



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
الجامعة التقنية الجنوبية
المعهد التقني العمارة
قسم التقنيات الكهربائية / قوى



مكائن التيار المتناوب

AC Machines

الفصل الثاني

م. أيمن كاظم محيسن

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
الجامعة التقنية الجنوبية
المعهد التقني العماره
القسم :- التقنيات الكهربائية / فرع القوى الكهربائية

عدد الوحدات	الساعات الاسبوعية			السنة الدراسية الثانية	اسم المادة مكائن التيار المتناوب AC Machines الفصل الثاني
	م	ع	ن		
5	5	3	2		

الهدف العام : تعريف الطالب على اجزاء وعمل المكائن الكهربائية.

الهدف الخاص :سيكون الطالب قادرا على ان :

1- يفهم نظرية عمل مكائن التيار المستمر والمتناوب.

2- يشغل المكائن الكهربائية.

3- يحدد اجزاء المكائن الكهربائية والمحولات.

المفردات النظرية

الاسبوع	
الاول	المحولات ثلاثية الطور الطرق المختلفة لتوصيل المحولات ثلاثية الطور مسائل
الثاني	المحركات الحثية ثلاثية الاطوار المميزات - العيوب - المجال المغناطيسي الدوار - نظرية التشغيل الانزلاق - تردد الجزء الدوار
الثالث	انواع المحركات محركات ذات قفص سنجابي - محركات ذات حلقات الانزلاق المقارنة بينهما - تركيب كل نوع - استخدامات كل نوع
الرابع	طرق التحكم في بدء تشغيل المحركات الحثية وهي التشغيل المباشر التشغيل بواسطة مفتاح ستار -دلتا التشغيل بواسطة المحول الذاتي - التشغيل عن طريق ربط مقاومات بالتوالي مع الجزء الدوار
الخامس	العلاقة بين العزم ومعامل القدرة - العلاقة بين العزم والانزلاق عزم بدء الدوران - شرط اقصى عزم بدء -عزم الدوران- شرط اقصى عزم الدوران -الدائرة المكافئة للمحرك الحثي- امثلة حسابية
السادس	عكس اتجاه دوران المحركات الحثية ثلاثية الاطوار-طرق اييقاف المحركات الحثية - السيطرة على المحركات الحثية باستخدام جهد المصدر - عدد الاقطاب - تردد المصدر-وضع مقاومة في دائرة الجزء الدوار تشغيل محركين على التوالي

السابع	المحركات الحثية احادية الطور – انواعها – تركيبها – نظرية التشغيل – كيفية الحصول على عزم ابتدائي شرح مفصل عن انواع المحركات الحثية احادية الطور 1-المحرك الحثي ذو الطور المنقسم 2-المحرك الحثي ذو متسعة البدء 3المحرك الحثي ذو متسعة البدء والدوران 4-المحرك الحثي ذو القطب المظلل 5- المحرك التنافري 6المحرك العام عكس اتجاه الدوران لكل نوع
الثامن	المولدات التزامنية تركيبها – مبادئ العمل – انواع المولدات بالنسبة الى العضو الدوار معامل الخطوة – معامل التوزيع معادلة القوة الدافعة الكهربائية في حالة الحمل (مقاوم -- حثي- سعوي) ورسم المخططات الطورية لكل حمل معدل تنظيم الجهد –مسائل متنوعة
التاسع	مقارنة بين مولدات التيار المستمر ومولدات التيار المتناوب اسباب جعل المنتج في المولدات التزامنية ثابتا تشغيل المولدات على التوازيالتوازي اسباب وشروط تشغيل المولدات التزامنية على التوازي شرح عملية التزامن-معدل تنظيم الجهد مسائل متنوعة
العاشر	المحركات التزامنية- تركيب ومبادئ العمل في المحركات التزامنية بدء التشغيل في المحركات التزامنية -المحرك التزامني في حالة الحمل المخطط الطوري في حالة عامل قدرة الوحدة –عامل قدرة متقدم – عامل قدرة متأخر حساب قيمة القوة الدافعة الكهربائية العكسية
الحادي عشر	الاستخدامات العملية – معدل تنظيم السرعة محرك شراجا – التركيب – نظرية العمل – تنظيم السرعة مراجعة عامة حول محركات التيار المتناوب
الثاني عشر	المحرك العام – تركيبه وخواصه واستخداماته المحرك التنافري – تركيبه ونظرية عمله وخواصه واستخداماته
الثالث عشر	محركات التحكم - انواعها – تركيبها – نظرية عملها - الشروط الواجب توافرها في محركات التحكم – خواصها
الرابع عشر	محركات الخطوة - تركيبها – التطبيقات التي تستخدم فيها التمييز بين انواعها نظرية عمل محركات الخطوة – حساب خطوة المحرك - كتابة الجداول المنطقية لدوران امحرك الخطوة في الاتجاه المطلوب
الخامس عشر	مولدات التاكو - انواع التاكومترات والتمييز بينها - اسباب الخطأ في قراءة التاكومترات وطرق تلافيها – كيفية معايرة التاكومترات

Single Phase Transformers

المحولات الكهربائية أحادية الوجه

تلعب المحولات الكهربائية دوراً مهماً في الحياة العصرية حيث تستخدم بصورة واسعة في الحياة العملية بقدرات وجهود مختلفة حيث تستخدم بقدرات عالية في رفع أو خفض الجهد الكهربائي عند توليد ونقل القدرة الكهربائية، كما تستخدم المحولات الكهربائية في كثير من الأجهزة الكهربائية وأجهزة القياس والدوائر الإلكترونية.

المحول الكهربائي هو جهاز كهرومغناطيسي ساكن (لا يحتوي على أجزاء متحركة مثل الآلات الكهربائية الأخرى) يستخدم في تحويل القدرة الكهربائية في دوائر التيار المتردد من دائرة ذات جهد أو تيار معين إلى دائرة أخرى بنفس التردد عند جهد أو تيار آخر. ويعتبر المحول الكهربائي تطبيقاً مباشراً لقانون "فاراداي" للحث الكهرومغناطيسي والذي يعتمد على توليد القوة الدافعة الكهربائية استاتيكيةاً بسبب تغير المجال المغناطيسي كما أشرنا في الوحدة الأولى. وسوف نتعرف في هذه الوحدة على نظرية عمل المحول وتركيبه وكذلك أنواعه المختلفة وطرق ترتيب الملفات فيها. أيضاً سوف نستنتج الدائرة المكافئة للمحول نظرياً وكيفية الحصول عليها عملياً. ومن المهم أيضاً دراسة أداء المحول في حالات التحميل المختلفة وحساب المفاوיד والكفاءة. وفي النهاية سوف نتعرض إلى نوع خاص من المحولات وهو المحول الذاتي نظراً لاستخداماته المتعددة وخصوصاً في المختبرات للحصول على مصدر جهد متغير.

٤- ١ أنواع المحولات الكهربائية :

يمكن تقسيم المحولات بعدة طرق مختلفة من أهمها أن يتم التقسيم بناءً على نوع الخدمة التي تقدمها كما يلي:

- **محولات القوى Power Transformers:** وهي تلك المحولات ذات القدرات العالية التي تستخدم في رفع أو خفض الجهد في منظومات وخطوط النقل كما في شكل ٤ - ١.



شكل ٤ - ١ محول قدرة

- **محولات التوزيع Distribution Transformers** : وهي المحولات التي تستخدم في استلام الطاقة الكهربائية من شبكات التوزيع وتسليمها إلى الأحمال وهي عادة محولات خفض. شكل ٤ - ٢ يوضح محول توزيع يستخدم في شبكات التوزيع الكهربائية.



شكل ٤ - ٢ محول توزيع

- **محولات الأجهزة Instrument Transformers** : وهي تستخدم في أجهزة قياس الجهد والتيار العالي كما في شكل ٤ - ٣ والتي تستعمل في أجهزة الحماية، وأيضا كحساس للجهد والتيار في أنظمة التحكم حتى تعمل تلك الأجهزة على جهود والتيارات آمنة.



ب . محول تيار



أ . محول جهد

شكل ٤ - ٣ محولات قياس

- **محولات التأريض Earthing Transformers** : وتستخدم لإيجاد مسار أرضي في منظومات الدلتا وعادة تتكون من ملف واحد. وتفيد تلك المحولات في منظومات التوزيع على جانب الحمل حيث يمكن عن طريقها عمل الحماية من الخطأ الأرضي.

- **محولات خاصة :** وهي المحولات التي تستخدم بطريقة خاصة بحيث يتطلب بعض التغييرات في تصنيعها مثل محولات الأفران ومحولات لحام القوس الكهربائي ومحولات اختبار شدة العزل .

- **المحولات الصغيرة:** وهي المحولات ذات المقننات الصغيرة مثل محولات الإضاءة ومحولات الأجراس ومحولات لعب الأطفال كما في شكل ٤ - ٤.



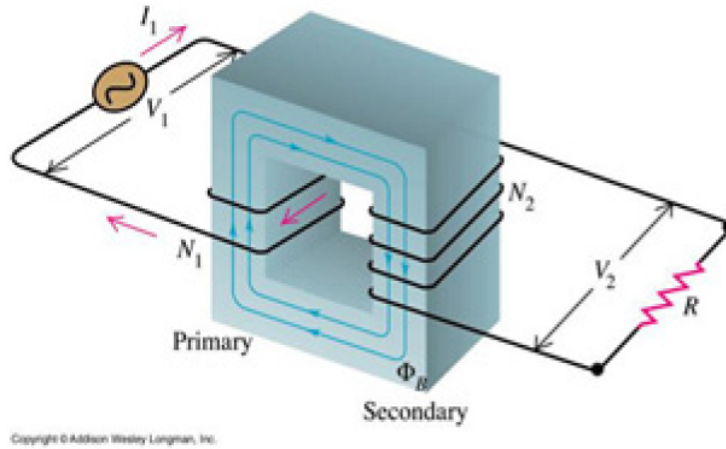
شكل ٤ - ٤ محولات ذات قدرات صغيرة

٤ - ٢ نظرية عمل المحول

يقوم عمل المحول على التأثير المتبادل بين دائرتين معزولتين كهربائياً ومرتبطتين بتدفق مغناطيسي متغير وهو في أبسط صورة يتكون من ملفين متقاربين ومعزولين كهربائياً وملفوفين على قلب (core) من شرائح الحديد كما هو موضح في شكل ٤ - ٥، وهذا القلب يربط الملفين مغناطيسياً. فإذا وصل جهد متردد بأحد الملفين فإنه ينشأ في القلب الحديدي تدفق مغناطيسي (Magnetic flux) متردد أيضاً، ويتشابك هذا الفيض مع الملف الآخر ويتولد به قوة دافعة كهربائية مستنتجة بالتأثير المتبادل تبعا لقانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي. فإذا وصل حمل بهذا الملف يمر فيه تيار، والملف الأول والذي يتصل بمنبع الجهد يطلق عليه الملف الابتدائي (primary winding) وهو ذو عدد لفات N_1 ، أما الملف الآخر المتصل بالحمل فيطلق عليه الملف الثانوي (secondary winding) وعدد لفاته N_2 . يسمى أحيانا الملفان بدلالة الجهد على كل منهما فيسمى الملف ذو الجهد الأكبر بملف الجهد العالي، ويسمى الملف ذو الجهد الأقل بملف الجهد المنخفض. وتجدر الإشارة إلى أن بعض المحولات تحتوي فقط على ملف واحد حيث يقوم هذا الملف بعمل كل من الملف الابتدائي والملف الثانوي وتسمى هذه المحولات بالمحولات الذاتية auto transformer.

تذكر دائماً أن المحول الكهربائي يستعمل مع التيار المتردد ولا يستعمل مع التيار المستمر،

لماذا؟



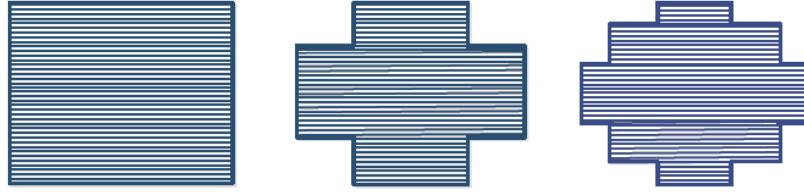
شكل ٤ - ٥ محول كهربائي في أبسط صورة

٤ - ٢ تركيب المحول

يتكون المحول من الأجزاء الآتية: القلب الحديدي (core)، الملفات (windings) بخلاف أوعية مناسبة لجمع القلب والملفات وعوازل مناسبة لعزل وحمل أطراف الملفات وأجهزة الوقاية والتبريد.

- القلب الحديدي (core): وهو يشكل المسار للفيض المغناطيسي للمحول ويصنع عادة من الصلب السليكوني والذي يتميز بنفاذية مغناطيسية عالية وبالتالي كفاءة عالية لتحويل الطاقة. كما أنه يمكن مغنطته بسهولة. ويتكون القلب الحديدي من سيقان (legs) توضع عليها الملفات وعوارض (yoke) لتكملة الدائرة المغناطيسية. ويتم تصنيع القلب من رقائق (laminations) من الصلب السليكوني (لتقليل المفاقيد الحديدية)، والتي سمكها يتراوح من 0.35mm إلى 0.5mm وتعزل الرقائق عن بعضها البعض بطبقة من الورق بسمك 0.02mm إلى 0.03mm والذي يلصق على أحد وجهي كل رقيقة، أو من الورنيش الذي يدهن به أحد وجهي الرقيقة. والهدف من هذا العزل هو التقليل من مفاقيد التيارات الإعصارية. ومقطع الساق يأخذ عدة أشكال، فإما أن يكون على شكل مربع أو صليب في المحولات صغيرة ومتوسطة القدرة، وإما أن يكون متدرجاً كما في المحولات الكبيرة القدرة. ويوضح شكل ٤ - ٦ عدة أشكال لمقاطع مختلفة للساق.

تربط الرقائق معاً بواسطة أحزمة في المحولات الصغيرة أو بمسامير في حالة المحولات الكبيرة، بحيث لا ينتج عنها طنين بسبب الاهتزازات الناشئة عن القوى المغناطيسية. وتعشق رقائق الساق مع رقائق العارضة مكونة بذلك القلب الحديدي.

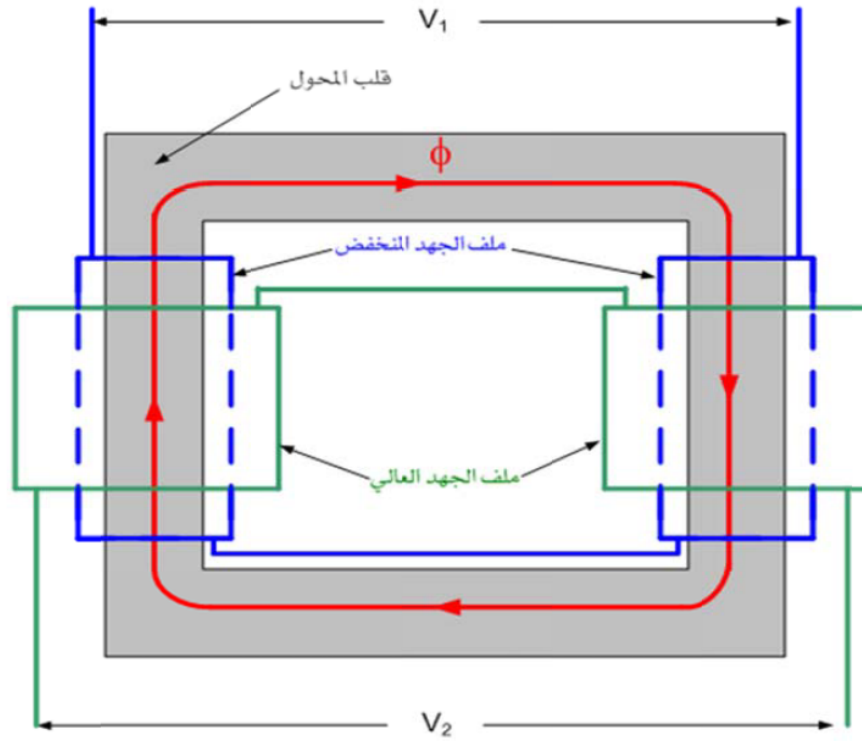


شكل ٤ - ٦ مقاطع مختلفة للساق (Leg)

يمكن لقلب المحول أن يأخذ أحد تكوينين رئيسيين، حيث يتم الإشارة لنوع المحول بناءً على شكل أو تكوين القلب حيث يوجد نوعان رئيسيان:

أ. المحول القلبي Core Type Transformer : شكل ٤ - ٧ يبين تكوين محول قلب أحادي الوجه وطريقة وضع الملفين الابتدائي والثانوي، وكذلك مسار الفيض المغناطيسي داخل قلب المحول. ويمكن ملاحظة أن كلاً من الملف الابتدائي والثانوي يتكون من نصفين على سيقان المحول، ويصل هذين النصفين معاً على التوالي أو التوازي كما يمكن ملاحظة أن الملفين الابتدائي والثانوي متمركزان مع قلب المحول.

يتكون القلب الحديدي في هذا النوع كما في شكل ٤ - ٧ من ساقين توضع عليهما الملفات وعارضتان لتكملة القلب الحديدي، وتكون الرقائق على شكل حرف L كما في شكل ٤ - ٨ ثم تجمع مع بعضها واحدة بعد الأخرى كما في شكل ٤ - ٩، وتتكون الدائرة المغناطيسية في هذا النوع من مسار واحد فقط، مما يميز هذا التصميم بالبساطة، كما أنه يسهل عزل الملفات.



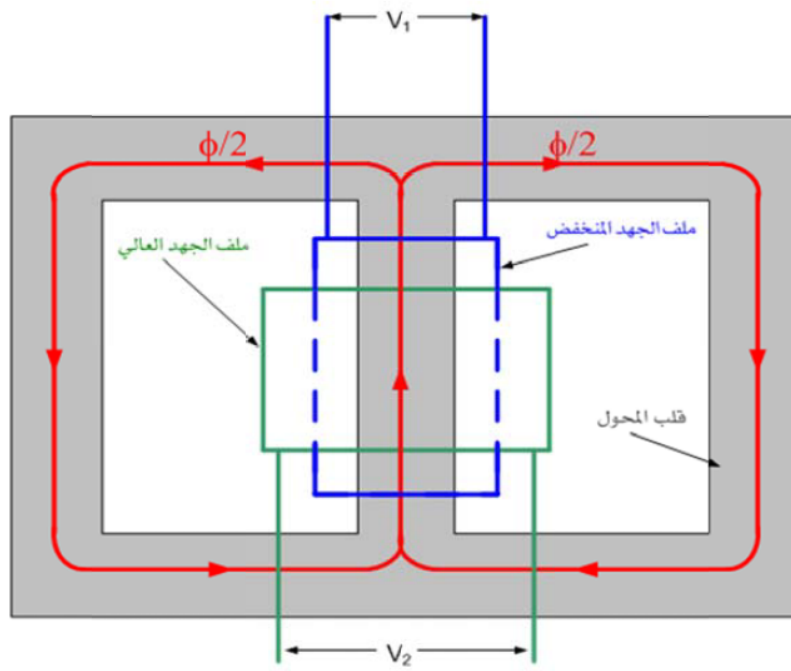
شكل ٤ - ٧ المحول القلبي أحادي الطور

شكل ٤ - ٨ الرقائق المكونة للقلب الحديدي في المحول القلبي

شكل ٤ - ٩ طريقة تجميع الرقائق المكونة للقلب الحديدي في المحول القلبي

ب. المحول القشري Shell Type Transformer: شكل ٤ - ١٠ يبين تكوين

محول قشري أحادي الوجه حيث يتم ترتيب وضع الملفات على قلب المحول بحيث يتكون مساران متوازيان للفيض المغناطيسي ويحيط كل مسار بملفي المحول.

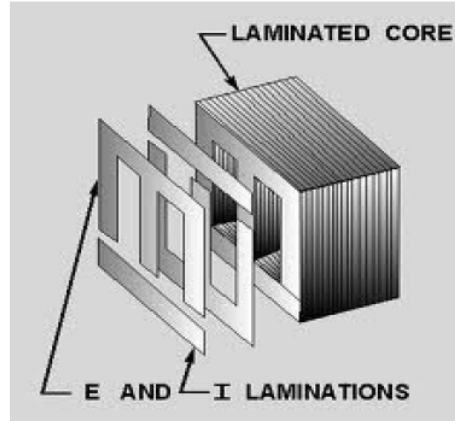


شكل ٤ - ١٠ المحول القشري أحادي الطور

في هذا النوع تكون الرقائق على أشكال حرف E وحرف I كما في شكل ٤ - ١١ ، وتجمع الرقائق مع بعضها بحيث توضع رقيقة على شكل E مع رقيقة على شكل I ، ثم توضع رقيقة على شكل I مع رقيقة على شكل E كما في شكل ٤ - ١٢ ، وتكرر هذه العملية حتى تتركب الرقائق بأكملها ، وتتكون الدائرة المغناطيسية من مسارين بالتوازي يشترك في تكوينها الساق الوسطى التي يجب أن تكون مساحتها ضعف مساحة أي من الساقين الآخرين. وتوضع ملفات الابتدائي والثانوي حول الساق الوسطى ، ولذلك يمتاز هذا النوع بأن الملفات تكون في حماية من الأضرار الميكانيكية.



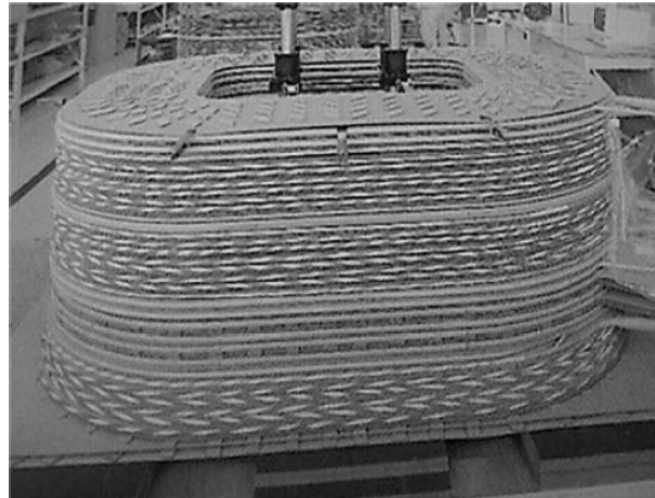
شكل ٤ - ١١ الرقائق المستخدمة في القلب الهيكلي



شكل ٤ - ١٢ طريقة تجميع الرقائق المكونة للقلب الحديدي في المحول القشري

- الملفات (Windings): يلعب وضع وشكل وطريقة تركيب ولف الملفات دوراً مهماً له تأثير كبير على أداء وخواص المحول حيث تؤثر على كفاءة المحول وقدرته على مقاومة الإجهادات الميكانيكية والحرارية التي يتعرض لها أثناء التركيب والتشغيل. والخبرة المتبعة هي وضع الملفين الابتدائي والثانوي متمركزين مع المحور الهندسي لعضو القلب المخصص لذلك (سيقان المحول)، بحيث يوضع الملف ذو الجهد المنخفض مجاوراً لقلب المحول ويتم اللف بحيث يشمل العضو بالكامل. وتوجد أربعة طرق رئيسية من اللف:

أ. **اللف اللولبي Pancake Type**: ويعتبر أبسط أنواع اللف، والملف إما أن يكون سابق التشكيل أو يلف مباشرة على اسطوانة عازلة. ويلاحظ أن يتم عزل كل لفعة عن اللفة التي تجاورها. ويستعمل اللف اللولبي في الملفات التي تحمل تيارات كبيرة، شكل ٤ - ١٣ يعرض صورة ملف من هذا النوع.



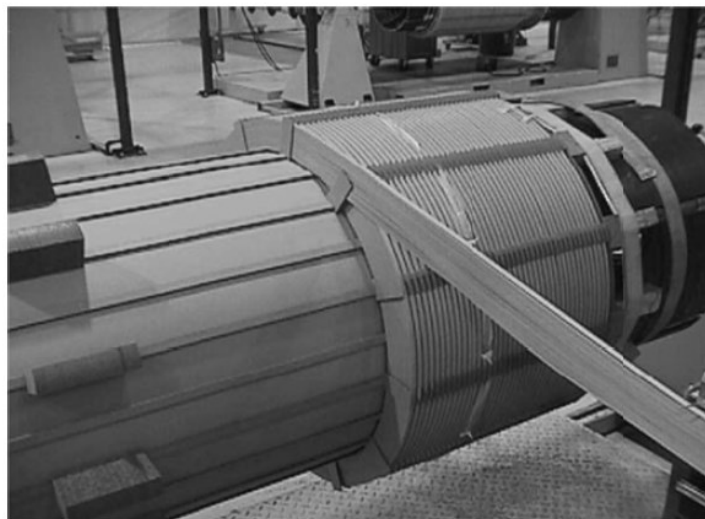
شكل ٤ - ١٣ ملف ملفوف بطريقة اللف اللولبي

ب. اللف المفرق crossover Type: يتم تكوين الملف الكلي في هذا النوع عن طريق توصيل مجموعة من الوحدات على التوالي. تتكون كل وحدة من عدة طبقات وكل طبقة من عدة لفات كما في شكل ١٤ - ٤



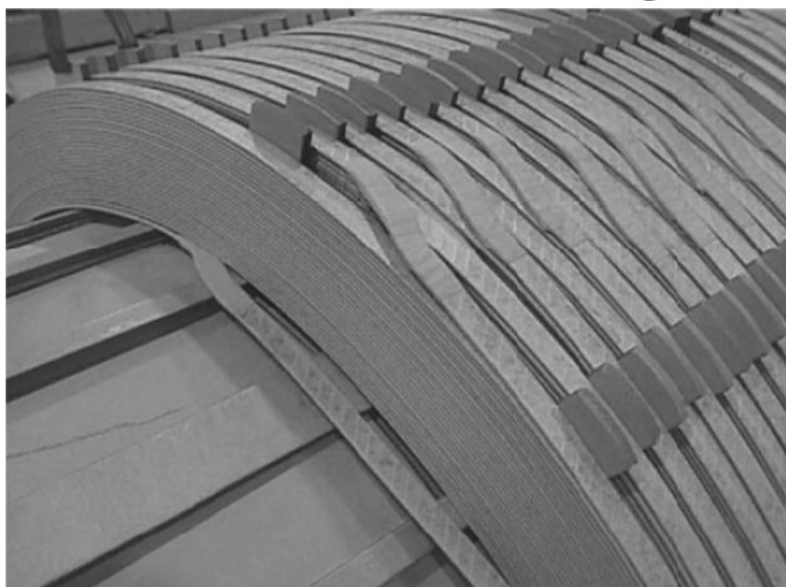
شكل ١٤ - ٤ ملف ملفوف بطريقة اللف المفرق

ت. اللف الحلزوني Helical Type: يتم اللف في هذه الطريقة بحيث تتكون كل لفة على حدة من موصل يتكون من عدد من الشرائح مستطيلة المقطع وبحيث تشغل كل لفة العمق القطري للملف (أي أن سمك اللفة هو نفسه سمك الملف) ويستعمل هذا النوع للمحولات الكبيرة حتى جهد ٣٣ كيلو فولت وللتيارات المتوسطة. شكل ١٥ - ٤ يبين هذا النوع من اللف.



شكل ١٥ - ٤ ملف ملفوف بطريقة اللف الحلزوني

ث. **اللف القرصي Disc Type**: يتم اللف القرصي بحيث يتكون الملف الكلي من عدد من الأقراص، ويتكون كل قرص من عدد من اللفات الملفوفة في اتجاه نصف قطري فوق بعضها بحيث تتصل الأقراص ببعضها دون انقطاع. يتميز هذا النوع من اللف بالمتانة الميكانيكية العالية والمقاومة للإجهادات الناشئة في الظروف الصعبة. شكل ١٦ - ٤ يبين هذا النوع من اللف.



شكل ١٦ - ٤ ملف ملفوف بطريقة اللف القرصي

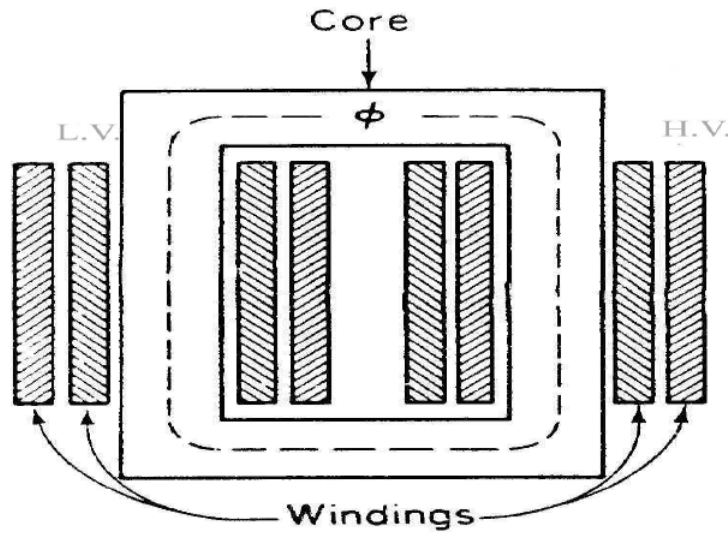
٤-٤ طريقة ترتيب الملفات

تتقسم الملفات حسب طريقة وضعها حول الساق إلى ملفات متمركزة، أي متحدة المركز وملفات متداخلة (Sandwich).

٤-٤-١ الملفات المتحدة المركز

وتسمى بهذا الاسم لأنها تصنع على هيئة أسطوانات وتستعمل في المحولات ذات القلب المركزي. ويوضح شكل ٤-١٧ كيفية ترتيب هذه الملفات، حيث توضع ملفات أسطوانية حول سيقان المحول وقد تكون هذه الملفات مستطيلة إذا كان مقطع الساق مستطيلاً، وقد تكون قضبان من النحاس موصلة مع بعضها بالتوازي في المحولات كبيرة القدرة، وتغلى هذه القضبان بطبقة من الورنيش ثم يلف حولها شريطاً من الورق سمكه 0.05mm ثم يلف عليه شريطاً من القطن بسمك 0.1mm لكي يحفظ شريط الورق.

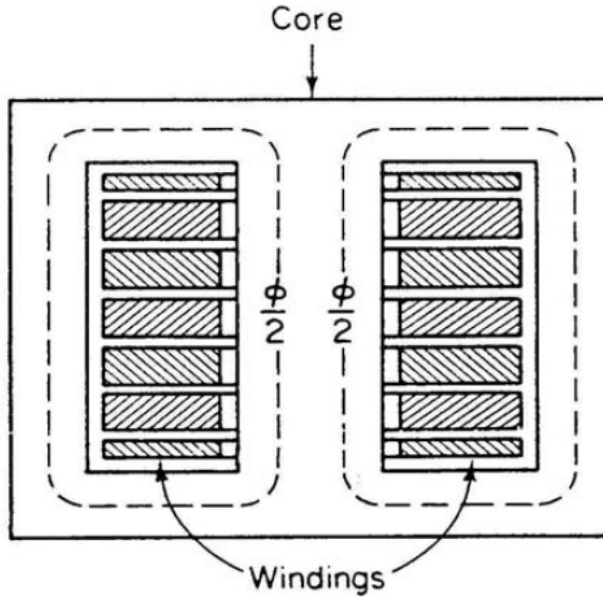
ترتب الملفات حول الساق بحيث يوضع أولاً أسطوانة من الورق أو البكالييت حول الساق وذلك لعزل الساق عن الملفات، ثم يوضع حول أسطوانة الورق أسطوانة ملفات الجهد المنخفض وذلك لسهولة عزلها عن الساق، ثم يترك حيز أسطوانتي يمتلئ بالزيت وذلك لتبريد المحول. ثم بعد ذلك توضع أسطوانة ملفات الجهد العالي.



شكل ٤-١٧ ترتيب الملفات المركزية للمحول

٤ - ٤ - ٢ الملفات المتداخلة

وتسمى بالملفات القرصية، نظراً لأنها على هيئة أقراص وتستعمل في المحولات الهيكلية ، وترتب بحيث يوضع قرص من ملف الجهد العالي وفوقه قرص من ملف الجهد المنخفض ، ثم قرص من ملف الجهد العالي وهكذا حتى يتم تركيب بقية الأقراص مع مراعاة أن يوضع نصف قرص من ملفات الجهد المنخفض عند النهايتين، أي أعلى وأسفل الملفات وذلك بسبب سهولة عزل ملفات الجهد المنخفض عن الحديد، كما هو موضح في شكل ٤ - ١٨.

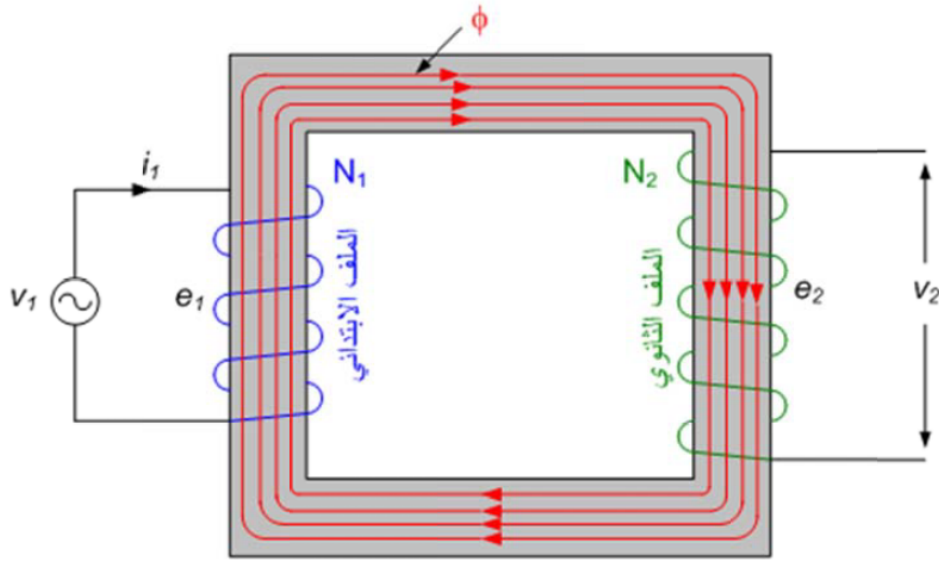


شكل ٤ - ١٨ ترتيب الملفات القرصية للمحول

يمكن أيضاً استخدام الملفات القرصية مع القلب المركزي، كما يمكن أن تستخدم الملفات الأسطوانية مع القلب الهيكلية بنفس الترتيب الذي ذكر في الحالتين.

٤- ٥ معادلة القوة الدافعة الكهربائية

تعتمد نظرية عمل المحرك كما سبق شرحه على الحث الكهرومغناطيسي، فعند توصيل الملف الابتدائي للمحول إلى مصدر للجهد المتردد يمر تيار متردد في الملف الابتدائي للمحول كما في شكل ٤ - ١٩، وهذا التيار يصاحبه مجال مغناطيسي متردد أيضاً (أي تتغير قيمته باستمرار) له نفس تردد التيار المسبب له (تردد المصدر). هذا المجال المغناطيسي يمر في القلب الحديدي ويتشابك مع كل من الملف الابتدائي والملف الثانوي وبالتالي تتكون قوة دافعة كهربائية في كل من الملفين، هذه القوة الدافعة المتولدة بالحث تتناسب مع عدد اللفات في كل ملف ومع معدل تغير الفيض المغناطيسي بالنسبة للزمن



شكل ٤ - ١٩ الدائرة التخطيطية للمحول

ويمكن إثبات أن:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4-1)$$

وبالمثل فإن القوة الدافعة المتولدة في الملف الثانوي تكون متناسبة مع عدد لفات الملف

الثانوي ومع معدل تغير المجال بالنسبة للزمن وعلى ذلك فإن:

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (4-2)$$

ومن المعادلتين السابقتين يمكن استنتاج أن:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4-3)$$

يمكن اعتبار الفيض المغناطيسي في المحول المثالي عبارة عن موجة جيبية.

$$\phi(t) = \phi_m \sin(\omega t) \quad (4-4)$$

حيث ϕ_m هي القيمة العظمى للمجال المغناطيسي. $\omega = 2\pi f$ ، f هو تردد المصدر.

وبحساب $\frac{d\phi}{dt}$ من المعادلة (4-4) والتعويض عنها في المعادلة (4-1) نحصل على العلاقة التالية:

$$e_1(t) = N_1 \phi_m \omega \cos \omega t = 2\pi N_1 \phi_m f \cos \omega t \quad (4-5)$$

وبكتابة المعادلة السابقة بالصيغة المتبعة :

$$e_1(t) = \sqrt{2} E_1 \cos \omega t$$

حيث E_1 هي القيمة الفعالة للجهد المتولد في الملف الابتدائي :

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m f$$

نجد أن المعادلة التي تحدد قيمة القوة الدافعة المتولدة E_1 يمكن كتابتها كما يلي:

$$E_1 = 4.44 N_1 \phi_m f \quad (4-6)$$

بنفس الطريقة السابقة يمكن استنتاج معادلة القوة التأثيرية المتولدة في الملف الثانوي،

وتكون المعادلة كالتالي:

$$E_2 = 4.44 N_2 \phi_m f \quad (4-7)$$

ويمكن أيضاً من المعادلة (4-6) والمعادلة (4-7) أن نثبت النسبة بين القوة الدافعة المتولدة في

الملف الابتدائي والقوة الدافعة المتولدة في الملف الثانوي مساوية للنسبة بين عدد اللفات في كل

منهما كإيلي:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4-8)$$

وتسمى النسبة بين القوة الدافعة المتولدة في ملفات الملف الابتدائي والقوة الدافعة في ملفات

الملف الثانوي بنسبة التحويل وهي تساوي أيضاً النسبة بين عدد ملفات الملف الابتدائي وعدد

لفات الملف الثانوي. وتقاس قدرة المحول عادة بالقدرة الظاهرية "S" أو KVA وحاصل ضرب

الجهد على الملفات الابتدائية في التيار المار به تساوي أيضاً حاصل ضرب الجهد على الملفات

الثانوية في التيار المار بها كما في المعادلة التالية:

$$S = V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \quad VA \text{ or } KVA \quad (4-9)$$

مثال ٤ - ١

محول أحادي الوجه يعمل على جهد تردده 60 Hz، فإذا كان القلب الحديدي على شكل مربع المقطع طول ضلعه 20cm وكثافة الفيض المغناطيسي العظمى المسموح بها للمرور في القلب الحديدي 10000 lines/cm^2 - احسب عدد الملفات المطلوب وضعها لكل من الملف الابتدائي والثانوي لتكون نسبة تحويل الجهد $3000/220 \text{ V}$.

الحل :

$$B=10000 \text{ lines/cm}^2, \quad A=20 \times 20 = 400 \text{ cm}^2, \quad E_1=3000 \text{ V}, \quad E_2=220 \text{ V}, \\ f=60 \text{ Hz}$$

$$\phi_m = B_m A = 10000 \times 400 \times 10^{-8} = 0.04 \text{ Wb}$$

$$E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44 f \phi_m} = \frac{3000}{4.44 \times 60 \times 0.04} = 282 \text{ turns}$$

$$E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$$

$$N_2 = \frac{E_2}{4.44 f \phi_m} = \frac{220}{4.44 \times 60 \times 0.04} = 21 \text{ turns}$$

٤- ٦ المحول المثالي والدائرة المكافئة

٤- ٦- ١ المحول المثالي:

المحول المثالي هو افتراض نظري فقط ويستخدم لفهم المحول الحقيقي. والمحول المثالي يتركب من ملفين لهما ممانعة حثية فقط وهما ملفوفان حول قلب من الحديد كما في شكل ٤- ٢٠، ويوصل الملف الابتدائي بمصدر للجهد المتردد كما سبق شرح ذلك بينما يوصل الملف الثانوي بالحمّل، ويفترض في المحول المثالي الافتراضات التالية:

- لا يوجد فقد في الطاقة حيث تنتقل الطاقة من دائرة الملف الابتدائي إلى دائرة الملف الثانوي دون أي فقد وهذا معناه

$$E_1 \times I_1 = E_2 \times I_2 \quad (4-10)$$

وبالتالي يمكن من المعادلة 4-10 والمعادلة 4-8 استنتاج أن:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4-11)$$

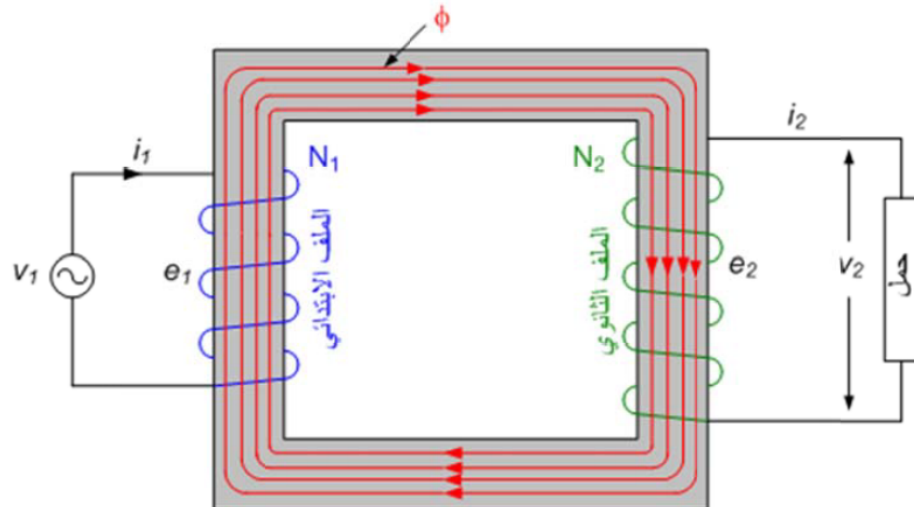
- أيضاً يفترض في المحول المثالي أن الملفات ليس لها مقاومة لممر التيار كذلك لا يوجد تسرب في الفيض المغناطيسي وهذا معناه أن:

$$V_1 = E_1 \quad ; \quad V_2 = E_2$$

وبالتالي نستنتج أن:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4-12)$$

القلب الحديدي له مغناطيسية لانهاية أي أنه لا يحتاج إلى تيار المغنطة.



شكل ٤- ٢٠ الدائرة التخطيطية للمحول في حالة التحميل

مثال ٤ - ٢

محول أحادي الوجه قدرته 25kVA وعدد لفات الابتدائي ٥٠٠ لفة والثانوي ٥٠ لفة وصل الملف الابتدائي إلى منبع جهد قيمته 3000V، احسب ما يلي :

١. تيار الملف الابتدائي .
٢. تيار الملف الثانوي عند الحمل الكامل .
٣. القوة الدافعة الكهربائية في الثانوي .
٤. أقصى تدفق في الدائرة المغناطيسية .

الحل :

$$\begin{aligned}
 S &= 25 \text{ kVA}, \quad N_1 = 500 \text{ turns}, \quad N_2 = 50 \text{ turns}, \quad V_1 = 3000 \text{ V} \\
 \frac{V_1}{V_2} &= \frac{N_1}{N_2} \\
 \frac{3000}{V_2} &= \frac{500}{50} \\
 V_2 &= \frac{3000 \times 50}{500} = 300 \text{ V} \\
 I_1 &= \frac{S}{V_1} = \frac{25000}{3000} = 8.33 \text{ A} \\
 I_2 &= \frac{S}{V_2} = \frac{25000}{300} = 83.3 \text{ A} \quad \text{ro} \quad I_2 = \frac{I_1 N_1}{N_2} = \frac{8.33 \times 500}{50} = 83.3 \text{ A} \\
 E_1 &= 4.44 f \phi_m N_1 \\
 \phi_m &= \frac{E_1}{4.44 \times f \times N_1} = \frac{3000}{4.44 \times 50 \times 500} = 0.027 \text{ Wb}
 \end{aligned}$$

مثال ٤ - ٣ محول أحادي الوجه قدرته 5kVA، جهده 440/110V ويعمل على تردد 60Hz ويغذي حمل بتيار مقداره 35A عند معامل قدرة 0.8 متقدم وعند الجهد المقنن. باعتبار المحول مثالي، أوجد ما يلي :

١. جهد الملف الابتدائي .
٢. تيار الملف الابتدائي .
٣. معاوقة الحمل .

الحل :

$$\begin{aligned}
 S &= 5 \text{ kVA}, \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{440}{110} = 4, \quad f = 60 \text{ Hz}, \quad I_2 = 35 \text{ A}, \text{ P.F} = 0.8 \text{ leading} \\
 V_2 &= 110 \angle 0 \text{ volt} \quad I_2 = 35 \angle \cos^{-1} 0.8 = 35 \angle 36.87^\circ \text{ Amp.} \\
 \frac{V_1}{V_2} &= \frac{I_2}{I_1} \\
 \therefore I_1 &= \frac{V_2 I_2}{V_1} = \frac{110 \times 35 \angle 36.87^\circ}{440} = 8.75 \angle 36.87^\circ \text{ A} \\
 Z_L &= \frac{V_2}{I_2} = \frac{110 \angle 0}{35 \angle 36.87^\circ} = 3.14 \angle 36.87^\circ \Omega
 \end{aligned}$$

٤ - ٦ - ٢ الدائرة المكافئة

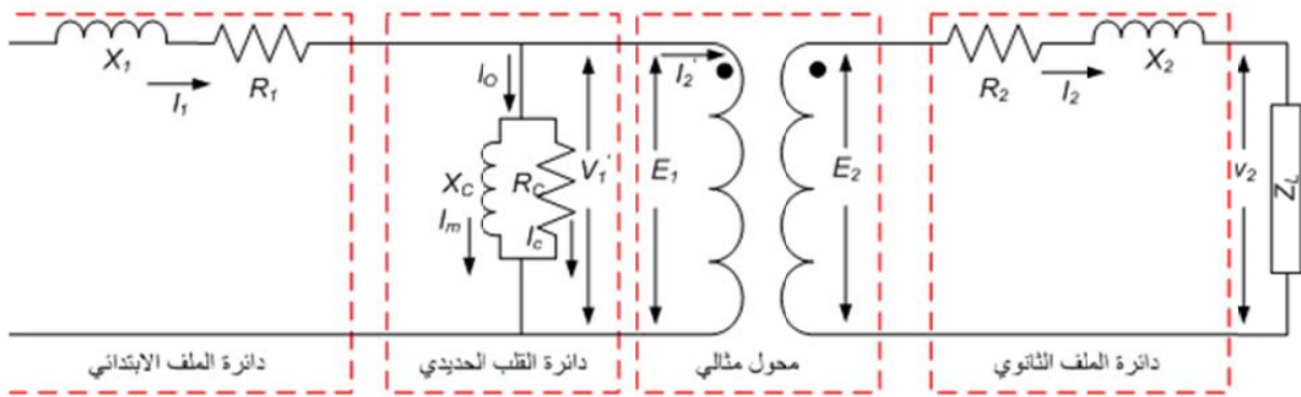
يجدر الإشارة قبل البدء في استنتاج الدائرة المكافئة للمحول بأن الدائرة المكافئة للمحول دائرة افتراضية ليس لها وجود في الطبيعة ولكنها فقط تستخدم لتبسيط المعادلات الرياضية والعمليات الحسابية المستخدمة للتعرف على أداء المحول في ظروف التشغيل المختلفة. بالرجوع إلى شكل ٤ - ٢٠ نجد أن هناك دائرتين كهربائيتين منفصلتين كهربائياً عن بعضهما تماماً دائرة خاصة بالملف الابتدائي ودائرة خاصة بالملف الثانوي، كما يشمل المحول القلب الحديدي والذي تتكون فيه قوة دافعة كهربائية أيضاً نتيجة لوجود المجال المغناطيسي المتردد ويمر به تيار المغنطة وتيارات دوامية، وكل دائرة منها يمكن تمثيلها كهربائياً كما يلي:

أولاً/ دائرة الملف الابتدائي: تتكون من مصدر للجهد V_1 ومقاومة الملفات R_1 والممانعة الحثية للملفات X_1 وكذلك القوة الدافعة الكهربائية E_1 المتولدة بالحث الكهرومغناطيسي ويمر بها التيار I_1

ثانياً/ دائرة الملف الثانوي: تتكون من القوة الدافعة الكهربائية E_2 المتولدة بالحث الكهرومغناطيسي ومقاومة الملفات R_2 والممانعة الحثية للملفات X_2 ومعاوقة الحمل Z_2 والتي يمر بها التيار I_2 ويحدث عليها فرق جهد V_2 .

ثالثاً/ الدائرة التي تمثل القلب الحديدي: للتعبير عن الفقد في القدرة الكهربائية نتيجة للتيارات الدوامية كما تعبر عن تيار المغنطة والذي يتسبب في وجود الفيض المغناطيسي. وتحتوي هذه الدائرة على مقاومة R_C وممانعة X_C . ويتم توصيل هذه الدائرة على التوازي مع دائرة الملف الابتدائي.

شكل ٤ - ٢١ يمثل الدائرة التي تعبر عن مكونات المحول الثلاث وكيفية توصيلها معاً لاستنتاج الدائرة المكافئة.



شكل ٤ - ٢١ الدوائر الممثلة لأجزاء المحول

حيث:

R_1 :	مقاومة ملفات الملف الابتدائي بالأوم
R_2 :	مقاومة ملفات الملف الثانوي بالأوم
X_1 :	ممانعة التسرب الحثية بملفات الملف الابتدائي بالأوم
X_2 :	ممانعة التسرب الحثية بملفات الملف الثانوي بالأوم
R_c :	المقاومة المعبرة عن المفاقد الحديدية في القلب الحديدي بالأوم
X_c :	ممانعة القلب الحديدي بالأوم
Z_L :	معاوقة الحمل بالأوم
I_1 :	التيار المار المسحوب من المصدر بالأمبير
I_2 :	التيار المار في الملفات الثانوية بالأمبير وهو نفسه تيار الحمل
I_0 :	تيار اللاحمل بالأمبير
I_c :	المركبة الفعالة لتيار اللاحمل بالأمبير وهي المسببة لفقد الحديدي
I_m :	المركبة الغيرفعالة لتيار اللاحمل بالأمبير وهي المسببة للمجال المغناطيسي
V_1 :	جهد المصدر بالفولت
V_2 :	الجهد على أطراف الحمل بالفولت
E_1 :	الجهد المتولد على أطراف الملف الابتدائي للمحول المثالي
E_2 :	الجهد المتولد على أطراف الملف الثانوي للمحول المثالي

لاستنتاج الدائرة المكافئة يجب أن تكون القدرة المنقولة عبر المحول المثالي من جهة الملف الابتدائي مساوية للقدرة في جهة الملف الثانوي أي أن:

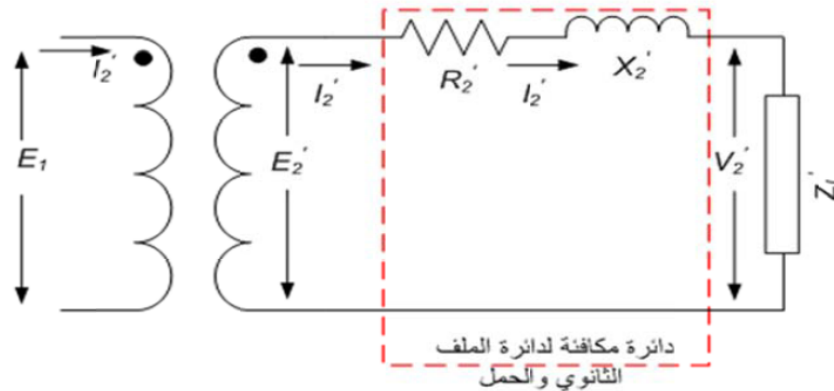
$$E_1 \times I_2' = E_2 \times I_2$$

وعلى ذلك فإن :

$$\frac{I_2'}{I_2} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4-13)$$

ويمكن استبدال دائرة الملف الثانوي بدائرة أخرى مكافئة لها ولكن جهدها يكون مساوياً لجهد الملف الابتدائي كما في شكل ٢٢ - ٤ وذلك لكي نتمكن من ربط دائرة الملف الابتدائي بدائرة الملف الثانوي

لإيجاد الدائرة المكافئة للمحول فإن الجهد على الملف الثانوي للدائرة المكافئة يجب أن يكون مساوياً للجهد في الملف الابتدائي.



شكل ٢٢ - ٤ استبدال دائرة الملف الثانوي بدائرة أخرى مكافئة لها وجهدا مساوياً لجهد الملف الابتدائي تمهيداً لاستنتاج الدائرة المكافئة للمحول

وبالرجوع إلى شكل ٤ - ٢٢ والأخذ في الاعتبار تساوي القدرة والمفاقيد بين دائرة الملف الثانوي والدائرة المكافئة لها وتساوي القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الدائرة المكافئة بالقوة الدافعة للملف الابتدائي يمكن استنتاج العلاقات التالية:

$$I'_2 = I_2 \times \frac{N_2}{N_1} \quad (4-14)$$

$$E'_2 = E_2 \times \frac{N_1}{N_2} \quad (4-15)$$

$$V'_2 = V_2 \times \frac{N_1}{N_2} \quad (4-16)$$

$$R'_2 = R_2 \times \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (4-17)$$

$$X'_2 = X_2 \times \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (4-18)$$

حيث إن :

R'_2 : مقاومة ملفات الملف الثانوي بالأوم منسوبة للملف الابتدائي

X'_2 : ممانعة ملفات الملف الثانوي بالأوم منسوبة للملف الابتدائي

I'_2 : التيار المار في الملف الثانوي بالأمبير منسوبة للملف الابتدائي

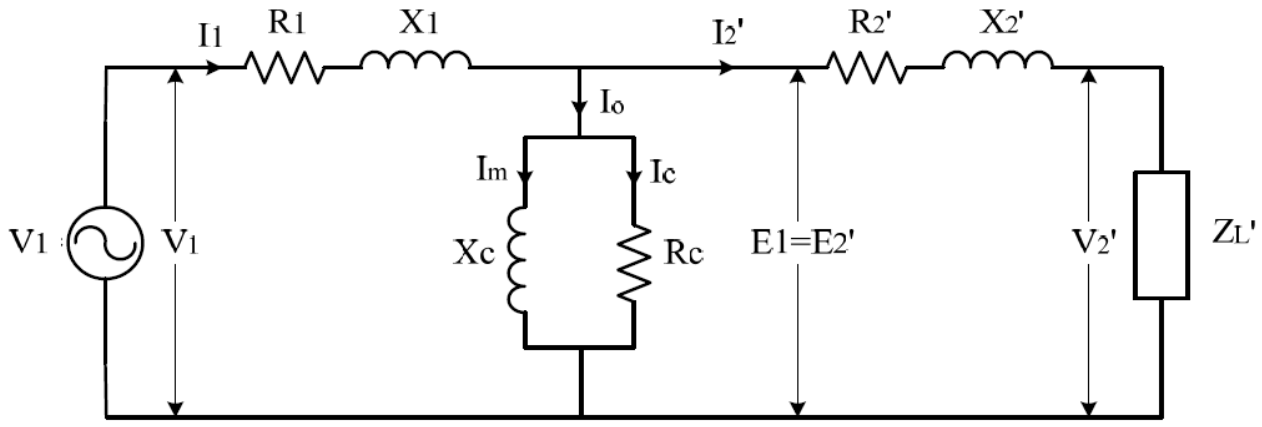
V'_2 : الجهد على أطراف الحمل بالفولت منسوبة للملف الابتدائي

E'_2 : الجهد المتولد على أطراف الملف الثانوي للمحول المثالي منسوبة للملف الابتدائي

الآن وبعد مساواة القوة الدافعة المتولدة على ملفات الثانوي بالجهد المتولد على أطراف الملف

الابتدائي يمكن توصيل الدائرة المكافئة لملفات الثانوي بدائرة الملف الابتدائي لنحصل على

الدائرة المكافئة للمحول كما في شكل ٤ - ٢٣. وتسمى بالدائرة المكافئة الدقيقة

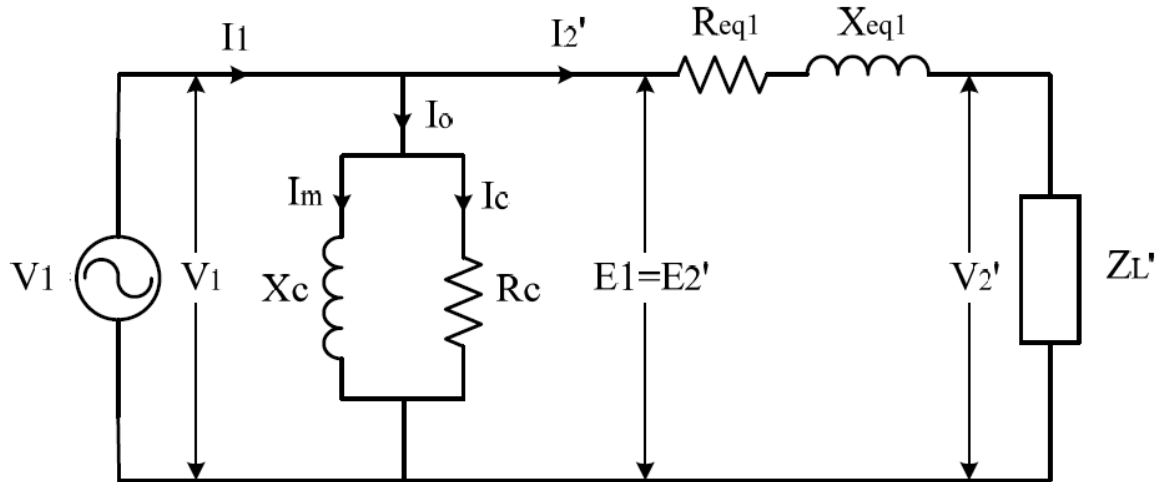


شكل ٤- ٢٣ الدائرة المكافئة الدقيقة للمحول منسوبة للملف الابتدائي

حيث إن:

Z_L' : معاوقة الحمل بالأوم منسوبة للملف الابتدائي

يمكن تبسيط الدائرة المكافئة كما في شكل ٤- ٢٤ وذلك لأن تيار اللاحمل يكون صغيراً وبالتالي يكون الفقد في الجهد الناتج من مروره في الملف الابتدائي صغيراً ويمكن إهماله.



شكل ٤- ٢٤ الدائرة المكافئة التقريبية للمحول منسوبة للملف الابتدائي

حيث إن:

$$R_{eq1} = R_1 + R_2' \quad (4-19)$$

$$X_{eq1} = X_1 + X_2' \quad (4-20)$$

ويمكن من خلال الدائرة المكافئة التقريبية في شكل ٤ - ٢٣ للمحول كتابة العلاقات التالية :

$$I_1 = I_o + I_2' \quad (4-21)$$

$$V_1 = V_2' + I_2' (R_{eq1} + jX_{eq1}) \quad (4-22)$$

مثال ٤ - ٤

محول أحادي الوجه قدرته 120kVA وجهده 400/2000V وعناصر الدائرة المكافئة هي كالتالي:

$$R_1 = 0.01 \Omega, \quad X_1 = 0.03 \Omega, \quad R_2 = 0.25 \Omega, \quad X_2 = 0.75 \Omega, \\ R_c = 500 \Omega, \quad X_c = 150 \Omega, \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{400}{2000}$$

ويغذي حمل قدرته 100kVA عند جهد مقداره 2000V ومعامل قدرة 0.8 متأخر. احسب

جهد وتيار الملف الابتدائي مستخدماً الدائرة المكافئة شكل ٤ - ٢٤

الحل:

في البداية يجب أن ننسب كل العناصر جهة الابتدائي، فتكون كالآتي:

$$R_1 = 0.015 \Omega, \quad X_1 = 0.035 \Omega, \\ R_2' = R_2 \times \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = 0.25 \times \left(\frac{400}{2000}\right)^2 = 0.01 \Omega \\ X_2' = X_2 \times \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = 0.75 \times \left(\frac{400}{2000}\right)^2 = 0.03 \Omega \\ R_{eq1} = R_1 + R_2' = 0.015 + 0.01 = 0.025 \Omega \\ X_{eq1} = X_1 + X_2' = 0.035 + 0.03 = 0.065 \Omega$$

يمكن حساب التيار في الملفات الثانوية كما يلي:

$$I_2 = \frac{VA}{V_2} = \frac{120000}{2000} = 60 \text{ A} \\ I_2' = I_2 \times \frac{N_2}{N_1} = 60 \times \frac{2000}{400} = 300 \text{ A}$$

وحيث إن معامل القدرة 0.8 متأخر فإن:

$$I_2' = 300 \angle -36.87^\circ = 240 - j180$$

يمكن حساب تيار اللاحمل كما يلي:

$$I_m = \frac{V_1}{X_c} = \frac{400}{150 \angle 90^\circ} = 2.66 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_c = \frac{V_1}{R_c} = \frac{400}{500} = 0.8 \text{ A}$$

$$I_o = I_c + I_m = 0.8 - j 2.66 = 2.78 \angle -73.26^\circ \text{ A}$$

يمكن حساب التيار المسحوب من المصدر كما يلي:

$$\begin{aligned} I_1 = I_o + I_2' &= 2.78 \angle -73.26^\circ + 300 \angle -36.87^\circ \\ &= 0.8 - j 2.66 + 240 - j 180 = 240.8 - j 180.8 \\ &= 300.64 \angle -36.78^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

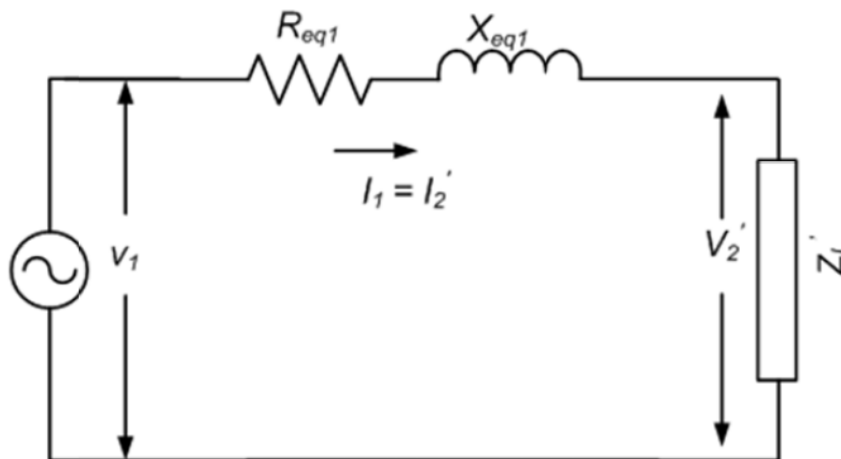
وعلى ذلك يكون التيار المسحوب من المصدر هو 300.64 أمبير عند زاوية 36.78° متأخراً

ويمكن حساب الجهد على الملفات الابتدائية كما يلي:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2' + I_2' (R_{eq1} + jX_{eq1}) \\ &= 400 \angle 0^\circ + 300 \angle -36.87^\circ (0.025 + j0.065) \\ &= 400 \angle 0^\circ + 300 \angle -36.87^\circ \times 0.07 \angle 68.96^\circ \\ &= 400 + 21 \angle 32.09^\circ \end{aligned}$$

$$V_1 = 417.79 + j11.16 = 417.94 \angle 1.5^\circ \text{ V}$$

توضح نتائج المثال السابق بأن تأثير تيار اللاحمل في حسابات قيم التيارات والجهد في الدائرة ليس بالتأثير الكبير، لذا يمكن في بعض الأحيان الاستغناء عن هذا الجزء من الدائرة المكافئة لنحصل على الدائرة المكافئة البسيطة كما في شكل ٤ - ٢٥.

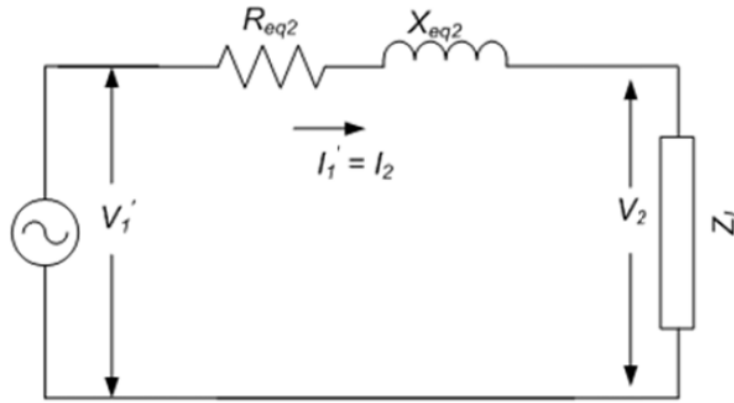


شكل ٤ - ٢٥ الدائرة المكافئة البسيطة للمحول منسوبة للملف الابتدائي

ومن الدائرة المكافئة البسيطة شكل ٤- ٢٥ يمكن ملاحظة أن :

$I_1 = I_2'$ وعلى المتدرب حل المثال السابق باستخدام الدائرة المكافئة البسيطة لإدراك مدى التبسيط الذي سببه إهمال قيمة تيار اللاحمل.

ويمكن استنتاج الدائرة المكافئة منسوبة للملف الثانوي كما في شكل ٤- ٢٦



شكل ٤- ٢٦ الدائرة المكافئة البسيطة للمحول منسوبة للملف الثانوي

وتكون العلاقات في هذه الحالة كالتالي:

$$V_1' = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (4-23)$$

$$I_1' = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (4-24)$$

$$R_1' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (4-25)$$

$$X_1' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (4-26)$$

$$R_{eq2} = R_1' + R_2 \quad (4-27)$$

$$X_{eq2} = X_1' + X_2 \quad (4-28)$$

$$I_1' = I_2 \quad (٤-٢٩)$$

$$V_1' = V_2 + I_2 (R_{eq2} + jX_{eq2}) \quad (٤-٣٠)$$

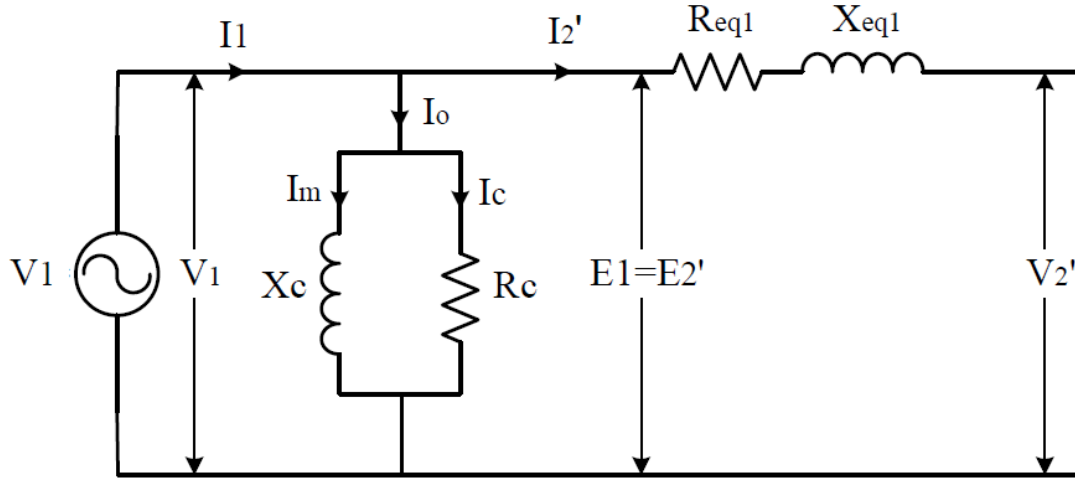
Transformer Operation

٤- ٧ تشغيل المحول

No load operation

٤- ٧- ١ تشغيل المحول عند اللاحمل

يمكن دراسة خواص المحول في حالة اللاحمل بدراسة الدائرة المكافئة للمحول التقريبية بدون حمل كما في شكل ٤- ٢٧.



شكل ٤- ٢٧ الدائرة المكافئة للمحول في حالة اللاحمل منسوبة للملف الابتدائي

في حالة اللاحمل فإن قدرة الخرج تساوي صفراً وبالتالي فإن القدرة المسحوبة من المنبع (قدرة الدخل) تستهلك في فقد الحديد والنحاس، ولذلك فإننا نستطيع أن نقول إن تيار اللاحمل I_o هو مجموع تيار المغنطة I_m والتيار الممثل للفقء في الحديد I_c وأن القدرة المسحوبة من المصدر في حالة اللاحمل P_o هي القدرة المفقودة في الحديد وتعطى بالعلاقة:

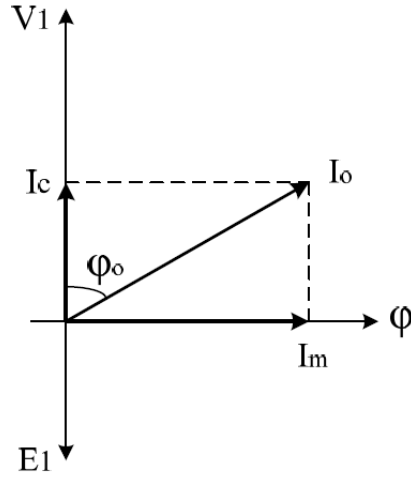
$$P_o = V_1 \cdot I_o \cdot \cos \phi_o \quad (4-31)$$

ويمكن ملاحظة أن تيار المغنطة يكون متأخراً عن الجهد المسبب له بزاوية مقدارها 90° بينما يكون التيار المستول عن الفقء الكهربائي يكون في نفس اتجاه الجهد المسبب له ويمكن التعبير عن ذلك بالمخطط الاتجاهي الموضح في شكل ٤- ٢٨. ويمكن كتابة العلاقات التالية من هذا المخطط الاتجاهي كما يلي:

$$I_m = I_o \cdot \cos \phi_o \quad (4-32)$$

$$I_c = I_o \cdot \sin \phi_o$$

حيث ϕ_o هي الزاوية بين التيار I_o والجهد المتولد على الملف الابتدائي.



شكل ٤- ٢٨ المخطط الاتجاهي للمحول في حالة الالحمل

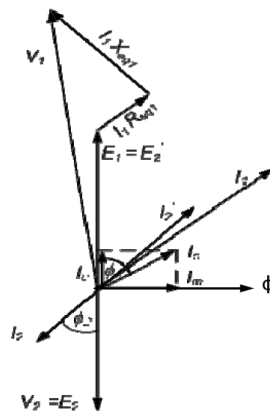
٤- ٧- ٢ تشغيل المحول عند الحمل Load operation

إذا تم توصيل معاوقة Z_L (حمل) على طرفي الملف الثانوي فإنه يمر به تيار يسمى تيار الملف الثانوي I_2 نتيجة لوجود معاوقة الحمل ويمكن رسم المخطط الاتجاهي للمحول في حالة الحمل بأشكال مختلفة تعتمد على الدائرة المكافئة المستخدمة. وفي حالة الدائرة المكافئة في شكل ٤- ٢٤ يمكن كتابة العلاقات التالية:

$$\vec{I_2'} = \frac{V_2'}{Z_L'} \quad (4-٣٣)$$

$$\vec{I_1} = \vec{I_2'} + \vec{I_0} \quad (4-٣٤)$$

ويمكن رسم المخطط الاتجاهي في حالة الحمل باستخدام الدائرة المكافئة للمحول في شكل ٤- ٢٤. ويكون كما في شكل ٤- ٢٩.



شكل ٤- ٢٩ المخطط الاتجاهي للمحول في حالة الحمل

Transformer Regulation

٤- ٨ معامل التنظيم للمحول

من العوامل المهمة عند اختيار محول لتطبيق معين ، معامل تنظيم الجهد . ويعرف معامل تنظيم الجهد بأنه التغيير في جهد الثانوي عندما يتغير تيار الحمل من صفر إلى القيمة المقننة . ويحسب بالعلاقة التالية :

$$V.R = \frac{|V_{2noload}| - |V_{2rated}|}{|V_{2noload}|} \quad (4-٣٥)$$

حيث إن :

$V.R$: معامل تنظيم الجهد للمحول

$V_{2noload}$: قيمة الجهد على أطراف الملف الثانوي في حالة اللاحمل

V_{2rated} : قيمة الجهد المقنن على أطراف الملف الثانوي في حالة التحميل بالحمل المقنن

وعادة ما يعبر عن معامل التنظيم كنسبة مئوية كما يلي :

$$P.V.R = \frac{|V_{2noload}| - |V_{2rated}|}{|V_{2noload}|} \times 100 \quad (4-٣٦)$$

حيث إن :

$P.V.R$: النسبة المئوية لمعامل تنظيم الجهد للمحول .

ويمكن كتابة معادلات معامل التنظيم أيضاً منسوبة لجهة الملف الابتدائي كما يلي :

$$V.R = \frac{|V_1| - |V_1'|}{|V_1'|} \quad (4-٣٧)$$

$$P.V.R = \frac{|V_1| - |V_1'|}{|V_1'|} \times 100 \quad (4-٣٨)$$

٤- ٩ اختبارات المحول

يجرى على المحول اختباران بهدف حساب عناصر الدائرة المكافئة للمحول وهما اختبار اللاحمل (اختبار الدائرة المفتوحة) واختبار القصر، وسوف نتناول كلاً منهما فيما يلي :

No Load Test

٤- ٩- ١ اختبار اللاحمل

يجرى هذا الاختبار عند تغذية الملفات الابتدائية للمحول بجهد متردد مساوي للجهد المقنن للمحول بينما تكون ملفات الثانوي مفتوحة لذا يسمى هذا الاختبار أيضاً باختبار الدائرة المفتوحة (Open Circuit Test) ونظراً لأن أطراف الملف الثانوي تكون مفتوحة وغير موصلة بحمل بينما يتم توصيل ملف الابتدائي إلى جهد المصدر، كما هو موضح في شكل ٤- ٣٠، لذلك نجد أن القدرة المسحوبة من المصدر تستهلك فقط في المفايد الحديدية للمحول وتكون قيمتها مساوية P_o . بينما يمر تيار اللاحمل I_o في الملف الابتدائي. يتم تسجيل قيم القدرة الداخلة والجهد والتيار باستخدام أجهزة القياس الموضحة في الشكل. ويستخدم هذا الاختبار لإيجاد قيمة نسبة التحويل وكذلك حساب R_o , X_o كالتالي:

$$P_o = V_o I_o \cos \phi_o$$

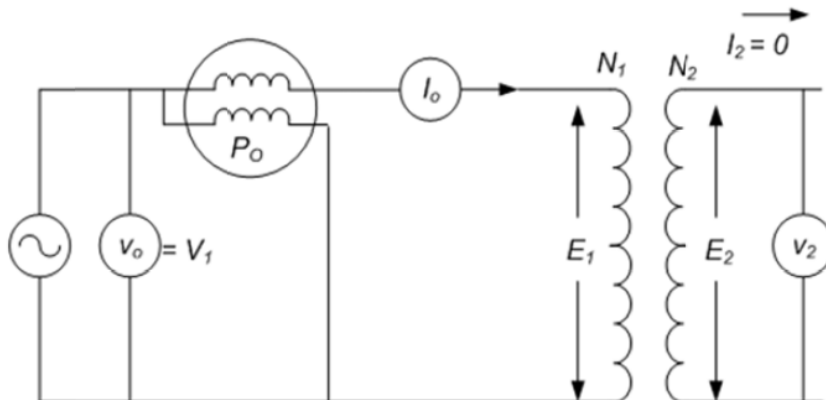
$$\cos \phi_o = \frac{P_o}{V_o I_o}$$

$$I_c = I_o \cos \phi_o$$

$$R_c = \frac{V_o}{I_c}$$

$$I_m = I_o \sin \phi_o$$

$$X_c = \frac{V_o}{I_m}$$



شكل ٤- ٣٠ اختبار اللاحمل

Short Circuit Test

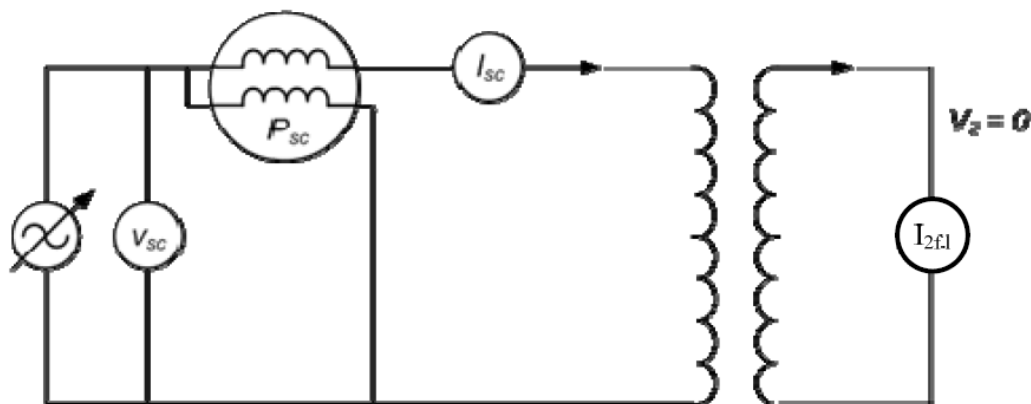
٤ - ٩ - ٢ اختبار القصر

يجرى هذا الاختبار عندما تكون أطراف الملف الثانوي مقصورة من خلال أميتر كما هو موضح في شكل ٤ - ٣١، ويراعى أن لا يزيد تيار القصر عن القيمة المقننة ويتم ذلك بتوصيل الملف الابتدائي بمنبع جهد متردد ومتحكم فيه بحيث يبدأ من الصفر ويزاد الجهد المسلط على أطراف الملف الابتدائي تدريجياً حتى يصل التيار المار في الملف الثانوي المقصور إلى القيمة المقننة، وعندئذ يتم تسجيل قراءات الأجهزة (القدرة المسحوبة في حالة القصر P_{sc} و تيار القصر I_{sc} ، وكذلك جهد الابتدائي V_{sc})، من خلال هذه القراءات يتم حساب X_{eq} ، R_{eq} ومنها تحسب عناصر الدائرة المكافئة كالتالي:

$$P_{sc} = I_{sc}^2 R_{eq} \quad (4-٣٩)$$

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (4-٤٠)$$

وبالتالي يمكن حساب كل من R_{eq} و X_{eq} كما يمكن حساب من R_1 و R_2' بقسمة R_{eq} على ٢ وبالمثل X_1 و X_2' وباستخدام نسبة التحويل يمكن حساب R_2 و X_2 .



شكل ٤ - ٣١ اختبار القصر

مثال ٤ - ٥

محول توزيع أحادي الوجه قدرته 500kVA وجهده 2300/230V. تم اختباره لإيجاد عناصر الدائرة المكافئة. أثناء اختبار الدائرة المفتوحة، كانت القدرة 2250W وكان التيار 9.4A، أما الجهد فكانت قيمته 2300V. وأثناء اختبار القصر كانت القدرة 8220W والتيار هو التيار المقنن أما الجهد فكان 94.5V. احسب عناصر الدائرة المكافئة.

الحل :

$$\text{Open Circuit Test: } V_o=2300V, \quad I_o=9.4A, \quad P_o=2250W$$

$$\text{Short Circuit Test: } V_{sc}=94.5V, \quad I_{sc}=I_{rated}, \quad P_{sc}=8220W$$

$$P_o = I_o V_o \cos \phi_o$$

$$\cos \phi_o = \frac{P_o}{I_o V_o} = \frac{2250}{9.4 \times 2300} = 0.1156$$

$$\phi_o = \cos^{-1}(0.1156) = 83.36^\circ$$

$$R_c = \frac{V_1}{I_c} = \frac{V_o}{I_o \cos \phi_o} = \frac{2300}{9.4 \times 0.1156} = 2116\Omega$$

$$X_c = \frac{V_1}{I_m} = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} = \frac{2300}{9.4 \times 0.9933} = 246.33\Omega$$

$$I_{sc} = I_{f.l} = \frac{500 \times 10^3}{2300} = 217.39A$$

$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{8220}{(217.39)^2} = 0.1739\Omega$$

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \sqrt{(R_{eq}^2 + X_{eq}^2)}$$

$$\left(\frac{94.5}{217.39} \right)^2 = (0.1739)^2 + X_{eq}^2$$

$$\therefore X_{eq} = 0.3984 \Omega$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{eq}}{2} = \frac{0.1739}{2} = 0.08695 \Omega$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{eq}}{2} = \frac{0.3984}{2} = 0.1992 \Omega$$

$$R_2' = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$R_2 = R_2' \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = 0.08695 \times \left(\frac{230}{2300} \right)^2 = .0008695 \Omega$$

Losses and Efficiency

٤- ١٠ المفايد والكفاءة

٤- ١٠- ١ المفايد في المحولات

كما هو الحال في معظم الآلات الكهربائية فإن المفايد في المحولات تنقسم إلى نوعين وهما فقد الحديد Iron loss وفقد النحاس Cupper loss، وعادةً فإن فقد الحديد ثابت القيمة ولا يعتمد على الحمل، أما فقد النحاس فيعتمد على الحمل حيث إنه يتناسب مع مربع التيار. ويمكن حساب الفقد الحديدي من تجربة اللاحمل، حيث القدرة المسحوبة في هذه التجربة والمتمثلة في قدرة اللاحمل P_o تساوي الفقد في الحديد تقريباً لأن الفقد النحاسي في حالة اللاحمل تكون صغيرة جداً ومهملة نظراً لصغر التيار المار في الملفات الابتدائية للمحول لذا يكون الفقد الحديدي مساوياً لقدرة اللاحمل.

$$P_i = P_o \quad (4-٤١)$$

يعتمد الفقد في النحاس على قيمة التيار المار في الملفات وبالتالي فإنه يعتمد على قيمة الحمل ويمكن حساب الفقد النحاسي عند الحمل الكامل من المعادلة التالية:

$$P_{cu.fl} = I_{1f.l}^2 R_{eq1} = I_{2f.l}^2 R_{eq2} \quad (4-٤٢)$$

أما إذا كان المحول يعمل عند حمل آخر غير الحمل الكامل فإنه يمكن حساب الفقد النحاسي بدلالة الفقد النحاسي عند الحمل الكامل. حيث إن الفقد عند أي نسبة حمل تتناسب مع مربع نسبة الحمل.

$$P_{cu(x)} = x^2 P_{cu.fl} = x^2 I_{1f.l}^2 R_{eq1} = x^2 I_{2f.l}^2 R_{eq2} \quad (4-٤٣)$$

كما يمكن حساب الفقد الكهربائي عند الحمل الكامل من تجربة القصر. ففي هذه التجربة يتم قصر الملف الثانوي وبالتالي فإن قدرة الخرج تساوي صفراً، وبذلك تكون كل القدرة الداخلة في هذه الحالة عبارة عن فقد حديدي في قلب المحول وفقد نحاسي في الملفات. ويكون الفقد الحديدي في هذه الحالة مهملاً نظراً لأنه يتناسب مع مربع الجهد والجهد عادة صغير جداً في هذه التجربة (٣ إلى ٥ %) بالنسبة للجهد المقنن. لذلك يمكن أن نعتبر أن القدرة الداخلة كلها فقد نحاسي. فإذا كان تيار القصر مساوياً لتيار الحمل الكامل فإن القدرة الداخلة تساوي فقد النحاس عند الحمل الكامل.

$$P_{cu.fl} = P_{sc} \quad (4-٤٤)$$

٤- ١٠ - ٢ كفاءة المحول

تحتسب الكفاءة للمحول عادة بدلالة قدرة الخرج Output Power التي يحتاجها الحمل والمفاقيد التي يستهلكها المحول، وتحسب الكفاءة من العلاقات التالية:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_i + P_{cu}} \times 100 \quad (4-٤٥)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4-٤٦)$$

حيث إن:

P_{in} : القدرة الداخلة للمحول.

P_{out} : هي قدرة الحمل (الخرج)، ويمكن حسابها من المعادلة:

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos \phi_2 \quad (٤-٤٧)$$

$$P_{in} = P_{out} + P_i + P_{cu} \quad (٤-٤٨)$$

حيث $\cos \phi_2$ هو معامل القدرة للحمل Power Factor.

بالتعويض عن قيمة P_{out} و P_{cu} في المعادلة 37-4 يمكن الحصول على الكفاءة كدالة في متغيرات الحمل (الجهد والتيار ومعامل القدرة):

$$\eta = \frac{|V_2| |I_2| \cos \phi_2}{|V_2| |I_2| \cos \phi_2 + P_i + |I_2|^2 R_{eq}} \times 100 \quad (4-٤٩)$$

مثال ٤- ٦ محول أحادي الوجه قدرته 500kVA، الفقد الحديدي 2500W والفقد النحاسي عند الحمل الكامل 7500W. احسب الكفاءة عند الحمل الكامل ثم عند نصف الحمل ومعامل قدرة ٠,٨ متأخر.

الحل:

$$S=500 \text{ kVA}, \quad P_i=2500\text{W}, \quad P_{cu,fl.}=7500 \text{ W}, \quad \cos\phi_2=0.8$$

$$P_{out}=500 \times 10^3 \times 0.8 = 400000 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_i + P_{cu}} \times 100 = \frac{400000}{400000 + 7500 + 2500} \times 100 = 97.56\%$$

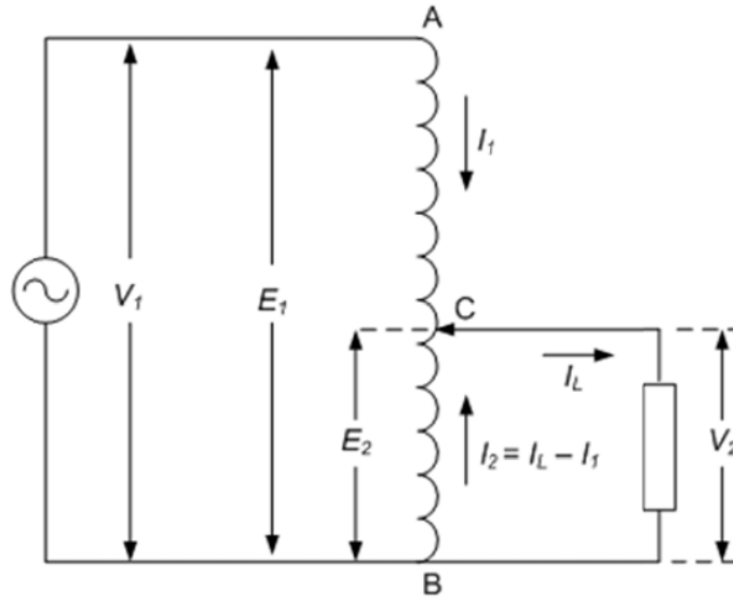
عند نصف الحمل:

$$P_{out(1/2)} = 0.5 \times 500 \times 10^3 \times 0.8 = 200000 \text{ W}$$

$$P_{cu(0.5)} = (0.5)^2 P_{cu,fl.} = 0.25 \times (7500) = 1875 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out(1/2)}}{P_{out(1/2)} + P_i + P_{cu(1/2)}} \times 100 = \frac{200000}{200000 + 1875 + 2500} \times 100 = 97.86\%$$

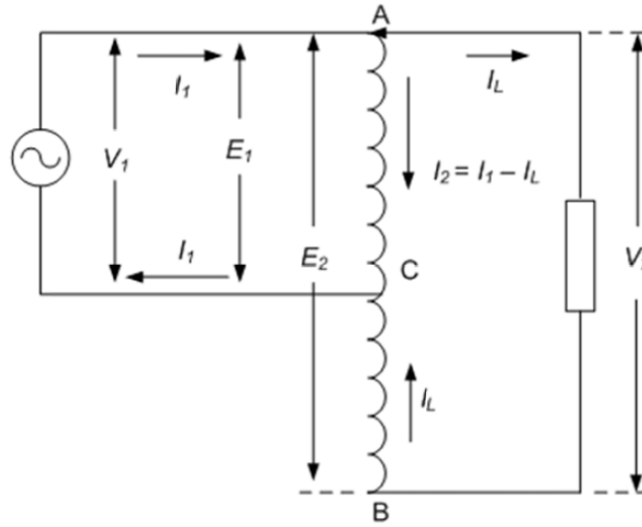
يعتبر المحول الذاتي نوع خاص من المحولات لأنه يتكون من ملف واحد ويعتمد في نظرية عمله وتشغيله على نفس نظرية عمل المحول ذي الملفين. ويستخدم الملف كله (الملف AB) في المحول الذاتي كملف ابتدائي بينما يستخدم جزء منه (الملف BC) كملف ثانوي وفي هذه الحالة يستخدم كمحول خافض كما في شكل ٤- ٣٢. كما يمكن استخدام الملف كله (الملف AB) كملف ثانوي بينما يستخدم جزء منه (الملف BC) كملف ابتدائي فإن المحول الذاتي في هذه الحالة يكون محول رفع كما في شكل ٤- ٣٣.



شكل ٤- ٣٢ محول ذاتي خافض للجهد

وعلى ذلك فإن المحول الذاتي يعتبر جهازاً مفيداً جداً في بعض الاستخدامات نظراً لبساطته وانخفاض ثمنه مقارنة مع المحول العادي. كما يتميز بأنه يعطي جهداً متغيراً. وذلك بتغيير موضع النقطة C وبذلك يمكن تغيير عدد لفات الثانوي للحصول على جهد يتراوح من صفر وحتى جهد الابتدائي أو أكبر منه كما في المحول الذاتي الرافع للجهد. ويسمى المحول الذاتي المتغير القيمة لجهد الثانوي "فارياك" "Variac". ويستخدم هذا النوع من المحولات في المختبرات وأجهزة بدء الحركة عندما يكون نسبة التحويل المطلوبة في حدود من ١ : ٢,٥ أي الجهد الثانوي والابتدائي متقاربين. ويتميز هذا النوع عن المحول ذي الملفين بصغر حجمه لنفس القدرة وذلك لتوفير النحاس المستخدم في الملفات ولكن من عيوب هذا المحول أن العزل

الكهربائي بين المنبع والحمل غير متوفر نظراً لاستخدام ملف واحد بين الدخل والخرج. ولذلك لا يفضل أيضاً استخدامه بنسبة تحويل كبيرة حيث يسبب خطورة وإمكانية حدوث قصر بين ملفات الجهد العالي والمخفض وذلك لنفس السبب. وهذا على العكس تماماً كما في المحول ذي الملفين.



شكل ٤- ٣٣ محول ذاتي رافع للجهد

Three Phase Transformers

المحولات الكهربائية ثلاثية الأوجه

مقدمة:

يتم توليد القدرة الكهربائية عملياً باستخدام مولدات القدرة الكهربائية ثلاثية الأوجه (المولدات التزامنية)، ولذلك يتم نقل القدرة الكهربائية من محطات التوليد إلى المستهلكين أيضاً باستخدام دوائر ثلاثية الأوجه. ولاعتبارات اقتصادية يجب رفع الجهد عند محطات التوليد باستخدام محولات رفع ثلاثية الأوجه حيث يتم نقل القدرة عند الجهود العالية ثم خفض الجهد مرة أخرى إلى جهد التوزيع باستخدام محولات خفض ثلاثية الأوجه وتتم عملية خفض على مرحلة واحدة أو أكثر. وسنتناول في هذه الوحدة المحولات ثلاثية الأوجه والتي تستخدم في عملية رفع أو خفض الجهد الكهربائي في منظومات نقل وتوزيع القدرة.

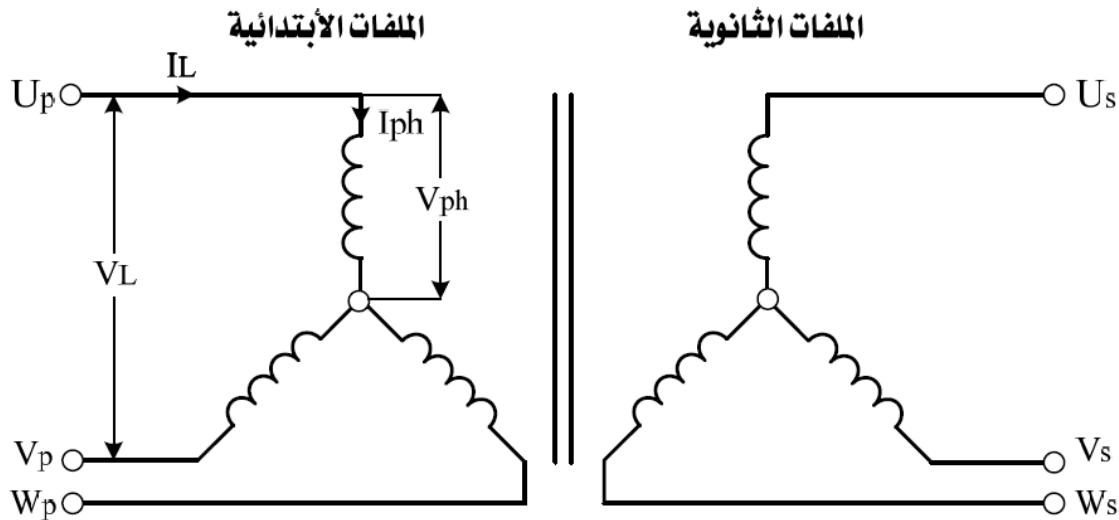
٥ - ٢ توصيل الملفات

توجد طرق كثيرة لتوصيل الملفات الابتدائية والملفات الثانوية وذلك للحصول على خواص تشغيل تلبي احتياجات الحمل الذي يعمل عليه المحول، ويخضع اختيار الطريقة التي يتم بها توصيل أطراف المحول لعوامل واعتبارات مختلفة كعوامل الإجهادات الميكانيكية التي تنشأ من المجالات الكهرومغناطيسية والتي تؤثر على هيكل وملفات المحول، وكذلك شدة العزل الكهربائي بالإضافة إلى خواص الشبكة مثل عدد الخطوط (ثلاثة أو أربعة). ومن هذه العوامل ما يعتمد على نوع الأداء المطلوب مثل منع التوافقية الثالثة أو الحصول على انحراف طوري معين (phase shift) إلخ. ويمكن تلخيص أهم الطرق الشائعة لتوصيل المحولات ثلاثية الأوجه كالتالي:

Star-Star	Y-Y	- توصيل الابتدائي نجمة - الثانوي نجمة
Delta-Delta	Δ - Δ	- توصيل الابتدائي دلتا - الثانوي دلتا
Star-Delta	Y- Δ	- توصيل الابتدائي نجمة - الثانوي دلتا
Delta-Star	Δ -Y	- توصيل الابتدائي دلتا - الثانوي نجمة

٥ - ٢ - ١ توصيل نجمة - نجمة (Y-Y)

يوضح شكل ٥ - ٥ طريقة التوصيل نجمة - نجمة، حيث توصل ملفات الابتدائي على شكل Y وتوصل ملفات الثانوي أيضاً على شكل Y.



شكل ٥ - ٥ توصيل Y-Y

وتتميز توصيلة النجمة - نجمة بالخواص التالية:

١. تحتاج إلى عدد أقل من الملفات وأقل كمية عزل (حيث $V_{ph} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_L$) كما تحتاج إلى أن تكون مساحة مقطع الملفات أكبر ($I_{ph} = I_L$) ولذلك فإن هذه التوصيلة تكون ملائمة من وجهة النظر الاقتصادية البحتة للمحولات ذات الجهد العالي والقدرات المنخفضة.
٢. الإجهادات الكهربائية على عوازل الملفات تكون أقل ما يمكن حيث يهبط الجهد من قيمة جهد الوجه عن طرف الملف إلى صفر عند نقطة التعادل.
٣. تتحمل ملفات المحول الموصل نجمة - نجمة إجهادات ميكانيكية عالية بسبب كبر مساحة مقطعها وقلة عددها.
٤. يتيح وجود نقطة تعادل على جانبي المحول عملية التأريض ووجود منظومة من أربعة أسلاك.
٥. في هذا النوع من التوصيل، لا يوجد مسار مغلق للتذبذبات غير مرغوب بها في التيار حيث إن نقطة التعادل معزولة، وبالتالي يحتوي تيار المغنطة على تذبذبات غير مرغوب بها بالإضافة إلى الموجة الأساسية، ويعمل هذا على تشوه شكل موجة الجهد مما ينتج عنه ضجيج يؤثر على خطوط الاتصالات. ولهذا السبب لا يستخدم هذا النوع من التوصيل إلا في حالات خاصة.
٦. تحسب نسبة التحويل بين الملف الابتدائي والملف الثانوي بنسبة جهد الوجه على كل منهما فتكون:

$$\frac{V_1/\sqrt{3}}{V_2/\sqrt{3}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

يتبين لنا مما سبق أن استخدامات المحول نجمة - نجمة محدودة ولأغراض معينة مثل محولات القدرة الصغيرة أو بغرض ربط منظومتين دلتا معاً وإيجاد خط تعادل لهما. وقد يستعمل في محولات النقل الكبيرة بشرط أن يكون من النوع القلبي ولا تستعمل المحولات القشرية لأنها تتسبب بتذبذبات تخرجها عن الخط.

مثال ٥ - ١

احسب نسبة التحويل لمحول ثلاثي الأوجه من نوع نجمة/نجمة يربط بين دائرتي جهد الخط لهما 66kV و 6.6kV . ثم احسب التيار في دائرة ملف الجهد العالي إذا كان المحول يغذي حملاً قدره 1000 kVA عند جهد 6.6kV .

الحل:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{66000}{6600} = \frac{10}{1}$$

$$S = \sqrt{3} V_2 I_2$$

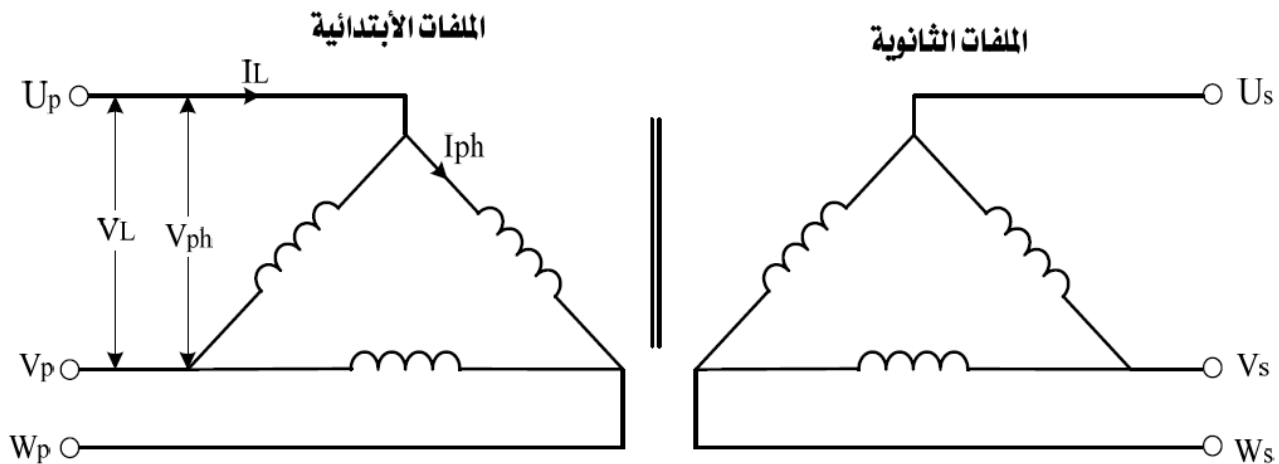
$$I_2 = \frac{1000000}{\sqrt{3} \times 6600} = 87.477 \quad \text{Amp.}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{87.477} = \frac{10}{1}$$

$$I_1 = 874.77 \text{Amp.}$$

٥ - ٢ - ٢ توصيل دلتا - دلتا ($\Delta-\Delta$)

في هذا النوع من التوصيل، يوصل كل من ملفات الابتدائي والثانوي على شكل دلتا، كما هو موضح في شكل ٥ - ٦. حيث توصل نهاية كل ملف ببداية الملف الآخر وينطبق هذا على كل من الملف الابتدائي والملف الثانوي.



شكل ٥ - ٦ توصيل $\Delta-\Delta$

ويمتاز هذا النوع من التوصيل بالخواص التالية:

١. تحتاج توصيلة الدلتا إلى عدد أكبر من اللفات وأكبر كمية من مواد العزل حيث أن جهد الخط يساوي جهد الوجه ($V_{ph} = V_L$) كما تحتاج إلى أن تكون مساحة مقطع الملفات أقل حيث ($I_{ph} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_L$) ولذلك فإن هذه التوصيلة تكون ملائمة من وجهة النظر الاقتصادية البحتة للمحولات ذات الجهود المنخفضة والتيارات العالية.
٢. تعتبر المحولات الموصلة دلتا - دلتا أضعف المحولات من حيث قدرتها على تحمل الإجهادات الميكانيكية بسبب صغر مساحة المقطع وكثرة عدد اللفات.
٣. الإجهادات الكهربائية على عوازل الملفات تكون أكبر نظراً لأن جهد الخط يساوي جهد الوجه.
٤. من خصائص توصيلة الدلتا عدم وجود نقطة التعادل وعلى ذلك فإنها لا تصلح بمفردها لإمداد منظومة من أربعة أسلاك إلا باستعمال أجهزة تأريض مساعدة.
٥. لا تحتوي توصيلة الدلتا على التوافقية الثالثة .
٦. تحسب نسبة التحويل بين الملف الابتدائي والملف الثانوي بنسبة جهد الوجه على كل منهما فتكون:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

يتبين لنا مما سبق أن استخدامات المحول دلتا - دلتا محدودة نظراً لعدم وجود نقطة تعادل طبيعية وصعوبة عملية التأريض، ومع ذلك من الممكن استخدامها في بعض التطبيقات لتغذية أحمال كبيرة وغير متزنة .

مثال ٥ - ٢

محول ثلاثي الأوجه من نوع دلتا/دلتا يغذي حمل جهده 13.8 kV بتيار قدرة 150A. احسب الجهد في الجانب الابتدائي ثم احسب التيار المار في ملفات المحول الابتدائية والثانوية وكذا تيار الخط في الجانب الابتدائي إذا كانت نسبة التحويل ٤,٧٨٢٦ .

الحل

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{13800} = 4.7826$$

$$V_1 = 66 \text{ kV}$$

$$I_{2ph} = \frac{I_2}{\sqrt{3}} = \frac{150}{\sqrt{3}} = 86.6 \text{ Amp.}$$

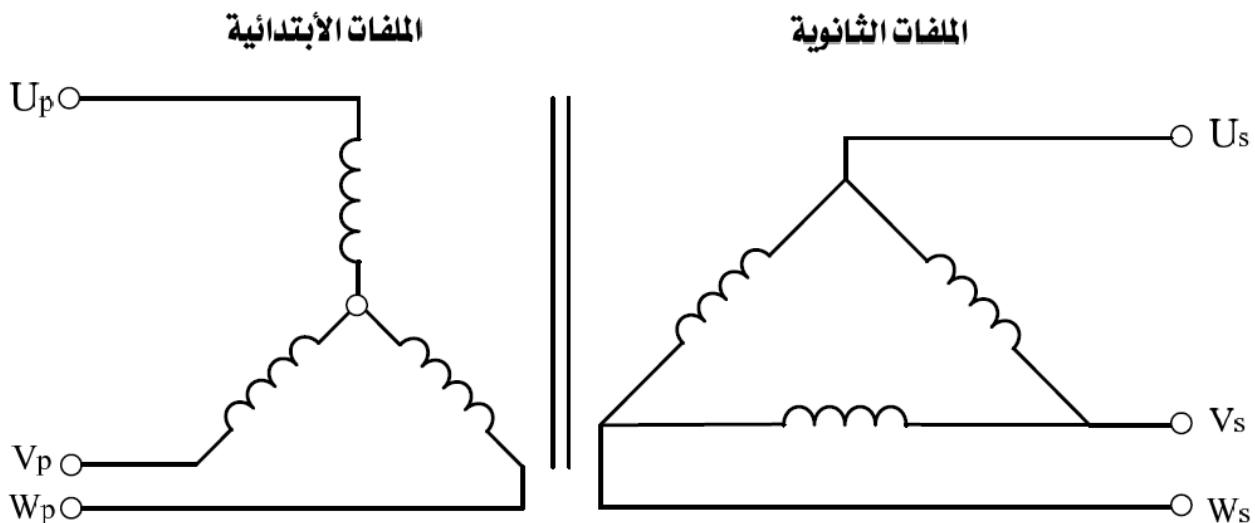
$$\frac{I_{1ph}}{I_{2ph}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_{1ph}}{86.6} = \frac{1}{4.7826}$$

$$I_{1ph} = 18.11 \text{ Amp.}$$

$$I_1 = I_{1ph} \times \sqrt{3} = 31.36 \text{ Amp.}$$

٥ - ٢ - ٣ توصيل نجمة - دلتا (Y-Δ)

يتم في هذه الطريقة توصيل ملفات الابتدائي على شكل نجمة أما ملفات الثانوي فتوصل دلتا كما هو موضح في شكل ٥ - ٧.



شكل ٥ - ٧ توصيل نجمة - دلتا

وتتميز توصيلة نجمة- دلتا بالخواص التالية:

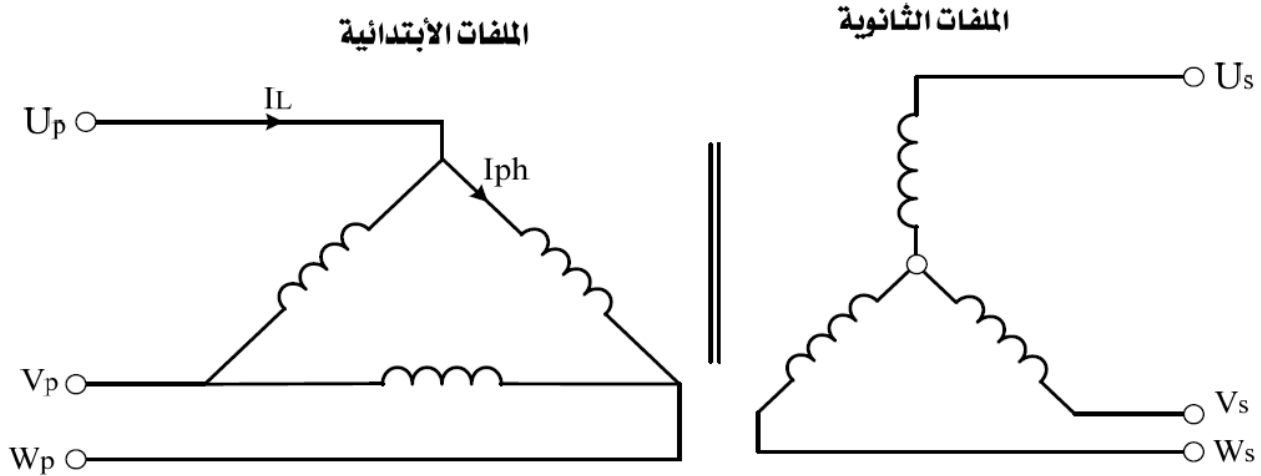
١. توصيلة دلتا للملف الثانوي تنشئ مساراً للتوافقيات مما يؤدي إلى عزل التوافقية الثالثة عن الخطوط الموصلة بهذا الملف .
٢. إمكانية تأريض نقطة التعادل على الجانب الابتدائي .
٣. يعمل ملف الدلتا في الجانب الثانوي على استقرار نقطة التعادل في الملف الابتدائي.
٤. يمكن دائماً توصيل أي محولين نجمة- دلتا على التوازي.
٥. يعتبر التوصيل نجمة- دلتا أحسن توصيل مرغوب فيه عند استعمال محولات خفض الجهد في منظومات نقل القدرة على الجهود الفائقة وكذلك في المحولات الضخمة .
٦. تحسب نسبة التحويل بين الملف الابتدائي والملف الثانوي بنسبة جهد الوجه على كل منهما فتكون:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sqrt{3}N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{V_1/\sqrt{3}}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\sqrt{3}N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{I_2/\sqrt{3}}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

٥ - ٢ - ٤ توصيل دلتا- نجمة (Δ- Y)

في هذه الحالة توصل ملفات الابتدائي على شكل دلتا وملفات الثانوي توصل نجمة. ويوضح شكل ٥ - ٨ طريقة التوصيل في هذه الحالة.



شكل ٥ - ٨ توصيل دلتا - نجمة

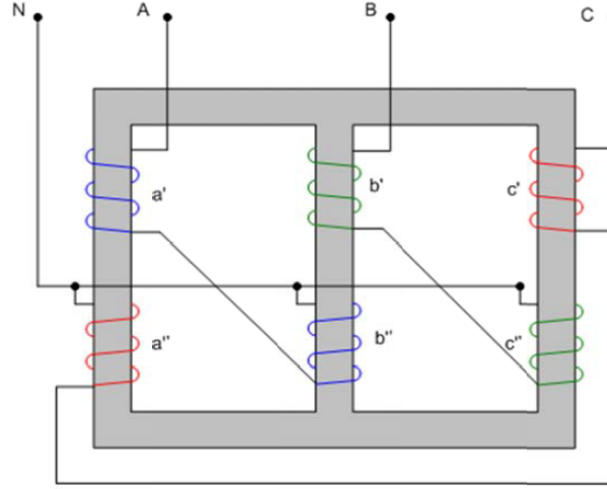
وتتميز توصيلة الدلتا - نجمة بالخصائص التالية:

١. نظراً لوجود ملفات الدلتا على الجانب الابتدائي فإن ذلك يؤدي إلى عزل التوافقية الثالثة على الخطوط الموصلة بهذا الجانب .
٢. إمكانية تأريض نقطة التعادل على الجانب الثانوي وعلى ذلك يمكن إمداد حمل غير متماثل بأربعة أسلاك دون أن يحدث ذلك تغيرات كبيرة في الجهود حيث تتناسب تلك الجهود مع معاوقات المحول فقط بسبب وجود ملفات الدلتا في الجانب الابتدائي .
٣. عدم وجود نقطة التعادل في جانب الدلتا لا يعتبر عيباً لأن هذا الجانب يوصل عادة بالمولد الذي تكون نقطة تعادله مؤرضة دائماً.
٤. يفضل عدم استخدامه كمحول خفض أو في المحولات الصغيرة بسبب ضعف ملفات الدلتا الميكانيكي.
٥. يعتبر محول الدلتا - نجمة أفضل محول رفع في منظومات النقل ومنظومات التوزيع الكبيرة.
٦. تحسب نسبة التحويل بين الملف الابتدائي والملف الثانوي بنسبة جهد الوجه على كل منهما فتكون:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{\sqrt{3}N_2} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2/\sqrt{3}} = \frac{N_1}{N_2}$$
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{\sqrt{3}N_2} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1/\sqrt{3}} = \frac{N_1}{N_2}$$

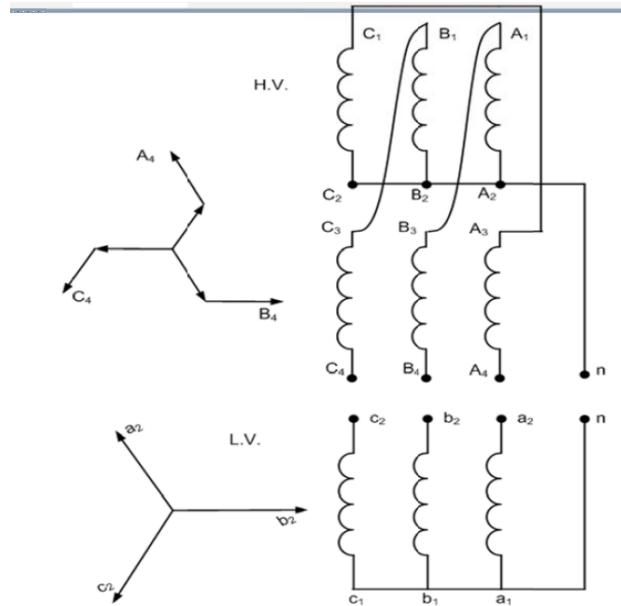
٥-٣ محول الزقزاق (Zigzag Transformer)

محولات الزقزاق هي محولات يكون أحد جانبيها (الابتدائي) أو الثانوي إما موصلًا نجمة أو دلتا بينما يتم تقسيم ملفات الجانب الآخر كل ملف إلى نصفين موصلين على التوالي، ويتم التوصيل بين الملفات كما في شكل ٥-٩ ويتم الربط بين الملفات بحيث يمكن الحصول على نقطة تعادل.



شكل ٥-٩ توصيل ملفات المحول بطريقة الزقزاق

وباستخدام محول الزقزاق يمكن الحصول على العديد من التوصيلات مثل (دلتا - زقزاق) و(زقزاق - دلتا) و(نجمة - زقزاق) و(زقزاق - نجمة) وكل من هذه التوصيلات له ما يميزه من خصائص. يبين شكل ٥-١٠ طريقة توصيل محول زقزاق - نجمة وكذلك مخطط المتجهات المناظر.



شكل ٥-١٠ توصيلة زقزاق - نجمة

المحركات الحثية الأحادية الطور

تركيب المحركات الحثية أحادية الوجه :

تتركب المحركات الحثية أحادية الوجه، من ملفات أحادية الوجه على العضو الثابت، وعضو دوار ذو قفص سنجابي، فتركيبها يشبه المحركات الحثية ثلاثية الأوجه ذات القفص السنجابي، عدا ما يختص بملفات العضو الثابت. فهي ملفات أحادية الوجه موزعة في مجاري العضو الثابت، بطريقة تجعلنا نحصل على قوة دافعة مغناطيسية موزعة توزيعاً جيبياً في الفراغ، وبالتالي نحصل على منحني جيبي، لكثافة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية. ومن أهم سمات هذه المحركات أن ليس لها عزم لبدء الحركة، ولكن إذا بدأت حركتها بأي وسيلة مساعدة فسوف تستمر في الدوران في نفس اتجاه الدوران الذي بدأت فيه.

نظرية المجال المغناطيسي المزدوج الدوار:

عند تغذية ملف العضو الثابت بتيار متردد، ذي موجة جيبية مع الزمن، فإن موجة القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة، تكون موزعة توزيعاً جيبياً في الثغرة الهوائية، وأيضاً متناسبة جيبياً مع الزمن، ويمكن كتابتها كدالة جيبية في الفراغ والزمن كالآتي:

$$F_1 = F_{1max} \cos(\omega t) \cdot \cos(\theta) \quad 1-1$$

القوة الدافعة المغناطيسية تولد مجالاً مغناطيسياً، له نفس خواص التوزيع الجيبي في الثغرة الهوائية، والتناسب الجيبي مع الزمن، ويمكن تمثيله رياضياً بالمعادلة (١ - ٢):

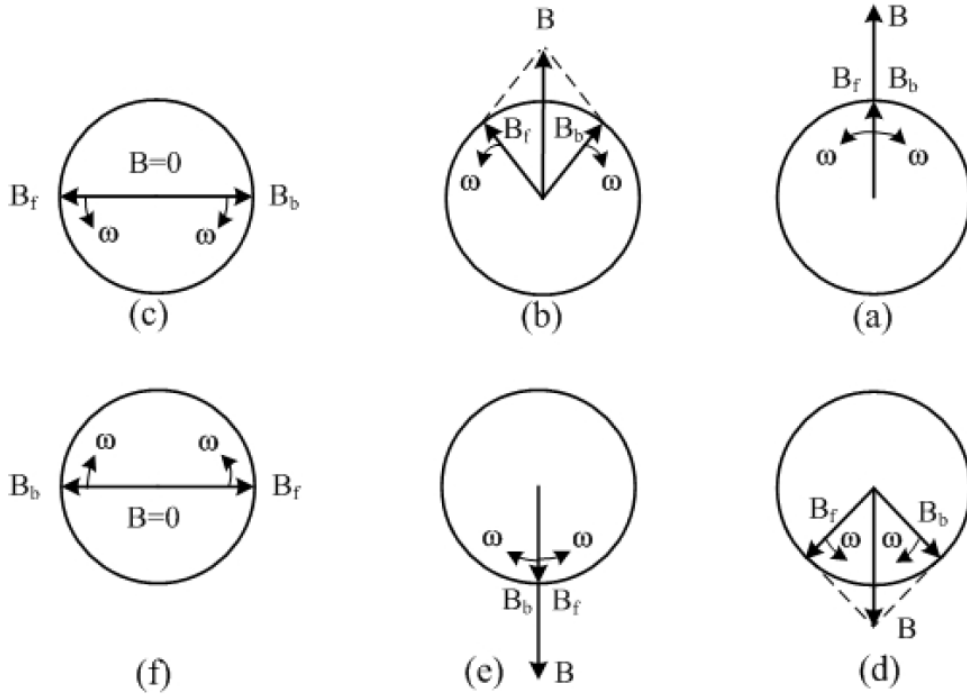
$$B_1 = B_{1max} \cos(\omega t) \cdot \cos(\theta) \quad 1-2$$

يمكن تحليل هذا المجال المغناطيسي إلى مجالين مغناطيسيين دوارين، الأول يدور في الاتجاه الموجب ويسمى بالمجال المغناطيسي الدوار الأمامي، وعادة يكون اتجاه دورانه، عكس اتجاه دوران عقارب الساعة، والمجال الآخر يدور في الاتجاه المضاد ويسمى بالمجال المغناطيسي الدوار الخلفي، وهو الذي يدور مع عقارب الساعة (حسب العرف المتبع في الآلات الكهربائية)، المعادلة (١ - ٣) توضح هذا التحليل:

$$B_1 = \frac{1}{2} B_{1max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} B_{1max} \cos(\theta + \omega t) \quad 1-3$$

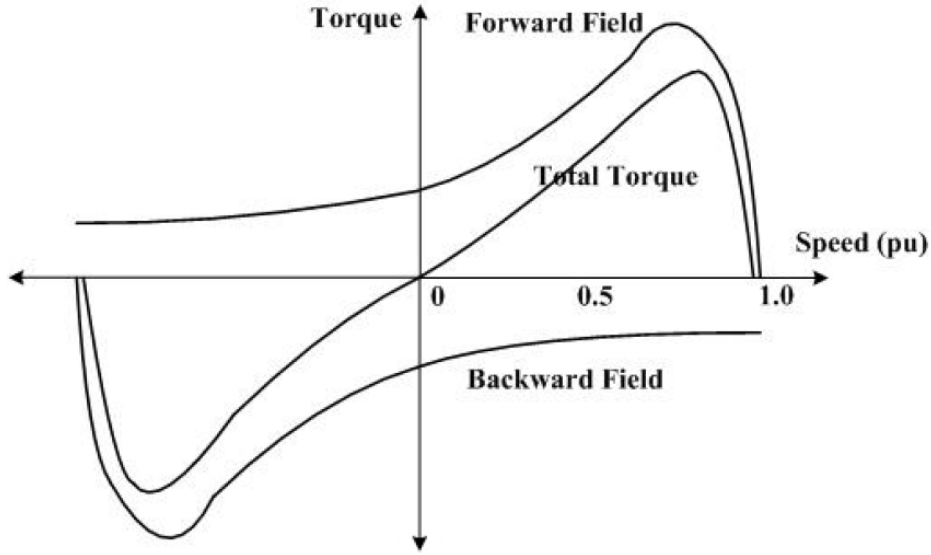
حيث يمثل الحد الأول مجالا مغناطيسيا جيبياً دائرياً ذا كثافة عظمى $\frac{1}{2}B_{1max}$ ، كما يمثل الحد الثاني مجالا مغناطيسيا جيبياً دائرياً آخر بنفس الكثافة العظمى، ويدور المجالان في اتجاهين متضادين بنفس السرعة الزاوية ω حول محيط الثغرة الهوائية. كل من هذين المجالين المغناطيسيين الدوارين يولد عزم دوران في الاتجاه الذي يدور فيه، كما في حالة المحركات الحثية الثلاثية الأوجه. يمكن توضيح ذلك باستخدام الرسم التوضيحي في الشكل (١ - ١) المتجه الدوار B_f يمثل المجال الأمامي والمتجه B_b يمثل المجال الخلفي، يلاحظ أن مجموع هذين المتجهين B يكون دائماً في اتجاه رأسي وتتغير قيمته مع دوران المتجهين B_f و B_b وهو يعادل المجال المغناطيسي النابض الناشئ عن ملف أحادي الوجه.

$$B = B_f + B_b \quad 1-4$$



شكل ١ - ١ كيفية تحليل المجال النابض إلى مجالين دوارين

يمكن الحصول على خواص المحرك الحثي أحادي الوجه، بتطبيق قاعدة التراكب على خواص محركين متماثلين، كل منهما ثلاثي الأوجه، يدور المحرك الأول في عكس اتجاه دوران المحرك الثاني. إذا قمنا برسم منحنى العلاقة بين العزم والسرعة، لكل من المجالين، نستطيع الحصول على منحنى خواص المحرك الحثي أحادي الوجه، كما هو مبين بالشكل (١ - ٢).



شكل ١ - ٢ منحني العزم مع السرعة للمجالين الأمامي والخلفي.

في حالة سكون العضو الدوار وعند بدء الحركة يكون عزم الدوران الناتج عن المجال الأمامي، مساوياً ومضاداً في الاتجاه للعزم الناتج عن المجال الخلفي، مما يجعل محصلة عزم الدوران المؤثر على العضو الدوار مساوية للصفر فلا يكون هناك عزم لبدء الحركة، وهي إحدى خصائص هذا النوع من المحركات. ولكن إذا بدء المحرك حركته الدورانية بوسيلة مساعدة في اتجاه معين فسيستمر في الدوران في نفس ذلك الاتجاه (يمكن اعتبار عزم الدوران الناشئ عن المجال الخلفي كعزم دوران فرملي يعيق حركة دوران المحرك نتيجة للعزم الناشئ عن المجال الخلفي).

عندما يدور العضو الدوار للمحرك بسرعة دورانية مقدارها N في اتجاه دوران المجال الأمامي، والذي يدور بسرعة التزامن N_s ، فإن الانزلاق الأمامي يكون مساوياً $s_f = s = (N_s - N)/N_s$ ، بينما يكون المجال الخلفي دائراً في عكس الاتجاه بالسرعة N_s ، أي أنه يدور بالسرعة $(N_s + N)$ بالنسبة للعضو الدوار، فيكون معامل الانزلاق للمجال الخلفي s_b مساوياً:

$$s_b = \frac{N_s + N}{N_s} = 2 - s \quad 1-5$$

عند ظروف التشغيل العادية بمعامل انزلاق للمجال الأمامي في حدود $s_f = 0.05$ تكون قيمة معامل الانزلاق للمجال الخلفي ($s_b = 1.95$) كبيرة جداً مقارنة بقيمة معامل الانزلاق للمجال الأمامي.

مثال ١ - ١ :

محرك حثي أحادي الوجه، 230-V ، 60 Hz ذو زوجين من الأقطاب ($2p = 4$) يعمل عند حمل الكامل بانزلاق مقداره $s = 0.04$ احسب:

i. الانزلاق للمجال الخلفي s_b

ii. سرعة التزامن N_s

iii. سرعة المحرك عند الحمل الكامل.

الحل:

i - Slip for the backward field $\equiv s_b = 2 - s = 2 - 0.04 = 1.96$

ii - The synchronous speed $\equiv N_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{60 \times 60}{2} = 1800$ rpm

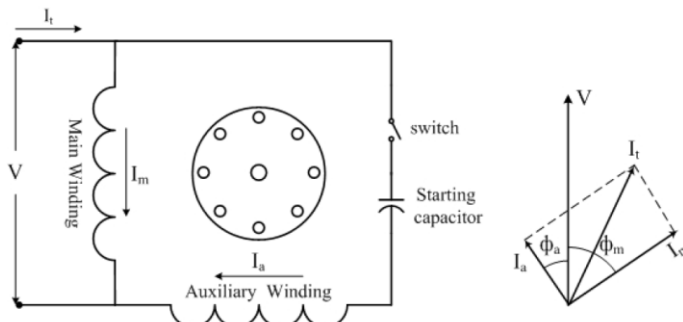
iii - The motor speed $\equiv N = (1 - s) N_s = 0.96 \times 1800 = 1728$ rpm

طرق بدء الحركة ومنحنيات الخواص للمحركات الحثية أحادية الوجه :

من أهم سمات هذه المحركات أن ليس لها عزم لبدء الحركة ، ولكن إذا بدأت حركتها بأي وسيلة مساعدة فسوف تستمر في الدوران في نفس اتجاه الدوران الذي بدأت فيه. وتصنف المحركات الحثية أحادية الوجه طبقاً للطريقة المستخدمة لبدء حركتها ، كما يطلق عليها أسماء تصف الطريقة التي استخدمت لبدء حركتها ، فيما يلي نتناول وصفاً لأنواع المحركات الحثية أحادية الوجه الشائعة الاستخدام:

المحرك مشطور الوجه : (Split-Phase Motor)

المحرك مشطور الوجه يحتوي على ملفين بالعضو الثابت، الأول هو الملف الرئيس، والثاني هو الملف المساعد (أو ملف بدء الحركة)، كل من هذين الملفين موزع في مجاري العضو الثابت، بحيث تكون الزاوية بين محوري الملفين تسعون درجة كهربائية في الفراغ، وبطريقة تجعلنا نحصل على مجال مغناطيسي موزع توزيع جيبي في الفراغ، من كل من الملفين على حدة. شكل (١- ١٣) يبين دائرة توصيل هذين الملفين وحيث إن الملفين موصلان على التوازي مع نفس مصدر الجهد فإن تيار الملف المساعد I_a يكون متأخراً عن جهد المصدر بزاوية يجب أن تكون أصغر ما يمكن ولتحقيق ذلك توضع الملفات المساعدة في الجزء العلوي من مجاري العضو الثابت وذلك لتقليل الممانعة الحثية لهذه الملفات، كما تصنع الملفات من أسلاك ذات مساحة مقطع صغيرة وبذلك تكون نسبة مقاومة الملفات المساعدة إلى ممانعتها الحثية كبيرة. أما الملفات الرئيسية فتصنع من أسلاك ذات مساحة مقطع أكبر لكي تكون نسبة مقاومتها إلى ممانعتها الحثية أقل فيكون تيار الملف الرئيس I_m متأخراً بزاوية أكبر ما يمكن من زاوية تيار الملف المساعد I_a ، كما هو موضح بمخطط المتجهات عند بدء الحركة بالشكل (١- ١٣) بما أن تيار الملفات المساعدة متقدم عن تيار الملفات الرئيسية، فإن المجال الكلي للعضو الثابت يصل إلى قيمته العظمى على محور الملفات المساعدة أولاً، ثم بعد ذلك يصل إلى قيمته العظمى على محور الملفات الرئيسية. لذلك فإن تيار الملفين يمثل نظام ثنائي الوجه غير متزن، والمحرك يكافئ محركاً ذا وجهين غير متزن، فينشأ مجال مغناطيسي دوار، ينتج عنه عزم دوران يتسبب في بدء دوران المحرك.



شكل ١- ١٣ كيفية التوصيل ومخطط المتجهات عند بدء الحركة للمحرك مشطور الوجه.

مثال ١ - ٢:

محرك حثي أحادي الوجه، 110-V، 50 Hz، من النوع مشطور الوجه، له الثوابت الآتية عند بدء الحركة:

$$Z_m = 1.2 + j 25 \quad \Omega \quad \text{معاوقة الملف الرئيسي}$$

$$Z_a = 12 + j 5 \quad \Omega \quad \text{معاوقة الملف المساعد}$$

احسب عند بدء الحركة: التيار في كل من الملف الرئيسي والملف المساعد و التيار الكلي للمحرك و معامل القدرة و الفرق الزمني بين تياري الملف الرئيسي والملف المساعد.

الحل:

تيار الملف الرئيسي:

$$\text{The main winding current} \equiv I_m = \frac{V_1}{Z_m} = \frac{110 \angle 0}{1.2 + j 25} = \frac{110 \angle 0}{25.03 \angle 87.252}$$

$$I_m = 4 \angle -87.252 \quad \text{Amp.}$$

تيار الملف المساعد:

$$\text{The auxiliary winding current} \equiv I_a = \frac{V_1}{Z_a} = \frac{110 \angle 0}{12 + j 5} = \frac{110 \angle 0}{13 \angle 22.62}$$

$$I_a = 8.46 \angle -22.62 \quad \text{Amp.}$$

التيار الكلي المسحوب من المصدر:

$$\text{The total motor current} = I_t = I_m + I_a$$

$$I_t = 4 \angle -87.25 + 8.46 \angle -22.62^\circ$$

$$= (0.192 - j 3.995) + (7.81 - j 3.254) \quad \text{Apm.}$$

$$= 8.02 - j 7.25 = 10.8 \angle -42.11^\circ \quad \text{Apm.}$$

معامل القدرة:

$$\text{The power factor} = \cos (-42.11) = 0.742$$

الزاوية بين تيارَي الملفين:

$$\text{The phase angle between the two winding currents} = \theta = \phi_m - \phi_a$$

$$\theta = -87.25 - (-22.62) = -64.63^\circ$$

$$I_m \text{ lags } I_a \text{ by } 64.62^\circ$$

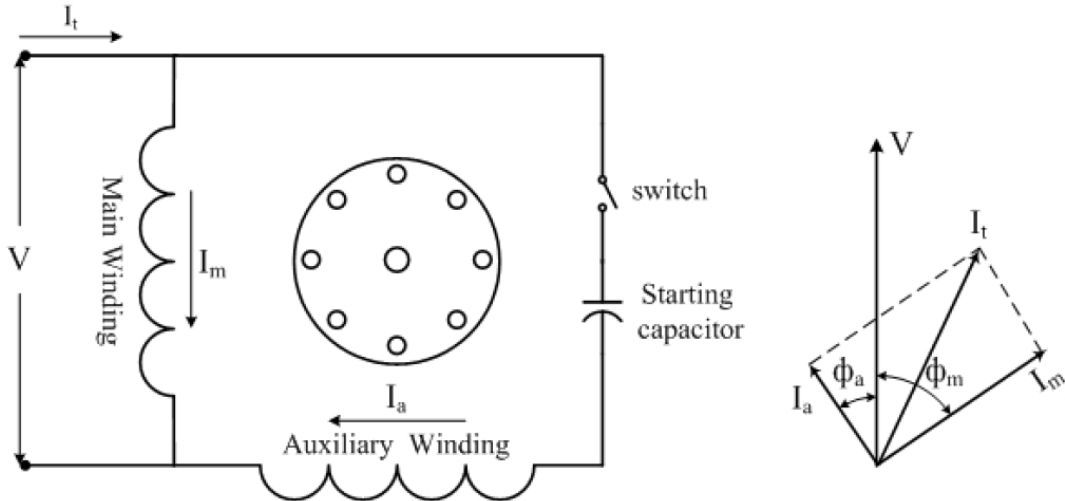
(Capacitor Motors)

• المحركات ذات المكثفات:

يمكن أن تستخدم المكثفات لتحسين خواص وأداء المحرك الحثي أحادي الوجه، أثناء بدء الحركة أو أثناء التشغيل، أو كليهما، اعتماداً على حجم ونوع المكثف المستخدم وطريقة توصيله.

أ. المحرك ذو مكثف بدء الحركة: (Capacitor –Start Motor)

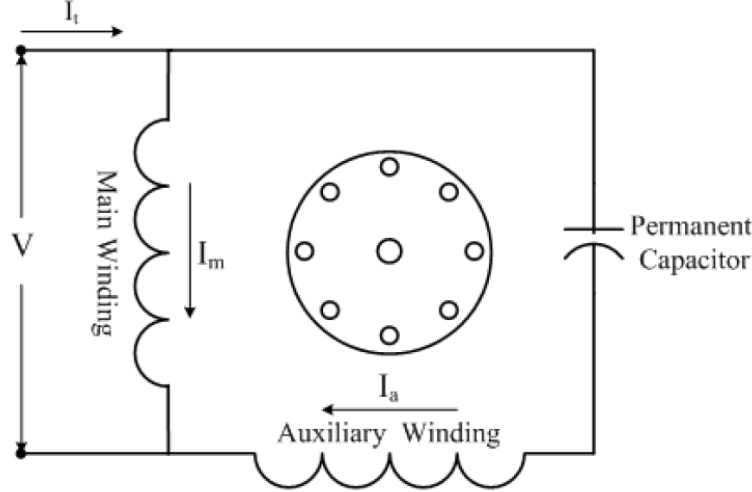
يحتوي المحرك ذو مكثف بدء الحركة على ملفات رئيسية وملفات مساعدة على عضوه الثابت، الفرق الزمني بين زاوية تيارى الملفين، نحصل عليه بواسطة مكثف بدء حركة موصل على التوالي مع الملفات المساعدة، كما هو مبين بالشكل (١- ٤٤). في هذه الحالة أيضا يفصل الملف المساعد ومكثف بدء الحركة بعد بدء الحركة ووصول سرعة المحرك إلى ٠.٧٥ من سرعة التزامن، كما يحدث في النوع السابق، وبالتالي يمكن تصميم الملفات المساعدة والمكثف، بحيث يكون تشغيلهما تشغيلاً متقطعاً، مما يساعد على تقليل كلفة كل منهما. يمكن باستخدام مكثف بدء الحركة، ذي القيمة المناسبة، التي تجعل تيار الملفات المساعدة I_a ، يتقدم عن تيار الملفات الرئيسية I_m (عند سكون العضو الدوار) بزاوية مقدارها تسعون درجة كهربائية الشكل (١- ٤٤)، أن نحصل على خصائص محرك متزن ذي وجهين. عند بدء الحركة.



شكل ١- ٤٤. كيفية توصيل ومخطط المتجهات للمحرك ذي مكثف بدء الحركة

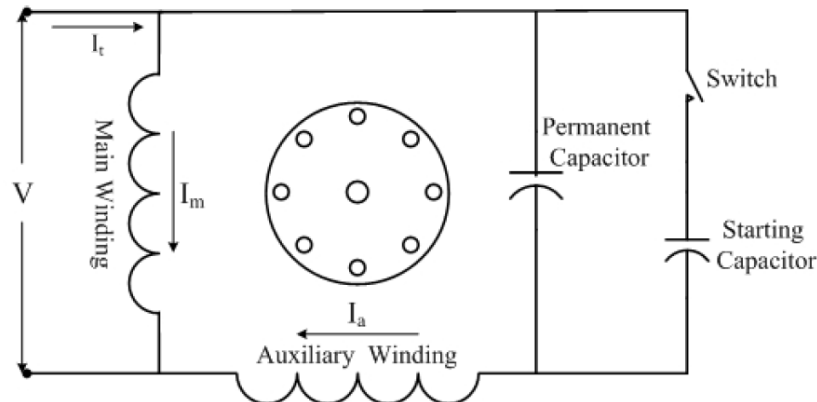
ب. المحرك ذو المكثف الدائم: (Permanent-Capacitor Motor)

في المحرك ذي المكثف الدائم تظل الملفات المساعدة عاملة مع الملفات الرئيسية أثناء التشغيل المستمر للمحرك، فيمكن تبسيط تركيب المحرك، بالاستغناء عن مفتاح الطرد المركزي، المشار إليه في الحالتين السابقتين. الشكل (١ - ٥) يبين كيفية توصيل الملفات كما يبين أيضاً منحني خواص المحرك.



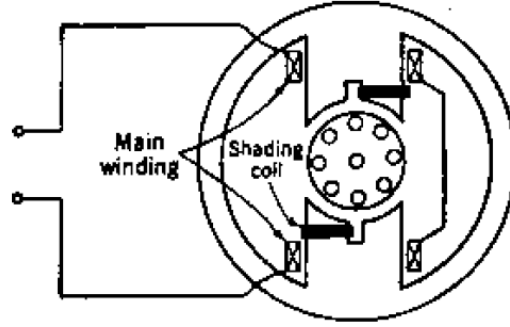
ت. المحرك ذو المكثفين: (Two-Values Capacitor Motor)

عند استخدام مكثفين أحدهما يستخدم أثناء فترة البدء فقط، والآخر يستمر عمله أثناء التشغيل المستمر للمحرك، يمكننا الحصول على أفضل خواص للمحرك، أثناء فترتي البدء والتشغيل معاً. يبين الشكل (١ - ٦) طريقة توصيل هذين المكثفين، كما يبين منحني خواص المحرك، يستخدم مكثف صغير، من النوع الورقي المشبع بالزيت، موصلاً على التوالي بصفة مستديمة (ويسمى المكثف الدائم)، مع الملفات المساعدة لتحسين خواص التشغيل. كما يستخدم مكثف آخر لتحسين عزم بدء الحركة، من النوع ذي السائل الكهربائي (ويسمى مكثف بدء الحركة)، موصل مع مفتاح خاص به، على التوازي مع المكثف الدائم، ليعملاً معاً أثناء فترة البدء فقط.



ث- المحرك ذو الوجه المظلل: (Shaded-Pole motor)

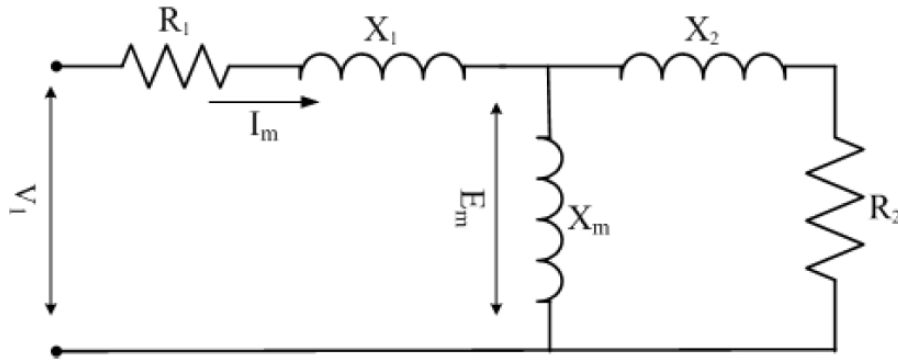
يتكون العضو الثابت لهذا المحرك من أقطاب بارزة ملفوف عليها ملفات الثابت، كل قطب مقسوم إلى جزأين بواسطة مجرى صغير، حيث تتم إحاطة (تطويق) جزء من كل قطب بلفة مقصورة من النحاس، تسمى الملف المظلل (Shading Coil)، كما هو موضح بالشكل (١ - ٧).



تحليل خواص المحركات الحثية أحادية المرحلة:

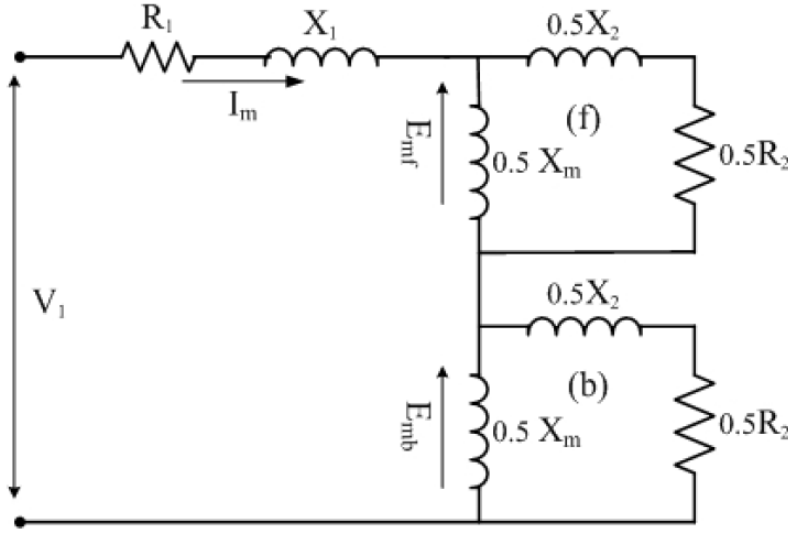
لقد سبق توضيح أن المجال المغناطيسي النابض، الناشئ عن ملف أحادي الوجه، يمكن تحليله إلى مجالين مغناطيسيين دوارين بسرعة التزامن في اتجاهين متضادين، كل من هذين المجالين يولد تياراً ومجالاً مغناطيسياً آخر في العضو الدوار، وبالتالي يتولد عزم دوران في الاتجاه الذي يدور فيه، تماماً كما يحدث في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه. هذا المجال المغناطيسي المزدوج الدوار، يوفر وسيلة ميسرة لحساب خواص المحرك الحثي أحادي الوجه.

عندما يكون العضو الدوار في حالة السكون، مع تغذية الثابت بالتيار المتردد، فالمحرك في هذه الحالة، يشبه محولاً ملفه الثانوي مقصور، والدائرة المكافئة للمحرك، تشبه تلك التي للمحول أثناء القصر، الشكل (٨ - ١) يبين الدائرة المكافئة للمحرك في حالة السكون X_1 , R_1 هما المقاومة والممانعة الحثية للملف الرئيسي في العضو الثابت X_2 , R_2 هما المقاومة والممانعة الحثية للعضو الدوار، منسوبة للملف الرئيسي، X_m ممانعة التماثل، V_1 جهد المصدر، E_m القوة الدافعة الكهربائية المضادة المتولدة في الملف الرئيسي نتيجة للتأثير المشترك للمجالين الأمامي والخلفي في حالة السكون.



شكل ٨ - ١ الدائرة المكافئة للمحرك أحادي الوجه في حالة السكون.

طبقاً لنظرية المجال المغناطيسي المزدوج الدوار، حيث تم تحليل المجال النابض الناشئ عن الملف الأحادي، إلى مجالين دوارين في اتجاهين متضادين، وقيمة كل منهما تساوي نصف القيمة العظمى للمجال النابض، تم تجزئة الجزء الذي يمثل التأثير المشترك للمجال الأمامي والخلفي، إلى جزأين متساويين في الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (٨ - ١)، الجزء الأول يمثل تأثير المجال الأمامي، والجزء الثاني يمثل تأثير المجال الخلفي.



شكل ١ - ٩ الدائرة المكافئة في حالة السكون مبيناً تأثير المجال الأمامي والمجال الخلفي.

دعنا الآن نستعرض الحالة بعد أن يبدأ المحرك دورانه بواسطة وسيلة مساعدة، واستمراره في الدوران بانزلاق (s)، في اتجاه مجاله الأمامي، وملفه الرئيسي فقط موصل مع مصدر الجهد، يتولد تيار في العضو الدوار بتردد (sf)، نتيجة للمجال الأمامي، حيث (f) هي تردد المصدر، سيقوم هذا التيار بدوره بتوليد مجال مغناطيسي يدور بسرعة (sNs) بالنسبة للعضو الدوار، أي بسرعة (N+sNs=N_s) بالنسبة للعضو الثابت. محصلة المجال الأمامي للثابت والدوار ستولد جهداً مضاداً للمصدر (E_{mf}). كما يراه الثابت (فيما يختص بالمجال الأمامي)، تماماً كما يحدث في حالة المحركات الحثية ثلاثية الأوجه، حيث تكون المقاومة والممانعة الحثية للدوار منسوبة للثابت هي $\{0.5(R_2/s + jX_2)\}$ على التوازي مع $(0.5jX_m)$ ، المعامل (0.5) ظهر هنا بسبب تحليل المجال النابض إلى مجالين دوارين، كل منهما له نصف القيمة العظمى للمجال النابض، كما هو موضح بالدائرة المكافئة بالشكل (١٠ - ١) في الجزء الذي يمثل المجال الأمامي المشار إليه بالرمز (f).

بما أن الانزلاق بالنسبة للمجال الخلفي ($s_b = 2-s$) فسيولد تيار في العضو الدوار نتيجة للمجال الخلفي بتردد $\{(2-s)f\}$ ، مكوناً مجالا مغناطيسياً، يدور في الفراغ بسرعة التزامن، في اتجاه المجال الخلفي، بناء عليه سيكون تأثير الدوار كما يراه الثابت بالنسبة إلى المجال الخلفي، كما هو موضح بالدائرة المكافئة بالشكل (١٠ - ١) في الجزء الخاص بالمجال الخلفي المشار إليه بالرمز (b)، وبالمثل فإن محصلة المجال الخلفي للعضو الثابت والعضو الدوار تولد جهداً (E_{mb}) مضاداً لجهد المصدر.

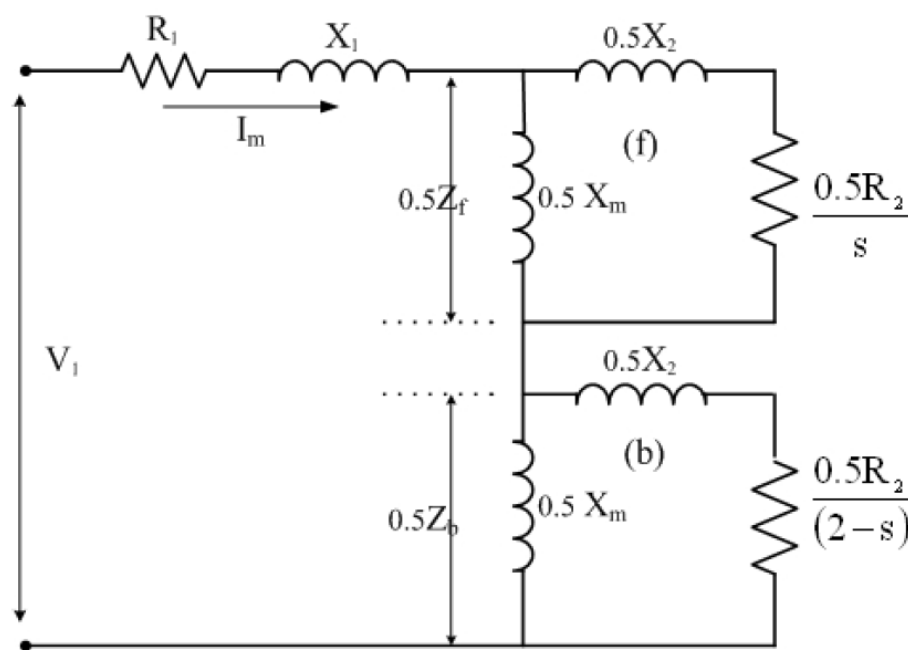
باستخدام الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (١- ١٠) نستطيع حساب جميع خواص المحرك، مثل القدرة والتيار ومعامل القدرة والعزم إلخ....، عند أي انزلاق محدد، وعندما تكون ثوابت المحرك معلومة.

لتبسيط الدائرة المكافئة افترض أن:

$$Z_f \equiv R_f + jX_f \equiv \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \text{ in parallel with } jX_m$$

$$Z_b \equiv R_b + jX_b \equiv \left(\frac{R_2}{2-s} + jX_2 \right) \text{ in parallel with } jX_m$$

في الدائرة المكافئة يلاحظ أن ($0.5 Z_f$, $0.5 Z_b$) تمثل رد فعل المجالين الأمامي والخلفي، كما يلاحظ أن قيمة (E_{mf}) تتزايد بينما قيمة (E_{mb}) تتناقص، كلما زادت السرعة وقل الانزلاق، بسبب زيادة (Z_f) ونقص (Z_b)، حيث إن قيمة الأولى تعتمد على قيمة (R_2/s) وقيمة الثانية تعتمد على $\{R_2/(2-s)\}$.



الشكل (١- ١٠)

مثال ١- ٤ :

الملفات الرئيسية لمحرك حثي أحادي الوجه 120-V ، 60 Hz ، ذي ستة أقطاب لها الثوابت الآتية:

$$R_1 = 2.4 \Omega , X_1 = 3.6 \Omega , R_2 = 1.6 \Omega , X_2 = 3.6 \Omega , X_m = 75 \Omega , s = 0.05$$

- احسب سرعة المحرك.
- مقاومة الدوار التأثيرية في الدائرة المكافئة للمجال الأمامي.
- مقاومة الدوار التأثيرية في الدائرة المكافئة للمجال الخلفي.
- المعاوقة الكلية لدائرة المجال الأمامي عند بدء الحركة وعند $s = 0.05$.
- المعاوقة الكلية لدائرة المجال الخلفي عند بدء الحركة وعند $s = 0.05$.

$$N_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{60 \times 60}{3} = 1200 \quad \text{rpm}$$

$$N = (1-s) N_s = (1-0.05) \times 1200 = 1140 \quad \text{rpm}$$

مقاومة الدوار التأثيرية في الدائرة المكافئة للمجال الأمامي تساوي $(0.5 R_2 / s)$.

$$\text{The effective rotor resistance in the forward branch} = \frac{0.5 R_2}{s} = \frac{0.5 \times 1.6}{0.05} = 16 \quad \Omega$$

مقاومة الدوار التأثيرية في الدائرة المكافئة للمجال الخلفي تساوي $\{ 0.5 R_2 / (2-s) \}$

$$\text{The effective rotor resistance in the backward branch} = \frac{0.5 R_2}{(2-s)} = \frac{0.5 \times 1.6}{1.95} = 0.41$$

المعاوقة الكلية لدائرة المجال الأمامي $(0.5 Z_f)$ حيث Z_f تحسب من:

$$Z_f = \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \times (jX_m)}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)}$$

at starting $s=1$

$$Z_f = \frac{(1.6 + j3.6) \cdot (j75)}{1.6 + j(3.6 + 75)} = \frac{(3.94 \angle 66.04)(75 \angle 90)}{78.62 \angle 88.834} = 3.76 \angle 67.166 \quad \Omega$$

$$0.5 Z_f = 1.88 \angle 67.166 \quad \Omega$$

at $s = 0.05$

$$Z_f = \frac{\left(\frac{1.6}{0.05} + j3.6\right) \cdot (j75)}{\frac{1.6}{0.05} + j(3.6 + 75)} = \frac{(32.2 \angle 6.42) \cdot (75 \angle 90)}{84.864 \angle 67.85} = 28.46 \angle 28.57 \quad \Omega$$

$$0.5Z_f = 14.23 \angle 28.57 \quad \Omega$$

واضح الزيادة في قيمة Z_f مع زيادة السرعة ونقصان الانزلاق، من ($s=1$) عند بدء الحركة إلى ($s=0.05$) عند التشغيل.

المعاوقة الكلية لدائرة المجال الخلفي ($0.5 Z_b$) حيث Z_b تحسب من:

$$Z_b = \frac{\left(\frac{R_2}{2-s} + jX_2\right) \times (jX_m)}{\frac{R_2}{2-s} + j(X_2 + X_m)}$$

at starting $s=1$

$$Z_b = \frac{(1.6 + j3.6) \cdot (j75)}{1.6 + j(3.6 + 75)} = Z_f = 3.76 \angle 67.166 \quad \Omega$$

$$0.5Z_b = 1.88 \angle 67.166 \quad \Omega$$

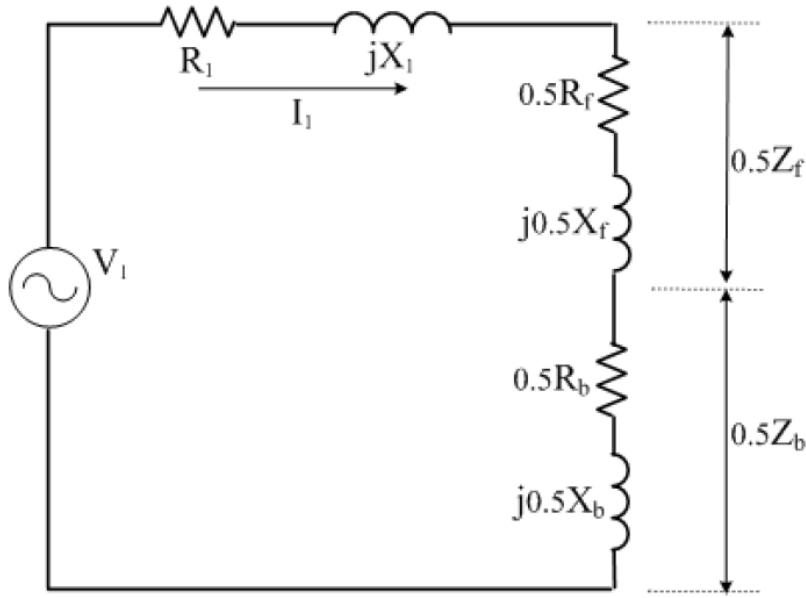
at $s = 0.05$

$$Z_b = \frac{\left(\frac{1.6}{1.95} + j3.6\right) \cdot (j75)}{\frac{1.6}{1.95} + j(3.6 + 75)} = \frac{(3.692 \angle 77.17) \cdot (75 \angle 90)}{78.6 \angle 89.4} = 3.523 \angle 77.77 \quad \Omega$$

$$0.5Z_b = 1.761 \angle 77.77 \quad \Omega$$

جميع خواص المحرك يمكن استنتاجها بمساعدة الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (١٠ - ١)

والتي يمكن تبسيطها إلى الشكل (١١ - ١)، باستخدام هذه الدائرة يمكن استنتاج العلاقات التي تربط بين القدرة المتولدة والعزم المتولد و المفايد والانزلاق، التي تم استنتاجها للمحرك الحثي الثلاثي الأوجه، كم ورد في مقرر آلات التيار المتردد.



شكل ١ - ١١ الدائرة المكافئة المبسطة.

العزم المتولد نتيجة للمجال الأمامي يمكن حسابه من:

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_s} \quad \text{N.m} \quad ٦-١$$

حيث (P_{gf}) قدرة الشجرة بالوات ، المتولدة نتيجة للمجال الأمامي ، (ω_s) سرعة التزامن بالرادياز كل ثانية . حيث إن (P_{gf}) سوف تمتص فقط في المقاومة ($0.5R_f$) ، إذا:

$$P_{gf} = I_1^2 (0.5R_f) \quad \text{watt} \quad ٧-١$$

بالمثل:

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_s} \quad \text{N.m} \quad ٨-١$$

$$P_{gb} = I_1^2 (0.5R_b) \quad \text{watt} \quad ٩-١$$

محصلة العزم المتولد:

$$T = T_f - T_b \quad ١٠-١$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} (P_{gf} - P_{gb}) \quad ١١-١$$

المفقودات النحاسية بالدوار والتي تسمى ($I^2 R \text{ loss}$)، يمكن حسابها من حاصل ضرب الانزلاق في قدرة الثغرة الممتصة من العضو الثابت، مفقودات الدوار النحاسية الناتجة عن المجال الأمامي والمجال الخلفي هي على الترتيب

$$\text{Forward field rotor } I^2 R \text{ loss} \equiv P_{cu2f} = s P_{gf} \quad ١٢-١$$

$$\text{Backward field rotor } I^2 R \text{ loss} \equiv P_{cu2b} = (2-s).P_{gb} \quad ١٣-١$$

$$\text{Total rotor } I^2 R \text{ loss} = s P_{gf} + (2-s).P_{gb} \quad ١٤-١$$

القدرة الميكانيكية المتولدة:

$$P_m = (1-s).P_g \quad ١٥-١$$

$$P_m = (1-s).(P_{gf} - P_{gb}) \quad ١٦-١$$

القدرة المستفاد منها والعزم المستفاد منه:

$$P_o = P_m - \text{losses} \quad ١٧-١$$

$$T_o = \frac{P_o}{\omega} \quad \text{N.m} \quad ١٨-١$$

$$\text{but } \omega = (1-s)\omega_s \quad ١٩-١$$

$$T_o = \frac{P_o}{(1-s)\omega_s} \quad \text{N.m} \quad ٢٠-١$$

مثال ١- ٥:

محرك حثي أحادي الوجه $\frac{1}{4}$ حصان، 110 فولت، 60 هيرتز وذو أربعة أقطاب له الثوابت الآتية:

$$R_1 = 2.02 \, \Omega \quad X_1 = 2.79 \, \Omega \quad X_m = 66.8 \, \Omega$$

$$R_2 = 4.12 \, \Omega \quad X_2 = 2.12 \, \Omega$$

المفاقيد الحديدية 24 وات المفاقيد الميكانيكية 13 وات، عند انزلاق $s = 0.05$ احسب:

تيار الدخل، قدرة الدخل، معامل القدرة، القدرة الميكانيكية المتولدة و العزم المتولد و قدرة الخرج و

كفاءة المحرك و المفقودات النحاسية بالدوار.

at $s = 0.05$

$$Z_f = \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \text{ in parallel with } jX_m$$

$$Z_f = \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \times (jX_m)}{\left(\frac{R_2}{s} + j(X_2 + jX_m) \right)}$$

$$Z_f = 31.9 + j40.3$$

Ω

$$Z_f = 31.9 + j40.3$$

$$Z_b = \left(\frac{R_2}{2-s} + jX_2 \right) \text{ in parallel with } jX_m$$

$$Z_b = \frac{\left(\frac{R_2}{2-s} + jX_2 \right) \times (jX_m)}{\left(\frac{R_2}{2-s} + j(X_2 + X_m) \right)}$$

$$Z_b = 1.98 + j2.12$$

Ω

$$Z_{in} = Z_1 + 0.5 Z_f + 0.5 Z_b$$

$$Z_{in} = (2.02 + j2.79) + 0.5(31.9 + j40.3) + 0.5(1.98 + j2.12)$$

$$Z_{in} = 18.96 + j24 = 30.6 \angle 51.7^\circ$$

Ω

The input current is :

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{in}} = \frac{110 \angle 0}{30.6 \angle 51.7^\circ} = 3.59 \angle -51.7^\circ$$

Apm.

$$\text{The power factor} = \cos(\phi) = \cos(-51.7) = 0.62$$

$$\text{The power input} = V_1 I_1 \cos(\phi)$$

$$P_1 = 110 \times 3.59 \times 0.62 = 244$$

Watt

$$P_{gf} = 0.5 I_1^2 R_f = 0.5 \times (3.59)^2 \times 31.9 = 206$$

Watt

$$P_{gb} = 0.5 I_1^2 R_b = 0.5 \times (3.59)^2 \times 1.98 = 12.8$$

Watt

$$P_g = P_{gf} - P_{gb} = 206 - 12.8 = 193.2$$

Watt

$$P_m = (1-s)P_g = (0.95) \times 193.2 = 184$$

Watt

The rotational losses = 24 + 13 = 37

Watt

The power output $\equiv P_o = P_m - \text{losses}$

Watt

$$P_o = 184 - 37 = 147$$

The efficiency $\equiv \eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{147}{244} = 0.6 = 60\%$

$$N_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{60 \times 60}{2} = 1800$$

rpm

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{2 \times \pi \times 1800}{60} = 188.5$$

rad/sec.

$$N = (1 - s) N_s = 0.95 \times 1800 = 1710$$

rpm

$$\omega = (1 - s) \omega_s = 0.95 \times 188.5 = 179$$

rad/sec.

The developed torque $\equiv T_d = \frac{P_g}{\omega_s}$

$$T_d = \frac{193.2}{188.5} = 1.1$$

N.m.

The output torque $\equiv T_o = \frac{P_o}{\omega} = \frac{147}{179} = 0.82$

N.m.

$$\begin{aligned} \text{The rotor } I^2 R \text{ loss} &= s P_{gf} + (2 - s) \times P_{gb} \\ &= 0.05 \times 206 + 1.95 \times 12.8 \\ &= 10.3 + 24.96 = 35.26 \end{aligned}$$

Watt

Watt

المحركات الحثية

Induction Motors

Three Phase Induction Motors:

المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

تمهيد :

يعتبر المحرك الحثي متعدد الأوجه الذي قام باختراعه نيقولا تسلا عام ١٨٨٦م الأكثر انتشاراً في عالم الصناعة حتى يومنا هذا ، جاء هذا الانتشار الواسع لهذا المحرك نتيجة لما يتمتع به من مزايا مثل :

- بساطة ومتانة التركيب.
- انخفاض الثمن مقارنة بالمحركات الأخرى.
- لا يحتاج لصيانة.
- إمكانية تصميمه بقدرات تتراوح من جزء الحصان إلى أكثر من عشرة آلاف حصان.
- لا يحتاج إلى تيار للمجال كما في المحركات الأخرى.

ومن عيوب هذا المحرك :

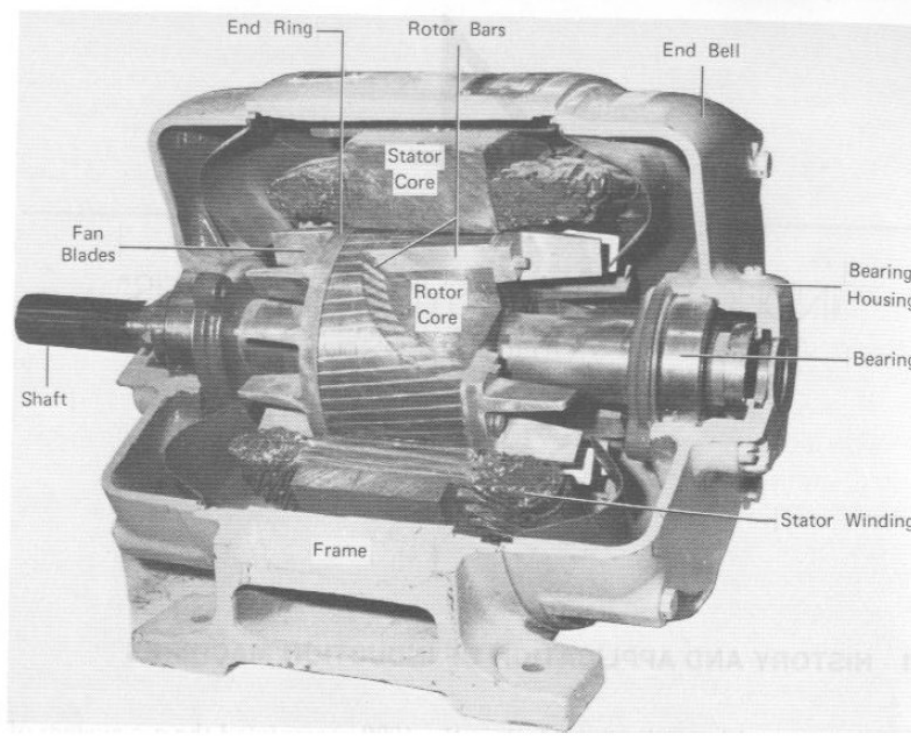
- صعوبة التحكم في سرعته.
- تيار البدء لهذا المحرك عالٍ (٥ - ٧) أضعاف تيار الحمل الكامل)
- معامل القدرة منخفض عند الأحمال الخفيفة.

لذا فإن مميزات هذه المحركات تفوق عيوبها في معظم التطبيقات الصناعية التي لا تتطلب تغييراً في السرعة كما أنه وجد حديثاً وسائل تحكم إلكترونية أدت إلى التغلب على هذه العيوب.

سميت المحركات الحثية بهذا الاسم لان الجهود والتيارات المتولدة في ملفات العضو الدائر تتولد بالحث (Induction) من تأثير التيارات المترددة بملفات العضو الثابت، تماماً كما يحدث في المحولات، لذلك يمكن اعتبار المحرك الحثي محولاً دواراً ، ملفاته الابتدائية ثابتة و ملفاته الثانوية حرة للحركة الدورانية.

١- تركيب المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

المحرك الحثي ثلاثي الأوجه يتركب من عضوين رئيسيين هما العضو الثابت Stator والعضو الدائر Rotor، كما في الشكل (١- ١).



شكل ١- ١: مقطع في محرك حثي ثلاثي الأوجه

١- ١- ١ تكوين العضو الثابت:

العضو الثابت يتكون كما في الشكل (١- ٢)، من شرائح متراسة من الحديد المغناطيسي تتراوح سماكتها من ٠,٣ إلى ٠,٦ مم حسب حجم المحرك، هذه الشرائح معزولة عن بعضها البعض بعازل كهربائي بحيث تكون مع بعضها البعض جسماً أسطوانياً محفوراً بداخله عدد من المجاري لاحتواء الملفات الثلاثية، الشكل (١- ٢).

الهدف من تصنيع العضو الثابت من شرائح متراسة من الحديد المغناطيسي هو التقليل من القدرة المفقودة نتيجة للتيارات الدوامية وبالتالي من حرارة الحديد التي تتكون بسبب تعرض الحديد للمجال المغناطيسي المتغير داخل المحرك، وبعد اكتمال تصنيع العضو الثابت بهذه الطريقة يتم تقسيمه إلى العدد المطلوب من الأقطاب وتقسم المجاري التي تخص كل قطب على الأوجه الثلاثة، بعد ذلك يتم تركيب ملفات كل وجه في المجاري الخاصة به تحت كل قطب، بحيث يفصل بين كل وجه وآخر ١٢٠ درجة

كهربائية، في نهاية عملية اللف يكون قد تم تركيب ثلاثة ملفات في العضو الثابت لكل ملف طرفان، هذه الأطراف الستة يتم تغذية العضو الثابت من خلالها بعد توصيلها إما على شكل نجمة أو دلتا.



الشكل ١ - ٢: اليمين شريحة عضو ثابت
والى اليسار العضو الثابت لمحرك كبير أثناء
إدخال الملفات داخل المجاري

١ - ٢ تكوين العضو الدائر:

يوجد منه نوعان مختلفان في تكوينهما، وإن كانت خواصهما الكهربائية متقاربة جداً. يُسمَّى المحرك عادةً باسم عضوه الدائر، للتمييز بين نوعين من المحركات الحثية ثلاثية الأوجه، هما المحركات ذات الحلقات الانزلاقية (Slip-ring motors) وتسمى أيضاً المحركات ذات العضو الدائر الملفوف، (Wound rotor motors) والمحركات ذات القفص السنجابي (Squirrel cage motors)

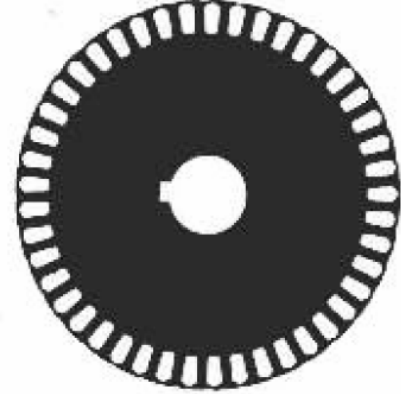
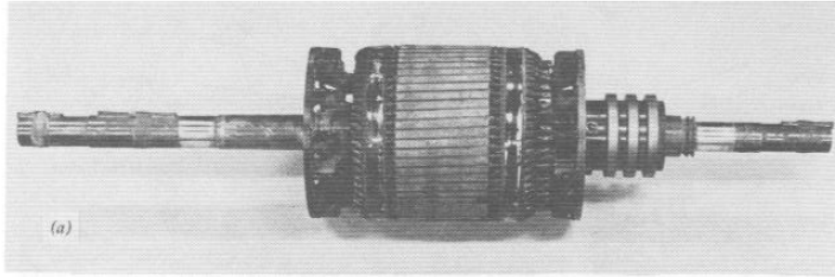
(Wound Rotor)

أ- العضو الدائر ذو حلقات الانزلاق:

يتكون العضو الدائر في المحركات ذات الحلقات الانزلاقية من جسم اسطواني من رقائق الحديد المغناطيسي المعزولة عن بعضها البعض، وبه مجاري على سطحه الخارجي تحتوي على ملفات ثلاثية الأوجه، يتم ترتيبها في المجاري على نحو مماثل لترتيب الملفات في العضو الثابت.

أي أن العضو الدائر يقسم إلى عدد من الأقطاب الذي يجب أن يكون مساوياً لأقطاب العضو الثابت الذي سيركب فيه وتقسم مجاري كل قطب إلى ثلاثة أقسام، كل قسم يركب فيه ملفات أحد الأوجه الثلاثة بحيث يكون بين كل وجه وآخر ١٢٠ درجة كهربائية. لذلك يطلق عليه اسم العضو الدائر الملفوف (Wound rotor). ويتم توصيل ملفات العضو الدائر الثلاثية على شكل نجمة أو دلتا، كما

توصل الأطراف في الحالتين إلى ثلاث حلقات انزلاقية (Slip Rings) مركبة على نفس عمود الإدارة للمحرك وتدور معه، الشكل (١ - ٣). يمكن توصيل ملفات العضو الدائر بناءً على ذلك إلى أية دائرة خارجية ثلاثية الأوجه، مثل مقاومات ثلاثية الأوجه عن طريق فرش كربونية فوق الحلقات الانزلاقية، وذلك من أجل التحكم في بدء حركة المحرك أو في تنظيم سرعته، لذلك فإن هذا النوع من المحركات يتميز بإمكانية تغيير خواص تشغيله على نطاق واسع.



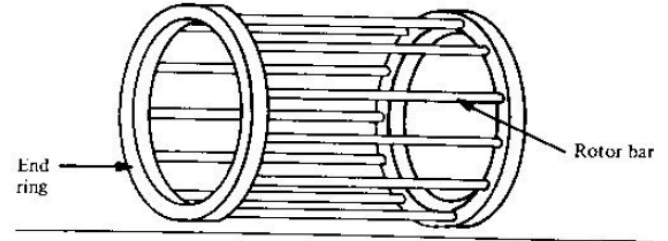
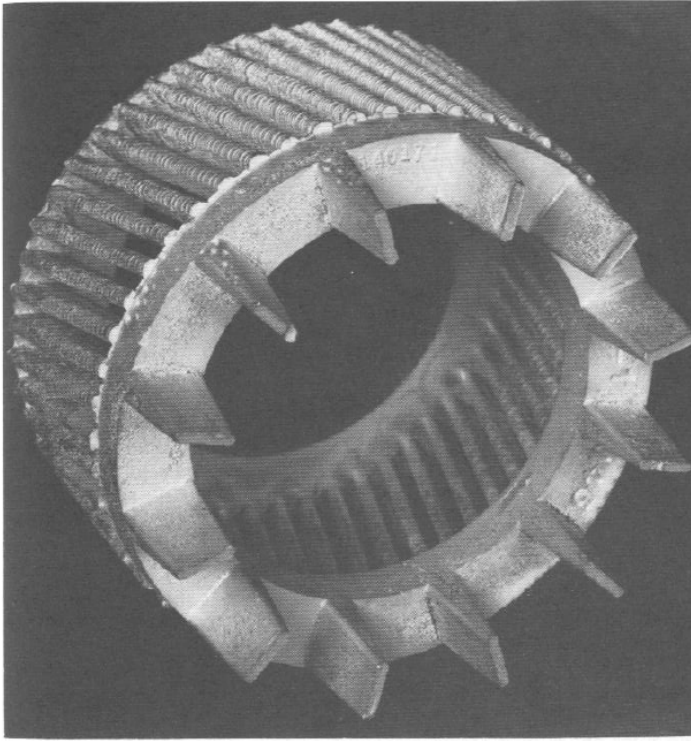
الشكل ١ - ٣: شريحة عضو دائر
والى اليمين (a): عضو دائر ملفوف
(b) عضو دائر ذو قفص سنجابي

(Squirrel-cage rotor)

ب- العضو الدائر ذو القفص السنجابي:

العضو الدائر ذو القفص السنجابي يتكون من جسم اسطواني من رقائق الحديد وبه مجارٍ على النحو السابق، ولكن بدلاً من الملفات ثلاثية الأوجه، التي توجد في النوع الأول، تصب داخل هذه المجاري قضبان من النحاس أو الألمنيوم وتتصل أطرافها من كل ناحية بحلقة متينة من نفس المعدن، بحيث تشبه القضبان والحلقتان في تكوينهما قفص السنجاب (Squirrel cage) كما في شكل (١ - ٣) و (٤ - ٤)، ومن ثم جاءت تسمية هذا النوع من المحركات بأنها ذات القفص السنجابي.

يكون تغيير خواص تشغيل هذا النوع من المحركات الحثية عن طريق العضو الثابت فقط، حيث إن القفص السنجابي للعضو الدائر ليس له أطراف يمكن الوصول إليها لتغيير خواص المحرك، كما أن قفص السنجاب يتواءم مع أي عدد من الأقطاب أو الأوجه للعضو الثابت الذي سيركب معه



الشكل ١ - ٤: قضبان القفص السنجابي ويظهر فيه قطبا النحاس أو الألمنيوم وحلقات القصر

١ - ٢ كيفية تكوين المجال المغناطيسي الدوار:

عند توصيل مصدر جهد كهربائي ثلاثي الأوجه، بين كل وجه وآخر ١٢٠ درجة كهربائية، إلى ملفات العضو الثابت والتي بين كل ملف وآخر منها زاوية فراغية قدرها ١٢٠ درجة، سيمر في هذه الملفات تيارات متزنة بين كل تيار وآخر ١٢٠ درجة، ونتيجة لمرور هذه التيارات بهذه الصفة في تلك الملفات سينشأ في الثغرة الهوائية مجال مغناطيسي دوار منتظم كما في الشكل (١ - ٥)، هذا المجال المغناطيسي يدور بسرعة تسمى السرعة التزامنية Synchronous speed وتحسب من المعادلة التالية:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{P} \quad \text{المعادلة (١ - ١)}$$

حيث:

n_s : السرعة التزامنية

f_s : تردد تيار العضو الثابت

P : عدد أقطاب للآلة

الشكل (١ - ٥) يوضح كيفية تكوين المجال المغناطيسي الدوار في محرك حثي ثلاثي الأوجه له قطبان لكل وجه، نتيجة لتغذية ملفاته الثلاثية بتيار ثلاثي الأوجه.

١- ٢ كيفية عمل المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

عند توصيل أطراف العضو الثابت بمصدر الجهد فإنه سينشأ مجال مغناطيسي دوار، هذا المجال المغناطيسي الدوار سيولد قوة دافعة كهربائية في أي موصل كهربائي يقع ضمن نطاق تأثيره وذلك طبقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي، وحيث إن العضو الدائر يقع ضمن تأثير هذا المجال المغناطيسي الدوار فإنه سينشأ في موصلاته قوة دافعة كهربائية ثلاثية الأوجه، وبما إن موصلات العضو الدائر مقصورة من الطرفين فإنه سيمر فيها تيارات ثلاثية الأوجه بين كل وجهه وآخر ١٢٠ درجة ومن ثم سيتولد مجال مغناطيسي دوار آخر في الثغرة الهوائية نتيجةً لمرور تيارات ثلاثية الأوجه في موصلات العضو الدائر، إذا أصبح لدينا مجالان مغناطيسيان دواران الأول ناتج من العضو الثابت ويدور بالسرعة التزامنية (n_s) والثاني ناتج من العضو الدائر ويدور بسرعة ($n_s - n$) بالنسبة للعضو الدائر، حيث n هي سرعة العضو الدائر، ويدور بالسرعة التزامنية (n_s) بالنسبة للعضو الثابت. وحيث إن هذين المجالين المغناطيسيين يدوران بنفس السرعة والاتجاه فإنه سيتولد عزم فعال على العضو الدائر يؤدي إلى دورانه بنفس اتجاه دوران المجالين الشكل (١ - ٦)، هذا العزم يتناسب طردياً مع شدة المجالين وجيب الزاوية بينهما طبقاً للمعادلة (١ - ٢):

$$T \propto F_s \cdot F_r \cdot \sin(\delta_{sr}) \quad \text{المعادلة (١ - ٢)}$$

حيث:

T : العزم.

F_s : شدة المجال المغناطيسي في العضو الثابت.

F_r : شدة المجال المغناطيسي في العضو الدائر.

δ_{sr} : الزاوية بين مجال العضو الثابت ومجال العضو الدائر.

عندما يبدأ العضو الدائر بالتسارع، بدون حمل، فإن السرعة النسبية بين سرعة المجال المغناطيسي وسرعة العضو الدائر ستتناقص كلما زادت سرعة العضو الدائر طبقاً للمعادلة التالية:

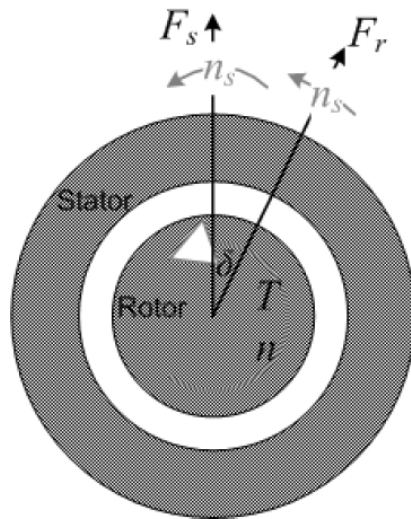
$$n_f = n_s - n \quad \text{المعادلة (١ - ٣)}$$

حيث:

n_f : سرعة قطع خطوط المجال المغناطيسي لموصلات العضو الدائر (أو السرعة النسبية).

بالتالي فإن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بسبب الحث الكهرومغناطيسي في موصلات العضو الدائر ستتناقص مع ازدياد سرعة العضو الدائر، ذلك لأن هذه القوة المتولدة تتناسب طردياً مع السرعة النسبية بين الموصل والمجال الذي يتعرض له وبالتالي فإن قيمة التيارات المارة في موصلات العضو الدائر ستتناقص، وبالتالي ستتناقص أيضاً شدة المجال المغناطيسي الناشئ عنها، ومن ثم يقل العزم المتولد من العضو الدائر، وهكذا حتى تصل سرعة العضو الدائر إلى سرعة قريبة من السرعة التزامنية فتكون التيارات المتولدة في موصلات العضو الدائر صغيرة وبالتالي يضعف المجال المغناطيسي الناشئ عنها مما يؤدي إلى انخفاض العزم المؤثر على العضو الدائر، وعندما تستقر سرعة العضو الدائر عند اللاحمل فإن العزم المتولد من العضو الدائر يكون مساوياً لعزم الاحتكاك الذي يتعرض له العضو الدائر.

عند تحميل المحرك تقل سرعة العضو الدائر وينتج عن ذلك زيادة في سرعة قطع المجال المغناطيسي لموصلات العضو الدائر، مما يؤدي إلى زيادة قيم الجهود المتولدة والتيارات المارة في موصلاته وبالتالي زيادة شدة المجال المغناطيسي الناشئ عنها ومن ثم زيادة العزم المتولد من العضو الدائر، حتى تستقر سرعة العضو الدائر عند سرعة جديدة، عندها يكون العزم المتولد مساوياً لعزم الحمل.



شكل ١- ٦ المجالات المغناطيسية الدوارة في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه

١-٤ الانزلاق؛

عندما يدور العضو الدائر بسرعة n لفة في الدقيقة، فإن السرعة النسبية بين المجال المغناطيسي الدائر بسرعة التزامن n_s وملفات العضو الدائر هي $(n_s - n)$ وتسمى سرعة الانزلاق (Slip speed)، هذه السرعة النسبية منسوبة إلى سرعة التزامن، تعطى ما يسمى بمعامل الانزلاق، أو الانزلاق (Slip) الذي يلعب دوراً كبيراً في تحديد خواص تشغيل المحركات الحثية، ويرمز للانزلاق بالرمز (s) وتتراوح قيمته

في المحركات الصغيرة ما بين ١٪ و ٢٪ وقد تصل إلى ٠.٥٪ للمحركات الكبيرة في حالة عدم التحميل وعند التحميل يتراوح الانزلاق من ٣٪ إلى ٥٪، ويحسب من:

$$\text{Slip Speed} = n_{\text{slip}} = n_s - n$$

$$\text{Slip} = s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{المعادلة (٤ - ١)}$$

$$\% \text{Slip} = s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \%$$

كما أن قيمة الانزلاق تساوي صفراً عندما يدور العضو الدائر بنفس السرعة التزامنية ($n = n_s$) وتساوي الواحد عندما يكون العضو الدائر في حالة السكون ($n = 0$). ومن الممكن حساب سرعة العضو الدائر بدلالة السرعة التزامنية والانزلاق وذلك بعد إعادة ترتيب المعادلة (٤ - ١) كما يلي:

$$\text{Rotor speed} = n = n_s (1 - s) \quad \text{المعادلة (٥ - ١)}$$

١ - ٥ تردد الجهود والتيارات في العضو الدائر:

عندما يكون العضو الدائر في حالة سكون فإن السرعة النسبية بينه وبين المجال المغناطيسي الدوار هي n_s ، ولكن عندما يدور العضو الدائر بسرعة معينة n ، وهي تقابل انزلاقاً معيناً s طبقاً للمعادلة (٥ - ١) حيث تصبح سرعة المجال المغناطيسي الدائر بالنسبة للملفات العضو الدائر هي ($n_s - n$) لفة في الدقيقة، بعد أن كانت n_s ، وبذلك تقل قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بالتأثير في ملفات العضو الدائر وكذلك يقل ترددها بنفس النسبة.

المحرك الحثي يعمل طبقاً لنظرية الحث الكهرومغناطيسي حيث يتولد الجهد والتيار في العضو الدائر طبقاً لهذا المبدأ كما هو الحال في المحول، لذلك فإنه أحياناً يسمى محولاً دواراً والابتدائي هو العضو الثابت والثانوي هو العضو الدائر ولكن لا يشابه المحول من حيث تردد الجهد والتيار في العضو الدائر (الثانوي). فعندما يكون العضو الدائر في حالة السكون فإن تردد التيارات المتولدة فيه هي نفسها تردد التيارات في العضو الثابت (كالمحول تماماً) بينما إذا كان العضو الدائر يدور بالسرعة التزامنية فإن تردد التيارات فيه يكون صفراً.

عندما يكون العضو الدائر ساكناً أي أن ($n = 0$) فإن الانزلاق ($s = 1$) ويكون تردد العضو الدائر مساوياً لتردد العضو الثابت ($f_r = f_s$).

عندما يدور العضو الدائر بالسرعة التزامنية أي أن ($n=n_s$) فإن ($s=0$) ويكون تردد العضو الدائر ($f_r=0$).

عند أي سرعة للعضو الدائر بين الصفر والسرعة التزامنية فإن تردد التيار في العضو الدائر سيتناسب طردياً مع سرعة الانزلاق (n_s-n)، وبما أن الانزلاق هو سرعة الانزلاق منسوبة إلى السرعة التزامنية المعادلة (١-٤)، فإنه يمكن التعبير عن تردد التيارات في العضو الدائر بالمعادلة التالية:

$$f_r = s \cdot f_s \quad \text{المعادلة (١-٦)}$$

مثال (١-١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ستة أقطاب، يتغذى من مصدر جهده ٢٤٠ فولت وتردده ٦٠ هيرتز، فإذا كانت قيمة الانزلاق عند الحمل الكامل ٥٪ احسب ما يلي:

- السرعة التزامنية لهذا المحرك
 - سرعة العضو الدائر عند الحمل الكامل
 - تردد الجهد والتيار في العضو الدائر عند الحمل الكامل
- الحل:

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{120 \cdot f_s}{P} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 & \text{rpm} \\ n &= n_s (1-s) = 1200 \times (1-0.05) = 1140 & \text{rpm} \\ f_r &= s \cdot f_s = 0.05 \times 60 = 3 & \text{Hz} \end{aligned}$$

مثال (١-٢):

محرك ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب يتغذى من مصدر تردده ٥٠ هيرتز، وسرعته عند الحمل الكامل ١٤٥٥ لفة في الدقيقة، احسب سرعة الانزلاق ومعامل الانزلاق عند الحمل الكامل.

الحل:

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{120 \cdot f_s}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 & \text{rpm} \\ n_{slip} &= n_s - n = 1500 - 1455 = 45 & \text{rpm} \\ s &= \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03 & \text{p.u.} \end{aligned}$$

مثال (١-٣):

محرك حثي ذو ستة أقطاب يتغذى من مصدر تردده ٥٠ هيرتز، القوة الدافعة الكهربائية في العضو الدائر ترددها ٢,٥ هيرتز، احسب معامل الانزلاق وسرعة العضو الدائر.

الحل:

$$\begin{aligned} s &= \frac{f_r}{f_s} = \frac{2.5}{50} = 0.05 \\ n_s &= \frac{120 \cdot f_s}{p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 & \text{rpm} \\ n &= n_s \cdot (1-s) = 1000 \times (1-0.05) = 950 & \text{rpm} \end{aligned}$$

١ - ٦ الدائرة المكافئة للمحركات الحثية ثلاثية الأوجه : The Equivalent Circuit

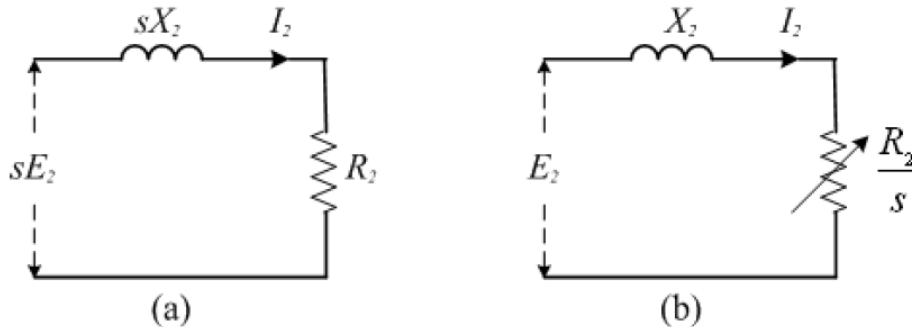
الدائرة المكافئة لوجه واحد من أوجه العضو الدوار يمكن رسمها كما هو مبين في الشكل (١-٧) (٧) ومنها نحصل على تيار العضو الدائر I_2 من العلاقة:

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad \text{المعادلة (١-٧)}$$

حيث تمثل E_2 القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في العضو الدائر عند السكون، X_2 تمثل ممانعة التسرب لكل وجه من العضو الدائر عند السكون، R_2 مقاومة العضو الدائر لكل وجه، (sE_2) تمثل القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في العضو الدائر عند انزلاق s ، (sX_2) تمثل ممانعة التسرب لكل وجه من العضو الدائر عند انزلاق s ، وبقسمة كل من بسط ومقام المعادلة (١-٧) على s نحصل على المعادلة (١-٨):

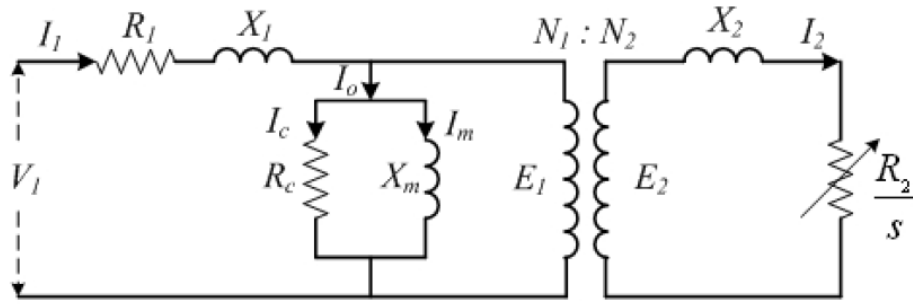
$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad \text{المعادلة (١-٨):}$$

وبإعادة رسم الدائرة المبينة في (١-٧) لتلائم العلاقة (١-٨) تصبح كما في الشكل (١-٧ب)



الشكل ١-٧: الدائرة المكافئة لوجه واحد من العضو الدائر

وللحصول على دائرة مكافئة كاملة تتضمن أيضاً دائرة العضو الثابت، ننظر للمحرك الحثي كمحول يحتوي على ثغرة هوائية، وأيضاً على مقاومة متغيرة في دائرة الثانوي. وعلى ذلك فإن الجانب الابتدائي للمحول يناظر العضو الثابت للمحرك الحثي، بينما يناظر الثانوي العضو الدائر (على أساس الوجه الواحد). غير أنه بسبب الثغرة الهوائية نجد أن قيمة ممانعة التمهبط X_m للمحرك تميل إلى الانخفاض بالمقارنة بتلك التي تخص المحول. من الممكن أن نرسم الدائرة المكافئة لكل وجه من أوجه المحرك الحثي ثلاثي الأوجه، أسوة بالمحول، كما هو موضح في الشكل (١-٨):



الشكل (٨ - ١): الدائرة المكافئة لوجه واحد للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

حيث:

R_1, R_2 : مقاومة ملفات العضو الثابت والعضو الدائر لكل وجه.

X_1, X_2 : ممانعة التسرب الحثية لملفات العضو الثابت والعضو الدائر لكل وجه.

R_c : مقاومة تمثل المفايد الحديدية، التيار المار بها يمثل تيار المفايد الحديدية.

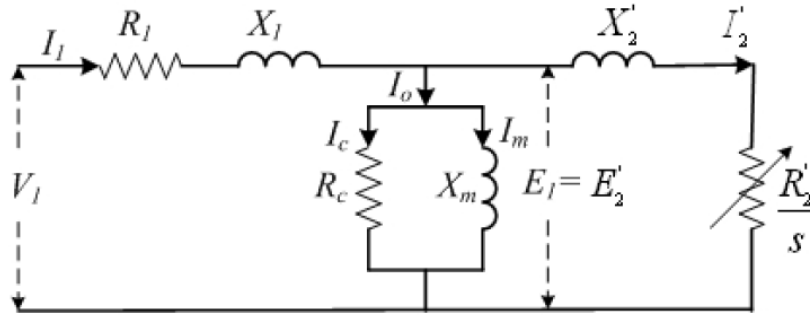
X_m : ممانعة التمرغظ، التيار المار بها هو تيار الممرغظ.

N_1, N_2 : عدد اللفات للعضو الثابت والعضو الدائر.

وإذا أخذنا في الاعتبار أوجه التشابه بين المحرك الحثي والمحول، فيمكن أن ننسب كميات العضو

الدائر إلى العضو الثابت لنحصل على الدائرة المكافئة الدقيقة لكل وجه كما هو مبين في الشكل

(٩ - ١):



الشكل (٩ - ١): الدائرة المكافئة للمحرك الحثي منسوبة إلى الابتدائي (العضو الثابت)

حيث:

$$E'_2 = E_2 \cdot \left[\frac{N_1}{N_2} \right] = a \cdot E_2 \quad \text{المعادلة (٩ - ١):}$$

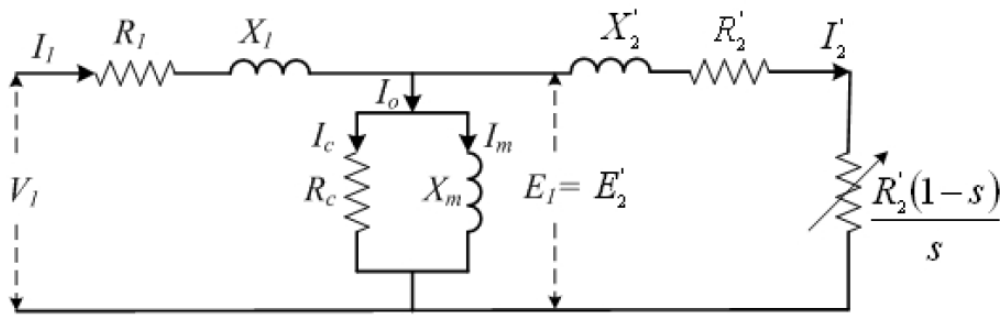
$$R'_2 = R_2 \cdot \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 = a^2 \cdot R_2 \quad \text{المعادلة (١٠ - ١):}$$

$$X'_2 = X_2 \cdot \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 = a^2 \cdot X_2 \quad \text{المعادلة (١) - (١١):}$$

$$I'_2 = I_2 \cdot \left[\frac{N_2}{N_1} \right] = I_2 / a \quad \text{المعادلة (١) - (١٢)}$$

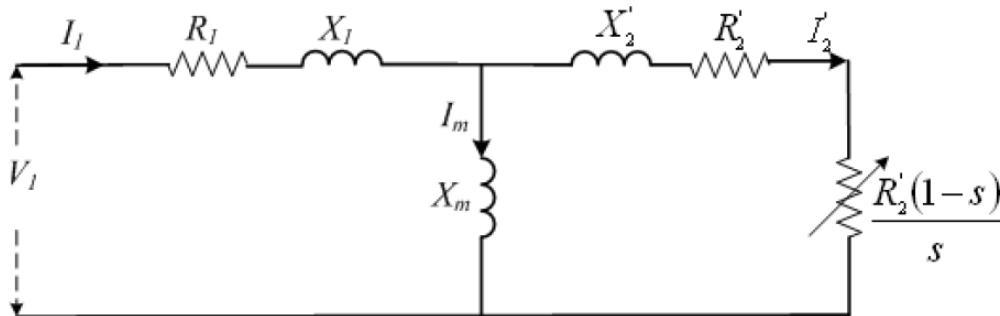
كما أن مقاومة ملفات العضو الدائر $\left\{ \frac{R'_2}{s} \right\}$ يمكن تجزئتها إلى مقاومتين كما في المعادلة (١) - (١٣)، حتى يتسنى لنا الحصول على الدائرة المبينة في الشكل (١) - (١٠):

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \cdot \left[\frac{1-s}{s} \right] \quad \text{المعادلة (١) - (١٣)}$$



الشكل ١ - ١٠: الدائرة المكافئة للمحرك الحثي بعد تجزئة مقاومة العضو الدائر

إن قيمة R'_2 تعني المقاومة لكل وجه من أوجه العضو الدائر عند السكون منسوبة على العضو الثابت، بينما $\frac{R'_2 \cdot (1-s)}{s}$ تعبر عن المقاومة الديناميكية لكل وجه التي تعتمد على سرعة العضو الدائر والتي تناظر التحميل الفعلي على المحرك. يجب ملاحظة أن قيم الثوابت المشتقة في الشكل (١) - (١٠) هي لمحرك في حالة السكون.

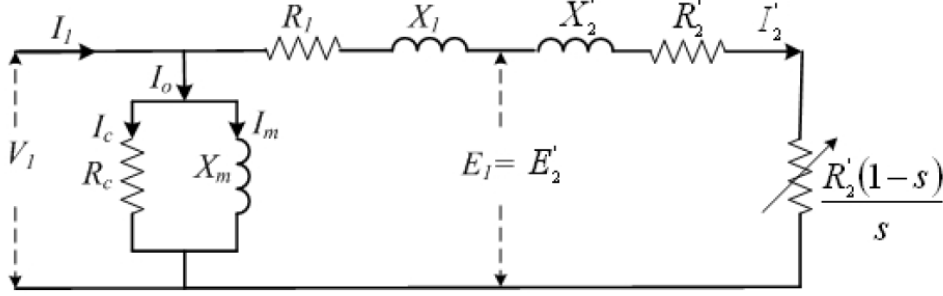


الشكل ١ - ١١: الدائرة المكافئة للمحرك الحثي بعد استبعاد R_c

الدائرة المكافئة التي في الشكل (١ - ١١) هي نفسها المبينة في الشكل (١ - ١٠) ولكن بعد استبعاد R_c (على أن يضاف الفقد في القلب الحديدي، الذي يتركز أغلبه في العضو الثابت، إلى بقية المفقودات أثناء حساب الكفاءة).

١ - ٦ - ١ تعيين ثوابت الدائرة المكافئة للمحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

يمكن أيضاً الحصول على دائرة مكافئة تقريبية بنقل الفرع الممثل للدائرة المكافئة عند اللاحمل الشكل (١ - ١٠) إلى جهة مصدر جهد الابتدائي، وذلك لأن تيار اللاحمل (I_o) صغير جداً إذا ما قورن بتيار الحمل الكامل (I_l)، فنحصل على الدائرة المكافئة التقريبية المبينة في الشكل (١ - ١٢).



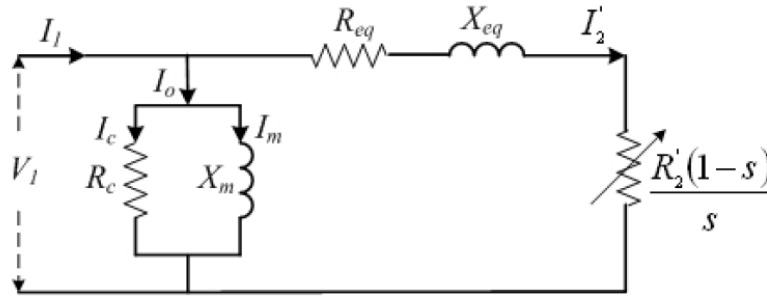
الشكل ١ - ١٢ : الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي

إذا اعتبرنا أن:

$$R_{eq} = R_1 + R_2' \quad ١٤ - ١$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2' \quad ١٥ - ١$$

يمكن رسم الدائرة المكافئة كما في الشكل (١ - ١٣):



الشكل ١ - ١٣ : الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي

بهذا التبسيط تصبح الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي مشابهة تماماً للدائرة المكافئة

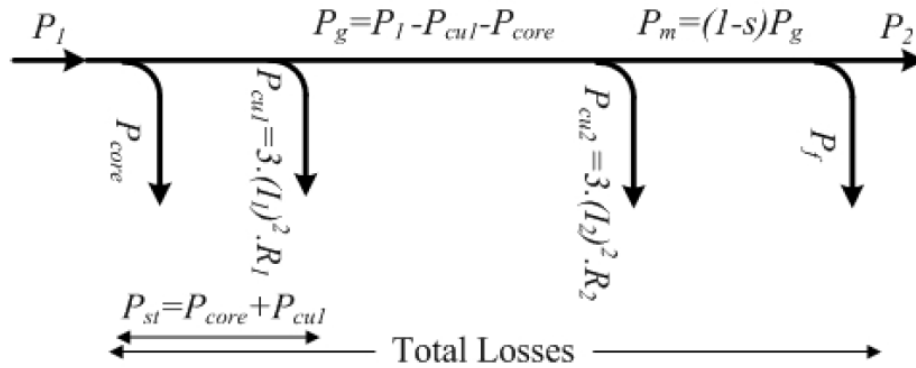
التقريبية للمحول، حيث تعتبر المقاومة $\left[R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]$ حملاً على المحرك، والقدرة المفقودة في هذه

المقاومة تمثل القدرة الميكانيكية المتولدة من المحرك. كما يجب أن نتذكر أن هذه الدائرة تعبر عن وجه واحد فقط من أوجه المحرك الثلاثة، فعند إجراء أي حسابات على هذه الدائرة يجب أن يؤخذ ذلك في الاعتبار.

١ - ٧ القدرة والعزم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

١ - ٧ - ١ القدرة في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

عادةً ما يوصف المحرك الحثي ثلاثي الأوجه بأنه محول دوار والدخل قدرة كهربائية في شكل جهود وتيارات ثلاثية الأوجه والخرج هو قدرة كهربائية تؤخذ من ملفات الثانوي (في المحول) ، بينما في المحرك الحثي تكون ملفات الثانوي (العضو الدائر) مقصورة و بالتالي لا تعطي قدره كهربائية وإنما تعطي قدره ميكانيكية تظهر على عمود الإدارة، شكل (١ - ١٨) يعرض مخطط سريان القدرة داخل المحرك حيث P_1 تمثل القدرة الكهربائية المسحوبة من المصدر ، و P_2 تمثل القدرة الميكانيكية الخارجة.



الشكل (١ - ١٨): مخطط سريان القدرة داخل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

يأخذ المحرك من المصدر الثلاثي الأوجه القدرة الكلية P_1 وات، وهي تساوي:

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi \quad \text{المعادلة (١ - ٢٤)}$$

حيث:

V_1 : جهد الوجه للعضو الثابت.

I_1 : تيار الوجه للعضو الثابت.

ϕ : الزاوية بين جهد الوجه وتيار الوجه وجيب تمامها هو معامل القدرة

تبدد ملفات العضو الثابت مفقوداتها النحاسية P_{cu1} في مقاومة العضو الثابت R_1 علي شكل حرارة، وتحسب من المعادلة (١ - ٢٥)، كما تتبدد في نفس الوقت أيضا مفقودات الحديد الكلية للمحرك P_{core} وذلك بسبب وجود التيارات الدوامية وظاهرة التخلف المغناطيسي في العضو الثابت، ومفقودات حديد العضو الدائر تكون ضئيلة جداً بسبب انخفاض قيمة التردد فيه عندما يكون الانزلاق

صغيراً جداً عند الحمل الكامل، وبجمع P_{cu1} مع P_{core} ، نحصل علي ما يسمى بمفقودات العضو الثابت P_{st} المعادلة (٢١ - ١). هذه القدرة المفقودة تمثلها المقاومة R_c في الدائرة المكافئة

$$P_{cu1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad \text{المعادلة (٢٥ - ١)}$$

$$P_{st} = P_{cu1} + P_{core} \quad \text{المعادلة (٢٦ - ١)}$$

الجزء المتبقي من القدرة الداخلة P_1 بعد طرح P_{st} سينتقل عبر الشفرة الهوائية إلى العضو الدائر عبر المجال المغناطيسي، وتسمى قدرة الشفرة الهوائية (air gap power) ويرمز لها بالرمز P_g أو P_{12}

$$P_g = P_{12} = P_1 - P_{st} \quad \text{المعادلة (٢٧ - ١)}$$

ويمكن حسابها أيضا من المعادلة التالية:

$$P_g = 3 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \quad \text{المعادلة (٢٨ - ١)}$$

القدرة الداخلة إلى العضو الدائر P_g سيفقد جزء منها في مقاومة ملفات العضو الدائر على شكل حرارة وتسمى مفاقيد نحاسية في العضو الدائر P_{cu2} وتحسب من المعادلة التالية:

$$P_{cu2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \quad \text{المعادلة (٢٩ - ١)}$$

المتبقي من القدرة الداخلة إلى العضو الدائر يتحول من قدره كهربائية إلى قدره ميكانيكية ويسمى القدرة الميكانيكية المتولدة ويرمز لها بالرمز P_m وتحسب من المعادلة التالية:

$$P_m = P_g - P_{cu2} \quad \text{المعادلة (٣٠ - ١)}$$

المقاومة $\left[R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]$ في الدائرة المكافئة هي التي تمثل القدرة الميكانيكية المتولدة وبالتالي يمكن حساب القدرة الميكانيكية المتولدة أيضا من المعادلة (٣١ - ١):

$$P_m = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad \text{المعادلة (٣١ - ١)}$$

القدرة الميكانيكية المتولدة P_m سيتبدد جزء منها بسبب الاحتكاك الذي يتعرض له العضو الدائر مع الهواء ومحاور الدوران، مفاقيد الاحتكاك هذه يرمز لها بالرمز P_f ، بالتالي فإن القدرة الميكانيكية الخارجة P_2 (القدرة الميكانيكية المفيدة useful mechanical power) هي الجزء المتبقي من القدرة الميكانيكية المتولدة بعد خصم القدرة المتبددة بسبب الاحتكاك كما يلي:

$$P_2 = P_m - P_f \quad \text{المعادلة (١- ٣٢):}$$

الشكل (١- ١٨) يلخص كيفية انتقال القدرة داخل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه.

من المعادلات (١- ٢٨) و (١- ٢٩) و (١- ٣١) يمكن لنا إجراء المقارنة التالية:

P_g	P_m	P_{cu2}
$3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \left(\frac{1}{s}\right)$	$3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right)$	$3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'$

نلاحظ من المقارنة أعلاه أنه عند ضرب P_g بالانزلاق s فإننا نحصل على P_{cu2} وكذلك عند ضرب P_g بالمعامل $(1-s)$ فإننا نحصل على P_m ، إذن:

$$P_{cu2} = s \cdot P_g \quad \text{المعادلة (١- ٣٣):}$$

$$P_m = (1-s) \cdot P_g \quad \text{المعادلة (١- ٣٤):}$$

$$P_g : P_m : P_{cu2} = 1 : (1-s) : s \quad \text{وأن النسبة بينهما:}$$

يتضح من المقارنة أن قدرة الثغرة الهوائية P_g تنقسم بين القدرة الميكانيكية المتولدة P_m ، وبين المفقودات النحاسية للعضو الدائر P_{cu2} بنسبة $(1-s)$ إلى s . هذا يعني أن معامل الانزلاق s يلعب دوراً أساسياً في تحديد نسبة المفاقد النحاسية P_{cu2} في العضو الدائر، فعند زيادة الانزلاق تزداد المفاقد النحاسية في العضو الدائر وتقل كفاءة المحرك. لذلك يجب أن يكون الانزلاق صغيراً بقدر الإمكان عند الحمل الكامل لكي تقل المفاقد النحاسية في العضو الدائر وتزداد كفاءة المحرك، وهذه هي طبيعة المحرك كما أشير إليها من قبل.

مثال (١- ٦):

إذا كان العضو الدائر لمحرك حثي ثلاثي الأوجه ذي تردد ٦٠ هيرتز وأقطاب، يسحب قدرة تبلغ ١٢٠ كيلووات عند تردد ٣ هيرتز، أوجد:

(أ) سرعة العضو الدائر

(ب) المفقودات النحاسية في العضو الدائر.

(ت) القدرة الميكانيكية المتولدة.

الحل:

$$s = \frac{f_r}{f_s} = \frac{3}{60} = 0.05$$

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \quad \text{rpm}$$

$$n = (1 - s) \cdot n_s = (1 - 0.05) \times 1800 = 1710 \quad \text{rpm}$$

$$P_{cu2} = s \cdot P_g = 0.05 \times 120 = 6 \quad \text{kw}$$

$$P_m = (1 - s) \cdot P_g = (1 - 0.05) \times 120 = 114 \quad \text{kw}$$

مثال (١- ٧):

إذا كانت المفقودات النحاسية للعضو الثابت للمحرك المذكور في المثال السابق تبلغ ٣ كيلووات، والمفقودات الميكانيكية تبلغ ٢ كيلووات، والمفقودات الحديدية في العضو الثابت مقدارها ١,٧ كيلووات، أوجد:

(أ) خرج المحرك على عمود الإدارة بالحصان.

(ب) كفاءة المحرك.

الحل:

$$P_2 = P_g - P_{cu2} - P_f = 120 - 6 - 2 = 112 \quad \text{kw}$$

$$P_2 = \frac{112000}{746} = 150 \quad \text{hp}$$

$$P_1 = P_g + P_{cu1} + P_{core} = 120 + 3 + 1.7 = 124.7 \quad \text{kw}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{112}{124.7} \times 100 = 89.7\%$$

مثال (١- ٨):

محرك حثي ثلاثي الأوجه له ٦ أقطاب وتردده ٦٠ هيرتز، يسحب قدرة تبلغ ٤٨ كيلووات عندما يدور بسرعة ١٤٠٠ الفة في الدقيقة، فإذا كان الفقد النحاسي في العضو الثابت ١,٤ كيلووات، والفقد في القلب ١,٦ كيلووات، والمفقودات الميكانيكية مقدارها ١ كيلووات، فأوجد كفاءة المحرك.

الحل:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{P} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \quad \text{rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0.05 \quad \text{p.u.}$$

$$P_g = P_1 - P_{st} = P_1 - (P_{cu1} + P_{corw})$$

$$P_g = 48 - (1.4 + 1.6) = 45 \quad \text{kw}$$

$$P_m = (1 - s) \cdot P_g = (1 - 0.05) \times 45 = 42.74 \quad \text{kw}$$

$$P_2 = P_m - P_f = 42.75 - 1 = 41.75 \quad \text{kw}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{41.75}{48} \times 100 = 87\%$$

مثال (١ - ٩):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ستة أقطاب يعمل على مصدر جهده ٤٤٠ فولت وتردد ٦٠ هيرتز فإذا كانت القدرة الداخلة إلى العضو الدائر ٨٠ كيلووات وتردد التيار في العضو الدائر ١٦٧ هيرتز احسب ما يلي:

(أ) الانزلاق.

(ب) سرعة العضو الدائر

(ت) القدرة الميكانيكية المتولدة

(ث) القدرة المفقودة في العضو الدائر

(ج) مقاومة ملفات العضو الدائر لكل وجه إذا كان التيار المار في ملفات العضو الدائر ٦٥ أمبير.

الحل:

$$s = \frac{f_r}{f_s} = \frac{1.67}{50} = 0.0334$$

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{P} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \quad \text{rpm}$$

$$n = (1 - s) \cdot n_s = (1 - 0.0334) \cdot 1000 = 966.6 \quad \text{rpm}$$

$$P_m = (1 - s) \cdot P_g = (1 - 0.0334) \times 80 = 77.33 \quad \text{kw}$$

$$P_{cu2} = s \cdot P_g = 0.0334 \times 80 = 2.67 \quad \text{kw}$$

$$R'_2 = \frac{P_{cu2}}{3 \cdot I_2^2} = \frac{2670}{3 \times (65)^2} = 0.21 \quad \Omega$$

مثال (١٠ - ١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ثمانية أقطاب يتغذى من مصدر تردد ٥٠ هيرتز ويدور بسرعة ٧٣٢ لفة في الدقيقة، فإذا كانت القدرة الداخلة إلى المحرك ٤٠ كيلووات و مفايد العضو الثابت ١ كيلووات و المفايد الميكانيكية بسبب الاحتكاك ٢ كيلووات احسب ما يلي:

(أ) معامل الانزلاق

(ب) القدرة الميكانيكية الخارجة (المستفاد منها) بالحصان

(ج) المفايد النحاسية في العضو الدائر

(د) كفاءة المحرك

الحل:

(أ) نوجد أولاً السرعة التزامنية:

$$n_s = \frac{120 f_s}{p} = \frac{120 \times 50}{8} = 750 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{750 - 732}{750} = 0.024$$

(ب) نستطيع إيجاد القدرة الميكانيكية الخارجة (المستفاد منها) P_2 كما يلي:

$$P_g = P_1 - P_{st} = 40 - 11 = 39$$

$$P_m = (1 - s) \cdot P_g = (1 - 0.024) \times 39 = 38.064 \text{ kw}$$

$$P_2 = P_m - P_f = 38.064 - 2 = 36.064 \text{ kw}$$

$$P_2 = \frac{36064}{746} = 48.343 \text{ hp}$$

(ج) المفايد النحاسية في العضو الدائر P_{cu2} :

$$P_{cu2} = s \cdot P_g = 0.024 \times 39 = 0.936 \text{ kw}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{36.640}{40} \times 100 = 90.16\% \text{ (د) كفاءة المحرك:}$$

١- ٢- ٣ العزم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه:

يعرف العزم أو عزم الدوران (Torque) بأنه القوة المؤثرة تأثيراً التوائياً على جسم ما فينتج عنها دوران ذلك الجسم حول مركزه، ويقاس بوحدة نيوتن متر Nm.

يتولد عزم الدوران الكلي (total developed torque) في المحرك الحثي بواسطة المجال المغناطيسي الدوار بالسرعة التزامنية n_s ونحصل عليه بقسمة P_g على ω_s المعادلة (١- ٢٨). وينشأ نفس عزم الدوران الكلي على عمود الإدارة الذي يدور بالسرعة n بفعل القدرة الميكانيكية P_m ، ونحصل عليه بقسمة P_m على ω المعادلة (١- ٢٩).

$$T = \frac{P_g}{\omega_s} \quad \text{Nm} \quad \text{المعادلة (١- ٣٥)}$$

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad \text{Nm} \quad \text{المعادلة (١- ٣٦)}$$

حيث ω_s و ω هما السرعة الزاوية للمجال المغناطيسي الدوار، والسرعة الزاوية للعضو الدائر على التوالي، بالراديان في الثانية ويحسبان من المعادلة (١- ٣٧):

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} \quad \text{rad/sec.} \quad \text{المعادلة (١- ٣٧)}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad \text{rad/sec.} \quad \text{المعادلة (١- ٣٨)}$$

بالتعويض بالمعادلة (١- ٣٦) والمعادلة (١- ٣٥) في المعادلة (١- ٣٣) يمكن أن نعبر عن العزم كما يلي:

$$T = \frac{P_g}{\omega_s} = \left(3 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \right) \div \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} \right) \quad \text{Nm}$$

$$T = K \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \quad \text{Nm} \quad \text{المعادلة (١- ٣٩)}$$

حيث

$$K = \left(\frac{3 \times 60}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \right) \quad \text{المعادلة (١- ٤٠)}$$

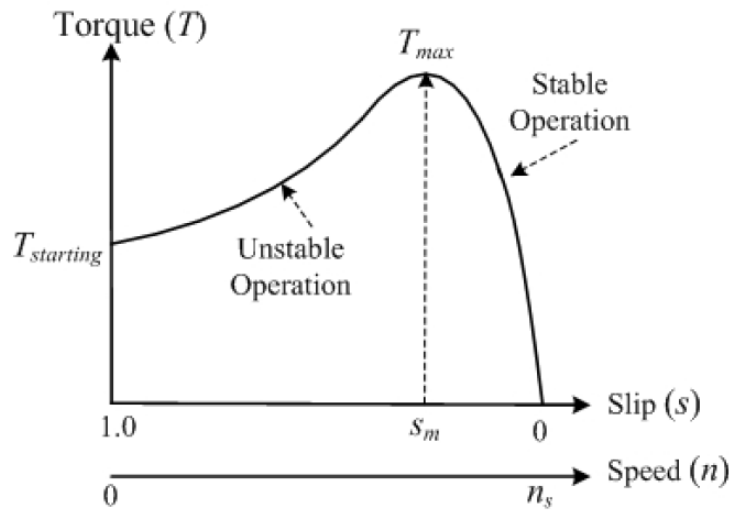
نوجد التيار I_2' بالرجوع إلى الدائرة المكافئة التقريبية في الشكل (١- ١٣) كما يلي:

$$I_2' = \frac{V_1}{Z_{eq}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{eq})^2}} \quad \text{المعادلة (١- ٤١)}$$

بالتعويض عن قيمة التيار I_2' في المعادلة (١- ٤١) يصبح العزم كما يلي:

$$T = K \cdot \frac{V_1^2}{\left(R_1 + R_2' / s\right)^2 + (X_{eq})^2} \cdot \frac{R_2'}{s} \quad \text{المعادلة (١- ٤٢)}$$

المعادلة (١- ٤٢) تمثل العلاقة بين العزم والانزلاق، ومنها يمكن حساب العزم عند أي قيمة للانزلاق وبالتالي عند أي قيمة للسرعة، عند رسم العلاقة بين العزم والانزلاق أو بين العزم والسرعة من المعادلة (١- ٤٢) نحصل على المنحنى الموضح في الشكل (١- ١٩):



الشكل (١- ١٩): العلاقة بين (العزم/السرعة) و (العزم/الانزلاق)

ينقسم منحنى العلاقة بين العزم والانزلاق الموضح في الشكل (١- ١٩) إلى جزأين مختلفين، فمن $s=0$ إلى $s=s_m$ يزداد عزم الدوران بزيادة قيمة الانزلاق بينما يقل عزم الدوران الذي يبذله المحرك من $s=s_m$ إلى $s=1$ فإن المحرك يمتلك خواص تشغيل متزنة في الجزء الأول، بينما تكون خواص تشغيله غير متزنة في الجزء الثاني. النتيجة الحتمية لوجود منطقتين مختلفتين في خواص المحرك، تتوفر في أحدهما خاصية الاتزان وتنعدم في الأخرى ولذا يجب أن نحرص على أن يظل تشغيل المحرك محصوراً في منطقة الاتزان، فلا ينتقل إلى المنطقة الأخرى إلا تحت ظروف خارجة عن الإرادة.

عادةً يكون عزم الحمل الكامل مساوياً تقريباً لنصف العزم الأقصى للمحرك بشرط أن لا يزيد عن عزم البدء، وفي حالة كون عزم الحمل أكبر من عزم البدء فإن المحرك لا يستطيع بدء الدوران، لذلك يجب بدء تشغيل المحرك بدون حمل وبعد أن يصل إلى منطقة التشغيل المتزن يضاف الحمل.

يتكون عزم الدوران الكلي T من عزم الدوران المفيد T_u (useful torque) وعزم دوران المفقودات الميكانيكية T_f . ويستفاد من عزم الدوران المفيد بأكمله في الحمل الميكانيكي، بينما تتبدد P_f هباء في المفقودات. يمكن الحصول على عزم الدوران المفيد بقسمة القدرة الخارجة P_2 على ω كما في المعادلة الآتية:

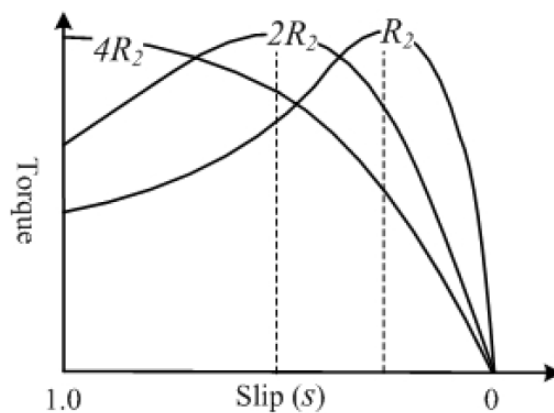
$$T_u = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n / 60} \quad \text{Nm.} \quad \text{المعادلة (٤٣ - ١):}$$

١ - ٢ - ٧ - ١ التحكم في قيمة الانزلاق الذي يحدث عنده العزم الأقصى (s_m):

معادلة العزم (٤٢ - ١) تعتبر دالة رياضية بدلالة الانزلاق (s)، القيمة العظمى لها (T_{max}) يتغير موضعها بتغير ثوابت الدائرة المكافئة، وإذا أردنا إيجاد قيمة الانزلاق الذي تحدث عنده القيمة العظمى لهذه الدالة فإن ذلك ممكن، وذلك بعد إجراء عملية تفاضل للمعادلة ومساواتها بالصفر نحصل على قيمة الانزلاق الذي يحدث عنده العزم الأقصى للمحرك وهو:

$$s_m = \frac{R_2'}{X_2'} = \frac{R_2}{X_2} \quad \text{المعادلة (٤٤ - ١):}$$

موضع العزم الأقصى (T_{max}) يمكن أن يتغير وذلك بتغير النسبة R_2' / X_2' ، ويمكن تحقيق ذلك عملياً بإضافة مقاومة ثلاثية توصل على التوالي مع ملفات العضو الدائر الملفوف (ذو حلقات الانزلاق) وبالتالي يتغير موضع العزم الأقصى للمحرك بتغيير قيمة s_m كما هو موضح في الشكل (٢٠ - ١):



الشكل (٢٠ - ١): تأثير مقاومة العضو الدائر على الانزلاق الذي يتحقق عنده العزم الأقصى

ويمكن أيضا من المعادلة (١ - ٤٢) حساب قيمة العزم الأقصى للمحرك وذلك عندما ننقل موضع العزم الأقصى إلى لحظة بدء الحركة أي عندما $R'_2 = X'_2$ و $s_m = 1$ فتصبح المعادلة:

$$T_{\max} = K \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot X'_2} \quad \text{المعادلة (١ - ٤٥)}$$

٧- ٢ - ٢ حساب عزم البدء:

يلاحظ من الشكل (١ - ٢٠) أن عزم البدء يزداد كلما زادت مقاومة ملفات العضو الدائر، أي أنه يمكن التحكم بقيمة عزم البدء وذلك بتغيير قيمة مقاومة ملفات العضو الدائر R_2 وذلك بإضافة مقاومة ثلاثية توصل على التوالي مع ملفات العضو الدائر كما هو واضح من المنحنيات في الشكل (١ - ٢٠)، أما قيمة عزم البدء فيمكن إيجادها مباشرة من المعادلة (١ - ٤٢) عندما تكون $s = 1$ (كما يلي:

$$T_{\text{starting}} = K \cdot \frac{V_1^2}{(R_1 + R'_2)^2 + X_{eq}^2} \cdot R'_2 \quad \text{المعادلة (١ - ٤٦)}$$

مثال (١ - ١١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل دلتا يتغذى من مصدر جهده ٢٤٠ فولت عناصر الدائرة المكافئة له كما يلي:

$R_1 = 0.4\Omega$	$R'_2 = 0.6\Omega$	$X_1 = 1.0\Omega$	$X'_2 = 1.0\Omega$
-------------------	--------------------	-------------------	--------------------

فإذا كانت السرعة التزامنية لهذا المحرك ١٨٠٠ لفة في الدقيقة وسرعة العضو الدائر عند الحمل الكامل ١٧١٠ لفة في الدقيقة، احسب ما يلي:

- تيار الحمل الكامل.
- عزم الحمل الكامل.
- تيار البدء.
- عزم البدء.
- أقصى عزم للمحرك وعند أي انزلاق يحدث.

الحل:

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا فإن:

$$V_1 = V_L = 240$$

V

(أ) لحساب تيار الحمل الكامل أو عزم الحمل الكامل، يجب أولاً أن نحسب الانزلاق عند الحمل الكامل كما يلي:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$$

يمكننا أن نعتبر أن $I_1 \approx I_2'$ في الدائرة المكافئة التقريبية وبالتالي يمكن حساب تيار الحمل الكامل كما يلي:

$$I_1 \approx I_2' = \frac{V_1}{Z_{eq}} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{eq})^2}}$$

$$I_1 \approx I_2' = \frac{V_1}{Z_{eq}} = \frac{240}{\sqrt{(0.4 + 0.6 / 0.05)^2 + (1 + 1)^2}} = 19.11 \quad \text{A}$$

(ب) بعد إيجاد التيار يمكن حساب عزم الحمل الكامل كما يلي:

$$K = \frac{3 \times 50}{2 \cdot \pi \cdot n_s} = \frac{3 \times 60}{2 \times \pi \times 1800} = 0.0159$$

$$T = K \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s}$$

$$T = 0.0159 \cdot (19.11)^2 \times \frac{0.6}{0.05} = 69.74 \quad \text{Nm}$$

(ت) لحساب تيار البدء I_1 نعوض عن $s=1$ كما يلي:

$$I_1 \approx I_2' = \frac{V_1}{Z_{eq}} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{eq})^2}}$$

$$I_1 \approx I_2' = \frac{240}{\sqrt{(0.4 + 0.6 / 1)^2 + (1 + 1)^2}} = 107.33 \quad \text{A}$$

(ث) عزم البدء $T_{starting}$ يحسب بالتعويض عن قيمة تيار البدء من الفقرة (ت)، والتعويض عن الانزلاق بالواحد كما يلي:

$$T_{starting} = K \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s}$$

$$T_{starting} = 0.0159 \times (107.33)^2 \times \frac{0.6}{1} = 109.9 \quad \text{Nm}$$

(ج) لحساب العزم الأقصى T_{max} والانزلاق الذي يحدث عنده العزم الأقصى s_{max} :

$$T_{max} = K \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot X_2'}$$

$$T_{max} = 0.0159 \times \frac{(240)^2}{2 \times 1} = 457.92 \quad \text{Nm}$$

$$s_{max} = \frac{R_2'}{X_2'} = \frac{0.6}{1} = 0.6$$

مثال (١ - ١٢):

محرك حثي ثلاثي الأوجه سرعته التزامنية ٩٠٠ لفة في الدقيقة، عند إجراء تجربة الدائرة المقصورة كانت القدرة الداخلة ٤٥ كيلووات عند تيار ١٩٣,٦ أمبير. فإذا كانت مقاومة العضو الثابت ٠,٢ أوم لكل وجه ونسبة التحويل (٢)، احسب باعتبار أن كل من العضوين الثابت والدائر موصل على شكل نجمة:

(أ) قيمة مقاومة ملفات العضو الدائر لكل وجه.

(ب) عزم بدء الحركة.

الحل:

$$R_{eq} = R_1 + R_2' = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2$$

$$R_{eq} = 0.2 + (2)^2 \times R_2 = 0.2 + 4 \times R_2$$

$$R_{eq} = \frac{P}{3 \cdot I_2'^2} = \frac{45 \times 10^3}{3 \times (193.6)^2} = 0.4 \quad \Omega$$

$$R_2 = 0.05 \quad \Omega$$

$$R_2' = R_{eq} - R_1 = 0.4 - 0.2 = 0.2 \quad \Omega$$

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} = \frac{2 \times \pi \times 900}{60} = 94.25 \quad \text{rad/sec}$$

$$T_{st} = 3 \cdot I_1^2 \cdot \frac{R'_2}{\omega_s} = \frac{3 \times (193.6)^2 \times 0.2}{94.25} = 238.6 \quad \text{Nm}$$

مثال (١ - ١٣):

ثوابت الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (١ - ١١) لكل وجه لمحرك حث جهده ٤٠٠ فولت وترددته ٦٠ هيرتز، وله ثلاثة أوجه موصلة على هيئة نجمة وأربعة أقطاب، هي كالآتي:

$R_1 = 2 \cdot R'_2 = 0.2 \Omega$	$X_1 = 0.5 \Omega$	$X'_2 = 0.2 \Omega$	$X_m = 20 \Omega$
-----------------------------------	--------------------	---------------------	-------------------

فإذا كان مجموع المفقودات الميكانيكية والحديدية عند سرعة ١٧٥٥ الفة في الدقيقة تبلغ ٨٠٠ واط فاحسب عند هذه السرعة:

- (أ) التيار الداخل.
- (ب) القدرة الداخلة.
- (ت) القدرة الخارجة.
- (ث) العزم المستفاد منه.
- (ج) الكفاءة.

الحل:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \quad \text{rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1800 - 1755}{1800} = 0.025$$

المعاوقة الكلية للدائرة المذكورة:

$$Z_e = (R_1 + jX_1) + \frac{[(R'_2 / s) + jX'_2] \times (jX_m)}{[(R'_2 / s) + jX'_2] + (jX_m)}$$

$$Z_e = (0.2 + j0.5) + \frac{[(0.1 / 0.025) + j0.2] \times (j20)}{[(0.1 / 0.025) + j0.2] + (j20)}$$

$$Z_e = (0.2 + j0.5) + \frac{[4 + j0.2] \times (j20)}{4 + j0.2 + j20}$$

$$Z_e = (0.2 + j0.5) + (3.77 + j0.944) = 3.97 + j1.444 \quad \Omega$$

$$Z_e = 4.223 \angle 20^\circ \quad \Omega$$

الجهد لكل وجه:

$$V_{ph} = V_L / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 231$$

V

(أ) التيار الداخل:

$$I_{ph} = I_L = \frac{231}{4.223 \angle 20} = 54.65 \angle -20$$

A

(ب) القدرة الكلية الداخلة:

$$P_{inp} = P_1 = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \phi$$

$$P_{inp} = P_1 = \sqrt{3} \times 400 \times 54.65 \times \cos(-20) = 35.58$$

kw

القدرة الشغرة الهوائية يمكن حسابها بطريقتين:

الطريقة الأولى:

$$P_g = P_1 - P_{cu1} = P_1 - 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$$

$$P_g = P_1 - P_{cu1} = 53580 - 3 \times (54.65)^2 \times (0.2) = 33.788$$

kw

الطريقة الثانية:

$$P_g = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2' / s$$

$$P_g = 3 \times (54.65)^2 \times (3.77) = 33.789$$

kw

القدرة المتولدة:

$$P_m = (1 - s) \cdot P_g = (1 - 0.025) \times 33.79 = 32.94$$

kw

(ت) القدرة الخارجة:

$$P_2 = P_m - P_f = 32940 - 800 = 32.14$$

kw

(ث) عزم الدوران المستفاد منه:

$$T_u = \frac{P_2}{\omega_m}$$

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \times \pi \times 1755}{60} = 183.8$$

rad/sec.

$$T_u = \frac{P_2}{\omega_m} = \frac{32140}{183.8} = 174.9$$

Nm

(ج) لحساب الكفاءة:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{32.14}{35.58} = 90.3\%$$

٨ - ١ طرق بدء الحركة والتحكم في سرعة المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

٨ - ١ - ١ طرق بدء الحركة :

تيار البدء الذي يسحبه المحرك الحثي ثلاثي الأوجه، عند توصيله إلى المصدر توصيلاً مباشراً، لحظة بدء دورانه تتراوح قيمته ما بين ٥ إلى ٧ أضعاف تيار الحمل الكامل، ويولد المحرك ما بين ١,٥ إلى ٢,٥ ضعف عزم الحمل الكامل، ويعتبر المحرك في حالة قصر عند البدء، ذلك لأنه عند لحظة البدء $s=1$ وأن المقاومة $R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$ في الدائرة المكافئة أصبحت صفراً، أي مقصورة، مما يعني زيادة كبيرة في تيار بدء الحركة. تيار البدء الذي يسحبه المحرك يتناسب طردياً مع جهد المصدر وعكسياً مع المعاوقة الكلية لدائرة المحرك، ويطلق على التيار الذي ينشأ عند استخدام التوصيل المباشر اسم تيار دائرة القصر للمحرك، وهو نفسه عبارة عن تيار البدء، (يمكن أيضاً تفسير الزيادة في تيار البدء عند البدء كونها تعود لعدم وجود قوة دافعة كهربائية عكسية متولدة في المحرك لتعاكس جهد المصدر). هذه الزيادة الكبيرة في تيار البدء غير مرغوب فيها لأنها تتسبب في بعض المشاكل مثل:

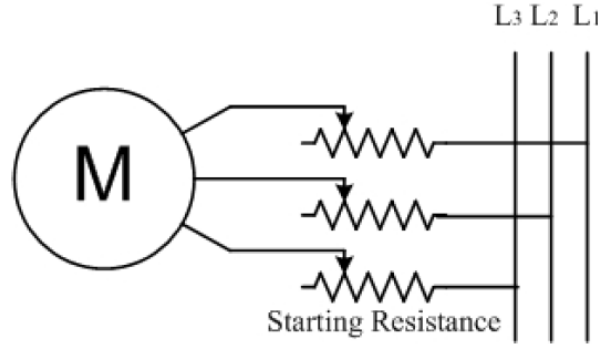
- ١- سحب تيار كبير من الشبكة الكهربائية وما يصاحبه من هبوط في جهد الشبكة مما يؤثر سلباً على الأحمال الأخرى الموصلة مع نفس الشبكة.
- ٢- تحميل خطوط النقل والقواطع وأجهزة الحماية بتيار أكبر من التيار المقنن. وقد يؤدي ذلك إلى تشغيل تلك الأجهزة وفصل التيار عن المكان.
- ٣- رفع درجة حرارة ملفات المحرك، خصوصاً في المحركات الكبيرة، حيث يستغرق المحرك وقتاً أطول لبدء الحركة، مما يؤدي مع التكرار إلى انهيار المواد العازلة.

لذلك لا ينصح ببدء حركة المحركات التي تزيد قدرتها عن ٢٥ كيلووات بالتوصيل المباشر، ولا بد من اتخاذ التدابير والاحتياطات اللازمة للحد من قيمة تيار بدء الحركة، خصوصاً في المحركات الكبيرة. وفيما يلي سنسرد باختصار عدة طرق للحد من تيار البدء، هذه الطرق تعتمد إما على خفض الجهد أو زيادة معاوقة المحرك أثناء فترة بدء الحركة.

٨ - ١ - ١ - ١ توصيل مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الثابت:

إن توصيل مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الثابت كما في الشكل (١ - ٢١)، يؤدي إلى خفض الجهد المسلط على العضو الثابت وبالتالي يقلل تيار البدء ويتم التخلص من هذه المقاومة تدريجياً أثناء فترة البدء حتى تلغي تماماً بوصول المحرك إلى سرعته المقننة لكن من عيوب هذه الطريقة

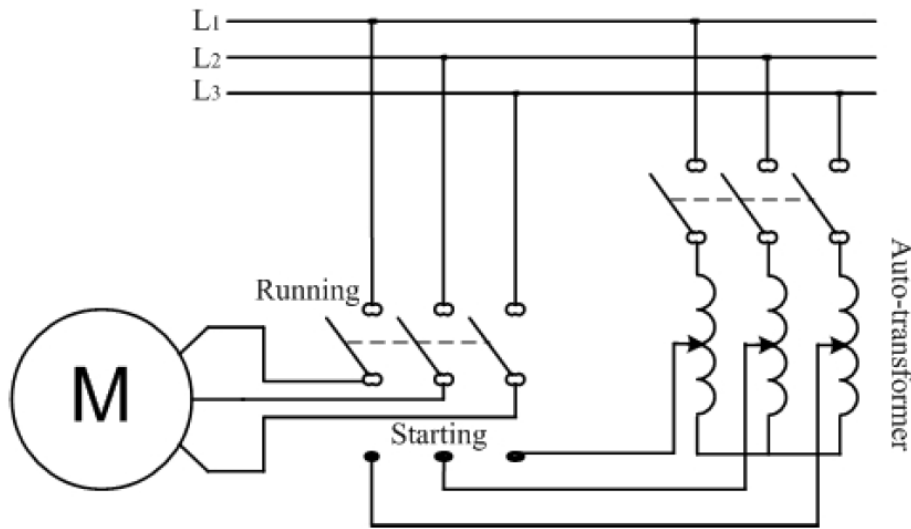
كبر المفايد النحاسية في المقاومة المضافة، بالإضافة إلى انخفاض كبير في قيمة عزم دوران البدء للمحرك، مما يجعل هذه الطريقة غير مناسبة للاستخدام خصوصاً مع المحركات الكبيرة.



الشكل ١ - ٢١: توصيلة بدء الحركة باستخدام مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت

(Auto-Transformer):

١ - ٨ - ١ - ٢ باستخدام محول ذاتي:



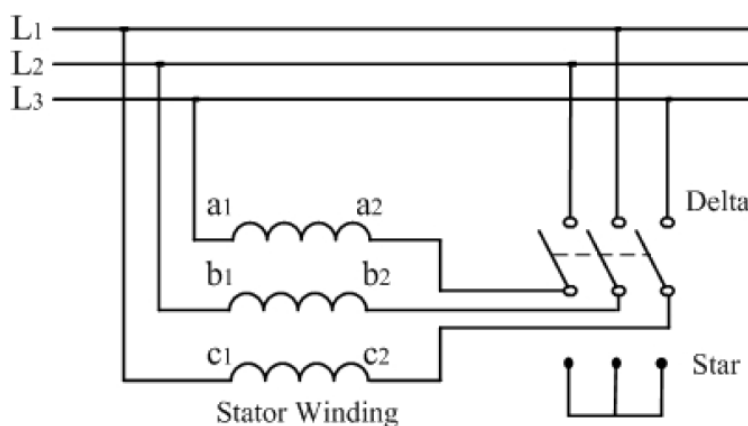
الشكل ١ - ٢٢: توصيلة بدء الحركة باستخدام محول ذاتي

في هذه الطريقة يتم توصيل أطراف العضو الثابت إلى محول ذاتي ثلاثي الأوجه الشكل (١ - ٢٢) بحيث يخفض الجهد المسلط على ملفات العضو الثابت للمحرك إلى حوالي $\frac{1}{2}$ أو إلى $(1/\sqrt{3})$ الجهد المقنن و يلاحظ من الشكل أن المحرك موصل إلى مفتاح ذي ناحيتين، حيث يتم وضعة خلال فترة البدء على الناحية الموصل عليها المحول الذاتي، وعندما تصل السرعة إلى أقصى مدى لها يحول المفتاح إلى الناحية الأخرى، حيث يصبح المحرك موصلاً توصيلاً مباشراً علي الشبكة الكهربائية. هذه الطريقة

مثالية حيث لا توجد قدرة مفقودة، كما أنها تعتبر الخيار الأفضل للمحركات التي توصل ملفاتها على شكل نجمة.

١ - ٨ - ١ - ٣ باستخدام مفتاح نجمة/دلتا:

هذه الطريقة مناسبة للمحركات التي توصل ملفاتها الثلاثية على شكل دلتا أثناء التشغيل العادي، حيث توصل ملفات العضو الثابت عند بدء الحركة على شكل نجمة ونتيجةً لذلك فإن جهد الوجه سيقبل إلى $(1:\sqrt{3})$ أي بنسبة ٥٧٪ من جهد المصدر وينخفض تيار الخط إلى ثلث التيار المار في حالة التوصيل على شكل دلتا. يلاحظ من الشكل (١ - ٢٣) أن المحرك موصل إلى مفتاح ذي ناحيتين، حيث يتم وضعة خلال فترة البدء على الناحية التي تجعل ملفاته موصلة على شكل نجمة، وعندما تصل السرعة إلى أقصى مدى لها يحول المفتاح إلى الناحية الأخرى، حيث تصبح ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا، ويستمر تشغيل المحرك بتوصيلة الدلتا.

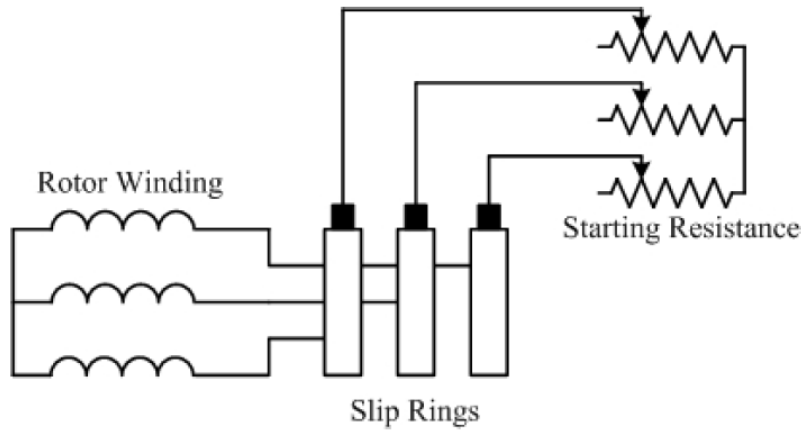


الشكل ١ - ٢٣: توصيلة بدء الحركة باستخدام مفتاح نجمة/دلتا

١ - ٨ - ١ - ٤ إضافة مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الدائر:

هذه الطريقة تصلح فقط للمحرك ذي حلقات الانزلاق حيث يمكن توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدائر الشكل (١ - ٢٤)، يؤدي توصيل مقاومة ثلاثية الأوجه على التوالي مع ملفات العضو الدائر إلى الحد من قيمة تيار البدء المسحوب من المصدر، نتيجة لزيادة معاوقة المحرك، وإلى جانب الحد من قيمة تيار البدء، فإن المقاومة المضافة ترفع من قيمة الانزلاق الذي يحدث عنده أقصى عزم مما يعني زيادة عزم دوران البدء، حيث تبين من المعادلة (١ - ٤٤) أننا نستطيع أن نحصل على قيمة العزم الأقصى (T_{max}) عند البدء بإضافة مقاومة ثلاثية إلى ملفات العضو الدائر بحيث تكون قيمة الانزلاق الذي يحدث

عنده أقصى عزم ($s_{max}=1$). يتم التخلص من هذه المقاومة الثلاثية تدريجياً خلال فترة البدء. هذه الطريقة تعتبر الأفضل للمحركات ذات حلقات الانزلاق.



الشكل ١ - ٢٤: توصيلة بدء الحركة باستخدام مقاومات موصلة على التوالي مع ملفات العضو الدائر

١ - ٨ - ٢ - ٥ باستخدام أجهزة بدء إلكترونية:

ظهرت حديثاً أجهزة لبدء حركة المحركات الحثية تستخدم تقنية إلكترونيات القدرة، هذه الأجهزة تعتمد على مبدأ التحكم الدقيق والناعم في الجهد مع مراقبة التيار في نفس الوقت وبالتالي تجعل التيار ثابتاً طيلة فترة البدء مع عزم مستقر. هذه الطريقة تعتبر الأفضل وذلك لأنها توفر للمحرك تسارعاً ناعماً بدون قفزات مفاجئة أو إجهاد ميكانيكي كما هو الحال في الطرق التقليدية.

١ - ٨ - ٢ التحكم في السرعة:

يوصف المحرك الحثي ثلاثي الأوجه بأنه من الناحية الموضوعية يمتلك سرعة ثابتة تقريباً، فسرعة المحرك في حالة اللاحمل تختلف اختلافاً طفيفاً جداً عن سرعة التزامن، كما أن السرعة لا تتغير إلا بمقدار طفيف آخر عن هذه السرعة عندما يصبح المحرك محملاً بالحمل الكامل. إن هذا الانخفاض الطفيف في سرعة المحرك، بين حالتي اللاحمل والحمل الكامل هو الذي يؤدي إلى إعطاء صفة الاتزان لتشغيل المحرك. في منطقة التشغيل المتزن، لذلك يمكن اعتبار المحرك ذا سرعة ثابتة خلال فترة تشغيله مع تغير الحمل، وهي سرعة التزامن علي وجه التقريب.

بالإشارة إلى المعادلة (١ - ٥) نجد أن سرعة المحرك الحثي يمكن التحكم فيها إما بتغير الانزلاق أو بتغير السرعة التزامنية، والسرعة التزامنية يمكن أن تتغير إما بتغير عدد الأقطاب أو بتغير تردد المصدر. وبناءً عليه يمكن التحكم في سرعة المحرك الحثي ثلاثي الأوجه بإحدى ثلاث طرق: تغيير الانزلاق أو تغيير عدد الأقطاب أو تغيير تردد المصدر.

١ - ٨ - ٢ - ١ تغيير الانزلاق باستخدام مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الدائر:

من البديهي أن هذه الطريقة لا تستخدم إلا في المحركات ذات الحلقات الانزلاقية، حيث يمكن توصيل مقاومة متغيرة ثلاثية المراحل على التوالي مع ملفات العضو الدائر عن طريق الفرش. وبتغيير هذه المقاومة يمكن الحصول على تغيير في سرعة المحرك، ذلك لأن إضافة المقاومة لملفات العضو الدائر تؤدي إلى زيادة الانزلاق الذي يحدث عنده العزم الأقصى وبالتالي تتغير السرعة مع تغير الانزلاق. تستخدم هذه الطريقة في أضيق الحدود، عندما يراد تغيير سرعة المحرك بما لا يتجاوز حوالي ١٥٪ من السرعة التزامنية. وذلك لأن زيادة هذه المقاومة يؤدي إلى زيادة المفاقيد النحاسية في العضو الدائر وبالتالي نقص كفاءة المحرك.

١ - ٨ - ٢ - ٢ تغيير عدد الأقطاب:

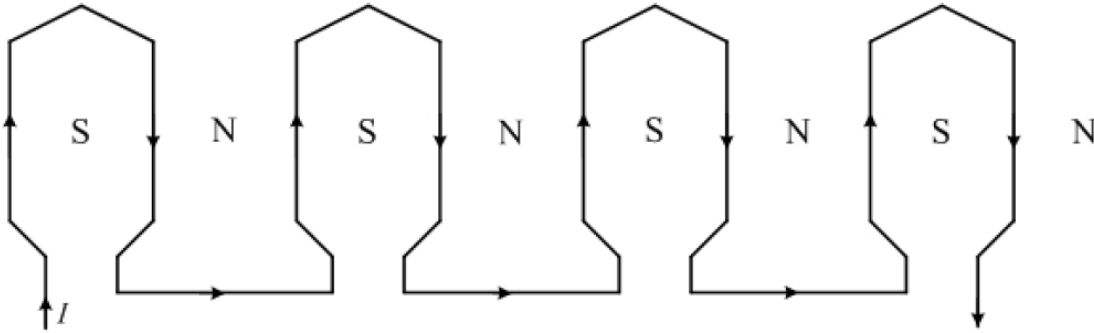
تعتمد هذه الطريقة على تغيير عدد أقطاب المحرك، مما يؤدي إلى تغيير قيمة سرعة التزامن للمحرك، وبالتالي سرعة دوران العضو الدائر، التي تتغير تغيراً طفيفاً جداً عنها، مابين حالتي اللاحمل والحمل الكامل. ويغلب استخدام هذه الطريقة في حالة المحرك ذي القفص السنجابي، نظراً لأن القفص السنجابي يمكن أن يتواءم مع المجال المغناطيسي مهما اختلف عدد أقطابه.

وهناك طريقتان لتغيير عدد الأقطاب، تتم إحداهما بتزويد العضو الثابت للمحرك بمجموعات من الملفات المستقلة عن بعضها البعض تمام الاستقلال، بحيث تكون كل مجموعة خاصة بسرعة معينة، وتتم الثانية بإعادة توصيل الملفات بطريقة مختلفة بحيث نحصل على نصف عدد الأقطاب أو ضعفها، بهذه الطريقة يصبح لدينا سرعتان تزامنيتان إحداهما ضعف الأخرى. فإذا كان عدد الأقطاب الأساسية ثمانية أقطاب كما هو موضح في الشكل (١ - ٢٥). يمكن إعادة توصيل الملفات بحيث تصبح الآلة ذات أربعة أقطاب، كما هو موضح في الشكل (١ - ٢٦). ويطلق على هذا الأسلوب في تغيير التوصيلات اسم توصيلات دالندر (Dahlander connection)

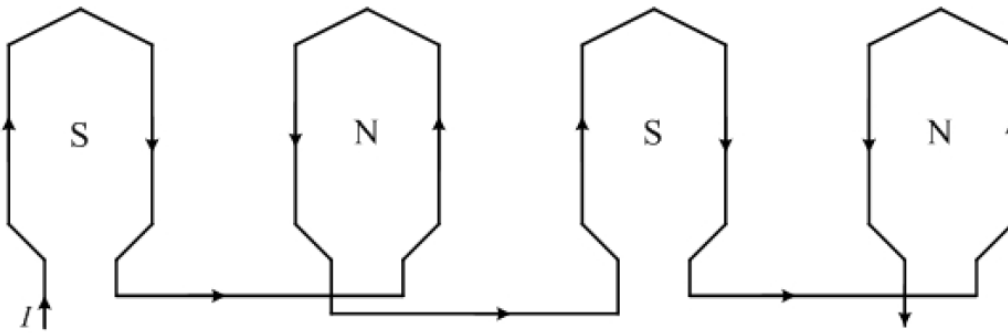
تزود المحركات التي تدير الآلات في الورش، التي تحتاج إلى سرعات متغيرة، بمجموعتين من الملفات في العضو الثابت، بحيث يمكن أن تعمل إحدى المجموعتين بأربعة أقطاب أو ثمانية، وتعمل المجموعة الأخرى بستة أقطاب أو اثنا عشر قطباً، وبذلك يمكن الحصول على السرعات ٦٠٠، ٩٠٠، ١٢٠٠، ١٨٠٠ لفة في الدقيقة عندما يتغذى المحرك من مصدر تردده ٦٠ هيرتز.

وتجدر الإشارة هنا إلى أنه عند تغيير عدد الأقطاب لملفات العضو الثابت، فإنه في حالة المحركات ذات القفص السنجابي يتواءم القفص السنجابي تلقائياً مع هذا التغيير، أما في حالة المحركات ذات الحلقات الانزلاقية يلزم تغيير توصيلات ملفات العضو الدائر للحصول على تغيير في عدد أقطابها مناظر

للتغيير الذي حدث في عدد أقطاب ملفات العضو الثابت. لذلك نجد أن هذه الطريقة في تغيير السرعة تستخدم عموماً مع المحركات ذات القفص السنجابي فقط. ومن عيوب هذه الطريقة أن تغيير السرعة يتم على درجات متفاوتة تفاوتاً كبيراً (نصف السرعة أو ضعفها مثلاً).



الشكل ١- ٢٥: توصيل الملفات لثمانية أقطاب



الشكل ١- ٢٦: توصيل الملفات بحيث تصبح الآلة ذات أربعة أقطاب

١- ٨- ٢- ٣ تغيير تردد المصدر:

يمكن التحكم في السرعة التزامنية للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه عن طريق التحكم في تردد مصدر الجهد المغذي للمفات العضو الثابت. وهذا يتطلب مصدر جهد ثلاثي الأوجه ذا تردد قابل للتغيير، هذه المصادر هي عبارة عن دوائر تحكم إلكترونية ذات قدرات عالية تقوم بتحويل القدرة الداخلة ذات التردد الثابت إلى تيار مستمر ومن ثم يتم تحويل التيار المستمر إلى تيار متردد ثلاثي الأوجه بالتردد المطلوب.

كما أن الجهد الخارج يضبط بحيث يكون متناسباً مع التردد المطلوب وذلك للحفاظ على قيمة ثابتة للفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية. مثل هذه الأجهزة تكون عادةً مكلفة ولا يلجأ إليها إلا في التطبيقات التي تحتاج تحكماً دقيقاً في السرعة.

الوحدة الثانية : المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

الفصل الأول : التركيب و نظرية العمل والدائرة المكافئة والمنحنيات المميزة

تمهيد

أن أكثر من ٩٨٪ من الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم يتم توليدها باستخدام الآلة التزامنية فهي الأكثر استخداماً لغرض تحويل الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية ، والآلة التزامنية كما أنها تستخدم كمولد تزامني تستخدم أيضاً كمحرك تزامني «كما سيأتي في الوحدة القادمة» وقد اكتسبت هذه التسمية (التزامنية) بسبب التزامن أو التوافق التام بين سرعة دوران المجال المغناطيسي والعضو الدوار ولذلك تسمى بالآلة التزامنية أو التوافقية.

تركيب الآلة التزامنية ثلاثية الأوجه

كأي آلة كهربائية تتركب الآلة التزامنية Synchronous Machine من عضوين : عضو ثابت وعضو دوار أحدهما يحمل ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية ويسمى المنتج Armature والآخر يحمل ملفات المجال المغناطيسي ، ويفضل أن تكون ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية مركبة على العضو الثابت بينما تكون ملفات المجال المغناطيسي مركبة على العضو الدوار وذلك لعدة أسباب أهمها ما يلي:

- ١ - التيار المسحوب من الآلة كبير لذا يفضل أن يؤخذ مباشرة وليس عن طريق حلقات انزلاق
 - ٢ - التخلص من حلقات الانزلاق أو تقليلها إلى (٢) بدلاً من (٦) حلقات
 - ٣ - سهولة تبريد ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية عندما تكون ثابتة
 - ٤ - حماية ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية من قوة الطرد المركزية بسبب وزنها الكبير
- لذا فإننا في دراستنا لهذه الآلة سنختار العضو الثابت لحمل ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية بينما ملفات المجال المغناطيسي ستكون من نصيب العضو الدوار.

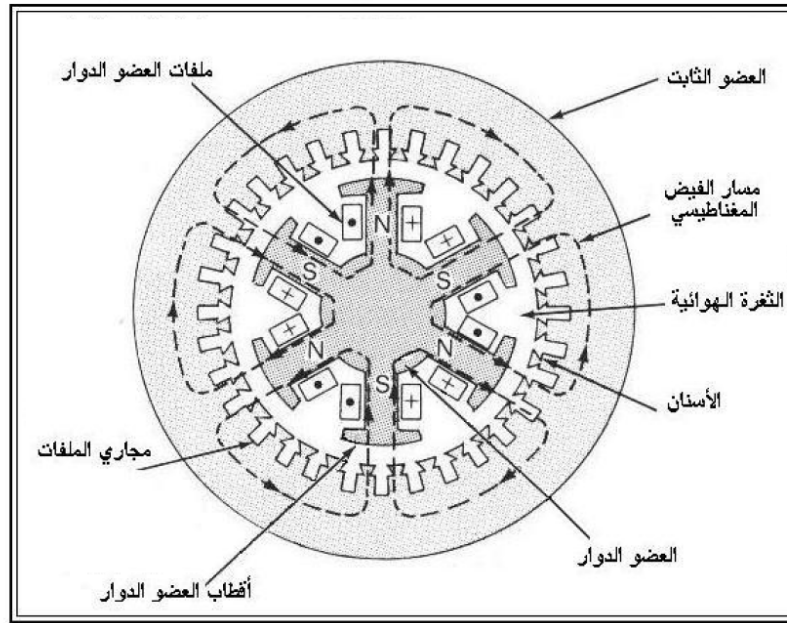
العضو الثابت:

العضو الثابت يكون مشابهاً تماماً للعضو الثابت في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه من حيث التركيب وطريقة اللف بحيث يخرج في النهاية ستة أطراف يمكن توصيلها على شكل نجمة أو دلتا. للتفاصيل يراجع تركيب العضو الثابت للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه في الوحدة الأولى.

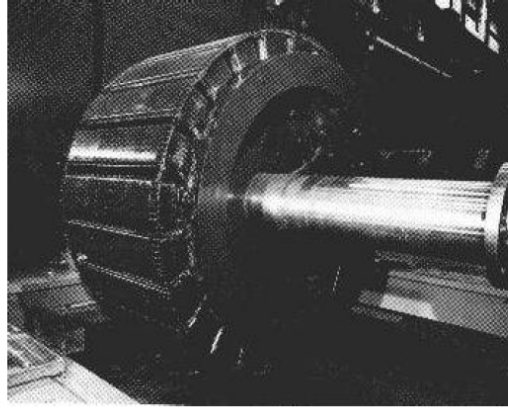
العضو الدوار:

العضو الدوار يحمل ملفات المجال المغناطيسي ويغذى بتيار مستمر عن طريق حلقتي انزلاق وحيث إن التيار المار في ملفات العضو الدوار تيار مستمر لذا لا يلزم تصنيع العضو الدوار على شكل شرائح حديدية بل يصنع من حديد مصمت وذلك لعدم وجود تيارات دوامية في هذه الحالة ، أما طريقة اللف فهي مشابهة لطريقة لف أقطاب العضو الثابت في آلات التيار المستمر بحيث يحمل كل قطب ملفاً واحداً ثم توصل ملفات الأقطاب على التوالي وفي النهاية يخرج طرفان إلى حلقتي الانزلاق لتغذية الملفات بالتيار المستمر. وهناك نوعان من العضو الدوار هما:

١- عضو دوار ذو أقطاب بارزة Salient Pole Rotor يستخدم مع الآلات التزامنية ذات السرعات المنخفضة مثل الآلات المركبة على مساقط المياه وذلك لأن سرعتها عادةً تقل عن 1000 لفة في الدقيقة انظر الشكل رقم (١ - ٢) والشكل رقم (٢ - ٢).

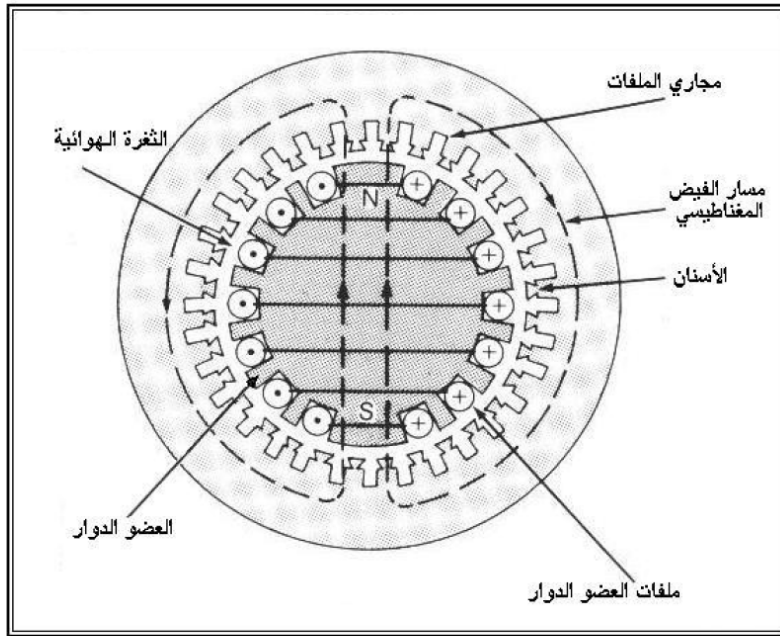


الشكل رقم ١ - ٢: آلة تزامنية ذات عضو دوار ذي أقطاب بارزة

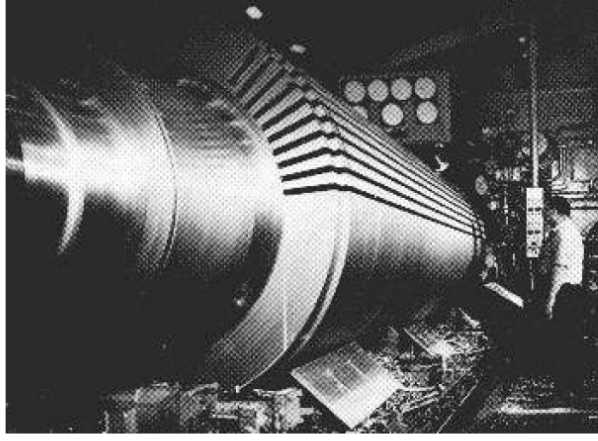


الشكل رقم ٢- ٢: عضو دوار ذو أقطاب بارزة

٢- عضو دوار أسطواناني Cylindrical Rotor و يستخدم في الآلات التزامنية ذات السرعات العالية التي تدار بواسطة توربينات غازية أو بخارية حيث تكون السرعة إما 1500 أو 1800 أو 3000 أو 3600 لفة في الدقيقة حسب التردد المطلوب وعدد الأقطاب. ويلاحظ أنه يجب أن يكون عدد أقطاب العضو الدوار مساوياً لعدد الأقطاب في العضو الثابت ، انظر الشكل رقم (٣- ٢) والشكل رقم (٤- ٢).



الشكل رقم ٣- ٢: آلة تزامنية ذات عضو دوار أسطواناني



شكل رقم ٤ - ٢: عضو دوار أسطواناني

كيفية عمل المولد التزامني

في البدء يدار العضو الدوار للآلة التزامنية بواسطة وسيلة تدوير مناسبة (محرك ديزل أو توربينة غازية أو بخارية أو مائية) وعندما تصل سرعة العضو الدوار إلى السرعة التزامنية يتم تغذية ملفات العضو الدوار بالتيار المستمر بواسطة مولد خاص مركب على نفس العمود يسمى المثير Exciter أو عن طريق حلقتي انزلاق إن كان من مولد خارجي ، وبالتالي ينتج في الثغرة الهوائية مجال مغناطيسي دوار يدور بنفس سرعة العضو الدوار (السرعة التزامنية) ولذلك سميت هذه الآلة بالآلة التزامنية.

هذا المجال المغناطيسي الدوار سيقطع ملفات العضو الثابت ويولد فيها قوة دافعة كهربية متناوبة طبق لمبدأ الحث الكهرومغناطيسي. هذه القوة الدافعة الكهربية المتولدة في المنتج (العضو الثابت) ستكون قوة دافعة كهربية ثلاثية الأوجه بين كل وجه وآخر ١٢٠ درجة وذلك لأن العضو الثابت يحمل ثلاثة ملفات بين كل ملف وآخر زاوية فراغية قدرها ١٢٠ درجة ، وتعتمد كمية القوة الدافعة الكهربية على شدة المجال المغناطيسي وسرعة العضو الدوار ، وحيث إن سرعة العضو الدوار يجب أن تكون ثابتة للحصول على تردد ثابت ، لذا فإن الخيار الوحيد للتحكم بمقدار القوة الدافعة الكهربية هو التحكم في شدة المجال المغناطيسي وذلك بتغيير قيمة التيار المستمر الداخل إلى ملفات العضو الدوار (تردد القوة الدافعة الكهربية المتولدة في المنتج يعتمد على سرعة العضو الدوار وعدد الأقطاب ويحسب من المعادلة التالية:

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \quad \text{المعادلة (2 - 1)}$$

أما القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج لكل وجه فتعطى من المعادلة التالية:

$$E_{ph} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \phi \cdot T_{ph} \cdot k_W \quad \text{المعادلة (2 - 2)}$$

حيث:

f : التردد

ϕ : شدة الفيض المغناطيسي

T_{ph} : عدد اللفات في كل وجه

k_W : معامل اللف (> 1)

الدائرة المكافئة للآلة التزامنية

إن وجود ثغرة هوائية غير منتظمة في الآلة التزامنية ذات الأقطاب البارزة سيضيفي بعض التعقيد على الدائرة المكافئة للآلة التزامنية لذا فإننا هنا سنفترض أن الثغرة الهوائية منتظمة أي أننا سنستخدم نموذج الآلة التزامنية ذات العضو الدوار الأسطواني ، كما أن هذا الافتراض يعطي نتائج مقبولة في حالة الآلة التزامنية ذات الأقطاب البارزة عندما تعمل في حالة الاستقرار steady state. إن الجهد المتولد في ملفات المنتج E_{ph} والمعطى بالمعادلة (2 - 2) يعتبر الجهد الداخلي للمولد ولا يظهر على أطراف المنتج إلا في حالة عدم مرور تيار في ملفات المنتج (حالة عدم التحمل) ، أما في حالة تحميل المولد فإنه سيظهر جهد آخر مختلف على أطراف المنتج يسمى الجهد الخارجي V_{ph} .

لماذا الجهد الخارجي لا يساوي الجهد الداخلي في حالة التحميل وما العلاقة بينهما ؟

الإجابة على هذا السؤال تقود إلى استنتاج نموذج للدائرة المكافئة للمولد التزامني.

يوجد عدد من العوامل التي تسبب الاختلاف بين E_{ph} و V_{ph} عند التحميل أهمها ما يلي:

١ - تشوه الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بسبب مرور تيارات في ملفات المنتج وهو ما يسمى

بظاهرة رد فعل المنتج Armature Reaction .

٢ - وجود مقاومة ملفات المنتج .

٣ - وجود ممانعة حثية ذاتية لملفات المنتج .

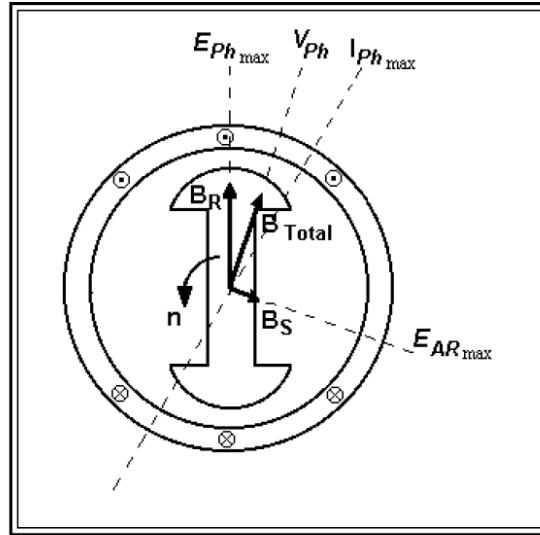
ما هو رد فعل المنتج ؟

عند تحميل الآلة التزامنية سيمر في كل وجه من أوجه العضو الثابت تيار كهربائي، وحيث إن ملفات العضو الثابت رتبت بحيث يفصل بين كل وجه وآخر زاوية فراغية مقدارها ١٢٠ درجة فإن التيارات المارة في هذه الأوجه ستفصل بين كل تيار وآخر زاوية طور مقدارها ١٢٠ درجة، ونتيجة لمرور هذه التيارات مجتمعة بهذه الصفة سيتولد مجال مغناطيسي دوار في العضو الثابت يدور بنفس سرعة واتجاه المجال المغناطيسي الدوار الناتج من ملفات العضو الدوار، هذا المجال المغناطيسي الجديد هو رد فعل المنتج كنتيجة لمرور تيارات كهربائية في ملفاته أثناء التحميل.

إذن: المجال المغناطيسي المؤثر في الثغرة الهوائية هو محصلة المجالين المتولدين من العضو الدوار و العضو الثابت ، وكما أن المجال المغناطيسي المتولد من العضو الدوار سينتج جهداً في ملفات العضو الثابت هو E_{ph} ، كذلك المجال المغناطيسي الناتج بسبب رد فعل المنتج سينتج جهداً في ملفات العضو الثابت هو E_{AR} ، ولذا فإن الجهد الذي سيظهر على أطراف المولد V_{ph} هو محصلة هذين الجهدين أو لنقل هو الجهد المتولد بسبب محصلة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية B_{Total} ، انظر الشكل (٥ - ٢).

$$B_{Total} = B_R + B_S \quad (3 - 2) \quad \text{المعادلة}$$

$$V_{ph} = E_{ph} + E_{AR} \quad (4 - 2) \quad \text{المعادلة}$$



الشكل رقم ٥ - ٢: المجالات المغناطيسية المؤثرة في المولد التزامني أثناء التحميل

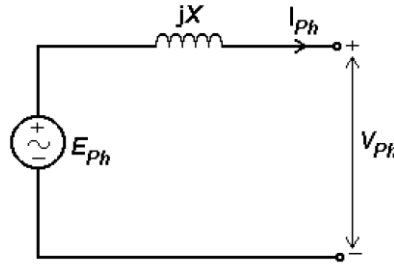
في الشكل (٥ - ٢) نجد أن التيار I_{Ph} نتج بسبب تحميل الآلة بحمل حثي وذلك لأنه متخلف عن الجهد E_{Ph} بزاوية ما ، هذا التيار بدوره أوجدَ المجال المغناطيسي B_S الذي بدوره أنتج جهداً في ملفات المنتج هو E_{AR} ، هذا الجهد E_{AR} الناتج بسبب رد فعل المنتج يتناسب طردياً مع التيار المسبب له كما أنه متخلف عنه بزاوية قدرها ٩٠ درجة ، وبناءً عليه نستطيع أن نعبر عن هذا الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج بما يلي:

$$E_{AR} = -jXI_{Ph} \quad \text{المعادلة (2 - 5)}$$

وبعد التعويض في المعادلة (٤ - ٢) نجد أن :

$$V_{Ph} = E_{Ph} - jXI_{Ph} \quad \text{المعادلة (2 - 6)}$$

المعادلة (٦ - ٢) يمكن أن نمثلها بالدائرة التالية:



الشكل رقم ٦ - ٢: دائرة تمثيل المعادلة (٦ - ٢)

إذن : الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج يمكن التعبير عنه بمحاثة موصلة على التوالي مع مصدر الجهد الداخلي.

بالإضافة إلى تأثير رد فعل المنتج أيضاً هناك تأثير للمقاومة و ممانعة التسرب الحثية لملفات المنتج. فإذا اعتبرنا أن مقاومة ملفات المنتج هي R_A و ممانعة التسرب الحثية لملفات المنتج هي X_A ، فإن جهد أطراف المولد يصبح كما يلي:

$$V_{Ph} = E_{Ph} - jXI_{Ph} - jX_AI_{Ph} - R_AI_{Ph} \quad \text{المعادلة (2 - 7)}$$

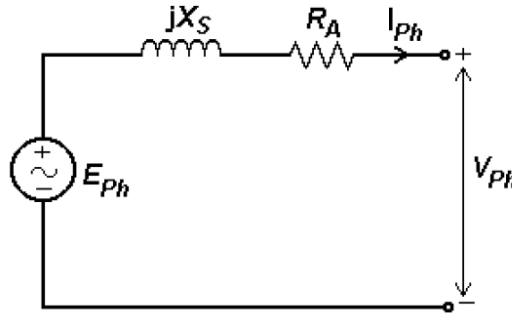
من أجل تبسيط المعادلة (٧ - ٢) يمكننا دمج ممانعة التسرب الحثية للملفات المنتج (X_A) مع الممانعة الحثية التي تمثل رد فعل المنتج (X) لتصبح ممانعة حثية واحدة تسمى الممانعة التزامنية (X_S).

$$X_S = X + X_A \quad (8-2) \quad \text{المعادلة}$$

وبالتالي يصبح جهد أطراف المولد كما يلي:

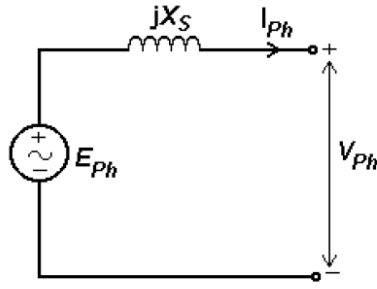
$$V_{Ph} = E_{Ph} - jX_S I_{Ph} - R_A I_{Ph} \quad (9-2) \quad \text{المعادلة}$$

المعادلة (٩ - ٢) هي المعادلة النهائية التي يحسب منها جهد أطراف المولد لكل وجه ، من هذه المعادلة يمكننا أن نرسم الدائرة المكافئة للآلة التزامنية كما هو موضح في الشكل (٧ - ٢) مع ملاحظة أنها تمثل وجه واحد فقط من أوجه المنتج وذلك للتشابه التام بين الأوجه الثلاثة.



الشكل رقم ٧ - ٢: الدائرة المكافئة للآلة التزامنية

الشكل (٧ - ٢) يمثل الدائرة المكافئة النهائية للآلة التزامنية ذات العضو الدوار الأسطواني ، كما أنه يمكن تبسيط هذه الدائرة وذلك بإهمال مقاومة ملفات المنتج نظراً لقلتها مقارنة بالممانعة التزامنية خصوصاً في الآلات الكبيرة فتصبح الدائرة المكافئة التقريبية كما هو موضح في الشكل (٨ - ٢).



الشكل رقم ٨ - ٢: الدائرة المكافئة التقريبية

وفي هذه الحالة يحسب جهد الأطراف لكل وجه كما يلي:

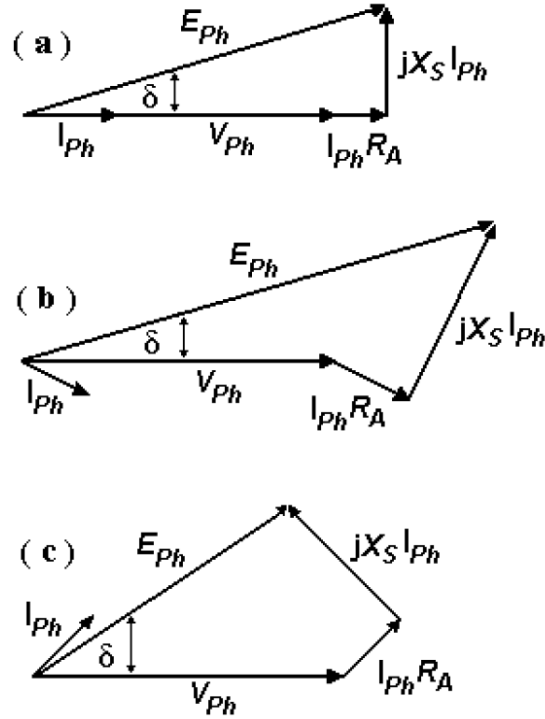
$$V_{Ph} = E_{Ph} - jX_S I_{Ph} \quad \text{المعادلة (10-2)}$$

المخطط الاتجاهي للآلة التزامنية

بما أن الجهود والتيارات المتولدة في الآلة التزامنية هي كميات اتجاهية (ذات مقدار وزاوية) لذلك يستحسن رسم هذه الكميات مع بعضها البعض بشكل اتجاهي لنحصل على ما يسمى بالمخطط الاتجاهي Phasor Diagram للآلة التزامنية. هذا المخطط الاتجاهي يعتبر أداة هامة جداً بالنسبة للآلة التزامنية لأنه بواسطته يسهل فهم ودراسة وتحليل أداء الآلة التزامنية ، فمثلاً الشكل رقم (٩ - ٢)

يوضح المخطط الاتجاهي المصاحب للمعادلة رقم (٩ - ٢) في ثلاث حالات تحميل للآلة التزامنية (حمل مادي أو حمل حثي أو حمل سعوي) ، ويلاحظ أن جهد الأطراف يعتبر مرجع جميع القيم في المخطط الاتجاهي وهو أيضاً محصلة جميع الجهود داخل الآلة وهذا مطابق تماماً للدائرة المكافئة في الشكل رقم (٧ - ٢).

حاول القيام برسم المخطط الاتجاهي المصاحب للدائرة المكافئة في الشكل رقم (٨ - ٢) في حالات التحميل الثلاث.



الشكل رقم ٩- ٢: المخطط الاتجاهي للآلة التزامنية عندما يكون معامل القدرة واحداً (a) و عندما يكون معامل القدرة متخلفاً (b) و عندما يكون معامل القدرة متقدماً (c)

معامل تنظيم الجهد

يعتبر معامل تنظيم الجهد Voltage Regulation من المعاملات الهامة في الآلة التزامنية وذلك لأنه يعطي فكرة واضحة عن مدى التغير الذي يحدث في قيمة الجهد على أطراف الآلة عند تحميل الآلة أو عندما تتغير الأحمال بشكل كبير ، كما أنه يعتبر مؤشراً جيداً للدلالة على المولد الأفضل عند المقارنة بين المولدات. ويعرف بأنه التغير في جهد الأطراف من حالة عدم الحمل إلى حالة الحمل الكامل منسوباً إلى قيمة الجهد في حالة الحمل الكامل.

ويعبر عنه رياضياً كما يلي:

$$VR = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} \times 100 \quad \text{المعادلة (2 - 12)}$$

وهناك عدة طرق تستخدم لتعيين معامل تنظيم الجهد تعتمد على نوعيه البيانات المتوفرة عن الآلة والتي تكون عادةً إما نتائج اختبارات أجريت على الآلة أو بيانات التصميم.

تشغيل المولدات التزامنية على التوازي

من النادر جداً أن يوجد مولد وحيد يغذي حملاً مستقلاً ماعدا حالات خاصة كالمولدات المعدة لأعمال الطوارئ. عادةً يوجد في كثير من التطبيقات أكثر من مولد مربوطة على التوازي مع بعضها البعض لإمداد الأحمال بالقدرة المطلوبة، وأقرب مثال على ذلك نجده في أي منطقة من مناطق المملكة حيث يوجد العشرات من المولدات التزامنية في أماكن مختلفة مربوطة مع بعضها البعض على التوازي لتغذية تلك المنطقة بما تحتاجه من القدرة الكهربائية.

إذن : لماذا يفضل ربط المولدات التزامنية مع بعضها على التوازي؟

هناك مميزات عديدة لتشغيل المولدات على التوازي أهمها ما يلي:

١- المولدات المربوطة على التوازي تستطيع أن تغذي أحمال أكبر من الحملاً الذي يغذيه مولد واحد.

٢- وجود عدة مولدات مربوطة على التوازي يزيد موثوقية النظام ، لأنه في حالة تعطل أي مولد فإن المولدات الأخرى تتقاسم حصة ذلك المولد.

٣- وجود عدة مولدات مربوطة على التوازي يسمح بإجراء أعمال الصيانة لمولد أو أكثر دون قطع القدرة عن الأحمال.

٤- وجود عدة مولدات صغيرة مربوطة على التوازي أكبر كفاءة من مولد وحيد مكافئ لها خصوصاً عندما تكون الأحمال صغيرة.

ومن أجل ربط المولدات على التوازي يجب أن يتحقق عدد من الشروط هي كما يلي:

١- القيمة الفعالة (rms value) لجهد الأطراف في كلا المولدين يجب أن تتساوى.

٢- التردد يجب أن يكون متساوياً في كلا المولدين

٣- تتابع الأطوار لكلا المولدين يجب أن يكون هو نفسه إما ABC أو ACB

٤- يجب أن تكون الجهود في نفس الطور (زاوية الطور للوجه a متساوية في كلا المولدين)

وعند تحقق هذه الشروط يمكن توصيل المولدين على التوازي بأمان ، أما عند توصيل المولدين عند عدم تحقق شرط أو أكثر من هذه الشروط فإن ذلك يؤدي إلى حدوث أضرار كبيرة قد تؤدي إلى تلف ملفات المولد بسبب مرور تيار كبير فيها أو يؤدي إلى كسر العمود .بسبب تحوله إلى محرك يدور باتجاه معاكس لدوران التوربينة.

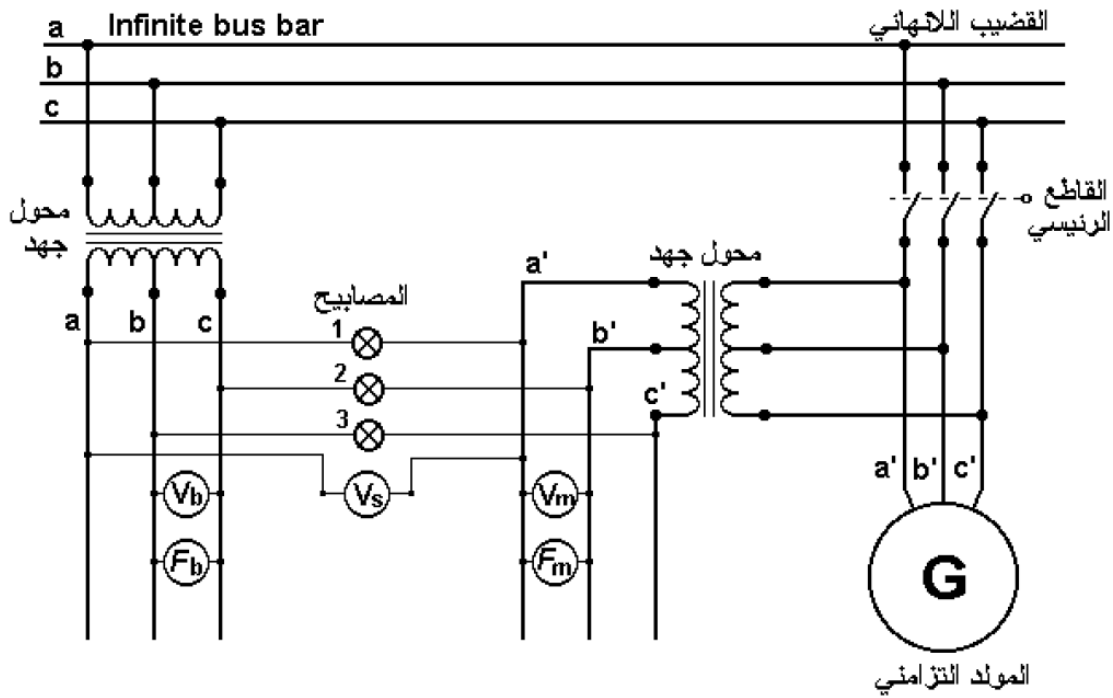
توصيل المولدات التزامنية إلى قضبان لا نهائية

إن عملية توصيل المولد التزامني إلى قضبان لا نهائية Infinite bus bars تعتبر عملية مشابهة لتوصيل المولد التزامني على التوازي مع مولد آخر كبير جداً وذلك لأن القضبان اللانهائية يعتبر كأنه مولد ذو قدره غير محدودة ، ولإتمام هذه العملية يجب أن تتحقق الشروط السابقة قبل عملية التوصيل ، وللتأكد من تحقق تلك الشروط تجرى عملية التزامن . وعملية التزامن هذه تجرى بعدة طرق نذكر منها طريقتين:

١- طريقة المصاييح المضئية

في هذه الطريقة توصل ثلاث لمبات بين الآلة والقضبان اللانهائية كما هو موضح في الشكل رقم (١٧ - ٢) بحيث توصل الأولى بين الخطين a و a' والثانية بين الخطين b و b' والثالثة بين الخطين c و c' كما يوصل ثلاثة أجهزة فولتمتر: Vs بين الوجهين a و a' و Vm لقياس جهد المولد و Vb لقياس جهد القضبان اللانهائي ، كذلك يتم توصيل جهازين لقياس تردد المولد والقضبان اللانهائي كما هو موضح في الشكل (١٧ - ٢) ، وبهذه الطريقة يمكن التأكد من تحقق شروط التزامن الأربعة كما يلي:

- ١- لكي يتحقق الشرط الأول يجب أن تتساوى قراءة أجهزة قياس الجهد ($V_m = V_b$)
- ٢- لكي يتحقق الشرط الثاني يجب أن تتساوى قراءة أجهزة قياس التردد ($F_m = F_b$)
- ٣- الشرط الثالث يتحقق عندما يكون انطفاء واشتعال المصاييح بشكل منتظم
- ٤- الشرط الرابع يتحقق عندما يكون فرق الجهد بين وجهين متماثلين في الآلة والقضيب مساوياً للصفر ($V_s = 0$) .



الشكل رقم ١٧ - ٢: عملية التزامن بطريقة المصابيح المضئية

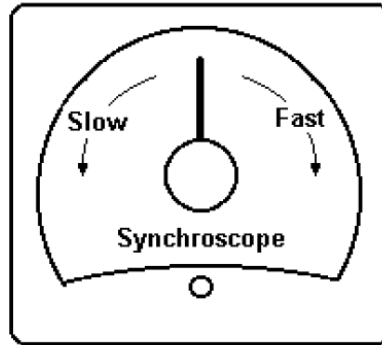
عملية التزامن فيتم إجراؤها كما يلي:

- ١- يرفع جهد أطراف المولد حتى يصبح مساوياً لجهد القضيب ($V_m = V_b$) وذلك بزيادة تيار المجال تدريجياً
- ٢- يضبط تردد المولد بحيث يكون قريباً من تردد القضيب وذلك بزيادة سرعة الدوران
- ٣- عند محاولة ضبط سرعة الدوران يحدث إحدى حالتين بالنسبة للمصابيح ، الحالة الأولى: جميع المصابيح تضيء وتنطفئ بشكل عشوائي و هذا يعني أن شرط تتابع الأطوار للمولد و القضبان مختلف وعندها يجب المبادلة بين أي طرفين من أطراف المولد من أجل عكس تتابع أطوار المولد وبعدها نلاحظ أن إضاءة المصابيح أصبحت بشكل منتظم ومتتابع. الحالة الثانية : جميع المصابيح تضاء وتنطفئ بشكل منتظم ومتتابع و هذا يعني أن تتابع الأطوار للمولد والقضيب اللانهائي متماثل.
- ٤- إذا تحققت الحالة الثانية يتبقى ضبط التردد وذلك عن طريق التحكم في السرعة التزامنية للآلة ، ويتضح ذلك في سرعة تتابع الإضاءة فإذا زادت سرعة تتابع إضاءة المصابيح يلزم زيادة أو تقليل سرعة المولد بحيث يكون تتابع إضاءة المصابيح بطيئاً قدر الإمكان وفي اللحظة التي يكون فيها ($V_s = 0$) أو المصباح الأول منطفئاً بينما الثاني والثالث مضاءان يكون الشرط الرابع قد تحقق ،

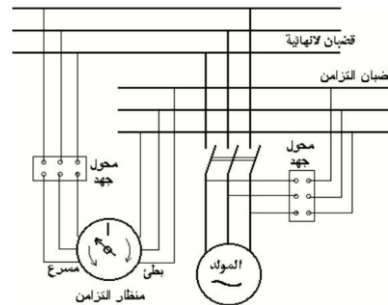
في هذه اللحظة تكون الآلة في لحظة تزامن مع القضيب اللانهاثي وعندها يمكن إغلاق القاطع الرئيسي بأمان.

٢- باستخدام جهاز التزامن

جهاز التزامن (Synchroscope) يستخدم للتأكد من أن جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهاثية وأن لهما نفس التردد، أي أنه يعتبر بديلاً للمصاييح في الشكل (١٧ - ٢)، وهو عبارة عن محرك حثي يتعرض لمجالين مغناطيسيين الأول من القضبان اللانهاثية والآخر من المولد التزامني و العضو الدوار مركب عليه مؤشر يتحرك باتجاه عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة يعتمد على تردد المولد التزامني أهو أعلى أم أقل من تردد القضبان اللانهاثية، وعندما يقف المؤشر بشكل عمودي (في مكان الساعة ١٢) فهذا يعني أن جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهاثي عند هذه الحالة يمكن توصيل المولد التزامني بالقضبان اللانهاثية بأمان عن طريق القاطع الرئيسي.



الشكل رقم ١٨ - ٢: جهاز التزامن



أمثلة محلولة :

مثال (١ - ٢) :

مولد تزامني ذو أربعة أقطاب ملفاته موصلة على شكل دلتا ، جهد الأطراف له 480 V والتردد 60 Hz ، منحني الدائرة المفتوحة له موضح في الشكل (١٩ - ٢) ، الممانعة التزامنية له $0.1\ \Omega$ ومقاومة ملفات المنتج $0.015\ \Omega$ ، عند الحمل الكامل يعطي تياراً قدره 1200 A عند معامل قدره 0.8 متخلفاً ، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك 40 kW و المفاقيد الحديدية 30 kW عند الحمل الكامل أحسب ما يلي :

أ) احسب سرعة العضو الدوار

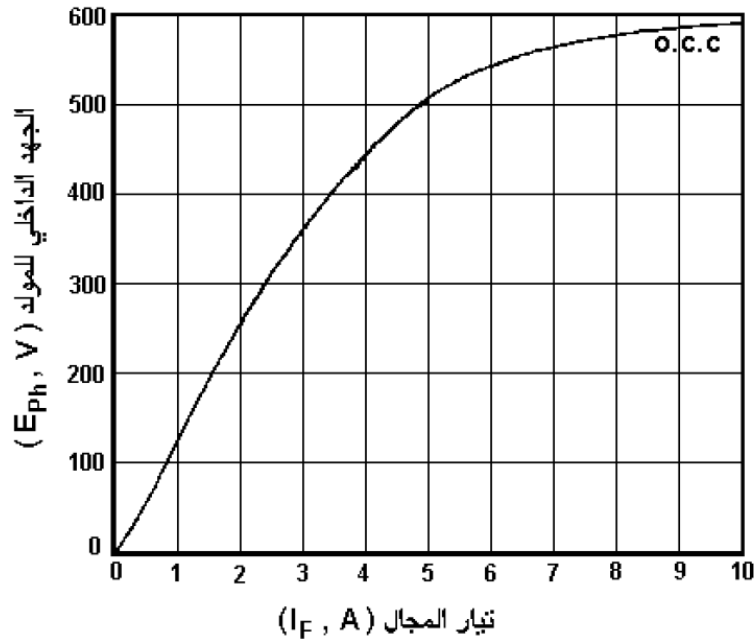
ب) كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يكون جهد الأطراف 480 V بدون حمل

ج) إذا كان المولد يغذي حملاً بتيار قدره 1200 A عند معامل قدرة 0.8 متخلفاً ، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يحافظ على جهد الأطراف عند 480 V

د) احسب كفاءة المولد

هـ) إذا فصل الحمل عن المولد فجأة ، ماذا سيحدث لجهد الأطراف؟

و) افترض أن المولد يغذي حملاً بتيار قدره 1200 A عند معامل قدره 0.8 متقدماً ، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يبقى جهد الأطراف عند 480 V



الشكل رقم ١٩ - ٢ : منحني الدائرة المفتوحة للمولد (مثال ١ - ٢)

الحل:

بما أن ملفات المولد موصلة على شكل دلتا

$$V_{Ph} = V_{Line} \quad \& \quad I_{Ph} = \frac{I_{Line}}{\sqrt{3}} \quad \text{إذن :}$$

أ (من المعادلة رقم (١ - ٢)

$$n = \frac{120 f}{P} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \quad \text{rpm}$$

ب) عند عدم الحمل $I_{Ph} = 0$ وبالتالي فإن $V_{Ph} = E_{Ph}$

وبعد الرجوع إلى منحنى الدائرة المفتوحة للمولد في الشكل (١٩ - ٢) نجد أن تيار المجال المقابل هو 4.5 A

ج) عندما يكون المولد يغذي الحمل بتيار قدره 1200 A عند معامل قدره 0.8 متخلفاً فهذا يعني أن :

$$I_{Ph} = \frac{1200}{\sqrt{3}} = 692.8 \quad \text{A}$$

ومتخلف عن الجهد بزاوية طور هي:

$$\theta = \cos^{-1}(0.8) = 36.87^\circ$$

وبتطبيق المعادلة (٩ - ٢) يمكننا إيجاد الجهد الداخلي E_{Ph} كما يلي:

$$\begin{aligned} E_{Ph} &= V_{Ph} + R_A I_{Ph} + jX_S I_{Ph} \\ &= 480 \angle 0 + (0.015)(692.8 \angle -36.87) \\ &\quad + (j0.1)(692.8 \angle -36.87) \\ &= 480 \angle 0 + 10.39 \angle -36.87 + 69.28 \angle 53.13 \\ &= 529.9 + j49.2 = 532 \angle 5.3 \quad \text{V} \end{aligned}$$

إذن: لكي يبقى جهد الأطراف V_{Ph} عند 480 V يجب أن نضبط الجهد الداخلي E_{Ph} عند 532 V ولكي يتحقق ذلك يجب زيادة تيار المجال I_f إلى 5.7 A طبقاً لمنحنى الدائرة المفتوحة للمولد الموضح في الشكل رقم (١٩ - ٢)

د (لحساب الكفاءة يجب حساب القدرة الخارجة والداخلية والمفقودة كما يلي:
القدرة الخارجة من المولد:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \sqrt{3} V_L I_L PF \\ &= \sqrt{3} \times 480 \times 1200 \times 0.8 = 798 \quad \text{kw} \end{aligned}$$

القدرة الداخلة إلى المولد:

$$P_{inp} = P_{out} + P_{Cu1} + P_{Core} + P_F$$

المفايد النحاسية في ملفات المنتج P_{Cu1} تحسب كما يلي:

$$\begin{aligned} P_{Cu1} &= 3I_{Ph}^2 R_A \\ &= 3(692.8)^2 (0.015) = 21.6 \text{ kw} \end{aligned}$$

إذن:

$$P_{inp} = 798 + 21.6 + 30 + 40 = 889.6 \text{ kw}$$

إذن كفاءة المولد هي:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{inp}} \times 100 = \frac{798}{889.6} \times 100 = 89.7 \%$$

هـ) إذا فصل الحمل بشكل مفاجئ عن المولد يعني أن التيار سيصبح صفراً وهذا يعني أن $(E_{Ph} = V_{Ph})$ طبقاً للمعادلة (٩ - ٢) ، وإذا لم يعاد ضبط تيار المجال فإن جهد الأطراف سيرتفع إلى قيمة الجهد الداخلي أي أن $(V_{Ph} = 532 \text{ V})$

و) يعاد حساب E_{Ph} كما في الفقرة (ج) مع الأخذ في الاعتبار تغير إشارة زاوية التيار لأنه أصبح متقدماً على الجهد كما يلي:

$$\begin{aligned} E_{Ph} &= V_{Ph} + R_A I_{Ph} + jX_S I_{Ph} \\ &= 480 \angle 0^\circ + (0.015)(692.8 \angle 36.87^\circ) \\ &\quad + (j0.1)(692.8 \angle 36.87^\circ) \\ &= 480 \angle 0^\circ + 10.39 \angle 36.87^\circ + 69.28 \angle 126.87^\circ \\ &= 446.7 + j61.7 = 451 \angle 7.9^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

إذن: لكي يبقى جهد الأطراف V_{Ph} عند 480 V عندما يكون معامل القدرة 0.8 متقدماً يجب أن يضبط الجهد الداخلي E_{Ph} عند 451 V وذلك بضبط تيار المجال عند 4.1 A

مثال (٢ - ٢):

مولد تزامني ذو ستة أقطاب ملفاته موصلة على شكل نجمة جهد الأطراف له 480 V عند تردد 60 Hz ، الممانعة التزامنية 1Ω لكل وجه ومقاومة ملفات المنتج مهمة ، تيار الحمل الكامل له 60 A عند معامل قدره 0.8 متخلفاً ، مفاقيد الاحتكاك 1.5 kW والمفاقيد الحديدية 1 kW عند الحمل الكامل ، وبما أن مقاومة ملفات المنتج مهمة افترض أن المفاقيد النحاسية في ملفات المنتج مهمة أيضاً ، تيار المجال ضبط بحيث يكون جهد الأطراف 480 V عند عدم الحمل. احسب ما يلي:

أ (سرعة دوران هذا المولد

ب) احسب جهد الأطراف عند الحمل الكامل في الحالات التالية:

١- معامل القدرة 0.8 متخلفاً

٢- معامل القدرة 1.0

٣- معامل القدرة 0.8 متقدماً

ج) كفاءة المحرك عند الحمل الكامل إذا كان معامل القدرة 0.8 متخلفاً

د (العزم الداخل إلى المولد

هـ) معامل تنظيم الجهد في حالات التحميل الثلاث المذكورة في الفقرة (ب)

الحل:

أ (من المعادلة رقم (١ - ٢)

$$n = \frac{120 f}{P} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

ب) لحساب جهد الأطراف عند تحميل المولد يستحسن استخدام المخطط الاتجاهي لذلك بدلاً من

استخدام المعادلة (٩ - ٢) لأنها في هذه الحالة ستحتوي على مجهولين هما زاوية الجهد الداخلي (δ)

بالإضافة إلى جهد الأطراف V_{Ph}

بما أن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة

$$V_{Ph} = \frac{V_{Line}}{\sqrt{3}} \quad \& \quad I_{Ph} = I_{Line} \quad \text{إذن :}$$

عند عدم الحمل:

$$V_{Ph} = E_{Ph} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277 \text{ V}$$

الحالة (١) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60 A) عند معامل قدره 0.8 متخلفاً فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابهاً للمخطط الموضح في الشكل (٢٠-٢) الحالة (١) بمأن معامل القدرة متخلف ، إذن التيار سيكون متخلفاً عن الجهد بزاوية θ

$$\theta = \cos^{-1}(0.8) = 36.87^\circ$$

في هذا المخطط الاتجاهي جهد الأطراف V_{Ph} مجهول و E_{Ph} يساوي 277 V بالرجوع إلى المخطط الاتجاهي وباعتبار المثلث القائم الزاوية oab يمكن حساب جهد الأطراف كما يلي:

$$\begin{aligned} E_{Ph}^2 &= (V_{Ph} + X_S I_{Ph} \sin \theta)^2 + (X_S I_{Ph} \cos \theta)^2 \\ (277)^2 &= (V_{Ph} + 1.0 \times 60 \times \sin 36.87)^2 + (1.0 \times 60 \times \cos 36.87)^2 \\ 76729 &= (V_{Ph} + 36)^2 + 2304 \\ 74425 &= (V_{Ph} + 36)^2 \\ 272.8 &= V_{Ph} + 36 \\ V_{Ph} &= 236.8 \text{ V} \end{aligned}$$

وحيث إن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

$$V_{Line} = \sqrt{3} V_{Ph} = \sqrt{3} \times 236.8 = 410 \text{ V}$$

الحالة (٢) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60 A) عند معامل قدره واحد فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابهاً للمخطط الموضح في الشكل (٢٠-٢) الحالة (٢) في هذه الحالة سيكون التيار في نفس الطور مع جهد الأطراف ، بالرجوع إلى المخطط الاتجاهي وباعتبار المثلث القائم الزاوية oab يمكن حساب جهد الأطراف كما يلي:

$$\begin{aligned}
E_{Ph}^2 &= V_{Ph}^2 + (X_S I_{Ph})^2 \\
(277)^2 &= V_{Ph}^2 + (1.0 \times 60)^2 \\
76729 &= V_{Ph}^2 + 3600 \\
V_{Ph}^2 &= 76729 - 3600 \\
V_{Ph} &= 270.4 \text{ V}
\end{aligned}$$

وحيث إن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

$$V_{Line} = \sqrt{3} V_{Ph} = \sqrt{3} \times 270.4 = 468.4 \text{ V}$$

الحالة (٣):

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60 A) عند معامل قدره 0.8 متقدماً فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابهاً للمخطط الموضح في الشكل (٢٠ - ٢) الحالة (٣) وبما أن معامل القدرة متقدم ، إذن التيار سيكون متقدماً عن الجهد بزاوية θ

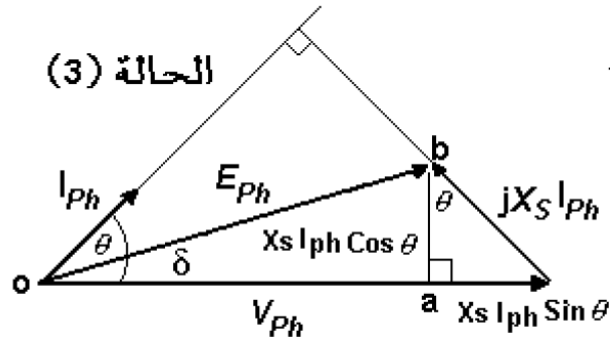
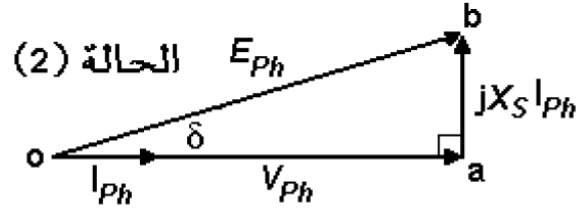
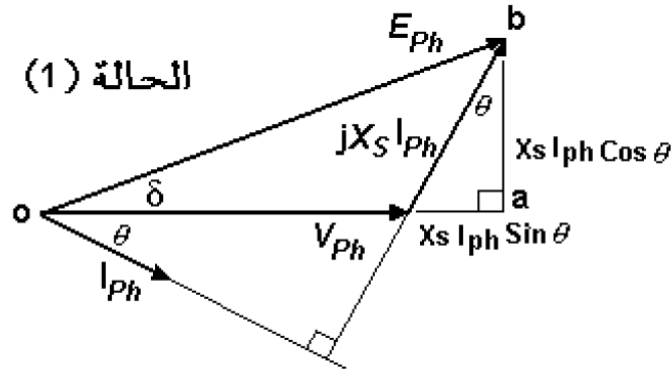
$$\theta = \cos^{-1}(0.8) = 36.87^\circ$$

في هذا المخطط الاتجاهي جهد الأطراف V_{Ph} مجهول و E_{Ph} يساوي 277 V بالرجوع إلى المخطط الاتجاهي وباعتبار المثلث القائم الزاوية oab يمكن حساب جهد الأطراف كما يلي:

$$\begin{aligned}
E_{Ph}^2 &= (V_{Ph} - X_S I_{Ph} \sin \theta)^2 + (X_S I_{Ph} \cos \theta)^2 \\
(277)^2 &= (V_{Ph} - 1.0 \times 60 \times \sin 36.87)^2 + (1.0 \times 60 \times \cos 36.87)^2 \\
76729 &= (V_{Ph} - 36)^2 + 2304 \\
74425 &= (V_{Ph} - 36)^2 \\
272.8 &= V_{Ph} - 36 \\
V_{Ph} &= 308.8 \text{ V}
\end{aligned}$$

وحيث إن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

$$V_{Line} = \sqrt{3} V_{Ph} = \sqrt{3} \times 308.8 = 535 \text{ V}$$



الشكل رقم ٢٠ - ٢: المخطط الاتجاهي للمولد التزامني في حالات تحميل مختلفة (المثال ٢ - ٢)

ج) لحساب الكفاءة يجب حساب القدرة الخارجة والداخلية والمفقودة كما يلي:
القدرة الخارجة من المولد عند الحمل الكامل (60 A) و معامل قدره 0.8 متخلفاً

$$P_{out} = \sqrt{3} V_L I_L PF$$

$$= \sqrt{3} \times 410 \times 60 \times 0.8 = 34.1 \text{ kw}$$

القدرة الداخلة إلى المولد:

$$P_{inp} = P_{out} + P_{Cu1} + P_{Core} + P_F$$

المفاقد النحاسية في ملفات المنتج P_{Cu1} مهمة بسبب إهمال مقاومة ملفات العضو الثابت

إذن:

$$P_{imp} = 34.1 + 0 + 1.0 + 1.5 = 36.6 \quad \text{kw}$$

إذن كفاءة المولد هي:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{imp}} \times 100 = \frac{34.1}{36.6} \times 100 = 93.2 \%$$

د (العزم الداخلى إلى المولد يحسب كما يلي:

$$T_{imp} = \frac{P_{imp}}{\omega_m}$$
$$\omega_m = \frac{n 2\pi}{60} = \frac{1200 \times 2\pi}{60} = 125.7 \quad \text{rad/sec}$$
$$T_{imp} = \frac{36.6 \times 10^3}{125.7} = 191.2 \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

هـ) معامل تنظيم الجهد للمولد يمكن حسابه باستخدام المعادلة (١٢ - ٢) للحالات الثلاث كما يلي:

$$VR = \frac{E_{Ph} - V_{Ph}}{V_{Ph}} \times 100$$

الحالة (١) :

$$VR = \frac{480 - 410}{410} \times 100 = 17.1 \%$$

الحالة (٢) :

$$VR = \frac{480 - 468}{468} \times 100 = 2.6 \%$$

الحالة (٣) :

$$VR = \frac{480 - 535}{535} \times 100 = -10.3 \%$$

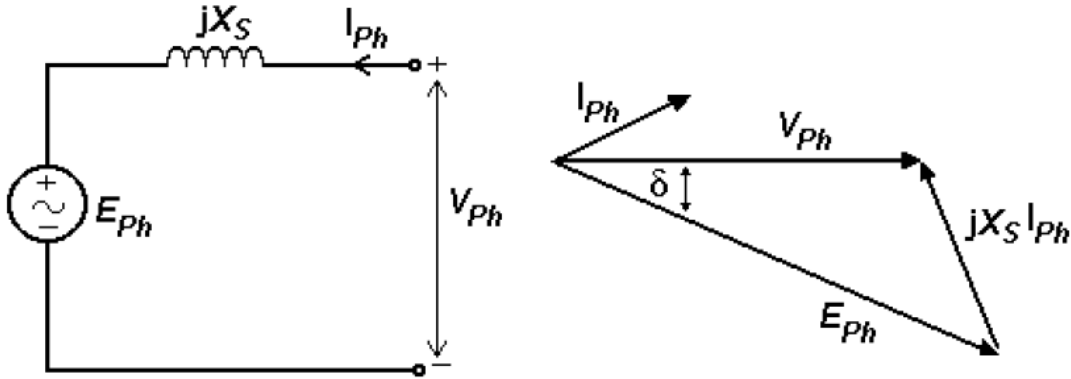
الوحدة الثالثة : المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

التركيب

الآلة التزامنية يمكن تشغيلها كمحرك تزامني Synchronous Motor وذلك بتغذية العضو الثابت من مصدر جهد ثلاثي الأوجه وتغذية ملفات المجال بتيار مستمر كالمعتاد وعند ذلك ينتج مجالان مغناطيسيان أحدهما يدور بالسرعة التزامنية حسب تردد مصدر الجهد وهو المجال الناتج من العضو الثابت والآخر يدور حسب سرعة العضو الدوار وعندما تصل سرعة العضو الدوار إلى سرعة المجال الناتج من ملفات العضو الثابت تستقر سرعة المحرك عند هذه السرعة ولا تتغير مهما تغير حمل المحرك مادام أنه ضمن الحمل المقنن له. الشكل (١٦ - ٢) يبين أنه عندما تكون زاوية العزم (δ) سالبة فإن الآلة التزامنية تتحول إلى محرك وعندها تكون القدرة الكهربائية داخلية إلى الآلة.

جميع العلاقات الرياضية الخاصة بالمولد التزامني تنطبق تماماً على المحرك التزامني مع الأخذ في الاعتبار تغير اتجاه القدرة وبالتالي يتغير اتجاه التيار في العضو الثابت ، وعلى هذا الأساس تصبح الدائرة المكافئة للمحرك التزامني كما هو موضح في الشكل رقم (١ - ٣) مع إهمال مقاومة ملفات العضو الثابت للتبسيط وبالتالي يمكن إيجاد قيمة الجهد الداخلي من المعادلة التالية:

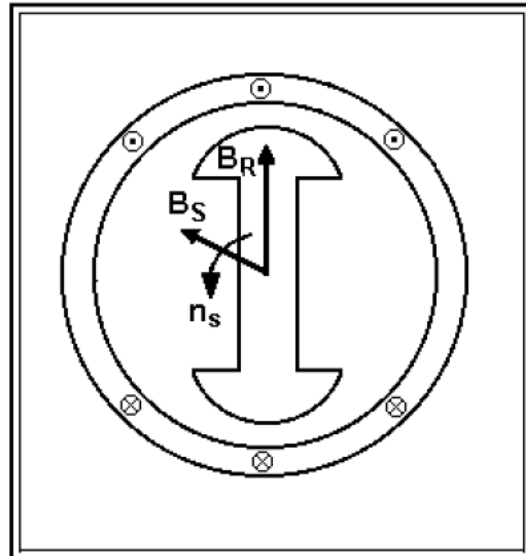
$$E_{Ph} = V_{Ph} - jX_S I_{Ph} \quad (1 - 3)$$



الشكل رقم ١ - ٣: الدائرة المكافئة والمخطط الاتجاهي المصاحب للمحرك التزامني

كيفية عمل المحرك التزامني

لكي نفهم كيف يعمل المحرك التزامني ، انظر الشكل (٢- ٣) الذي يوضح محركاً تزامنياً ذي قطبين. عندما تغذى ملفات المجال بالتيار المستمر سيتولد مجال مغناطيسي ثابت في العضو الدوار ، أما العضو الثابت فعندما يوصل في مصدر الجهد سيمر فيه تيارات ثلاثية الأوجه والتي بدورها ستولد مجالاً مغناطيسياً دواراً منتظماً وبالتالي سيتواجد داخل الآلة مجالان مغناطيسيان هما B_R و B_S ، كما في الشكل (٢- ٣). مجال العضو الدوار B_R سيحاول أن يكون متعامداً مع مجال العضو الثابت B_S - تماماً كما يحدث عندما توضع قطعتان من المغناطيس قرب بعضهما البعض - وحيث أن مجال العضو الثابت يدور فإن مجال العضو الدوار سيحاول اللحاق به (ومعه العضو الدوار نفسه) ولكن لن يتمكن من ذلك بسبب اتساع الزاوية بينهما ، وهكذا يعيد الكرة في كل دورة دون أن يتمكن من البدء وبالتالي لابد من إيجاد وسيلة تجعل العضو الدوار يحافظ على الزاوية بين مجاله ومجال العضو الثابت و لكي يتحقق ذلك يجب أن يدار العضو الدوار بالسرعة التزامنية أو قريب منها قبل توصيل التيار المستمر في ملفاته وعند التوصيل ستكون الزاوية بين المجالين صغيرة وسيستمر مجال العضو الدوار (ومعه العضو الدوار نفسه) في اللحاق بمجال العضو الثابت وسيدور بنفس سرعته (السرعة التزامنية) ولا تتغير مهما تغير حمل المحرك مادام أنه ضمن الحمل المقنن له ، وفي حالة زيادة الحمل عن العزم الأقصى للمحرك (أي أن $\delta < 90^\circ$) فإن العضو الدوار سيفقد التزامن ويبدأ بالتباطؤ التدريجي حتى يتوقف.



الشكل رقم ٢- ٣: المجالات المغناطيسية في المحرك التزامني

طرق بدء حركة المحرك التزامني

١- باستخدام المحرك الخارجي

بحيث يدار المحرك التزامني بواسطة محرك يركب على نفس العمود حتى تصل السرعة إلى السرعة التزامنية وعندها تغذى ملفات المجال بالتيار المستمر ويفصل محرك البدء وعندها ينتج عزم ذو اتجاه واحد يجعل المحرك يحافظ على السرعة التزامنية مهما تغير الحمل ضمن الحمل المقتن ما لم يفقد التزامن.

٢- باستخدام قضبان التخميد

وذلك بتركيب مجموعة من القضبان في أحذية الأقطاب ثم تقصر هذه القضبان بحلقات نحاسية من الجهتين بحيث تكون ما يشبه القفص السنجابي في المحركات الحثية ، وفي هذه الحالة وعند توصيل التيار الكهربائي يبدأ المحرك بالدوران على أساس أنه محرك حثي وعندما تصل السرعة إلى قرب السرعة التزامنية تغذى ملفات المجال بالتيار المستمر وعندها يتكون مجال مغناطيسي دوار آخر يؤدي وجوده مع المجال الناتج من العضو الثابت إلى نقل المحرك إلى السرعة التزامنية وعندها يتلاشى تأثير قضبان التخميد لأن التيارات المارة بها عند السرعة التزامنية تساوي صفراً ، ويكون العزم الناتج في هذه الحالة هو عزم المحرك التزامني وليس الحثي ، ويحافظ المحرك على سرعته عند السرعة التزامنية مهما تغير الحمل ما لم يفقد التزامن .

٣- باستخدام ظاهرة التيارات الدوامية

وجد حديثاً محركات تزامنية ذات عضو دوار مصمت وبدون قضبان تخميد تبدأ حركتها على هذا الأساس بحيث تكون التيارات الدوامية المتولدة في العضو الدوار المصمت عزم مشابه لعزم المحرك الحثي ، وعندما يتسارع العضو الدوار وتصل سرعته قرب السرعة التزامنية سيعلق بالمجال المغناطيسي الدوار الناتج من العضو الثابت وسيدور معه بنفس السرعة وعندئذ ستتلاشى التيارات الدوامية وهذه الطريقة مناسبة للمحركات التزامنية الصغيرة.

٤- باستخدام مصدر جهد متغير التردد

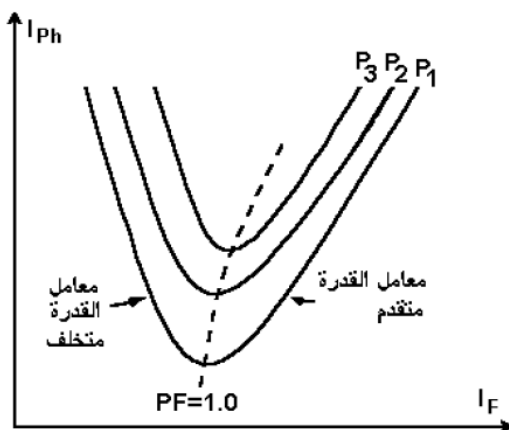
يمكن بدء دوران المحرك التزامني بسهولة إذا كان يغذى من مصدر جهد متغير التردد والذي بدأ ينتشر في السنوات الأخيرة بفضل التقدم في تقنية إلكترونيات القدرة وذلك بخفض التردد إلى أن تصبح سرعة المجال المغناطيسي الدوار قليلة جداً بحيث يتمكن العضو الدوار من أن يعلق به ، وعندما يبدأ العضو

الدوار في الدوران يرفع التردد تدريجياً حتى يصل المحرك إلى السرعة المطلوبة. وسيستمر العضو الدوار في الدوران بنفس سرعة المجال المغناطيسي ما لم يفقد التزامن.

ويلاحظ في جميع الطرق السابقة أنه أثناء عملية البدء وقبل توصيل التيار المستمر إلى ملفات المجال يجب أن تكون ملفات المجال مقصورة عبر مقاومة ، لأن تعرضها للمجال المغناطيسي الدوار الناتج من العضو الثابت سيؤدي إلى تولد جهد عالٍ على أطراف ملفات المجال قد يؤدي إلى انهيار العازل أو حدوث شرارة بين حلقات الانزلاق.

منحنيات (V) للمحرك التزامني

هي منحنيات تحدد خواص تشغيل المحرك التزامني وترتبط بين تيار المجال I_F و تيار المنتج I_{Ph} انظر الشكل (٣ - ٣) ، وكل منحنى يمثل مستوى محدداً من القدرة الفعالة P ، في كل منحنى أقل قيمة لتيار المنتج تحدث عندما يكون معامل القدرة مساوياً للواحد وعند هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلكاً للقدرة الفعالة P فقط ، وعند أي قيمة أقل من هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلكاً للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى القدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متخلفاً ، بينما عندما يكون تيار المجال أكبر من هذه القيمة يكون المحرك معطياً للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى استهلاكه للقدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متقدماً في هذه الحالة. وهذا يعني أنه يمكننا بالتحكم في تيار المجال أن نجعل المحرك التزامني إما مستهلكاً للقدرة غير الفعالة أو مزوداً للشبكة بالقدرة غير الفعالة أي أن المحرك التزامني يمكن أن يعمل كأنه ملف أو مكثف.



الشكل رقم ٣ - ٣ : منحنيات V للمحرك التزامني

استخدامات المحرك التزامني

يستخدم المحرك التزامني على نطاق ضيق وذلك في التطبيقات التي يكون فيها ثبات السرعة مطلباً أساسياً ، وفي حالة كون ثبات السرعة غير مطلب أساسي فيستغني عن المحرك التزامني بغيره نظراً لارتفاع ثمنه حيث إنه يحتاج إلى نظام إثارة Excitation System ونظام بدء حركة ، ومن أشهر تطبيقاته استخدامه كمكثف تزامني Synchronous Condenser

محرك تزامني ملفاته موصلة على شكل دلتا ، جهد المصدر 208 V والتردد 60 Hz ، ممانعته التزامنية له 2.5Ω ومقاومة ملفات المنتج مهمة ، المفاقيد الحديدية 1.0 kw و مفاقيد الاحتكاك 1.5 kw ، يدير حملاً قدره 15 hp عند معامل قدرة 0.8 متقدماً ، أوجد ما يلي:

أ) ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

ب) أوجد قيم I_{Line} ، I_{Ph} ، E_{Ph}

ج) عندما يزداد الحمل إلى 30 hp وضح سلوك المحرك باستخدام المخطط الاتجاهي

د) أوجد قيم I_{Line} ، I_{Ph} ، E_{Ph} بعد زيادة الحمل

هـ) احسب معامل القدرة بعد زيادة الحمل

الحل:

أ) المخطط الاتجاهي موضح في الشكل (٧- ٣)

ب) القدرة الميكانيكية الخارجة من المحرك بالكيلو وات هي:

$$P_{out} = 15 \text{ hp} \times 0.746 \text{ kw/hp} = 11.19 \text{ kw}$$

أما القدرة الكهربائية الداخلة إلى المحرك فهي:

$$P_{inp} = P_{out} + P_{Cu1} + P_{Core} + P_F$$

$$P_{inp} = 11.19 + 0 + 1.0 + 1.5 = 13.69 \text{ kw}$$

وبالتالي يمكن حساب تيار الخط كما يلي:

$$\begin{aligned} I_{Line} &= \frac{P_{inp}}{\sqrt{3} V_{Ph} \cos \theta} \\ &= \frac{13.69 \times 10^3}{\sqrt{3} (208)(0.8)} = 47.5 \text{ A} \end{aligned}$$

و بهأن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا فإن تيار الوجه يحسب كما يلي:

$$I_{Ph} = \frac{I_{Line}}{\sqrt{3}} = \frac{47.5}{\sqrt{3}} = 27.4 \text{ A}$$

و بهأن المحرك يعمل عند معامل قدرة متقدماً فإن زاوية تيار الوجه تصبح كما يلي:

$$I_{Ph} = 27.4 \angle 36.87^\circ \text{ A}$$

أما E_{Ph} فيمكن حسابه مباشرة بتطبيق المعادلة (١- ٣) كما يلي:

$$\begin{aligned} E_{Ph} &= V_{Ph} - jX_S I_{Ph} \\ &= 208 \angle 0^\circ - (j2.5)(27.4 \angle 36.87^\circ) \\ &= 208 \angle 0^\circ - 68.5 \angle 126.87^\circ \\ &= 249.1 - j54.8 = 255 \angle -12.4^\circ \end{aligned}$$

د) بعد زيادة الحمل تصبح القدرة الكهربائية الداخلة إلى المحرك كما يلي:

$$P_{inp} = P_{out} + P_{Cu1} + P_{Core} + P_F$$

$$P_{inp} = 30(0.746) + 0 + 1.0 + 1.5 = 24.88 \text{ kw}$$

بعد زيادة الحمل قيمة E_{Ph} لم تتغير وإنما ازدادت الزاوية (δ) بينها وبين V_{Ph} هذه الزاوية الجديدة يمكن إيجادها بتطبيق المعادلة (١٤ - ٢) كما يلي:

$$\begin{aligned} \delta &= \sin^{-1} \left(\frac{X_S P}{3 V_{Ph} E_{Ph}} \right) \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{2.5 \times 24.88 \times 10^3}{3 \times 208 \times 255} \right) \\ &= \sin^{-1} (0.391) \\ &= 23^\circ \end{aligned}$$

إذن: الجهد الداخلي E_{Ph} يصبح كما يلي:

$$E_{Ph} = 255 \angle -23^\circ$$

وبالتالي يمكن إيجاد تيار المنتج I_{Ph} من المعادلة (١ - ٢) كما يلي:

$$\begin{aligned} I_{Ph} &= \frac{V_{Ph} - E_{Ph}}{jX_S} \\ &= \frac{208 \angle 0^\circ - 255 \angle -23^\circ}{j2.5} \\ &= \frac{103.1 \angle 105^\circ}{j2.5} = 41.2 \angle 15^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

وبالتالي يكون تيار الخط كما يلي:

$$I_{Line} = \sqrt{3} I_{Ph} = \sqrt{3} \times 41.2 = 71.4 \text{ A}$$

هـ) معامل القدرة بعد زيادة الحمل هو:

$$PF = \cos (15^\circ) = 0.966$$

٥- ١ محرك التوالي العام

محرك التوالي العام أو المحرك العام هو محرك يعمل على كل من مصدري التيار المستمر والتيار المتردد، من هنا جاءت التسمية بالمحرك العام، إذا قمنا بعكس قطبية كل من تيارى المنتج والمجال في محركات التيار المستمر في نفس اللحظة سيستمر المحرك في الدوران في نفس الاتجاه، لأن اتجاه العزم المتولد لم يتغير. بما أن ملفات المنتج وملفات المجال موصلان على التوالي، في محركات التيار المستمر ذي تغذية التوالي، فإن تيارى المنتج والمجال يكونان منطبقين، الزاوية بينهما صفر، وينعكس كل منهما في نفس اللحظة عندما يوصل المحرك مع مصدر للتيار المتردد، وبالتالي سيتولد عزم نابض بضعف تردد المصدر ولكن في اتجاه واحد، وذي قيمة متوسطة تعمل على دوران المحرك.

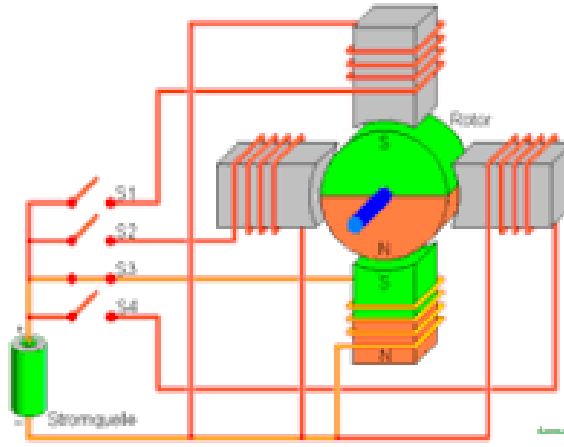
٥- ١- ٢ خواص واستخدامات المحرك العام:

محرك التوالي العام يمكنه أن يعمل بسرعات عالية قد تصل إلى 15000 لفة في الدقيقة، وينتج عزمًا كبيراً، فهو ذو قدرة عالية مقارنة بحجمه، فيستخدم في التطبيقات التي تتطلب خفة في وزن المحرك المستخدم مع قدرات عالية، مثل الأجهزة المنزلية كالمكانس الكهربائية والخلاطات، وأيضاً يستخدم في المثقاب الكهربائي وآلات الحياكة الكهربائية. شكل (٥- ١) يوضح خواص المحرك العام، يتضح من الشكل، أن خواص المحرك تختلف بعض الشيء عند تشغيله بالتيار المتردد، عن خواصه عند التشغيل بالتيار المستمر، وذلك لسببين:

- معاوقة ملفات المنتج وملفات المجال تمتص جزءاً من جهد المصدر، وبالتالي تكون السرعة أقل عند استخدام الجهد المتردد عنها في حالة استخدام نفس الجهد المستمر.
 - قد تصل الدائرة المغناطيسية إلى حالة التشبع المغناطيسي عند القيم العظمى للتيار المتردد، مما يقلل من قيمة المجال المغناطيسي وبالتالي العزم المتولد.
- يمكن تحليل خواص المحرك العام باستخدام معادلات محرك التوالي للتيار المستمر مع إدخال التعديلات المناسبة كما يتضح من المثال التالي:

محرك الخطوة (Stepper motor) : هو محرك كهربائي يستخدم في الآلات الصغيرة التي تحتاج لدقة

في تحكم بمحركاتها مثل الطابعة وقاطع الليزر إلخ. و من أهم ميزات هذا النوع من المحركات انه يمكن التحكم في عدد وسرعة دوراته وزاوية التوقف بدقة. يستخدم هذا المحرك أيضاً في التطبيقات الروبوتية، نظراً لإمكانية التحكم في إيقافه عند زاوية محددة. ومما يميز هذا المحرك أيضاً أنه يعتمد على النظام الثنائي في التشغيل binary حيث يلاحظ أنه يخرج منه أربع أو خمس أسلاك تسمح له بتلقي تتابع معين.



محرك الخطوة

المحرك الخطي: هو محرك كهربائي تم "فتح" الجزء الثابت والدوار فيه، وبالتالي، بدلاً من إنتاج عزم الدوران (الدوران)، فإنه ينتج قوة خطية على طوله.

مولدات التاكو أو التاكومترات هي أجهزة لقياس السرعة الدورانية، وهي عبارة عن مولدات صغيرة القدرة تعمل على تحويل السرعة الدورانية إلى إشارة كهربائية متناسبة معها يمكن قياسها. تعتمد علاقة التحويل، على العلاقة بين سرعة الدوران والقوة الدافعة الكهربائية المتولدة، العلاقة العامة لخرج مولد التاكو هي:

$$V_a = K_g \cdot \omega$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

[١-٣]

حيث ω هي سرعة الدوران بالراديان في الثانية و K_g هو ثابت توليد الجهد أو ميل الخط الذي يمثل العلاقة بين ω و V_a .

تصنف مولدات التاكو حسب تصميمها ونظرية عملها من حيث إنها مولدات للتيار المستمر أو مولدات حثية أو تزامنية.