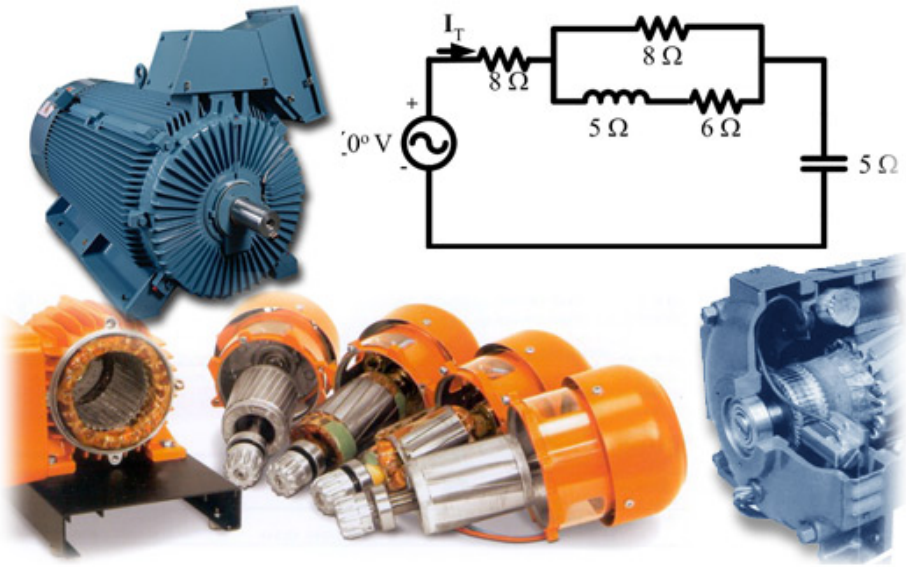
المملكـــة العربيـــة الســـعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

آلات و معدات كهربائية

آلات التيـــار المتردد - نظري

٢٤١ كهر



جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

مقدمه

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

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

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

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " آلات التيار المتردد " لمتدربي قسم" آلات ومعدات كهربائية " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

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

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

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تمهيد

هذه هي الحقيبة التدريبية السابعة في تخصص الآلات والمعدات الكهربائية, وهي تهدف إلى تعريف المتدرب بتركيب وأساسيات تشغيل وأداء آلات التيار المتردد الشائعة الاستخدام كالمحركات الحثية والآلات التزامنية, كذلك تهدف إلى تعريف االمتدرب بتطبيقات هذه الآلات واستخداماتها في الصناعة, كما تهدف أيضاً إلى تدريب المتدرب على كيفية قياس الخواص الهامة لهذه الآلات وتحديد مدى تشغيلها وكذلك تدريبه على إجراء الحسابات المتعلقة بتلك الآلات وهذه الحقيبة تشتمل على أربع وحدات تدريبية, الثلاث الأولى منها خاصة بالمقرر النظري الذي يدرس للمتدرب في الفصل وهي كما يلي:

- الوحدة الأولى: المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
- الوحدة الثانية: المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه.
- الوحدة الثالثة: المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه.

وقد قسمت كل وحدة إلى عدد من الفصول , كل فصل يختص بموضوع أو أكثر بالإضافة إلى عدد من الأمثلة الحسابية المحلولة حلاً تفصيلياً حول ذلك الموضوع , كما يوجد في نهاية كل فصل مجموعة من الأسئلة والتمارين الخاصة بموضوع ذلك الفصل والتي تعتبر كوسيلة مراجعة وتثبيت للمعلومات التي درست للطالب في ذلك الفصل.

أما الوحدة الرابعة فهي خاصة بالتجارب العملية التي يجب على المتدرب أن يجريها أسبوعياً في المعمل. وهذه الوحدة لا تعتبر منهج تدريبي مستقل وإنما الغرض منها هو دعم ومساندة الوحدات النظرية الثلاث السابقة فهي تهدف إلى إثبات فرضيات أو ترسيخ مفاهيم معينة درسها المتدرب نظرياً حول تلك الأنواع من الآلات الكهربائية، كما يوجد في نهاية كل تجربة من التجارب العشر التي قدمت في هذه الوحدة مجموعة من الأسئلة المتعلقة بالتجربة ذاتها والتي تعتبر كمقياس لمدى فهم واستيعاب المتدرب للتجربة.

المملكـــة العربيـــة الســـعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

آلات التيـــار المتردد

المحركات الحثية ثلاثية الأوجه

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الجدارة: الإلمام الشامل بتركيب وأساسيات تشغيل وأداء المحركات الحثية ثلاثية الأوجه

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

الإلمام بأنواع وتركيب المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

١. الإلمام بكيفية توليد المجال المغناطيسي الدوار في هذه المحركات.
٢. فهم نظرية عمل المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
٣. الإلمام بخواص المحركات الحثية ثلاثية الأوجه وطبيعة عملها.
٤. الإلمام بطرق عكس اتجاه دوران المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
٥. إجراء الاختبارات الروتينية على هذه المحركات.
٦. حساب ثوابت الدائرة المكافئة لهذه المحركات.
٧. فهم المنحنيات الخاصة بأداء هذه المحركات.
٨. إجراء الحسابات المتعلقة بهذه المحركات مثل حساب القدرة والعزم والكفاءة .
٩. الإلمام بطرق بدء الحركة للمحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
١٠. الإلمام بكيفية تغيير سرعة دوران المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

الوقت المتوقع للتدريب: ١٤ ساعة

الوسائل المساعدة: التجارب العملية من رقم ١ إلى ٧ في الوحدة التدريبية الرابعة من هذه الحقيبة

متطلبات الجدارة: يجب أن يكون المتدرب قد أتم دراسة الحقيبة التدريبية الرابعة في هذا التخصص (آلات التيار المستمر والمحولات)

هذه الوحدة مقسمة إلى أربعة فصول, كل فصل يختص بموضوع أو أكثر حول المحركات الحثية ثلاثية الأوجه وهي كما يلي:

الفصل الأول : التركيب ونظرية العمل.
الفصل الثاني: الدائرة المكافئة وكيفية تحديد عناصرها.
الفصل الثالث: القدرة و العزم.
الفصل الرابع: طرق بدء الحركة والتحكم في السرعة.

وفي نهاية كل فصل يوجد عدد من الأمثلة الحسابية المحلولة حلاً تفصيلياً, بالإضافة إلى مجموعة من الأسئلة والتمارين التي تم اختيارها بعناية لتكن بمثابة قياس لفهم و استيعاب المتدرب لهذا الفصل.

الوحدة الأولى : المحركات الحثية ثلاثية الأوجه

الفصل الأول : التركيب ونظرية العمل

تمهيد :

المحرك الحثي متعدد الأوجه الذي قام باختراعه نيقولا تسلا عام ١٨٨٦م يعتبر المحرك الأكثر انتشاراً في عالم الصناعة هذا اليوم، ويقدر أن في مصانع أمريكا وحدها ما يزيد عن خمسين مليون محرك من هذا النوع تعطي جميعها ما مقداره ١٥٠ مليون حصان ، ويعتقد أن هذا العدد يزداد بما يقارب مليون محرك كل عام .

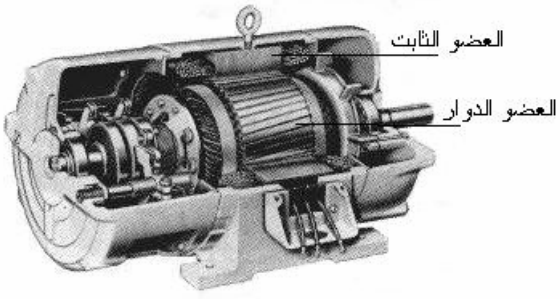
هذا الانتشار الواسع لهذا المحرك جاء نتيجةً لما يتمتع به من مزايا مثل: المتانة ، بساطة التركيب ، انخفاض الثمن مقارنة بالمحركات الأخرى ، قلة الصيانة ، كما أنه يتوفر بقدرات تتراوح من جزء من الحصان إلى أكثر من ١٠,٠٠٠ حصان ولا يحتاج إلى أي وسيلة إثارة بالإضافة إلى كفاءته العالية وبالجملة فإن مميزات تشغيله حسنه ومرضيه في الأعمال التي لا تتطلب تغيراً في السرعة.

ومما يعيب هذا المحرك أنه ليس من السهل التحكم في سرعته كما أن تيار البدء لهذا المحرك عالي (٦ -٨ أضعاف تيار الحمل الكامل) وكذلك معامل القدرة منخفض عند الأحمال الخفيفة.

ولكننا نجد أن مميزات هذا المحرك تفوق عيوبه في معظم التطبيقات الصناعية كما أنه وجد حديثاً وسائل تحكم إلكترونية أدت إلى التغلب على هذه العيوب.

تركيب المحرك الحثي

المحرك الحثي ثلاثي الأوجه Three Phase Induction Motor يتركب من عضوين رئيسيين كأي محرك آخر: هما العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor ، انظر الشكل رقم (١ -١).

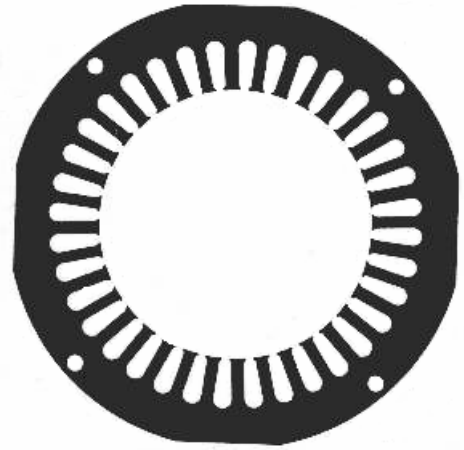


شكل رقم ١ -١: مقطع في محرك حثي

العضو الثابت:

العضو الثابت يتكون من شرائح متراصة من الحديد المغناطيسي تتراوح سماكتها من ٠,٣ مم إلى ٠,٦مم ـ حسب حجم المحرك ـ(شكل رقم ٢ -١) ، ومعزولة عن بعضها بعازل كهربائي بحيث تكون مع بعضها جسماً أسطوانياً محفور بداخله عدد من المجاري وذلك لتركيب الملفات ، انظر شكل رقم (٣ -١).

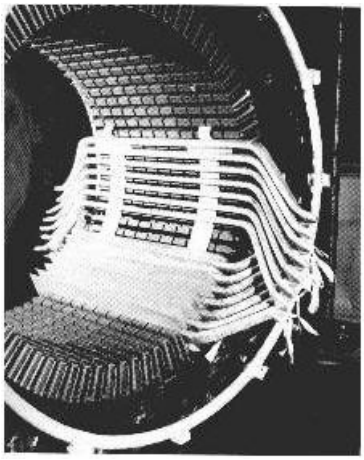
الهدف من تصنيع العضو الثابت بهذه الطريقة هو تقليل حرارة الحديد الناتجة من التيارات الدوامية التي تكونت بسبب تعر ض الحديد للمجال المغناطيسي المتغير داخل المحرك ، كما أنه يوجد في المحركات الكبيرة عادةً فتحات تهوية بين الشرائح في العضو الثابت. بعد اكتمال تصنيع العضو الثابت بهذه الطريقة يتم تقسيمه إلى العدد المطلوب من الأقطاب وتقسم المجاري في كل قطب على الأوجه الثلاثة ثم بعد ذلك يتم تركيب ملفات كل وجه في المجاري الخاصة به تحت كل قطب بحيث يفصل بين كل وجه وأحر ١٢٠ درجة كهربائية وفي نهاية عملية اللف يكون قد تم تركيب ثلاثة ملفات في العضو الثابت لكل ملف طرفان هذه الأطرف الستة يتم تغذية العضو الثابت من خلالها بعد توصيلها إما على شكل نجمة أو دلتا ، انظر الأشكال (٤ -١، ٥ -١).



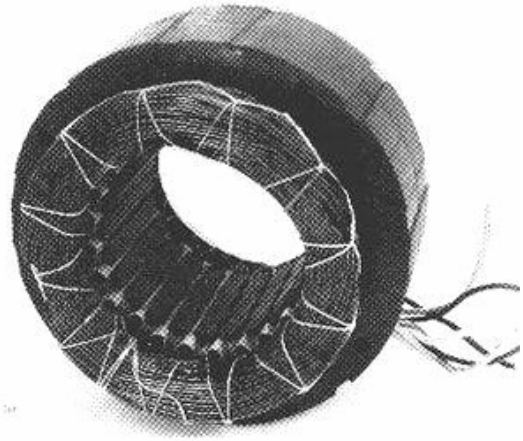
شكل رقم ٢ -١ : شريحة عضو ثابت

العضو الدوار:

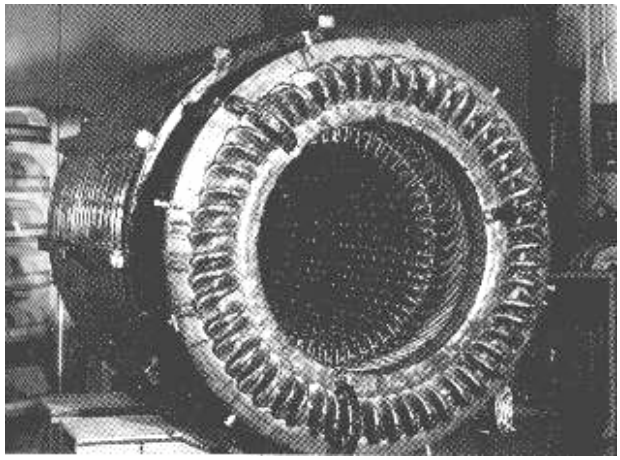
يوجد منه نوعان مختلفان في التركيب ومتقاربان في الخواص الكهربائية ، ويسمى المحرك عادةً باسم عضوه الدوار للتميز بين نوعيه وهما: العضو الدوار الملفوف أو ذو حلقات الانزلاق والعضو الدوار ذو القفص السنجابي.



شكل رقم ٣ -١: العضو الثابت أثناء تركيب الشرائح والملفات ويلاحظ وجود فتحات للتهوية بين الشرائح



شكل رقم ٤ -١: عضو ثابت مكتمل لمحرك صغير



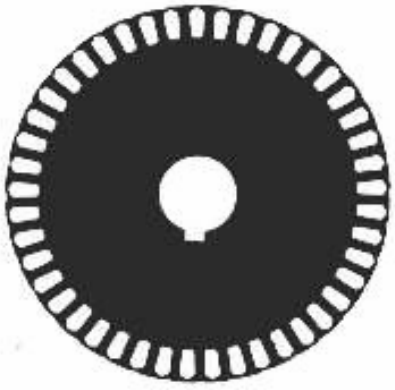
شكل رقم ٥ -١: عضو ثابت مكتمل لمحرك كبير

العضو الدوار الملفوف (ذو حلقات الانزلاق):

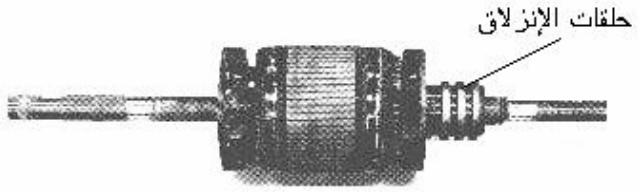
العضو الدوار الملفوف Wound Rotor يتركب من شرائح متراصة من الحديد المغناطيسي المعزولة عن بعضها مركبة على عمود المحرك ومحفور عليها عدد من المجاري لتركيب الملفات ،شكل رقم (٦ - ١).

يقسم العضو الدوار إلى عدد من الأقطاب مساوي لأقطاب العضو الثابت الذي سيركب فيه وتقسم المجاري في كل قطب إلى ثلاثة أقسام كل قسم يركب فيه ملفات أحد الأوجه الثلاثة بحيث يكون بين كل وجه وأخر ١٢٠ درجه كهربائية ، عادةً هذه الملفات الثلاثة توصل على شكل نجمة حيث تقصر ثلاثة أطراف مع بعضها داخل العضو الدوار بينما الثلاثة الأخرى يتم توصيلها إلى ثلاث حلقات انزلاق Slip Rings مركبة على نفس العمود.

من خلال حلقات الانزلاق وعن طريق فرش كربونية مماسة لحلقات الانزلاق أثناء الدوران يتم توصيل ملفات العضو الدوار إلى خارج المحرك وذلك من أجل التحكم في بدء دوران المحرك أو في تنظيم سرعته وذلك بتوصيل مقاومات خارجية بهذه الأطراف الثلاثة، لذلك فإن هذا النوع من المحركات يتميز بإمكانية تغيير خواص تشغيله على نطاق واسع عن طريق توصيل ملفات العضو الدوار بدائرة خارجية ، انظر شكل رقم (٧ -١).



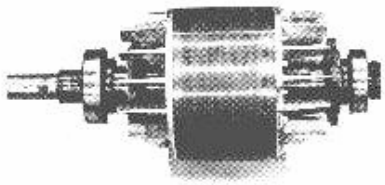
شكل رقم ٦ -١: شريحة عضو دوار



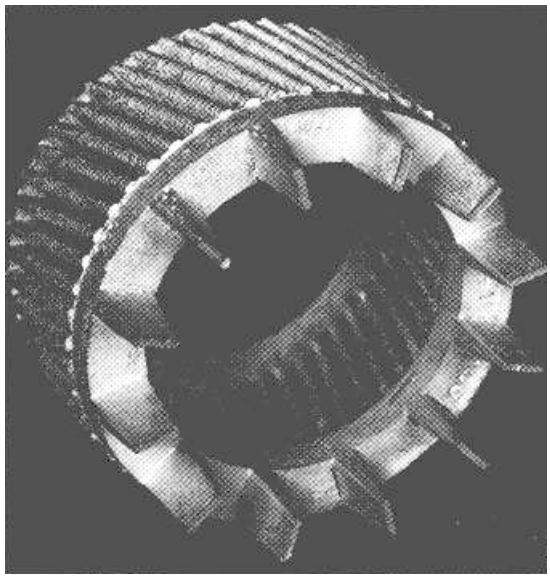
شكل رقم ٧ -١: عضو دوار ملفوف (ذو حلقات انزلاق)

العضو الدوار ذو القفص السنجابي:

العضـو الـدوار ذو القفـص السـنجابي Squirrel cage مشـابة تمامـاً للعضـو الـدوار ذي حلقـات الانزلاق من حيث التركيب الميكانيكي ولكن بدلاً من وضع ملفات في المجاري فإنه يوضع قضبان من النحاس أو الألمنيوم وهذه القضبان مقصورة أطرافها مع بعض من الجهتين بحلقتين من نفس مادة القضبان . هـذا النـوع لا يقسـم إلى عـدد معـين مـن الأقطـاب وإنمـا يسـتطيع التكـيف تلقائيـاً مـع عـدد الأقطاب والأوجه للعضو الثابت الذي سيركب فيه. وحيث أنه لا يوجد به حلقات انزلاق فإنه لا يمكن ربطه بدائرة خارجية وبالتالي لا يمكن تغيير خواص تشغيل هذا المحرك أو التحكم بسرعته ، انظر الأشكال (٨ -١ ، ٩ -١).



شكل رقم ٨ -١: عضو دوار ذو قفص سنجابي



شكل رقم ٩ -١: قضبان القفص السنجابي بعد إزالة الشرائح الحديدية

المجال المغناطيسي الدوار

حيث أن ملفات العضو الثابت موصلة إما على شكل نجمة أو دلتا ويوجد بين كل ملف وأخر زاوية فراغية قدرها ١٢٠ درجة فإنه عندما توصل هذه الملفات بمصدر جهد كهربائي ثلاثي الأوجه بين كل وجه واخر١٢٠ درجة فإنه سيمر في هذه الملفات تيارات متزنة بين كل تيار وأخر ١٢٠ درجة ، ونتيجة لمرور هذه التيارات بهذه الصفة في تلك الملفات التي يفصل بين كل ملف و آخر زاوية فراغية قدرها ١٢٠ درجة فإنه سينشاء في الثغرة الهوائية مجال مغناطيسي دوار منتظم ، انظر الشكل (١٠ - ١). هذا المجال المغناطيسي يدور بسرعة تسمى السرعة التزامنية Synchronous speed وتحسب من المعادلة التالية :

حيث:

ns: السرعة التزامنية .

f_s: تردد تيار العضو الثابت .

p: عدد أقطاب الآلة .

شدة هذا المجال المغناطيسي تتناسب طردياً مع تيار الوجه المار في العضو الثابت وعدد اللفات في العضو الثابت تحت كل قطب ، وتحسب من المعادلة التالية:

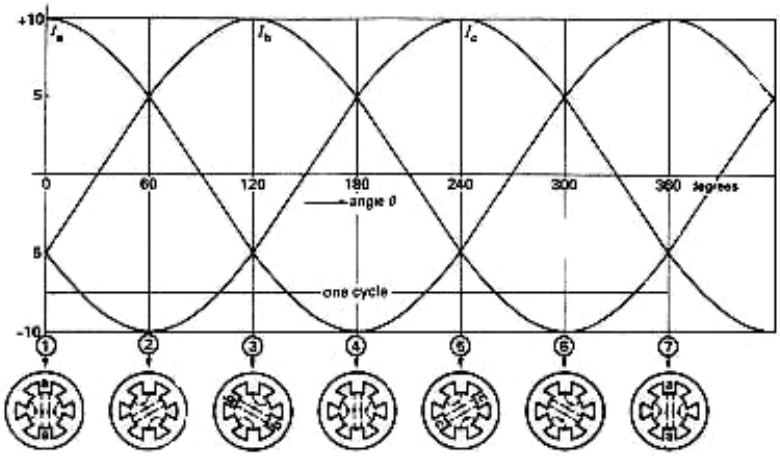
$$F_s = N_s \cdot I_s \qquad (2 - 1)$$

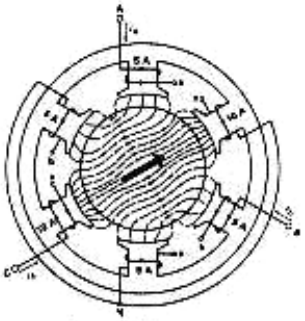
حيث:

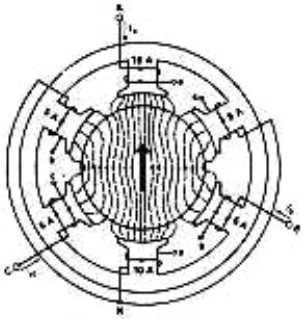
F_s: شدة المجال المغناطيسي في العضو الثابت .

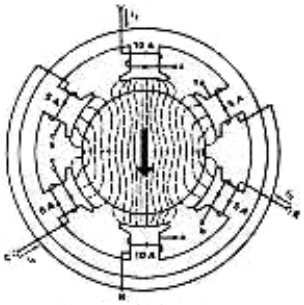
N_s: عدد لفات العضو الثابت لكل قطب .

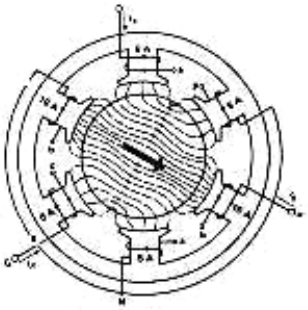
I_s: القيمة الفعالة لتيار الوجه في العضو الثابت .

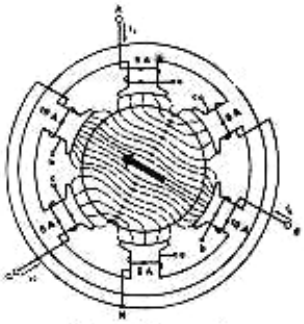


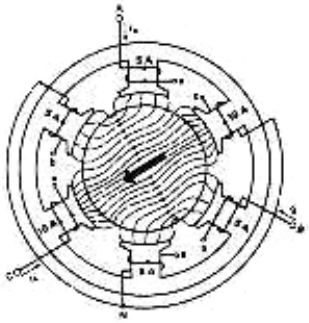

عند ٦٠ درجة


عند الزاوية صفر


عند ١٨٠ درجة


عند ١٢٠ درجة


عند ٣٠٠ درجة


عند ٢٤٠ درجة

شكل رقم ١٠ -١: رسم توضيحي للمجال المغناطيسي الدوار في محرك ذي ستة أقطاب

كيفية عمل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

عند توصيل أطراف العضو الثابت بمصدر الجهد فإنه سينشاء 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 الدوار يقع ضمن تأثير هذا المجال المغناطيسي الدوار فإنه سينشاء في موصلاته قوة دافعة كهربائية ثلاثية الأوجه ، و بمأن موصلات العضو الدوار مقصورة من الطرفين فإنه سيمر فيها تيارات ثلاثية الأوجه بين كل وجهه وأخر ١٢٠ درجة و من ثم سيتولد مجال مغناطيسي دوار آخر في الثغرة الهوائية نتيجةً لمرور تيارات ثلاثية الأوجه في موصلات العضو الدوار. في هذه الحالة أصبح لدينا مجالان مغناطيسيان دواران الأول ناتج من العضو الثابت ويدور بالسرعة التزامنية (ns) والثاني ناتج من العضو الدوار ويدور بسرعة (ns- n) بالنسبة للعضو الدوار ـ حيث n هي سرعة العضو الدوارـ ويدور بالسرعة التزامنية (ns) بالنسبة للعضو الثابت. وحيث أن هذين المجالين المغناطيسيين يدوران بنفس السرعة والاتجاه فإنه سيتولد عزم فعال على العضو الدوار يؤدي إلى دورانه بنفس اتجاه و دوران المجالين وذلك طبقاً لمبدأ إنتاج العزم Principle of Torque Production ، انظر شكل (١١ -١) ، هذا العزم يتناسب طردياً مع شدة المجالين وجيب الزاوية بينهما طبقاً للمعادلة التالية:

$$T \propto F_s \cdot F_r \cdot Sin(\delta_{sr}) \qquad (3-1)$$

حيث:

T: العزم

F_s: شدة المجال المغناطيسي في العضو الثابت

F_r: شدة المجال المغناطيسي في العضو الدوار

δ_{sr}: الزاوية بين المجالين

بعدما يبدأ العضو الدوار بالتسارع فإن سرعة تعرض موصلاته لقطع خطوط المجال المغناطيسي الدوار ستقل كلما زادت سرعة العضو الدوار طبقاً للمعادلة التالية:

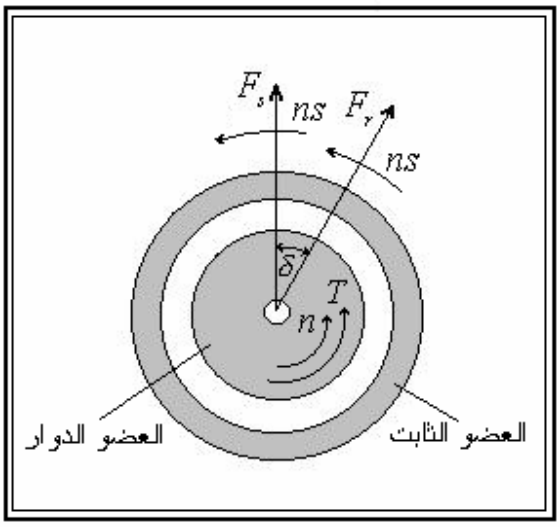
$$n_f = ns - n \qquad (4-1)$$

حيث:

n_f: سرعة قطع خطوط المجال المغناطيسي لموصلات العضو الدوار

وبالتالي فإن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في موصلات العضو الدوار ستقل مع ازدياد سرعة العضو الدوار وذلك لأن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بسب الحث الكهرومغناطيسي تتناسب طردياً مع السرعة النسبية بين الموصل والمجال الذي يتعرض له. وبالتالي فإن قيمة التيارات المارة في موصلات العضو الدوار ستقل وبالتالي شدة المجال المغناطيسي المتولد منها ستقل ومن ثم يقل العزم المؤثر على العضو الدوار ، وهكذا حتى تصل سرعة العضو الدوار إلى سرعة قريبة من السرعة التزامنية. عندما تصل سرعة العضو الدوار إلى قرب السرعة التزامنية تكون التيارات المتولدة في موصلات العضو الدوار صغيرة وبالتالي يضعف المجال المغناطيسي الناشئ منها مما يؤدي إلى انخفاض العزم المؤثر على العضو الدوار. وعندما تستقر سرعة العضو الدوار فإن العزم المؤثر على العضو الدوار يكون مساوي لقوة الاحتكاك التي يتعرض لها العضو الدوار.

عند تحميل المحرك تقل سرعة العضو الدوار وينتج عن ذلك زيادة في سرعة قطع المجال المغناطيسي لموصلات العضو الدوار مما يؤدي إلى زيادة قيم التيارات المارة في موصلاته وبالتالي زيادة شدة المجال المغناطيسي الناشئ منها ومن ثم زيادة العزم المؤثر على العضو الدوار، ثم تستقر سرعة العضو الدوار عند سرعة جديدة و عندها يكون العزم المؤثر عليه مساوي لعزم الحمل المسلط عليه.



شكل رقم ١١ -١: محاور المجالات المغناطيسية في المحرك الحثي

مفهوم الانزلاق

الجهد المتولد في موصلات العضو الدوار يعتمد على السرعة النسبية بين العضو الدوار وسرعة المجال المغناطيسي الدوار الناتج من العضو الثابت ، فإذا كانت سرعة المجال المغناطيسي الدوار (السرعة التزامنية) هي ns والتي تحسب من المعادلة (١ -١) ، وإذا كانت سرعة العضو الدوار هي n فإن السرعة النسبية بين سرعة العضو الدوار وسرعة المجال المغناطيسي الدوار هي الفرق بين السرعتين (ns-n) وتسمى سرعة الانزلاق Slip speed:

$$n_{slip} = ns - n \qquad (5\text{-}1)$$

حيث: n_{slip} تعني سرعة الانزلاق

وإذ نسبت سرعة الانزلاق إلى السرعة التزامنية للآلة نفسها فإنها تعطي معاملاً هاماً ومفيداً جداً عند دراسة الآلات الحثية يسمى معامل الانزلاق Slip ويرمز له بالرمز (S) وتتراوح قيمته في المحركات الصغيرة ما بين ٠,٠١ إلى ٠,٠٢ وقد تصل إلى ٠,٠٠٥ في المحركات الكبيرة في حالة عدم التحميل وعند التحميل يتراوح الانزلاق من ٠,٠٣ إلى ٠,٠٥ ، ويمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$s = \frac{ns - n}{ns} \qquad (6\text{-}1)$$

يلاحظ أن قيمة الانزلاق لا تقل عن الصفر وذلك عندما يدور العضو الدوار بنفس السرعة التزامنية ولا تزيد عن الواحد وذلك عندما يكون العضو الدوار ثابت .

من الممكن حساب سرعة العضو الدوار بدلالة السرعة التزامنية والانزلاق وذلك بعد حل المعادلة (٦ -١) كما يلي:

$$n = ns\,(1 - S) \qquad (7\text{-}1)$$

تردد الجهود والتيارات في العضو الدوار

المحرك الحثي يعمل طبقاً لنظرية الحث الكهرومغناطيسي حيث يتولد الجهد والتيار في العضو الدوار طبقاً لهذا المبدأ كما هو الحال في المحول ، لذلك فإنه أحياناً يسمى محول دوار، الابتدائي هو العضو الثابت والثانوي هو العضو الدوار ولكن لا يشابه المحول من حيث تردد الجهد والتيار في العضو الدوار(الثانوي). فعندما يكون العضو الدوار ثابت فإن تردد التيارات المتولدة فيه هو نفسه تردد التيارات في العضو الثابت (كالمحول تماماً) بينما إذا كان العضو الدوار يدور بالسرعة التزامنية فإن تردد التيارات فيه يكون صفراً.

إذن: ما هو تردد التيارات في العضو الدوار عندما يدور بسرعة أقل من السرعة التزامنية ؟؟

عندما $(n=0)$ فإن $(S=1)$ والتردد $(f_r=f_s)$

وعندما $(n=ns)$ فإن $(S=0)$ والترد د $(f_r=0)$

إذن : عند أي سرعة للعضو الدوار بين الصفر والسرعة التزامنية فإن تردد التيار في العضو الدوار سيتناسب طردياً مع الفرق بين السرعة التزامنية (ns) وسرعة العضو الدوار(n) ، بماأن الانزلاق هو الفرق بين هاتين السرعتين منسوباً إلى السرعة التزامنية (المعادلة ٦ -١) فإنه يمكن التعبير عن تردد التيارات في العضو الدوار بالمعادلة التالية:

أمثلة محلولة :

مثال (١ -١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب ملفاته موصلة على شكل نجمة يغذى من مصدر جهده 240 V وتردده 50 Hz ، فإذا كانت قيمة الانزلاق عند الحمل الكامل 5% احسب ما يلي:

أ) السرعة التزامنية لهذا المحرك

ب) سرعة العضو الدوار عند الحمل الكامل

جـ) تردد التيارات في العضو الدوار عند الحمل الكامل

الحـل:

أ) من المعادلة (١ -١):

$$ns = \frac{120\ f_s}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \quad \text{rpm}$$

ب) من المعادلة (٧ -١):

$$n = ns\ (1 - S) = 1500\ \ (1 - 0.05) = 1425 \quad \text{rpm}$$

جـ) من المعادلة (٨ -١):

$$f_r = S \cdot f_s = 0.05 \times 50 = 2.5 \quad \text{Hz}$$

مثال (٢ -١):

محرك ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب يعمل على مصدر تردده 60 Hz ، وسرعته عند الحمل الكامل 1740 دورة/دقيقة ، احسب سرعة الانزلاق ومعامل الانزلاق عند الحمل الكامل .

الحـل:

أولاً: تحسب السرعة التزامنية من المعادلة (١ -١):

$$ns = \frac{120\ f_s}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \quad \text{rpm}$$

سرعة الانزلاق عند الحمل الكامل تحسب من المعادلة (٥ -١):

$$n_{slip} = ns - n = 1800 - 1740 = 60 \quad \text{rpm}$$

معامل الانزلاق عند الحمل الكامل يحسب من المعادلة (٦ -١):

$$S = \frac{ns - n}{ns} = \frac{1800 - 1740}{1800} = 0.0333$$

مثال(٣ -١):

محرك حثي ذو ستة أقطاب يعمل على مصدر تردده 50 Hz ، القوة الدافعة الكهربائية في العضو الدوار ترددها 2.5 Hz ، احسب معامل الانزلاق وكذلك سرعة العضو الدوار.

الحـل:

معامل الانزلاق يحسب من المعادلة (٨ -١):

$$S = \frac{f_r}{f_s} = \frac{2.5}{50} = 0.05$$

لحساب سرعة العضو الدوار :

أولاً: تحسب السرعة التزامنية من المعادلة (١ -١):

$$ns = \frac{120\ f_s}{p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \quad \text{rpm}$$

ثم تحسب سرعة العضو الدوار من المعادلة (٧ -١):

$$n = ns\,(S - 1) = 1000\ (0.05 - 1) = 950 \quad \text{rpm}$$

أسـئلة و تماريــن

١- لماذا يصنع العضو الثابت أو الدوار من شرائح حديدية؟

٢- ما المقصود بالحث الكهرومغناطيسي؟

٣- ما المقصود بالتيارات الدوامية ؟ وكيف تنشأ؟

٤- ما هي فائدة وجود حلقات الانزلاق؟

٥- ما هي الشروط اللازمة لتوليد مجال مغناطيسي دوار منتظم؟

٦- اشرح كيف يتولد عزم فعال يؤدي إلى دوران العضو الدوار

٧- هل يمكن للعضو الدوار أن تصل سرعته إلى السرعة التزامنية؟

٨- ما هو معامل الانزلاق؟

٩- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو قطبين يغذى من مصدر تردده 60 Hz ، احسب سرعة العضو الدوار إذا كان تردد التيارات في العضو الدوار 2 Hz

١٠- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ثمانية أقطاب يعمل على مصدر تردده 50 Hz ، وسرعته عند الحمل الكامل 716 دورة / دقيقة ، احسب سرعة الانزلاق ومعامل الانزلاق عند الحمل الكامل.

١١- محرك حثي ذو أربعة أقطاب يعمل على مصدر تردده 60 Hz ، القوة الدافعة الكهربائية في العضو الدوار ترددها 2.7 Hz ، احسب معامل الانزلاق وكذلك سرعة العضو الدوار.

١٢- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو قطبين ملفاته موصلة على شكل نجمة يغذى من مصدر جهده 220 V وتردده 60 Hz ، فإذا كانت قيمة الانزلاق عند الحمل الكامل 0.05 احسب ما يلي:

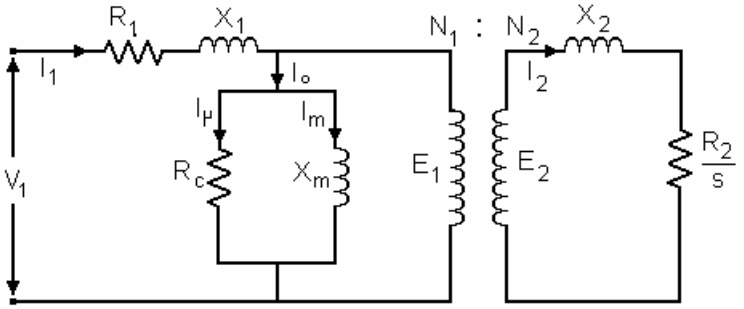
أ) السرعة التزامنية لهذا المحرك

ب) سرعة العضو الدوار عند الحمل الكامل

جـ) تردد التيارات في العضو الدوار عند الحمل الكامل

الفصل الثاني : الدائـرة المكـافئـة

الـدائرة المكـافئـة Equivalent Circuit للمحـرك الحثـي ثلاثـي الأوجـه تشـبه تمامـاً الـدائرة المكـافئـة للمحول ، كما هو موضح في الشكل التالي:



شكل رقم ١٢ -١: الدائرة المكافئة للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

حيث:

R_1, R_2: مقاومة ملفات العضو الثابت والعضو الدوار لكل وجه

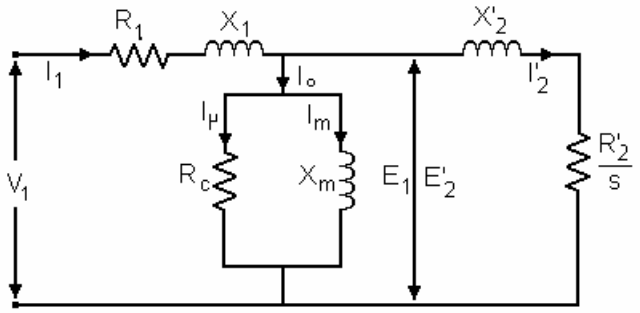
$X_1, X2$: الممانعة الحثية لملفات العضو الثابت والعضو الدوار لكل وجه

R_C: مقاومة تمثل المفاقيد الحديدية

X_m: المفاعلة المغناطيسية

N_1, N_2: عدد اللفات للعضو الثابت والعضو الدوار

ويمكن أن ترسم الدائرة المكافئة بحيث تكون دائرة الثانوي منسوبة إلى الابتدائي للتخلص من الدائرة المغناطيسية كما هو موضح في الشكل التالي:



شكل رقم ١٣ -١: الدائرة المكافئة للمحرك الحثي منسوبة إلى الابتدائي

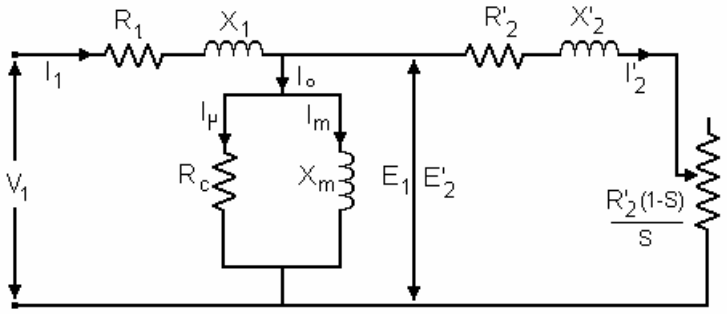
حيث:

$$E'_2 = (N_1 / N_2) E_2$$
$$\frac{R'_2}{S} = \frac{R_2}{S}(N_1 / N_2)^2$$
$$X'_2 = X_2 (N_1 / N_2)^2$$
$$I'_2 = I_2 (N_2 / N_1)$$

كما أن مقاومة ملفات العضو الدوار($\frac{R'_2}{S}$) يمكن تقسيمها إلى مقاومتين كما يلي:

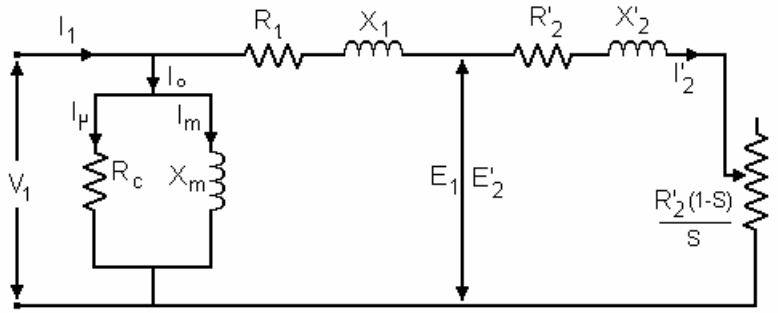
$$\frac{R'_2}{S} = \frac{R'_2}{S} + R'_2 - R'_2$$
$$= R'_2 + \frac{R'_2}{S} - R'_2$$
$$= R'_2 + R'_2\left(\frac{1}{S} - 1\right)$$
$$= R'_2 + R'_2\left(\frac{1 - S}{S}\right)$$

وبالتالي يمكن إعادة رسم الدائرة المكافئة كما يلي:



شكل رقم ١٤ -١: الدائرة المكافئة للمحرك الحثي في وضعها النهائي

ويمكن أيضاً الحصول على الدائرة المكافئة التقريبية عندما نهمل تيار اللاحمل (I_o) وذلك لأن قيمته صغيرة جداً عند مقارنتها بتيار الحمل (I_1). وعلى هذا الأساس يمكن نقل الفرع الممثل للدائرة المغناطيسية إلى جهة جهد الابتدائي(V_1) كما هو موضح في الشكل رقم (١٥ -١).



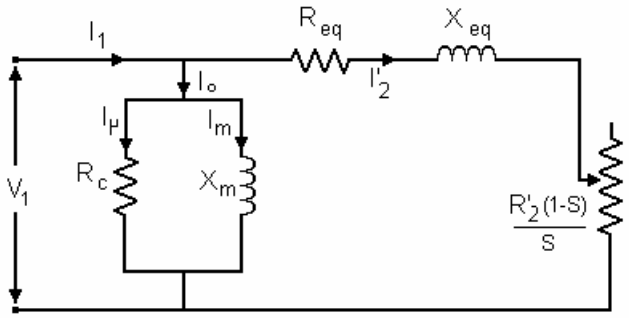
شكل رقم ١٥ -١: الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي

ونتيجة لهذا التقريب يمكن أن نعتبر أن:

$$R_{eq} = R_1 + R_2'$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2'$$

وبالتالي يمكن إعادة رسم الدائرة المكافئة كما في الشكل التالي:



شكل رقم ١٦ -١: الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي

وبهذا التبسيط تصبح الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي مشابهة تماماً للدائرة المكافئة التقريبية للمحول, حيث تعتبر المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ حملاً للمحول ، والقدرة المفقودة في هذه المقاومة تمثل القدرة الميكانيكية الناتجة من المحرك.

يلاحظ أن الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه أعلاه تعبر عن وجه واحد من أوجه المحرك الثلاثة وذلك للتشابه التام بين الأوجه الثلاثة ، فليس هناك ما يدعو إلى تكرارها ثلاث مرات ، ولكن عند إجراء الحسابات على هذه الدائرة يجب أن يؤخذ ذلك في الاعتبار حيث تحتاج بعض الكميات إلى ضربها بعدد الأوجه أو بجذر ثلاثة حسب طريقة توصيل ملفات المحرك.

تعيين ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية

تعتبر الدائرة المكافئة للمحرك الحثي أداةً مفيدةً جداً لتحديد استجابة المحرك عند التغير في الأحمال ، وإذا أردنا تطبيقها على آلة حقيقية فإن ذلك يتطلب تحديد قيم ثوابت الآلة ($R_1, R_2, X_1, X_2, R_c, X_m$). ولكي يتم تحديد قيم هذه الثوابت يتوجب القيام بعدد من الاختيارات في المعمل. هذه الاختبارات مشابهةً تماماً لاختبارات الدائرة المفتوحة والدائرة المقصورة التي تجرى عادةً على المحول.

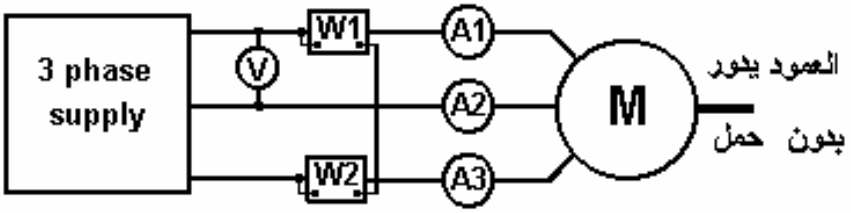
اختبار عدم الحمل No load Test:

في هذا الاختبار يوصل المحرك كما هو موضح في الشكل رقم (١٧ -١) ثم يسلط الجهد المقنن على أطراف المحرك و يترك العضو الدوار يدور بحرية تامة بدون أي حمل ، بعد ذلك تسجل قراءات الأجهزة كما يلي:

$$P = W_1 + W_2$$

$$I_o = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3}$$

مع ملاحظة أن قيم الجهد والتيار المقروءة هي للخط وأن القدرة المقروءة تمثل تقريباً المفاقيد الحديدية (المفاقيد الثابتة).



شكل رقم ١٧ -١: اختبار عدم الحمل للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

حيث إن العضو الدوار يدور بدون حمل فهذا يعني أن سرعة دورانه مساوية تقريباً للسرعة التزامنية مما يعني أن الانزلاق صغير جداً (S<0.001) أو لنقل أنه يساوي صفر تقريباً. وعند التعويض عن قيمة الانزلاق في هذه الحالة في المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ في الدائرة المكافئة نجد أن قيمة هذه المقاومة تصل إلى ما لانهاية($R_2'\left(\frac{1-0}{0}\right)=\infty$) وهذا يعني أن الدائرة المكافئة أصبحت مفتوحة من جهة الثانوي.

ولذلك فإن هذا الاختبار يمكن أن يسمى اختبار الدائرة المفتوحة أسوةً بالمحول. بما أن جهة الثانوي أصبحت مفتوحة فهذا يعني أن تيار الاختبار سيمر من خلال R_c , X_m فقط. لذلك يمكن من نتائج هذه التجربة وبعد إجراء حسابات بسيطة تحديد قيم R_c , X_m كما يلي مع الأخذ بالاعتبار طريقة توصيل ملفات المحرك هل هي على شكل نجمة أو دلتا.

من الدائرة المكافئة في الشكل رقم (١٦ -١):

$$R_c = \frac{V_1}{I_\mu} \quad , \quad X_m = \frac{V_1}{I_m}$$

حيث V_1 هو جهد الوجه

من المخطط الاتجاهي (شكل رقم ١٨ -١) يمكننا إيجاد قيم I_m , I_μ بدلالة I_o كما يلي:

$$I_\mu = I_o Cos\,\theta$$
$$I_m = I_o Sin\,\theta$$

حيث :

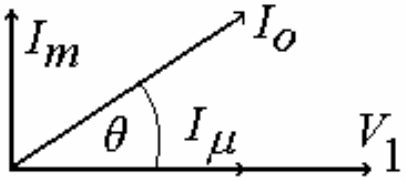
$$Cos\theta = \frac{P}{3V_1 I_o} \qquad (9\text{-}1)$$

$$\theta = Cos^{-1}\left(\frac{P}{3V_1 I_o}\right) \qquad (10\text{-}1)$$

وبالتالي يمكن إيجاد قيم R_c , X_m كما يلي:

$$R_c = \frac{V_1}{I_o Cos\,\theta} \qquad (11 - 1)$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_o Sin\,\theta} \qquad (12 - 1)$$



شكل رقم ١٨ -١: المخطط الاتجاهي في حالة اللاحمل

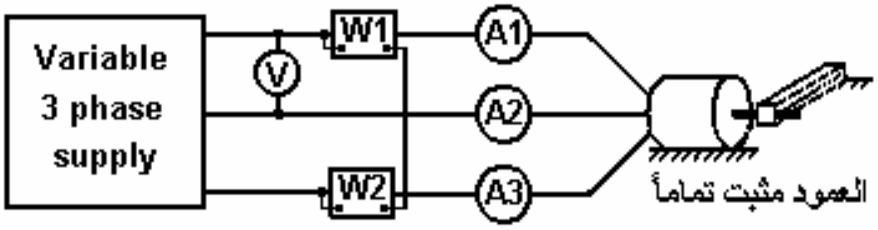
اختبار عدم الحركة Locked Rotor Test:

في هذا الاختبار يوصل المحرك كما هو موضح في الشكل رقم (١٩ -١) ولكن العضو الدوار يمنع من الحركة بأي وسيلة مناسبة ، بعد ذلك يزاد الجهد المسلط على أطراف المحرك تدريجياً حتى يصل التيار المار في ملفات المحرك إلى القيمة المقننة عند الحمل الكامل وذلك لأن توصيل المحرك على الجهد المقنن سوف يتسبب بمرور تيار كبير جداً قد يتلف ملفات المحرك ، بعد ذلك تسجل قراءات الأجهزة كما يلي:

$$P = W_1 + W_2$$

$$I_1 = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3}$$

مع ملاحظة أن قيم الجهد والتيار المقروءة هي للخط وأن القدرة المقروءة تمثل تقريباً المفاقيد النحاسية (المفاقيد المتغيرة).



شكل رقم ١٩ -١: اختبار عدم الحركة للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

حيث أن العضو الدوار ثابت في هذه الحالة فإن ذلك يعني أن الانزلاق مساوي للواحد (S=1) وعند التعويض عن قيمته في المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ في الدائرة المكافئة نجد أن قيمة هذه المقاومة أصبحت صفراً ($R_2'\left(\frac{1-1}{1}\right)=0$) وهذا يعني أن الدائرة المكافئة أصبحت مقصورة من جهة الثانوي ، ولذلك فإن هذا الاختبار يسمى أحياناً اختبار الدائرة المقصورة.

بما أن جهة الثانوي أصبحت مقصورة فهذا يعني أن تيار الاختبار سيمر من خلال R_{eq} , X_{eq} فقط. أي أن ($I_1=I_2'$) ، لذلك يمكن من نتائج هذه التجربة وبعد إجراء حسابات بسيطة تحديد قيم R_{eq} , X_{eq} كما يلي ، مع الأخذ بالاعتبار طريقة توصيل ملفات المحرك هل هي على شكل نجمة أو دلتا.

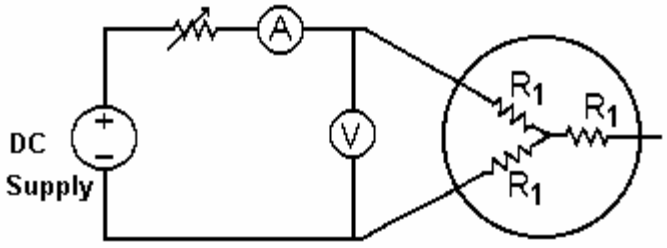
$$R_{eq} = \frac{P}{3I_1^2} \qquad (13-1)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_1}{I_1} \qquad (14-1)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \qquad (15-1)$$

اختبار التيار المستمر DC Test:

هذا الاختبار يجرى من أجل قياس مقاومة ملفات العضو الثابت R_1 وذلك بتوصيل ملفات المحرك كما هو موضح في الشكل رقم (٢٠ -١).



شكل رقم ٢٠ -١: دائرة قياس مقاومة العضو الثابت

في هذا الاختبار يزاد الجهد تدريجياً حتى يصل التيار المار في ملفات المحرك إلى القيمة المقننة وذلك لكي ترتفع درجة حرارة الملفات كما هو الحال في وضع التشغيل الطبيعي ، وذلك لأن المقاومة تتغير بتغير درجة الحرارة ثم تسجل بعد ذلك قيمة الجهد والتيار وتحسب المقاومة كما يلي:

$$2\,R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2\,I_{DC}} \qquad (16 - 1)$$

ويفضل أن يؤخذ تأثير الخاصية القشرية skin effect بالاعتبار.

أمثلة محلولة

مثال (٤ -١):

نتائج تجربتي عدم الحمل وعدم الحركة لمحرك حثي ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل نجمة كما يلي:

تجربة عدم الحمل	تجربة عدم الحركة
$V_L = 220$ V	$V_L = 30$ V
P = 600 W	P = 1500 W
$I_L = 20$ A	$I_L = 50$ A

احسب مكونات الدائرة المكافئة التقريبية لهذا المحرك.

الحـل:

أولاً: من نتائج تجربة عدم الحمل نستطيع حساب قيم R_c , X_m كما يلي:

بماأن ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة

إذن :

$$V_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \quad V$$
$$I_o = I_L = 20 \quad A$$

باستخدام المعادلات من (٩ -١) إلى (١٢ -١) نجري الحسابات التالية:

$$Cos\,\theta = \frac{P}{3V_1 I_o} = \frac{600}{3\times 127\times 20} = 0.0787$$
$$\theta = Cos^{-1}(0.0787) = 85.48^o$$
$$R_c = \frac{V_1}{I_o Cos\,\theta} = \frac{127}{20\times 0.0787} = 80.68 \quad \Omega$$
$$X_m = \frac{V_1}{I_o Sin\,\theta} = \frac{127}{20\,Sin(85.48)} = 6.37 \quad \Omega$$

ثانياً: من نتائج تجربة عدم الحركة نستطيع حساب قيم R_{eq} , X_{eq} كما يلي:
بماأن ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة
إذن :

$$V_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32 \quad V$$
$$I_1 = I_L = 50 \quad A$$

باستخدام المعادلات من (١٣ -١) إلى (١٥ -١) نجري الحسابات التالية:

$$R_{eq} = \frac{P}{3I_2'^2} = \frac{1500}{3\times 50^2} = 0.2 \quad \Omega$$
$$Z_{eq} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{17.32}{50} = 0.3464 \quad \Omega$$
$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$
$$= \sqrt{(0.3464)^2 - (0.2)^2} = 0.2828 \quad \Omega$$

مثال (٥ -١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل دلتا ، أجريت له اختبارات تحديد عناصر الدائرة المكافئة فأعطى النتائج التالية:

اختبار التيار المستمر	اختبار الدائرة المفتوحة	اختبار الدائرة المقصورة
$V_{DC} = 19$ V	$V_L = 127$ V	$V_L = 39.3$ V
$I_{DC} = 20$ A	$I_L = 7.53$ A	$I_L = 34.64$ A
	P = 179 W	P = 1265 W

احسب مكونات الدائرة المكافئة إذا كان $X_1 = X_2'$

الحـل:

أولاً: من اختبار التيار المستمر

في حالة اختبار التيار المستمر توصل الملفات على شكل نجمة وتحسب قيمة R_1 من المعادلة (١٦ -١) كما يلي:

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} = \frac{19}{2\times 20} = 0.475 \quad \Omega$$

ثانياً: من نتائج اختبار الدائرة المفتوحة (عدم الحمل) نستطيع حساب قيم R_c , X_m كما يلي:
بماأن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا
إذن :

$$V_1 = V_L = 127 \quad \text{V}$$
$$\text{I}_\text{o} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{7.53}{\sqrt{3}} = 4.347 \quad \text{A}$$

باستخدام المعادلات من (٩ -١) إلى (١٢ -١) نجري الحسابات التالية:

$$Cos\theta = \frac{P}{3V_1 I_o} = \frac{179}{3\times127\times4.347} = 0.108$$
$$\theta = Cos^{-1}(0.108) = 83.8^o$$
$$R_c = \frac{V_1}{I_o Cos\theta} = \frac{127}{4.347\times0.108} = 270.78 \quad \Omega$$
$$\text{X}_\text{m} = \frac{V_1}{I_o Sin\theta} = \frac{127}{4.347 Sin(83.8)} = 29.435 \quad \Omega$$

ثالثاً: من نتائج اختبار الدائرة المقصورة (عدم الحركة) نستطيع حساب قيم R_{eq} , X_{eq} كما يلي:
بماأن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا
إذن :

$$V_1 = V_L = 39.3 \quad \text{V}$$
$$\text{I}_1 = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{34.64}{\sqrt{3}} = 20 \quad \text{A}$$

باستخدام المعادلات من (١٣ -١) إلى (١٥ -١) نجري الحسابات التالية:

$$R_{eq} = \frac{P}{3I_2'^2} = \frac{1265}{3\times 20^2} = 1.054 \quad \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{39.3}{20} = 1.965 \quad \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

$$= \sqrt{(1.965)^2 - (1.054)^2} = 1.658 \quad \Omega$$

بما أن:

$$R_{eq} = R_1 + R_2'$$

$$R_1 = 0.475 \quad \Omega$$

إذن:

$$R_2' = R_{eq} - R_1 = 1.054 - 0.475 = 0.579 \quad \Omega$$

بما أن:

$$X_1 = X_2'$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2'$$

إذن:

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{eq}}{2} = \frac{1.658}{2} = 0.829 \quad \Omega$$

أسـئلة و تماريــن

١- لماذا اختبار عدم الحمل يسمى أحياناً اختبار الدائرة المفتوحة؟
٢- لماذا اختبار عدم الحركة يسمى أحياناً اختبار الدائرة المقصورة ؟
٣- لماذا تحدد X_m , R_c باستخدام اختبار عدم الحمل وليس اختبار عدم الحركة؟
٤- لماذا تحدد X_{eq} , R_{eq} باستخدام اختبار عدم الحركة وليس اختبار عدم الحمل؟
٥- لماذا يسلط الجهد تدريجياً على المحرك في اختبار عدم الحركة؟؟
٦- ما هي الخاصية القشرية skin effect ؟

٧- محرك حثي ثلاثي الأوجه 5 HP ذو أربعة أقطاب ، عند إجراء تجربتي اللاحمل والقصر له أعطى النتائج التالية:
تجربة عدم الحمل 220 V, 3.86 A, 550 W
تجربة القصر 35 V, 12.9 A, 490 W
فإذا كانت ملفات المحرك موصله على شكل دلتا احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا المحرك

٨- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته 29.84 KW ملفاته موصلة على شكل Δ عند اختباره أعطى النتائج التالية :
تجربة عدم الحمل 415 V, 21 A, 1250 W
تجربة عدم الحركة 100 V, 45 A, 2730 W
أحسب مكونات الدائرة المكافئة التقريبية لهذا المحرك.

٩- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته 20 HP ملفاته موصلة على شكل Y عند إجراء تجربتي اللاحمل والقصر له أعطى النتائج التالية :
تجربة اللاحمل 380 V, 16.5 A, 1050 W
تجربة القصر 86 V, 32 A, 1854 W
احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا المحرك إذا كان X1 = X`2 & R1 = R`2

الفصل الثالث : القـدرة و العـزم

أولاً : القدرة في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

عادةً ما يوصف المحـرك الحثي ثلاثي الأوجه بأنـه محول دوار ، الدخل قدره كهربائيـة في شـكل جهود وتيارات ثلاثية الأوجه والخرج هو قدره كهربائية تؤخذ من ملفات الثانوي (في المحول) ، بينما في المحـرك الحثي تكون ملفات الثانوي (العضو الدوار) مقصورة و بالتالي لا تعطي قدره كهربائية و إنما تعطي قدره ميكانيكية تظهر على العمود. العلاقة بين القدرة الكهربائية الداخلة و القدرة الميكانيكية الخارجة موضحه في الشكل رقم (٢١ -١) الذي يصف كيفية انسياب القدرة داخل المحرك.

القـدرة الداخلـة إلى العضـو الثابـت تعتمـد قيمتهـا علـى الحمـل المحمـل بـه المحـرك و المتمثـل بالتيـار و معامل القدرة .وتعطى من المعادلة التالية:

$$P_1 = 3V_1 I_1 Cos\theta \qquad (17-1)$$

حيث:

V_1: جهد الوجه للعضو الثابت

I_1: تيار الوجه للعضو الثابت

θ: الزاوية بين الجهد والتيار وجيب تمامها هو معامل القدرة

هذه القدرة الداخلة P_1 سيفقد منها جزء في مقاومة ملفات العضو الثابت R_1 على شـكل حرارة وتسمى مفاقيد نحاسية في العضو الثابت و تحسب من المعادلة التالية:

$$P_{Cu1} = 3I_1^2 R_1 \qquad (18-1)$$

الجزء المتبقي من القدرة الداخلة P_1 سيفقد جزء منها في القلب الحديدي للعضو الثابت وذلك بسبب وجود التيارات الدوامية وظاهرة التخلف المغناطيسي وتسمى مفاقيد حديدية P_{Core} ، هذه القدرة المفقودة

تمثلها المقاومة R_c في الدائرة المكافئة. مجموع هذان النوعان من المفاقيد في العضو الثابت (المفاقيد النحاسية في R_1 و المفاقيد الحديدية في R_c) تسمى مفاقيد العضو الثابت ويرمز لها بالرمز P_{St}.

$$P_{St} = P_{Cu1} + P_{Core} \qquad (19-1)$$

الجزء المتبقي من القدرة الداخلة P_1 سينتقل عبر الثغرة الهوائية إلى العضو الدوار وتسمى القدرة المنتقلة عبر الثغرة الهوائية من العضو الثابت إلى العضو الدوار ويرمز لها بالرمز P_g.

$$P_g = P_1 - P_{St} \qquad (20-1)$$

ويمكن حسابها أيضا من المعادلة التالية:

$$P_g = 3 I_2'^2 \frac{R_2'}{S} \qquad (21-1)$$

هذه القدرة الداخلة إلى العضو الدوار P_g سيفقد جزء منها في مقاومة ملفات العضو الدوار على شكل حرارة و تسمى مفاقيد نحاسية في العضو الدوار وتحسب من المعادلة التالية:

$$P_{Cu\,2} = 3 I_2'^2 R_2' \qquad (22-1)$$

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

$$P_m = Pg - P_{Cu2} \qquad (23-1)$$

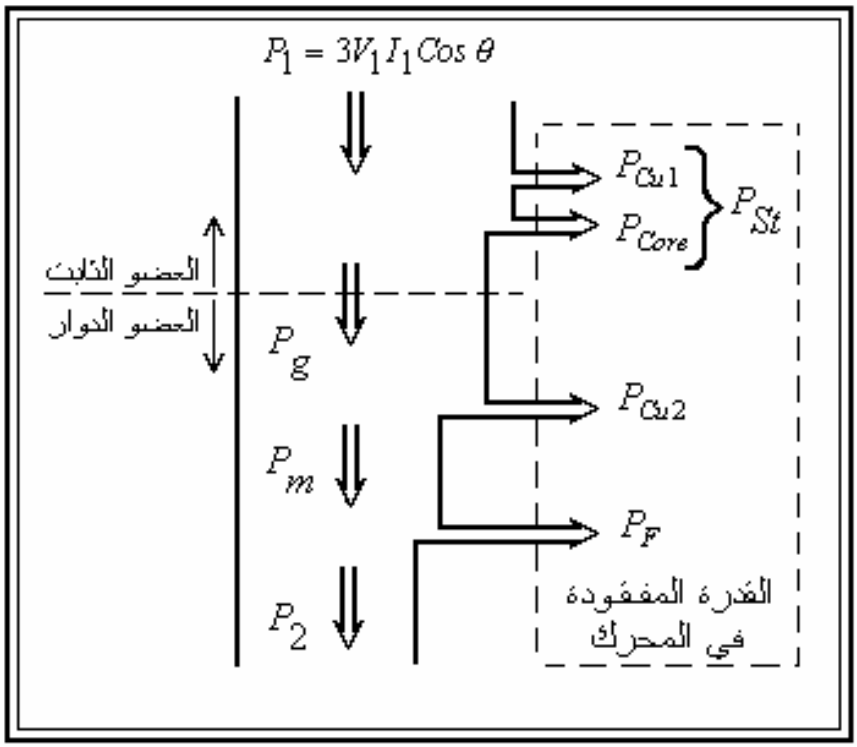
المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ في الدائرة المكافئة هي التي تمثل القدرة الميكانيكية المتحولة وبالتالي يمكن حساب القدرة الميكانيكية المتحولة أيضا من المعادلة التالية:

$$P_m = 3 I_2'^2 R_2' \frac{(1-S)}{S} \qquad (24-1)$$

القدرة الميكانيكية المتحولة P_m سيفقد جزء منها بسب الاحتكاك الذي يتعرض له العضو الدوار مع الهواء و حوامل العمود. مفاقيد الاحتكاك هذه يرمز لها بالرمز P_F. وبالتالي فإن القدرة الميكانيكية الخارجة P_2 هي الجزء المتبقي من القدرة الميكانيكية المتحولة بعد خصم القدرة المفقودة بسب الاحتكاك كما يلي:

$$P_2 = P_m - P_F \qquad (25 - 1)$$

الشكل رقم (٢١ -١) يلخص كيفية انتقال القدرة داخل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه.



شكل رقم ٢١ -١: مخطط سريان القدرة داخل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

يلاحظ أن المفاقيد الحديدية في العضو الدوار مهملة وذلك لقلتها. ما هو سبب قلة المفاقيد الحديدية في العضو الدوار ؟

من المعادلات (٢١ -١)، (٢٢ -١)، (٢٤ -١) يمكن لنا إجراء المقارنة التالية:

P_g	P_m	P_{Cu2}
$3I_2^{'2}\ \frac{R_2^{'}}{S}$	$3I_2^{'2}\ R_2^{'}\frac{(1-S)}{S}$	$3\ I_2^{'2}\ R_2^{'}$

نلاحظ من المقارنة أعلاه أنه عند ضرب P_g بالانزلاق S فإننا نحصل على P_{Cu2}

إذن:

$$P_{Cu\ 2}\ =\ SP_g \qquad (26\ -1)$$

وكذلك عند ضرب P_g بالمعامل (1-S) فإننا نحصل على P_m

إذن:

$$P_m\ =\ (1\ -\ S)\,P_g \qquad (27\ -1)$$

يتضح من هذا أن معامل الانزلاق S يلعب دوراً هاماً جداً في تحديد نسبة المفاقيد النحاسية P_{Cu2} في العضو الدوار ، فعند زيادة الانزلاق تزداد المفاقيد النحاسية في العضو الدوار وبالتالي يجب أن يكون الانزلاق صغيراً بقدر الإمكان لكي تقل المفاقيد النحاسية في العضو الدوار وبالتالي تزداد كفاءة المحرك.

أمثلة محلولة:

مثال(٦ -١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ستة أقطاب يعمل على مصدر جهده 440 V وتردده 60 Hz فإذا كانت القدرة الداخلة إلى العضو الدوار 80 kw وتردد التيار في العضو الدوار 1.67 Hz

احسب ما يلي:

أ) الانزلاق

ب) سرعة العضو الدوار

جـ) القدرة الميكانيكية المتحولة

د) القدرة المفقودة في العضو الدوار

هـ) مقاومة ملفات العضو الدوار لكل وجه إذا كان التيار المار في ملفات العضو الدوار 65 A

الحـل:

أ) من المعادلة (٨ -١)

$$S = \frac{F_r}{F_s} = \frac{1.67}{50} = 0.0334$$

ب) نحسب أولاً السرعة التزامنية من المعادلة (١ -١):

$$ns = \frac{120\ f_s}{p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \quad \text{rpm}$$

ثم نوجد سرعة العضو الدوار من المعادلة (٧ -١):

$$n = ns(1 - S) = 1000\ (1 - 0.0334\ ) = 966.6 \quad \text{rpm}$$

جـ) من المعادلة (٢٧ -١)

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

د) من المعادلة (٢٦ -١)

$$P_{Cu\,2} = SP_g = 0.0334 \times 80 = 2.67 \quad \text{kw}$$

هـ) من المعادلة (٢٢ -١) نستطيع إيجاد مقاومة ملفات العضو الدوار كما يلي:

$$R_2' = \frac{P_{Cu\,2}}{3I_2'^2} = \frac{2670}{3 \times (65)^2} = 0.21 \quad \Omega$$

مثال (٧ -١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ثمانية أقطاب يتغذى من مصدر تردده 50Hz ويدور بسرعة 732 rpm فإذا كانت القدرة الداخلة إلى المحرك 40 kw و مفاقيد العضو الثابت 1 kw و المفاقيد الميكانيكية بسبب الاحتكاك 2 kw احسب ما يلي:

أ) معامل الانزلاق

ب) القدرة الميكانيكية الخارجة بالحصان

جـ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار

د) كفاءة المحرك

الحـل:

أ) نحسب أولاً السرعة التزامنية من المعادلة (١ -١):

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

ثم نحسب الانزلاق من المعادلة (٦ -١):

$$S = \frac{ns - n}{ns} = \frac{750 - 732}{750} = 0.024$$

ب) بتتبع مسار انتقال القدرة داخل المحرك في الشكل (٢١ -١) نستطيع إيجاد القدرة الميكانيكية الخارجة كما يلي:

$$P_g = P_1 - P_{St} = 40 - 1 = 39 \quad \text{kw}$$

$$p_m = (1 - S)\,p_g = (1 - 0.024) \times 39 = 38.064 \quad \text{kw}$$

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

$$P_2(\text{hp}) = \frac{36.064}{0.746} = 48.343 \quad \text{hp}$$

جـ) من المعادلة (٢٦ -١):

$$P_{Cu\,2} = SP_g = 0.024 \times 39 = 0.936 \quad \text{kw}$$

د) كفاءة المحرك تحسب كما يلي:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{36.064}{40} \times 100 = 90.16\ \%$$

ثانياً: العـزم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

العـزم أو عـزم الـدوران (Torque) هـو القـوة المـؤثرة تـأثيراً إلتوائيـاً على جسـم مـا فينـتج عنهـا دوران ذلـك الجسم حول مركزه ، ويقاس بوحدة نيوتن متر Nm ، هذا هو التعريف العام للعزم.

أمـا العـزم الـذي يـؤثر علـى العمـود في المحـرك الحثـي ثلاثـي الأوجـه فهـو حاصـل قسـمة القـدرة الميكانيكية المتحولة P_m على السرعة الزاوية لدوران العمود طبقاً للمعادلة التالية:

$$T = \frac{P_m}{\omega} \qquad \text{Nm} \qquad (28-1)$$

حيث ω هي السرعة الزاوية للعمود.

وحيث أن السرعة الزاوية للعمود متغيرة بتغير الحمل ، لـذلك يفضـل اسـتخدام السـرعة التزامنيـة الزاويـة بـدلاً منهـا ، ولكـن نسـتخدم معهـا القـدرة المنتقلـة خـلال الثغـرة الهوائيـة P_g بـدلاً مـن اسـتخدام القـدرة الميكانيكية المتحولة P_m طبقاً للمعادلة التالية:

$$T = \frac{P_g}{\omega_s} \qquad \text{Nm} \qquad (29-1)$$

حيث ω_s هي السرعة الزاوية للمجال المغناطيسي الدوار وتحسب من المعادلة التالية:

$$\omega_s = \frac{2\pi\, ns}{60} \qquad \text{rad/sec.} \qquad (30-1)$$

بـالرجوع إلى المعادلـة رقـم (٢١ -١) والمعادلـة (٣٠ -١) والتعـويض عنهمـا في المعادلـة (٢٩ -١) يمكـن أن نعبر عن العزم كما يلي:

$$T = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{3 I_2'^2 R_2' / S}{2\pi\ ns\ / 60}$$

وبعد قليل من الترتيب تصبح المعادلة السابقة كما يلي:

$$T = K \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{S} \qquad \text{Nm} \qquad (31-1)$$

حيث:

$$K = \frac{3\times 60}{2\pi\ ns} \qquad (32-1)$$

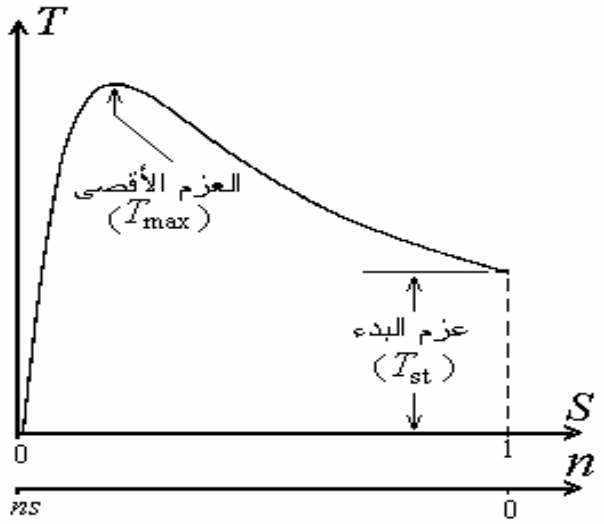
بالرجوع إلى الدائرة المكافئة التقريبية في الشكل (١٥ -١) يمكن أن نوجد التيار $I_2^{'}$ كما يلي:

$$I_2^{'} = \frac{V_1}{Z_{eq}} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2^{'}/S)^2 + X_{eq}^2}} \qquad (33 - 1)$$

بالتعويض عن قيمة التيار $I_2^{'}$ في المعادلة رقم (٣١ -١) يصبح العزم كما يلي:

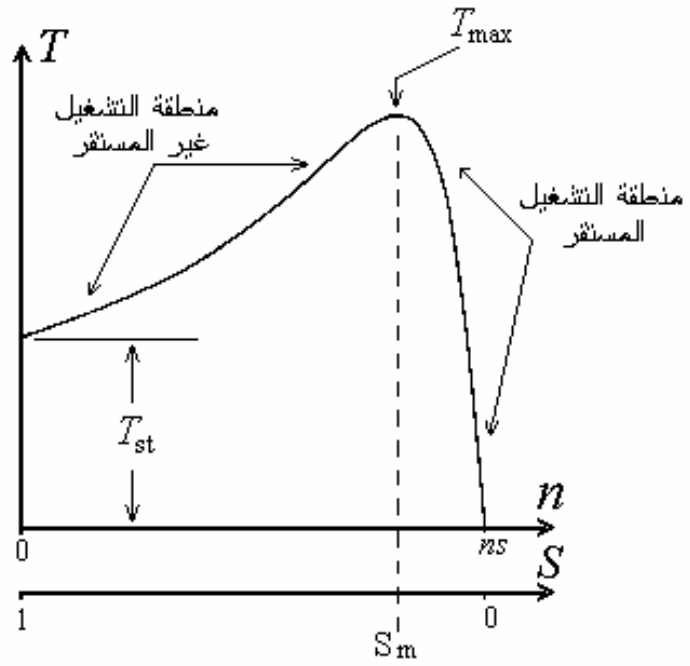
$$T = K \cdot \frac{V_1^{\,2}}{(R_1 + R_2^{'}/S)^2 + X_{eq}^2} \cdot \frac{R_2^{'}}{S} \qquad (34 - 1)$$

هذه المعادلة (٣٤ -١) تمثل العلاقة بين الانزلاق والعزم ومنها يمكن حساب العزم عند أي قيمة للانزلاق. عند رسم العلاقة بين (العزم/الانزلاق) في المعادلة (٣٤ -١) فإننا نحصل على منحنى مشابه للمنحنى الموضح في الشكل التالي:



شكل رقم ٢٢ -١: العلاقة بين (العزم/الانزلاق) أو (العزم /السرعة)

يلاحظ في المنحنى أعلاه أن محور الانزلاق في الوضع الطبيعي بينما محور السرعة معكوس ، لذلك يفضل إعادة رسم المنحنى معكوساً لكي يتناسب مع محور السرعة كما هو موضح في الشكل التالي:



شكل رقم ٢٣ -١: العلاقة بين (العزم/الانزلاق) أو (العزم /السرعة)

منحنى (السرعة/العزم) الموضح في الشكل رقم (٢٣ -١) ينقسم إلى منطقتين: الأولى منطقة التشغيل غير المستقر وهي المنطقة التي تسبق موضع العزم الأقصى ، في هذه المنطقة لا يستطيع المحرك إدارة أي حمل مهما كان وإذا حدث أن حمل المحرك في هذه المنطقة فإنه سوف يتباطئ حتى يتوقف عن الدوران.
المنطقة الأخرى هي منطقة التشغيل المستقر وهي المنطقة التي بعد موضع العزم الأقصى ، في هذه المنطقة يستطيع المحرك إدارة الحمل المقنن له ، وعادةً 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 ينصح في هذه الحالة بدء تشغيل المحرك بحمل خفيف وبعد أن يصل إلى منطقة التشغيل المستقر تضاف بقية الأحمال.

التحكم في موضع العزم الأقصى:

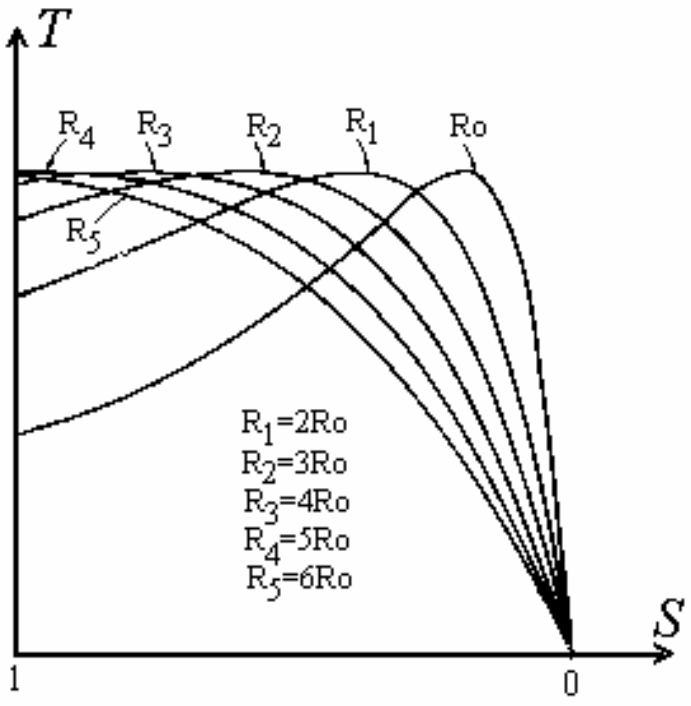
معادلة العزم (٣٤ -١) تعتبر دالة رياضية بدلالة الانزلاق (S) ، القيمة العظمى لها (T_{max}) يتغير موضعها بتغير ثوابت الدائرة المكافئة الداخلة فيها ، وإذا أردنا إيجاد قيمة الانزلاق الذي تتحقق عنده القيمة العظمى لهذه الدالة فإن ذلك ممكن ، وذلك بعد مفاضلتها ثم مساواتها بالصفر كما يلي :
قبل إجراء عملية التفاضل يفضل إهمال معاوقة العضو الثابت للتبسيط لتصبح المعادلة كما يلي:

$$T(S) = K \cdot \frac{V_1^2}{(R_2'/S)^2 + X_2'^2} \cdot \frac{R_2'}{S} \qquad (35 - 1)$$

بعد مفاضلة المعادلة (٣٥ -١) بالنسبة للانزلاق ثم مساواتها بالصفر نحصل على قيمة الانزلاق الذي يتحقق عنده العزم الأقصى للمحرك كما يلي:

$$S_m = \frac{R_2'}{X_2'} \qquad (36 - 1)$$

إذن: موضع العزم الأقصى (T_{max}) يمكن أن يتغير وذلك بتغير النسبة (R_2'/X_2')، ويمكن تحقيق ذلك عملياً بإضافة مقاومة موصله على التوالي مع ملفات العضو الدوار الملفوف (ذو حلقات الانزلاق) وبالتالي يتغير موضع العزم الأقصى للمحرك بتغيير قيمة S_m كما هو موضح في الشكل التالي:



شكل رقم ٢٤ -١: تأثير تغير مقاومة العضو الدوار على موضع العزم الأقصى

ويمكن أيضا من المعادلة (٣٥ -١) حساب قيمة العزم الأقصى للمحرك وذلك عندما ننقل موضع العزم الأقصى إلى لحظة البدء أي أن ($S_m = 1$ & $R_2' = X_2'$) فتصبح المعادلة كما يلي:

$$T_{\max} = K \cdot \frac{V_1^2}{2X_2'} \qquad (37\text{-}1)$$

حساب عزم البدء:

يلاحظ من الشكل رقم (٢٤ -١) أن عزم البدء يزداد كلما زادت مقاومة ملفات العضو الدوار، أي أنه يمكن التحكم بقيمة عزم البدء وذلك بتغيير قيمة مقاومة ملفات العضو الدوار R_2' وذلك بإضافة مقاومة موصلة على التوالي مع ملفات العضو الدوار كما هو واضح من المنحنيات في الشكل رقم (٢٤ -١). أما قيمة عزم البدء فيمكن إيجادها مباشرة من المعادلة (٣٤ -١) عندما يكون ($S = 1$) كما يلي:

$$T_{Start} = K \cdot \frac{V_1^2}{(R_1 + R_2')^2 + X_{eq}^2} \cdot R_2' \qquad (38\text{-}1)$$

أمثلة محلولة:

مثال (٨ -١):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل دلتا يتغذى من مصدر جهده 240 V عناصر الدائرة المكافئة له كما يلي:

$R_1 = 0.4\ \Omega$ $\qquad$ $R_2' = 0.6\ \Omega$

$X_1 = 1.0\ \Omega$ $\qquad$ $X_2' = 1.0\ \Omega$

فإذا كانت السرعة التزامنية لهذا المحرك 1800 rpm وسرعة العضو الدوار عند الحمل الكامل 1710 rpm، احسب ما يلي:

أ) تيار الحمل الكامل

ب) عزم الحمل الكامل

جـ) تيار البدء

د) عزم البدء

هـ) أقصى عزم للمحرك وعند أي انزلاق يحدث

الحـل:

بماأن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا فإن:

$$V_1 = V_L = 240 \quad V$$

أ) لحساب تيار الحمل الكامل أو عزم الحمل الكامل يجب أولاً أن نحسب الانـزلاق الـذي يحـدث عنـده الحمل الكامل كما يلي:

$$S = \frac{ns - n}{ns} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$$

في الـدائرة المكافئـة التقريبيـة يعتبـر أن $I_1 \approx I_2'$ وبالتـالي يمكـن حسـاب تيـار الحمـل الكامـل مـن المعادلة (٣٣ -١) كما يلي:

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

$$= \frac{240}{\sqrt{(0.4 + 0.6/0.05)^2 + (1+1)^2}} = 19.11 \quad A$$

ب) عزم الحمل الكامل يحسب بعد إيجاد التيار من المعادلة (٣١ -١) كما يلي:

$$K = \frac{3 \times 60}{2\pi\, ns} = \frac{3 \times 60}{2\pi \times 1800} = 0.0159$$

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

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

جـ) تيار البدء يحسب من لمعادلة (٣٣ -١) عندما S=1 كما يلي:

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

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

د) عزم البدء يحسب مباشرة من المعادلة (٣٨ -١) أو باستخدام المعادلة (٣١ -١) بعد التعويض عن قيمة تيار البدء في الفقرة (جـ) والتعويض عن الانزلاق بالواحد كما يلي:

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

$$= 0.0159 \times (107.33)^2 \times 0.6 = 109.9 \text{ Nm}$$

هـ) العزم الأقصى يحسب مباشرة من المعادلة (٣٧ -١) ، أما الانزلاق الذي يحدث عنده هذا العزم فيحسب من المعادلة (٣٦ -١) كما يلي:

$$T_{\max} = K \cdot \frac{V_1^2}{2X_2'} = 0.0159 \times \frac{(240)^2}{2 \times 1} = 457.92 \text{ Nm}$$

$$S_m = \frac{R_2'}{X_2'} = \frac{0.6}{1} = 0.6$$

أسـئلة و تماريــن

١- هل زيادة أو نقص معامل الانزلاق يؤثر على كفاءة المحرك؟ كيف ذلك؟
٢- لماذا المفاقيد الحديدية في العضو الدوار مهملة ؟
٣- هل زيادة المفاقيد النحاسية في العضو الدوار يؤثر على سرعة المحرك؟ كيف ذلك؟
٤- ما لمقصود بعزم الدوران Torque ؟
٥- ما لمقصود بالسرعة الزاوية؟
٦- كيف يمكن التحكم في موضع العزم الأقصى للمحرك؟
٧- كيف يمكن التحكم في عزم البدء؟
٨- هل التحكم في موضع العزم الأقصى يؤثر على كفاءة المحرك؟ كيف ذلك؟

٩- محرك حثي ثلاثي الأوجه سرعته التزامنية 1000 rpm يعطي قدره ميكانيكية متحولة قدرها 5 hp عندما تكون سرعة العضو الدوار 935 rpm ، احسب القدرة الداخلة إلى هذا المحرك إذا كانت مفقودات العضو الثابت 400 w.

١٠- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ستة أقطاب يتغذى من مصدر جهده 500 V وتردده 60 Hz ، يعطي قدره ميكانيكية خارجة قدرها 20 hp عندما تكون سرعته 1140 rpm ، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك 1 hp ، احسب ما يلي:
أ) معامل الانزلاق
ب) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار
جـ) القدرة الداخلة إلى المحرك إذا كانت مفاقيد العضو الثابت 1500 W
د) تيار الخط الداخل إلى المحرك إذا كان معامل القدرة 0.86

١١- إذا كانت القدرة الكهربائية الداخلة إلى محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب هي 200 KW عندما تكون سرعته 1710 rpm ويتغذى على مصدر جهده 450 V وتردده 60 Hz فإذا كانت مفاقيد العضو الثابت 3 KW و المفاقيد الميكانيكية 6 KW، احسب ما يلي:

أ) معامل الانزلاق

ب) القدرة الميكانيكية المتحولة

جـ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار

د) كفاءة المحرك

١٢- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب يعمل على مصدر جهده 220 V وتردده 50 Hz ، سرعة المحرك 1440 rpm عند معامل قدره 0.8 متخلف ، القدرة الخارجة منه 10.8 KW ، فإذا كانت مفاقيد العضو الثابت 1060 W و المفاقيد الميكانيكية 390 W احسب ما يلي:

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار .

ب) تردد التيارات في العضو الدوار .

جـ) تيار الخط .

د) كفاءة المحرك

١٣- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب يعمل على مصدر جهده 220 V وتردده 60 Hz ، سرعة المحرك 1710 rpm عند معامل قدره 0.83 متخلف ، القدرة الخارجة منه 11 KW ، فإذا كانت مفاقيد العضو الثابت 1100 W و المفاقيد الميكانيكية 420 W احسب ما يلي:

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار

ب) تردد التيارات في العضو الدوار

جـ) تيار الخط

١٤- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ثمانية أقطاب يعمل على مصدر جهده 380 V وتردده 60 Hz، فإذا كانت سرعة المحرك عند الحمل الكامل 864 rpm ، القدرة الداخلة إليه 10 KW، وكانت مفاقيد العضو الثابت 600 W و المفاقيد الميكانيكية 350 W احسب ما يلي:

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار .

ب) كفاءة المحرك .

جـ) عزم المحرك عند الحمل الكامل .

١٥- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب يعمل على مصدر جهده 380 V وتردده 60 Hz ، عناصر الدائرة المكافئة لهذا المحرك كما يلي:

$R_1 = 0.12\ \Omega$ $\quad$ $R`_2 = 0.16\ \Omega$

$X_1 = 0.45\ \Omega$ $\quad$ $X`_2 = 0.52\ \Omega$

فإذا كانت ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة احسب ما يلي:

أ) تيار البدء .

ب) عزم البدء .

جـ) العزم الأقصى للمحرك وعند أي انزلاق .

د) كم عزم البدء عند إضافة مقاومة قيمتها 1 Ω الى كل وجه من أوجه العضو الدوار

١٦- محرك حثي ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل دلتا يتغذى من مصدر جهده 220 V ، عناصر الدائرة المكافئة له كما يلي:

$R1 = 0.4\ \Omega$, $R2' = 0.6\ \Omega$

$X1 = 0.82\ \Omega$, $X2' = 0.86\ \Omega$

فإذا كانت السرعة التزامنية لهذا المحرك 1500 rpm وسرعة العضو الدوار عند الحمل الكامل 1440 rpm ، احسب ما يلي:

أ) عزم الحمل الكامل

ب) عزم البدء

١٧- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب يعمل على مصدر جهده 380 V وتردده 60 Hz ، عناصر الدائرة المكافئة لهذا المحرك كما يلي:

$R_1 = 0.12\ \Omega$ $\quad$ $R`_2 = 0.16\ \Omega$

$X_1 = 0.45\ \Omega$ $\quad$ $X`_2 = 0.52\ \Omega$

فإذا كانت ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة احسب ما يلي:

أ) تيار البدء

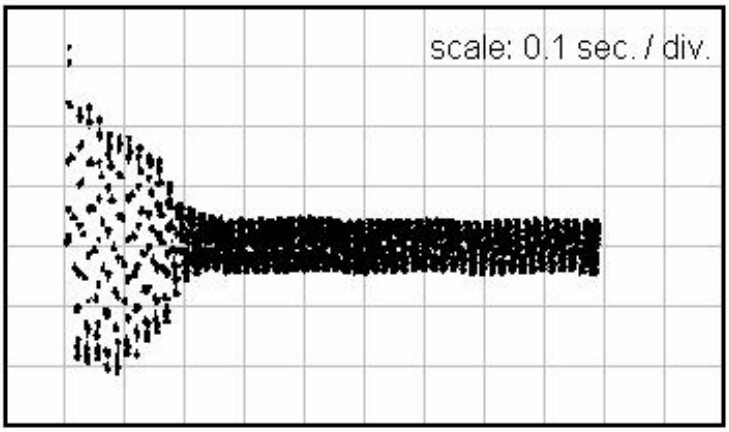
ب) عزم البدء

جـ) العزم الأقصى للمحرك وعند أي انزلاق

الفصل الرابع : طرق بدء الحركة والتحكم في السرعة

طرق بدء الحركة

بالرجوع إلى الدائرة المكافئة نجد أن المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ تعتمد على قيمة الانزلاق ، وحيث إن قيمة الانزلاق تكون مساوية للواحد عند بدء تشغيل المحرك ، فهذا يعني أن المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ أصبحت مقصورة عند البدء لأن ($R_2'\left(\frac{1-1}{1}\right)=0$) وهذا يعني أن تيار البدء أصبح عالي جداً. (تيار البدء عادةً يتراوح من ٦إلى ٨ أضعاف تيار الحمل الكامل) ،انظر الشكل رقم (٢٥ -١).



شكل رقم ٢٥ -١ : تيار البدء لمحرك صغير (الصورة بواسطة الأوسيلسكوب)

هذا التيار العالي عند البدء يتسبب في وجود بعض المشاكل مثل:

١- رفع درجة حرارة ملفات المحرك مما يؤدي مع التكرار إلى انهيار عزلها .

٢- التأثير على وسائل توصيل الكهرباء إلى المحرك كالكيابل والقواطع وأجهزة الحماية .

٣- حدوث هبوط في جهد الأجهزة المشتركة مع المحرك في نفس الخط .

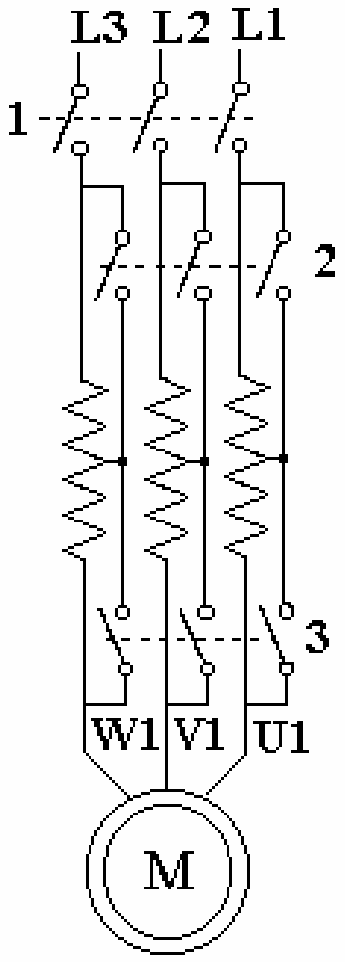
لذلك لابد من اتخاذ بعض التدابير للتقليل من قيمة تيار البدء خصوصاً في المحركات الكبيرة.

فيما يلي عدة طرق لتقليل تيار البدء جميعها تعتمد على المعادلة (٣٩ -١) وذلك إما بتقليل البسط (الجهد) أو بزيادة المقام (معاوقات العضو الثابت أو الدوار).

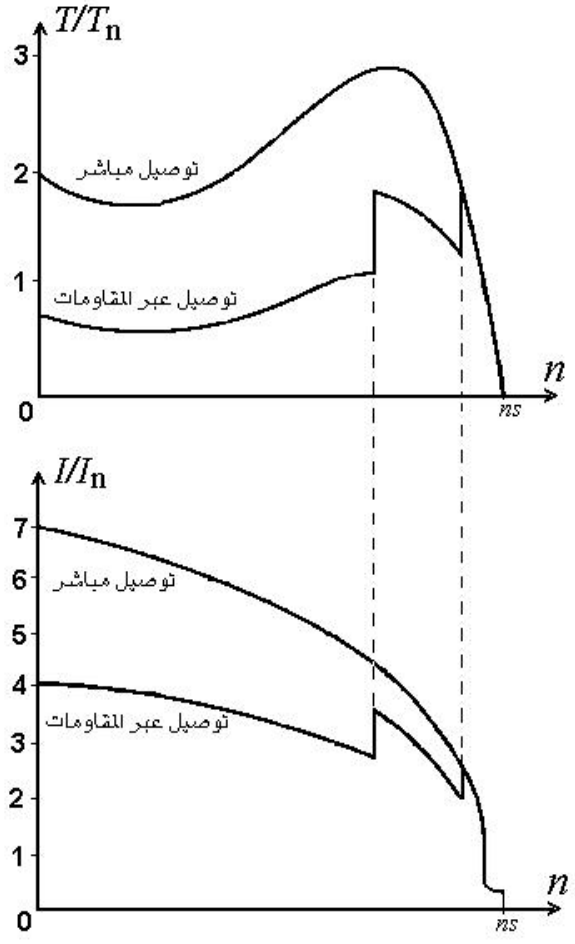
$$I_{Start} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + X_{eq}^2}} \qquad (39 - 1)$$

١ـ توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت :

إن توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت يؤدي إلى تقليل الجهد المسلط على العضو الثابت وبالتـالي يقـل تيـار البـدء طبقـاً للمعادلـة (٣٩ -١) ، ثـم بعـد اجتيـاز فـترة البـدء يمكـن إلغـاء هـذه المقاومات.تدريجياً. عيب هذه الطريقة هو زيادة المفاقيد النحاسية مما يجعلها غير مناسبة للاستخدام خصوصاً مع المحركات الكبيرة انظر الأشكال (٢٦ -١) و (٢٧ -١).



شكل رقم ٢٦ -١: مخطط التوصيل

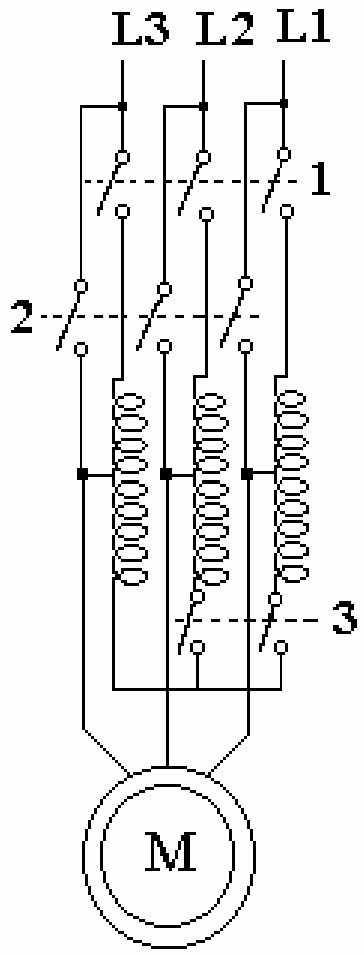


شكل رقم ٢٧ -١: منحنى العزم والتيار

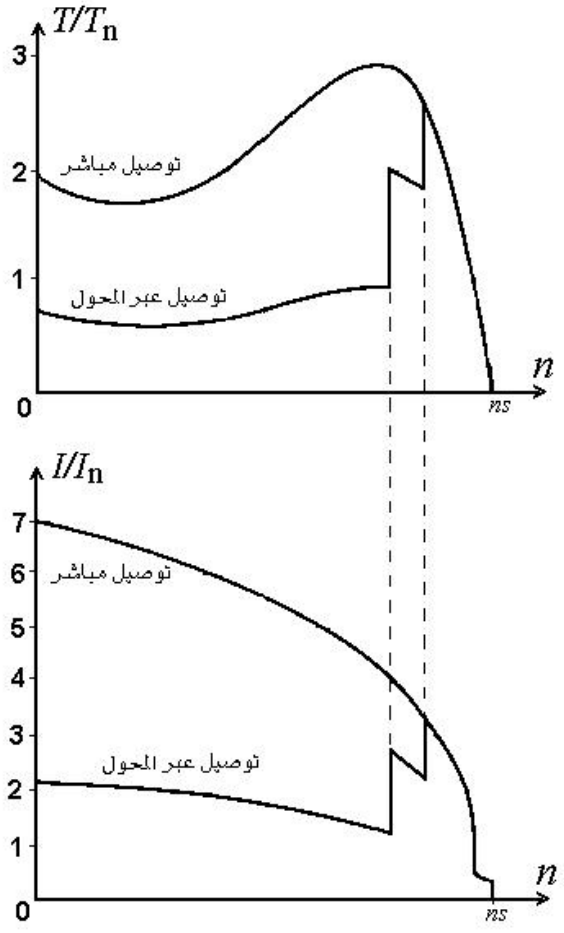
٢ـ باستخدام محول ذاتي:

في هذه الطريقة يتم توصيل أطراف العضو الثابت إلى محول ذاتي ثلاثي الأوجه بحيث يخفض الجهد المسلط على ملفات العضو الثابت إلى قيمة تتناسب مع تيار البدء المسموح به ، وبعد اجتياز المحرك

لفترة البدء يتم تسليط جهد المصدر كاملاً على ملفات العضو الثابت وذلك بفصل المحول. هذه الطريقة مثالية جداً حيث لا يوجد فيها أي قدره مفقودة. كما أنها تعتبر الخيار الأفضل للمحركات التي تم توصيل ملفاتها داخلياً من قبل المصنع على شكل نجمة. انظر الأشكال (٢٨ -١) و (٢٩ -١).



شكل رقم ٢٨ -١: مخطط التوصيل

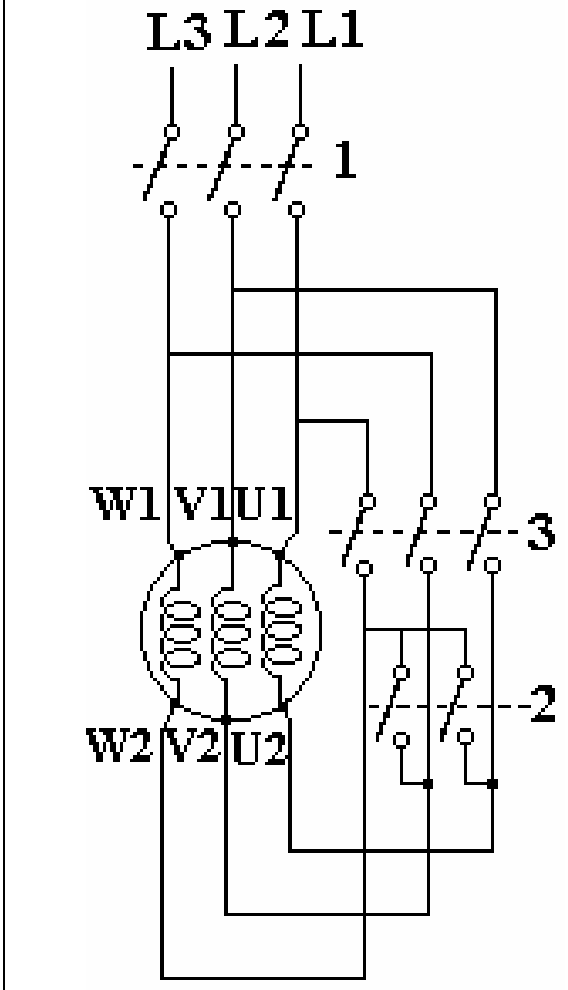


شكل رقم ٢٩ -١: منحنى العزم والتيار

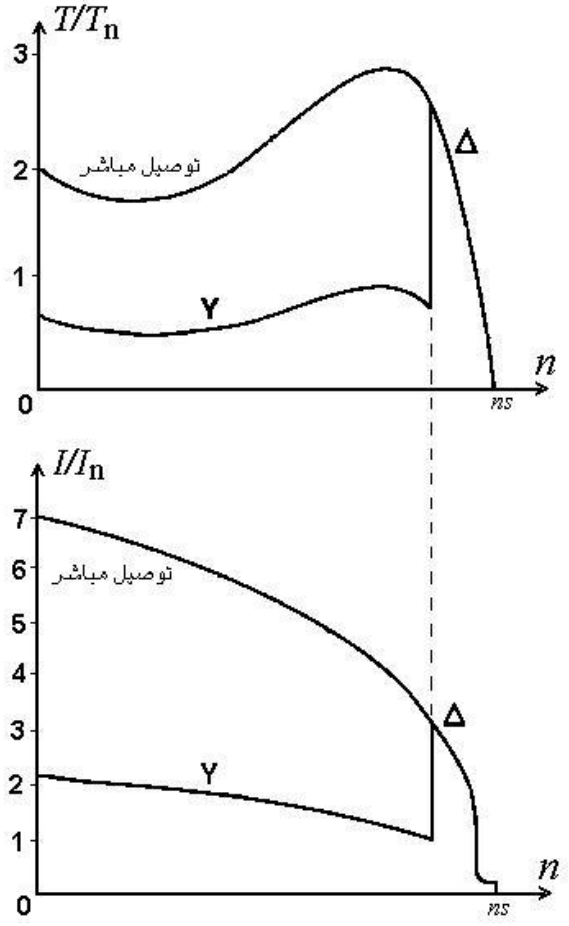
٣ـ طريقة تغيير توصيل ملفات العضو الثابت من نجمة إلى دلتا:

هذه الطريقة مناسبة للحركات ذات الستة أطراف والتي توصل ملفاتها على شكل دلتا أثناء التشغيل العادي حيث توصل ملفات العضو الثابت عند البدء على شكل نجمة ونتيجةً لذلك فإن جهد الوجه سيقل إلى ($1/\sqrt{3}$) من جهد المصدر وينخفض تيار الخط إلى ($1/3$) التيار المار في حالة التوصيل على شكل

دلتا، وبعد أن يجتاز المحرك فترة البدء يتم إعادة توصيل الملفات على شكل دلتا ، انظر الأشكال (٣٠ -١) و (٣١ -١).



شكل رقم ٣٠ -١: مخطط التوصيل

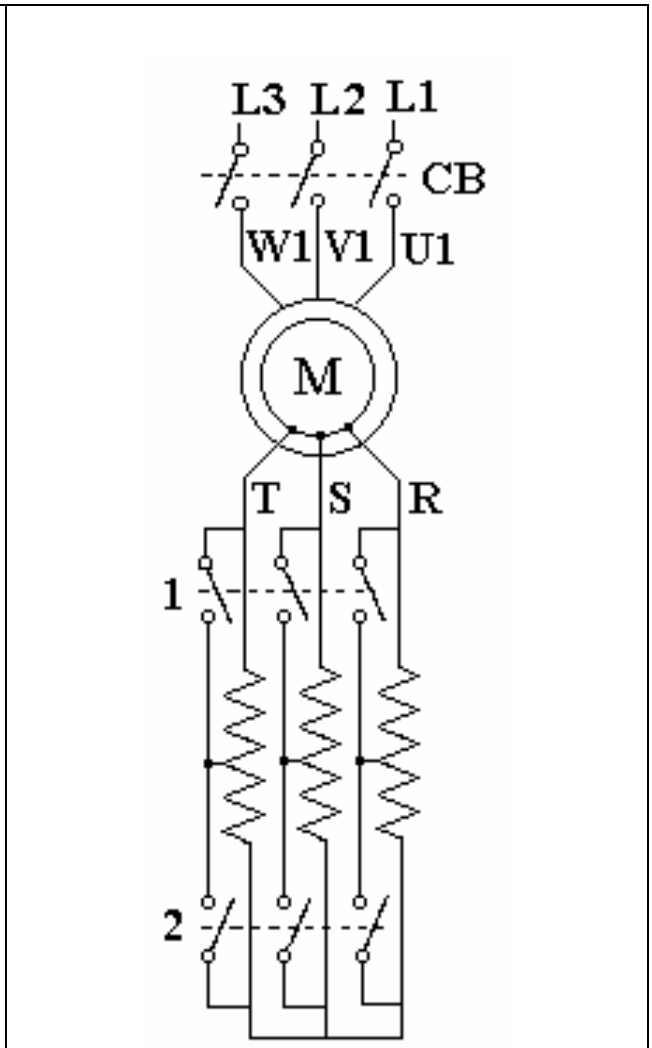


شكل رقم ٣١ -١: منحنى العزم والتيار

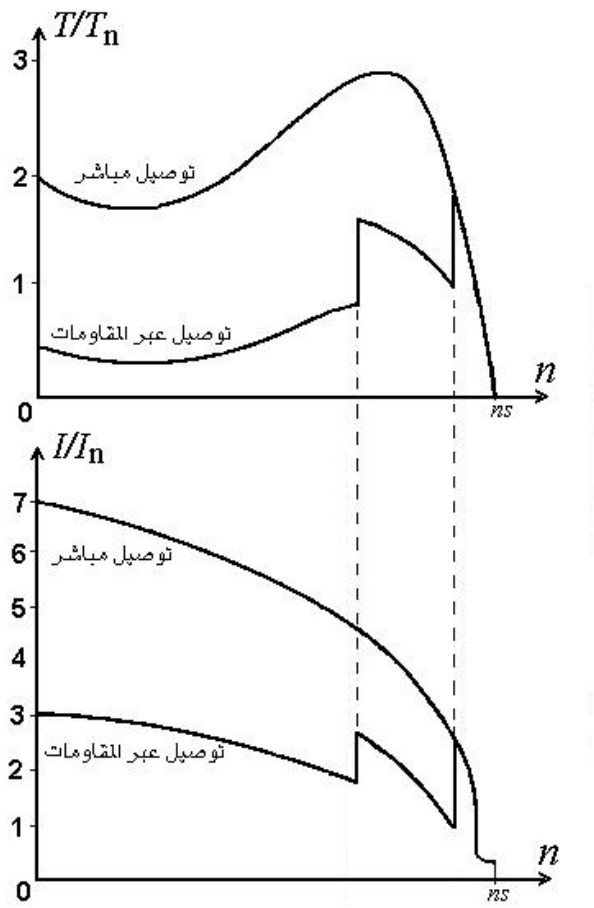
٤- إضافة مقاومات موصلة على التوالي مع ملفات العضو الدوار:

هذه الطريقة خاصة فقط بالمحرك ذي حلقات الانزلاق حيث يمكن توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدوار وبالتالي فإن تيار البدء يقل نتيجة لزيادة المقام في المعادلة (٣٩ -١) ، وبعد أن يجتاز المحرك فترة البدء يتم إزالة هذه المقاومات تدريجياً وذلك لتجنب زيادة المفاقيد في دائرة العضو الدوار. هذه الطريقة تعتبر الأفضل للمحركات ذات حلقات الانزلاق , كما أنها تزيد من عزم البدء للمحرك وذلك

لأن مقاومة البدء تضاف إلى R'_2 وبالتالي فإن الانزلاق الذي يحدث عنده أعلى عزم يزداد وبالتالي ينتقل موضع العزم الأقصى إلى الأمام مما يعني الزيادة في عزم البدء للمحرك ، انظر الأشكال (٣٢ -١) و (٣٣ -١).



شكل رقم ٣٢ -١: مخطط التوصيل

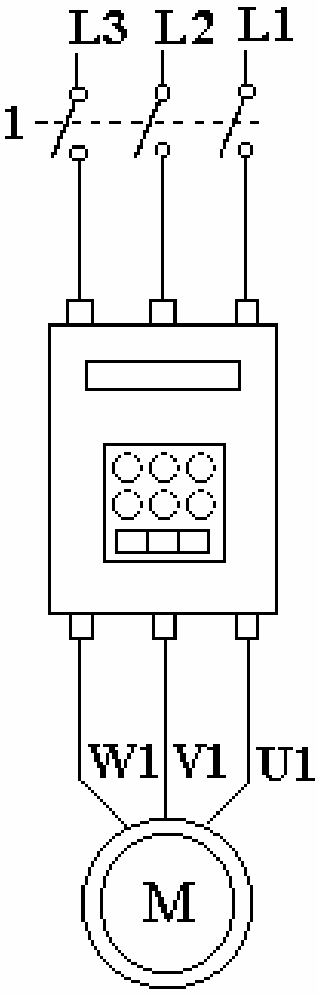


شكل رقم ٣٣ -١: منحنى العزم والتيار

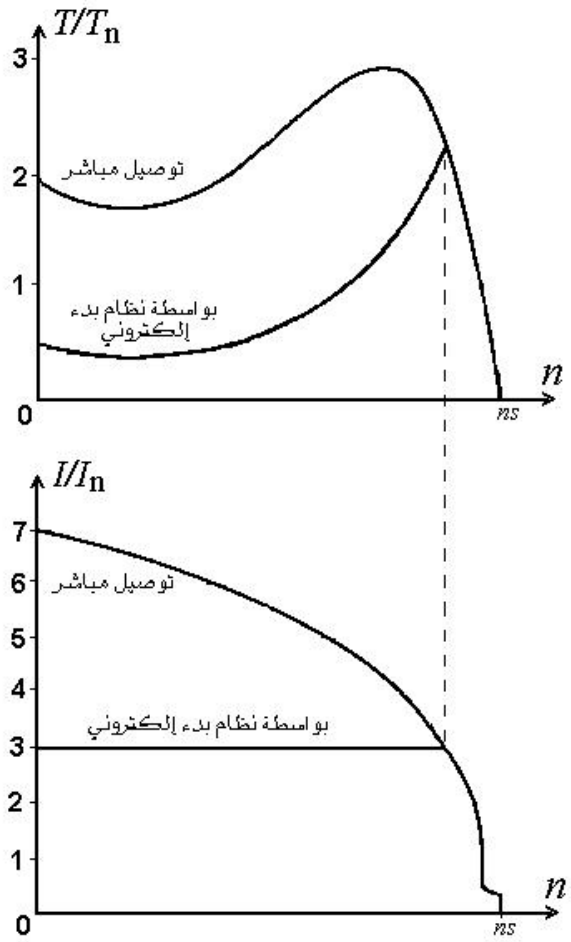
٥ ـ باستخدام أجهزة بدء إلكترونية:

ظهرت حديثاً أجهزة لبدء المحركات الكهربائية تستخدم تقنية إلكترونيات القدرة ، هذه الأجهزة تعتمد على مبدأ التحكم الدقيق والناعم في الجهد مع مراقبة التيار في نفس الوقت وبالتالي تجعل التيار ثابت طيلة فترة البدء مع عزم مستقر. هذه الطريقة تعتبر الأفضل وذلك لأنها توفر للمحرك تسارع ناعم بدون وقفات أو قفزات مفاجئة أو تذبذب أو إجهاد ميكانيكي كما هو الحال في الطرق التقليدية ، كما أن هذه الأجهزة تتوفر فيها جميع أنواع الحماية التي يتطلبها المحرك عادةً مما يعني توفير ثمن أجهزة

الحماية مقابل ارتفاع ثمن الجهاز، كما أنها أيضا تتحكم بعملية إيقاف أو تباطؤ المحرك عند الإيقاف. هذه الأجهزة تتوفر بقدرات تصل إلى 500 kw، انظر الأشكال (٣٤ -١) و (٣٥ -١).



شكل رقم ٣٤=١: مخطط التوصيل



شكل رقم ٣٥ -١: منحنى العزم والتيار

التحكم في السرعة

المحرك الحثي ثلاثي الأوجه يعتبر هو المحرك المثالي للتطبيقات التي لا تتطلب تغيراً في السرعة وذلك لأن سرعته ثابتة تقريباً عند قيمة أقل من السرعة التزامنية بقدر بسيط وعندما يتغير الحمل تتغير سرعته بشكل طفيف. ، ولذلك فهو يعتبر محرك ذو سرعة ثابتة تقريباً. ونظراً لوجود بعض التطبيقات التي تتطلب تحكماً في السرعة أمكن التحكم المحدود في سرعته بعدد من الطرق. بالرجوع إلى المعادلة رقم (٧ -١) نجد أن سرعة العضو الدوار يمكن التحكم بها إما بتغيير الانزلاق أو بتغير السرعة التزامنية، والسرعة التزامنية يمكن أن تتغير إما بتغير عدد الأقطاب أو بتغير تردد المصدر وذلك طبقاً

للمعادلة رقم (١ -١). وبناءً عليه يمكن التحكم في سرعة المحرك الحثي ثلاثي الأوجه بإحدى ثلاث طرق: تغيير الانزلاق أو تغيير عدد الأقطاب أو تغير تردد المصدر.

١ـ تغير قيمة الانزلاق:

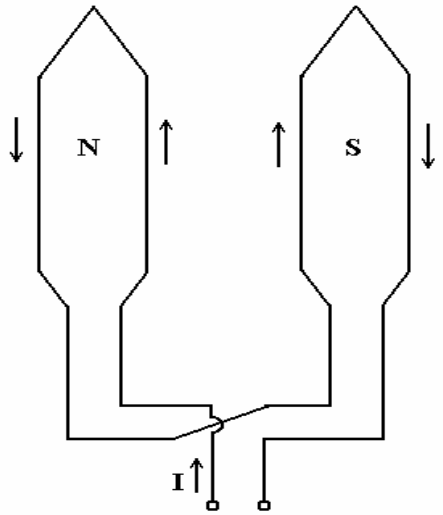
هذه الطريقة تستخدم فقط مع المحركات ذات حلقات الانـزلاق وذلك بتوصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدوار ، انظر الشكل رقم (٣٢ -١). إن أي تغيير في مقاومة ملفات العضو الدوار سيؤدي إلى تغيير موضع العزم الأقصى طبقاً للمعادلة رقم (٣٦ -١) وبالتالي تتغير السرعة مع تغير الانـزلاق طبقاً للمعادلة رقم (٧ -١).

هذه الطريقة تعطي تحكم محدود في السرعة و يحبذ أن لا يزيد عن ١٥٪ من السرعة التزامنية وذلك لأن زيادة هذه المقاومة يؤدي إلى زيادة المفاقيد النحاسية في العضو الدوار وبالتالي قلة كفاءة المحرك.

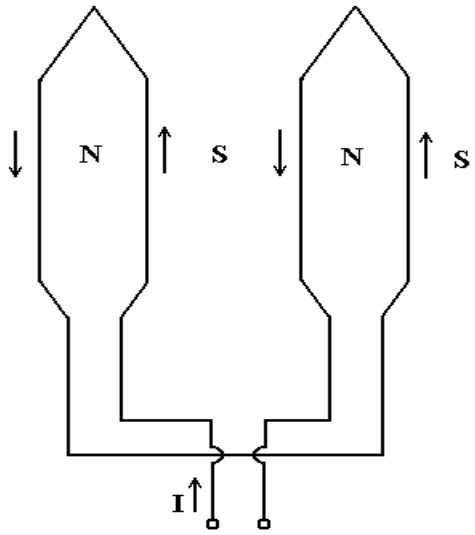
٢ـ تغيير عدد الأقطاب:

يمكن تغيير عدد أقطاب العضو الثابت في المحرك الحثي ذي القفص السنجابي وذلك بإعادة توصيلها بطريقة مختلفة بحيث نحصل على نصف عدد الأقطاب أو الضعف ، بهذه الطريقة يصبح لدينا سرعتان تزامنيتان الواحدة نصف الأخرى . فإذا كانت الأقطاب الأساسية أربعة كما هو موضح في الشكل رقم (٣٦ -١) يمكن إعادة التوصيل بحيث تصبح ثمانية أقطاب كما هو موضح في الشكل رقم (٣٧ -١).
إذا كانت هذه الطريقة لا تعطي السرعة المطلوبة فإنه بالإمكان وضع طبقتان منفصلتان من الملفات في العضو الثابت كل طبقة ذات عدد من الأقطاب مختلف عن الأخر ، مثلاً يمكن أن تكون الطبقة الأولى ذات ثمانية أقطاب بينما الثانية تكون ذات ستة أقطاب, كما أنه بالإمكان دمج الطريقتين معاً لنحصل على محرك ذو أربع سرعات.

هذه الطريقة غير مناسبة للمحرك ذي العضو الدوار الملفوف لأن ذلك يستدعي إعادة توصيل ملفات العضو الدوار لكي تصبح مساوية لملفات العضو الثابت كلما أردنا تغيير السرعة وهذا غير مناسب. بينما العضو الدوار ذي القفص السنجابي يتلاءم تلقائياً مع أي عدد موجود من الأقطاب في العضو الثابت.



شكل رقم ٣٦ -١: توصيل الملفات على شكل قطبين



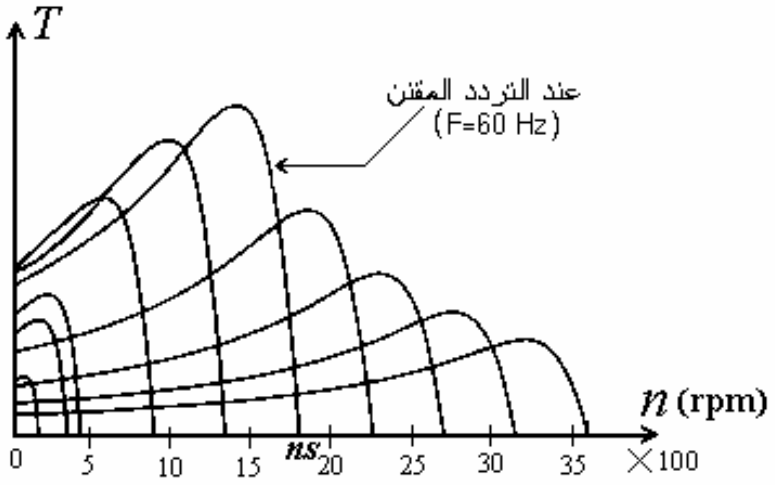
شكل رقم ٣٧ -١: توصيل الملفات على شكل أربعة أقطاب

٢ـ تغيير تردد المصدر:

السرعة التزامنية للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه يمكن التحكم بها عن طريق التحكم في تردد مصدر الجهد المغذي لملفات العضو الثابت. و هذا يتطلب وجود مصدر جهد ثلاثي الأوجه ذو تردد قابل للتغيير. هذا النوع من المصادر هي عبارة عن أجهزة تحكم إلكترونية ذات قدرات عالية تقوم بتحويل القدرة الداخلة ذات التردد الثابت إلى تيار مستمر ومن ثم تحويل هذا التيار المستمر إلى تيار متردد ثلاثي الأوجه عند التردد المطلوب.

كما أن الجهد الخارج يضبط بحيث يكون متناسب 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 تحكم دقيق في السرعة.

الشكل رقم (٣٨ -١) يوضح منحنيات (العزم/السرعة) لمحرك ذي أربعة أقطاب عند ترددات مختلفة، ويلاحظ أن العزم يزداد عند انخفاض التردد وذلك بسبب زيادة الجهد والعكس يحدث عند زيادة التردد وذلك للمحافظة على كمية ثابتة للفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية.



شكل رقم ٣٨ -١: منحنيات (العزم/السرعة) لمحرك ذي أربعة أقطاب عند ترددات مختلفة

أســئلة وتمـارين

١- لماذا تيار البدء يكون عالياً في المحركات الحثية؟

٢- لا يحبذ توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت من أجل تقليل تيار البدء، لماذا؟

٣- ما هي مميزات استخدام المحول الذاتي في عملية البدء؟

٤- ما هي مواصفات المحرك الذي يمكنه البدء بطريقة (Y / Δ)؟

٥- لماذا إضافة مقاومة إلى ملفات العضو الدوار يؤدي إلى تقليل تيار البدء؟

٦- ما هي مميزات أجهزة البدء الإلكترونية؟

٧- اشرح كيف يمكن التحكم في سرعة المحرك عن طريق إضافة مقاومة إلى دائرة العضو الدوار

٨- كيف يمكن الحصول على محرك حثي ذي أربع سرعات؟

٩- لماذا يجب تغيير الجهد عند تغيير تردد المصدر من أجل التحكم في سرعة المحرك؟

١٠- فيما يلي اختر الإجابة الصحيحة مع التعليل إما بكتابة معادلة أو رسم منحنى:

أ) إذا زاد تحميل المحرك فإن الانزلاق (يقل / يزداد)

ب) إذا زيدت مقاومة العضو الدوار فإن تيار البدء (يقل / يزداد)

جـ) إذا زيدت مقاومة العضو الدوار فإن سرعة المحرك (تقل / تزداد)

د) إذا قل الانزلاق فإن القدرة المفقودة في العضو الدائر (تقل / تزداد)

هـ) إذا قل تردد المصدر فإن سرعة المجال المغناطيسي الدوار (تقل / تزداد)

و) إذا زاد الانزلاق فإن تردد التيارات داخل ملفات العضو الدوار (يقل / يزداد)

ز) إذا زادت سرعة المحرك فإن قيم التيارات داخل ملفات العضو الدوار (تقل / تزداد)

حـ) إذا زد عدد أقطاب العضو الثابت فإن سرعة المجال المغناطيسي الدوار (تقل / تزداد)

آلات التيـــار المتردد

المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الجدارة: الإلمام الشامل بتركيب وأساسيات تشغيل وأداء المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

لإلمام بأنواع وتركيب الآلات التزامنية.

١. الإلمام بنظرية عمل المولدات التزامنية.
٢. الإلمام بكيفية ضبط جهد وتردد المولدات التزامنية.
٣. إجراء الحسابات الفنية المتعلقة بتشغيل المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه.
٤. إجراء الاختبارات الروتينية على المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه.
٥. تحديد عناصر الدائرة المكافئة للمولدات التزامنية.
٦. حساب القدرة والعزم والكفاءة للمولدات التزامنية.
٧. حساب معامل تنظيم الجهد للمولدات التزامنية.
٨. إجراء عملية ربط للمولد التزامني بالشبكة العامة.
٩. استنتاج وفهم المنحنيات المميزة لهذه المولدات.
١٠. رسم المخطط الاتجاهي وكيفية استخدامه للتحكم في هذه المولدات.

الوقت المتوقع للتدريب: ٨ ساعات

الوسائل المساعدة: التجارب العملية رقم ٨ و رقم ٩ في الوحدة التدريبية الرابعة من هذه الحقيبة

متطلبات الجدارة: يجب أن يكون المتدرب قد أتم دراسة الوحدة التدريبية الأولى في هذه الحقيبة (المحركات الحثية ثلاثية الأوجه)

هذه الوحدة مقسمة إلى فصلين, كل فصل يختص بموضوع أو أكثر حول المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه وهي:

الفصل الأول : التركيب ونظرية العمل – الدائرة المكافئة – المنحنيات المميزة

الفصل الثاني: القدرة والعزم – التشغيل المتوازي

وفي نهاية الفصل الثاني أدرج عدد من الأمثلة الحسابية المحلولة حلاً مفصلاً بالإضافة إلى مجموعة من الأسئلة والتمارين التي أدرجت في نهاية كل فصل والتي تم اختيارها بعناية لتكن بمثابة قياس لفهم و استيعاب المتدرب لهذا الفصل.

الوحدة الثانية : المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

الفصل الأول : التركيب - نظرية العمل – الدائرة المكافئة– المنحنيات المُمَيِّزة

تمهيد

أن أكثر من ٩٨٪ من الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم يتم توليدها باستخدام الآلة التزامنية فهي الأكثر استخداما 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 و العضو 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 والأخر 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 مباشرةً 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.

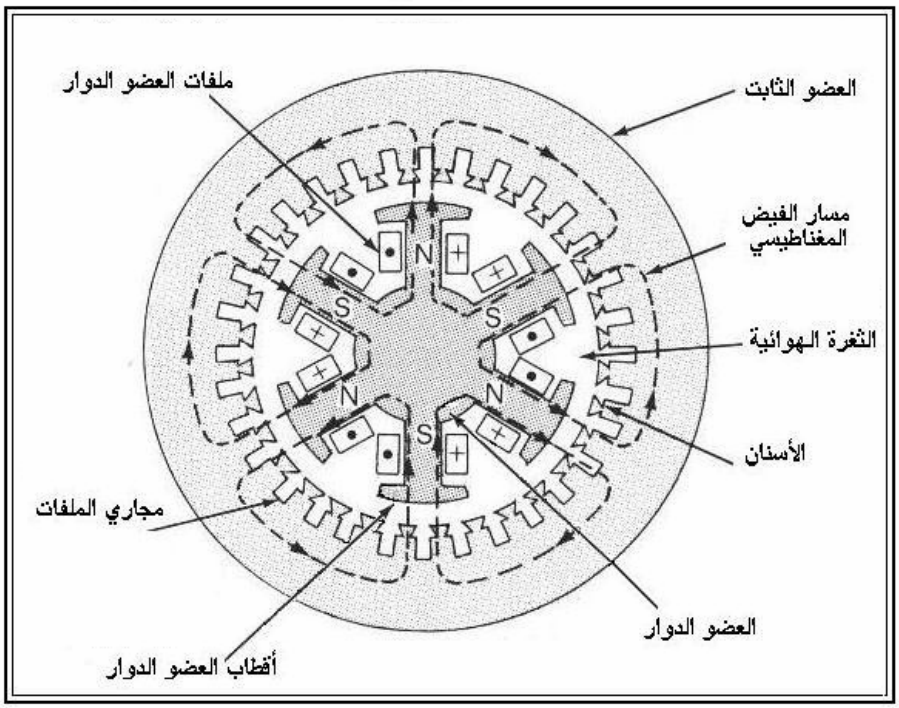
العضو الثابت:

العضو الثابت يكون مشابه 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.

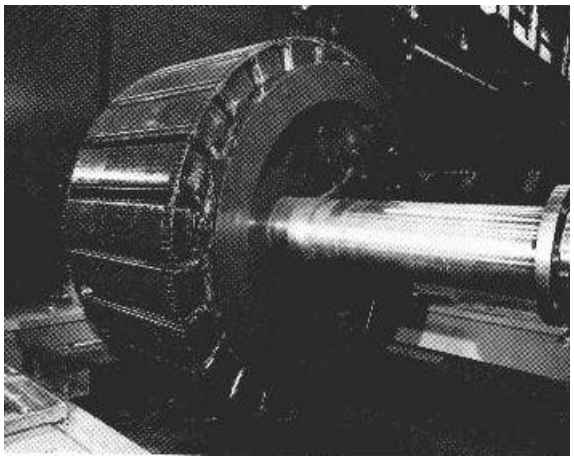
العضو الدوار:

العضو الدوار يحمل ملفات المجال المغناطيسي ويغذى بتيار مستمر عن طريق حلقتي انزلاق وحيث أن 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 ملف واحد 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 و ذلك لأن سرعتها عادةً تقل عن 1000 لفة بالدقيقة انظر شكل رقم (١ -٢) وشكل رقم (٢ -٢).

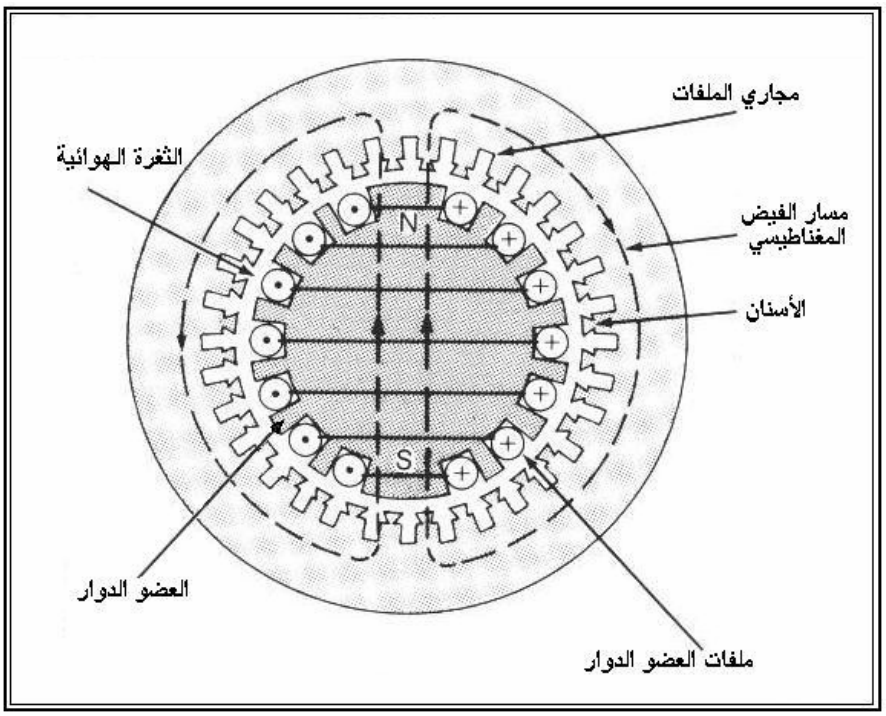


شكل رقم ١ -٢: آلة تزامنية ذات عضو دوار ذو أقطاب بارزة

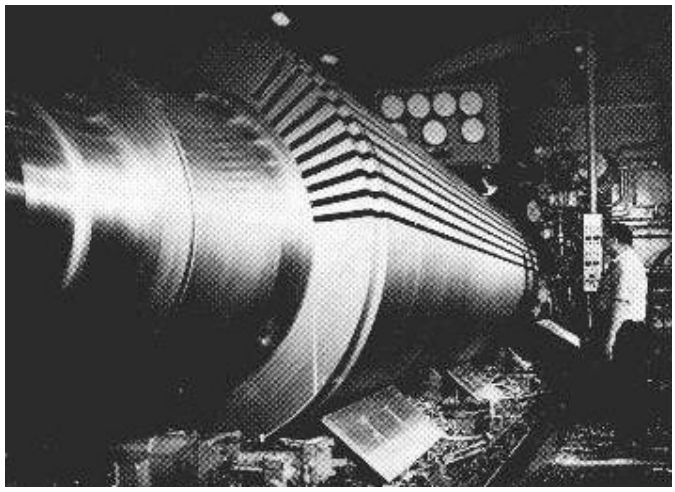


شكل رقم ٢ -٢ : عضو دوار ذو أقطاب بارزة

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



شكل رقم ٣ -٢ : آلة تزامنية ذات عضو دوار أسطواني



شكل رقم ٤ -٢: عضو دوار أسطواني

كيفية عمل المولد التزامني

في البدء يدار العضو الدوار للآلة التزامنية بواسطة وسيلة تدوير مناسبة (محرك ديزل – 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 كهربائية متناوبة طبقاً لمبدأ الحث الكهرومغناطيسي. هذه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في المنتج (العضو الثابت) ستكون قوة دافعة كهربائية ثلاثية الأوجه بين كل وجه وأخر ١٢٠ درجة وذلك لأن العضو الثابت يحمل ثلاثة ملفات بين كل ملف وأخر زاوية فراغية قدرها ١٢٠ درجة ، وتعتمد كمية القوة الدافعة الكهربائية على شدة المجال المغناطيسي وسرعة العضو الدوار ، وحيث أن سرعة العضو الدوار يجب أن تكون ثابتة للحصول على تردد ثابت ، لذا فإن الخيار الوحيد للتحكم بمقدار القوة الدافعة الكهربائية هو التحكم بشدة المجال المغناطيسي وذلك بتغيير قيمة التيار المستمر الداخل إلى ملفات العضو الدوار. تردد القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في المنتج يعتمد على سرعة العضو الدوار وعدد الأقطاب ويحسب من المعادلة التالية:

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

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

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

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 سيضفي 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 (٢ -٢) يعتبر هو 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 هي 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 لملفات المنتج .

٣- وجود ممانعة حثية ذاتية لملفات المنتج .

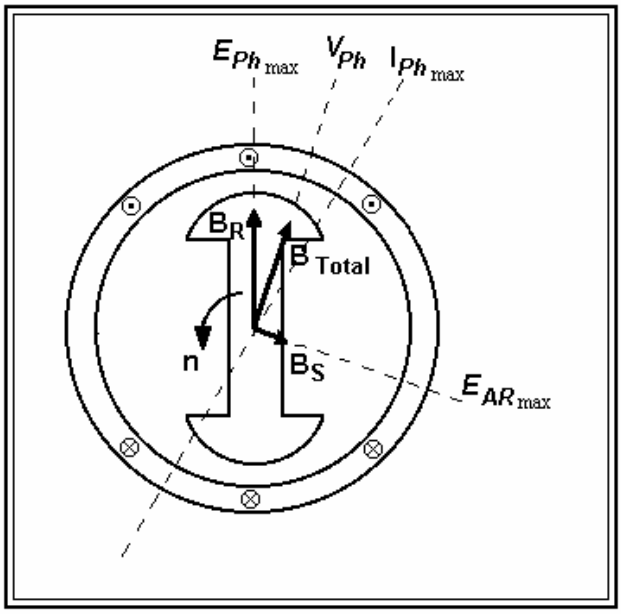
ما هو رد فعل المنتج ؟

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 وأخر زاوية فراغية مقدارها ١٢٠ درجة فإن التيارات المارة في هذه الأوجه سيفصل بين كل تيار وأخر 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).

$$B_{Total} = B_R + B_S \qquad (3 - 2)$$

$$V_{ph} = E_{ph} + E_{AR} \qquad (4 - 2)$$



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

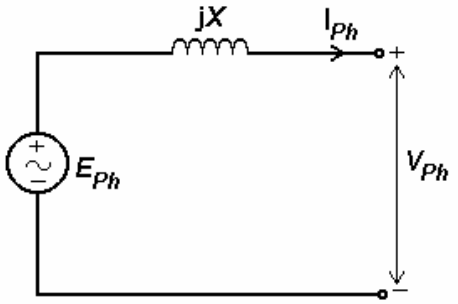
في الشكل (٥ -٢) نجد أن التيار I_{Ph} نتج بسبب تحميل الآلة بحمل حثي وذلك لأنه متخلف عن الجهد E_{Ph} بزاوية ما ، هذا التيار بدوره أوجد المجال المغناطيسي B_S الذي بدوره أنتج جهداً في ملفات المنتج هو E_{AR}، هذا الجهد E_{AR} الناتج بسبب رد فعل المنتج يتناسب طردياً مع التيار المسبب له كما أنه متخلف عنه بزاوية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

$$E_{AR} = -jXI_{Ph} \qquad (5-2)$$

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

$$V_{Ph} = E_{Ph} - jXI_{Ph} \qquad (6-2)$$

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



شكل 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 أيضا هناك تأثير للمقاومة و المفاعلة الحثية الذاتية لملفات المنتج. فإذا اعتبرنا أن مقاومة ملفات المنتج هي R_A والمفاعلة الحثية الذاتية لملفات المنتج هي X_A ، فإن جهد أطراف المولد يصبح كما يلي:

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

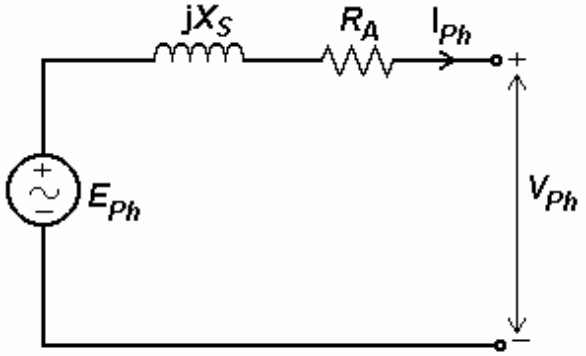
من أجل تبسيط المعادلة (٧ -٢) يمكننا دمج المفاعلة الحثية الذاتية للملفات المنتج (X_A) مع المفاعلة الحثية التي تمثل رد فعل المنتج (X) لتصبح مفاعلة حثية واحدة تسمى المفاعلة التزامنية (X_S).

$$X_S = X + X_A \qquad (8-2)$$

وبالتالي يصبح جهد أطراف المولد كما يلي:

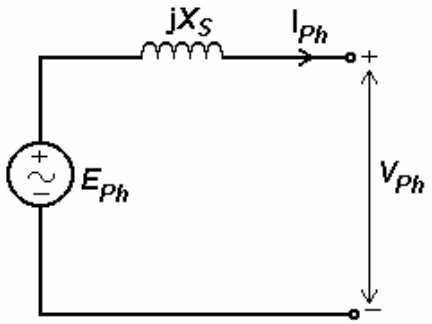
$$V_{Ph} = E_{Ph} - jX_S I_{Ph} - R_A I_{Ph} \qquad (9-2)$$

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.



شكل 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 مقارنةً بالمفاعلة التزامنية خصوصاً في الآلات الكبيرة فتصبح الدائرة المكافئة التقريبية كما هو موضح في الشكل(٨ -٢).



شكل رقم ٨ -٢: الدائرة المكافئة التقريبية

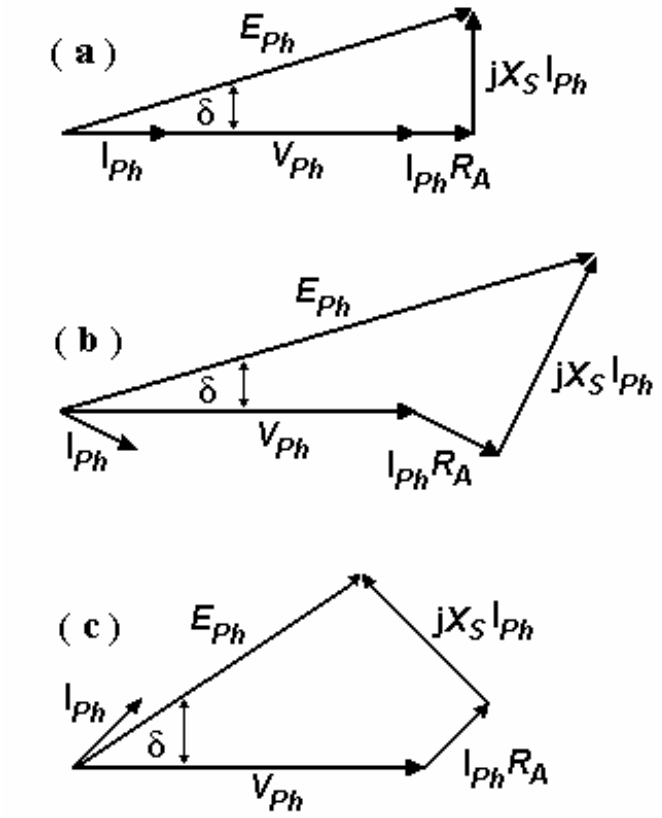
وفي هذه الحالة يحسب جهد الأطراف لكل وجه كما يلي:

$$V_{Ph} = E_{Ph} - jX_S I_{Ph} \qquad (10-2)$$

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 بشكل إتجاهي لنحصل على ما يسمى بالمخطط الاتجاهي Phasor Diagram للآلة التزامنية. هذا المخطط الاتجاهي يعتبر أداةً هامةً جداً بالنسبة للآلة التزامنية لأن 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 ـ حمل حثي ـ حمل سعوي) ، ويلاحظ أن جهد الأطراف يعتبر هو مرجع جميع القيم في المخطط الاتجاهي وهو أيضا 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.



شكل رقم ٩ -٢: المخطط الاتجاهي للآلة التزامنية عندما يكون معامل القدرة واحد (a) ، عندما يكون معامل القدرة متخلف (b) ، عندما يكون معامل القدرة متقدم (c)

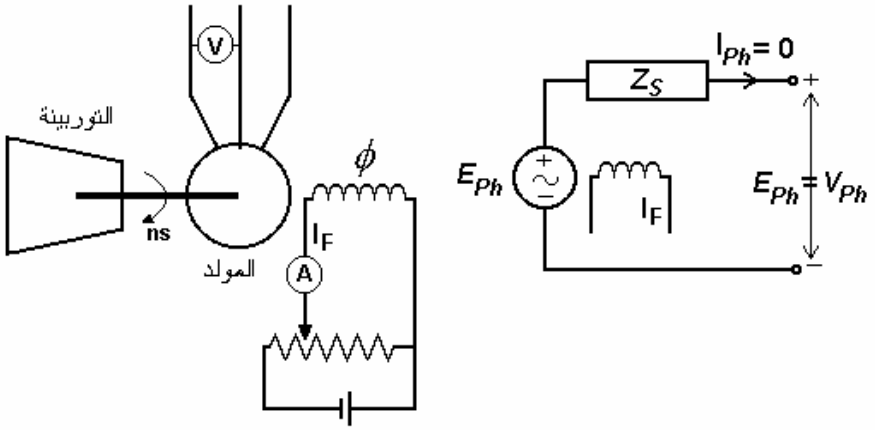
اختبارات الآلة التزامنية

الآلة التزامنية كغيرها من الآلات يجرى عليها الاختبارين الشهيرين (اختبار عدم الحمل واختبار القصر) وذلك لتحديد المنحنيات المُمَيِّزة للآلة وحساب عناصر الدائرة المكافئة.

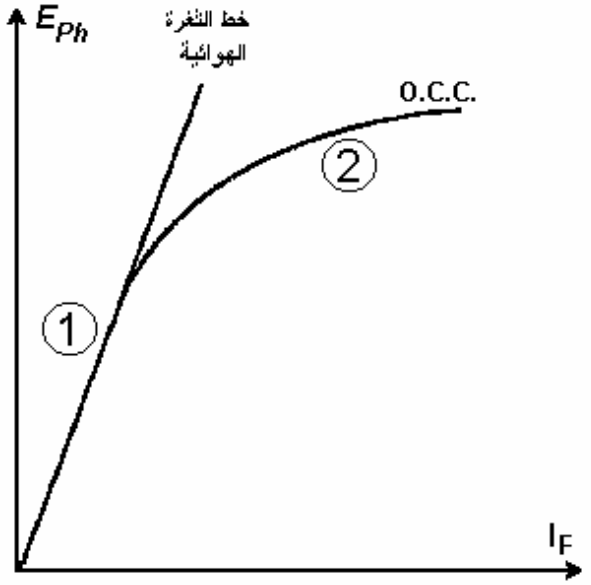
أولاً: اختبار عدم الحمل (الدائرة المفتوحة Open Circuit)

في هذا الاختبار تترك أطراف المنتج مفتوحة وتدار الآلة حتى تصل إلى سرعتها التزامنية ومن ثم يزاد تيار المجال تدريجياً ابتداءً من الصفر, هذه الزيادة في تيار المجال تؤدي إلى زيادة الفيض المغناطيسي بالتالي زيادة الجهد المتولد على أطراف المنتج المفتوحة وتسجل قيم التيار والجهد في جدول ثم ترسم العلاقة بينهما كما هو موضح في الشكل رقم (١١ -٢), هذه العلاقة تسمى منحنى المغنطة

Magnetization Curve أو منحنى الدائرة المفتوحة المُمَيِّز Open Circuit Characteristic (O.C.C)
راجع الأشكال (١٠ -٢، ١١ -٢)



شكل رقم ١٠ -٢: الآلة التزامنية أثناء اختبار عدم الحمل

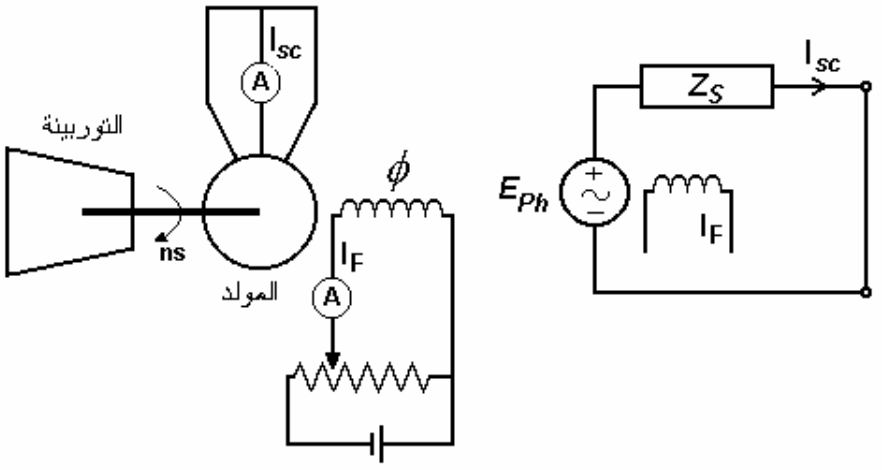


شكل رقم ١١ -٢: منحنى الدائرة المفتوحة للآلة التزامنية

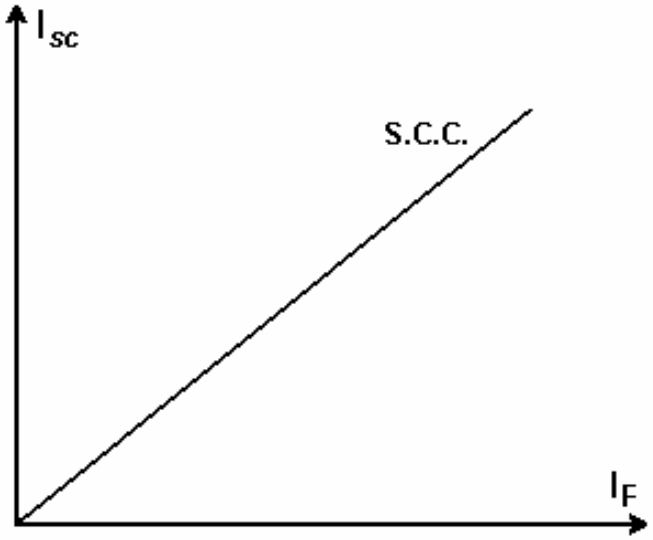
يلاحظ من المنحنى السابق أنه ينقسم إلى منطقتين واضحتين في المنطقة رقم (١) الفيض المغناطيسي منخفض ولذا فإن ممانعة الحديد تكون صغيرة جداً وهذا يعني أن الممانعة الموجودة هي ممانعة الهواء فقط وهذا يؤدي إلى أن الجهد يتغير تغيراً خطياً مع تيار المجال في هذه المنطقة , امتداد المنحنى في هذه المنطقة هو الخط الفاصل بين المنطقتين و يسمى خط الثغرة الهوائية ، في المنطقة رقم (٢) يزداد الفيض المغناطيسي مما يؤدي إلى زيادة ممانعة الحديد ـ أي أن الحديد بدأ يصل إلى حالة التشبع ـ مما يؤدي إلى تناقص معدل الارتفاع في جهد أطراف المنتج مقابل تيار المجال كما هو ملاحظ من المنحنى.

ثانياً: اختبار القصر Short Circuit Test:

في هذا الاختبار تقصر أطراف المنتج الثلاثة مع بعضها وتدار الآلة حتى تصل إلى السرعة التزامنية ثم يزاد تيار المجال تدريجياً وتسجل قيمة تيار المنتج وقيمة تيار المجال المقابلة في جدول ثم ترسم العلاقة بينهما كما هو موضح في الشكل رقم (١٣ -٢) , هذه العلاقة تسمى منحنى القصر المُمَيِّز Short Circuit Characteristic (S.C.C) ويجب أن لا يترك تيار القصر يزداد عن القيمة المقننة لتيار الحمل الكامل ، راجع الأشكال (١٢ -٢، ١٣ -٢).



شكل رقم ١٢ -٢: الآلة التزامنية أثناء اختبار الدائرة المقصورة



شكل رقم ١٣ -٢: منحنى الدائرة المقصورة للآلة التزامنية

حساب المفاعلة التزامنية باستخدام منحنيي الدائرة المفتوحة (O.C.C) والقصر (S.C.C).

يمكن حساب المفاعلة التزامنية (X_S) للآلة التزامنية باستخدام منحنى الدائرة المفتوحة (O.C.C) ومنحنى الدائرة المقصورة (S.C.C) كما يلي:

١- عند كل قيمة من قيم تيار المجال (I_F) تحسب (Z_S) من المعادلة التالية:

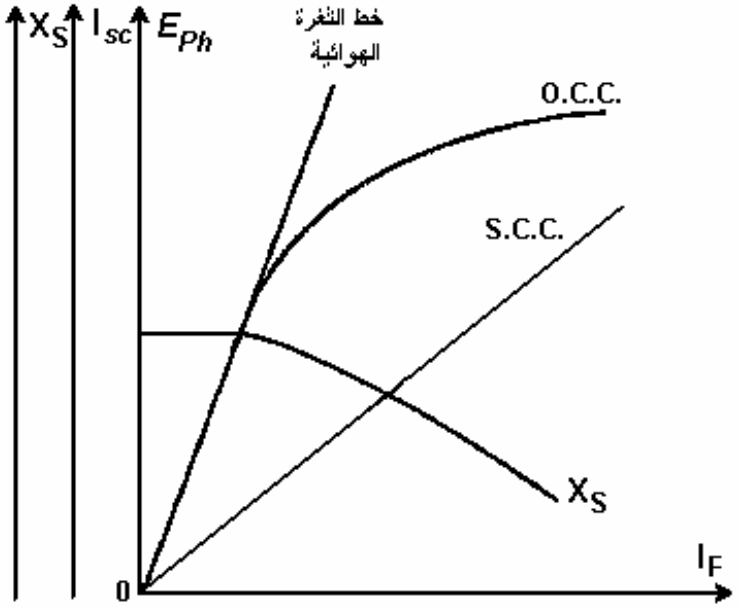
$$Z_S = \frac{E_{Ph}}{I_{SC}} \qquad I_F \text{ is constant}$$

٢- تحسب (X_S) من المعادلة التالية:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} \qquad (11-2)$$

حيث R_A هي مقاومة ملفات المنتج ويمكن قياسها مباشرة باستخدام الأوميتر.

يمكن أيضاً أن ترسم العلاقة بين X_S, I_F كما هو موضح في الشكل رقم (١٤ -٢) ، ويلاحظ أن قيمة X_S تكون ثابتة في منطقة التغير الخطي لمنحنى الدائرة المفتوحة(O.C.C) وتقل كلما زادت الممانعة المغناطيسية للحديد.



شكل رقم ١٤ -٢: المفاعلة التزامنية للآلة التزامنية بدلالة تيار المجال

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 مؤشر جيد 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:

$$VR = \frac{E_{Ph} - V_{Ph}}{V_{Ph}} \times 100 \qquad (12 - 2)$$

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.

أسئلة وتمارين

١- من أين اكتسبت الآلة التزامنية تسميتها؟

٢- كيف يمكن التحكم بمقدار القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج؟

٣- هل من المناسب زيادة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج عن طريق زيادة سرعة الدوران؟

٤- كيف يمكن التحكم في تردد الآلة التزامنية؟

٥- ما لمقصود برد فعل المنتج؟

٦- ما هي المفاعلة التزامنية؟

٧- ارسم الدائرة المكافئة التقريبية للآلة التزامنية ، واذكر الأساس الذي تم عليه التقريب؟

٨- ارسم المخطط الاتجاهي للآلة التزامنية المصاحب للدائرة المكافئة التقريبية في حالة كون معامل القدرة مساو للواحد ومتخلف ومتقدم

٩- ما لمقصود بالتشبع المغناطيسي في الحديد؟

١٠- إلى أي مدى يمكن زيادة تيار المجال في اختباري عدم الحمل و الدائرة المقصورة؟

١١- ما هو معامل تنظيم الجهد؟

١٢- ما هي أهمية معرفة معامل تنظيم الجهد للمولد؟

١٣- أيهما أفضل للمولد أن يكون معامل تنظيم الجهد له كبير أم صغير؟

الفصل الثاني : القدرة والعزم – التشغيل المتوازي

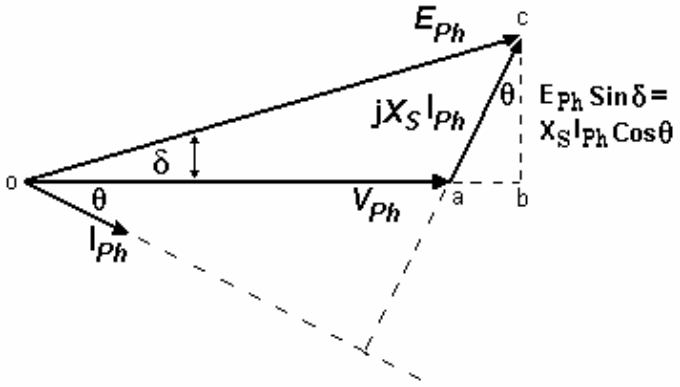
القدرة والعزم في الآلة التزامنية

القدرة الفعالة الخارجة من المولد التزامني تعطى من المعادلة التالية:

$$P = 3V_{Ph} I_{Ph} Cos\,\theta \qquad (13 - 2)$$

حيث: θ هي الزاوية بين الجهد والتيار وجيب تمامها هو معامل القدرة

إذا أهملنا مقاومة ملفات المنتج R_A وذلك لصغر قيمتها عندما تقارن بالمفاعلة التزامنية X_S كما في الشكل (٨ -٢) فإننا نستطيع إيجاد معادلة مهمة جداً لحساب القدرة الخارجة من الآلة التزامنية. لكي نوجد هذه المعادلة نستعين بالمخطط الاتجاهي المعبر عن هذه الحالة والموضح في الشكل (١٥ -٢)



شكل رقم ١٥ -٢: المخطط الاتجاهي للمولد التزامني في حالة إهمال R_A

نلاحظ في المخطط الاتجاهي أعلاه أن المستقيم bc يمكن أن يعبر عنه بـ ($E_{Ph}Sin\delta$) أو بـ($X_S I_{Ph} Cos\theta$) وذلك لكونه ضلع مشترك في المثلثين abc، obc وبالتالي فإن:

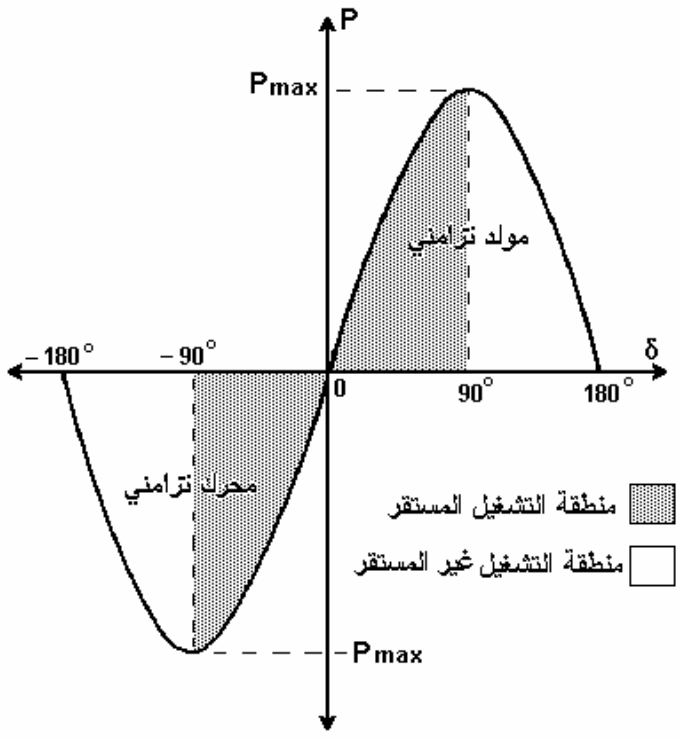
$$I_{Ph} Cos\ \theta = \frac{E_{Ph} Sin\ \delta}{X_S}$$

وبعد التعويض في المعادلة (١٣ -٢) تصبح معادلة القدرة كما يلي:

$$P = \frac{3V_{Ph}E_{Ph}Sin\,\delta}{X_S} \qquad (14 - 2)$$

معادلة القدرة (١٤ -٢) يمكن أن نرسم منها العلاقة بين P و δ كما هو موضح في الشكل (١٦ -٢) ، العلاقة (١٤ -٢) توضح أن القدرة الخارجة من المولد التزامني تعتمد على الزاوية δ بين E_{Ph} و V_{Ph} ، هذه الزاوية δ تسمى زاوية الحمل Load angle أو زاوية العزم Torque angle ، كما يلاحظ أيضا أن أكبر قدره ممكن أن تؤخذ من المولد نظرياً هي عندما تكون قيمة الزاوية δ تسعون درجة ، أي أن (Sinδ=1) وبالتالي:

$$P_{\max} = \frac{3V_{Ph}E_{Ph}}{X_S} \qquad (15 - 2)$$



شكل رقم ١٦ -٢: القدرة في الآلة التزامنية بدلالة زاوية الحمل δ

منطقة التشغيل الامن أو المستقر للآلة التزامنية هي عندما تكون (δ < 90) في حالة التشغيل كمولد أو عندما تكون (δ < 90-) في حالة التشغيل كمحرك كما هو موضح في الشكل (١٦ -٢).

العزم المتولد داخل الآلة التزامنية يمكن إيجاده من المعادلة(١٤ -٢) بعد قسمتها على السرعة الزاوية للعضو الدوار كما يلي:

$$T = \frac{3V_{Ph}E_{Ph}Sin\,\delta}{\omega_m X_S} \qquad (16 - 2)$$

تشغيل المولدات التزامنية على التوازي

من النادر جداً أن يوجد مولد وحيد يغذي حمل مستقل ماعدا في حالات خاصة كالمولدات المعدة لأعمال الطوارئ. عادةً يوجد في كثير من التطبيقات أكثر من مولد مربوطة على التوازي مع بعضها 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 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 الحمل 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 متساوي 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 واحد 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

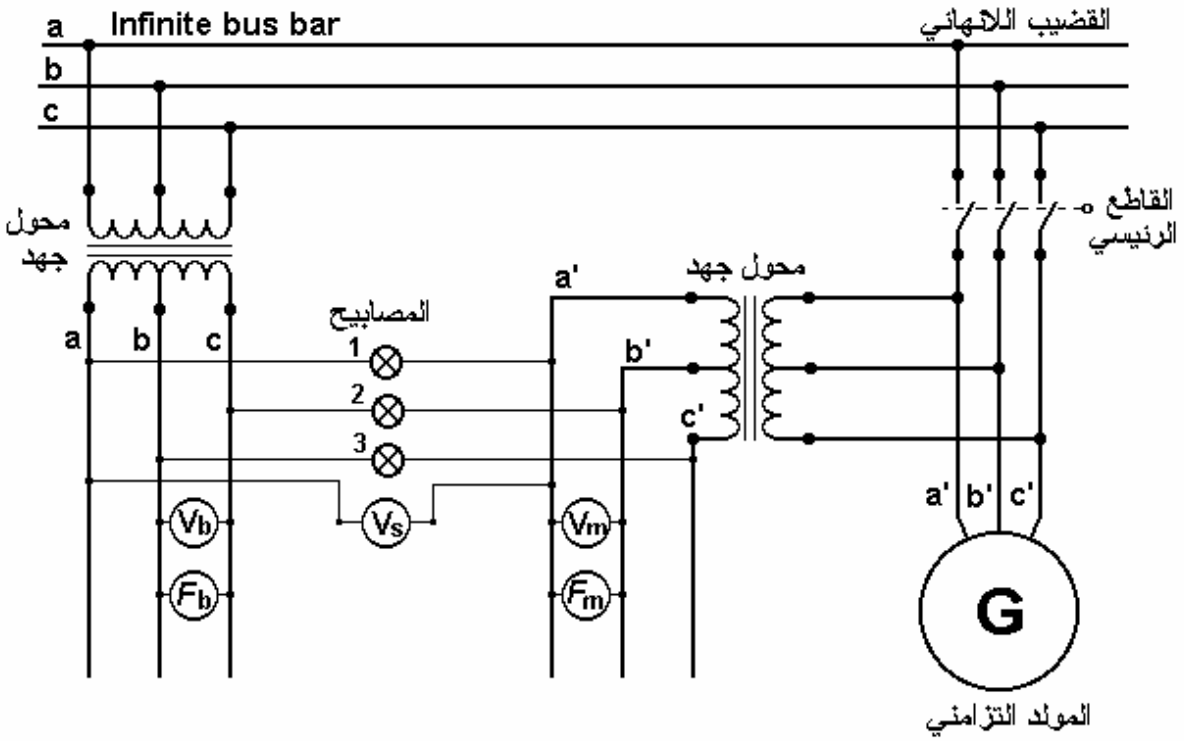
إن عملية توصيل المولد التزامني إلى قضبان لا نهائية Infinite bus bars تعتبر عملية مشابهة لتوصيل المولد التزامني على التوازي مع مولد آخر كبير جداً وذلك لأن القضبان اللانهائي يعتبر كأنه مولد ذو قدره غير محدودة ، ولإتمام هذه العملية يجب أن تتحقق الشروط السابقة قبل عملية التوصيل, وللتأكد من تحقق تلك الشروط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

١ - طريقة المصابيح المضيئة

في هذه الطريقة توصل ثلاث لمبات بين الآلة والقضبان اللانهائية كما هو موضح في الشكل رقم (١٧ - ٢) بحيث توصل الأولى بين الخطين a',a والثانية بين الخطين c',b والثالثة بين الخطين b',c كما يوصل ثلاثة أجهزة فولتميتر: Vs بين الوجهين a',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 (Vm = Vb)
٢- لكي يتحقق الشرط الثاني يجب أن تتساوى قراءة أجهزة قياس التردد (Fm = Fb)
٣- الشرط الثالث يتحقق عندما يكون انطفاء واشتعال المصابيح بشكل منتظم

٤- الشرط الرابع يتحقق عندما يكون فرق الجهد بين وجهين متماثلين في الآلة والقضيب مساوي للصفر (Vs = 0) .



شكل رقم ١٧ -٢ : عملية التزامن بطريقة المصابيح المضيئة

أما عملية التزامن فيتم إجراؤها كما يلي:

١- يرفع جهد أطراف المولد حتى يكون مساوياً لجهد القضيب (Vm = Vb) وذلك بزيادة تيار المجال تدريجياً

٢- يضبط تردد المولد بحيث يكون قريب من تردد القضيب وذلك بزيادة سرعة الدوران

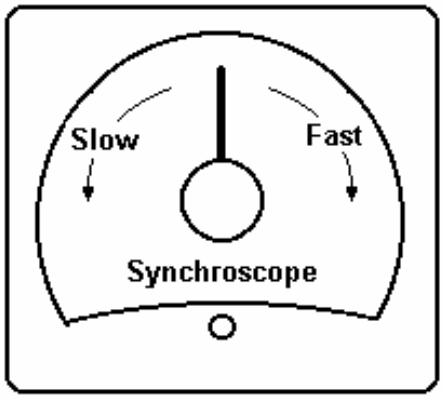
٣- عند محاولة ضبط سرعة الدوران يحدث إحدى حالتين بالنسبة للمصابيح ، الحالة الأولى: جميع المصابيح تضيء وتنطفئ بشكل عشوائي و هذا يعني أن شرط تتابع الأطوار للمولد و القضبان مختلف وعندها يجب المبادلة بين أي طرفين من أطراف المولد من أجل عكس تتابع أطوار المولد وبعدها نلاحظ أن إضاءة المصابيح أصبحت بشكل منتظم ومتتابع. الحالة الثانية : جميع المصابيح تضأ وتنطفأ 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 بالسرعة 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 بطيء قدر الإمكان وفي اللحظة التي يكون فيها (Vs = 0) أو المصباح الأول منطفئ بينما الثني والثالث مضاءان يكون الشرط الرابع قد تحقق ،

في هذه اللحظة تكون الآلة في لحظة تزامن مع القضيب اللانهائي 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 اللانهائية وأن لهما نفس التردد,أي أنه يعتبر بديل للمصابيح في الشكل (١٧ -٢) ، و هو عبارة عن محرك حثي يتعرض لمجالين مغناطيسيين الأول من القضبان اللانهائية والأخر من المولد التزامني و العضو الدوار مركب عليه مؤشر يتحرك باتجاه عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة يعتمد على تردد المولد التزامني هل هو أعلى أو أقل من تردد القضبان اللانهائية, و عندما يقف المؤشر بشكل عمودي (في مكان الساعة 12) فهذا يعني أن جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهائي عند هذه الحالة يمكن توصيل المولد التزامني بالقضبان اللانهائية بأمان عن طريق القاطع الرئيسي.



شكل 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، منحنى الدائرة المفتوحة له موضح في الشكل(١٩ -٢) ، المفاعلة التزامنية له 0.1 Ω ومقاومة ملفات المنتج 0.015 Ω ، عند الحمل الكامل يعطي تياراً قدره 1200 A عند معامل قدره 0.8 متخلف ، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك 40 kw و المفاقيد الحديدية 30 kw عند الحمل الكامل فاحسب ما يلي:

أ) ما هي سرعة العضو الدوار

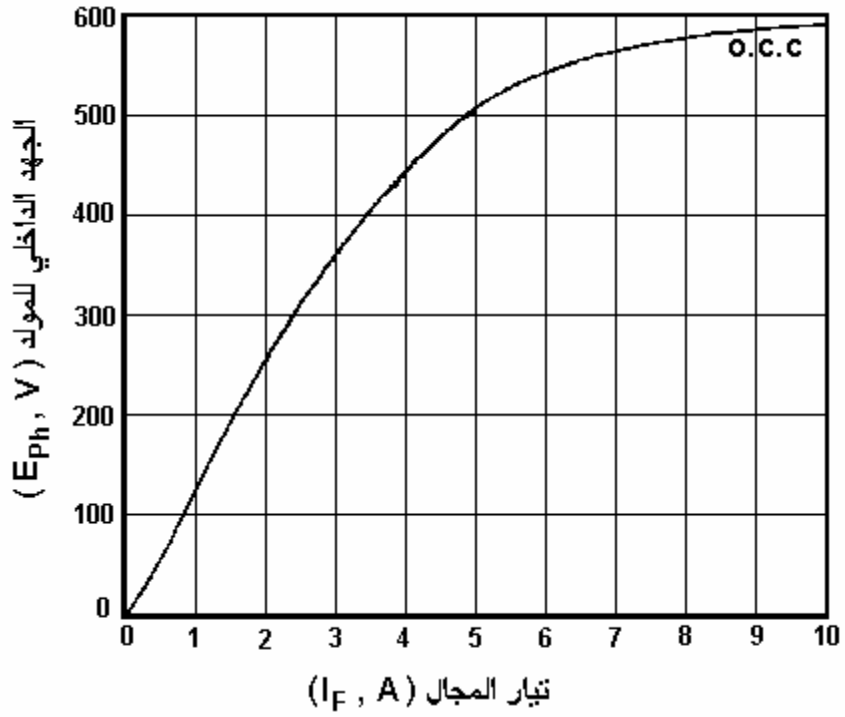
ب) كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يكون جهد الأطراف 480 V بدون حمل

جـ) إذا كان المولد يغذي حملاً بتيار قدره 1200 A عند معامل قدره 0.8 متخلف ، 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 متقدم ، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يبقى جهد الأطراف عند 480 V



شكل رقم ١٩ -٢ : منحنى الدائرة المفتوحة للمولد(مثال ١ -٢)

الحـــل:

بما أن ملفات المولد موصلة على شكل دلتا

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

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

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

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

ومتخلف عن الجهد بزاوية طور هي:

$$\theta = \text{Cos}^{-1}(0.8) = 36.87^{o}$$

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 والداخلة 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:

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

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

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

إذن:

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

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 فهذا 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 V)

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

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

إذن: لكي يبقى جهد الأطراف V_{Ph} عند 480 V عندما يكون معامل القدرة 0.8 متقدم 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 ، المفاعلة التزامنية 1Ω لكل وجه و مقاومة ملفات المنتج مهملة ، تيار الحمل الكامل له 60 A عند معامل قدره 0.8 متخلف ، مفاقيد الاحتكاك 1.5 kw والمفاقيد الحديدية 1 kw عند الحمل

الكامل ، و بمأن مقاومة ملفات المنتج مهملة افترض أن المفاقيد النحاسية في ملفات المنتج مهملة أيضا ، تيار المجال ضبط بحيث يكون جهد الأطراف 480 V عند عدم الحمل. احسب ما يلي:

أ) ما هي سرعة دوران هذا المولد

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

١ - معامل القدرة 0.8 متخلف

٢ - معامل القدرة 1.0

٣ - معامل القدرة 0.8 متقدم

جـ) احسب كفاءة المحرك عند الحمل الكامل إذا كان معامل القدرة 0.8 متخلف

د) احسب العزم الداخل إلى المولد

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

الحـل:

أ) من المعادلة رقم (١ -٢)

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

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

اذن : $V_{Ph} = \frac{V_{Line}}{\sqrt{3}}$ & $I_{Ph} = I_{Line}$

عند عدم الحمل:

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

الحالة (١) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60 A) عند معامل قدره 0.8 متخلف فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابه للمخطط الموضح في الشكل(٢٠ -٢) الحالة(١)

بمأن معامل القدرة متخلف ، إذن التيار سيكون متخلف عن الجهد بزاوية θ

$$\theta = \text{Cos}^{-1}(0.8) = 36.87^{o}$$

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:

$$E_{Ph}^2 = (V_{Ph} + X_S I_{Ph} Sin\theta)^2 + (X_S I_{Ph} Cos\theta)^2$$
$$(277)^2 = (V_{Ph} + 1.0 \times 60 \times Sin36.87)^2 + (1.0 \times 60 \times Cos36.87)^2$$
$$76729 = (V_{Ph} + 36)^2 + 2304$$
$$74425 = (V_{Ph} + 36)^2$$
$$272.8 = V_{Ph} + 36$$
$$V_{Ph} = 236.8 \quad V$$

وحيث أن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

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

الحالة (٢) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60 A) عند معامل قدره واحد فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابه 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:

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

وحيث أن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

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

الحالة (٣) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60 A) عند معامل قدره 0.8 متقدم فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابه للمخطط الموضح في الشكل(٢٠ -٢) الحالة (٣)

بماأن معامل القدرة متقدم ، إذن التيار سيكون متقدم عن الجهد بزاوية θ

$$\theta = \text{Cos}^{-1}(0.8) = 36.87^{o}$$

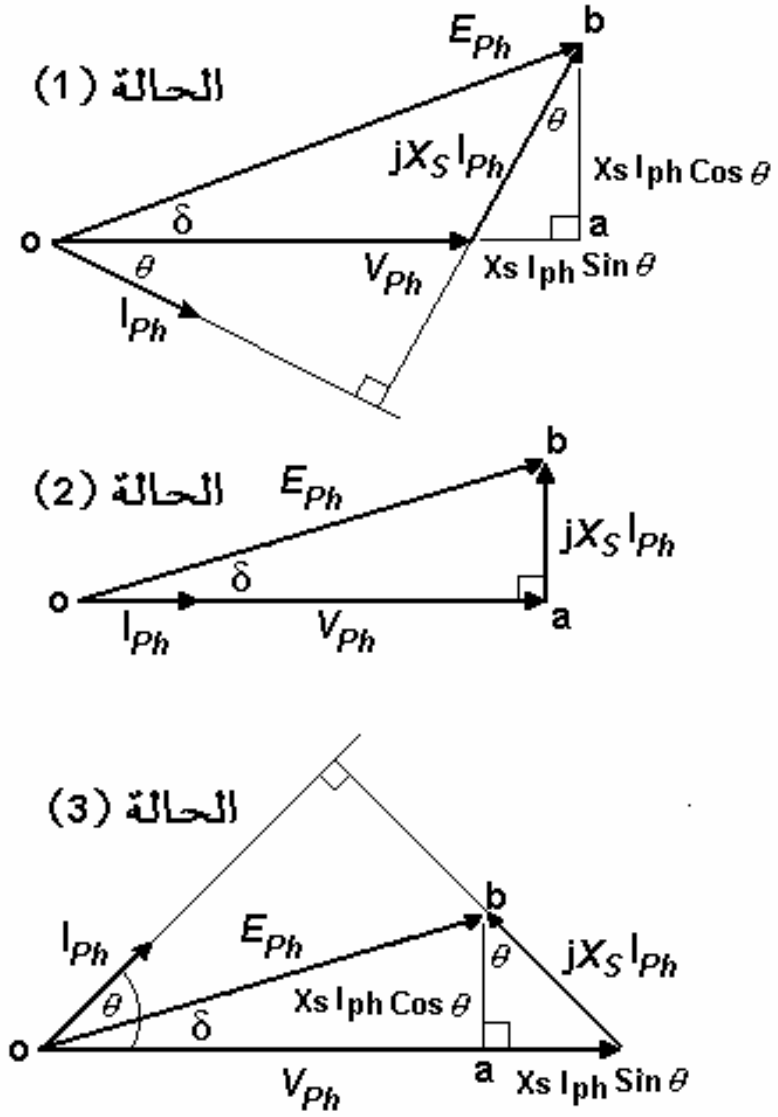
في هذا المخطط الاتجاهي جهد الأطراف V_{Ph} مجهول و E_{Ph} يساوي 277 V

بالرجوع إلى المخطط الاتجاهي وباعتبار المثلث القائم الزاوية oab يمكن حساب جهد الأطراف كما يلي:

$$E_{Ph}^2 = (V_{Ph} - X_S I_{Ph} Sin\,\theta)^2 + (X_S I_{Ph} Cos\,\theta)^2$$
$$(277)^2 = (V_{Ph} - 1.0 \times 60 \times Sin\,36.87)^2 + (1.0 \times 60 \times Cos\,36.87)^2$$
$$76729 = (V_{Ph} - 36)^2 + 2304$$
$$74425 = (V_{Ph} - 36)^2$$
$$272.8 = V_{Ph} - 36$$
$$V_{Ph} = 308.8 \quad \text{V}$$

وحيث أن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

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



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

جـ) لحساب الكفاءة يجب حساب القدرة الخارجة والداخلة والمفقودة كما يلي:

القدرة الخارجة من المولد عند الحمل الكامل (60 A) و معامل قدره 0.8 متخلف

$$P_{out} = \sqrt{3}\, V_L I_L PF$$
$$= \sqrt{3} \times 410 \times 60 \times 0.8 = 34.1 \quad \text{kw}$$

القدرة الداخلة إلى المولد:

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

المفاقيد النحاسية في ملفات المنتج P_{Cu1} مهملة بسبب إهمال مقاومة ملفات العضو الثابت

إذن:

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

إذن كفاءة المولد هي:

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

د) العزم الداخل إلى المولد يحسب كما يلي:

$$T_{inp} = \frac{P_{inp}}{\omega_m}$$

$$\omega_m = \frac{n\,2\pi}{60} = \frac{1200 \times 2\pi}{60} = 125.7 \quad \text{rad/sec}$$

$$T_{inp} = \frac{36.6 \times 10^3}{125.7} = 191.2 \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

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) :

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

أسئلة وتمارين

١- لماذا يفضل ربط المولدات التزامنية على التوازي؟

٢- ما هي شروط ربط المولدات التزامنية على التوازي؟

٣- ما هي مخاطر توصيل المولد التزامني على التوازي مع عدم تحقق شرط أو أكثر من شروط التزامن؟

٤- ما لمقصود بالقضيب اللانهائي؟

٥- بعد توصيل المولد بالقضيب اللانهائي ، هل يمكن التحكم بسرعة المولد؟

٦- بعد توصيل المولد بالقضيب اللانهائي، هل القدرة تنتقل من المولد إلى القضيب أو العكس؟

٧- متى تفقد الآلة التزامن؟

٨- مولد تزامني ثلاثي الأوجه 10 MW ملفاته موصلة على شكل نجمة ، جهد الأطراف له 11 kV والتردد 60 Hz ،المفاعلة التزامنية له 0.66 Ω ومقاومة ملفات المنتج 0.1 Ω ، احسب الجهد الداخلي E_{Ph} عند الحمل الكامل و معامل قدره 0.85 متخلف

٩- مولد تزامني ثلاثي الأوجه 180 kVA ملفاته موصلة على شكل دلتا ، جهد الأطراف له 220 V والتردد 50 Hz ،المفاعلة التزامنية له 0.07 Ω و مقاومة ملفات المنتج 0.016 Ω ، احسب الجهد الداخلي E_{Ph} عند الحمل الكامل و معامل قدره :

أ) 0.72 متخلف ، ب) 0.72 متقدم ، جـ) مساوي للواحد

١٠- مولد تزامني ذو قطبين ملفاته موصلة على شكل نجمة ، جهد الأطراف له 2300 V والتردد 60 Hz، اختبار الدائرة المفتوحة له أعطى القراءات الموضحة في الجدول التالي:

E_{Ph}	600	1200	1800	2230	2520	2700	2800	2850
I_F	1	2	3	4	5	6	7	8

المفاعلة التزامنية له Ω 1.1 ومقاومة ملفات المنتج Ω 0.15 ، عند الحمل الكامل يعطي تياراً قدره A 250 عند معامل قدره 0.8 متخلف ، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك kw 24 و المفاقيد الحديدية kw 18 عند الحمل الكامل ، احسب ما يلي:

أ) ارسم منحنى الدائرة المفتوحة للمولد

ب) كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يكون جهد الأطراف V 2300 بدون حمل

جـ) إذا كان المولد يغذي حملاً بتيار قدره A 250 عند معامل قدره 0.85 متخلف ، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يحافظ على جهد الأطراف عند V 2300

د) احسب القدرة الداخلة إلى المولد

هـ) افترض أن المولد يغذي حملاً بتيار قدره A 250 عند معامل قدره 0.8 متقدم ، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يبقى جهد الأطراف عند V 2300

١١- مولد تزامني ذو أربعة أقطاب ملفاته موصلة على شكل دلتا جهد الأطراف له V 280 عند تردد Hz 60 ، المفاعلة التزامنية Ω 1.05 لكل وجه و مقاومة ملفات المنتج مهملة ، تيار الحمل الكامل له A 100 عند معامل قدره 0.78 متخلف ، مفاقيد الاحتكاك kw 1.75 والمفاقيد الحديدية kw 1.2 عند الحمل الكامل ، تيار المجال ضبط بحيث يكون جهد الأطراف V 280 عند عدم الحمل . احسب ما يلي:

أ) ما هي سرعة دوران هذا المولد

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

١ - معامل القدرة 0.78 متخلف

٢ - معامل القدرة 1.0

٣ - معامل القدرة 0.78 متقدم

جـ) احسب كفاءة المحرك عند الحمل الكامل إذا كان معامل القدرة 0.78 متخلف

د) احسب العزم الداخل إلى المولد

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

آلات التيـــار المتردد

المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الجدارة: الإلمام الشامل بكيفية تشغيل وأداء المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه و تطبيقاتها

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

١. الإلمام بنظرية عمل المحركات التزامنية.
٢. الإلمام بطرق بدء حركة المحركات التزامنية.
٣. فهم كيفية التحكم في معمل القدرة ومنحنيات (V) للمحرك التزامني
٤. الإلمام بكيفية استخدام المحرك التزامني كمكثف تزامني
٥. إجراء الحسابات الفنية المتعلقة بتشغيل المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه.
٦. حساب القدرة والعزم والكفاءة للمحركات التزامنية.
٧. فهم كيفية سلوك المحرك التزامني عند تغير الحمل أو تيار المجال
٨. رسم المخطط الاتجاهي وكيفية استخدامه للتحكم في هذه المحركات.

الوقت المتوقع للتدريب: ٤ ساعات

الوسائل المساعدة: التجربة العملية رقم ١٠ في الوحدة التدريبية الرابعة من هذه الحقيبة

متطلبات الجدارة: يجب أن يكون المتدرب قد أتم دراسة الوحدة التدريبية الثانية في هذه الحقيبة (المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه)

هذه الوحدة تحتوي على فصل وحيد يشمل كل ما يحتاج المتدرب معرفته عن المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه وفي نهايتاً أدرج عدد من الأمثلة الحسابية المحلولة حلاً مفصلاً بالإضافة إلى مجموعة من الأسئلة والتمارين التي تم اختيارها بعناية لتكن بمثابة قياس لفهم و استيعاب المتدرب لهذه الوحدة.

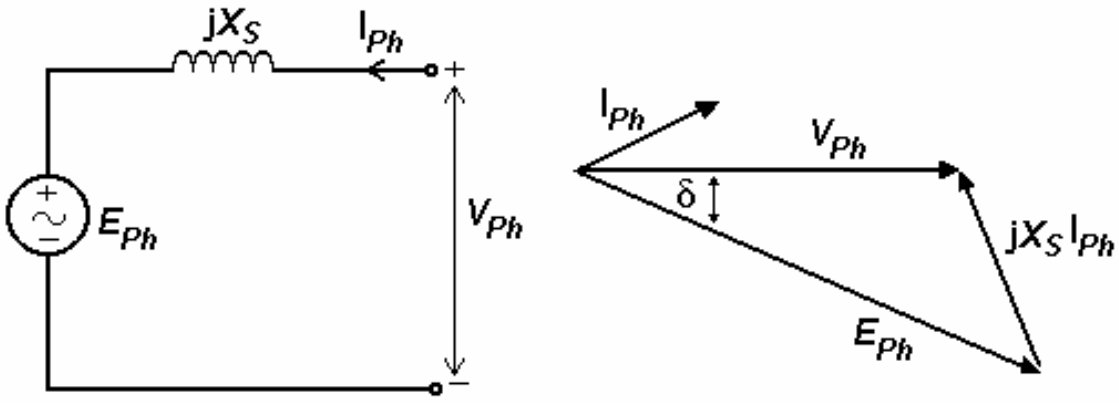
الوحدة الثالثة : المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

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 ولأخر 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 داخلة إلى الآلة.

جميع العلاقات الرياضية الخاصة بالمولد التزامني تنطبق تماماً على المحرك التزامني مع الأخذ بالاعتبار 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:

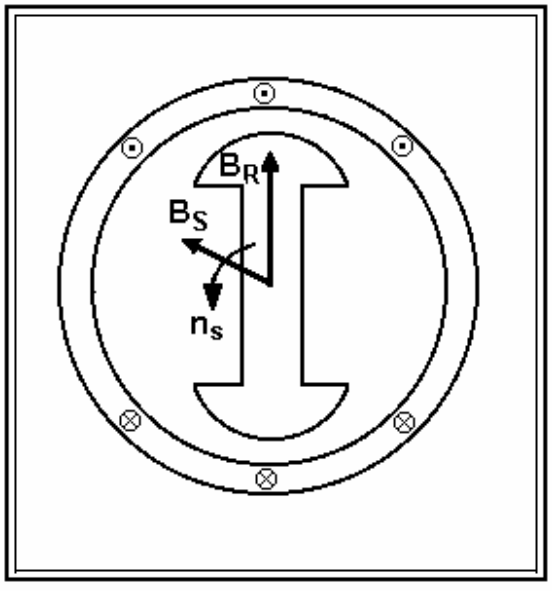
$$E_{Ph} = V_{Ph} - jX_S I_{Ph} \qquad (1-3)$$



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

كيفية عمل المحرك التزامني

لكي نفهم كيف يعمل المحرك التزامني ، انظر الشكل (٢ -٣) حيث يوضح محرك تزامني ذي قطبين. عندما تغذى ملفات المجال بالتيار المستمر سيتولد مجالاً مغناطيسياً ثابتاً 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 مجالين مغناطيسيين 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 ـ تماماً كما يحدث عندما يوضع قطعتان من المغناطيس قرب بعضهما ـ 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 أيجاد وسيلة تجعل العضو الدوار يحافظ على الزاوية بين مجاله ومجال العضو الثابت ، 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) باللحاق 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 $\delta > -90$) فإن العضو الدوار سيفقد التزامن ويبدأ بالتباطؤ التدريجي حتى يتوقف.



شكل رقم ٢ -٣: المجالات المغناطيسية في المحرك التزامني

طرق بدء حركة المحرك التزامني

١ - باستخدام محرك خارجي

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 المقنن ما لم يفقد التزامن.

٢ - باستخدام قضبان تخميد

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 صفر, 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 تزامنيه 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. هذه الطريقة مناسبة للمحركات التزامنية الصغيرة.

٤ - باستخدام مصدر جهد متغير التردد

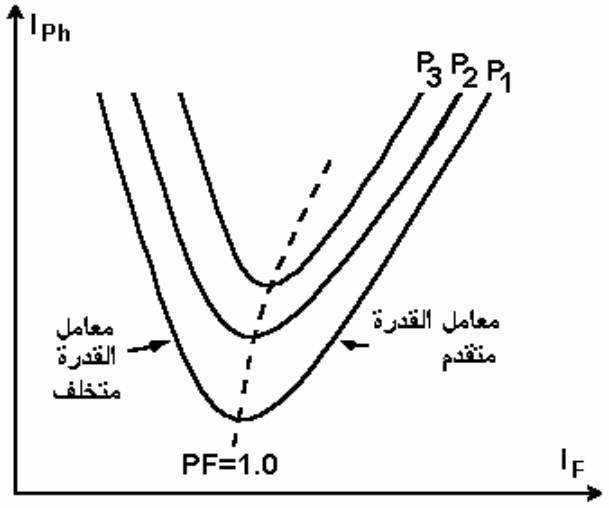
يمكن بدء دوران المحرك التزامني بسهولة إذا كان يغذى من مصدر جهد متغير التردد والذي بدأ ينتشر في السنوات الأخير بفضل التقدم في تقنية إلكترونيات القدرة وذلك بخفض التردد إلى أن تصبح سرعة المجال المغناطيسي الدور قليلة جداً بحيث يتمكن العضو الدوار من أن يعلق به ، وعندما يبدأ العضو

الدوار بالدوران يرفع التردد تدريجياً حتى يصل المحرك إلى السرعة المطلوبة. وسيستمر العضو الدوار بالدوران 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 عالي على أطراف ملفات المجال قد يؤدي إلى انهيار العازل أو حدوث شرارة بين حلقات الانزلاق.

منحنيات (V) للمحرك التزامني

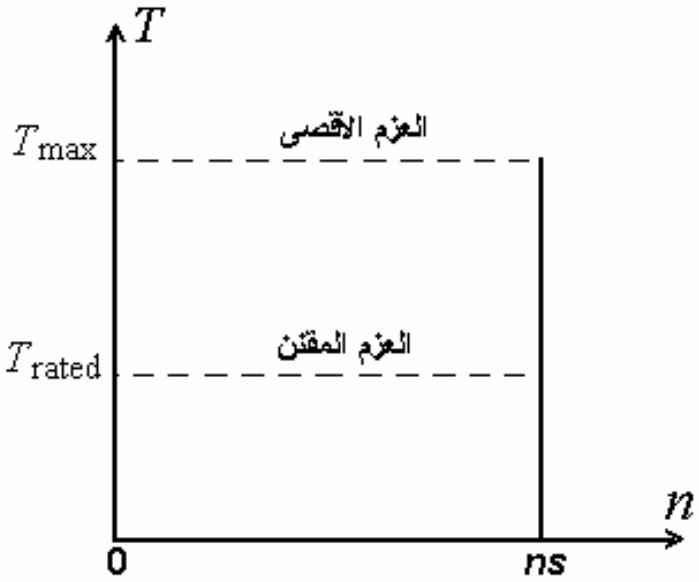
هي منحنيات تحدد خواص تشغيل المحرك التزامني وتربط بين تيار المجال I_F وتيار المنتج I_{Ph} انظر الشكل (٣ -٣), وكل منحنى يمثل مستوى محدد من القدرة الفعالة P , في كل منحنى أقل قيمة لتيار المنتج تحدث عندما يكون معامل القدرة مساوي للواحد وعند هذه القيمة لتيار المجال المحرك مستهلك للقدرة الفعالة P فقط ، وعند أي قيمة أقل من هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلك للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى القدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متخلف ، بينما عندما يكون تيار المجال أكبر من هذه القيمة يكون المحرك معطي للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى استهلاكه للقدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متقدم في هذه الحالة. وهذا يعني أنه يمكننا بالتحكم في تيار المجال بحيث نجعل المحرك التزامني أما مستهلك للقدرة غير الفعالة أو مزود للشبكة بالقدرة غير الفعالة أي أن المحرك التزامني يمكن أن يعمل كأنه ملف أو مكثف.



شكل رقم ٣ -٣: منحنيات V للمحرك التزامني

منحنى العزم / السرعة للمحرك التزامني

المحرك التزامني عادةً يدير أحمال تتطلب سرعة ثابتة وغالباً يتم تغذيته من مصدر كهربائي ضخم بحيث يظهر بالنسبة للمحرك كأنه قضيب لا نهائي ، هذا يعني أن جهد الأطراف للمحرك وتردد المصدر لا يمكن أن يتغيرا مهما تغيرت القدرة المسحوبة من المصدر بواسطة المحرك، و بمأن سرعة المحرك مرتبطة بتردد المصدر فهذا يعني أن سرعة المحرك لن تتغير مهما تغير الحمل المسلط عليه ما دام أنه ضمن الحمل المقنن للمحرك ، وعليه فإن عزم المحرك سيبقى ثابتاً عند السرعة التزامنية مهما تغير الحمل ما دام أنه ضمن الحمل المقنن للمحرك كما هو موضح في الشكل التالي:



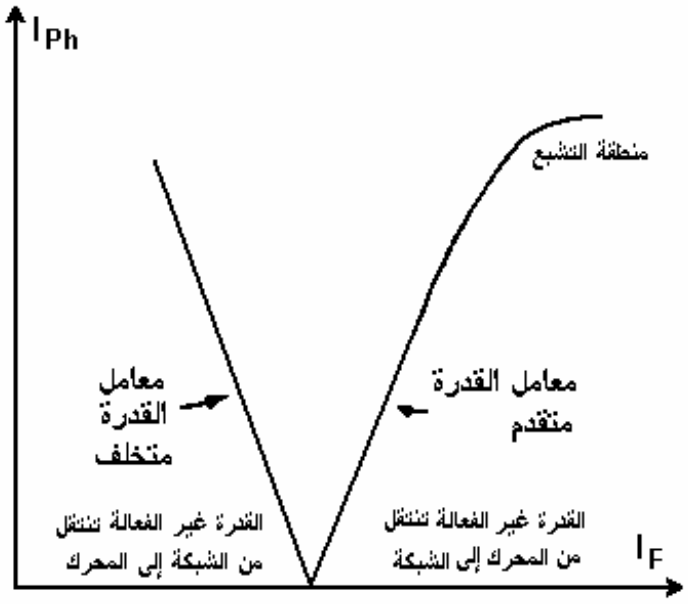
شكل رقم ٤ -٣: منحنى العزم / السرعة للمحرك التزامني

استخدامات المحرك التزامني

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

المكثف التزامني

من التطبيقات الهامة للمحرك التزامني استخدامه كمكثف تزامني وذلك من أجل تحسين معامل القدرة, ولهذا الغرض يصنع المحرك التزامني بدون عمود خارج منه وذلك لأنه يعمل بدون حمل, من أجل ذلك يزاد تيار المجال إلى قيمة معينه بحيث يتقدم تيار المنتج على جهد الأطراف بزاوية قريبة من ٩٠ درجة وهذا يجعله يظهر على الشبكة كأنه مكثف. الشكل (٥ -٣) يبين منحنى **V** للمحرك التزامني عندما يعمل كمكثف تزامني. وما زال المكثف التزامني يوجد منه أعداد كبيرة تحت الخدمة في الأنظمة الكهربائية القديمة ، أما في الوقت الحاضر فقد بدأ يقل استخدامه لهذا الغرض ويستخدم بدلاً منه المكثفات الساكنة static capacitors التي احتلت مكانه سريعاً وذلك لقلة ثمنها وقلة متطلبات الصيانة.

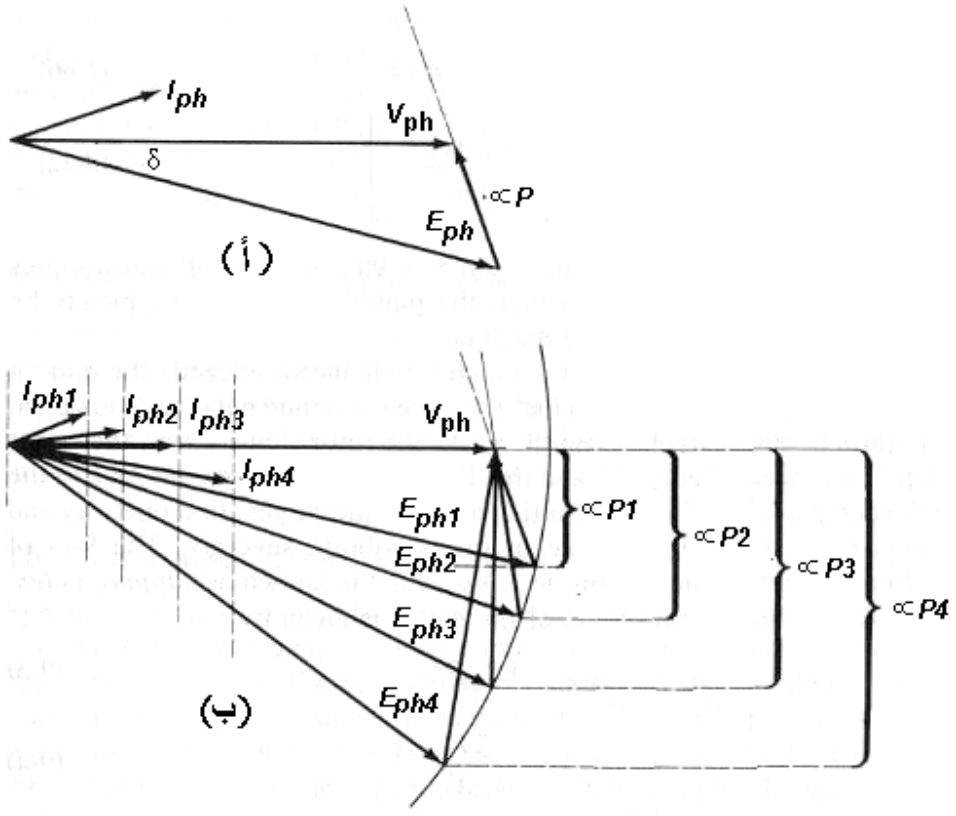


شكل رقم ٥ -٣: منحنى V للمكثف التزامني

سلوك المحرك التزامني في حالة تغيير الحمل مع ثبات تيار المجال:

عندما يدار حمل ما بمحرك تزامني فإن المحرك سوف ينتج ما يكفي من العزم لكي يحافظ على سرعة دورانه عند السرعة التزامنية ، ولكن ماذا يحدث عندما يتغير الحمل؟

لكي نفهم ما يحدث عند تغير الحمل ، افترض أن لمحرك يعمل عند معامل قدره متقدم كما هو موضح في الشكل(٦ -٣)أ ، فإذا ازداد الحمل على العمود فإن سرعة المحرك ستقل ونتيجة لذلك زاوية العزم (δ) سوف تزداد وبالتالي سوف يزداد العزم المتولد طبقاً للمعادلة (١٦ -٢) والذي بدوره سيزيد من سرعة العضو الدوار إلى أن يصل إلى السرعة التزامنية مرة أخرى ولكن عند زاوية عزم (δ) أكبر ، مما يعني استهلاك قدره أكبر ، وهكذا كلما ازداد الحمل على المحرك كما هو واضح من المخطط الاتجاهي في الشكل (٦ -٣) ب ، ويحدث العكس تماماً عندما يقل الحمل على المحرك ، مع ملاحظة أن قيمة E_{Ph} تبقى ثابتة دائماً بسبب عدم تغير قيمة تيار المجال و في المخطط الاتجاهي يتحرك متجهاً E_{Ph} راسماً دائرة هو يمثل نصف قطرها ، والمثال التالي يوضح هذا السلوك للمحرك التزامني.



شكل رقم ٦ -٣: تأثير التغير في الحمل على سلوك المحرك التزامني

مثال(١ -٣):

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

أ) ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

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

جـ) عندما يزداد الحمل إلى 30 hp وضح سلوك المحرك باستخدام المخطط الإتجاهي

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

هـ) احسب معامل القدرة بعد زيادة الحمل

الحـل:

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

ب) القدرة الميكانيكية الخارجة من المحرك بالكيلو وات هي:

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

أما القدرة الكهربائية الداخلة إلى المحرك فهي:

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

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

وبالتالي يمكن حساب تيار الخط كما يلي:

$$I_{Line} = \frac{P_{inp}}{\sqrt{3}\, V_{Ph} Cos\ \theta}$$

$$= \frac{13.69 \times 10^3}{\sqrt{3}(208)(0.8)} = 47.5 \quad \text{A}$$

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

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

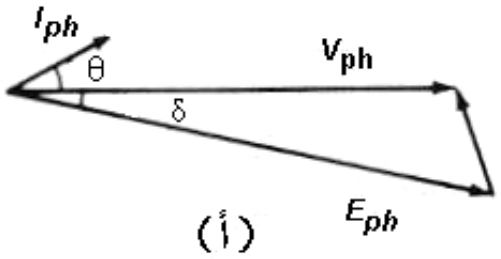
و بماأن المحرك يعمل عند معامل قدره متقدم فإن زاوية تيار الوجه تصبح كما يلي:

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

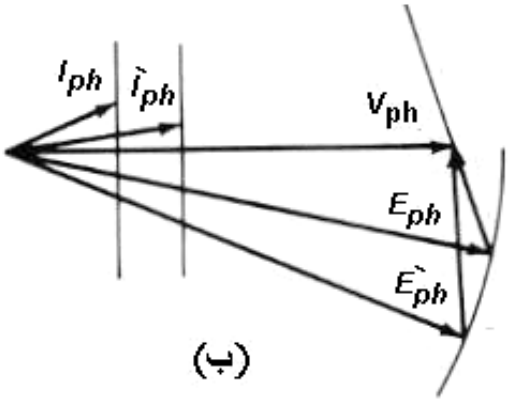
أما E_{Ph} فيمكن حسابه مباشرة بتطبيق المعادلة (١ -٣) كما يلي:

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

جـ) عند زيادة الحمل إلى 30 hp فإن العضو الدوار سيتباطئ قليلاً وعندها تزداد الزاوية (δ) بين المجالين مما يعني ازدياد عزم المحرك لكي تصل سرعته إلى وضعها السابق وهذا يعني انفراج الزاوية بين V_{Ph} و E_{Ph} كما هو موضح في المخطط الاتجاهي في الشكل (٧ -٣)ب.



(أ)



(ب)

شكل رقم (٧ -٣) المخطط الاتجاهي للمحرك التزامني في حالات تحميل مختلفة (المثال ٣ -١)

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

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

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

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:

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

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

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

وبالتالي يمكن إيجاد تيار المنتج I_{Ph} من المعادلة (١ -٣) كما يلي:

$$\begin{aligned}I_{Ph} &= \frac{V_{Ph}-E_{Ph}}{jX_S}\\ &= \frac{208\angle 0^\circ - 255\angle -23}{j2.5}\\ &= \frac{103.1\angle 105^\circ}{j2.5} = 41.2\angle 15^\circ \quad \text{A}\end{aligned}$$

وبالتالي يكون تيار الخط كما يلي:

$$I_{Line} = \sqrt{3}\, I_{Ph} = \sqrt{3}\times 41.2 = 71.4 \quad \text{A}$$

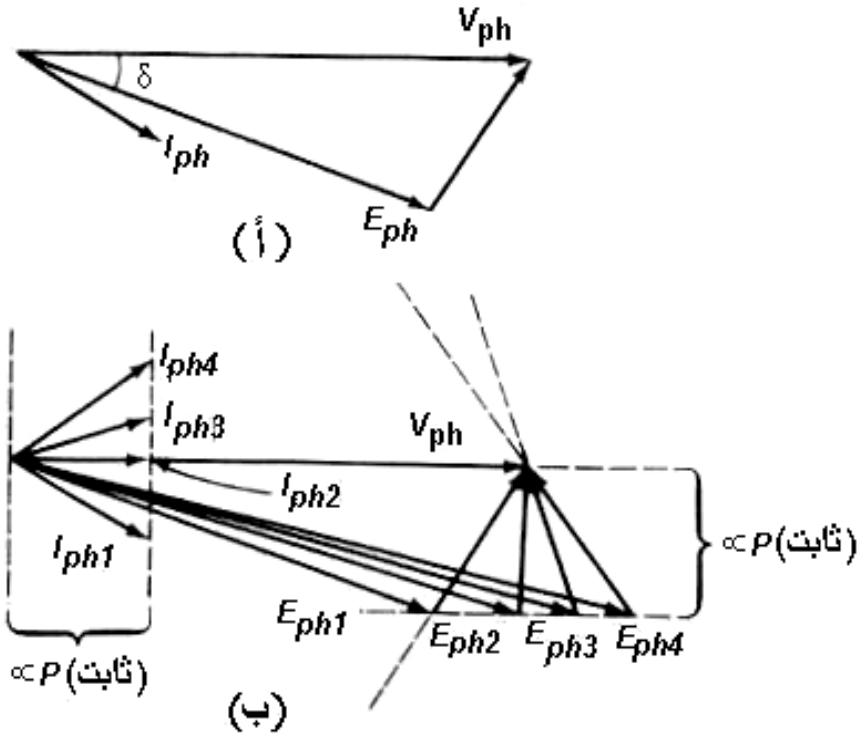
هـ) معامل القدرة بعد زيادة الحمل هو:

$$PF = Cos\ (15^\circ) = 0.966$$

سلوك المحرك التزامني في حالة تغيير تيار المجال:

لكي يتضح تأثير التغير في تيار المجال على سلوك المحرك التزامني. افترض أن محركاً تزامنياً يعمل عند معامل قدره متخلف كما هو موضح في الشكل (٨ -٣) أ ، عند زيادة تيار المجال I_F فإن E_{Ph} سيزداد أما سرعة الدوران و عزم المحرك فلن يتغير ، هذا يعني أنه كلما زادت قيمة I_F فإن E_{Ph} سيزداد مع ثبات القدرة الخارجة من المحرك، وعليه فإن زيادة E_{Ph} تعني النقص في قيمة I_{Ph} أولاً ثم يزداد بعد ذلك كما هو موضح في الشكل (٨ -٣)ب.

ويلاحظ أنه عند القيم المنخفضة للجهد الداخلي E_{Ph} تيار المنتج سيكون متخلف وبالتالي نجد أن المحرك يعمل كأنه حمل حثي Inductive Load بينما عند القيم المرتفعة للجهد الداخلي E_{Ph} تيار المنتج سيكون متقدم وبالتالي نجد أن المحرك يعمل كأنه حمل سعوي Capacitive Load ، هذا السلوك للمحرك التزامني موضح في المثال (٢ -٣).



شكل رقم (٨ -٣) تأثير التغير في تيار المجال على سلوك المحرك التزامني

مثال(٢ -٣):

افترض أن المحرك التزامني في المثال السابق يدير حملاً قدره 15 hp عند معامل قدره 0.85 متخلف ، أوجد ما يلي:

أ) ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

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

جـ) إذا زيد تيار المجال بنسبة ٢٥٪ وضح سلوك المحرك باستخدام المخطط الاتجاهي ثم أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} ، I_{Line} بعد زيادة تيار المجال

د) احسب معامل القدرة بعد زيادة تيار المجال

الحـل:

أ) المخطط الاتجاهي موضح في الشكل (٩ -٣)

ب) من المثال السابق القدرة الكهربائية الداخلة 13.69 kw و بماأن المحرك يعمل عند معامل قدره 0.85 متخلف ، إذن يمكن إيجاد تيار الخط كما يلي:

$$I_{Line} = \frac{P_{inp}}{\sqrt{3}\, V_{Ph} Cos\ \theta}$$

$$= \frac{13.69 \times 10^3}{\sqrt{3}(208)(0.85)} = 44.7 \quad A$$

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

$$I_{Ph} = \frac{I_{Line}}{\sqrt{3}} = \frac{44.7}{\sqrt{3}} = 25.8 \ A$$

و بماأن المحرك يعمل عند معامل قدره متخلف فإن زاوية تيار الوجه تصبح كما يلي:

$$I_{Ph} = 25.8\angle -31.8° \quad A$$

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

$$\begin{aligned} E_{Ph} &= V_{Ph} - jX_S I_{Ph} \\ &= 208\angle 0° - (j2.5)(25.8\angle -31.8°) \\ &= 208\angle 0° - 64.5\angle 58.2° \\ &= 174 - j54.8 = 182\angle -17.5° \end{aligned}$$

جـ) إذا ازداد تيار المجال I_F بنسبة ٢٥٪ فإن الفيض المغناطيسي سيزداد بنفس النسبة وبالتالي الجهد الداخلي E_{Ph} سيزداد بنفس النسبة كما يلي:

$$\begin{aligned} E'_{Ph} &= 1.25\, E_{Ph} \\ &= 1.25\,(182) = 227.5 \quad \text{V} \end{aligned}$$

ومع زيادة E_{Ph} إلا أن القدرة الخارجة من المحرك تبقى ثابتة و تتناسب مع طول ($E_{Ph} Sin\ \delta$) كما هو موضح في الشكل (٩ -٣).

بماأن طول ($E_{Ph} Sin\ \delta$) يبقى ثابت قبل زيادة تيار المجال وبعد ذلك ، لذا يمكننا حساب زاوية العزم الجديدة كما يلي:

$$\begin{aligned} E_{Ph}\ Sin\ \delta &= E'_{Ph}\ Sin\ \delta' \\ \delta' &= Sin^{-1}\left(\frac{E_{Ph}}{E'_{Ph}}\ Sin\ \delta\right) \\ &= Sin^{-1}\left(\frac{182}{227.5}\ Sin\ (-17.5)\right) \\ &= Sin^{-1}(-0.24) = -13.9° \end{aligned}$$

وبالتالي يمكن إيجاد تيار المنتج I_{Ph} من المعادلة (١ -٣) كما يلي:

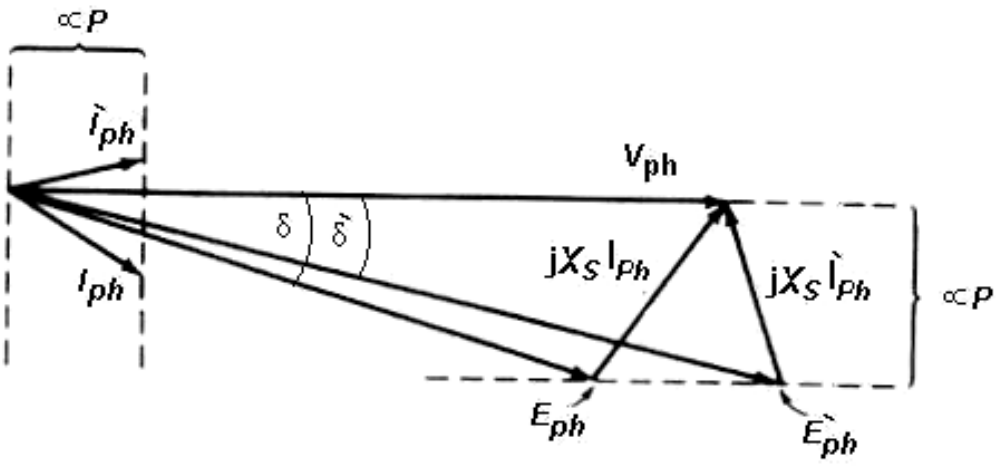
$$I_{Ph} = \frac{V_{Ph} - E_{Ph}}{jX_S}$$
$$= \frac{208\angle 0° - 227.5\angle -13.9°}{j2.5}$$
$$= \frac{56.2\angle 103.2°}{j2.5} = 22.5\angle 13.2° \quad A$$

وبالتالي يكون تيار الخط كما يلي:

$$I_{Line} = \sqrt{3}\, I_{Ph} = \sqrt{3} \times 22.5 = 38.97 \quad A$$

د) معامل القدرة بعد زيادة تيار المجال هو:

$$PF = Cos\ (13.2°) = 0.974$$



شكل رقم ٩ -٣: المخطط الاتجاهي للمحرك التزامني في حالة تغير تيار المجال (المثال ٢ -٣)

أســئلة وتمـارين

١- كيف يعمل المحرك التزامني؟

٢- لماذا المحرك التزامني لا يستطيع البدء من تلقاء نفسه؟

٣- قارن بين طرق بدء المحرك التزامني من حيث: سهولة الاستخدام - التكلفة

٤- لماذا يجب قصر ملفات المجال أثناء عملية البدء؟

٥- اشرح كيف يمكن تغيير معامل القدرة للمحرك التزامني من متقدم إلى متخلف أو العكس دون حدوث تغير في القدرة الخارجة منه

٦- متى يفضل استخدام المحرك التزامني على الحثي؟

٧- ماذا يعني فقد التزامن بالنسبة للمحرك التزامني؟

٨- قارن بين المحرك الحثي و التزامني من حيث : التكلفة - طرق البدء - السرعة - العزم

٩- محرك تزامني ملفاته موصلة على شكل نجمة ، جهد الخط للمصدر 360 V والتردد 50 Hz ، الممانعة التزامنية له 2.1 Ω ومقاومة ملفات المنتج مهملة ، المفاقيد الحديدية 960 W و مفاقيد الاحتكاك 1420 W ، يدير حملاً قدره 11 kw عند معامل قدره 0.8 متقدم ، أوجد ما يلي:

أ) ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

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

جـ) عندما يزداد الحمل إلى 18 kw وضح سلوك المحرك باستخدام المخطط الإتجاهي

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

هـ) احسب معامل القدرة بعد زيادة الحمل

١٠- محرك تزامني ملفاته موصلة على شكل دلتا ، يغذى من مصدر جهده 480 V ، الممانعة التزامنية له 1 Ω ومقاومة ملفات المنتج مهملة ، المفاقيد الحديدية و مفاقيد الاحتكاك مهملة أيضا. أوجد ما يلي:

أ) إذا كان يدير حملاً قدره 400 hp عند معامل قدره 0.85 متقدم ، أوجد قيمة وزاوية كل من E_{Ph} ، I_{Ph}

ب) إذا زيد تيار المجال بنسبة ١٠٪ وضح سلوك المحرك باستخدام المخطط الاتجاهي ثم أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} وكذلك معامل القدرة الجديد.

المراجع والمصادر

- Electric Machinery Fundamentals, Stephen J . Chapman, McGRAW-Hill, 1991.
- An Introduction to Electrical Machines and Transformers, George McPherson, John Wiley & Sons, 1981.
- Electric Machines, M . S . Sarma, West Publishing Company, 1994.
- Electrical Technology, B . L . Theraja and A . K . Theraja, Nirja Construction & Development, 1989.

المحتويات

مقدمه .....
تمهيد .....
الوحدة الأولى : المحركات الحثية ثلاثية الأوجه ٣
الفصل الأول : التركيب ونظرية العمل ٣
تمهيد : ٣
تركيب المحرك الحثي ٣
المجال المغناطيسي الدوار ٨
كيفية عمل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه ١٠
مفهوم الانزلاق ١٢
تردد الجهود والتيارات في العضو الدوار ١٣
أمثلة محلولة : ١٤
أسـئلة و تمارين ١٦
الفصل الثاني : الدائرة المكافئة ١٧
تعيين ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية ٢٠
اختبار عدم الحمل No load Test: ٢٠
اختبار عدم الحركة Locked Rotor Test: ٢٢
اختبار التيار المستمر DC Test: ٢٣
أمثلة محلولة ٢٤
أسـئلة و تمارين ٢٩
الفصل الثالث : القدرة و العزم ٣٠
أولاً : القدرة في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه ٣٠
أمثلة محلولة : ٣٣
ثانياً : العزم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه ٣٦
التحكم في موضع العزم الأقصى: ٣٨
أمثلة محلولة : ٤٠
أسـئلة و تمارين ٤٣
الفصل الرابع : طرق بدء الحركة والتحكم في السرعة ٤٦
طرق بدء الحركة ٤٦
التحكم في السرعة ٥١
٢ـ تغيير عدد الأقطاب: ٥٢
أسـئلة وتمارين ٥٥

الوحدة الثانية : المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه ٥٨
الفصل الأول : التركيب - نظرية العمل – الدائرة المكافئة– المنحنيات المُمَيِّزة ٥٨
تركيب الآلة التزامنية ثلاثية الأوجه ٥٨
كيفية عمل المولد التزامني ٦١
الدائرة المكافئة للآلة التزامنية ٦٢
المخطط الاتجاهي للآلة التزامنية ٦٦
اختبارات الآلة التزامنية ٦٧
حساب المفاعلة التزامنية باستخدام منحنيي الدائرة المفتوحة (O.C.C) والقصر (S.C.C) ٧٠
معامل تنظيم الجهد ٧١
أسئلة وتمارين ٧٢
الفصل الثاني : القدرة والعزم – التشغيل المتوازي ٧٣
القدرة والعزم في الآلة التزامنية ٧٣
تشغيل المولدات التزامنية على التوازي ٧٥
توصيل المولدات التزامنية إلى قضبان لا نهائية ٧٦
أمثلة محلولة : ٧٩
أسئلة وتمارين ٨٧
الوحدة الثالثة : المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه ٩١
التركيب ٩١
كيفية عمل المحرك التزامني ٩٢
طرق بدء حركة المحرك التزامني ٩٣
منحنيات (V) للمحرك التزامني ٩٤
منحنى العزم / السرعة للمحرك التزامني ٩٥
استخدامات المحرك التزامني ٩٦
المكثف التزامني ٩٦
سلوك المحرك التزامني في حالة تغيير الحمل مع ثبات تيار المجال : ٩٧
سلوك المحرك التزامني في حالة تغيير تيار المجال : ١٠١
أسـئلة وتمـارين ١٠٥
المراجع و المصادر ١٠٥

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS