلزم زيادتها أو نقصانها وسوف يتضح ذلك من عملية تتابع الإضافة إذا زادت السرعة يلزم التقليل وعندما يستقر الوضع على أن يصبح المصباح رقم ١ مظلماً والمصباحان ٢ ، ٣ مضيئين بنفس درجة الإضاءة . عند هذه الحالة يلاحظ أن الآلة قد وصلت إلى حالة تسمح لها بالتوصيل بالقضبان اللانهاية وتوصل عندها عن طريق قفل دائرة التوصيل أو المفتاح S .

٢ - باستخدام جهاز التزامن Synchroscope

ويستخدم هذا الجهاز للمساعدة في عملية التزامن والتثبت أو التأكد من توافر جميع الشروط المطلوبة. ويحتوي هذا الجهاز على مؤشر معرض للمجال المغناطيسي وهو المجال المحصل بين المجال المغناطيسي الناشئ عن القضبان اللانهائية وتلك الناشئة عن المولد ومن حركة المؤشر إلى وضع رأسي ثابت يدل عندها على أن الآلة والقضبان في حالة توافق تام وهي اللحظة التي عندها يمكن توصيل المولد إلى القضبان اللانهائية .

ويوضح شكل (٤ - ١٣) رسماً كروكياً لكيفية توصيل المولد بالقضبان اللانهائية عن طريق جهاز التزامن Synchroscope وتتم هذه العملية في كل مرة يراد توصيل مولد لم يكن متصلاً أو في حالة عدم تشغيل بالقضبان اللانهائية التي تتصل عليها مجموعة من المولدات للمشاركة في تقسيم الأعمال .



شكل (٤ - ١٣) استخدام جهاز التزامن

٤ - ١٠ المحركات المتزامنة (التوافقية) Synchronous Motors

المحركات المتزامنة من المحركات القليلة الاستعمال والتي تتميز بثبات سرعتها عند سرعة التزامن مهما تغير الحمل على هذا النوع من المحركات حيث

$$n_s = \frac{60f}{P} \quad (٤ - ٣٨)$$

وعلى ذلك فطالما التردد للمنبع المتصل عليه المحرك ثابت تظل السرعة ثابتة فيستخدم هذا المحرك فقط في الحالات التي تتطلب سرعة ثابتة عند كافة الظروف .

ولكن نظراً لأن العزم يتناسب مع $(\sin \delta)$ من المعادلة (٤ - ٣٢)

$$T = \frac{3EV}{X_s} \sin \delta \cdot \frac{1}{w_s}$$

فإن العزم الناشئ يكون على شكل موجة جيبيية متوسطة يساوي صفراً وعليه لا يستطيع المحرك أن يبدأ حركته بنفسه . ولكن ينتج هذا المحرك عزمًا فقط عند سرعة التزامن . وعلى ذلك فيجب أن

تدار الآلة حتى تصل سرعتها إلى سرعة التزامن وعندها يبدأ عمل المحرك كمحرك توافقي. وهكذا تكون هناك مشكلة إنتاج عزم لبدء الحركة وإدارة المحرك حتى هذه السرعة .

٤ - ١٠ - ١ طرق بدأ حركة المحركات المتزامنة :

١ - أن يدار المحرك عن طريق محرك صغير حتى تصل سرعته إلى سرعة قريبة من سرعة التزامن مع التنبيه اللازم ثم توصله عند هذه النقطة على المنبع الكهربائي بعد إجراء التوافق أو التزامن كما سبق توضيحها في البند السابق مع المولدات .

٢ - باستخدام قضبان تخميد Damping Coils وفيها توضع قضبان على أحذية الأقطاب وتقتصر هذه القضبان بحلقات نحاسية وبذلك تشبه إلى حد كبير القفص السنجاب في حالة المحركات التأثيرية .

ويبدأ المحرك في هذه الحالة حركته كمحرك تأثيري ذي قفص سنجاب وتبدأ في هذه الحالة دائرة التنبيه مفتوحة ويزاد الجهد تقريباً حتى يصل إلى قرب القيمة المقننة حتى تصل السرعة إلى قرب السرعة المتزامنة . وعند ذلك تغلق دائرة التنبيه فيأخذ المحرك في زيادة السرعة حتى تصل إلى سرعة التزامن ويعمل في هذه الحالة كمحرك توافقي .

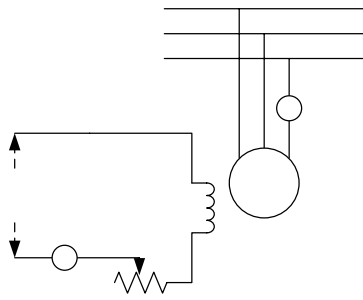
٤ - ١٠ - ٢ منحنيات V " The V-Curves " للمحرك المتزامن :

وهي نوع من المنحنيات تحدد خواص التشغيل للمحرك وهو منحنى يبين تيار عضو الاستنتاج وتيار ملفات التنبيه وذلك عند تثبيت القدرة عند قيمة ثابتة لكل منحنى .

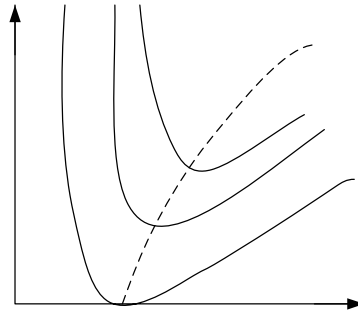
ويوضح شكل (٤ - ١٤) دائرة توصيل المحرك في تجربة لتحديد V-Curves لمحرك متزامن . وتجري التجربة أولاً عند اللاحمل وتغير قراءة التيار اللازم للتنبيه وتأخذ قراءته وكذلك تيار الحمل ويرسم منحنى ثم يكرر هذا مع أحمال مختلفة $\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{4}$ ، F.L وتسمى هذه المنحنيات V-Curves نظراً لأنها تشبه حرف V في اللغة الإنجليزية . ويوضح هذا شكل (٤ - ١٥) .

يقصد بكلمة Lead معامل قدرة متقدمة وكذلك Lag معامل قدرة متأخرة وعند منتصف المنحنى يكون معامل القدرة الوحدة وذلك فإن الخط الواصل بين هذه النقط يسمى خط معامل القدرة

الوحدة وهو الخط المنقط Unity P.F. line



شكل (٤ - ١٤) دائرة توصيل المحرك



شكل (٤ - ١٥) منحنيات V

٤- ١٠- ٣ الكفاءة (الجودة) Efficiency

بمجرد تحديد المفاقد الخاصة بالآلة المتزامنة يمكن حساب معامل الجودة أو الكفاءة .

وتتقسم المفاقد إلى عدة أنواع سواء كانت الآلة مولد أو محرك كما يلي :

- المفاقد النحاسية وهي قسمان وهما مفاقد النحاس في ملفات المنتج وكذلك مفاقد النحاس في ملفات عضو التنبيه .
- المفاقد الحديدية .
- مفاقد الاحتكاك .

وبتحديد أنواع المفاقد وكذلك قدرة المخرج للمولد أو قدرة الدخل بالنسبة للمحرك

$$P_o = \sqrt{3}VI \cos \phi$$

$$P_i = \sqrt{3}VI \cos \phi$$

$$\xi\% = \frac{V_f P_o}{P_o + losses} \times 100 \quad (٤ - ٣٩)$$

$$\xi\% = \frac{P_o - losses}{P_o} \times 100 \quad (٤ - ٤٠)$$

Ger

Field
winding

٤- ١٠- ٤ بعض الاستخدامات الخاصة بالآلة المتزامنة :

تستخدم الآلة المتزامنة في بعض الحالات في ظروف تشغيل خاصة ومنها :

١ - المكثف المتزامن (The Syn.Capacitor (compensator)

تكون هذه الآلة عبارة عن محرك تزامني يدور عند اللاحمل ومصمم للعمل على مدى واسع لتغيير تيار المجال . ويأخذ المحرك تياراً متقدماً في هذه الحالة مثل المكثف الثلاثي الأطوار بقدرة يمكن

التحكم فيها وتصل قدرتها إلى وحدات ذات قدرة ١٠٠ ميجا فولت أمبير أو أكثر وتوضع على خطوط القدرة للتحكم في الجهد عند نقط مختلفة على خطوط نقل القدرة .

٢ - تصحيح معامل القدرة Power-Factor Correction

تحتاج معظم مكونات المعدات الكهربائية إلى تيار بمعامل قدرة متأخر أثناء تشغيلها الاعتيادي ولتحسين معامل القدرة لأي منشأة معينة فإنه يلزم تركيب بعض المعدات التي تأخذ معامل قدرة متقدم ولذلك ينخفض التيار الكلي المأخوذ وتنخفض المفقودات وكذلك التكاليف النقدية وقد يبدو اقتصادياً استعمال مكثفات إستاتيكية لهذا الغرض ولكن المكثف التزامني له ميزات إضافية مثل قدرته على توفير قدرة ميكانيكية كما يمكن التحكم في معامل القدرة عن طريق تغيير تيار المجال . ولذلك يستخدم بكثرة المكثف المتزامن في دوائر القدرة وشبكات نقل القدرة التي لها معامل قدرة صغير ويحتاج إلى تعديل . وكذلك في المصانع معامل القدرة فيها صغير نظراً لاستخدام أحمال ذات معامل قدرة متأخر .

٤ - ١٠ - ٥ أمثلة متنوعة ومحلولة على الآلات المتزامنة :

مثال ١

مولد متزامن يحتوي على ٧٢ مجرى ثلاثة أوجه ، ٦ أقطاب ملفوف بطريقة طبقتين كل ملف يحتوي على ٢٠ لفة ، خطوة الملف $\frac{5}{6}$ من الخطوة القطبية . و المجال المغناطيسي لكل قطب 4.8×10^6 خط (0.048) وبر وتدار الآلة ١٢٠٠ لفة/دقيقة .

احسب : أ - معامل التوزيع K_d ب - معامل الخطوة K_c

ج - القوة الدافعة الكهربائية المتولدة لكل وجه .

الحل:

$$F = \frac{pn}{60} = 3 \times \frac{1200}{60} = 60 \text{ c/s}$$

$$K_c = \cos \frac{\theta}{2} , \quad \theta = 180 - \frac{5}{6} \times 180$$

$$= 180 - 150 = 30^\circ$$

$$\therefore K_c = \cos \frac{30}{2} = 0.967$$

$$q = \frac{72}{3 \times 6} = \frac{\text{عدد المجاري}}{\text{عدد الأوجه} \times \text{عدد الأقطاب}} = 4$$

$$\alpha = \frac{6 \times 180}{72} = 15^\circ$$

$$K_d = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin(\alpha/2)} = \frac{\sin(4 \times 15/2)}{4 \sin(15/2)}$$

$$\therefore K_d = 0.95 \quad , \quad K_w = K_d \cdot K_c$$

$$T_{ph} N = \frac{2 \times 20 \times 72}{2 \times 3} = 480 \text{ Turn}$$

$$= \frac{20 \times 72}{3} = 480 \text{ Turn}$$

$$E_{ph} = 4.44 f \phi T_{ph} K_w$$

$$= 4.44 \times 60 \times 0.048 \times 480 \times 0.95 \times 0.917$$

$$E_{ph} = 5347 \text{ Volt}$$

مثال ٢ :

مولد ثلاثي الوجه ١٦ قطب يدور بسرعة ٣٧٥ لفة/دقيقة ويحتوي على ١٤٤ مجرى كل مجرى بها ٧ موصلات وكل وجه مكون من دائرتين على التوازي فإذا كان الفيض المغناطيسي ٠,٠٣٨٩ وبر أوجد القوة الدافعة الكهربائية لكل وجه وكانت خطوة اللف ١٦٠ درجة . أوجد كذلك جهد الخط إذا كان المولد موصل نجمه .

الحل :

$$q = \frac{144}{3 \times 16} = 3$$

$$f = p \frac{n}{60} = 8 \times \frac{375}{60} = 50 \text{ c/s}$$

$$\theta = 180 - 160 = 20^\circ \quad \text{زاوية التغير}$$

$$K_c = \cos \frac{\theta}{2} = \cos \frac{20}{2} = 0.985$$

$$\alpha = \frac{180}{3 \times 3} = 20^\circ$$

$$K_d = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin(3 \times 20/2)}{3 \sin\left(\frac{20}{2}\right)}$$

$$K_d = 0.96$$

عدد الموصلات الكلية

$$Z = 144 \times 7 = 1008$$

$$N = \frac{Z}{2 \times 3 \times 2} = \frac{1008}{12} = 84 \text{ Turn}$$

$$E_{ph} = 4.44 f \phi N K_c K_d$$

$$= 4.44 \times 50 \times 0.0389 \times 84 \times 0.985 \times 0.96$$

$$= 6859$$

$$\therefore E_{line} = \sqrt{3} \times 6859 = 11880$$

مثال ٣

مولد متزامن ثلاثي الأوجه موصل نجمة ٥٠ ذبذبة/ثانية . ١٠٠٠ كيلوفولت أمبير ومعامل التنظيم له ٢٥٪ عند الحمل الكامل عندما يكون جهد الأطراف ٣٣٠٠ فولت ويدار عند سرعة ٣٧٥ لفة/دقيقة . عدد المجاري لكل قطب لكل وجه $q = 3$ ومعامل اللف (٠,٩٦) فإذا كان الفيض لكل قطب ٠,٠٥٨١ وبر .

احسب عدد الموصلات الموجودة في كل مجرى .

الحل :

$$f = \frac{pn}{60} \quad \therefore P = \frac{60 \times 50}{375} = \delta$$

$$V = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1905V$$

$$\xi\% = 25 = \frac{E_o - V}{V}$$

$$\therefore 0.25 = \frac{E_o - 1905}{1905} \quad , \quad \therefore E_o = 2381.25 \text{ Volt}$$

$$E = 4.44 f \phi N K_w \quad , \quad 2381.25 = 4.44 \times 50 \times 0.0581 \times N_{ph} \times 0.96$$

$$N_{ph} = 192 \text{ turn}$$

$$cond = \frac{192 \times 2}{3 \times 16} = 8 \text{ cond}$$

مثال ٤ :

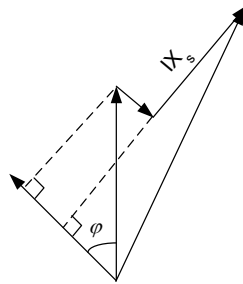
محرك متزامن ثلاثة أوجه موصل نجمة ٢٣٠٠ فولت له مقاومة ٠,٢ أوم وممانعة التزامن ٢,٢ أوم ويعمل المحرك عند معامل قدرة ٠,٥ متقدم والتيار ٢٠٠ أمبير .
احسب : القوة الدافعة الكهربائية لكل وجه .
الحل :

برسم مخطط المتجهات لكل من الجهد V_{ph} ، I_{ph}

$$V_{ph} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1328$$

$$I_{ph} = 200A$$

وبينهما زاوية $\cos^{-1} 0.5$ وهي 60° متقدم أي إن التيار متقدم عن الجهد بمقدار 60° ومن مخطط المتجهات الآتي



مخطط المتجهات لمعامل قدرة متقدم

$$E_{ph} = \sqrt{(V \cos \phi - IR)^2 + (V \sin \phi + IX)^2}$$

$$E_{ph} = \sqrt{(1328 \times 0.5 - 200 \times 0.2)^2 + (1328 \times 0.868 + 200 \times 2.2)^2}$$

$$E_{ph} \cong 1708 \text{ volt}$$

وواضح أن E_{ph} هي القوة الدافعة الكهربائية المضادة وهي أكبر من جهد الأطراف وذلك بسبب معامل القدرة المتقدم .

مثال ٥

محرك متزامن وجه واحد يغذى بجهد ٢٥٠ فولت له مقاومة ٠,٤ وممانعة ٤ أوم فإذا كانت القدرة التي يعطيها هذا المحرك ٤٠٠٠ وات متضمنة مفايد الحديد والاحتكاك . احسب :
تيار المنتج عند معامل القدرة الوحدة . القوة الدافعة الكهربائية المتولدة .

الحل :

$$\cos \phi = 1.0$$

$$P = VI \cos \phi - I^2 R$$

$$4000 = 250I - 0.4I^2$$

$$0.4I^2 - 250I + 4000 = 0$$

$$I = \frac{250 \pm \sqrt{(250)^2 - 4 \times 0.4 \times 4000}}{2 \times 0.4}$$

$$\therefore I = 16.5 \text{ Amp}$$

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{(V \cos \phi - IR)^2 + (V \sin \phi + IX)^2} \\ &= \sqrt{(250 - 16.5 \times 0.4)^2 + (16.5 \times 4)^2} \end{aligned}$$

$$\therefore E = 252.2V$$

المحتويات

.....	مقدمة	١
.....	تمهيد	١
١	الوحدة الأولى: آلات التيار المستمر	١
١	1- تركيب آلات التيار المستمر :	١
٢	٢ - مبدء عمل المبدل :	٢
٤	٣ - معادلة القوة الدافعة الكهربائية (E (electromotive force (e.m.f) equation	٤
٧	٦ - أنواع آلات التيار المستمر	٧
١٠	٧ - تدفق القدرة , مفايد و كفاءة آلات التيار المستمر :	١٠
١٤	٢,١ - مولدات التيار المستمر	١٤
١٤	١ - مولدات التيار المستمر ذات إستثارة المنفصلة :	١٤
١٥	٢,١ - خصائص مولد التيار المستمر ذي الإستثارة المنفصلة :	١٥
١٩	٢ - مولدات الإستثارة الذاتية :	١٩
١٩	١,٢ - مولد التوازي :	١٩
٢٢	٢,٢ - مولد التوالي :	٢٢
٢٩	٣,١ محركات التيار المستمر	٢٩
٢٩	١ - مقدمة	٢٩
٢٩	٢ - محركات التيار المستمر ذات إستثارة توازي و إستثارة منفصلة :	٢٩
٣٥	٣ - محرك التيار المستمر التوالي	٣٥
٣٩	٤ - محركات التيار المستمر المركبة	٣٩
٤٣	الوحدة الثانية: المحولات الكهربائية	٤٣
٤٣	تركيب المحولات TRANSFORMER CONSTRUCTION	٤٣
٤٧	٢ - ٢ محولات الوجه الواحد Single- Phase Transformers	٤٧
٤٨	نظرية عمل المحوّل	٤٨
٥٠	٢ - ٤ المحول المثالي The Ideal Transformer	٥٠
٥٣	نقل المعاوقة في المحولات	٥٣
٥٦	المحوّل الفعلي (غير المثالي) The Real Transformer	٥٦
٥٩	٢ - ٧ الدائرة المكافئة للمحوّل الفعلي (The Equivalent Circuit of A Real Transformer)	٥٩
٦٣	حساب مكوّنات الدائرة المكافئة	٦٣
٦٣	٢ - ٨ ١- اختبار الدائرة المفتوحة The Open-Circuit Test	٦٣
٦٤	٢ - ٨ ٢- اختبار الدائرة المقصورة The Short Circuit Test	٦٤
٦٧	كفاءة المحوّل Transformer Efficiency	٦٧
٦٩	٢ - ١٠ معامل تنظيم الجهد للمحوّل Voltage Regulation of a Transformer	٦٩
٧١	المحوّلات ثلاثية الأوجه	٧١
٧١	٢ - ١١ ١- طرق التوصيل للمحوّلات (التشغيل على التوازي) :	٧١
٧٢	٢ - ١١ ٢- شروط التشغيل على التوازي :	٧٢

٧٢	٣، ١، ٢ - توصيل المحولات ثلاثية الأوجه :
٧٨	الوحدة الثالثة : المحركات التأثيرية
٧٨	٣ - ١ المقدمة
٧٨	٣ - ٢ التركيب :
٧٩	٣ - ٣ المجال المغناطيسي الدوار Rotating Magnetic Field
٨٢	٣ - ٤ نظرية عمل المحرك :
٨٨	٣ - ٥ علاقات القدرة في المحرك : Power Relations For I.M.
- ٩٠ -	٣ - ٦ عزم الدوران Torque
- ٩٩ -	٣ - ٩ أمثلة محلولة :
- ١٠٥ -	٣ - ١٠ طرق بدء حركة المحركات التأثيرية :
- ١٠٨ -	٣ - ١١ استخدام مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الدائر الملفوف :
- ١٠٨ -	٣ - ١١ - ٢ تغير السرعة في المحركات ذات القفص السنجابي :
- ١١٠ -	٣ - ١٢ تشغيل المحرك الثلاثي الأوجه على تردد يختلف عن تردده الأصلي :
- ١١٢ -	الوحدة الرابعة : الآلات التزامنية
- ١١٢ -	٤ - ١ المقدمة والتركيب :
- ١١٣ -	٤ - ٢ ملفات المنتج في آلات التيار المتغير :
- ١١٥ -	٤ - ٣ القوة الدافعة الكهربائية في ملفات آلات التيار المتغير
- ١١٨ -	٤ - ٥ نظرية تشغيل الآلات التزامنية (التوافقية) :
- ١٢١ -	٤ - ٦ منحنيات الآلة التزامنية (التوافقية)
- ١٢٣ -	معامل التنظيم للجهد Voltage Regulatim
- ١٢٤ -	٤ - ٧ العزم و القدرة في الآلات التزامنية :
- ١٢٥ -	٤ - ٨ تشغيل المولدات التزامنية على التوازي Parallel Operation of S.M.
- ١٢٦ -	٤ - ٩ توصيل الآلات التزامنية على قضبان لا نهائية :
- ١٢٩ -	٤ - ١٠ منحنيات V " The V-Curves " للمحرك المتزامن :
- ١٣٠ -	٤ - ١٠ - ٣ الكفاءة (الجودة) Efficiency
- ١٣٠ -	٤ - ١٠ - ٤ بعض الاستخدامات الخاصة بالآلة التزامنية :
- ١٣١ -	٤ - ١٠ - ٥ أمثلة متنوعة ومحلولة على الآلات التزامنية :

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم
المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

BAE SYSTEMS