المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تخصص قوى كهربائية

آلات التيار المتردد

٢١٨ كهر

طبعة ١٤٢٩ هـ

مقدمة

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

تسعى المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني 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 للتدريب التقني والمهني 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 تخصص " **قوى كهربائية**" في الكليات 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 حقيبة آلات التيار المتردد لشعبة القوي الكهربائية، وهي تهدف إلى تعريف المتدرب نظرية عمل وخواص وتركيب آلات التيار المتردد الشائعة الاستخدام كالمحركات الحثية والآلات التزامنية سواء أكانت مولدات أو محركات، كذلك تهدف إلى تعريف المتدرب تطبيقات واستخدامات هذه الآلات في الصناعة، كما تهدف أيضاً إلى تدريب المتدرب على كيفية قياس خواص هذه الآلات وتحديد مدى تشغيلها وكذلك تدريبه على إجراء الحسابات المتعلقة بتلك الآلات، وهذه الحقيبة تشتمل على وحدتين تدريبيتين رئيستين، وهما:

- الوحدة الأولى: المحركات الحثية ثلاثية وأحادية الأوجه.
- الوحدة الثانية: الآلات التزامنية ثلاثية الأوجه.

آلات التيار المتردد

المحركات الحثية

المحركات الحثية

Induction Motors

الجدارة: معرفة أنواع وتركيب ونظرية عمل وخواص المحركات الحثية ثلاثية وأحادية الأوجه وطرق بدء حركتها واستخداماتها.

.

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

١. الإلمام بأنواع وتركيب واستخدامات المحركات الحثية
٢. الإلمام بكيفية توليد المجال المغناطيسي الدوار في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
٣. فهم نظرية عمل المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
٤. الإلمام بخواص المحركات الحثية ثلاثية الأوجه
٥. إجراء الاختبارات على المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
٦. حساب ثوابت الدائرة المكافئة للمحركات.الحثية ثلاثية الأوجه.
٧. الإلمام بكيفية حساب القدرة والعزم والكفاءة.
٨. الإلمام بكيفية التحكم في سرعة المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
٩. الإلمام بطرق بدء الحركة للمحركات الحثية ثلاثية الأوجه.
١٠. الإلمام بأنواع وخواص وتطبيقات المحركات الحثية أحادية الوجه.
١١. معرفة تركيب وكيفية عمل الأنواع المختلفة من المحركات الحثية أحادية الوجه.
١٢. فهم كيفية تحليل المجال المغناطيسي إلى مجالين دوارين كأساس لحساب العزم المتولد في المحركات الحثية أحادية الوجه.
١٣. معرفة استخدامات المحركات الحثية أحادية الوجه.
١٤. التمييز بين الطرق المختلفة لبدء حركة المحركات الحثية أحادية الوجه ومميزات كل منها.
١٥. معرفة منحنيات الخواص لأنواع المحركات الحثية أحادية الوجه.

الوقت المتوقع للتدريب: ٢٦ ساعة.

الوسائل المساعدة: التجارب المعملية المتعلقة بهذه الوحدة في حقيبة مختبر الآلات الكهربائية

متطلبات الجدارة: يجب أن يكون المتدرب قد أتم دراسة حقيبة آلات التيار المستمر والمحولات لشعبة القوي الكهربائية، وحقيبة الدوائر الكهربائية- ٢.

المحركات الحثية
Induction Motors

المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : Three Phase Indution Motors:

تمهيد :

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

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

ومن عيوب هذا المحرك:

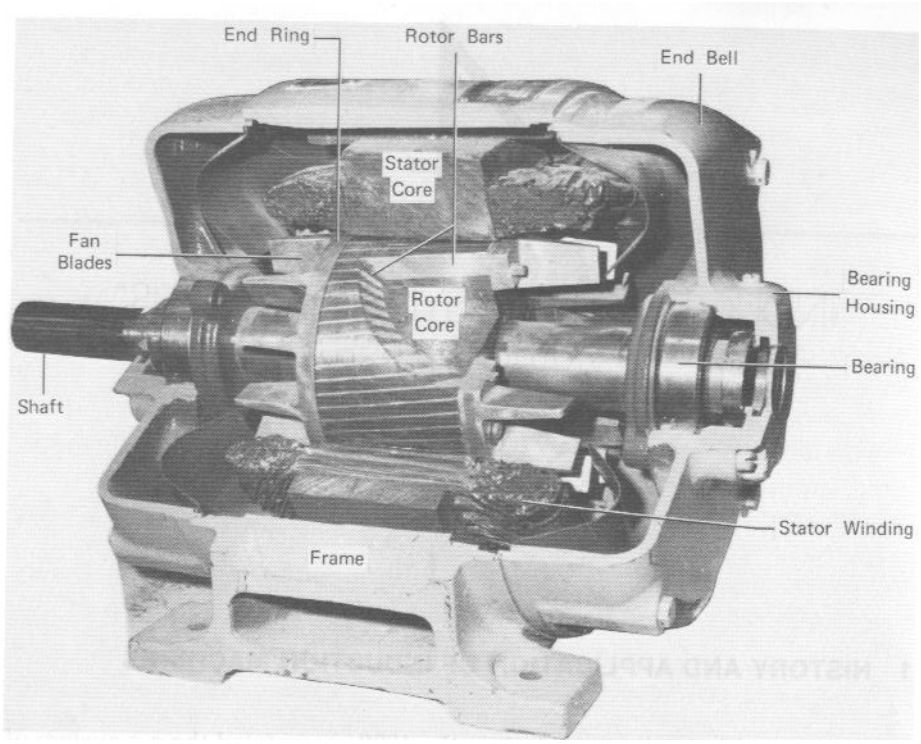
- صعوبة التحكم في سرعته.
- تيار البدء لهذا المحرك عالٍ (٥- ٧) أضعاف تيار الحمل الكامل)
- معامل القدرة منخفض عند الأحمال الخفيفة.

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

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

١- ١ تركيب المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

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



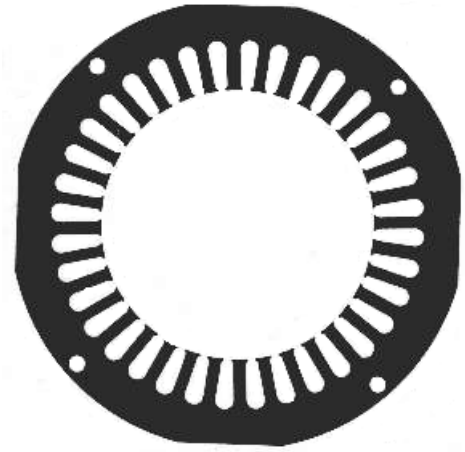
شكل ١- ١: مقطع في محرك حثي ثلاثي الأوجه

١- ١- ١ تكوين العضو الثابت:

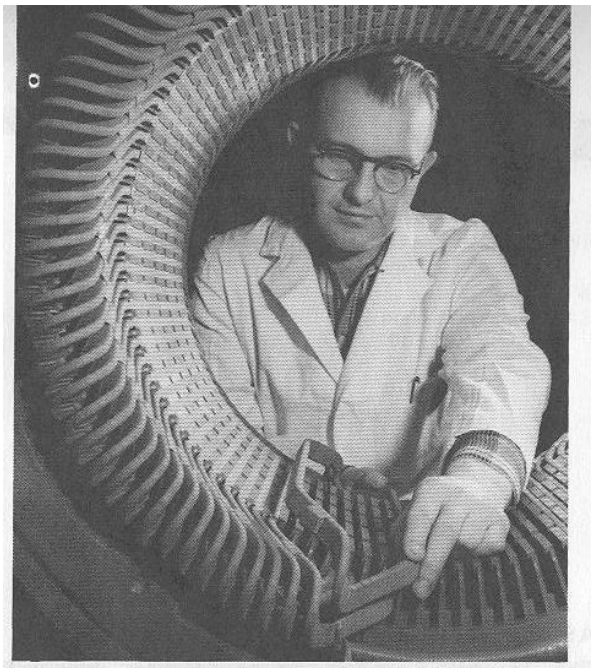
العضو الثابت يتكون كما في الشكل (١- ٢)، من شرائح متراصة من الحديد المغناطيسي تتراوح سماكتها من ٠,٣ إلى ٠,٦مم حسب حجم المحرك، هذه الشرائح معزولة عن بعضها البعض بعازل كهربائي بحيث تكون مع بعضها البعض جسماً أسطوانياً محفوراً بداخله عدد من المجاري لاحتواء الملفات الثلاثية، الشكل(١- ٢).

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

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



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



١- ١- ٢ تكوين العضو الدائر:

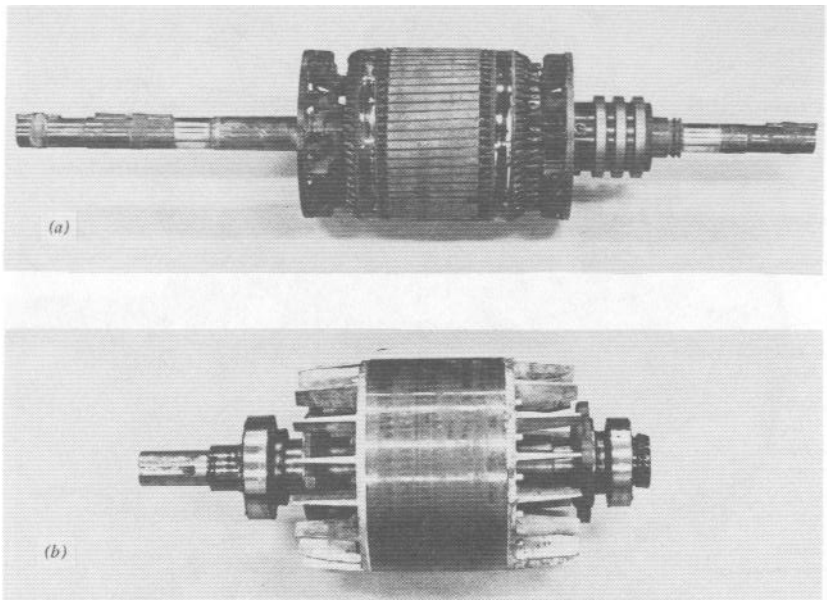
يوجد منه نوعان مختلفان في تكوينهما، وإن كانت خواصهما الكهربية متقاربة جداً. يُتسَمَّى المحرك عادةً باسم عضوه الدائر، للتمييز بين نوعين من المحركات الحثية ثلاثية الأوجه، هما المحركات ذات الحلقات الانزلاقية (Slip-ring motors) وتسمي أيضا المحركات ذات العضو الدائر الملفوف، (Wound rotor motors) والمحركات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

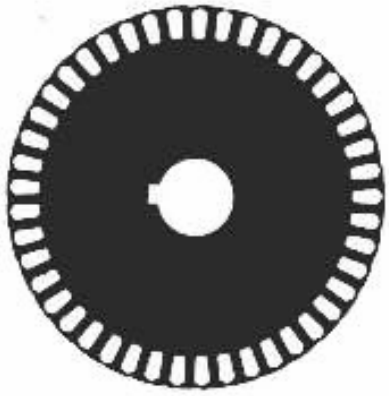
أ- العضو الدائر ذو حلقات الانزلاق: (Wound Rotor)

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

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

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



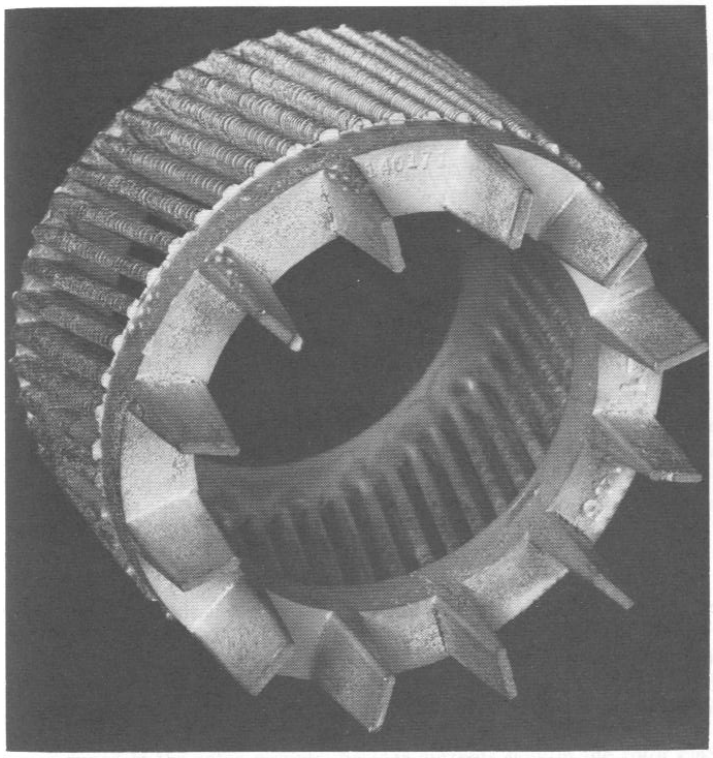


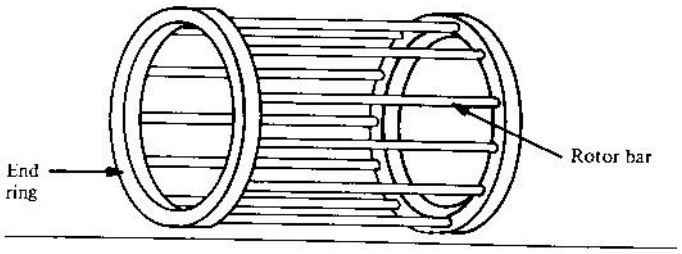
الشكل ١- ٣: شريحة عضو دائر والى اليمين(a):عضو دائر ملفوف (b)عضو دائر ذو قفص سنجابي

ب- العضو الدائر ذو القفص السنجابي: (Squirrel-cage rotor)

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

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





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

١- ٢ كيفية تكوين المجال المغناطيسي الدوار:

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

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

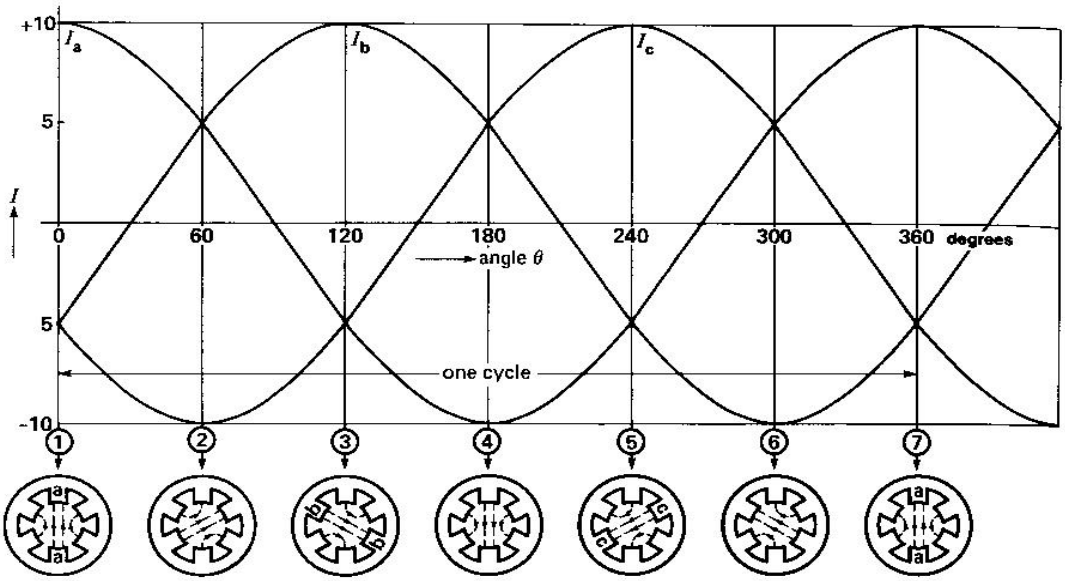
حيث:

n_s: السرعة التزامنية

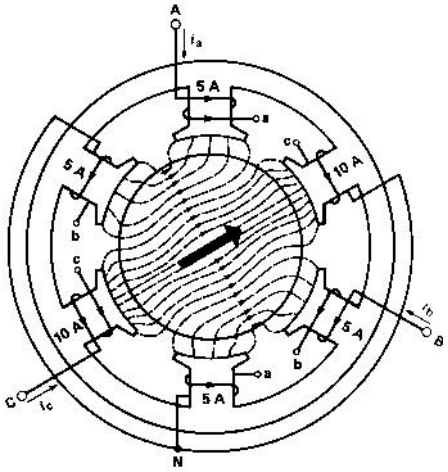
f_s: تردد تيار العضو الثابت

P: عدد أقطاب للآلة

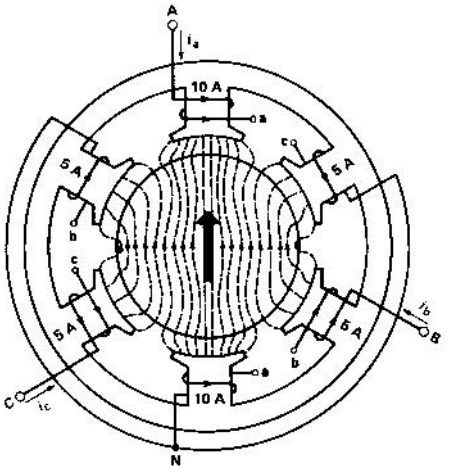
الشكل (١- ٥) يوضح كيفية تكوين المجال المغناطيسي الدوار في محرك حثي ثلاثي الأوجه له قطبان لكل وجه، نتيجة لتغذية ملفاته الثلاثية بتيار ثلاثي الأوجه.



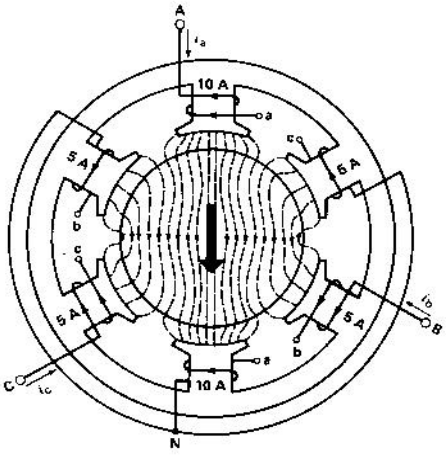
التيارات اللحظية في الأوجه الثلاثة لمحرك حثي ثلاثي الأوجه



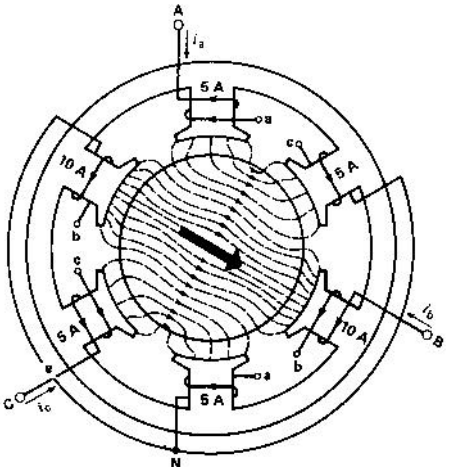
اللحظة الثانية عند الزاوية ٦٠ درجة



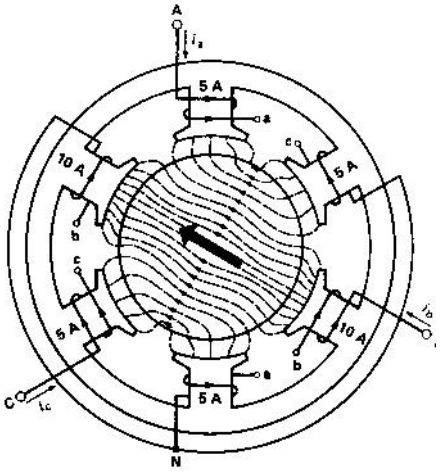
اللحظة الأولي عند الزاوية صفر



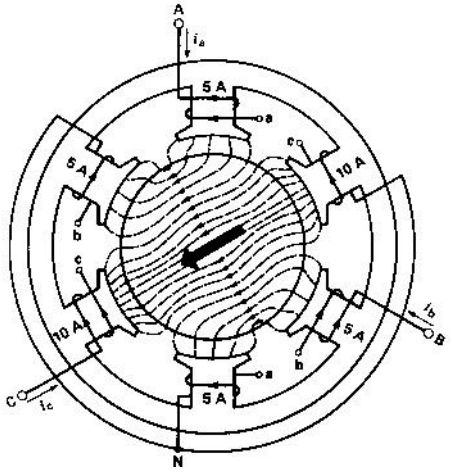
اللحظة الرابعة عند الزاوية ١٨٠ درجة



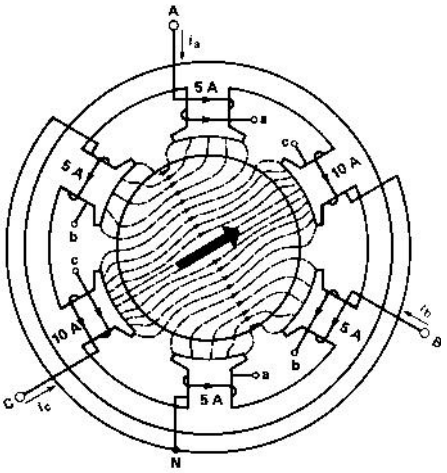
اللحظة الثالثة عند الزاوية درجة١٢٠



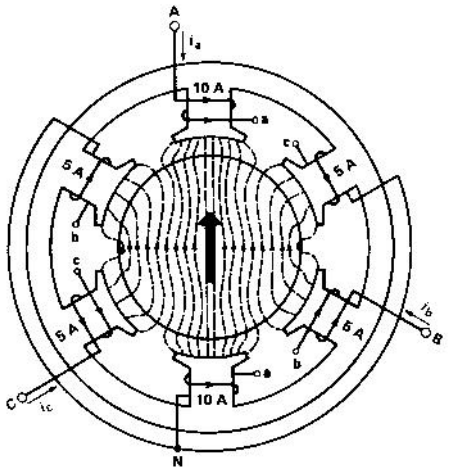
اللحظة السادسة عند الزاوية ٣٠٠ درجة



اللحظة الخامسة عند الزاوية ٢٤٠ درجة



اللحظة الثامنة عند الزاوية ٤٢٠ درجة
نفس اتجاه المجال عند اللحظة الثانية



اللحظة السابعة عند الزاوية ٣٦٠ درجة
نفس اتجاه المجال عند اللحظة الأولي

الشكل(١- ٥):كيفية تكوين المجال المغناطيسي الدوار لمحرك حثي ثلاثي الأوجه له قطبان لكل وجه

يتضح من تتبع اتجاه محصلة المجال الناتج عن الأوجه الثلاثة للمحرك، نتيجة لمرور التيارات اللحظية ثلاثية الأوجه بملفات تلك الأوجه، عند اللحظات المتتالية المبينة في الشكل(١- ٥) أن المجال يدور ٦٠درجة في الفراغ كلما مرت لحظة زمنية معينة، ويكتمل دوران المجال ٣٦٠درجة كل ذبذبة كاملة للتيار، يتضح ذلك بمقارنة اتجاه المجال عند اللحظة السابعة باتجاه المجال عند اللحظة الأولي وكذلك بمقارنة اتجاه المجال عند اللحظة الثامنة باتجاه المجال عند اللحظة الثانية وهكذا.

١- ٣ كيفية عمل المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

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

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

حيث:

T: العزم.

F_s: شدة المجال المغناطيسي في العضو الثابت.

F_r: شدة المجال المغناطيسي في العضو الدائر.

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

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

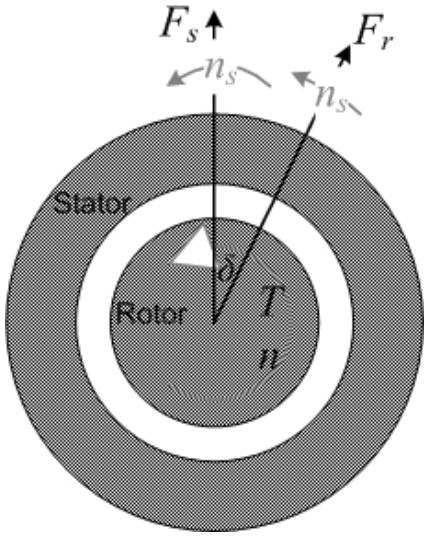
$$n_f = n_s - n$$ المعادلة(١- ٣)

حيث:

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

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

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



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

١- ٤ الانزلاق:

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

في المحركات الصغيرة ما بين ١٪ و ٢٪ وقد تصل إلى ٠,٥٪ للمحركات الكبيرة في حالة عدم التحميل وعند التحميل يتراوح الانزلاق من ٣٪ إلى ٥٪، ويحسب من:

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

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

المعادلة(١- ٤)

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

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

$$\text{Rotor speed} = n = n_s(1-s)$$

المعادلة(١- ٥)

١- ٥ تردد الجهود والتيارات في العضو الدائر:

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

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

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

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

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

المعادلة(١- ٦) $$f_r = s \cdot f_s$$

مثال (١- ١):

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

أ) السرعة التزامنية لهذا المحرك

ب) سرعة العضو الدائر عند الحمل الكامل

ت) تردد الجهد والتيار في العضو الدائر عند الحمل الكامل

الحـل:

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

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

$$f_r = s \cdot f_s = 0.05 \times 60 = 3 \quad \text{Hz}$$

مثال (١- ٢):

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

الحـل:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \quad \text{rpm}$$

$$n_{slip} = n_s - n = 1500 - 1455 = 45 \quad \text{rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03 \quad \text{p.u.}$$

مثال(١- ٣):

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

الحـل:

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

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

$$n = n_s \cdot (1 - s) = 1000 \times (1 - 0.05) = 950 \quad \text{rpm}$$

أسـئلة و تمارينـــ:

١- اذكر فائدتين للمحرك الحثي ذي العضو الدائر الملفوف على المحرك ذي القفص السنجابي.

٢- لماذا يصنع العضو الثابت والدائر من شرائح من الحديد؟

٣- الجهد والتردد المتولدان في العضو الدائر للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه ينخفضان كلما زادت سرعة المحرك. وضح السبب!

٤- اشرح كيفية توليد المجال المغناطيسي الدوار في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه.

٥- ماذا يحدث لسرعة وتيار العضو الدائر للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه عند زيادة الحمل الميكانيكي؟

٦- لماذا يدور العضو الدائر للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه، دائما بسرعة أقل من سرعة المجال المغناطيسي الدوار؟

٧- ارسم رسماً يوضح كيفيه دوران المجال المغناطيسي لمحرك حثي ثلاثي الأوجه يحتوي على ٤أقطاب لكل وجه.

٨- ما الشروط اللازمة لتوليد مجال مغناطيسي دوار منتظم؟

٩- اشرح كيف يتولد عزم فعال يؤدي إلى دوران العضو الدائر.

١٠- هل يمكن أن تصل سرعة العضو الدائر إلى السرعة التزامنية؟

١١- عرف معامل الانزلاق.

١٢- يتركب المحرك الحثي ثلاثي الأوجه من جزئين رئيسين هما.....

أ) العضو الثابت والعضو الدائر.

ب) العضو الثابت والمجال الدوار.

ت) حلقات الانزلاق والفرش.

ث) العضو الدائر وملفات المنتج.

١٣- في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه، السرعة النسبية بين المجال الدوار و..... تكون صفراً.

أ) ملفات العضو الثابت

ب) العضو الدائر.

ت) مجال العضو الدائر.

ث) الفراغ.

١٤- في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه، المجال المتولد عن العضو الدائر يدور بسرعة التزامن بالنسبة ل.....

أ) العضو الثابت.

ب) العضو الدائر.

ت) مجال العضو الثابت.

ث) لا شيء مما سبق.

١٥- أي الجمل الآتية غير صحيح فيما يختص بالمجال الدوار للعضو الثابت:

أ) قيمته ثابتة.

ب) يدور حول العضو الثابت بسرعة التزامن.

ت) يولد قوة دافعة كهربائية في ملفات العضو الدائر.

ث) قيمته تعتمد علي الحمل.

١٦- العضو الدائر للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه لا يمكنه أن يدور بسرعة التزامن، لأن:

أ) عزم الدوران سيصبح صفراً.

ب) قاعدة لنز لا تتحقق.

ت) المحرك الحثي سيتحول إلى محرك تزامني.

ث) مقاومة الهواء ستمنعه من الدوران.

١٧- أي من قيم الكميات الآتية للعضو الدائر لا تعتمد على الانزلاق:

أ) الممانعة.

ب) السرعة.

ت) القوة الدافعة الكهربائية المتولدة.

ث) التردد.

ج) المقاومة

١٨- املأ الفراغات بعبارة مناسبة، عند تحميل محرك حثي ثلاثي الأوجه، كان يدور أصلا بدون حمل فإن:

أ) سرعته.....

ب) الانزلاق.....

ت) القوة الدافعة الكهربائية في العضو الدائر.....

ث) تيار العضو الدائر.....

ج) العزم المتولد.....

ح) العضو الدائر يستمر في الدوران بالانزلاق الذي يتساوي عنده العزم المتولد مع.....

١٩- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو قطبين يتغذى من مصدر تردده ٦٠هيرتز، احسب سرعة العضو الدائر إذا كان تردد التيارات في العضو الدائر ٢هيرتز.

٢٠- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ثمانية أقطاب يتغذي من مصدر تردده ٥هيرتز، وسرعته عند الحمل الكامل ٧١٦ لفة في الدقيقة، احسب سرعة الانزلاق ومعامل الانزلاق عند الحمل الكامل.

٢١- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب يتغذي من مصدر تردده ٦٠هيرتز، القوة الدافعة الكهربائية في العضو الدائر ترددها ٢,٧هيرتز، احسب معامل الانزلاق وكذلك سرعة العضو الدائر.

٢٢- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو قطبين ملفاته موصلة على شكل نجمة يتغذى من مصدر جهده ٢٢٠فولت وتردده ٦٠هيرتز، فإذا كانت قيمة الانزلاق عند الحمل الكامل ٥٪ احسب ما يلي:

أ) السرعة التزامنية لهذا المحرك.

ب) سرعة العضو الدائر عند الحمل الكامل

ت) تردد الجهد والتيار في العضو الدائر عند الحمل الكامل

٢٣- محرك حثي ثلاثي الأوجه تردده ٦٠هيرتز له ٨أقطاب، ويعمل عند انزلاق ٠,٠٥عند حمل معين. احسب ما يأتي بوحدة لفة في الدقيقة:

أ) سرعة دوران العضو الدائر بالنسبة للعضو الثابت.

ب) سرعة دوران العضو الدائر بالنسبة للمجال المغناطيسي للعضو الثابت.

ت) سرعة دوران المجال المغناطيسي للعضو الدائر بالنسبة لجسم العضو الدائر.

ث) سرعة المجال المغناطيسي للعضو الدائر بالنسبة للعضو الثابت.

ج) سرعة مجال العضو الدائر بالنسبة للمجال الناشئ عن العضو الثابت.

الإجابة:	(أ)٨٥٥	(ب)٤٥	(ت)٤٥	(ث)٩٠٠	(ج)صفر

٢٤- محرك حثي ثلاثي الأوجه له ٦ أقطاب يتغذي من مصدر تردده ٦٠هيرتز ويدور (أ) عند اللاحمل بسرعة ١١٦٠لفة في الدقيقة (ب) عند الحمل الكامل بسرعة ١٠٩٢لفة في الدقيقة. أوجد معامل الانزلاق وتردد تيار العضو الدائر عند حالتي اللاحمل والحمل الكامل.

الإجابة:	(أ) ٣,٤٪ ، ٢هيرتز	(ب) ٩٪ ، ٥,٤هيرتز.

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

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

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}$$

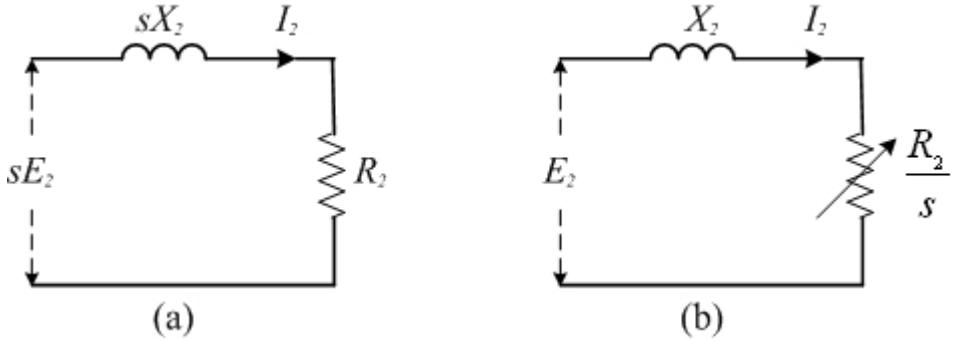
المعادلة(١- ٧)

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

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

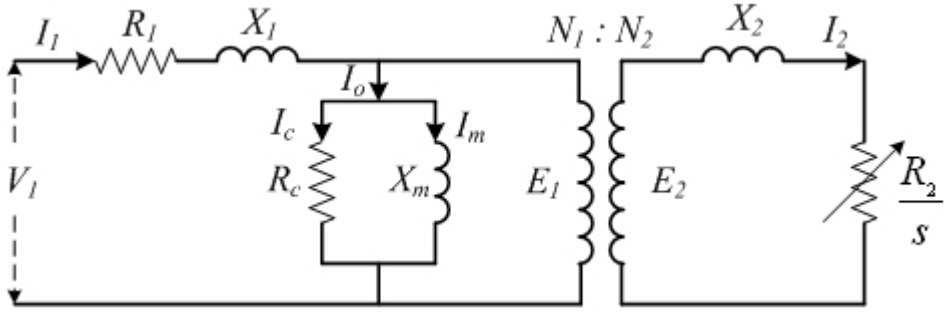
المعادلة(١- ٨):

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



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

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



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

حيث:

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

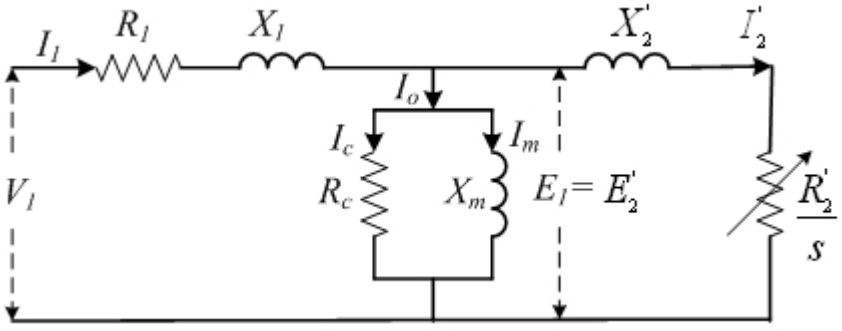
X_1, X_2: ممانعة التسرب الحثية لملفات العضو الثابت والعضو الدائر لكل وجه.

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

X_m: ممانعة التمغنط، التيار المار بها هو تيار المغنطة.

N_1, N_2: عدد اللفات للعضو الثابت والعضو الدائر.

وإذا أخذنا في الاعتبار أوجه التشابه بين المحرك الحثي والمحول، فيمكن أن ننسب كميات العضو الدائر إلى العضو الثابت لنحصل على الدائرة المكافئة الدقيقة لكل وجه كما هو مبين في الشكل (١- ٩):



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

حيث:

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

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

المعادلة(١- ١١):

$$X_2^{'} = X_2 \cdot \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 = a^2 \cdot X_2$$

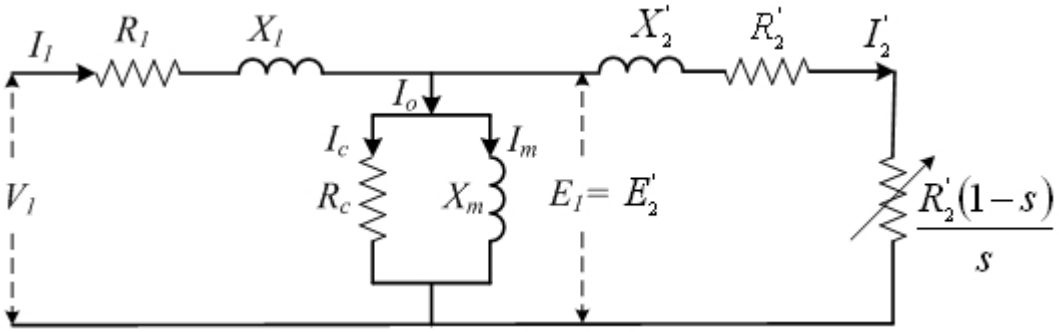
المعادلة (١- ١٢)

$$I_2^{'} = I_2 \cdot \left[\frac{N_2}{N_1}\right] = I_2 / a$$

كما أن مقاومة ملفات العضو الدائر $\left\{\frac{R_2^{'}}{s}\right\}$ يمكن تجزئتها إلى مقاومتين كما في المعادلة(١- ١٣)، حتى يتسنى لنا الحصول على الدائرة المبينة في الشكل(١- ١٠):

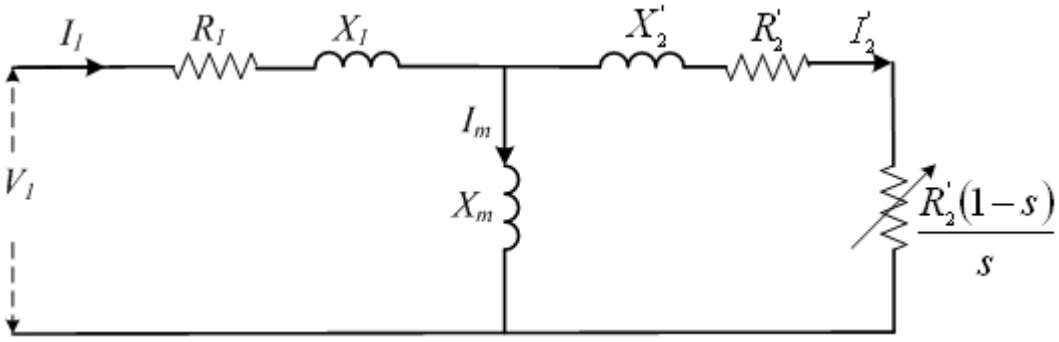
المعادلة(١- ١٣)

$$\frac{R_2^{'}}{s} = R_2^{'} + R_2^{'} \cdot \left[\frac{1-s}{s}\right]$$



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

إن قيمة $R_2^{'}$ تعني المقاومة لكل وجه من أوجه العضو الدائر عند السكون منسوبة على العضو الثابت، بينما $\frac{R_2^{'} \cdot (1-s)}{s}$ تعبر عن المقاومة الديناميكية لكل وجه التي تعتمد على سرعة العضو الدائر والتي تناظر التحميل الفعلي على المحرك. يجب ملاحظة أن قيم الثوابت المشتقة في الشكل(١- ١٠) هي لمحرك في حالة السكون.

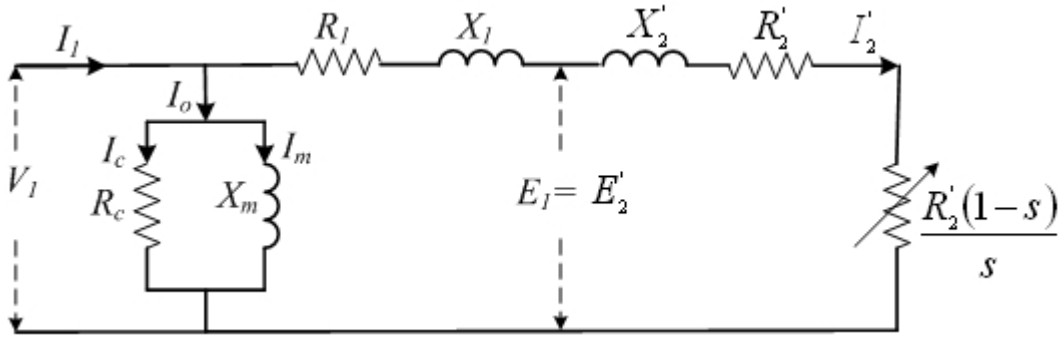


الشكل ١- ١١: الدائرة المكافئة للمحرك الحثي بعد استبعاد R_c

الـدائرة المكافئـة الـتي في الشـكل(١- ١١) هـي نفسـها المبينـة في الشـكل(١- ١٠) ولكـن بعـد استبعاد R_c (على أن يضاف الفقد في القلب الحديدي، الذي يتركز أغلبه في العضو الثابت، إلى بقية المفقودات أثناء حساب الكفاءة).

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

يمكن أيضاً الحصول على دائرة مكافئة تقريبية بنقل الفرع الممثل للدائرة المكافئة عند اللاحمل الشكل(١- ١٠) إلى جهة مصدر جهد الابتدائي، وذلك لأن تيار اللاحمل (I_o) صغير جدا إذا ما قورن بتيار الحمل الكامل (I_1)، فنحصل على الدائرة المكافئة التقريبية المبينة في الشكل (١- ١٢).



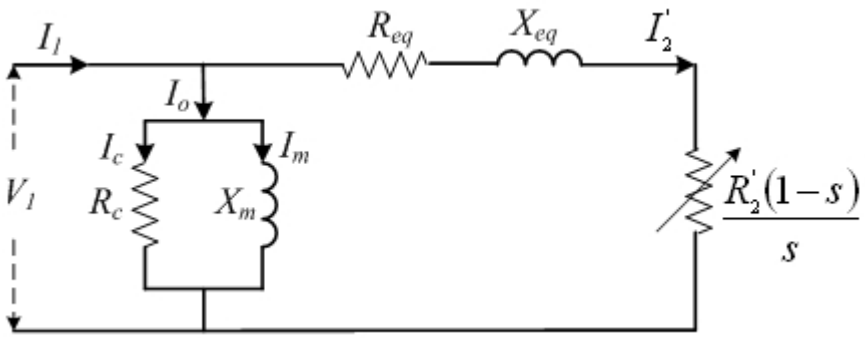
الشكل ١- ١٢: الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي

إذا اعتبرنا أن:

$$R_{eq} = R_1 + R_2' \qquad ١٤ - ١$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2' \qquad ١٥ - ١$$

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



الشكل ١- ١٣: الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي

بهذا التبسيط تصبح الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي مشابهة تماماً للدائرة المكافئة التقريبية للمحول، حيث تعتبر المقاومة $\left[R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right)\right]$ حملاً على المحرك، والقدرة المفقودة في هذه

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

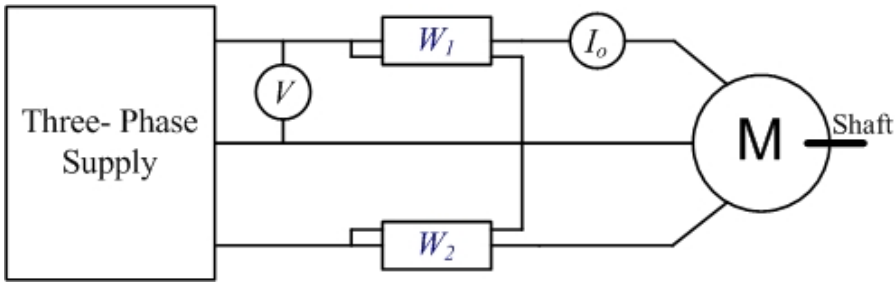
الدائرة المكافئة للمحرك الحثي أداة مفيدة لمعرفة خواص تشغيل المحرك، فعند تطبيق الدائرة على آلة معينة، يجب معرفة قيم ثوابت الدائرة المكافئة $(R_1, R_2, X_1, X_2, R_c, X_m)$، ولكي يتم معرفة قيم تلك الثوابت، يتحتم القيام ببعض الاختبارات المعملية، .هذه الاختبارات مشابهة تماما لاختبارات الدائرة المفتوحة والدائرة المقصورة التي تجرى على المحول.

أ- اختبار اللاحمل (أو اختبار الدائرة المفتوحة): No Load Test or Open Circuit Test

لإجراء هذا الاختبار يوصل المحرك كما هو مبين في الشكل (١- ١٤) حيث يستخدم جهازي واتميتر لقياس القدرة الكلية، ثم يسلط الجهد المقنن على أطراف المحرك و يترك العضو الدائر يدور بحرية تامة بدون أي حمل، ثم تسجل قراءات الأجهزة:

القدرة الكلية هي مجموع قراءتي الواتميتر $P = W_1 + W_2$

مع ملاحظة أن قيم الجهد والتيار المقروءة هي للخط وأن القدرة المقروءة تمثل المفاقيد الحديدية (المفاقيد الثابتة) وهي مجموع قراءتي الواتميتر.



شكل ١- ١٤ :كيفية توصيل دائرة اختبار اللاحمل للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

حيث إن العضو الدائر يدور بدون حمل فهذا يعني أن سرعة دورانه مساوية تقريباً للسرعة التزامنية مما يعني أن الانزلاق s صغير جد أي أنه يساوي صفراً تقريباً، عند التعويض عن قيمة الانزلاق في المقاومة التي تمثل الحمل في الدائرة المكافئة $\left[R_2' \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right)\right]$، نجد أن قيمة هذه المقاومة كبيرة جداً تصل إلى ما لانهاية، هذا يعني أن الدائرة المكافئة أصبحت مفتوحة من جهة الثانوي، لذلك سمي هذا الاختبار باختبار الدائرة المفتوحة قياساً بالمحول.

بما أن جهة الملف الثانوي أصبحت مفتوحة فهذا يعني أن التيار سيمر من خلال R_c,X_m فقط، لذلك يمكن من نتائج هذه التجربة وبعد إجراء حسابات بسيطة تحديد قيم R_c,X_m ، بافتراض أن ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة:

من الدائرة المكافئة الشكل (١- ١١):

$$R_c = \frac{V_1}{I_c} \qquad X_m = \frac{V_1}{I_m}$$

حيث V_1 هو جهد الوجه

من المخطط الاتجاهي في حالة اللاحمل الشكل (١- ١٥) يمكننا إيجاد قيم I_m , I_c بدلالة I_o كما يلي:

$$I_c = I_o \cdot Cos\phi_o \qquad I_m = I_o \cdot Sin\phi_o$$ المعادلة(١- ١٦)

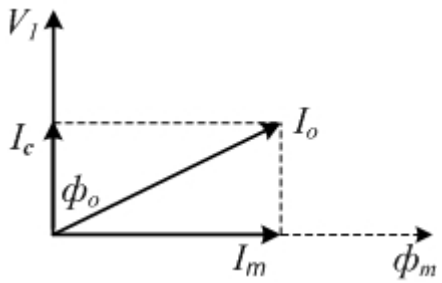
حيث:

$$Cos\phi_o = \frac{P}{3 \cdot V_1 \cdot I_o}$$ المعادلة(١- ١٧)

$$\phi_o = Cos^{-1}\left(\frac{P}{3 \cdot V_1 \cdot I_o}\right)$$ المعادلة(١- ١٨)

إذاً يمكن إيجاد قيم R_c , X_m من المعادلات الآتية:

$$R_c = \frac{V_1}{I_c} = \frac{V_1}{I_o \cdot Cos\phi_o} \qquad X_m = \frac{V_1}{I_m} = \frac{V_1}{I_o \cdot Sin\phi_o}$$ المعادلة(١- ١٩)



الشكل ١- ١٥: المخطط الاتجاهي في حالة اللاحمل

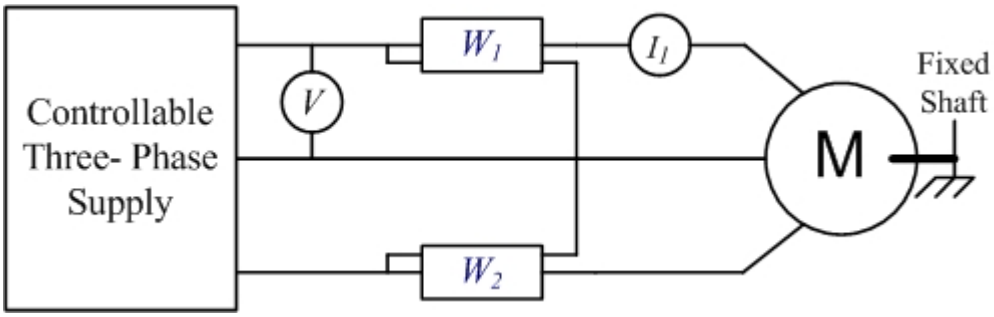
ب- اختبار عدم الحركة (أو اختبار دائرة القصر):

Locked Rotor Test (or Short Circuit Test):

لإجراء هذا الاختبار يوصل المحرك كما هو مبين في الشكل (١- ١٦) ويمنع العضو الدائر من الدوران بوسيلة مناسبة، ثم يسلط جهد منخفض على أطراف المحرك يبدأ من الصفر ويزاد تدريجياً حتى يصل التيار المار في ملفات المحرك إلى القيمة المقننة عند الحمل الكامل، ذلك لأن توصيل الجهد المقنن سوف يتسبب في مرور تيار كبير جداً (تيار قصر) قد يتلف ملفات المحرك، ثم تسجل قراءات الأجهزة:

القدرة الكلية هي مجموع قراءتي الواتميتر $P = W_1 + W_2$

مع ملاحظة أن قيم الجهد والتيار المقروءة هي للخط وأن القدرة المقروءة تمثل المفاقيد النحاسية (المفاقيد المتغيرة) كما في حالة المحولات.



الشكل ١- ١٦: كيفية توصيل دائرة اختبار عدم الحركة (القصر) للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

حيث إن العضو الدائر مثبت فإن ذلك يعني أن الانزلاق مساوي للواحد (s=1) وعند التعويض عن قيمته في المقاومة $\left[R_2^{'} \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right)\right]$ في الدائرة المكافئة نجد أن قيمتها $\left[R_2^{'} \cdot \left(\frac{1-1}{1}\right) = 0\right]$ أصبحت صفراً، هذا يعني أن الدائرة المكافئة أصبحت مقصورة من جهة الثانوي، لذلك فإن هذا الاختبار يسمى أحياناً اختبار الدائرة المقصورة.

بما أنه قد تم تسليط جهد منخفض على ملفات العضو الثابت فإن التيار (I_o) أصبح صغيرً جداً، وأن جهة الثانوي أصبحت مقصورة، فهذا يعني أن ($I_1 \cong I_2^{'}$)، سيمر التيار خلال R_{eq}, X_{eq} فقط، لذلك يمكن من نتائج هذه التجربة وبعد إجراء حسابات بسيطة تحديد قيم R_{eq}, X_{eq}، بافتراض أن ملفات الثابت موصلة على شكل نجمة ومن الدائرة المكافئة لشكل (١- ١١)فإن:

$$R_{eq} = \frac{P}{3 \cdot I_1^2}$$ المعادلة(١- ٢٠)

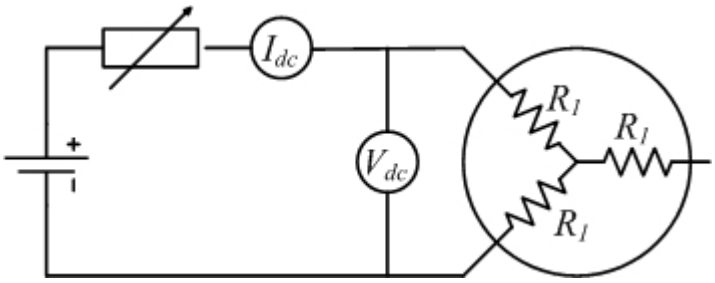
$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_1}$$ المعادلة(١- ٢١)

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$ المعادلة(١- ٢٢)

حيث V_{sc} هو جهد الوجه المخفض أثناء إجراء اختبار القصر.

ج- 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 (١- ١٧).



الشكل ١- ١٧: دائرة قياس مقاومة ملفات العضو الثابت

في هذا الاختبار يزاد الجهد (V_{dc}) تدريجياً حتى يصل التيار المار في ملفات المحرك إلى القيمة المقننة وذلك حتي ترتفع درجة حرارة الملفات كما هو الحال في وضع التشغيل الطبيعي، لأن المقاومة تتغير بتغير درجة الحرارة، ثم تسجل قيمة الجهد والتيار وتحسب المقاومة كما هو موضح من المعادلة(١- ٢٣):

$$2 \cdot R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$$

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{2 \cdot I_{dc}}$$ المعادلة(١- ٢٣)

تزاد قيمة المقاومة المقاسة بنسبة حوالي ١٠٪ للأخذ في الاعتبار تأثير الخاصية القشرية (skin effect) عند مرور التيار المتردد داخل المقاومات.

مثال(١- ٤):

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

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

احسب مكونات الدائرة المكافئة التقريبية لهذا المحرك.

الحل:

من نتائج تجربة اللاحمل نستطيع حساب قيم X_m , R_c كما يلي:

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة، إذن:

$$V_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = 127 \quad \text{V}$$

$$I_o = I_L = 20 \quad \text{A}$$

لحساب قيم X_m , R_c نتبع الخطوات التالية:

$$Cos\phi_o = \frac{P}{3 \cdot V_1 \cdot I_o} = \frac{600}{3 \times 127 \times 20} = 0.0787$$

$$\phi_o = Cos^{-1}(0.0787) = 85.48^o$$

$$R_c = \frac{V_1}{I_o \cdot Cos\phi_o} = \frac{127}{20 \times 0.0787} = 80.68 \quad \Omega$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_o \cdot Sin\phi_o} = \frac{127}{20 \times Sin(85.48)} = 6.37 \quad \Omega$$

من نتائج تجربة عدم الحركة نستطيع حساب قيم X_{eq} , R_{eq} كما يلي:

بم أن ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة، إذن:

$$V_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32 \quad \text{V}$$

$$I_1 = I_L = 50 \quad \text{A}$$

لحساب قيم X_{eq} , R_{eq} نتبع الخطوات التالية:

$$R_{eq} = \frac{P}{3 \cdot I_2^{'2}} = \frac{1500}{3 \times 50^2} = 0.2 \qquad \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{17.32}{50} = 0.3464 \qquad \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{(0.3464)^2 - (0.2)^2} = 0.2828 \qquad \Omega$$

مثال (١- ٥):

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

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

احسب مكونات الدائرة المكافئة إذا كان $X_1 = X_2^{'}$

الحل:

من اختبار التيار المستمر تحسب قيمة R_1 من المعادلة (١- ٢١) كما يلي:

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{2 \cdot I_{dc}} = \frac{19}{3 \times 20} = 0.475 \qquad \Omega$$

من نتائج اختبار الدائرة المفتوحة (اللاحمل) يمكننا حساب قيم R_c, X_m كما يلي:

وبما أن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا ، إذن:

$$V_1 = V_L = 127 \qquad \text{V}$$

$$I_o = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{7.53}{\sqrt{3}} = 4.347 \qquad \text{A}$$

لحساب قيمة كلا من $R_c \& X_m$ نتبع الخطوات التالية:

$$Cos\phi_o = \frac{P}{3 \cdot V_1 \cdot I_o} = \frac{179}{3 \times 127 \times 4.347} = 0.108$$

$$\phi_o = Cos^{-1}(0.108) = 83.8^o$$

$$R_c = \frac{V_1}{I_o \cdot Cos\phi_o} = \frac{127}{4.347 \times 0.108} = 270.78 \qquad \Omega$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_o \cdot Sin\phi_o} = \frac{127}{4.347 \times Sin(83.8)} = 29.435 \qquad \Omega$$

من نتائج اختبار الدائرة المقصورة (عدم الحركة) نستطيع حساب قيم $R_{eq,}\ X_{eq}$ كما يلي:

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا، إذن:

$$V_1 = V_L = 39.3 \qquad V$$

$$I_1 = I_2^{'} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{34.64}{\sqrt{3}} = 20 \qquad A$$

لحساب قيمة كلا من (R_1, R_2, X_1, X_2) نتبع الخطوات التالية:

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

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

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{(1.965)^2 - (1.054)^2} = 1.658 \qquad \Omega$$

بما أن:

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

$$R_1 = 0.475 \qquad \Omega$$

إذن:

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

بما أن:

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

$$X_1 = X_2^{'}$$

إذن:

$$X_1 = X_2^{'} = \frac{X_{eq}}{2} = \frac{1.658}{2} = 0.859 \qquad \Omega$$

أسـئلة و تمارينـــن

١- لماذا سمي اختبار اللاحمل باختبار الدائرة المفتوحة؟

٢- لماذا سمي اختبار عدم الحركة باختبار الدائرة المقصورة؟

٣- لماذا يزاد الجهد تدريجياً على المحرك أثناء اختبار عدم الحركة؟

٤- أساس عمل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه مشابه لعمل.....

أ) المحرك التزامني.

ب) محرك التيار المستمر الموصل على التوازي.

ت) المحول ذو الملف الثانوي المقصور.

ث) المحرك الحثي ثلاثي الوجه.

٥- إن تأثير زيادة طول الثغرة الهوائية في المحرك الحثي هو لزيادة.....

أ) معامل القدرة.

ب) السرعة.

ت) تيار المغنطة.

ث) مجال الثغرة الهوائية.

٦- أي من العبارات الآتية غير صحيح، اختبار الدائرة المفتوحة لمحرك حثي ثلاثي الأوجه يساعد على:

أ) إيجاد تيار اللاحمل.

ب) إيجاد معامل القدرة في حالة اللاحمل.

ت) إيجاد المفاقيد الثابتة.

ث) إيجاد مقاومة المحرك منسوبة إلى العضو الثابت.

٧- أي من العبارات الآتية غير صحيح، اختبار القصر لمحرك حثي ثلاثي الأوجه يساعد على:

أ) إيجاد تيار القصر بالجهد المقنن.

ب) إيجاد معامل القدرة في حالة القصر.

ت) إيجاد المفاقيد الثابتة.

ث) إيجاد مقاومة المحرك منسوبة إلى العضو الثابت.

٨- محرك حثي ثلاثي الأوجه ٥ حصان ذو أربعة أقطاب، عند إجراء تجربتي اللاحمل والقصر عليه أعطى النتائج التالية:

تجربة اللاحمل	550 W	3.86 A	220 V
تجربة عدم الحركة	490 W	12.9 A	35 V

فإذا كانت ملفات المحرك موصله على شكل دلتا، احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا المحرك

٩- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته٢٩,٨٤ كيلووات ملفاته موصلة على شكل دلتا عند اختباره أعطى النتائج التالية:

تجربة اللاحمل	1250 W	21 A	415 V
تجربة عدم الحركة	2730 W	45 A	100 V

احسب مكونات الدائرة المكافئة التقريبية لهذا المحرك.

١٠- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته ٢٠حصان ملفاته موصلة على شكل Y عند إجراء تجربتي اللاحمل والقصر له أعطى النتائج التالية:

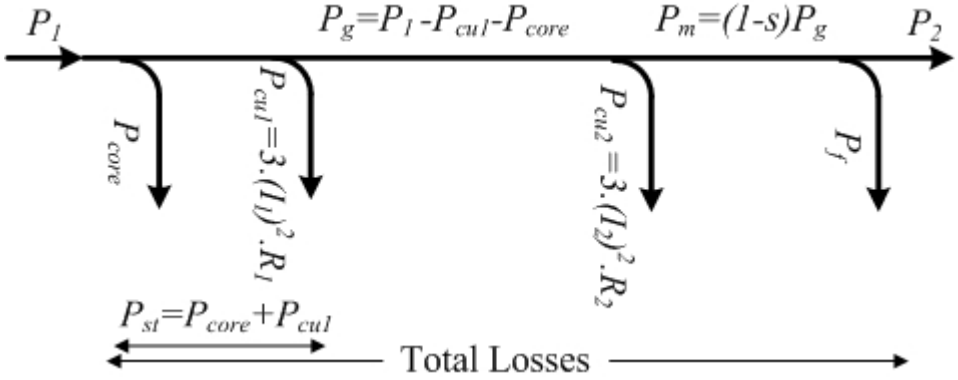
تجربة اللاحمل	1050 W	16.5 A	380 V
تجربة القصر	1854 W	32 A	86 V

احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا المحرك إذا كانت $X_1 = X_2` \ \& R_1 = R_2`$

١- ٧ القـدرة و العـزم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

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

عـادةً مـا يوصـف المحـرك الحثـي ثلاثـي الأوجـه بأنـه محـول دوار والـدخل قـدرة كـهربائيـة في شـكل جهود وتيارات ثلاثية الأوجه والخرج هو قدرة كـهربائيـة تؤخـذ مـن ملفـات الثـانوي (في المحـول)، بينمـا في المحرك الحثي تكون ملفات الثانوي (العضو الدائر) مقصورة و بالتالي لا تعطي قدره كـهربائية و إنما تعطي قدره ميكانيكية تظهر على عمود الإدارة، شكل (١- ١٨) يعرض مخطط سريان القدرة داخل المحرك حيث P_1 تمثل القدرة الكهربية المسحوبة من المصدر، و P_2 تمثل القدرة الميكانيكية الخارجة.



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

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

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot Cos\phi$$ المعادلة(١- ٢٤)

حيث:

V_1 : جهد الوجه للعضو الثابت.

I_1: تيار الوجه للعضو الثابت.

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

تبـدد ملفـات العضـو الثابـت مفقوداتهـا النحاسـية P_{cu1} في مقاومـة العضـو الثابـت R_1 علـي شـكل حـرارة، وتحسـب مـن المعادلـة (١- ٢٥)، كـمـا تتبـدد في نفـس الوقـت أيضـا مفقـودات الحديـد الكليـة للمحـرك P_{core} وذلـك بسـبب وجـود التيـارات الدوامـية وظـاهرة التخلـف المغناطيسـي في العضـو الثابـت، ومفقودات حديد العضو الدائر تكون ضئيلة جداً بسبب انخفاض قيمة التردد فيه عندما يكون الانزلاق

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

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

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

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

المعادلة(١- ٢٧): $P_g = P_{12} = P_1 - P_{st}$

ويمكن حسابها أيضا من المعادلة التالية:

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

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

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

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

المعادلة(١- ٣٠): $P_m = P_g - P_{cu2}$

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

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

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

المعادلة(١- ٣٢):

$$P_2 = P_m - P_f$$

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

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

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

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

المعادلة(١- ٣٣):

$$P_{cu2} = s \cdot P_g$$

المعادلة(١- ٣٤)

$$P_m = (1-s) \cdot P_g$$

وأن النسبة بينهما:

$$P_g : P_m : P_{cu2} = 1 : (1-s) : s$$

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

مثال(١- ٦):

إذا كان العضو الدائر لمحرك حثي ثلاثي الأوجه ذي تردد ٦٠هيرتز و٤أقطاب، يسحب قدرة تبلغ ١٢٠ كيلووات وات عند تردد ٣هيرتز، أوجد:

أ) سرعة العضو الدائر

ب) المفقودات النحاسية في العضو الدائر.

ت) القدرة الميكانيكية المتولدة.

الحل:

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

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

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

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

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

مثال(١- ٧):

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

أ) خرج المحرك على عمود الإدارة بالحصان.

ب) كفاءة المحرك.

الحل:

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

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

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

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

مثال(١- ٨):

محرك حثي ثلاثي الأوجه له ٦أقطاب وتردده ٦٠هيرتز، يسحب قدرة تبلغ ٤٨كيلووات عندما يدور بسعة ١١٤٠لفة في الدقيقة، فإذا كان الفقد النحاسي في العضو الثابت ١,٤كيلووات، والفقد في القلب ١,٦كيلووات، والمفقودات الميكانيكية مقدارها ١كيلووات، فأوجد كفاءة المحرك.

الحل:

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

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

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

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

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

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

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

مثال(١- ٩):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ستة أقطاب يعمل على مصدر جهده ٤٤٠فولت وتردده ٦٠هيرتز فإذا كانت القدرة الداخلة إلى العضو الدائر ٨٠كيلووات وتردد التيار في العضو الدائر ١,٦٧هيرتز

احسب ما يلي:

أ) الانزلاق.

ب) سرعة العضو الدائر

ت) القدرة الميكانيكية المتولدة

ث) القدرة المفقودة في العضو الدائر

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

الحل:

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

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

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

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

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

$$R_2^{'} = \frac{P_{cu2}}{3 \cdot I_2^{'2}} = \frac{2670}{3 \times \left(65\right)^2} = 0.21 \quad \Omega$$

مثال (١- ١٠):

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

أ) معامل الانزلاق

ب) القدرة الميكانيكية الخارجة (المستفاد منها) بالحصان

جـ) المفاقيد النحاسية في العضو الدائر

د) كفاءة المحرك

الحل:

أ) نوجد أولاً السرعة التزامنية:

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

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

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

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

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

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

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

جـ) المفاقيد النحاسية في العضو الدائر P_{cu2}:

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

د) كفاءة المحرك:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{36.640}{40} \times 100 = 90.16\%$$

١- ٧- ٢ العـزم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه :

يعـرف العـزم أو عـزم الـدوران (Torque) بأنـه القـوة المؤثرة تـأثيراً التوائيـاً علـى جسـم مـا فينـتج عنهـا دوران ذلك الجسم حول مركـزه، ويقاس بوحدة نيوتن متر Nm.

يتولـد عـزم الـدوران الكلـي (total developed torque) في المحـرك الحثـي بواسـطة المجـال المغناطيسي الدوار بالسرعة التزامنية n_s ونحصل علية بقسمة P_g على ω_s المعادلـة (١- ٢٨). وينشـأ نفس عزم الـدوران الكلـي علـى عمـود الإدارة الـذي يـدور بالسـرعة n بفعل القـدرة الميكانيكيـةP_m، ونحصـل علية بقسمةP_m على ω المعادلة (١- ٢٩).

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

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

حيـث ω_s و ω همـا السـرعة الزاويـة للمجـال المغناطيسـي الـدوار، والسـرعة الزاويـة للعضـو الـدائر علـى التتالي، بالراديان في الثانية ويحسبان من المعادلة (١- ٣٧):

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

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

بالتعويض بالمعادلة(١- ٢٦) والمعادلة (١- ٣٥) في المعادلة (١- ٣٣) يمكن أن نعبر عن العزم كما يلي:

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

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

حيث

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

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

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

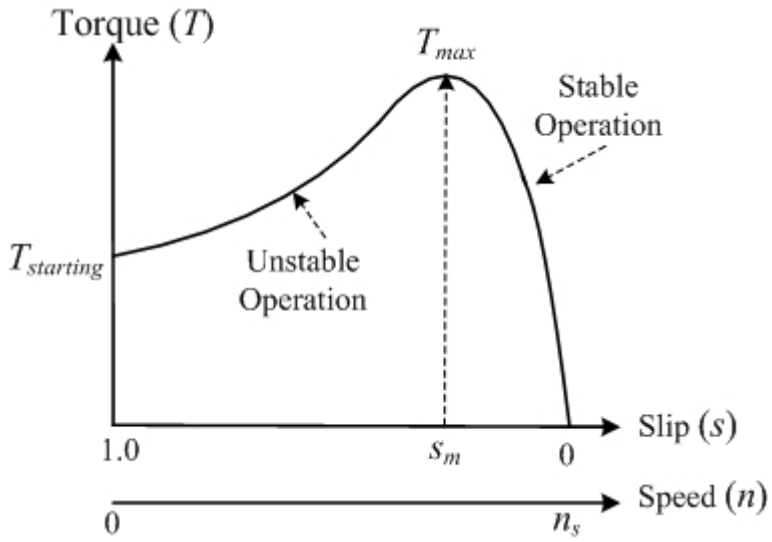
المعادلة(١- ٤١)

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

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

المعادلة(١- ٤٢)

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



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

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

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

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

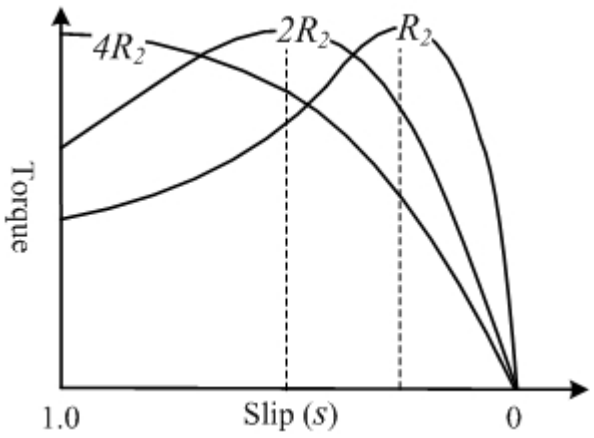
$$T_u = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n / 60} \quad \text{Nm.}$$ المعادلة(١- ٤٣):

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

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

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

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



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

ويمكن أيضا من المعادلة (١- ٤٢) حساب قيمة العزم الأقصى للمحرك وذلك عندما ننقل موضع العزم الأقصى إلى لحظة بدء الحركة أي عندما $s_m = 1 \,\&\, R_2' = X_2'$ فتصبح المعادلة:

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

المعادلة(١- ٤٥)

٧- ٢- ٢ حساب عزم البدء:

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

$$T_{starting} = K \cdot \frac{V_1^2}{\left(R_1 + R_2'\right)^2 + X_{eq}^2} \cdot R_2'$$

المعادلة(١- ٤٦)

مثال (١- ١١):

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

$R_1 = 0.4\Omega$	$R_2' = 0.6\Omega$	$X_1 = 1.0\Omega$	$X_2' = 1.0\Omega$

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

أ) تيار الحمل الكامل.

ب) عزم الحمل الكامل.

ت) تيار البدء.

ث) عزم البدء.

ج) أقصى عزم للمحرك وعند أي انزلاق يحدث.

الحل:

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا فإن:

$$V_1 = V_L = 240 \qquad \text{V}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

مثال (١- ١٢):

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

أ) قيمة مقاومة ملفات العضو الدائر لكل وجه.

ب) عزم بدء الحركة.

الحل:

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

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

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

$$R_2 = 0.05 \quad \Omega$$

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

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

$$T_{st} = 3 \cdot I_1^2 \cdot \frac{R_2'}{\omega_s} = \frac{3 \times (193.6)^2 \times 0.2}{94.25} = 238.6 \quad \text{Nm}$$

مثال (١- ١٣):

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

$R_1 = 2 \cdot R_2' = 0.2\Omega$	$X_1 = 0.5\Omega$	$X_2' = 0.2\Omega$	$X_m = 20\Omega$

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

أ) التيار الداخل.

ب) القدرة الداخلة.

ت) القدرة الخارجة.

ث) العزم المستفاد منه.

ج) الكفاءة.

الحل:

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

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

المعاوقة الكلية للدائرة المذكورة:

$$Z_e = (R_1 + jX_1) + \frac{[(R_2'/s) + jX_2'] \times (jX_m)}{[(R_2'/s) + jX_2'] + (jX_m)}$$

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

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

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

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

الجهد لكل وجه:

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

أ) التيار الداخل:

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

ب) القدرة الكلية الداخلة:

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

$$P_{inp} = P_1 = \sqrt{3} \times 400 \times 54.65 \times Cos(-20) = 35.58 \qquad \text{kw}$$

القدرة الثغرة الهوائية يمكن حسابها بطريقتين:

الطريقة الأولي:

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

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

الطريقة الثانية:

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

$$P_g = 3 \times (54.65)^2 \times (3.77) = 33.789 \qquad \text{kw}$$

القدرة المتولدة:

$$P_m = (1-s) \cdot P_g = (1-0.025) \times 33.79 = 32.94 \qquad \text{kw}$$

ت) القدرة الخارجة:

$$P_2 = P_m - P_f = 32940 - 800 = 32.14 \qquad \text{kw}$$

ث) عزم الدوران المستفاد منه:

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

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \times \pi \times 1755}{60} = 183.8 \qquad \text{rad/sec.}$$

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

ج) لحساب الكفاءة:

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

أسـئلة وتمارينـــن :

١- هل تغيير معامل الانزلاق يؤثر على كفاءة المحرك؟ وضح ذلك؟

٢- لماذا تهمل المفاقيد الحديدية في العضو الدائر؟

٣- هل تؤثر زيادة المفاقيد النحاسية في العضو الدائر على سرعة المحرك؟ وضح ذلك؟

٤- ما المقصود بعزم الدوران؟

٥- ما بالسرعة الزَّاوّية؟

٦- كيف يمكن تغيير الانزلاق الذي يحدث عنده أقصى عزم؟

٧- كيف يمكن التحكم في عزم البدء؟

٨- هل التحكم في موضع العزم الأقصى يؤثر على كفاءة المحرك؟ كيف ذلك؟

٩- أي من الجمل الآتية صحيح، يعرف الانزلاق في المحركات الحثية بأنه:

أ) النسبة بين فقد النحاس في العضو الدائر ودخل العضو الدائر.

ب) النسبة بين فقد النحاس في العضو الثابت ودخل العضو الثابت.

ت) النسبة بين فقد النحاس في العضو الدائر وخرج العضو الدائر.

ث) النسبة بين فقد النحاس في العضو الدائر وفقد النحاس في العضو الثابت.

١٠- العزم المتولد في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه يعتمد على العناصر الثلاثة الآتية:

أ) السرعة و التردد ، وعدد الأقطاب.

ب) الجهد و التيار، ومعاوقة العضو الثابت.

ت) سرعة التزامن و سرعة العضو الدائر، والتردد.

ث) القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في العضو الدائر و تيار العضو الدائر و ومعامل القدرة.

١١- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ٦ أقطاب يتغذى من مصدر تردده ٦٠هيرتز، سرعته عند الحمل الكامل ٩٥٠لفة في الدقيقة،فعند نصف الحمل تكون سرعته..... لفة في الدقيقة.

أ) ٤٧٥ ب)٥٠٠ ج)٩٧٥ د)١٠٠٠

١٢- إذا كانت قدرة الثغرة الهوائية لمحرك حثي هي ١٠٠كيلووات عند انزلاق مقداره ١٠٪ ،فإن القدرة الميكانيكية المتولدة تساوي .....كيلووات.

أ) ١٠ ب)٩٠ ج)٩٩ د)٨٠

١٣- العزم الأقصى للمحرك الحثي يحدث عند الانزلاق الذي يكون عنده معامل القدرة في العضو الدائر يساوي.....

أ) واحد ب)٠,٧٠٧ ج)٠,٨٦٦ د)٠,٥

١٤- عند تخفيض الجهد المسلط على المحرك الحثي إلى نصف الجهد المقنن، فإن عزم بدء الحركة ينخفض إلى..... عزم البدء المتولد بالجهد المقنن.

أ) نصف ب) ربع ج) $1/\sqrt{2}$ د) $\sqrt{3}/2$

١٥- إذا كان العزم الأقصى لمحرك حثي يساوي ١٠٠نيوتن متر ويحدث عند انزلاق مقدارة ١٢٪ ، فإن قيمة العزم المتولد عند انزلاق ٦٪ تكون..... نيوتن متر.

أ) ١٠٠ ب) ١٦٠ ج)٥٠ د)٤٠

١٦- كفاءة المحركات الحثية ثلاثية الأوجه ترتفع بالتناسب المباشر مع.....

أ) السرعة.

ب) الحمل الميكانيكي.

ت) الجهد المصدر.

ث) عزم العضو الدائر.

١٧- المحرك الحثي ثلاثي الأوجه يدور بسرعة ثابتة طالما أن.....

أ) العزم المتولد فيه يظل ثابتاً.

ب) جهد المصدر يظل ثابتاً.

ت) العزم المتولد فيه يساوي عزم الحمل.

ث) مجال العضو الثابت يظل ثابتاً.

١٨- محرك حثي ثلاثي الأوجه سرعته التزامنية١٠٠٠لفة في الدقيقة يعطي قدره ميكانيكية متولدة قدرها ٥حصان عندما تكون سرعة العضو الدائر ٩٣٥لفة في الدقيقة، احسب القدرة الداخلة إلى هذا المحرك إذا كانت مفقودات العضو الثابت٤٠٠وات

١٩- محـرك حثـي ثلاثـي الأوجـه ذو سـتة أقطـاب يتغـذى مـن مصـدر جهـده ٥٠٠فولـت وتـردده ٦٠هيرتز، يعطي قدرة ميكانيكية خارجة قدرها ٢٠حصان عندما تكون سرعته ١١٤٠الفة في الدقيقة، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك ١حصان، احسب:

أ) معامل الانزلاق.

ب) المفاقيد النحاسية في العضو الدائر.

ت) القدرة الداخلة إلى المحرك إذا كانت مفاقيد العضو الثابت ١٥٠٠وات.

ث) تيار الخط الداخل إلى المحرك إذا كان معامل القدرة ٠,٨٦

٢٠- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته٢٠حصان موصل نجمة، له ٤ أقطاب يتغذي من مصدر جهده ٤٠٠فولت، وتردده ٦٠هيرتز، يعطي الحمل الكامل عند انزلاق ٥٪. فإذا كانت المفقودات الميكانيكية تبلغ ٤٠٠وات فاحسب:

ا)العزم المتولد ب)العزم المستفاد منه ج) فقد النحاس في العضو الدوار.

٢١- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته١٠حصان موصل نجمة، له ٤ أقطاب يتغذي من مصدر جهده ١٥٠فولت، وتردده ٤٠٠هيرتز، يعطي القدرة المقننة عند انزلاق ٣٪. فإذا كان الفقد الميكانيكي ٢٠٠وات عند السرعة المقننة فأوجد:

أ)سرعة الدوران. ب) تردد تيار العضو الدائر.. ج) فقد النحاس في العضو الدائر.. د) قدرة الثغرة.

هـ) العزم المتولد. و) العزم المستفاد منه.

٢٢- إذا كانت القدرة الكهربائية الداخلة إلى محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب هي ٢٠٠كيلـووات عنـدما تكـون سـرعته ١٧١٠الفـة في الدقيقـة ويتغـذى علـى مصـدر جهـده ٤٥٠فولـت وتـردده٦٠هيرتـز فـإذا كانـت مفاقيـد العضـو الثابـت ٣كيلـووات والمفاقيـد الميكانيكيـة ٦كيلـووات، احسب:

أ- معامل الانزلاق.

ب- القدرة الميكانيكية المتولدة.

ت- المفاقيد النحاسية في العضو الدائر.

ث- كفاءة المحرك

٢٣- محـرك حثـي ثلاثـي الأوجـه ذو أربعـة أقطـاب يعمـل علـى مصـدر جهـده ٢٢٠فولـت وتـردده ٥٠هيرتـز، سـرعة المحـرك ١٤٤٠لفـة في الدقيقـة عنـد معامـل قـدره ٠,٨ متـأخر، القـدرة الخارجـة منـه ١٠,٨كيلووات، فإذا كانت مفاقيد العضو الثابت ١٠٦٠وات و المفاقيد الميكانيكية ٣٩٠وات، احسب ما يلي:

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدائر.

ب) تردد التيارات في العضو الدائر.

ت) تيار الخط.

ث) كفاءة المحرك.

٢٤- محـرك حثـي ثلاثـي الأوجـه ذو أربعـة أقطـاب يعمـل علـى مصـدر جهـده ٢٢٠فولـت وتـردده ٦٠هيرتز، وسرعته ١٧١٠لفة في الدقيقة، القدرة الخارجة منه ١١كيلووات، فإذا كانت مفاقيد العضو الثابت ١١٠٠وات والمفاقيد الميكانيكية ٤٢٠وات، احسب ما يلي إذا كان معامل القدرة ٠,٨٣متأخراً:

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدائر.

ب) تردد التيارات في العضو الدائر.

ت) تيار الخط.

٢٥- محـرك حثـي ثلاثـي الأوجـه ذو ثمانيـة أقطـاب يعمـل علـى مصـدر جهـده ٣٨٠فولـت وتـردده ٦٠هيرتز، فإذا كانت سرعة المحرك عند الحمل الكامل ٨٦٤لفة في الدقيقة، القدرة الداخلة للمحـرك ١٠كيلووات، وكانت مفاقيد العضو الثابت ٦٠٠وات والمفاقيد الميكانيكية ٣٥٠وات احسب:

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدائر.

ب) كفاءة المحرك.

ت) عزم المحرك عند الحمل الكامل.

٢٦- محـرك حثـي ثلاثـي الأوجـه ذو أربعـة أقطـاب يعمـل علـى مصـدر جهـده ٣٨٠فولـت وتـردده ٦٠هيرتز، عناصر الدائرة المكافئة لهذا المحرك كما يلي:

R_1=0.12 Ω	R_2`= 0.16 Ω	X_1= 0.45 Ω	X_2`= 0.52 Ω

فإذا كانت ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة احسب:

أ) تيار البدء.

ب) عزم البدء.

ت) العزم الأقصى للمحرك والانزلاق الذي يحدث عنده أقصي عزم.

ث) قيمة عزم البدء عند إضافة مقاومة قيمتها 1 Ω الى كل وجه من أوجه العضو الدائر.

٢٧- محـرك حثـي ثلاثـي الأوجـه ملفاتـه موصـلة علـى شـكل دلتـا يتغـذى مـن مصـدر جهـده ٢٢٠فولت، عناصر الدائرة المكافئة له كما يلي:

$R_1 = 0.4\ \Omega$	$R_2` = 0.6\ \Omega$	$X_1 = 0.82\ \Omega$	$X_2` = 0.86\ \Omega$

فإذا كانت السرعة التزامنية لهذا المحرك ١٥٠٠لفة في الدقيقة وسرعة العضو الدائر عند الحمل الكامل ١٤٤٠لفة في الدقيقة، احسب ما يلي:

أ) عزم الحمل الكامل.

ب) عزم البدء.

٢٨- محـرك حثـي ثلاثـي الأوجـه ذو أربعـة أقطـاب يعمـل علـى مصـدر جهـده ٣٨٠فولـت وتـردده ٦٠هيرتز، عناصر الدائرة المكافئة لهذا المحرك كما يلي:

$R_1 = 0.12\ \Omega$	$R_2` = 0.16\ \Omega$	$X_1 = 0.45\ \Omega$	$X_2` = 0.52\ \Omega$

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

أ) تيار البدء.

ب) عزم البدء.

ت) العزم الأقصى للمحرك والانزلاق الذي يحدث عنده العزم الأقصى.

٢٩- محرك حثي ثلاثي الأوجه موصل نجمة، له ٤ أقطاب يتغذي من مصدر جهده ٦٠٠فولت، وتردده ٦٠هيرتز، يمثل بالدائرة المكافئة المبينة بالشكل(١- ١١). ثوابت الدائرة المكافئة هي كالآتي:

$R_1 = 0.75\Omega$	$R_2' = 0.8\Omega$	$X_1 = X_2' = 2\Omega$	$X_m = 50\Omega$

فإذا كان مجموع المفقودات الميكانيكية والحديدية عند سرعة ١٧٢٨لفة في الدقيقة تبلغ ٨٠٠وات فاحسب عند هذه السرعة:

أ)التيار الداخل. ب) القدرة الداخلة. ج) قدرة الثغرة الهوائية. د) القدرة الخارجة.
هـ) العزم المتولد.. و) العزم المستفاد منه.

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

١- ٨- ١ طرق بدء الحركة :

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

١- سحب تيار كبير من الشبكة الكهربائية وما يصاحبه من هبوط في جهد الشبكة مما يؤثر سلباً علي الأحمال الأخرى الموصلة مع نفس الشبكة.

٢- تحميل خطوط النقل والقواطع وأجهزة الحماية بتيار أكبر من التيار المقنن. وقد يؤدي ذلك إلى تشغيل تلك الأجهزة وفصل التيار عن المكان.

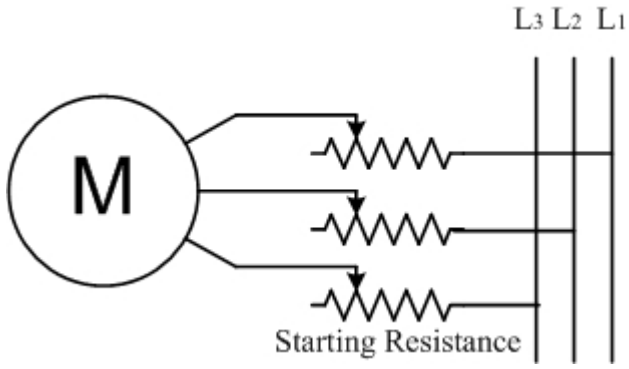
٣- رفع درجة حرارة ملفات المحرك، خصوصاً في المحركات الكبيرة، حيث يستغرق المحرك وقتاً أطول لبدء الحركة، مما يؤدي مع التكرار إلى انهيار المواد العازلة.

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

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

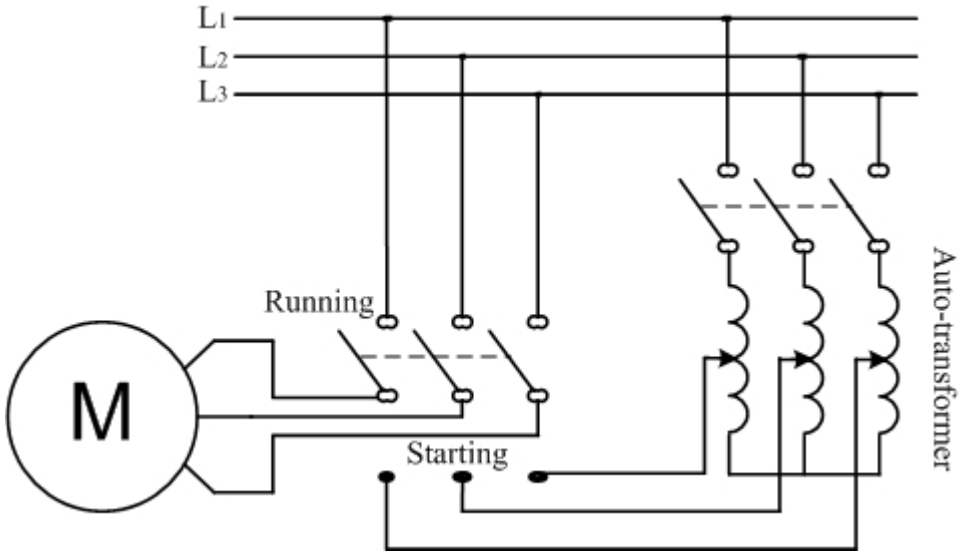
إن توصيل مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الثابت كما في الشكل (١- ٢١)، يؤدي إلى خفض الجهد المسلط على العضو الثابت وبالتالي يقلل تيار البدء ويتم التخلص من هذه المقاومة تدريجياً أثناء فترة البدء حتى تلغي تماماً بوصول المحرك إلى سرعته المقننة لكن من عيوب هذه الطريقة

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



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

١- ٨- ١- ٢ باستخدام محول ذاتي: (Auto-Transformer):



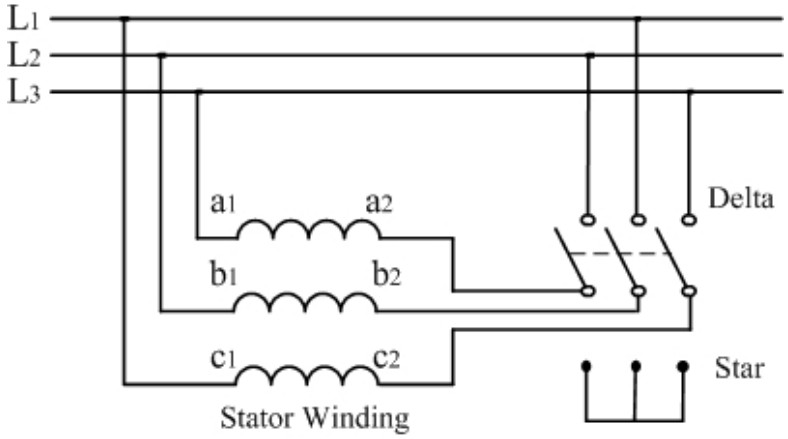
الشكل ١- ٢٢: توصيلة بدء الحركة باستخدام محول ذاتي

في هذه الطريقة يتم توصيل أطراف العضو الثابت إلى محول ذاتي ثلاثي الأوجه الشكل (١- ٢٢) بحيث يخفض الجهد المسلط على ملفات العضو الثابت للمحرك إلى حوالي ½ أو إلى $(1/\sqrt{3})$ الجهد المقنن و يلاحظ من الشكل أن المحرك موصل إلى مفتاح ذي ناحيتين، حيث يتم وضعة خلال فترة البدء على الناحية الموصل عليها المحول الذاتي، وعندما تصل السرعة إلى أقصي مدى لها يحول المفتاح إلى الناحية الأخرى، حيث يصبح المحرك موصلاً توصيلاً مباشراً علي الشبكة الكهربائية. هذه الطريقة

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

١- ٨- ١- ٣ باستخدام مفتاح نجمة/دلتا:

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

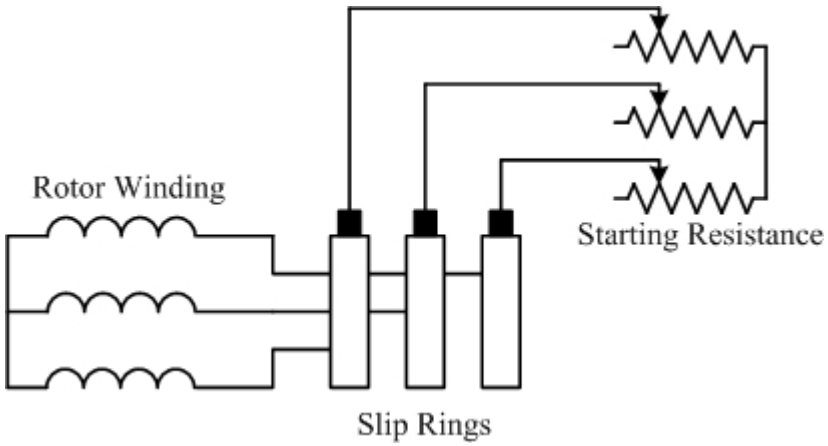


الشكل ١- ٢٣: توصيلة بدء الحركة باستخدام مفتاح نجمة\دلتا

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

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

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



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

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

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

١- ٨- ٢ التحكم في السرعة:

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

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

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

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

١- ٨- ٢- ٢ تغيير عدد الأقطاب:

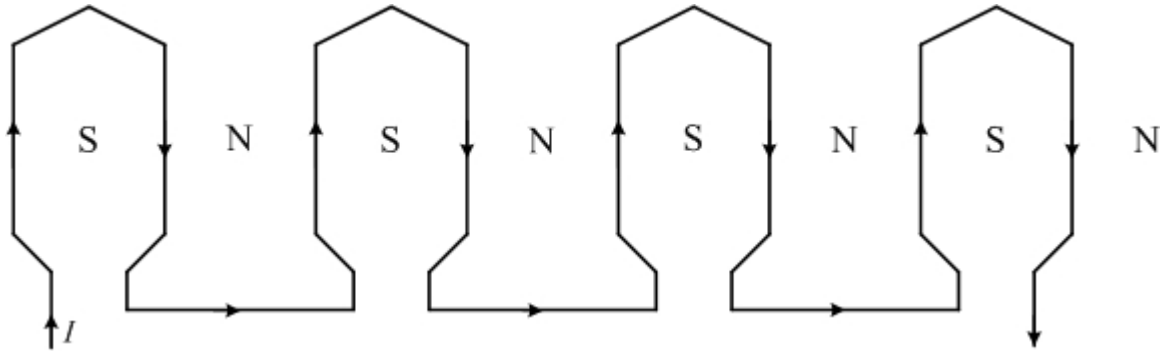
تعتمد هذه الطريقة على تغيير عدد أقطاب المحرك، مما يؤدي إلى تغيير قيمة سرعة التزامن للمحرك، وبالتالي سرعة دوران العضو الدائر، التي تتغير تغيراً طفيفاً جداً عنها، مابين حالتي اللاحمل والحمل الكامل. ويغلب استخدام هذه الطريقة في حالة المحرك ذي القفص السنجابي، نظراً لأن القفص السنجابي يمكن أن يتواءم مع المجال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

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

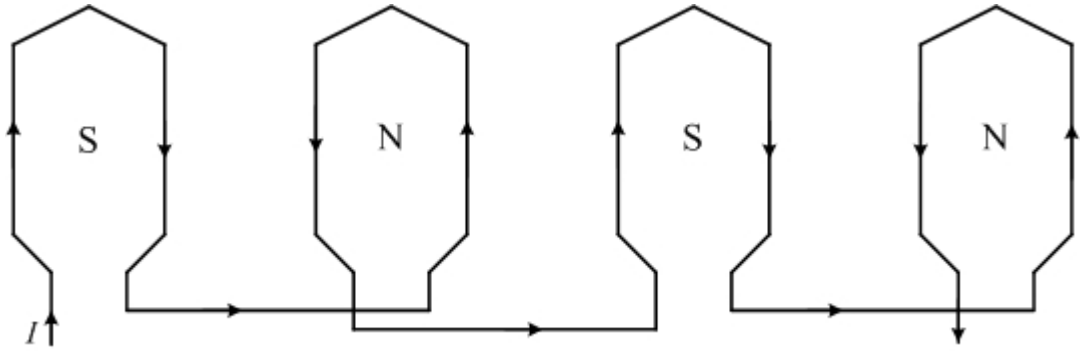
تزود المحركات التي تدير الآلات في الورش، التي تحتاج إلى سرعات متغيرة، بمجموعتين من الملفات في العضو الثابت، بحيث يمكن أن تعمل إحدى المجموعتين بأربعة أقطاب أو ثمانية، وتعمل المجموعة الأخرى بستة أقطاب أو اثنا عشر قطباً، وبذلك يمكن الحصول على السرعات ١٨٠٠,١٢٠٠,٩٠٠,٦٠٠لفة في الدقيقة عندما يتغذى المحرك من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

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

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



الشكل ١- ٢٥: توصيل الملفات لثمانية أقطاب



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

١- ٨- ٢- ٣ تغيير تردد المصدر:

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

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

أســئلة وتمـارين:

١- لماذا يكون تيار البدء عالياً في المحركات الحثية؟

٢- لماذا لا يحبذ توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت للمحركات الحثية لأجل تقليل تيار البدء؟

٣- ما مميزات استخدام المحول الذاتي في عملية بدء المحركات الحثية ؟

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

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

٦- اشرح كيف يمكن التحكم في سرعة المحرك الحثي ذي حلقات الانزلاق عن طريق إضافة مقاومة إلى دائرة العضو الدائر.

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

٨- فيما يلي اختر الإجابة الصحيحة:

أ) إذا زاد تحميل المحرك فإن الانزلاق (يقل/ لا يتأثر).

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

ت) إذا زيدت مقاومة العضو الدائر فإن سرعة المحرك (تقل/ تزداد).

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

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

ح) إذا زاد الانزلاق فإن تردد التيارات داخل ملفات العضو الدائر (يقل/ يزداد).

خ) إذا زادت سرعة المحرك فإن قيم التيارات داخل ملفات العضو الدائر (تزداد/ تقل).

د) إذا زاد عدد أقطاب العضو الثابت فإن سرعة المجال المغناطيسي الدوار (تقل/ تزداد).

٩- بماذا تؤثر زيادة مقاومة العضو الدائر زيادة طفيفة على كل من:

أ) عزم البدء.

ب) تيار البدء.

ت) السرعة عند الحمل الكامل.

ث) الكفاءة.

ج) معامل القدرة.

ح) درجة حرارة المحرك عند الحمل الكامل.

الإجابة أ)يزداد ب)يقل ت)تقل ث)تقل ج)يزداد ح)تزداد

١٠- محرك حثي ثلاثي الأوجه، له ٦ أقطاب موصل بمصدر تردده ٦٠هيرتز. الجهد المتولد في العضو الدائر عند عدم الحركة ٤فولت. احسب الجهد المتولد في العضو الدائر إذا كان المحرك يدور في نفس اتجاه دوران المجال المغناطيسي الدوار بسرعة:

أ) ٣٠٠ لفة في الدقيقة.

ب) ١٠٠٠ لفة في الدقيقة.

ت) ١٥٠٠ لفة في الدقيقة.

الإجابة أ)٣فولت ب)٠,٦٧فولت ت)- ١ فولت

١١- محرك حثي ثلاثي الأوجه ، له ٦ أقطاب موصل مع مصدر تردده ٦٠هيرتز. الجهد المتولد في العضو الدائر عند عدم الحركة ٢٤٠فولت. احسب الجهد المتولد والتردد في العضو الدائر إذا كان المحرك يدور بسرعة:

أ) ٦٠٠ لفة في الدقيقة، في نفس اتجاه دوران المجال المغناطيسي الدوار.

ب) ٩٠٠ لفة في الدقيقة، في نفس اتجاه دوران المجال المغناطيسي الدوار.

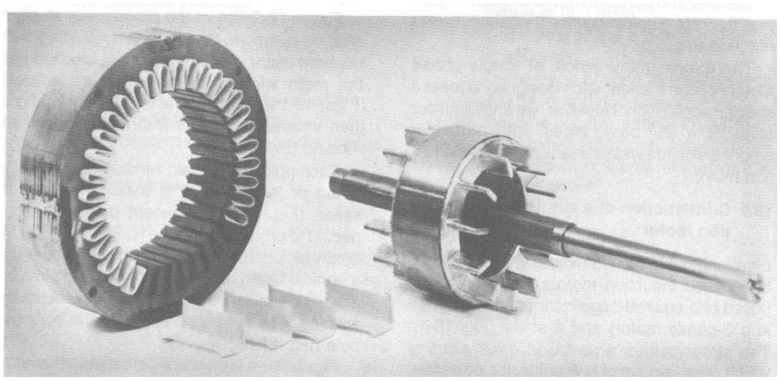
ت) ٣٦٠٠ لفة في الدقيقة، في عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسي الدوار.

الإجابة أ)١٢٠فولت، ٣٠هيرتز ب)٦٠فولت، ١٥هيرتز ت)٩٦٠ فولت، ٢٤٠هيرتز

١- ٩ المحركات الحثية أحادية الوجه : Single Phase Induction Motors

١- ٩- ١ التركيب:

تتركب المحركات الحثية أحاديه الوجه، من ملفات أحادية الوجه على العضو الثابت، وعضو دوار ذي قفص سنجابي كما في الشكل(١- ٢٧)، فتركيبها يشبه المحركات الحثية ثلاثية الأوجه ذات القفص السنجابي، عدا ما يختص بملفات العضو الثابت حيث تكون أحادية الوجه. الملفات أحادية الوجه موزعة في مجاري العضو الثابت بطريقة تجعلنا نحصل على قوة دافعة مغناطيسية موزعة توزيعاً جيبياً في الفراغ، وبالتالي نحصل على منحنى جيبياً لكثافة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية. ومن أهم سمات هذه المحركات أن ليس لها عزم لبدء الحركة، ولكن إذا بدأت حركتها بأي وسيلة مساعدة فسوف تستمر في الدوران في نفس اتجاه الدوران الذي بدأت فيه.



الشكل(١- ٢٧) يبين العضو الثابت خالياً من الملفات والعضو الدوار لمحرك حثي أحادي الوجه

١- ٩- ٢ نظرية المجال المغناطيسي المزدوج الدوار:

عند تغذية ملف العضو الثابت بتيار متردد، ذي موجة جيبيه مع الزمن، فإن موجة القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة، تكون موزعة توزيعاً جيبياً في الثغرة الهوائية، وأيضاً متناسبة جيبياً مع الزمن، ويمكن كتابتها كدالة جيبيه في الفراغ والزمن المعادلة(١- ٤٧):

$$F_1 = F_{1max}\ cos(\omega_s \cdot t).cos(\theta)$$ المعادلة(١- ٤٧):

القوة الدافعة المغناطيسية تولد مجالا مغناطيسيا، له نفس خواص التوزيع الجيبي في الثغرة الهوائية، والتناسب الجيبي مع الزمن، ويمكن تمثيله رياضيا بالمعادلة (١- ٤٨):

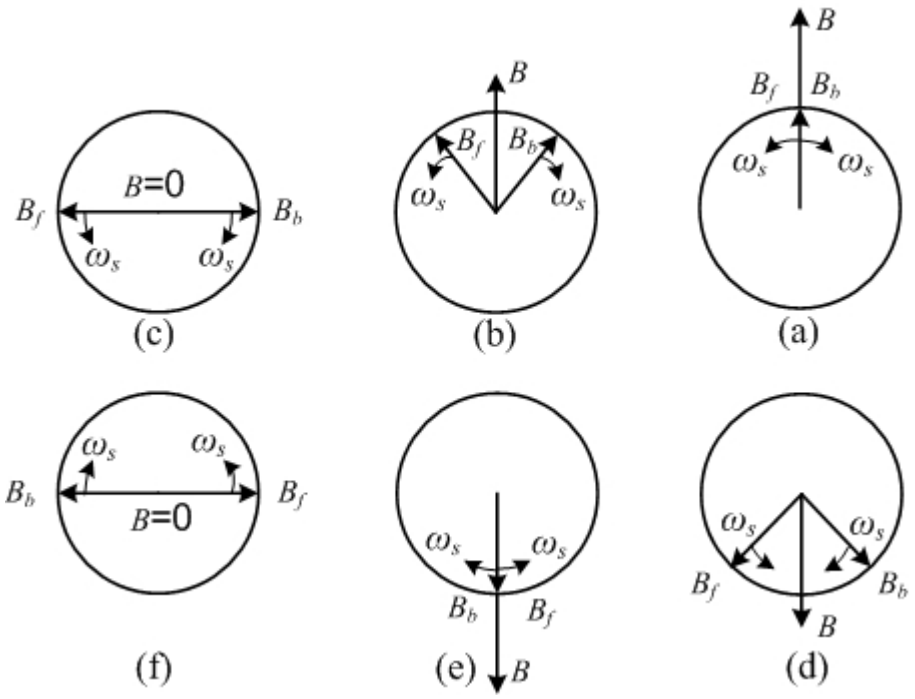
$$B_1 = B_{1max}\ cos(\omega_s \cdot t).cos(\theta)$$ المعادلة(١- ٤٨):

يمكن تحليل هذا المجال المغناطيسي إلى مجالين مغناطيسيين دوارين، الأول يدور في الاتجاه الموجب ويسمى بالمجال المغناطيسي الدوار الأمامي، و عادة يكون اتجاه دورانه، عكس اتجاه دوران عقارب الساعة، والمجال الآخر يدور في الاتجاه المضاد ويسمى بالمجال المغناطيسي الدوار الخلفي، وهو الذي يدور مع عقارب الساعة (حسب العرف المتبع في الآلات الكهربائية)، المعادلة (١- ٤٩) توضح هذا التحليل:

$$B_1 = \frac{1}{2} B_{1max} \cos(\theta - \omega_s \cdot t) + \frac{1}{2} B_{1max} \cos(\theta + \omega_s \cdot t)$$ المعادلة(١- ٤٩):

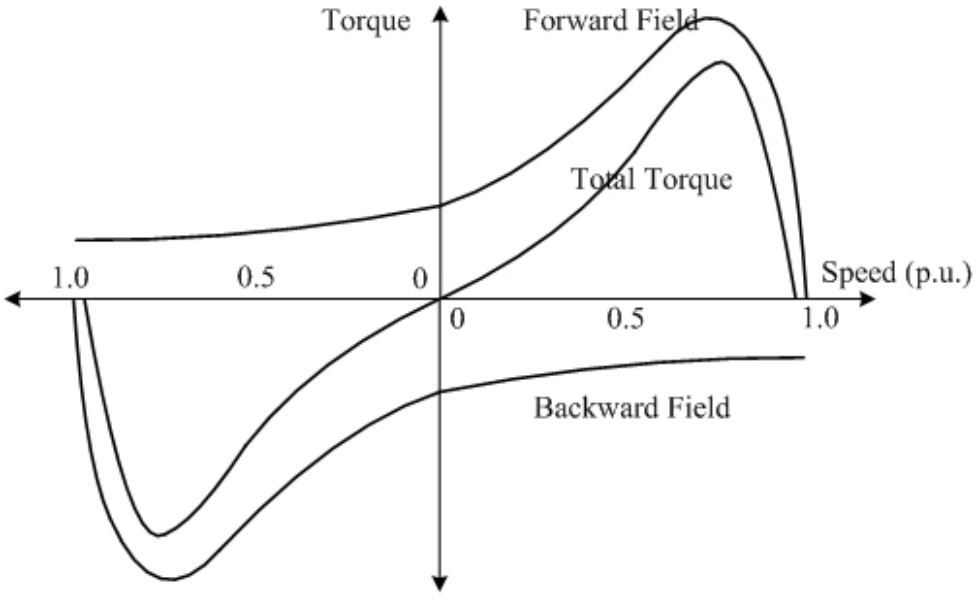
حيث يمثل الحد الأول مجالاً مغناطيسياً جيبياً دائراً بالسرعة التزامنية وذو كثافة عظمى $\frac{1}{2}B_{1max}$، كما يمثل الحد الثاني مجالاً مغناطيسياً جيبياً دائراً آخر بنفس الكثافة العظمي، ويدور المجالين في اتجاهين متضادين بنفس السرعة التزامنية ω_s حول محيط الثغرة الهوائية. كل من هذين المجالات المغناطيسيين الدوارين يولد عزم دوران في الاتجاه الذي يدور فيه، كما في حالة المحركات الحثية الثلاثية المراحل. يمكن توضيح كيفية تحليل المجال المغناطيسي النابض الناشئ عن ملف أحادي إلى مجالين مغناطيسيين دوارين متساويين في القيمة، ويدور كل منهما عكس الآخر بنفس سرعة الدوران ω_s والقيمة العظمى لكل منهما تساوي نصف القيمة العظمى للمجال أحادي الوجه، باستخدام الرسم التوضيحي في الشكل(١- ٢٨)، حيث المتجه الدوار B_f يمثل المجال الأمامي والمتجه B_b يمثل المجال الخلفي و يلاحظ أن مجموع هذين المتجهين B يكون دائماً في اتجاه رأسي وتتغير قيمته مع دوران المتجهين B_f & B_b وهو يعادل المجال المغناطيسي النابض الناشئ عن ملف أحادي الوجه.

$$B = B_f + B_b$$ المعادلة(١- ٥٠):



الشكل ١- ٢٨ كيفية تحليل المجال النابض إلى مجالين دوارين

إذن يمكننا الحصول على خواص المحرك الحثي أحادي الوجه، بتطبيق قاعدة التراكب (Superposition)على خواص محركين متماثلين، كل منهما ثلاثي المراحل و يدور المحرك الأول في عكس اتجاه دوران المحرك الثاني. إذا قمنا برسم منحني العلاقة بين العزم والسرعة، لكل من المجالين، نستطيع الحصول على منحني خواص المحرك الحثي أحادي الوجه، كما هو مبين في الشكل(١- ٢٩)



الشكل (١- ٢٩) منحنيي العزم مع السرعة للمجالين الأمامي والخلفي.

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

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

المعادلة(١- ٥١):
$$s_b = \frac{n_s + n}{n_s} = 2 - s$$

عند ظروف التشغيل العادية بمعامل انزلاق في حدود ٥٪ (s=0.05) للمجال الأمامي، تكون قيمة معامل الانزلاق للمجال الخلفي كبيرة جداً مقارنة بقيمة معامل الانزلاق للمجال الأمامي.

مثال ١- ١٤:

محرك حثي أحادي الوجه، ٢٣٠فولت، ٦٠هيرتز، ذو أربعة أقطاب يعمل عند الحمل الكامل بانزلاق مقداره ٤٪ احسب:

i. الانزلاق للمجال الخلفي s_b
ii. السرعة التزامنية n_s
iii. سرعة المحرك عند الحمل الكامل.

الحل:

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

$$ii - \ The\ synchronous\ speed \equiv n_s = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \quad \text{rpm}$$

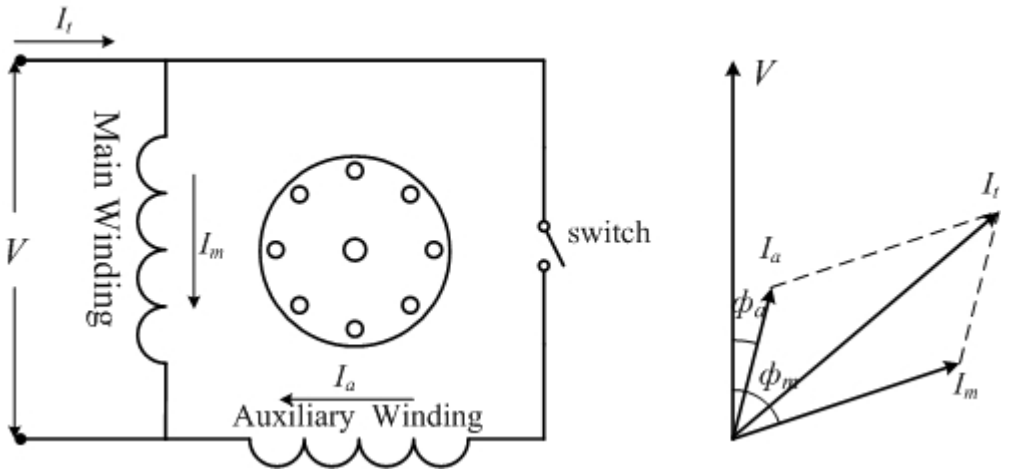
$$iii - \ The\ motor\ speed \equiv n = (1 - s) n_s = 0.96 \times 1800 = 1728 \quad \text{rpm}$$

١- ٩- ٣ طرق البدء ومنحنيات الخواص للمحركات الحثية أحادية الوجه :

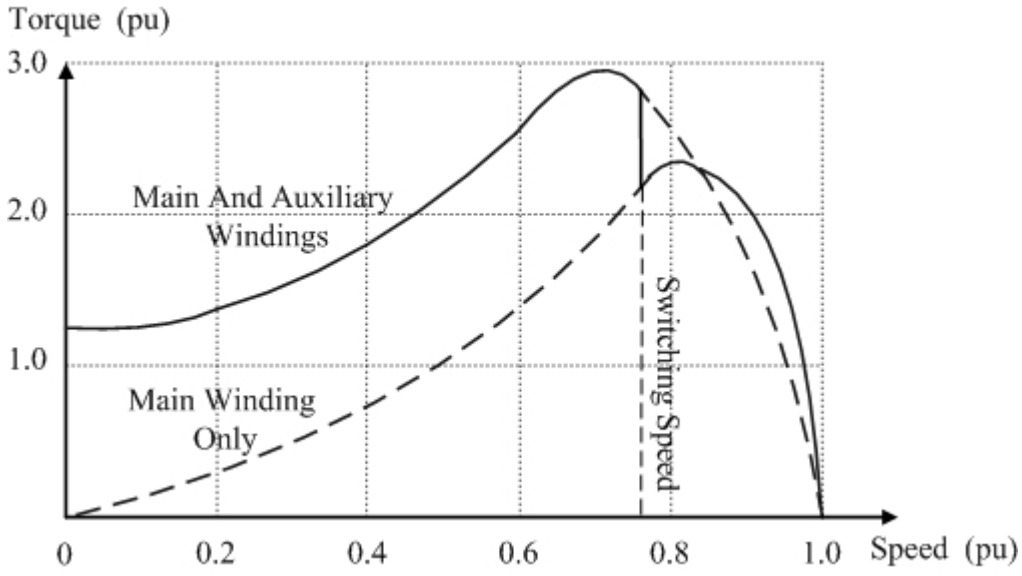
المحركات الحثية أحادية الوجه تصنف طبقاً للطريقة المستخدمة لبدء حركتها، كما يطلق عليها أسماء تصف الطريقة التي استخدمت لبدء حركتها، فيما يلي نتناول وصف لأنواع المحركات الحثية أحادية الوجه الشائعة الاستخدام:

١- ٩- ٣- ١ المحرك المشطور الوجه : (Split-Phase Motor)

المحرك المشطور الوجه يحتوي على ملفين في العضو الثابت، الأول هو الملف الرئيس، والثاني هو الملف المساعد (أو ملف بدء الحركة)، كل من هذين الملفين موزع في مجاري العضو الثابت، بحيث تكون الزاوية بين محوري الملفين تسعون درجة كهربائية في الفراغ، وبطريقة تجعلنا نحصل على مجال مغناطيسي موزع توزيعاً جيبياً في الفراغ، من كل من الملفين على حدة، الشكل (١- ٣٠) يبين دائرة توصيل هذين الملفين. تستعمل أسلاك ذات مساحة مقطع صغيرة للملفات المساعدة، فتكون نسبة مقاومتها إلى ممانعتها الحثية كبيرة، في حين تكون نسبة المقاومة إلى الممانعة الحثية للملفات الرئيسة، أقل من ذلك، وحيث إن الملفين موصلان على التوازي مع نفس مصدر الجهد، فإن تيار الملف المساعد I_a يكون متأخراً بزاوية صغيرة عن جهد المصدر، بينما يكون تيار الملف الرئيسي، I_m متأخراً بزاوية أكبر من ذلك بصورة محسوسة، كما هو موضح بمخطط المتجهات عند بدء الحركة في الشكل (١- ٣٠) .وبما أن تيار الملفات المساعدة متقدم عن تيار الملفات الرئيسة، فإن المجال الكلي للعضو الثابت يصل إلى قيمته العظمى على محور الملفات المساعدة أولاً، ثم بعد ذلك يصل إلى قيمته العظمى على محور الملفات الرئيسة. إذن تيار الملفين يمثل نظاماً ثنائي الوجه غير متزن، والمحرك يكافئ محركاً ذا وجهين غير متزن، فينشأ مجال مغناطيسي دوار، ينتج عنه عزم دوران يتسبب في بدء دوران المحرك.



الشكل (١- ٣٠) كيفية التوصيل ومخطط المتجهات عند بدء الحركة للمحرك المشطور الوجه.



الشكل (١- ٣١): منحنى العزم/السرعة (المحرك المشطور الوجه).

بعد أن يبدأ المحرك حركته بالملفين معاً تفصل الملفات المساعدة، باستخدام مفتاح يعمل بقوة الطرد المركزي عندما تصل سرعة المحرك إلى حوالي خمسة وسبعين في المائة (٧٥٪)من سرعة التزامن، ويستمر المحرك بعد ذلك في الدوران بالملف الرئيس فقط. الشكل (١- ٣١).

أبسط طريقة للحصول على نسبة كبيرة بين مقاومة الملفات المساعدة إلى ممانعتها الحثية، هي استخدام سلك ذي مساحة مقطع صغير للملفات المساعدة، مقارنة بمساحة مقطع الأسلاك المستخدمة للملفات الرئيسة، كما يمكن التقليل من الممانعة الحثية للملفات المساعدة، بوضعها في الجزء العلوي من مجاري العضو الثابت و لا يشكل استخدام أسلاك ذات مساحة مقطع صغير للملفات المساعدة أي خطر عليها، حيث إنها لا تستعمل إلا أثناء فترة بدء الحركة فقط.

من خصائص المحركات ذات الوجه المشطور، أن لها عزم بدء بحركة متوسط القيمة وتياراً منخفضاً أثناء بدء الحركة، وتستخدم في المراوح والشفاطات ومضخات الطرد المركزي وفي الأجهزة المنزلية والمكتبية.

مثال ١- ١٥:

محرك حثي أحادي الوجه، ١١٠فولت، ٥٠هيرتز من النوع المشطور الوجه، له الثوابت الآتية عند بدء الحركة:

معاوقة الملف الرئيسي $Z_m = 1.2 + j\,25 \quad \Omega$

معاوقة الملف المساعد $Z_a = 12 + j\,5 \quad \Omega$

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

الحل:

التيار في كل من الملف الرئيس والملف المساعد:

تيار الملف الرئيس $I_m = \frac{V_1}{Z_m} = \frac{110\angle 0}{1.2 + j\,25} = \frac{110\angle 0}{25.03\angle 87.252}$

$I_m = 4\angle -87.252$ A

تيار الملف المساعد $I_a = \frac{V_1}{Z_a} = \frac{110\angle 0}{12 + j\,5} = \frac{110\angle 0}{13\angle 22.62}$

$I_a = 8.46\angle -22.62$ A

التيار الكلي المسحوب من المصدر:

$I_t = I_m + I_a$

$I_t = 4\angle -87.25 + 8.46\angle -22.62^{o}$

$I_t = (0.192 - j3.995) + (7.81 - j3.254)$

$I_t = 8.02 - j7.25 = 10.8\angle -42.11^{o}$ A

معامل القدرة $Cos(-42.11) = 0.742$

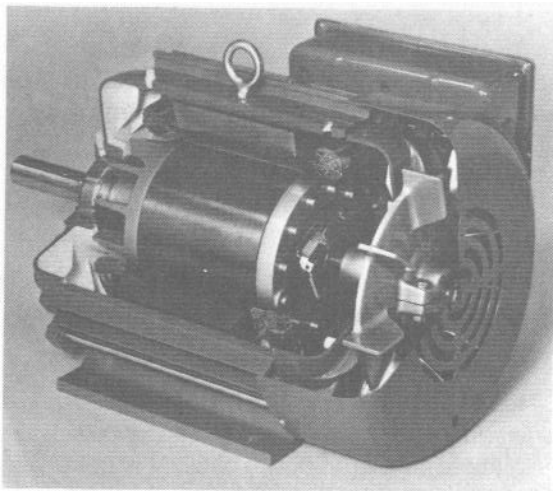
الفرق الزمني بين تياري الملف الرئيس والملف المساعد:

$\theta = \phi_m - \phi_a = -87.25 - (-22.62) = -64.63^{o}$

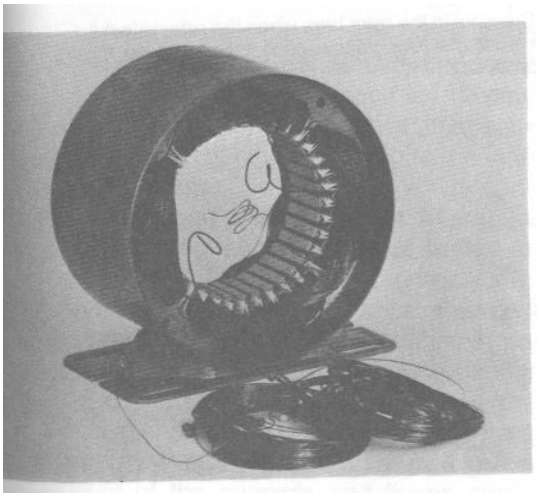
I_m lags I_a by 64.62^{o}

١- ٩- ٣- ٢ المحركات ذات المكثفات: (Capacitor Motors)

يمكـن أن تسـتخدم المكثفـات لتحسـين خـواص وأداء المحـرك الحثـي أحـادي الوجـه، أثنـاء بـدء الحركة أو أثناء التشغيل، أوكليهما، اعتماداً على حجم ونوع المكثف المستخدم وطريقة توصيله.



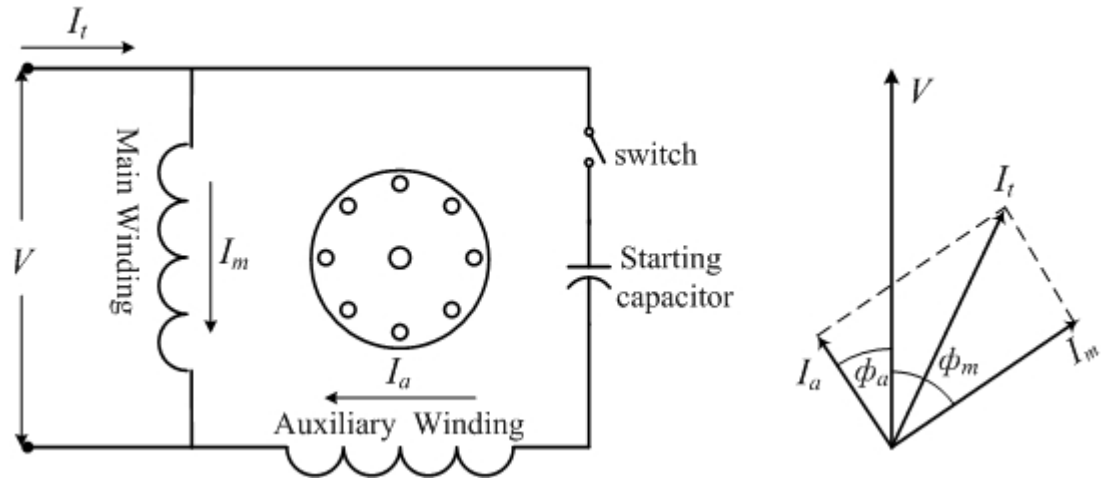
مقطع في المحرك ذي مكثف البدء



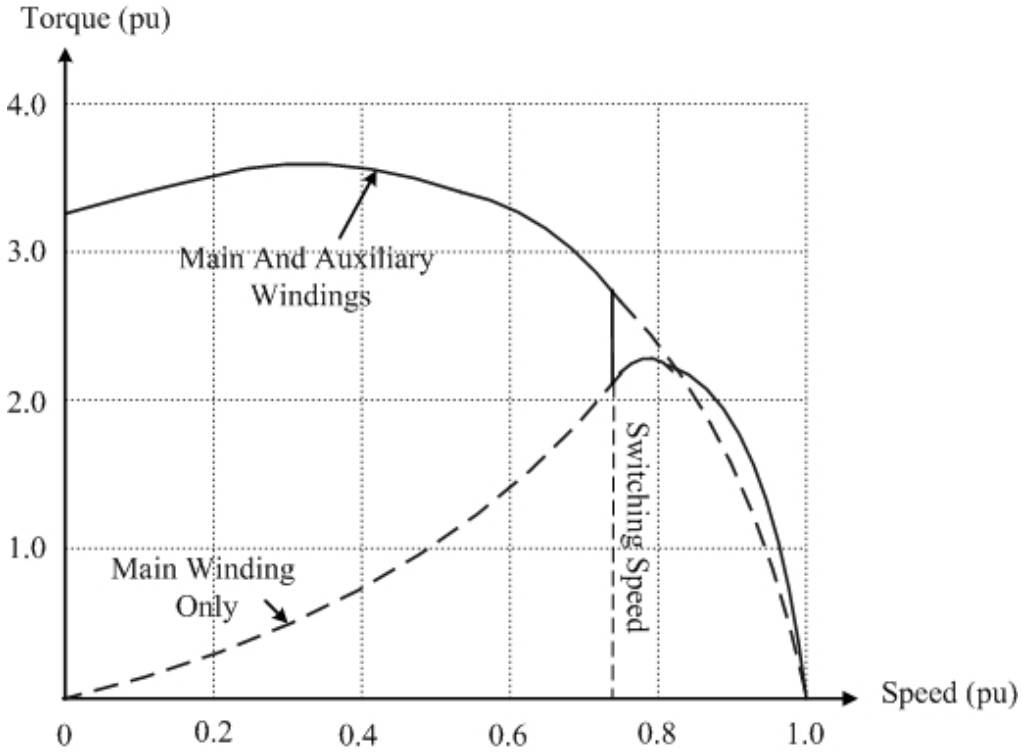
العضو الثابت وبداخله الملفات

أ. المحرك ذو مكثف البدء: Capacitor –Start Motor

يحتوي المحرك ذو مكثف بدء الحركة على ملفات رئيسة وملفات مساعدة على عضوه الثابت، الفرق الزمني بين زاوية تياري الملفين، نحصل عليه بواسطة مكثف موصل على التوالي مع الملفات المساعدة، كما هو مبين في الشكل(١- ٣٢)، يفصل الملف المساعد بعد بدء الحركة في هذه الحالة أيضاً، تماماً كما يحدث في النوع السابق، وبالتالي يمكن تصميم الملفات المساعدة والمكثف، بحيث يكون تشغيلهما تشغيلاً متقطعاً، مما يساعد على تقليل كلفة كل منهما و.من الممكن باستخدام مكثف بدء الحركة ذي القيمة المناسبة، التي تجعل تيار الملفات المساعدة I_a، يتقدم عن تيار الملفات الرئيسة I_m (عند سكون العضو الدوار) بزاوية مقدارها تسعون درجة كهربائية الشكل (١- ٣٣)، أن نحصل على خصائص محرك متزن ذي وجهين.عند بدء الحركة.



الشكل (١- ٣٢) .كيفية التوصيل ومخطط المتجهات للمحرك مكثف البدء

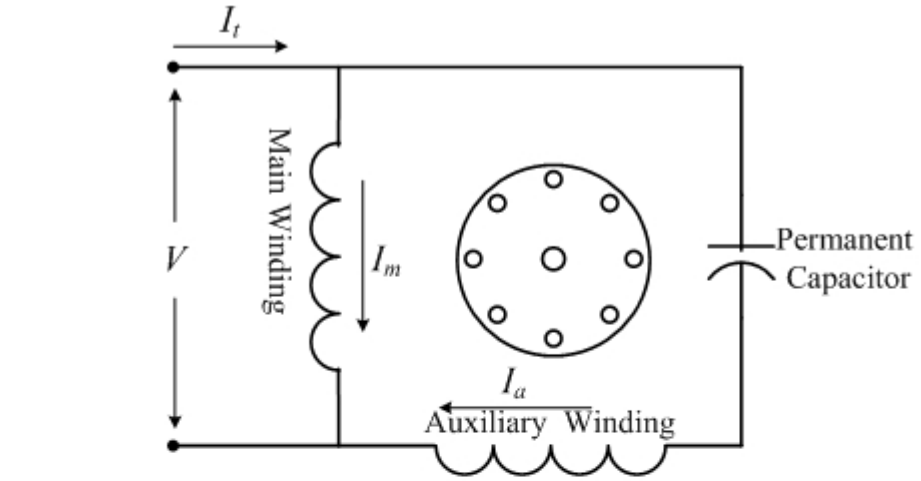


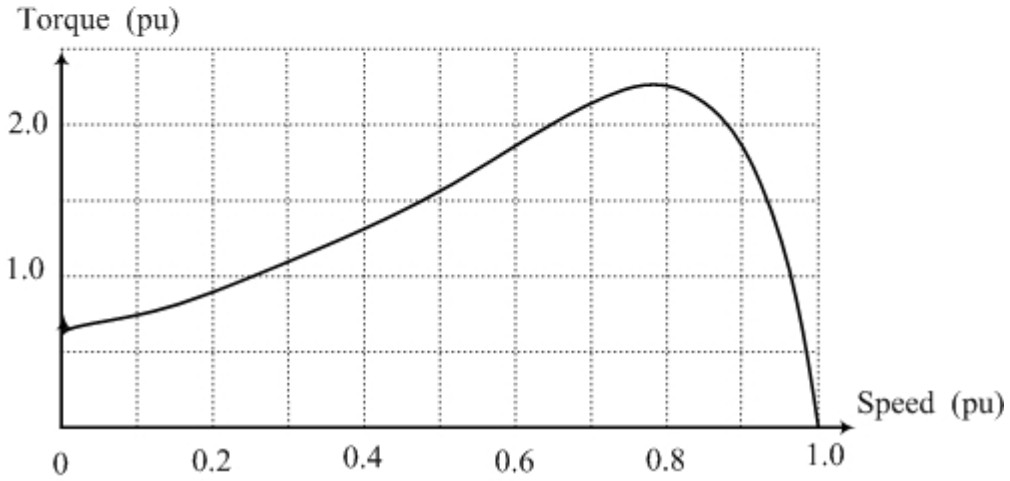
الشكل (١- ٣٣).منحنى العزم/السرعة للمحرك ذي مكثف البدء

الشكل (١- ٣٣) .يبين منحني الخواص للمحرك ذي مكثف بدء الحركة، ومن أهم خصائصه العزم الكبير المتولد عند بدء الحركة، يبدأ المحرك الدوران والملفين موصلين عند بدء الحركة مما يعطي عزم دوران كبير ثم تفصل الملفات المساعدة ويستمر المحرك في الدوران بالملف الرئيس أثناء التشغيل. يستخدم هذا النوع في الضواغط والمضخات والثلاجات، وأجهزة التبريد والتكييف وفي الأحمال التي تتطلب عزماً كبيراً لبدء حركتها.

ب. المحرك ذو المكثف الدائم: Permanent-Capacitor Motor

في المحرك ذي المكثف الدائم تظل الملفات المساعدة عاملة مع الملفات الرئيسة أثناء التشغيل المستمر للمحرك، فيمكن تبسيط تركيب المحرك، بالاستغناء عن مفتاح الطرد المركزي، المشار إليه في الحالتين السابقتين.الشكل (١- ٣٤).يبين كيفية توصيل الملفات كما يبين أيضاً منحنى خواص المحرك.

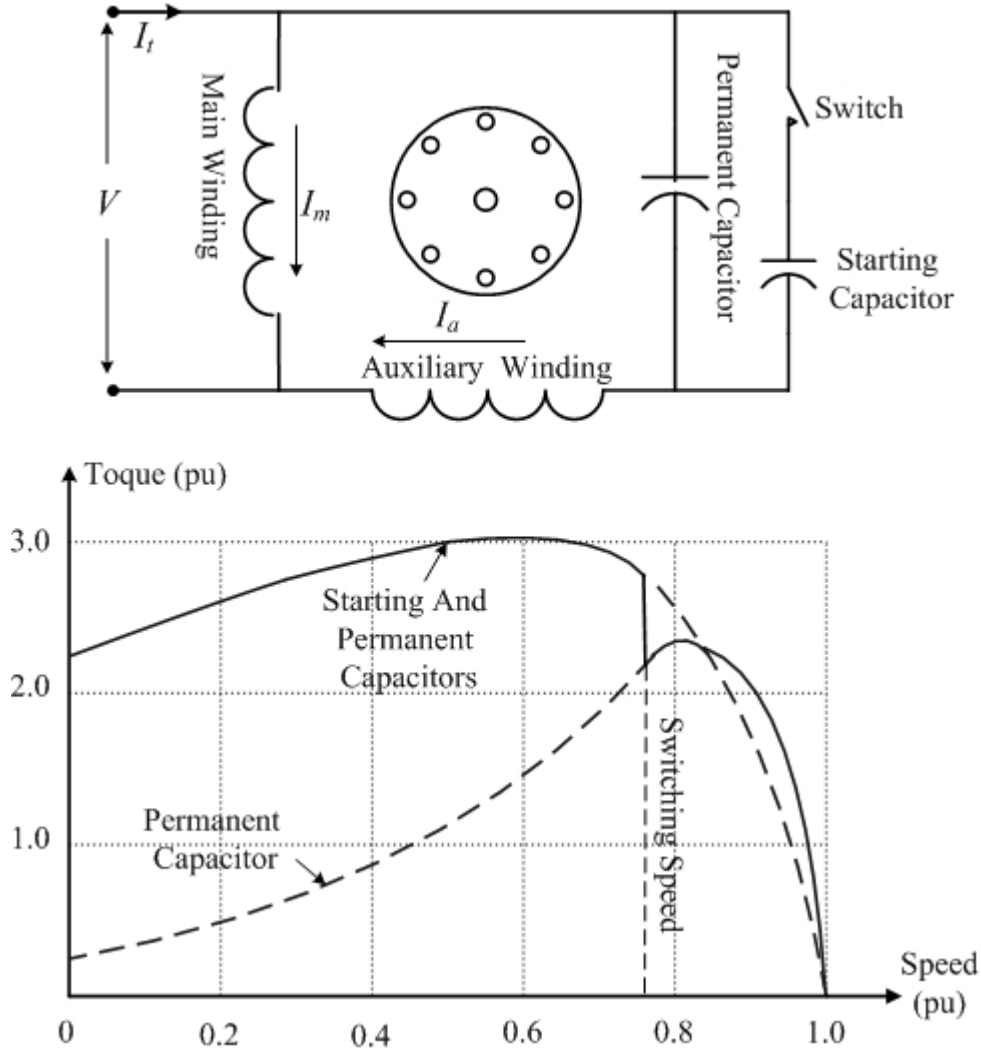




الشكل (١- ٣٤) كيفية توصيل وخواص المحرك ذي المكثف الدائم

تصمم الملفات المساعدة والمكثف على أساس التشغيل المستمر، وبحيث يصبح المحرك مكافئاً لمحرك مثالي ذي وجهين عند حمل بعينه، فيختفي وجود المجال الخلفي مما يؤدي إلى تحسين الكفاءة، كما تختفي أيضا الضجة التي كان يسببها المجال الخلفي، فتكون النتيجة محركاً هادئ الصوت أثناء التشغيل، كما يؤدي استخدام المكثف الدائم إلى تحسين معامل القدرة أثناء التشغيل ويستخدم هذا النوع من المحركات في التطبيقات التي تتطلب هدوءاً في الصوت أثناء تشغيلها.

المحرك ذو المكثفين: Two-Values Capacitor Motor



الشكل(١- ٣٥) كيفية توصيل وخواص المحرك ذي المكثفين

عند استخدام مكثفين أحدهما يستخدم أثناء فترة البدء فقط، والآخر يستمر عمله أثناء التشغيل المستمر للمحرك، يمكننا الحصول على أفضل خواص للمحرك، أثناء فترتي البدء والتشغيل معاً. الشكل (١- ٣٥) يبين طريقة توصيل هذين المكثفين، كما يبين منحني خواص المحرك ويستخدم مكثف من النوع الورقي المشبع بالزيت موصل على التوالي بصفة مستديمة (ويسمي المكثف الدائم)، مع الملفات المساعدة لتحسين خواص التشغيل. كما يستخدم مكثف آخر لتحسين عزم بدء الحركة، من النوع ذي السائل الكهربي (ويسمي مكثف بدء الحركة) موصلاً مع مفتاح طرد مركزي خاص به، على التوازي مع المكثف الدائم، ليعملا معاً أثناء فترة البدء فقط، ويعتبر هذا النوع من المحركات أكثر كلفة من الأنواع السابقة، ويستخدم في التطبيقات التي تتطلب تشغيلاً هادئاً مع عزم كبير لبدء الحركة.

مثال ١- ١٦:

محرك حثي أحادي الوجه، من النوع ذي مكثف بدء الحركة، جهده ١٢٧ فولت وتردده ٦٠ هيرتز، ثوابت الملفات الرئيسة والمساعدة عند البدء:

$$Z_m = 4.2 + j3.8 \quad \Omega \qquad\qquad Z_a = 8.8 + j3.3 \quad \Omega$$

عين قيمة مكثف البدء اللازمة للحصول على زاوية مقدارها تسعون درجة كهربائية بين تياري الملفات الرئيسة والمساعدة عند بدء الحركة.

الحل:

زاوية معاوقة الملفات الرئيسة:

$$\phi_m = tan^{-1}\left(\frac{3.8}{4.2}\right) = 42.14^o$$

زاوية معاوقة الملفات المساعدة يجب أن تكون:

$$\phi_a = 90 - \phi_m = 47.86^o$$

ممانعة المكثف X_c يجب أن تحقق العلاقة:

$$tan^{-1}\left(\frac{X_c - 3.2}{8.8}\right) = 47.86 \qquad \frac{X_c - 3.2}{8.8} = tan\,(47.86) = 1.1$$

$$X_c = 1.1 \times (8.8) + 3.2 = 12.93 \quad \Omega$$

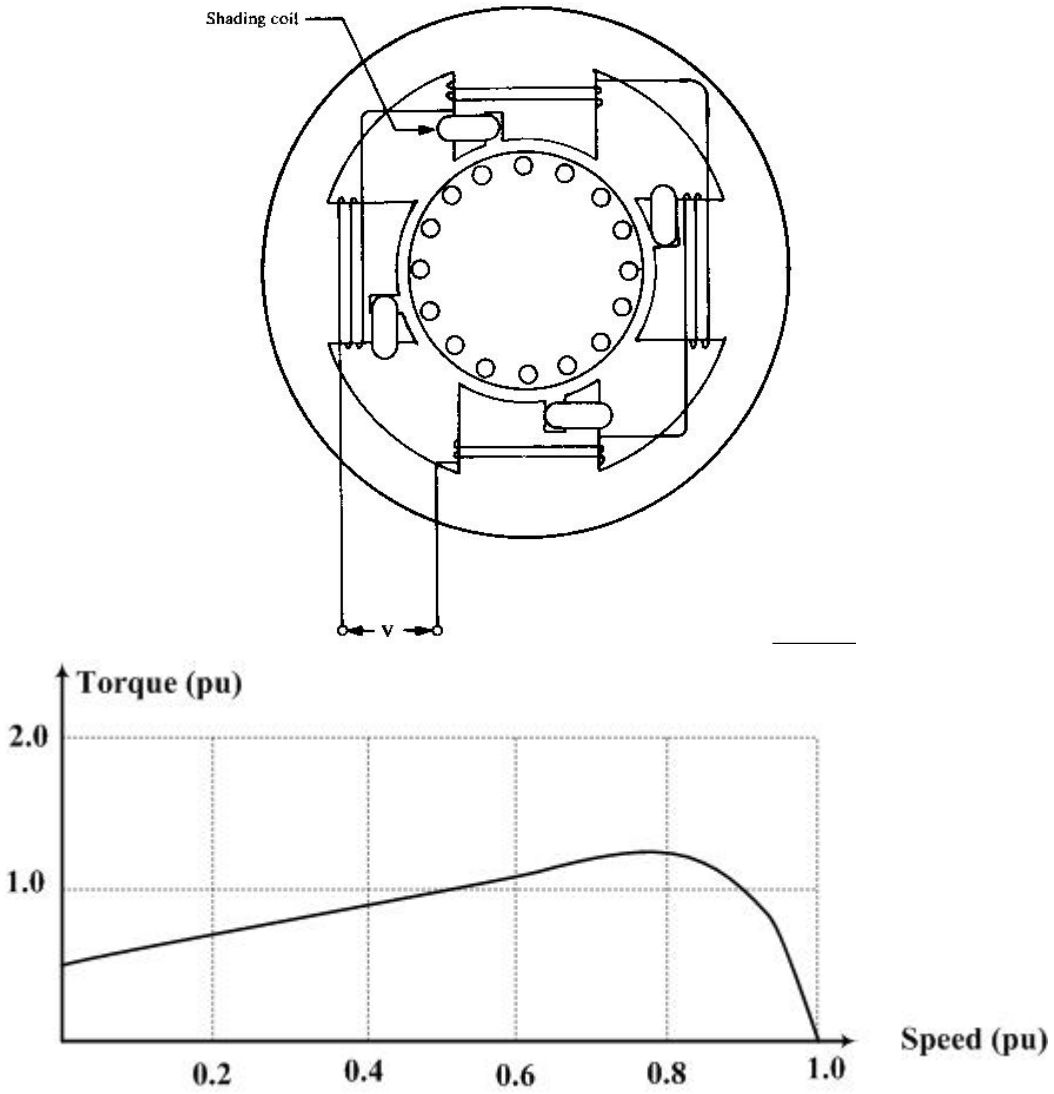
سعة المكثف يمكن حسابها من:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c}$$

$$c = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{377 \times 12.93} = 205 \quad \mu F$$

١- ٩- ٣- ٣ المحرك ذو الوجه المظلل: Shaded-Pole motor

يتكون العضو الثابت لهذا المحرك من أقطاب بارزة ملفوف عليها ملفات الثابت، كل قطب مقسوم إلى جزأين بواسطة مجرى صغير، حيث يتم إحاطة (تطويق) جزء من كل قطب بلفة مقصورة من النحاس، تسمى الملف المظلِل (Shading Coil) ، كما هو موضح في الشكل (١- ٣٦).



الشكل (١- ٣٦) تركيب وخواص المحرك ذي الوجه المظلل

تتولد في الملف المظلِل تيارات بفعل جزء المجال المغناطيسي المتشابك معه، تؤدي إلى تأخر محصلة المجال المغناطيسي لهذا الجزء من القطب (الجزء المظلل) زمنياً عن المجال المغناطيسي في الجزء الآخر، نتيجة لذلك يتكون مجال مغناطيسي دوار يتحرك من الجزء غير المظلل باتجاه الجزء المظلل من القطب، مما ينشأ عنه عزم دوران صغير يعمل على دوران المحرك. يبين الشكل (١- ٣٦) تركيب المحرك، كما

يبين منحني العلاقة بين العزم والسرعة. يتميز هذا المحرك برخص الثمن وبساطة التركيب، ويستخدم في المراوح الصغيرة ومضخات المياه المستخدمة في المكيفات الصحراوية وغسالات الملابس.

اختبار ذاتي:

اختر الإجابة أو الإجابات الصحيحة:

١- ملف بدء الحركة (الملف المساعد) للمحرك أحادي الوجه ذي الوجه المشطور، موجود في ... .

أ. الدوار

ب. الثابت

ج. المنتج

د. المجال

٢- من خواص المحركات أحادية الوجه أنها ... .

أ. لا تحتاج لوسيلة بدء حركة.

ب. تحتاج لوسيلة بدء حركة.

ج. بها ملف واحد فقط.

د. تدور في اتجاه واحد فقط.

٣- بعد فصل ملفات بدء الحركة في المحركات أحادية الوجه من مصدر التغذية يستمر المحرك في الدوران بالملف ..... فقط.

أ. الدوار

ب. المساعد

ج. الرئيس

د. التشغيل

٤- لو تُرك ملف بدء الحركة موصلاً أثناء تشغيل المحرك أحادي الوجه فسوف .. ....

أ. يسحب المحرك تياراً كبيراً من المصدر.

ب. يدور المحرك بسرعة كبيرة.

ج. يدور المحرك بسرعة بطيئة.

د. تحدث شرارة كهربائية.

٥- يمكن عكس اتجاه دوران المحركات الحثية أحادية الوجه ب.... .

أ. عكس أطراف ملفاته.

ب. عكس أطراف الملف المساعد فقط.

ج. عكس أطراف الملف الرئيس فقط.

د. عكس أطراف مصدر التغذية.

ه. جميع ما سبق.

٦- في المحرك ذي مكثف بدء الحركة، يوصل المكثف على التوالي مع الملف ....

أ. المساعد.

ب. الرئيس.

ج. الدوار.

د. التشغيل.

٧- المحرك ذو المكثف الدائم لا يحتوي على .....

أ. مفتاح الطرد المركزي.

ب. ملف بدء الحركة.

ج. القفص السنجابي.

د. الملف الرئيس.

٨- المكثف المستخدم لبدء الحركة في المحرك ذي المكثفين، يكون من النوع ... .

أ. الورقي المشبع بالزيت.

ب. ذي السائل الكهربي.

ج. الهوائي.

د. السيراميك.

٩- جميع الجُمل الآتية والتي تخص المحرك ذا الوجه المظلل صحيحة ما عدا.

أ. يدور المحرك باتجاه من القطب غير المظلل إلى القطب المظلل.

ب. كفاءة المحرك رديئة جداً.

ج. معامل القدرة منخفض.

د. له عزم كبير لبدء الحركة.

أسئلة وتمارين:

١- لماذا تحتاج المحركات أحادية الوجه لوسيلة مساعدة لبدء حركتها؟ وضح إجابتك بالرسم.

٢- عَدِّدْ الطرق المختلفة المستخدمة لبدء حركة المحركات أحادية الوجه.

٣- ما أهم مميزات المحرك ذي مكثف بدء الحركة مقارنة بالمحرك المشطور الوجه؟

٤- ما أهم مميزات المحرك ذي المكثف الدائم مقارنة بالمحرك المشطور الوجه؟

٥- ما أهم مميزات المحرك ذي المكثفين مقارنة بالمحرك ذي المكثف الدائم؟

٦- في أي التطبيقات تستخدم المحركات الحثية أحادية المرحلة؟ أعط أمثلة لاستخدام كل نوع من أنواع المحركات.

٧- محرك حثي أحادي الوجه ٢٣٠فولت، ٥٠هيرتز ذي ستة أقطاب $(2p = 6)$ يعمل عند الحمل الكامل بانزلاق مقداره ٥٪ احسب:

i. الانزلاق للمجال الخلفي (s_b).

ii. سرعة التزامن n_s

iii. سرعة المحرك عند الحمل الكامل.

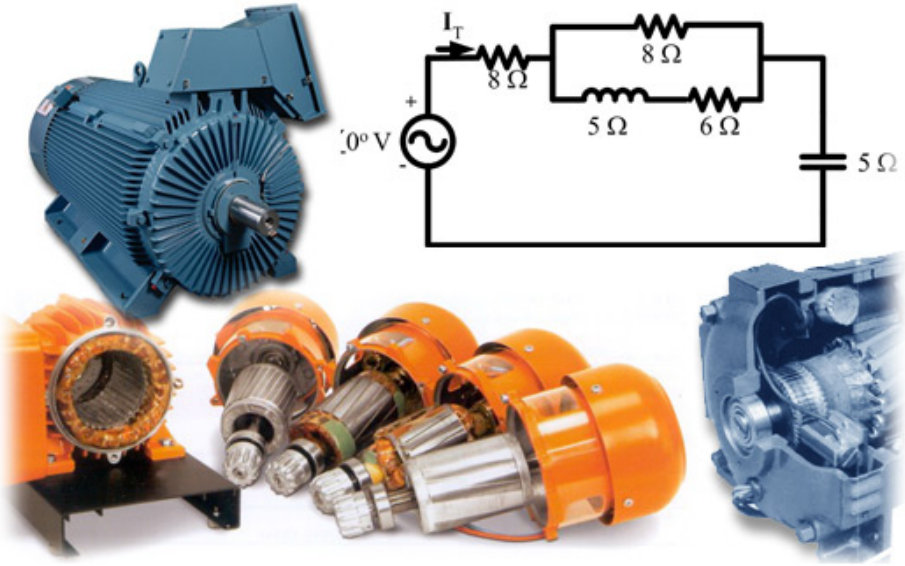
٨- محرك حثي أحادي الوجه من النوع ذي مكثف بدء الحركة، جهده ١٢٠فولت وتردده ٦٠هيرتز، ثوابت الملفات الرئيسة والمساعدة عند البدء:

$$Z_m = 4.2 + j3.6 \ \ \Omega \qquad\qquad Z_a = 8.4 + j3.0 \ \ \Omega$$

احسب قيمة مكثف البدء اللازم للحصول على زاوية مقدارها ثمانون درجة كهربائية (80°) بين تياري الملفات الرئيسة والمساعدة عند بدء الحركة.

آلات التيار المتردد

الآلات التزامنية



الآلات التزامنية

المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

الجدارة: معرفة أنواع وتركيب وخواص تشغيل وأداء الآلات التزامنية ثلاثية الأوجه، واستخداماتهما.

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

١. الإلمام بأنواع وتكوين الآلات التزامنية.
٢. الإلمام بنظرية عمل المولدات التزامنية.
٣. الإلمام بكيفية ضبط جهد وتردد المولدات التزامنية.
٤. إجراء الاختبارات اللازمة لتعيين ثوابت الدائرة المكافئة.
٥. حساب عناصر الدائرة المكافئة للمولدات التزامنية.
٦. رسم المخطط الاتجاهي للمولدات التزامنية.
٧. حساب القدرة والعزم والكفاءة للمولدات التزامنية.
٨. حساب معامل تنظيم الجهد للمولدات التزامنية.
٩. الإلمام بكيفية تغيير جهد الأطراف مع تغير الحمل.
١٠. الإلمام بكيفية ربط المولدات التزامنية على التوازي وربطها بالشبكة اللانهائية.
١١. الإلمام بكيفية توزيع الأحمال بين المولدات التزامنية الموصلة على التوازي.
١٢. الإلمام بنظرية عمل المحركات التزامنية.
١٣. فهم كيفية التحكم في معامل القدرة للمحركات التزامنية.
١٤. الإلمام بكيفية استخدام المحرك التزامني كمكثف تزامني.
١٥. حساب القدرة والعزم والكفاءة للمحركات التزامنية.
١٦. فهم منحنيات (V) للمحركات التزامنية.
١٧. الإلمام بطرق بدء حركة المحركات التزامنية.

الوقت المتوقع للتدريب: ٢٦ ساعة.

الوسائل المساعدة: التجارب المعملية المتعلقة بالآلات التزامنية في مقرر مختبر الآلات الكهربائية.

متطلبـات الجـدارة: يجـب أن يكـون المتـدرب قـد أتم دراسـة الوحـدة التدريبيـة الأولى هـذه الحقيبـة (المحركات الحثية).

الآلات التزامنية

المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

تمهيد:

تعتبر الآلات التزامنية ضمن أنواع الآلات الكهربائية الثلاثة الدوارة الأكثر شيوعاً. وقد سميت بهذا الاسم لان العضو الدائر يدور بنفس سرعة دوران المجال المغناطيسي المتولد من الثابت، أي أن هنالك توافقاً تاماً بين سرعة دوران المجال المغناطيسي والعضو الدائر ولذلك تسمى بالآلات التزامنية أو التوافقية.

تمتلك الآلات التزامنية، مثل معظم الآلات الدوارة، القابلية للعمل إما كمحرك أو كمولد، كما أن أكثر من ٩٨٪ من الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم يتم توليدها باستخدام المولدات التزامنية فهي الأكثر استخداماً لغرض تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.

تستخدم الآلات التزامنية بصورة رئيسة كمنابع للطاقة الكهربائية ذات التيار المتناوب، حيث تركب في محطات التوليد الحرارية والمائية والنووية ذات القدرات الكبيرة، وفي المحطات الكهربائية المتنقلة، ووسائط النقل (القطارات والسيارات والطائرات).حيث تتحدد بنية المولد التزامني "Synchronous Generator" بشكل أساسي بنوع الآلة المحركة له "Prime-Mover" وبناءً على ذلك يمكن تقسيم المولدات التزامنية إلى المولدات التوربينية والمولدات الهيدروليكية ومولدات الديزل. تدار المولدات التوربينية"Turbo-Alternators" بواسطة عنفات (توربينات) بخارية أو غازية. وتدار المولدات الهيدروليكية بالعنفات المائية "Hydraulic Turbine"، أما مولدات الديزل فتدار بمحركات الاحتراق الداخلي. تستخدم الآلات التزامنية على نطاق واسع كمحركات كهربائية عندما تكون الاستطاعة المطلوبة ١٠٠كيلووات وفما فوق، وذلك من أجل تشغيل المضخات والضواغط والمراوح وغيرها من الآلات التي تعمل عند سرعة دوران ثابتة، وأيضا بهدف توليد القدرة غير الفعالة "Reactive Power" في الشبكة وتستخدم المعوضات التزامنية "Synchronous Compensators" وتسمي أيضاً المكثفات التزامنية (Synchronous Capacitors).

في عام ١٨٧٦ استطاع العالم الروسي ب. ن. يابلوتشكوف وضع تصميم لعدد من المولدات التزامنية متعددة الأطوار"Multi-phases" ذات الإثارة الكهرومغناطيسية والأطوار غير المتصلة كهربائياً، .وقد تم اختراع أول مولد تزامني ثلاثي الأطوار من قبل الروسي م. و. دوليغو دوبروفولسكي. وقد بلغت قدرة هذا المولد٢٣٠كيلوفولت أمبير، وتم تشغيله بواسطة تربينة مائية، لقد بقيت الفكرة الأساسية للآلات

التزامنية منذ ذلك الحين ثابتة ولم يطرأ عليها تغير يذكر، لكن بنيتها التصميمية لاقت تطوراً كبيراً، كما ازدادت الحمولات الكهرومغناطيسية "Electro-Magnetic Loading" لهذه الآلات، مما مكن من تحسين مواصفاتها من حيث الأبعاد وجودة الأداء ودرجة التحميل. وقد تحقق تطور كبير في هذا المجال مع البدء باستخدام التبريد بالهيدروجين والماء في الآلات التزامنية الضخمة.

٢- ١ تركيب الآلات التزامنية ثلاثية الأوجه:

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

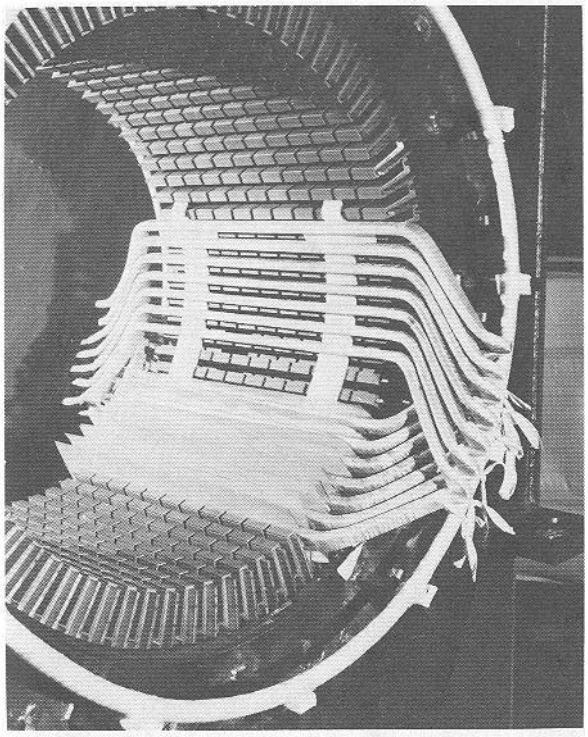
١- العضو الثابت قطره أكبر مما يتيح استخدام عدد أكبر من اللفات وبالتالي توليد جهد أكبر.
٢- التيار المسحوب من الآلة كبير لذا يفضل أن يؤخذ مباشرةً من عضو ثابت وليس عن طريق حلقات انزلاق.
٣- حماية ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية من قوة الطرد المركزية بسبب وزنها الكبير.
٤- التخلص من أو تقليل حلقات الانزلاق إلى ٢ بدلاً من ٦ حلقات لأن التيار المار خلالها هو تيار المجال.
٥- سهولة تبريد ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية عندما تكون ثابتة.

لهذه الأسباب فإن العضو الثابت يحمل ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية (ملفات المنتج) بينما العضو الدائر يحمل ملفات المجال المغناطيسي.

٢- ١- ١ العضو الثابت:

العضو الثابت مشابه تماماً للعضو الثابت في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه من حيث التركيب وطريقة اللف، فيتكون من شرائح متراصة من الحديد السليكوني (Silicon Steel) على شكل اسطوانة مجوفة محفور بداخله عدد من المجاري وذلك لتركيب الملفات الشكل(٢- ١).والهدف من تصنيع العضو الثابت بهذه الطريقة هو التقليل من مفاقيد الحديد. ويتم تقسيمه إلى العدد المطلوب من الأقطاب وتقسم المجاري في كل قطب على الأوجه الثلاثة ويتم تركيب ملفات كل وجه في المجاري الخاصة به تحت كل قطب ويفصل بين كل وجه وآخر ١٢٠درجة كهربائية، يخرج من الملفات ستة

أطراف يمكن توصيلها على شكل نجمة أو دلتا ، وتفضل توصيلة النجمة للمولدات الكهربائية.للحصول على جهد أكبر بنسبة($\sqrt{3}$) عند الأطراف وأيضا لإمكانية تأريض نقطة التعادل.



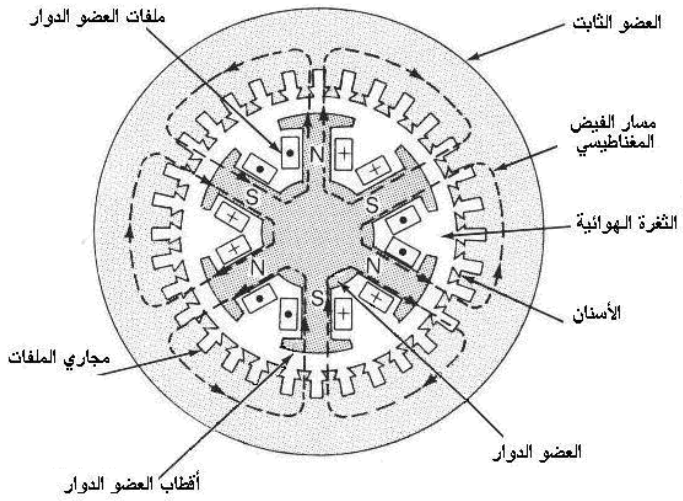
الشكل٢- ١ العضو الثابت لآلة تزامنية أثناء إدخال الملفات داخل المجاري

٢- ١- ٢ العضو الدائر:

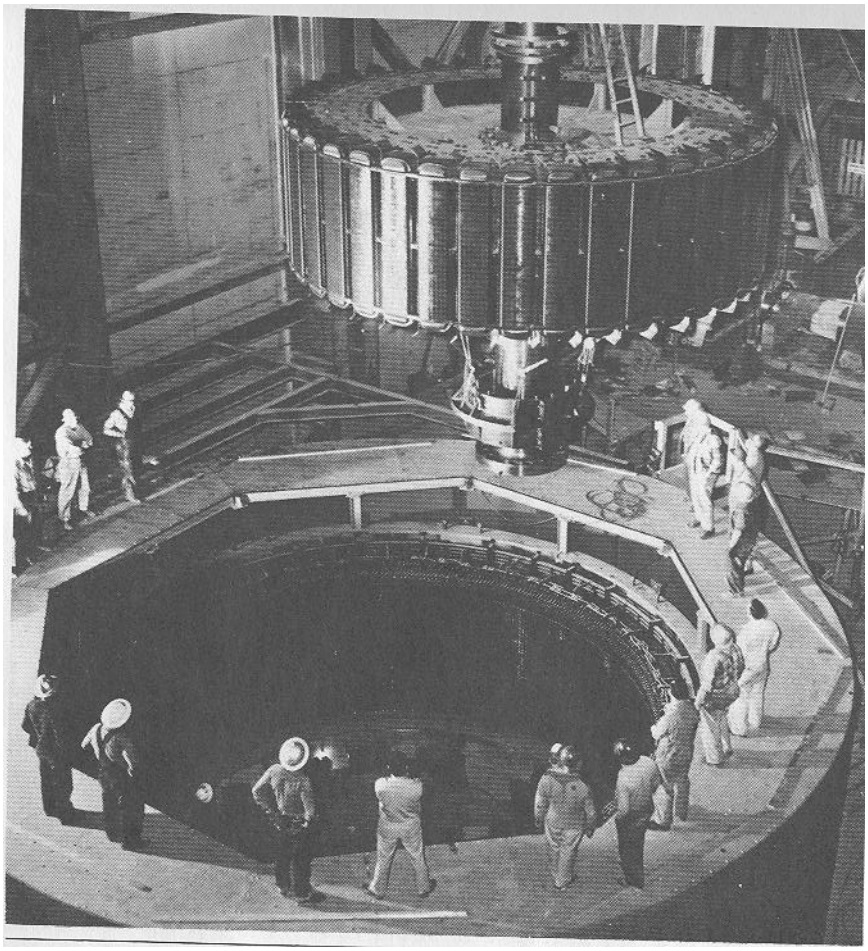
العضو الدائر يحمل ملفات المجال المغناطيسي ويغذى بتيار مستمر عن طريق حلقتي انزلاق وحيث إن التيار المار في ملفات العضو الدائر تيار مستمر لذا لا يلزم تصنيع العضو الدائر على شكل شرائح حديدية بل يصنع من حديد مصمت وذلك لعدم وجود تيارات دوامية في هذه الحالة ،أما طريقة اللف فهي مشابهة لطريقة لف أقطاب العضو الثابت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

أ- **عضو دائر ذو أقطاب بارزة** Salient Pole Rotor

يستخدم في الآلات التزامنية ذات السرعات المنخفضة مثل الآلات التي تدار بواسطة التوربينات المائية، وعادة ما يكون قطر الآلة في هذه الحالة كبير لاستيعاب العدد الكبير من الأقطاب ويكون طولها صغيراً نسبياً، وهي تركب مع التوربين المائي بحيث يكون محورهما رأسياً، الأشكال (٢- ٢) و (٢- ٣).



الشكل ٢- ٢: آلة تزامنية ذات عضو دائر ذي ستة أقطاب بارزة



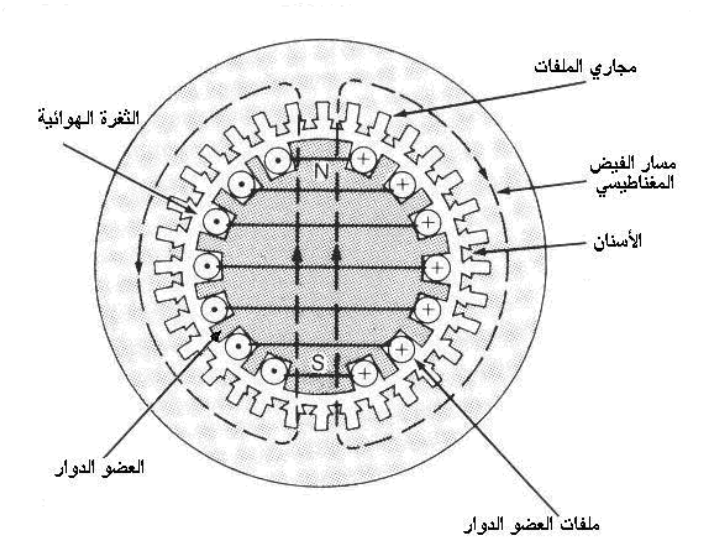
الشكل ٢- ٣: آلة تزامنية ذات عضو دائر ذي أقطاب بارزة أثناء التجميع ويبلغ قطرها ٩٢٥سم وطولها ٢٣٥سم وعدد المجاري ٣٧٨ مجرى

ب- **عضو دائر أسطوا ني** Cylindrical Rotor

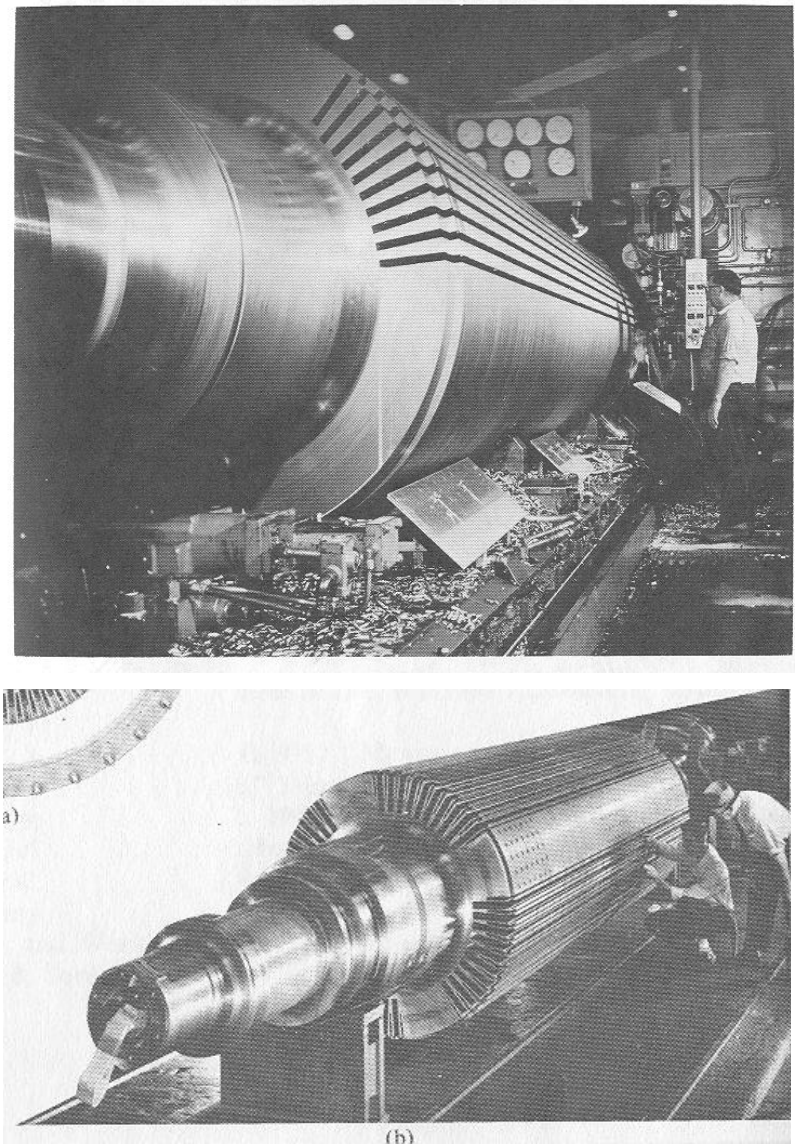
يستخدم في الآلات التزامنية ذات السرعات العالية التي تدار بواسطة توربينات غازية أو بخارية حيث تكون السرعة عالية، ويكون عدد الأقطاب اثنين أو أربعة أقطاب، وعادة ما يكون قطر الآلة في هذه الحالة صغيراً للحد من قوة الطرد المركزية، ويكون طولها كبيراً نسبياً، وهي تركب مع التوربينات الغازية أو البخارية بحيث يكون محورهما أفقياً. كما يجب أن يكون عدد أقطاب العضو الدائر مساوياً لعدد الأقطاب في العضو الثابت، الأشكال (٢- ٤) و(٢- ٥).

تتميز الآلات التزامنية ذات العضو الدائر الاسطواني بعدة مزايا:

- تثبيت ملفات الإثارة داخل مجاري العضو الدائر يجعلها قوية ومتينة لتتحمل قوة الطرد المركزية.
- انتظام الفجوة الهوائية حول محيط العضو الدائر.
- توزيع الحرارة بانتظام على سطح العضو الدائر وذلك بسبب توزيع الملفات على عدد من المجاري مما يجعل تبريده منتظماً.
- انخفاض مستوى الضوضاء وسهولة ضمان توازن الآلة أثناء دورانها.



الشكل ٢- ٤: آلة تزامنية ذات عضو دائر أسطواني ذي قطبين



الشكل ٢- ٥: عضو دائر أسطواني أثناء التصنيع ذي أربعة أقطاب طوله ٣٧٥سم وقطره ١٨٠سم

٢- ٢ طرق تبريد الآلات التزامنية:

يتم تبريد الآلات التزامنية ذات العضو الدائر الاسطواني بقدرات حتى٢٥ميجاوات باستخدام منظومة التبريد المغلقة التي تستخدم الهواء كوسط للتبريد ، .يقصد بالمنظومة المغلقة أن الهواء البارد الذي يلامس السطوح الحارة سوف يسخن فيمرر خلال جهاز خاص لتبريده وتسليطه ثانية على السطوح الحارة.

في المولدات التوربينية التي تزيد قدرتها عن ٢٥ميجاوات يستبدل الهواء بغاز الهيدروجين كوسط تبريد وله عدة مزايا مقارنة بالهواء وهي:

- كثافة الهيدروجين تبلغ حوالي ١٠٪ من كثافة الهواء ولهذا فإن مفاقيد التهوية تقل بحوالي ٩٠٪ عند استخدام الهيدروجين كبديل عن الهواء وبالتالي تزداد كفاءة الآلة.
- التوصيلية الحرارية للهيدروجين تزيد على تلك التي للهواء مما يحسن من تبريد الآلة وخفض درجة الحرارة، مما يتيح إمكانية زيادة المقادير المقننة بمقدار يصل إلى ٣٠٪.
- انعدام الأوكسجين والرطوبة المصاحبة للهواء، يزيل خطر الحريق فيزداد عمر العوازل.

بشكل عام يتحسن تبريد الآلات التزامنية عند استخدام الهيدروجين كوسط تبريد.

في الآلات التزامنية التي تزيد قدرتها على ٣٠٠ميجاوات تستخدم طريقة التبريد المباشر حيث يمكن نقل الحرارة المتولدة إلى خارج الآلة مباشرة، في التبريد المباشر يتم تصميم موصلات ملفات المنتج بحيث تكون مجوفة، بحيث يمكن إمرار وسيط التبريد من خلالها ليمس السطوح الحارة مباشرة، كما أن وسيط التبريد قد يكون من الغازات أو الهواء أو الهيدروجين أو من السوائل كالماء، إن طريقة التبريد المباشر تحسن من تبريد الآلات التزامنية وتسمح بزيادة كثافة التيار في موصلاتها.

٢- ٣ كيفية عمل المولدات التزامنية:

يدار العضو الدائر للآلة التزامنية بواسطة وسيلة تدوير مناسبة (محرك ديزل أو توربين غازي أو بخاري أو مائي) وعندما تصل سرعة العضو الدائر إلى السرعة التزامنية يتم تغذية ملفات العضو الدائر بالتيار المستمر بواسطة مولد خاص مركب على نفس العمود يسمى المثير Exciter أو عن طريق حلقتي انزلاق إن كانت التغذية من مولد خارجي، وبالتالي ينتج في الثغرة الهوائية مجال مغناطيسي دوار يدور بنفس سرعة العضو الدائر (السرعة التزامنية) ولذلك سميت هذه الآلات بالآلات التزامنية.

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

المعادلة(٢- ١):

$$f = \frac{n.P}{120}$$

القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج بالفلوت لكل وجه فتعطى بالمعادلة التالية:

المعادلة(٢- ٢):

$$E_{ph} = \sqrt{2}.\pi.f.\phi.T_{ph}.K_W$$
$$E_{ph} = 4.44.f.\phi.T_{ph}.K_W$$

حيث:

f: التردد بالهيرتز

ϕ : شدة المجال المغناطيسي بالوبر

T_{ph}: عدد اللفات في كل وجه

K_w: معامل اللف (أقل من ١)

٢- ٤ الدائرة المكافئة للآلات التزامنية:

إن الثغرة الهوائية غير المنتظمة في الآلات التزامنية ذات الأقطاب البارزة ستضفي بعض التعقيد على الدائرة المكافئة للآلة التزامنية لذا فإننا هنا سنفترض أن الثغرة الهوائية منتظمة أي أننا سنفترض أن الآلة التزامنية ذات عضو دائر اسطواني، كما أن هذا الافتراض يعطي نتائج مقبولة في حالة الآلات التزامنية ذات الأقطاب البارزة عندما تعمل في حالة الاستقرار. إن الجهد المتولد في ملفات المنتج E_{ph} والمعطى بالمعادلة (٢- ٢) يعتبر الجهد الداخلي للمولد ولا يظهر على أطراف المنتج إلا في حالة عدم التحميل، أما في حالة تحميل المولد فإنه سيظهر جهد آخر مختلف على أطراف المنتج يسمى الجهد الخارجي V_{ph}، سبب الاختلاف بين الجهدين يعود لعدة عوامل منها:

- رد فعل المنتج (Armature Reaction)، ويمكن التعبير عنة بفرق جهد علي ممانعة حثيه (X_a).
- مقاومة ملفات المنتج ويمكن التعبير عنها بفرق جهد على مقاومة (R_a).
- ممانعة التسرب لملفات المنتج ويمكن التعبير عنها بفرق جهد على ممانعة حثيه (X_l).

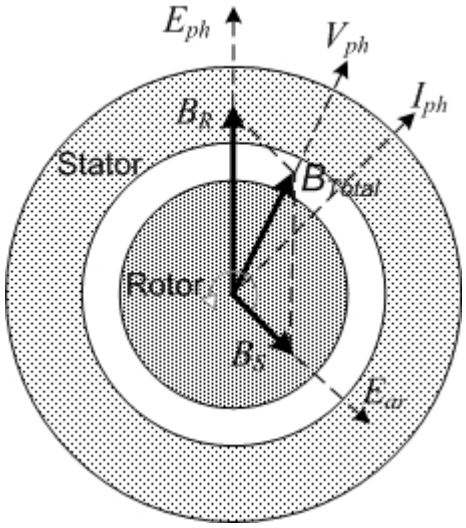
٢- ٥ رد فعل المنتج: Armature Reaction

عند تحميل المولد التزامني سيمر في كل وجه من أوجه العضو الثابت الثلاثة تيار كهربائي، وحيث إن ملفات العضو الثابت رتبت بحيث يفصل بين كل وجه وآخر زاوية مقدارها ١٢٠ درجة كهربائية، فإن التيارات المارة في هذه الأوجه سيفصل بين كل تيار وأخر زاوية طور مقدارها ١٢٠ درجة كهربائية، ونتيجة لمرور هذه التيارات مجتمعة بهذه الصفة سيتولد مجال مغناطيسي دوار في العضو الثابت يدور بنفس سرعة واتجاه دوران المجال المغناطيسي الدوار الناتج من ملفات العضو الدائر، هذا المجال المغناطيسي الجديد هو ما يسمي برد فعل المنتج كنتيجة لمرور تيارات كهربائية في ملفات المنتج أثناء التحميل.

إذن: المجال المغناطيسي المؤثر في الثغرة الهوائية هو محصلة المجالين المتولدين من العضو الدائر والعضو الثابت، وكما أن المجال المغناطيسي المتولد من العضو الدائر 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 الجهد المتولد بسبب محصلة المجال المغناطيسي في الثغرة الهوائية B_{Total}، الشكل (٢- ٦).

$$B_{Total} = B_R + B_s$$ المعادلة(٢- ٣)

$$V_{ph} = E_{ph} + E_{ar}$$ المعادلة_٢- ٤)



الشكل ٢- ٦: المجالات المغناطيسية في المولدات التزامنية أثناء التحميل

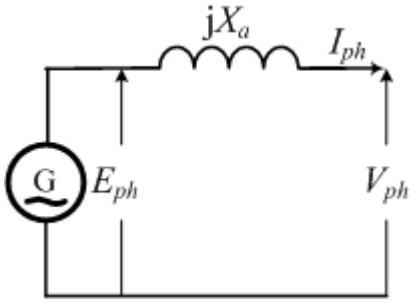
في الشكل (٢- ٦) نجد أن التيار I_{ph} نتج بسبب تحميل الآلة بحمل حثي وذلك لأنه متأخر عن الجهد E_{ph} بزاوية ما ، هذا التيار بدوره أوجد المجال المغناطيسي B_s الذي بدوره أنتج جهداً في ملفات المنتج هو E_{ar}، هذا الجهد E_{ar} الناتج بسبب رد فعل المنتج يتناسب طردياً مع التيار المسبب له كما أنه متأخر عنه بزاوية قدرها ٩٠ درجة ، وبناءً عليه نستطيع أن نعبر عن هذا الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج بما يلي:

المعادلة(٢- ٥):
$$E_{ar} = -jX_a \cdot I_{ph}$$

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

المعادلة(٢- ٦):
$$V_{ph} = E_{ph} - jX_a \cdot I_{ph}$$

المعادلة (٢- ٦) يمكن أن نمثلها بالدائرة المبينة في الشكل(٢- ٧):



الشكل ٢- ٧: دائرة تمثيل رد فعل المنتج بالمعادلة(٢- ٦)

إذن: الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج يمكن التعبير عنه بالجهد المتولد على ممانعة حثيه موصلة على التوالي مع مصدر الجهد الداخلي وتسمي (Armature Reaction Reactance)

بالإضافة إلى تأثير رد فعل المنتج هنالك أيضاً تأثير لمقاومة المنتج ولمفاعله التسرب الحثية لملفات المنتج (Armature Leakage Reactance) فإذا اعتبرنا أن مقاومة ملفات المنتج هي R_a ومفاعله التسرب الحثية لملفات المنتج هي X_l، فإن جهد أطراف المولد يصبح كما يلي:

المعادلة(٢- ٧):
$$V_{ph} = E_{ph} - R_a \cdot I_{ph} - jX_l \cdot I_{ph} - jX_a \cdot I_{ph}$$

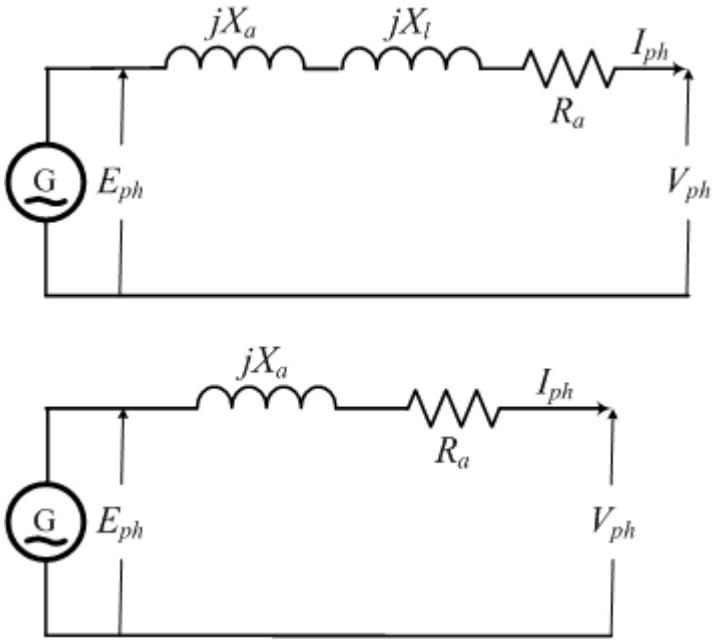
من أجل تبسيط المعادلة (٢- ٧) يمكننا جمع (Armature Leakage Reactance) ممانعة التسرب الحثية لملفات المنتج X_l مع (Armature Reaction Reactance)المانعة الحثية التي تمثل رد فعل المنتج X_a لتصبح ممانعة حثيه واحدة تسمى الممانعة التزامنية (Synchronous Reactance) X_s

المعادلة(٢- ٨):
$$Xs = Xa + Xl$$

وبالتالي يحسب جهد أطراف المولد كما يلي:

المعادلة(٢- ٩):
$$V_{ph} = E_{ph} - R_a \cdot I_{ph} - jX_s \cdot I_{ph}$$

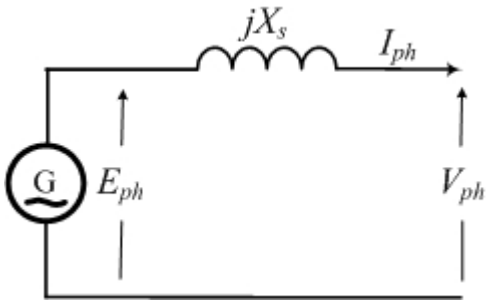
المعادلة (٢- ٩) هي المعادلة النهائية التي يحسب منها جهد أطراف المولد لكل وجه، من هذه المعادلة يمكننا أن نرسم الدائرة المكافئة للآلة التزامنية كما هو موضح في الشكل (٢- ٨) مع ملاحظة أنها تمثل وجهاً واحداً فقط من أوجه المنتج.



الشكل ٢- ٨: الدائرة المكافئة للآلات التزامنية

الشكل (٢- ٨) يمثل الدائرة المكافئة للآلات التزامنية ذات العضو الدائر الاسطواني في صورتها النهائية، وهي تعطي نتائج مقبولة في حالة الآلات التزامنية ذات الأقطاب البارزة عندما تعمل في حالة الاستقرار، كما أنه يمكن تبسيط هذه الدائرة وذلك بإهمال مقاومة ملفات المنتج نظراً لصغرها مقارنةً

بالممانعة التزامنية خصوصاً في الآلات الكبيرة فتصبح الدائرة المكافئة التقريبية كما هو موضح في الشكل(٢- ٩).



الشكل ٢- ٩: الدائرة المكافئة التقريبية للمولدات التزامنية

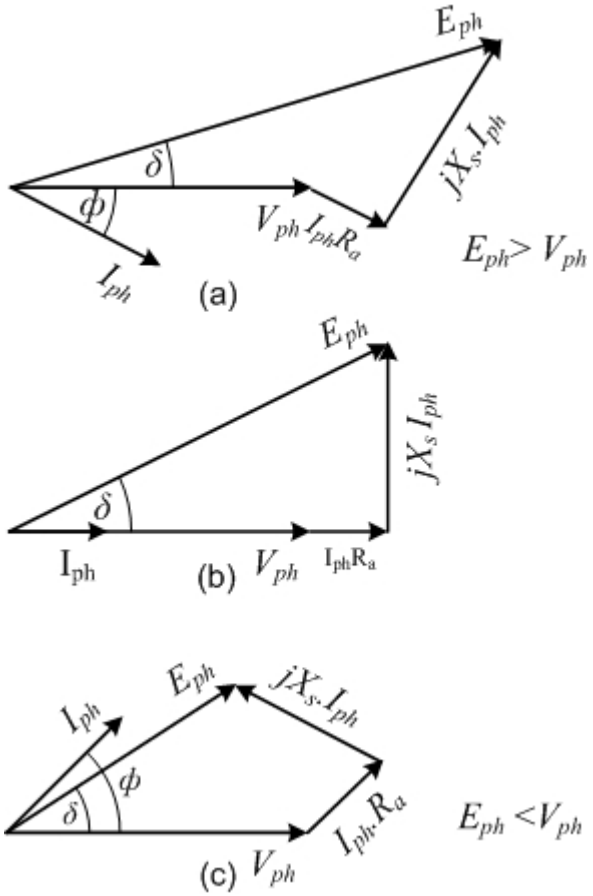
وفي هذه الحالة يحسب جهد الأطراف لكل وجه كما يلي:

المعادلة(٢- ١٠):
$$V_{ph} = E_{ph} - jX_s \cdot I_{ph}$$

٢- ٦ مخطط المتجهات للآلات التزامنية: Phasor Diagram

بما أن الجهود والتيارات المتولدة في الآلات التزامنية هي كميات اتجاهية (ذات مقدار وزاوية) لذلك يستحسن رسم هذه الكميات مع بعضها البعض بشكل اتجاهي لنحصل على ما يسمى بالمخطط الاتجاهي (Phasor Diagram) للآلات التزامنية، هذا المخطط الإتجاهي يعتبر أداةً هامةً جداً بالنسبة للآلة التزامنية لأن بواسطته يسهل فهم وتحليل أداء الآلات التزامنية والشكل (٢- ١٠) يوضح المخطط الاتجاهي المصاحب للمعادلة (٢- ٩) في ثلاث حالات تحميل للمولد التزامني (حمل حثي وحمل مادي - وحمل سعوي)، ويلاحظ أن جهد الأطراف يعتبر مرجع جميع القيم في المخطط الاتجاهي وهو أيضا محصلة جميع الجهود داخل المولد وهذا مطابق تماماً للدائرة المكافئة في الشكل (٢- ٧).

يلاحظ من الشكل(٢- ١٠) أن ($E_{ph} > V_{ph}$) ($\dot{E}_{ph}$ أكبر من V_{ph}) عند معامل القدرة المتأخر والعكس صحيح عند معامل القدرة المتقدم.



الشكل ٢- ١٠: مخطط المتجهات للمولدات التزامنية: (أ)عندما يكون معامل القدرة متأخراً، (ب)عندما يكون معامل القدرة واحداً، (جـ)عندما يكون معامل القدرة متقدماً

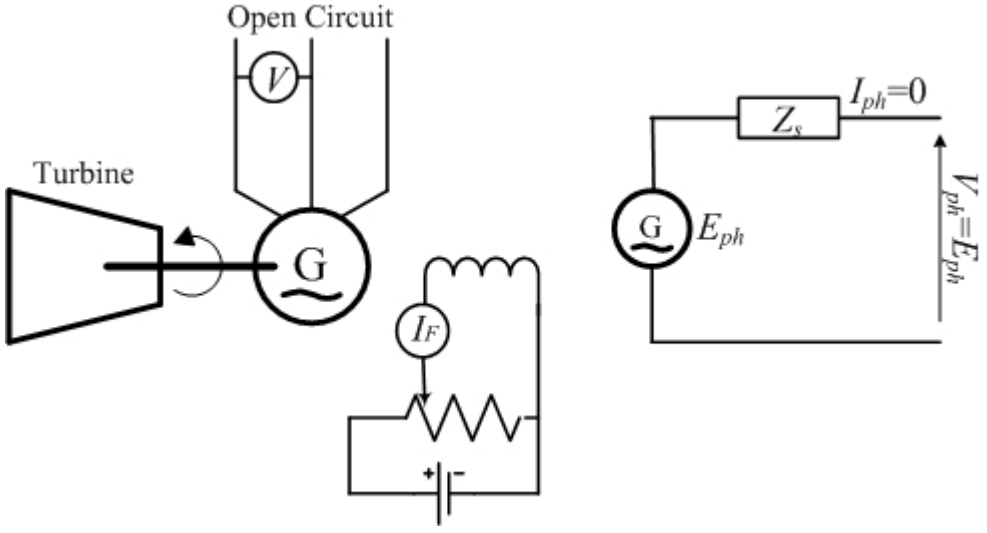
يتضح لنا من مخطط المتجهات في الشكل (٢- ١٠) أن المتجه الذي يمثل الجهد المتولد داخل المولد أي E_{ph} دائماً يسبق المتجه الذي يمثل الجهد عند الأطراف V_{ph} في جميع حالات التحميل الثلاث المذكورة، أي أن زاوية الحمل (δ) تكون دائماً موجبة في حالة عمل الآلة كمولد، بصرف النظر عن أيهما أكبر الجهد عند الأطراف أم الجهد المتولد داخل المولد.

٢- ٧ اختبارات الآلات التزامنية:

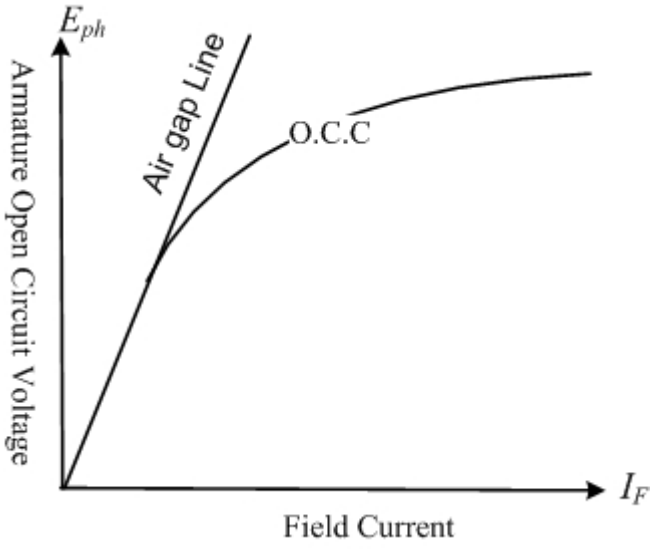
لحساب ثوابت الدائرة المكافئة يلزم القيام ببعض التجارب المعملية للحصول علي بعض منحنيات الخواص التي يمكن منها حساب تلك الثوابت، ومن أهمها اختبار اللاحمل ويسمي أحياناً اختبار الدائرة المفتوحة واختبار دائرة القصر ويسمي أحياناً اختبار عدم الحركة.

أ- اختبار اللاحمل (اختبار الدائرة المفتوحة): Open Circuit Test

في هذا الاختبار تترك أطراف المنتج مفتوحة أي بدون أحمال الشكل(٢- ١١) وتدار الآلة بالسرعة التزامنية ومن ثم يزاد تيار المجال I_F تدريجياً ابتداءً من الصفر، هذه الزيادة في تيار المجال تؤدي إلى زيادة الفيض المغناطيسي وبالتالي زيادة الجهد المتولد على أطراف المنتج المفتوحة E_{ph}، وتسجل قيم الجهد المتولد E_{ph} وتيار المجال I_F المقابل له، ثم ترسم العلاقة بينهما كما هو موضح في الشكل (٢- ١٢)، هذه العلاقة تسمى منحنى الدائرة المفتوحة Open Circuit Characteristic(O.C.C.) أو منحنى المغنطة Magnetization Curve.



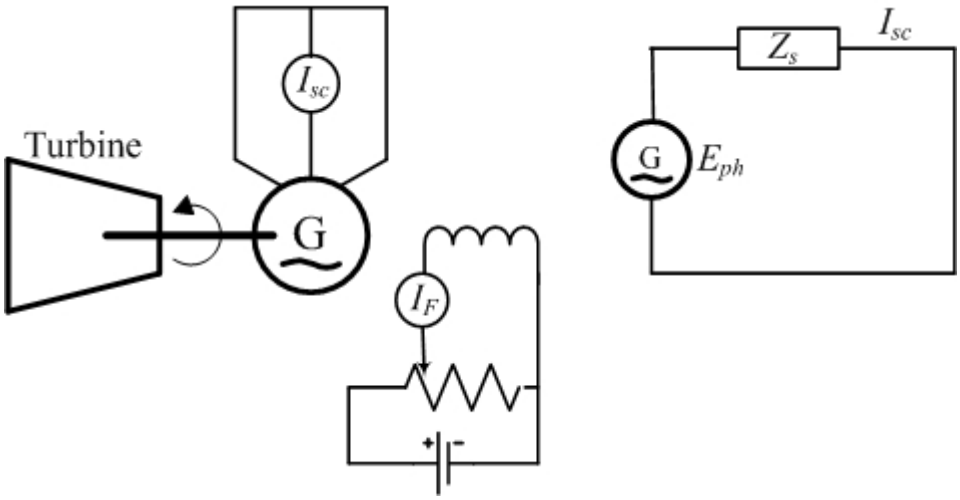
الشكل ٢- ١١: الآلة التزامنية أثناء اختبار اللاحمل



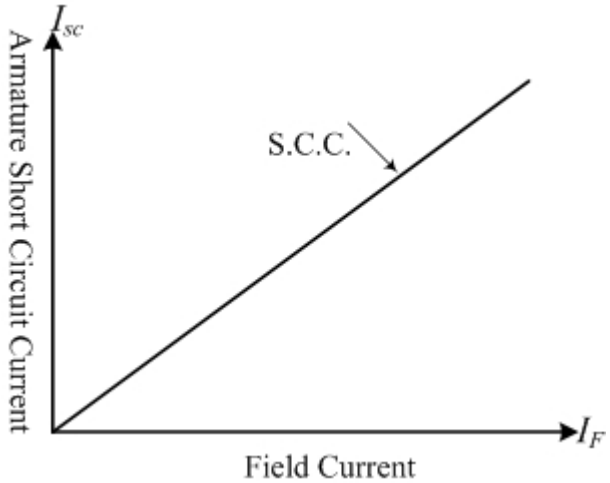
الشكل ٢- ١٢: منحنى الدائرة المفتوحة للآلات التزامنية

ب- اختبار القصر: Short Circuit Test

في هـذا الاختبـار تقصـر أطـراف المنـتج الثلاثـة مـع بعضـها الـبعض الشـكل(٢- ١٣) وتـدار الآلـة بالسرعة التزامنية ثم يزاد تيار المجال I_F تدريجياً وتسجل قيمته وقيمة تيار القصر المقابلة بالمنتج I_{sc}، ثم ترسم العلاقة بينهما كما هو موضح في الشكل (٢- ١٤)، هذه العلاقة تسمى منحنى القصر Short Circuit Characteristic (S.C.C.) كما يجب ألا يزيد تيار القصر أثناء هذا الاختبار عن القيمة المقننة لتيار الحمل الكامل.



الشكل ٢- ١٣: الآلة التزامنية أثناء اختبار الدائرة المقصورة



الشكل ٢- ١٤: منحنى الدائرة المقصورة للآلات التزامنية

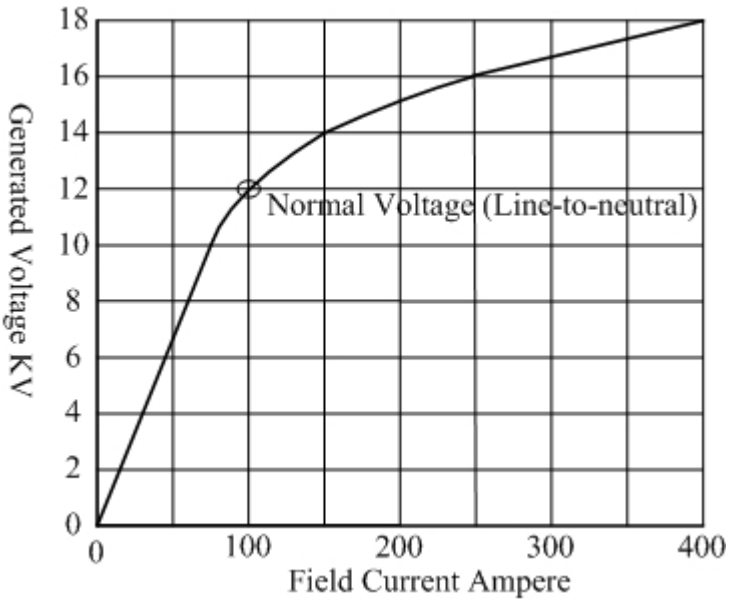
مثال (٢- ١):

مولـد تـزامني ثلاثـي الأوجـه ملفاتـه موصـلة علـى شـكل نجمـة جهـده ٢١كيلوفولـت، قدرتـه ٣٦ ميجافولت أمبير، إذا كانت الممانعة التزامنية ٩أوم وتيار الحمل الكامل ١٠٠٠ أمبير، اختبار اللاحمل للمولد مبين بالشكل(٢- ١٥).أوجد تيار المجال المطلوب وارسم مخطط المتجهات في الحالات الآتية:

١- عند اللاحمل.

٢- عند حمل مادي مقداره ٣٦ميجاوات.

٣- عند حمل سعوي بقدرة غير فعالة ١٢ميجافولت أمبير.



الشكل٢- ١٥ :منحني اختبار اللاحمل للمثال ٢- ١

الحل:

١- عند اللاحمل

$$E_{ph} = V_{ph} = V_L / \sqrt{3} = 21/\sqrt{3} = 12 \quad \text{KV}$$

من منحني اختبار اللاحمل نجد أن تيار المجال المطلوب في هذه الحالة وهو ١٠٠ أمبير

٢- عند حمل مادي مقداره ٣٦ ميجاوات (معامل القدرة واحد)

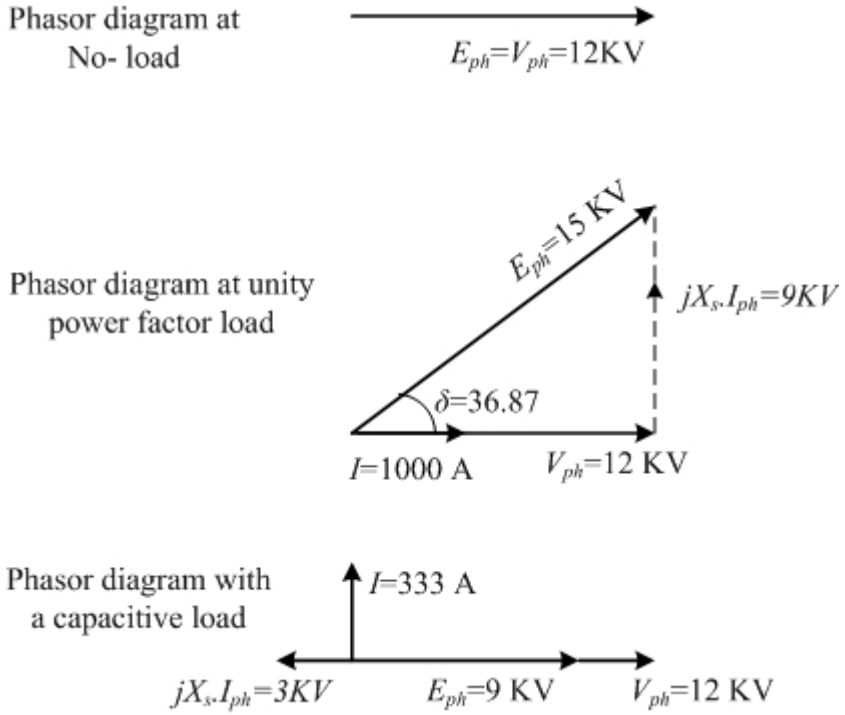
$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot Cos\phi$$

$$I_{ph} = I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{36 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 21 \times 10^3} = 1000\angle 0^o \quad \text{A}$$

$$E_{ph} = V_{ph}\angle 0^o + jX_s \cdot I_{ph}$$

$$E_{ph} = \left(21000/\sqrt{3}\right)\angle 0^{o} + j \times 9 \times 1000 = 15000\angle 36.87^{o} \quad \text{V}$$

من منحني اختبار اللاحمل مقابل ١٥ كيلوفولت نجد أن تيار المجال المطلوب في هذه الحالة هو ٢٠٠ أمبير.



الشكل٢- ١٦ :مخطط المتجهات للمثال(٢- ١)

٣- عند حمل سعوي بقدرة غير فعالة ١٢ميجافولت أمبير، التيار يسبق الجهد ب٩٠ درجة.

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot Sin\phi$$

$$I_{ph} = I_L = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{12 \times 10^{6}}{\sqrt{3} \times 21 \times 10^{3}} = 333\angle 90^{o} \quad \text{A}$$

$$E_{ph} = V_{ph}\angle 0^{o} + jX_s \cdot I_{ph}$$

$$E_{ph} = \left(21000/\sqrt{3}\right)\angle 0^{o} + 9\angle 90^{o} \times 333\angle 90^{o}$$

$$E_{ph} = 12000\angle 0^{o} + 3000\angle 180 = 9000\angle 0^{o} \quad \text{V}$$

من منحني اختبار اللاحمل مقابل ٩ كيلوفولت نجد أن تيار المجال المطلوب في هذه الحالة وهو ٧٠ أمبير.

٢- ٨ حساب الممانعة التزامنية (X_s) باستخدام منحنيي الدائرة المفتوحة ودائرة القصر:

يمكن حساب الممانعة التزامنية (X_s) للآلة التزامنية باستخدام منحنيي الدائرة المفتوحة (O.C.C.) والدائرة المقصورة (S.C.C.) كما في الشكل(٢- ١٧):

١- عند كل قيمة من قيم تيار المجال (I_F) تحسب (Z_s) بقسمة الجهد المتولد على تيار القصر:

$$Z_s = \frac{E_{ph}}{I_{sc}} = \frac{AC}{BC}$$

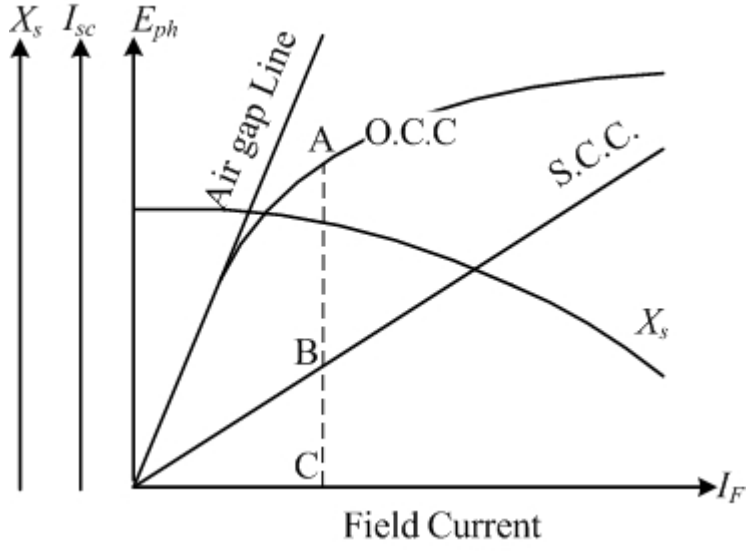
٢- تحسب (X_s) من المعادلة التالية:

المعادلة(٢- ١١):

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$$

حيث R_a هي مقاومة ملفات المنتج ويمكن قياسها مباشرة باستخدام الأوميتر أو باختبار التيار المستمر كما سبق شرحه في الوحدة الأولي من هذه الحقيبة.

نرسم العلاقة بين I_F، X_s كما هو موضح في الشكل (٢- ١٧)، ويلاحظ أن قيمة X_s تكون ثابتة في منطقة التغير الخطي لمنحنى الدائرة المفتوحة(O.C.C.) وتقل كلما ازدادت درجة التشبع المغناطيسي في الحديد، أي مع ازدياد المعاوقة المغناطيسية للحديد، حيث يقل تأثير رد فعل المنتج. وتنخفض بالتالي ممانعة رد فعل المنتج (X_a).



الشكل ٢- ١٧: الممانعة التزامنية للآلة التزامنية بدلالة تيار المجال

مثال (٢- ٢):

عند إجراء تجربة اللاحمل علي مولد تزامني ثلاثي الأوجه وجد أنه يولد جهداً خطياً مقداره ١٥كيلوفولت عندما كان تيار المجال ١٤٠٠ أمبير، وعند إجراء تجربة دائرة القصر وجد أن تيار قصر مقداره ٢١٠٠٠ أمبير يمر عند نفس تيار المجال، احسب الممانعة التزامنية للمولد مع إهمال مقاومة ملفات المنتج.

الحل: جهد الوجه عند اللاحمل يحسب من:

$$E_{ph} = V_{ph} = V_L / \sqrt{3} = 15 / \sqrt{3} = 8.66 \qquad \text{KV}$$

الممانعة التزامنية

$$X_s = Z_s = \frac{E_{ph}}{I_{sc}} = \frac{8660}{21000} = 0.412 \qquad \Omega$$

٢- ٩ معامل تنظيم الجهد: Voltage Regulation:

يعرف معامل تنظيم الجهد بأنة التغير في جهد الأطراف من حالة اللاحمل إلي حالة الحمل الكامل منسوباً إلى الجهد عند الحمل الكامل. وهو من المعاملات الهامة في الآلات التزامنية وذلك لأنه يعطي فكرة عن مدى التغير الذي يحدث في قيمة الجهد على أطراف المولد بين اللاحمل والحمل الكامل عند معامل قدرة محدد، كما أنه مؤشر للدلالة على جودة المولد عند المقارنة بين المولدات، ويكتب رياضياً كما يلي:

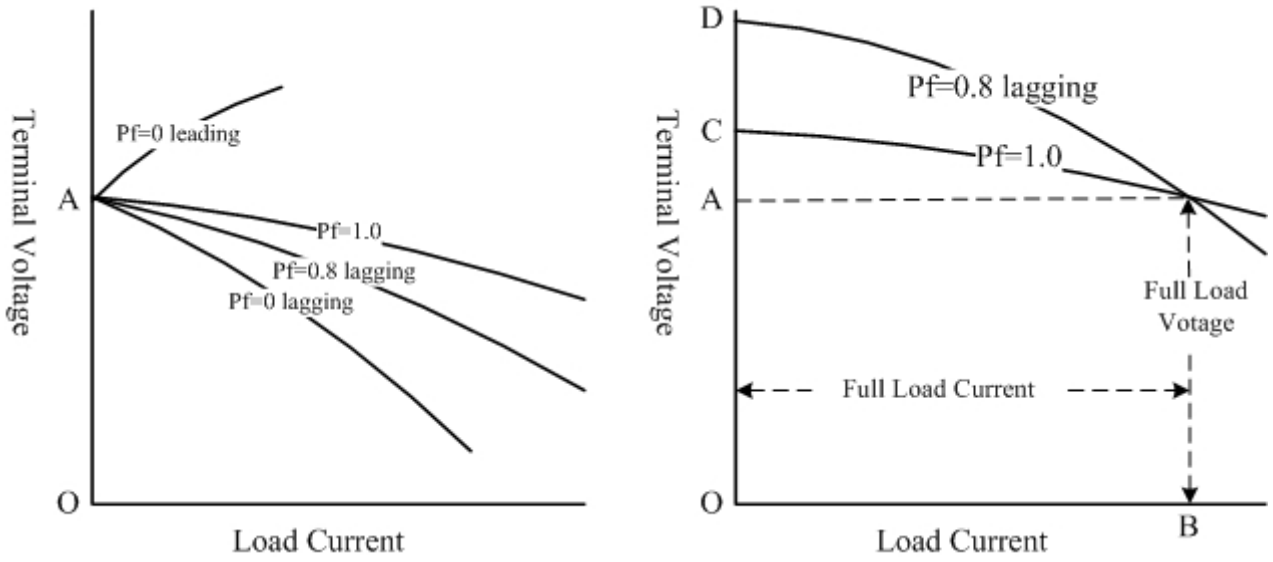
المعادلة(٢- ١٢):

$$\text{Per unit Voltage Regulation} = V.R. = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}}$$

يمكن قياس معامل تنظيم الجهد (في المولدات الصغيرة) عند معامل قدرة محدد (واحد مثلا)، بتحميل المولد بالحمل الكامل عند معامل قدرة واحد وتضبط السرعة وتيار المجال حتى يعطي الجهد المقنن للآلة عند الحمل الكامل، فعند إزالة الحمل ومع المحافظة على نفس السرعة وتيار المحال سيتغير جهد الأطراف، هذا التغير في جهد الأطراف بين الحمل الكامل و اللاحمل مقسوماً على الجهد عند الحمل الكامل يعطي معامل تنظيم الجهد و من الشكل (٢- ١٨) فإن معامل تنظيم الجهد يحسب من:

$$V.R. = \frac{AC}{OA} \qquad \text{for unity power factor} \qquad ٢- ١٣$$

$$V.R. = \frac{AD}{OA} \qquad \text{for p.f. of 0.8 lagging}$$



الشكل ٢- ١٨ تغير جهد الأطراف مع الحمل وتأثير معامل القدرة

الشكل (٢- ١٨) يوضح أيضاً تأثير معامل القدرة على جهد الأطراف، فعندما يحمل المولد بحمل ذي معامل قدرة متأخر نجد أن جهد الأطراف ينخفض مع زيادة الحمل، بينما عند تحميله بحمل ذي معامل قدرة متقدم نجد أن جهد الأطراف يرتفع مع زيادة الحمل. هذا يتفق أيضا من مخطط المتجهات بالشكل(٢- ١٠). أما في المولدات الكبيرة يفضل حساب معامل تنظيم الجهد ، وذلك بحساب قيمة E_{ph} من المعادلة(٢- ٩) ثم التعويض في المعادلة(٢- ١٢).

مثال (٢- ٣):

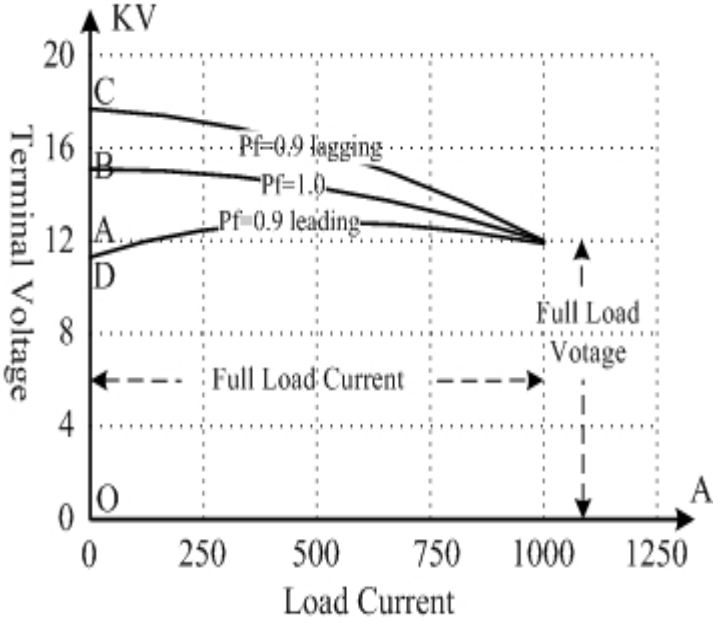
الشكل(٢- ١٩) يبين كيفية تغير جهد الأطراف للمولد التزامني في المثال(٢- ١) مع تغير الحمل عند معامل قدرة واحد و٠,٩متأخراً و٠,٩متقدماً، احسب معامل تنظيم الجهد في الحالات الثلاثة.

الحل:

For unity power factor load-$V.R. = \frac{AB}{OA} = \frac{15-12}{12} \times 100 = 25\%$

For p.f. of 0.9 lagging-$V.R. = \frac{AC}{OA} = \frac{18-12}{12} \times 100 = 50\%$

For p.f. of 0.9 leading-$V.R. = \frac{AD}{OA} = \frac{11-12}{12} \times 100 = -8\%$



الشكل(٢- ١٩):كيفية تغير جهد الأطراف لمولد تزامني مع تغير الحمل للمثال(٢- ٣)

مثال (٢- ٤):

مولد تزامني ذو أربعة أقطاب ملفاته موصلة على شكل دلتا ، جهد الأطراف له ٤٨٠ فولت والتردد ٦٠ هيرتز، منحنى الدائرة المفتوحة له معطى في الشكل(٢- ٢٠)، الممانعة التزامنية له ٠,١Ω ومقاومة ملفات المنتج ٠,٠١٥Ω، يعطي تياراً قدره ١٢٠٠ أمبير عند الحمل الكامل ومعامل قدره ٠,٨ متأخراً، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك٤٠ كيلووات والمفاقيد الحديدية ٣٠ كيلوات عند الحمل الكامل فأجب ما يلي:

أ) ما هي سرعة العضو الدائر (سرعة التزامن)؟

ب) كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يكون جهد الأطراف ٤٨٠ فولت في حالة اللاحمل

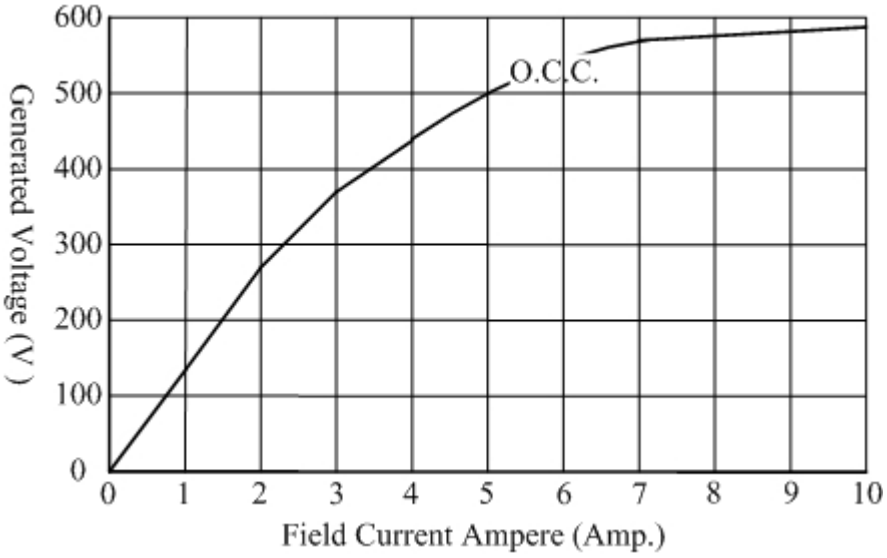
جـ) إذا كان المولد يغذي حملاً بتيار قدره ١٢٠٠ أمبير عند معامل قدره ٠,٨متأخراً ، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يحافظ على جهد الأطراف عند ٤٨٠ فولت.

د) احسب كفاءة المولد.

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

و) افترض أن المولد يغذي حملاً بتيار قدره ١٢٠٠ أمبير عند معامل قدره ٠,٨متقدماً ، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يبقى جهد الأطراف عند ٤٨٠ فولت.

ى)احسب معامل تنظيم الجهد في الحالات (جـ) و (و)



الشكل ٢- ٢٠: منحنى الدائرة المفتوحة للمولد التزامني(مثال ٢- ٤)

الحل:

بما أن ملفات المولد موصلة على شكل دلتا فإن

$$V_{ph} = V_{Line} = 480\angle 0^{o} \qquad I_{ph} = \frac{I_{Line}}{\sqrt{3}}$$

أ) السرعة التزامنية للمولد:

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

ب) عند اللاحمل $E_{Ph} = V_{Ph}$

من منحنى الدائرة المفتوحة للمولد في الشكل(٢- ٢٠) نجد أن تيار المجال المقابل هو ٤,٥أمبير.

ج) عندما يكون المولد يغذي الحمل بتيار قدره ١٢٠٠أمبير عند معامل قدره ٠,٨ متأخراً،فإن التيار سيتأخر عن الجهد بزاوية طور مقدارها ϕ:

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

$$I_{ph} = \frac{1200}{\sqrt{3}} = 692.8\angle -36.87^{o} \quad \text{A}$$

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

$$E_{ph} = V_{ph} + R_a \cdot I_{ph} + jX_s \cdot I_{ph}$$
$$E_{ph} = 480\angle 0 + (0.015)\cdot(692.8\angle -36.87) + (j0.1)\cdot(692.8\angle -36.87)$$
$$E_{ph} = 532\angle 5.3 \qquad \text{V}$$

لكي يبقى جهد الأطراف V_{Ph} عند٤٨٠ فولت يجب أن نضبط الجهد الداخلي E_{Ph} عند ٥٣٢ فولت، وبالرجوع إلى منحنى الدائرة المفتوحة للمولد في الشكل(٢- ٢٠) نجد أنه لتحقيق ذلك يجب زيادة تيار المجال I_F إلى ٥,٧ أمبير.

د) لحساب الكفاءة يجب إجراء الحسابات التالية:

القدرة الخارجة من المولد:

القدرة الخارجة من المولد:
$$P_{0ut} = \sqrt{3}\cdot V_L \cdot I_L \cdot Cos\phi$$
$$P_{out} = \sqrt{3}\times 480\times 1200\times 0.8 = 798 \qquad \text{kw}$$

المفاقيد النحاسية في ملفات المنتج
$$P_{cu1} = 3\cdot I_{ph}^2 \cdot R_a$$
$$P_{cu1} = 3\cdot(692.8)^2\cdot(0.015) = 21.6 \qquad \text{kw}$$

القدرة الداخلة إلى المولد:
$$P_{inp} = P_{out} + P_{cu1} + P_{core} + P_f$$
$$P_{inp} = 798 + 21.6 + 30 + 40 = 889.6 \qquad \text{kw}$$

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

هـ)إذا فصل الحمل بشكل مفاجئ عن المولد فهذا يعني أن التيار سيصبح صفراً وأن $(E_{Ph}=V_{Ph})$، وإذا لم يعاد ضبط تيار المجال فإن جهد الأطراف سيرتفع إلى قيمة الجهد الداخلي أي إلى ٥٣٢ فولت

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

$$E_{phE} = V_{ph} + R_a \cdot I_{ph} + jX_s \cdot I_{ph}$$
$$E_{ph} = 480\angle 0 + (0.015)\cdot(692.8\angle 36.87) + (j0.1)\cdot(692.8\angle 36.87)$$
$$E_{ph} = 451\angle 7.9 \qquad \text{V}$$

لكي يبقى جهد الأطراف V_{Ph} عند ٤٨٠ فولت يجب أن نضبط الجهد الداخلي E_{Ph} عند ٤٥١ فولت، وبالرجوع إلى منحنى الدائرة المفتوحة للمولد في الشكل(٢- ٢٠) نجد أنه لتحقيق ذلك يجب ضبط تيار المجال عند ٤,١ أمبير.

ى)معامل تنظيم الجهد :

في الحالة (جـ):

$$V.R. = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} = \frac{532 - 480}{480} \times 100 = 10.8\%$$

في الحالة (و):

$$V.R. = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} = \frac{451 - 480}{480} \times 100 = -6.04\%$$

يلاحظ أن معامل تنظيم الجهد سالب في حالة معامل القدرة المتقدم.

مثال (٢- ٥):

مولد تزامني ثلاثي الأوجه ذو دوار اسطواني موصل على شكل نجمة قدرته ١٠كيلوفولت أمبير، وجهده ٢٣٠ فولت، ممانعته التزامنية ١,٢ أوم لكل وجه ومقاومة ملفات المنتج ٠,٥أوم لكل وجه، احسب النسبة المئوية لمعامل تنظيم الجهد عند الحمل الكامل عندما يكون معامل القدرة ٠,٨متأخراً.

الحل:

في حالة معامل القدرة المتأخر تكون الزاوية ϕ سالبة:

$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.8\angle 0^o \quad \text{V}$$

$$I_{ph} = I_L = \frac{S(KVA)}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 230} = 25.1\angle -36.87 \quad \text{A}$$

$$E_{ph} = V_{ph} + R_a \cdot I_{ph} + jX_s \cdot I_{ph}$$

$$E_{ph} = 132.8\angle 0^o + 0.5\angle 0^o \times 25.1\angle -36.87 + 1.2\angle 90^o \times 25.1\angle -36.87$$

$$E_{ph} = 132.8\angle 0^o + 12.55\angle -36.87 + 30.12\angle 53.13^o \quad \text{V}$$

$$E_{ph} = 161.76 \quad \text{V}$$

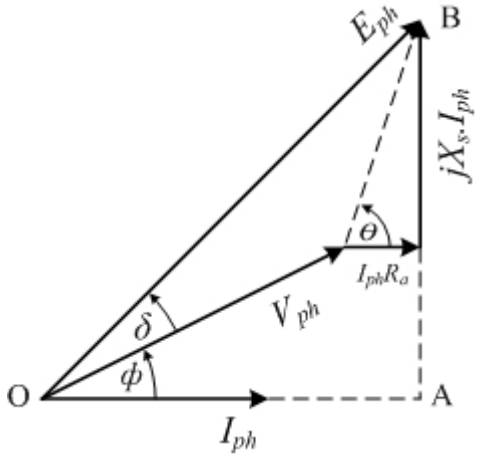
يمكننا حل هذا المثال بطريقة أخرى إذا ما قمنا برسم مخطط المتجهات كما هو موضح في الشكل (٢- ٢١)، ومن نظرية فيثاغورث لحساب المثلثات نجد أن:

$$(OB)^2 = (OA^2) + (AB^2)$$

$$E_{ph}^2 = \left(V_{ph} \cdot Cos\phi + I_{ph} \cdot R_a\right)^2 + \left(V_{ph} \cdot Sin\phi + I_{ph} \cdot X_s\right)^2$$

$$E_{ph} = \sqrt{\left(132.8 \times 0.8 + 25.1 \times 0.5\right)^2 + \left(132.8 \times 0.6 + 25.1 \times 1.2\right)^2} \quad V$$

$$E_{ph} = \sqrt{\left(106.24 + 12.55\right)^2 + \left(79.68 + 30.12\right)^2} = 161.76 \quad V$$



الشكل (٢- ٢١): مخطط المتجهات للمثال(٢- ٥)

معامل تنظيم الجهد:

$$V.R. = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} = \frac{161.76 - 132.8}{132.8} = 21.8\%$$

مثال (٢- ٦):

كرر حل المثال السابق عندما يكون معامل القدرة متقدماً، بينما تبقي جميع البيانات الأخرى بدون تغيير

الحل:

في حالة معامل القدرة المتقدم تكون الزاوية ϕ موجبة:

$$I_{ph} = 25.1\angle 36.87 \quad A$$

$$E_{ph} = V_{ph} + I_{ph} \cdot Z_s$$

$$I_{ph} \cdot Z_s = 25.1\angle 36.87 \times \left(0.5 + j1.2\right) = -8 + j31.6$$

$$E_{ph} = 132.8\angle 0^o - 8 + j31.6 \quad V$$

$$E_{ph} = 128.7 \quad \text{V}$$

معامل تنظيم الجهد:

$$V.R. = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} = \frac{128.7 - 132.8}{132.8} = -3.1\%$$

مثال (٢- ٧):

مولد تزامني ثلاثي الأوجه ذو عضو دوار اسطواني موصل على شكل نجمة سرعته التزامنية ١٨٠٠ لفة في الدقيقة، قدرته ١٥٠ ميجاوات وجهده ١٢,٦ كيلوفولت وتردده ٦٠هيرتز، مقاومة ملفات المنتج ١,٥٣٥ ميلي أوم لكل وجه. نتائج اختبار الدائرة المفتوحة مبينة في الجدول التالي:

V_L(KV)	3.8	5.8	7.8	9.8	11.3	12.6	13.5	14.2
I_F(A)	200	300	400	500	600	700	800	900

اختبار الدائرة المقصورة لعضو الإنتاج خطاً مستقيماً يمر بنقطة الأصل، وبنقطة التيار المقنن لعضو الإنتاج عند تيار مجال قدرة ٧٠٠ أمبير، عين:

١- الممانعة المتزامنة غير المشبعة مغناطيسياً لكل وجه.
٢- الممانعة المتزامنة المشبعة مغناطيسياً لكل وجه.
٣- ارسم مخطط المتجهات وعين التغير في الجهد عند الحمل الكامل بمعامل قدرة ٠,٨٥متأخراً.
٤- أعد الفقرة (٣) عند الحمل الكامل بمعامل قدرة ٠,٨٥متقدماً.

الحل:

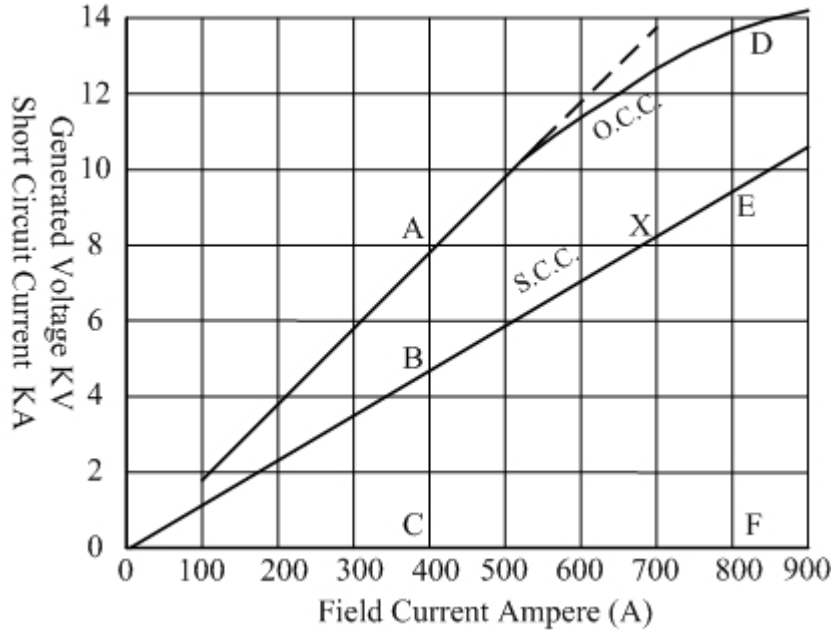
تيار الحمل الكامل (التيار المقنن):

$$I_{ph} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot Cos\phi} = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 12.6 \times 0.85} = 8086 \quad \text{A}$$

نرسم منحني الدائرة المفتوحة من النتائج المعطاة في الجدول، ونرسم أيضا منحني دائرة القصر كخط مستقيم يمر بنقطة الأصل والنقطة X التي إحداثياتها (٧٠٠ و ٨٠٨٦)، كما هو مبين في الشكل (٢- ٢٢).

١- لإيجاد الممانعة المتزامنة غير المشبعة مغناطيسياً لكل وجه من الشكل(٢- ٢٢):

$$X_s = \frac{AC}{BC} = \frac{7.8/\sqrt{3}}{4.6} = 0.979 \quad \Omega/\text{phase}$$



الشكل ٢- ٢٢ :منحنيي اللاحمل والدائرة المقصورة للمثال(٢- ٧)

٢- لإيجاد الممانعة المتزامنة المشبعة مغناطيسياً لكل وجه من الشكل(٢- ٢٢):

$$X_s = \frac{DF}{EF} = \frac{13.5/\sqrt{3}}{9.2} = 0.847 \quad \Omega/\text{phase}$$

٣- لإيجاد الجهد المتولد E_{ph} عند الحمل الكامل بمعامل قدرة ٠,٨٥متأخراً:

$$I_{ph} = I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\cdot V_L \cdot Cos\phi} = \frac{150\times10^3}{\sqrt{3}\times12.6\times0.85} = 8086\angle -31.8^o \quad \text{A}$$

$$E_{ph} = V_{ph} + R_a \cdot I_{ph} + jX_s \cdot I_{ph}$$

$$E_{ph} = \frac{12.6\times10^3}{\sqrt{3}} + \left(1.535\times10^{-3}\times8086\angle -31.8^o\right) + \left(0.847\angle90^o \times 8086\angle -31.8^o\right)$$

$$E_{ph} = 7275\angle0^o + (10.55 - j6.54) + (3609 + j5821) \quad \text{V}$$

$$E_{ph} = 10894.55 + j5814.5 = 12349\angle28^o \quad \text{V}$$

$$V.R. = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} = \frac{12349 - 7275}{7275} = 69.75\%$$

٤- لإيجاد الجهد المتولد E_{ph} عند الحمل الكامل بمعامل قدرة ٠,٨٥متقدماً:

$$I_{ph} = 8086\angle 31.8 \quad \text{A}$$

$$E_{ph} = V_{ph} + R_a \cdot I_{ph} + jX_s \cdot I_{ph}$$

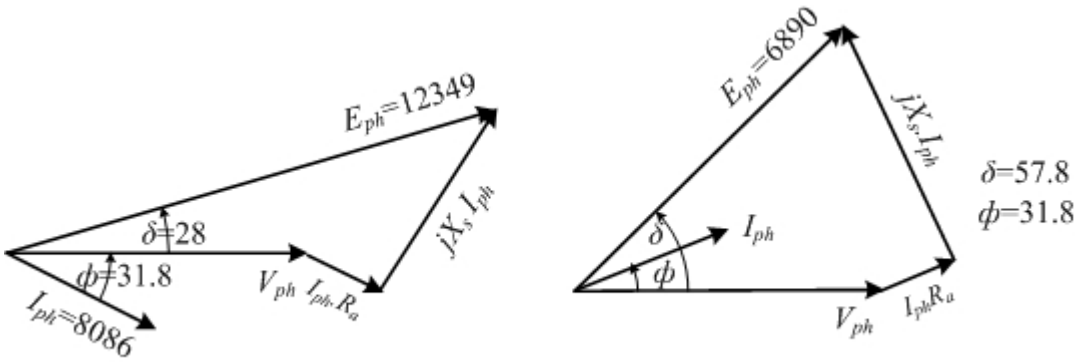
$$E_{ph} = \frac{12.6\times10^3}{\sqrt{3}} + \left(1.535\times10^{-3}\times 8086\angle 31.8^o\right) + \left(0.847\angle 90^o \times 8086\angle 31.8^o\right)$$

$$E_{ph} = 7275\angle 0^o + (10.55 + j6.54) + (-3609 + j5821) \quad \text{V}$$

$$E_{ph} = 3676.55 + j5827.5 = 6890\angle 57.8^o \quad \text{V}$$

$$V.R. = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} = \frac{6890 - 7275}{7275} = -5.3\%$$

مخطط المتجهات المطلوب مبين في الشكل(٢- ٢٣) (أ) عند معامل قدرة ٠,٨ متأخراً، (ب) عند معامل قدرة ٠,٨ متقدماً.



الشكل(٢- ٢٣): مخطط المتجهات للمثال(٢- ٧) (أ) معامل القدرة متأخراً (ب)معامل القدرة متقدماً

كما هو ملاحظ من الحل أنه تم استخدام الممانعة المتزامنة المشبعة مغناطيسياً لكل وجه حيث إن الجهد المتولد يقع في منطقة التشبع المغناطيسي.

٢- ١٠ تشغيل المولدات التزامنية على التوازي:

من النادر جداً أن يوجد مولد تزامني وحيد يغذي حملاً مستقلاً ماعدا حالات خاصة كالمولدات المعدة لحالات الطوارئ، عادةً توصل المولدات التزامنية على التوازي مع بعضها البعض لإمداد الأحمال بالقدرة المطلوبة، خصوصاً إذا كانت قدرة المولد الواحد غير كافية لتغذية الأحمال في منطقة ما، وذلك ما نجده في جميع محطات توليد الطاقة الكهربائية.

إن منظومات القدرة الكهربائية الحديثة تعتمد في الأساس على عمل عدد من محطات التوليد الكهربائية المربوطة على التوازي للعمل مع بعضها البعض لهدف ضمان استمرارية تجهيز الطاقة الكهربائية وتحقيق أعلى مؤشر اقتصادي في جانب توليد ونقل و توزيع الطاقة الكهربائية.ولما كانت محطة التوليد الواحدة تتكون من عدد من المولدات التزامنية المربوطة مع بعضها البعض على التوازي، فإن منظومة القدرة الكهربائية تتكون في الواقع من عشرات المولدات التزامنية المربوطة مع بعضها على التوازي لتجهيز قدرة كهربائية فائقة. إن قدرة أي مولد عند النظر إليه بصورة منفردة، تعتبر ضئيلة مقارنة مع قدرة المنظومة ولهذا عند اختلال عمل هذا المولد المنفرد فإن جهد المنظومة و ترددها يبقيان ثابتين دون تغيير، فتسمى منظومة القدرة في هذهالحالة بمنظومة القضبان اللانهائية (Infinite Bus Bar).

مميزات تشغيل المولدات التزامنية على التوازي:

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

٢- وجود عدة مولدات مربوطة على التوازي يزيد من اعتمادية 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 الطاقة الكهربائية عن الأحمال.

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

شروط توصيل المولدات التزامنية على التوازي:

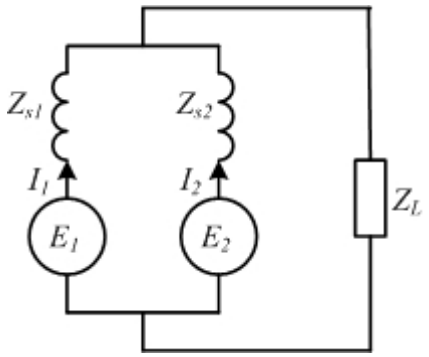
لربط المولد التزامني على التوازي مع منظومة القدرة يجب تحقيق بعض الشروط المعينة قبل غلق مفتاح الربط .تسمى عملية ربط المولدات التزامنية على التوازي بعملية التزامن (Synchronization) حسب الشروط التالية:

١- القيمة الفعالة (r.m.s. value) لجهد الأطراف في كلا المولدين يجب أن تتساوى.
٢- التردد يجب أن يكون متساوياً في كلا المولدين.
٣- تتابع الأطوار لكل من 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).

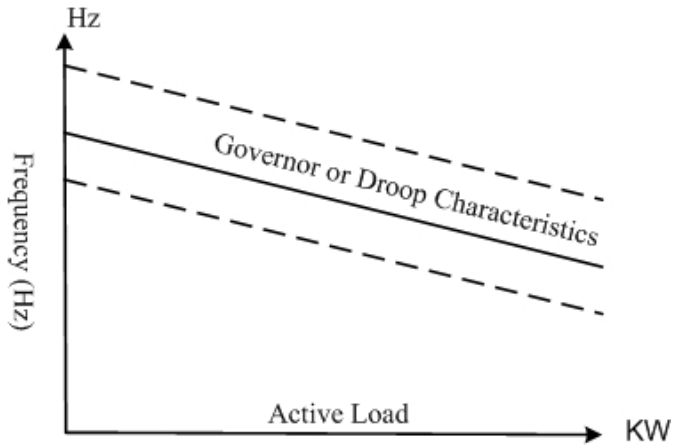
وعند تحقيق هذه الشروط يمكن توصيل المولدين على التوازي بأمان، أما عند توصيل المولدين في حالة عدم تحقيق واحد أو أكثر من هذه الشروط فإن ذلك يؤدي إلى حدوث أضرار كبيرة قد تؤدي إلى تلف ملفات المولد بسبب مرور تيار كبير فيها.

٢- ١١ كيفية توزيع الأحمال بين المولدات التزامنية الموصلة علي التوازي:

بعد أن تعرفنا علي شروط توصيل المولدات على التوازي نأتي الآن إلى كيفية توزيع الحمل بين مولدين متزامنين موصلين على التوازي الشكل (٢- ٢٤)، ولشرح ذلك نبدأ بتعريف منحنى خواص المنظم للمولد(Governor or Droop Characteristics):



الشكل ٢- ٢٤ مولدان متزامنان موصلان على التوازي



الشكل ٢- ٢٥ منحنى خواص المنظم للمولد

هو عبارة عن خط مستقيم يمثل العلاقة بين تردد (أو سرعة) المولد والحمل بالكيلووات، وهو ينخفض خطياً ابتداء من التردد عند اللاحمل إلى التردد عند الحمل الكامل، هذا الانخفاض في التردد عادة ما يضبط بحيث يكون من ٤إلى ٦٪ عند الحمل الكامل. ويمكن تحريك الخط المستقيم إلى أعلى أو إلى أسفل بتغيير خواص المنظم كما هو موضح بالخطوط المتقطعة الشكل (٢- ٢٥).

لتوضيح كيفية حساب توزيع الأحمال بين مولدين موصلين على التوازي باستخدام منحنى خواص المنظم للمولد نأخذ المثال (٢- ٨):

مثال (٢- ٨):

مولدان متزامنان موصلان على التوازي قدرة كل منهما ٢٠٠٠ كيلوفولت أمبير، منحنى خواص المنظم للمولد الأول ينخفض خطياً من ٥٠ هيرتز عند اللاحمل حتى ٤٨ هيرتز عند الحمل الكامل، منحنى خواص المنظم للمولد الثاني ينخفض خطياً من ٥٠ هيرتز عند اللاحمل حتى ٤٧,٥ هيرتز عند الحمل الكامل:

١- كيف يقتسم المولدان قدرة فعالة مقدارها ٣٠٠٠ كيلووات؟.

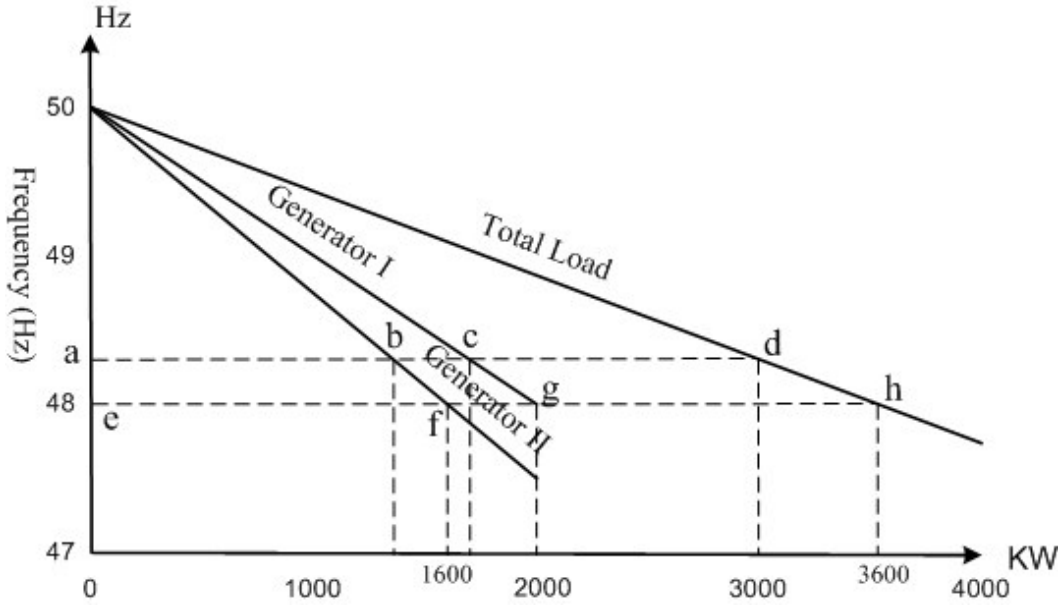
٢- ما أقصي حمل يتحمله المولدان معاً دون زيادة التحميل على أي منهما، وكيفية توزيع ذلك الحمل بين المولدين؟.

الحل:

نرسم منحنى خواص المنظم لكل آلة، الذي هو عبارة عن خط مستقيم، يتحدد الخط الأول للآلة الأولي بالنقطتين (٥٠,٠) و(٤٨,٢٠٠٠) كما يتحدد الخط الثاني للآلة الثانية بالنقطتين (٠- ٥٠) و(٢٠٠٠- ٤٧,٥). ثم نقوم بجمع الإحداثيين الأفقيين لهذين المنحنيين عند تردد معين، للحصول على نقطة على المنحني(الخط) المحصل للآلتين معا عند نفس التردد (الخط abcd)، ثم نرسم المنحنى المحصل الذي يمثل الحمل الكلي للآلتين معاً الخط (dh) وامتداده كما هو مبين في الشكل (٢- ٢٦).

١- لمعرفة توزيع الحمل الكلي البالغ ٣٠٠٠ كيلووات بين المولدين، نحدد النقطة المناظرة لهذا الحمل على المنحني المحصل، ثم نرسم خطاً أفقياً (abcd)، تقاطع هذا الخط مع منحنيات خواص المنظم لكل آلة يعطي الحمل على كل آلة، كما هو مبين في الشكل (٢- ٢٦)، من هذا المنحني نجد أن الحمل على الآلة الأولي هو١٦٦٦كيلووات وعلى الآلة الثانية هو ١٣٣٤كيلووات، يلاحظ أن الآلة الأولى تأخذ حملاً أكبر من الآلة الثانية دائماً، لأن معدل هبوط التردد مع الحمل فيها أقل من الثانية.

٢- لكي نوجد أقصي حمل يتحمله المولدان معاً دون زيادة التحميل على أحداهما عن الحمل الكامل، يراعي أن تأخذ الآلة الأولي ٢٠٠٠ كيلووات فقط كحد أقصي للحمل عليها، ثم يحدد الحمل على الآلة الثانية بنفس الطريقة السابقة الخط (efgh)، نجد أنه يبلغ ١٦٠٠كيلووات فقط في هذه الحالة.



الشكل ٢- ٢٦ : حل المثال(٢- ٨)

مثال (٢- ٩):

مولدان متزامنان موصلان على التوازي قدرة كل منهما ٢٠٠٠ كيلوفولت أمبير، منحنى خواص المنظم للمولد الأول ينخفض خطياً من ٦٠ هيرتز عند اللاحمل حتى ٥٨ هيرتز عند الحمل الكامل، منحنى خواص المنظم للمولد الثاني ينخفض خطيا من ٦١ هيرتز عند اللاحمل حتى ٤٧ هيرتز عند الحمل الكامل:

١- كيف يقتسم المولدان قدرة فعالة مقدارها ٣٠٠٠ كيلووات، وعند أي تردد؟.

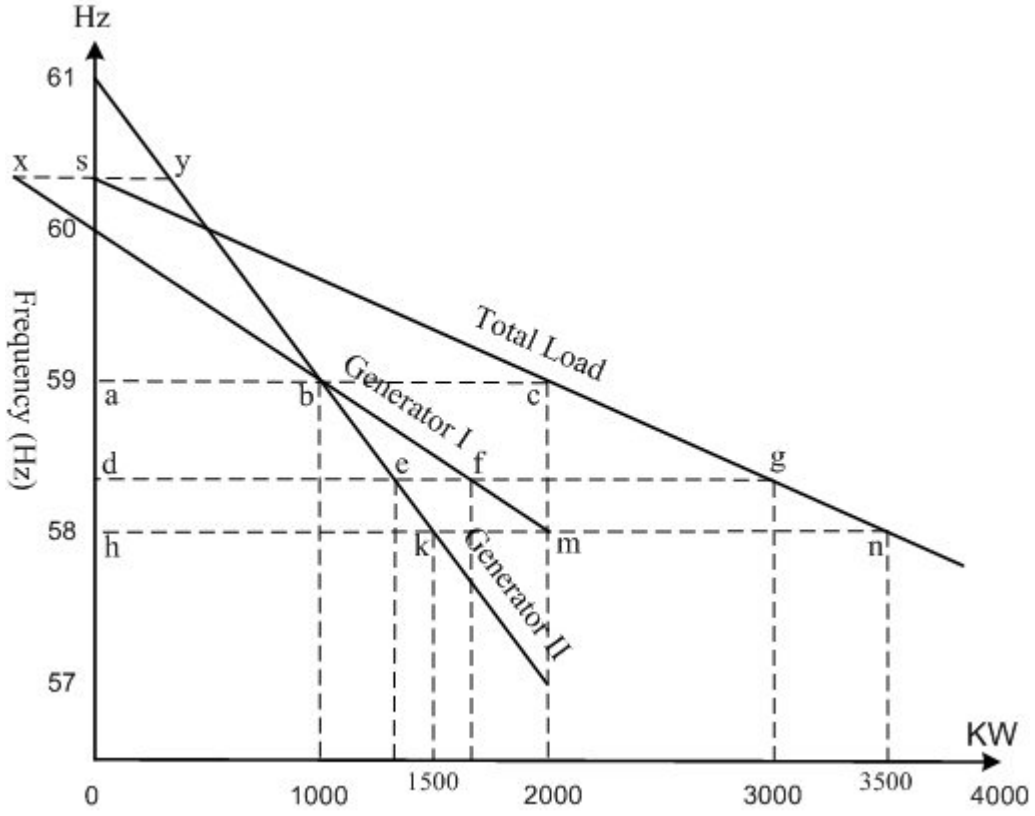
٢- ما هو أقصي حمل يتحمله المولدان معاً دون زيادة التحميل على أي منهما، وكيفية توزيع ذلك الحمل بين المولدين؟.

٣- متى يقتسم المولدان الحمل الكلي بالتساوي، أوجد ذلك الحمل والتردد الذي يحدث عنده؟

الحل:

يرسم منحنى خواص المنظم لكل آلة، الذي هو عبارة عن خط مستقيم. يتحدد الخط الأول للآلة الأولي بالنقطتين (٦٠,٠) و(٥٨,٢٠٠٠). كما يتحدد الخط الثاني للآلة الثانية بالنقطتين (٠- ٦١) و(٢٠٠٠- ٥٧). ثم نقوم بجمع الإحداثيات الأفقية لهذين المنحنيين عند ترددات مختلفة، كما هو مبين

بالخطوط الأفقية (abc) & (defg) & (hkmn)، للحصول على نقطتين أو أكثر على المنحنى المحصل للآلتين معاً، ثم نرسم المنحنى المحصل الذي يمثل الحمل الكلي للآلتين معاً الخط (ngcs) كما هو مبين في الشكل (٢- ٢٧).



الشكل ٢- ٢٧ حل المثال (٢- ٩)

١- لمعرفة توزيع الحمل الكلي البالغ ٣٠٠٠ كيلووات بين المولدين، نحدد النقطة المناظرة لهذا الحمل على المنحنى المحصل، ثم نرسم خطاً أفقياً، تقاطع هذا الخط مع منحنيات خواص المنظم لكل مولد يعطي الحمل على كل آلة، كما هو مبين في الشكل، الحمل على المولد الأول عند النقطة (f) يساوي ١٦٦٧ كيلووات وعلى المولد الثاني عند النقطة (e) ويساوي ١٣٣٣ كيلووات، والتردد المشترك هو ٥٨,٣ هيرتز النقطة (d).

يلاحظ أن المولد الأول يأخذ حملاً أكبر من المولد الثاني فقط إذا ازداد الحمل الكلي عن ٢٠٠٠ كيلووات، كما يأخذ المولد الثاني حملاً أكبر إذا قل الحمل الكلي عن ٢٠٠٠ كيلووات

٢- لكي نوجد أقصي حمل يتحمله المولدان معاً دون زيادة التحميل على أحدهما عن الحمل الكامل، يراعى أن يأخذ المولد الأول ٢٠٠٠ كيلووات فقط كحد أقصي للحمل عليه النقطة (m)، ثم يحدد

الحمل علي المولد الثاني بنفس الطريقة السابقة عند النقطة (k)، نجد أنه يبلغ ١٥٠٠كيلووات، التردد المشترك في هذه الحالة هو ٥٨ هيرتز النقطة (h).

٣- يقتسم المولدان الحمل الكلي بالتساوي عند نقطة تقاطع منحنيات خواص المنظم للمولدين النقطة (b)، الحمل على كل مولد هو ١٠٠٠ كيلووات لكل منهما، والحمل الكلي هو ٢٠٠٠ كيلووات، عند تردد مقداره ٥٩ هيرتز الخط (abc).

ماذا يحدث عند الخط (xy)؟

٢- ١٢ توصيل المولدات التزامنية إلى قضبان لا نهائية:

إن عملية توصيل المولد التزامني إلى قضبان لا نهائية Infinite bus bars تعتبر عملية مشابهة لتوصيل المولد التزامني على التوازي مع مولد آخر كبير جداً وذلك لأن القضبان اللانهائية تعتبر كأنها 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:

أ- طريقة المصابيح المضيئة

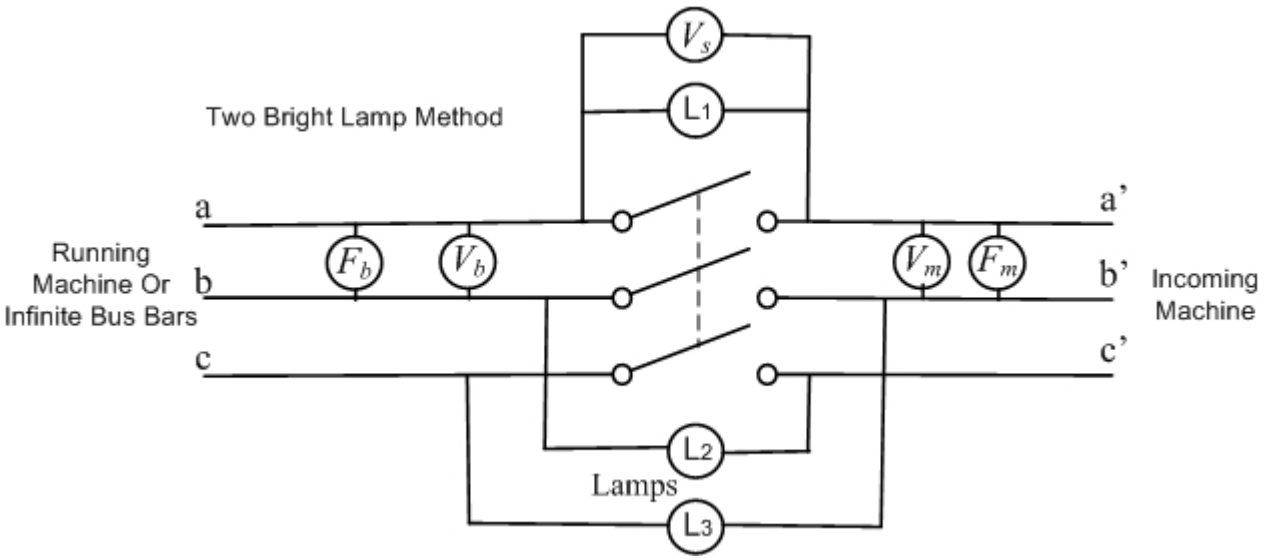
في هذه الطريقة توصل ثلاثة مصابيح بين الآلة والقضبان اللانهائية حيث يوصل المصباح الأول بين الخطين a، a' والثاني بين الخطين b، c' والثالث بين الخطين c، b' كما يوصل ثلاثة أجهزة فولتميتر، V_s بين الوجهين a، a' و V_m لقياس جهد المولد و V_b لقياس جهد القضبان اللانهائي، كذلك يتم توصيل جهازين لقياس تردد المولد والقضبان اللانهائية، كما هو موضح في الشكل(٢- ٢٨)، وبهذه الطريقة يمكن التأكد من تحقق شروط التزامن الأربعة كما يلي:

١- لكي يتحقق الشرط الأول، يجب أن تتساوى قراءة أجهزة قياس الجهد $(V_m=V_b)$

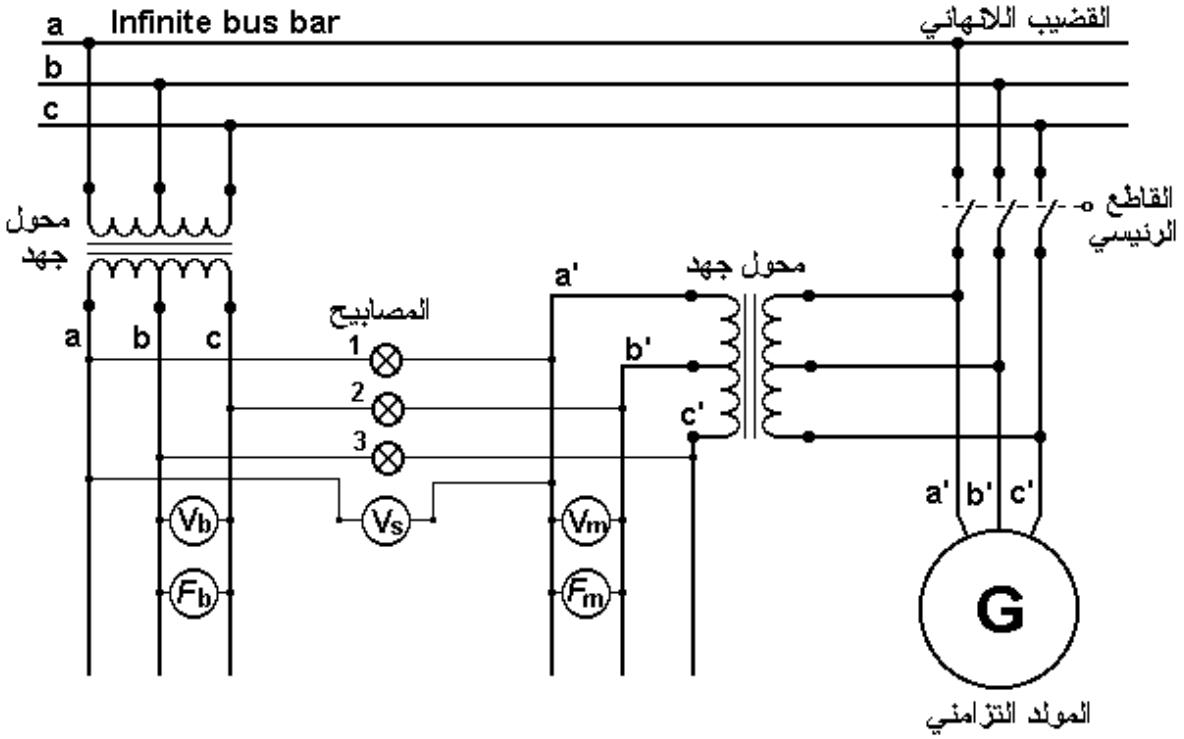
٢- لكي يتحقق الشرط الثاني، يجب أن تتساوى قراءة أجهزة قياس التردد $(F_m=F_b)$

٣- الشرط الثالث يتحقق عندما يكون انطفاء واشتعال المصابيح بشكل منتظم

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



الشكل ٢- ٢٨أ: توصيلة عملية التزامن بطريقة المصابيح المضيئة



الشكل ٢- ٢٨ب: توصيلة عملية التزامن بطريقة المصابيح المضيئة

أما عملية التزامن فيتم إجراؤها كما يلي:

١- يرفع جهد أطراف المولد حتى يكون مساوياً لجهد القضيب $(V_m=V_b)$ وذلك بزيادة تيار المجال تدريجياً

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

٣- عند محاولة ضبط سرعة الدوران تحدث إحدى حالتين بالنسبة للمصابيح:

الحالة الأولى: جميع المصابيح تضيء وتنطفئ بشكل عشوائي وهذا يعني أن شرط تتابع الأطوار للمولد والقضبان مختلف وعندها يجب المبادلة بين أي طرفين من أطراف المولد من أجل عكس تتابع أطوار المولد وبعدها نلاحظ أن إضاءة المصابيح أصبحت بشكل منتظم ومتتابع

الحالة الثانية: جميع المصابيح تضاء وتنطفئ بشكل منتظم ومتتابع وهذا 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 بطيئا قدر الإمكان وفي اللحظة التي يكون فيها $(V_s = 0)$ أو المصباح الأول منطفئاً بينما الثاني والثالث مضاءان يكون الشرط الرابع قد تحقق، في هذه اللحظة تكون الآلة في لحظة تزامن مع القضيب اللانهائي وعندها يمكن إغلاق القاطع الرئيس بأمان.

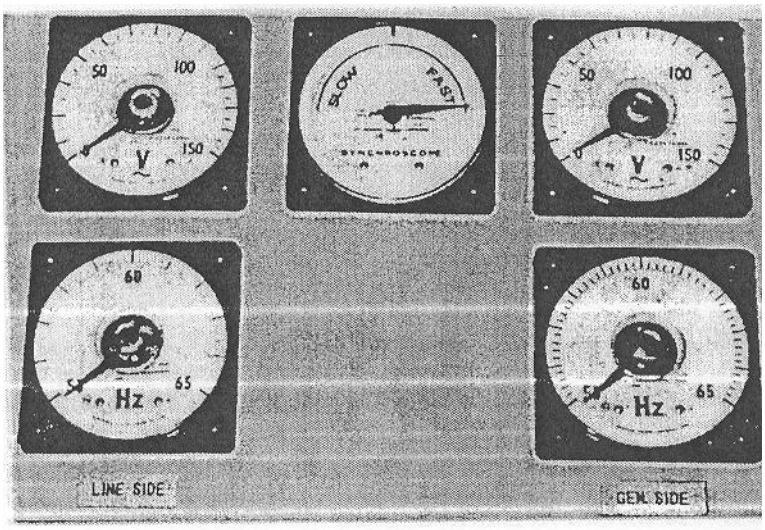
ب- باستخدام جهاز التزامن (السينكروسكوب): (Synchroscope)

استخدام جهاز التزامن أسهل وأكثر اعتمادية من طريقة المصابيح المضيئة وهو يستخدم للتأكد من أن جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهائية وأن لهما نفس التردد. ويتكون جهاز التزامن الشكل(٢- ٢٩) من محرك حثي يتعرض لمجالين مغناطيسيين الأول من القضبان اللانهائية والآخر من المولد التزامني، العضو الدائر مركب عليه مؤشر يدور باتجاه أو عكس اتجاه عقارب الساعة، ويعتمد ذلك على تردد المولد التزامني، إذا كان تردد المولد أعلى من تردد القضبان اللانهائية، يدور المؤشر مع عقارب الساعة أي في الاتجاه (Fast) وإذا كان تردد المولد أقل من تردد القضبان اللانهائية يدور المؤشر عكس عقارب الساعة أي في الاتجاه (Slow)، و عندما يقف المؤشر بشكل عمودي (في مكان الساعة 12) فهذا يعني أن تردد المولد مساوٍ لتردد القضبان اللانهائية وأن جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهائية عند هذه الحالة يمكن توصيل المولد التزامني بالقضبان اللانهائية بأمان عن طريق القاطع الرئيس. أما إذا توقف المؤشر في أي مكان عدا مكان (الساعة 12) فهذا يعني أن تردد المولد مساوٍ لتردد القضبان اللانهائية ولكن جهد المولد ليس في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهائية وأن الزاوية بين الطورين تحدد بمكان وقوف المؤشر.

يستخدم جهاز التزامن (Synchroscope) كجزء من لوحة التزامن الشكل(٢- ٣٠) والتي تضم أيضا جهازين لقياس الجهد وجهازين لقياس التردد (Frequency Meters)، في المحطات الحديثة لتوليد الطاقة الكهربائية تتم عملية التزامن آلياً دون تدخل أي من العاملين في المحطة سوي مراقبة أجهزة القياس من غرفة التحكم

سلوك المولد التزامني المربوط مع قضبان لانهائية وكيفية التحكم فيه سوف يتم التدريب علية في الحقيبة التدريبية للمقرر ٢٢٤كهر (التوليد ومحطات التحويل الرئيسة).

الشكل ٢- ٢٩: جهاز التزامن



الشكل ٢- ٣٠: لوحة التزامن

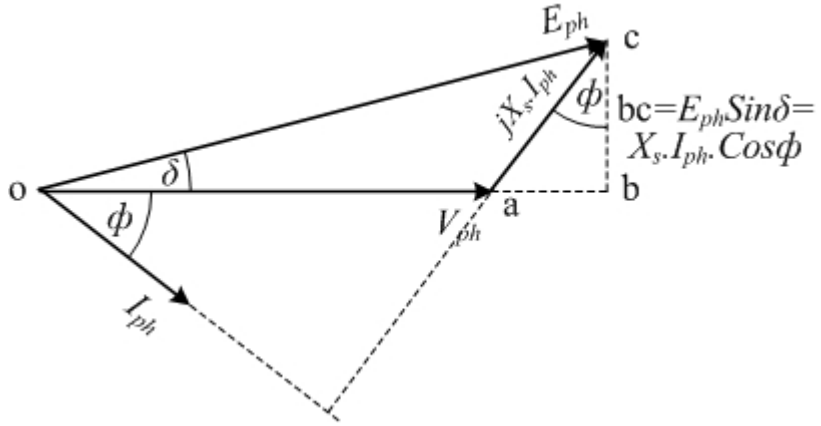
٢- ١٣ القدرة والعزم في الآلات التزامنية :

القدرة الفعالة الخارجة من المولد التزامني تعطى من المعادلة التالية:

$$P = 3 \cdot V_{ph} \cdot I_{ph} \cdot Cos\phi$$ المعادلة(٢- ١٤)

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

إذا ما أهملنا مقاومة ملفات المنتج R_a وذلك لصغر قيمتها عندما تقارن بالممانعة التزامنية X_S، فإننا نستطيع إيجاد معادلة هامة وبسيطة لحساب القدرة الخارجة من الآلة التزامنية، .لإيجاد هذه المعادلة نستعين بالمخطط الاتجاهي المعبر عن هذه الحالة والموضح في الشكل (٢- ٣١).



الشكل ٢- ٣١: المخطط الاتجاهي للمولدات التزامنية في حالة إهمال R_a

نلاحظ من مخطط المتجهات في الشكل(٢- ٣١) أن المستقيم bc يمكن أن يعبر عنه بـ $(E_{Ph}Sin\delta)$ أو بـ$(X_sI_{Ph}Cos\ \phi)$ وذلك لكونه ضلعاً مشتركاً في المثلثين obc، abc وبالتالي فإن:

$$I_{ph} \cdot Cos\phi = \frac{E_{ph} \cdot Sin\delta}{X_s}$$

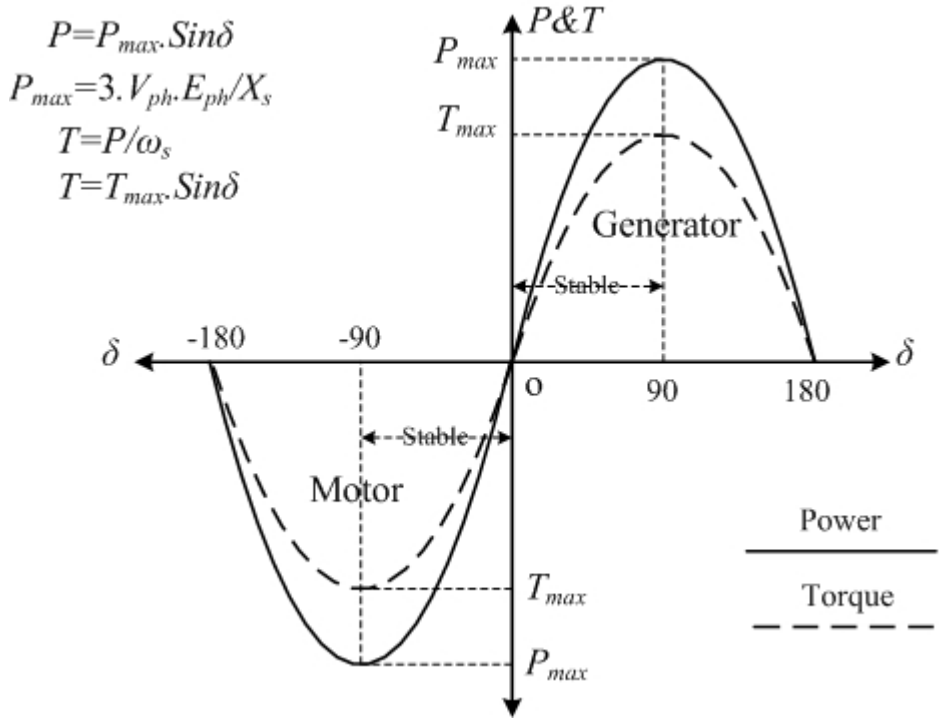
وبعد التعويض في المعادلة (٢- ١٤) تصبح معادلة القدرة كما يلي:

$$P = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{X_s} Sin\delta = P_{max} \cdot Sin\delta$$ المعادلة(٢- ١٥):

يمكننا أن نرسم العلاقة بين P و δ كما هو موضح في الشكل (٢- ٣٢)، والممثلة بالمعادلة (٢- ١٥) والتي توضح أن القدرة الخارجة من المولد التزامني تعتمد على الزاوية δ بين E_{Ph} و V_{Ph}، والزاوية δ تسمى زاوية الحمل Load angle أو زاوية العزم Torque angle، كما يلاحظ أن أقصى قدرة (P_{max}) يمكننا أخذها من المولد (نظرياً) عندما تكون قيمة الزاوية δ تسعون درجة، أي أن $(Sin\delta=1)$ وبالتالي:

المعادلة(٢- ١٦):

$$P_{\max} = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{X_s}$$



الشكل ٢- ٣٢: القدرة والعزم في الآلات التزامنية بدلالة زاوية الحمل δ

منطقة التشغيل المستقر للآلة التزامنية في حالة التشغيل كمولد هي عندما تكون $(90 > \delta > 0)$ وفي حالة التشغيل كمحرك هي عندما تكون $(0 > \delta > -90)$ كما هو موضح في الشكل (٢- ٣٢).

العزم المتولد داخل الآلات التزامنية يمكن إيجاده من المعادلة(٢- ١٥) بقسمتها على السرعة التزامنية بالراديان في الثانية (ω_s) كما في المعادلة(٢- ١٧):

المعادلة(٢- ١٧):

$$T = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{\omega_s \cdot X_s} Sin\delta = T_{max} \cdot Sin\delta$$

مثال (٢- ١٠):

مولد متزامن ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل نجمة جهده ٢١ كيلوفولت، قدرته ٣٦ ميجافولت أمبير، موصل مع شبكة لانهائية جهدها ١٧,٣ كيلوفولت، إذا كانت السرعة التزامنية ١٨٠٠ لفة في الدقيقة والممانعة التزامنية ٩ أوم لكل وجه، وجهد الوجه المتولد١٢ كيلوفولت، أوجد:

١- القدرة الفعالة التي يولدها المولد إذا كانت زاوية الحمل ٣٠ درجة.

٢- أقصى قدرة فعالة يولدها المولد قبل أن يخرج عن التزامن.

الحل:

$$V_{ph} = V_L / \sqrt{3} = 17.3 / \sqrt{3} = 10 \quad \text{KV}$$

$$E_{ph} = 12 \quad \text{KV}$$

$$\delta = 30^o$$

$$P = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot V_{ph}}{X_s} \times Sin\delta$$

$$P = \frac{3 \times 12 \times 10}{9} \times Sin(30) = 40 \times 0.5 = 20 \quad \text{MW}$$

$$P_{max} = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot V_{ph}}{X_s} = \frac{3 \times 12 \times 10}{9} = 40 \quad \text{MW}$$

مثال (٢- ١١):

في المثال(٢- ١) إذا كانت السرعة التزامنية ١٨٠٠ لفة في الدقيقة أوجد:

١- العلاقة بين القدرة وزاوية الحمل δ، وأقصى قدرة يولدها المولد قبل خروجه عن التزامن.

٢- العلاقة بين العزم وزاوية الحمل δ، وأقصى عزم.

أ)عند حمل مادي مقداره ٣٦ ميجاوات.

ب)عند حمل حثي مقداره ٣٦ ميجافولت أمبير بمعامل قدرة ٠,٨متأخراً.

الحل:

$$V_{ph} = 12\angle 0^o \quad \text{KV}$$

أ)عند حمل مادي مقداره ٣٦ميجاوات من المثال (٢- ١):

$$E_{ph}\angle\delta = 15\angle 36.87^o \quad \text{KV}$$

$$P = P_{max} \cdot Sin\delta = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot V_{ph}}{X_s} \times Sin\delta$$

$$P = \frac{3 \times 15 \times 12}{9} \times Sin\delta = 60 \times Sin\delta \quad \text{MW}$$

$$P = 60 \times Sin(36.87) = 60 \times 0.6 = 36 \quad \text{MW}$$

$$P_{max} = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot V_{ph}}{X_s} = 60 \quad \text{MW}$$

لكي نوجد العزم عند حمل مادي مقداره ٣٦ ميجاوات:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} = \frac{2 \times \pi \times 1800}{60} = 188.5 \quad \text{rad/sec.}$$

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{60 \times 10^6 \times Sin\delta}{188.5} = 318310 \times Sin\delta \quad \text{Nm}$$

$$T = 318310 \times Sin(36.87) = 318310 \times 0.6 = 191000 \quad \text{Nm}$$

$$T_{max} = 318310 \quad \text{Nm}$$

ب) عند حمل حثي مقداره ٣٦ ميجافولت أمبير بمعامل قدرة ٠,٨ ، يتأخر التيار عن الجهد بزاوية ϕ :

$$\phi = Cos^{-1}(0.8) = 36.87$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot Cos\phi$$

$$I_{ph} = I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot Cos\phi} = \frac{36 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 21 \times 10^3 \times 0.8} = 1237 \angle -36.87^o \quad \text{A}$$

$$E_{ph} = V_{ph} \angle 0^o + jX_s \cdot I_{ph}$$

$$E_{ph} = \left(21000 / \sqrt{3}\right) \angle 0^o + 9 \angle 90 \times 1237 \angle -36.87$$

$$E_{ph} = 12000 \angle 0^o + 11133 \angle 53.13$$

$$E_{ph} = 12000 \angle 0^o + 6680 + j8906$$

$$E_{ph} \angle \delta = 18680 + j8906 = 20694 \angle 25.49^o \quad \text{V}$$

لكي نوجد العلاقة بين القدرة وزاوية الحمل عند حمل حثي مقداره ٣٦ ميجافولت أمبير بمعامل قدرة ٠,٨ :

$$P = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot V_{ph}}{X_s} \times Sin\delta$$

$$P = \frac{3 \times 20.694 \times 12}{9} \times Sin\delta = 82.776 \times Sin\delta \quad \text{MW}$$

$$P = 82776 \times Sin(25.49) = 82.776 \times 0.43 = 36 \quad \text{MW}$$

$$P_{max} = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot V_{ph}}{X_s} = 82.776 \quad \text{MW}$$

لكي نوجد العزم عند حمل حثي مقداره ٣٦ ميجافولت أمبير بمعامل قدرة ٠,٨ :

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{82.776 \times 10^6 \times Sin\delta}{188.5} = 435000 \times Sin\delta \quad \text{Nm}$$

$$T = 435000 \times Sin(25.49) = 435000 \times 0.43 = 187000 \quad \text{Nm}$$

$$T_{max} = 435000 \quad \text{Nm}$$

أسئلة وتمارين:

١- لماذا سميت الآلات التزامنية بهذا الاسم؟

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 الآلات التزامنية؟

٥- ما مزايا وضع ملفات المنتج للآلات التزامنية في العضو الثابت؟

٦- ما الفروق الأساسية بين المولدات التزامنية التي تدار بتوربين مائي وتلك التي تدار بتوربين بخاري أو غازي؟

٧- ما المقصود برد فعل المنتج؟

٨- ما الممانعة التزامنية؟

٩- ارسم الدائرة المكافئة التقريبية للآلات التزامنية، واذكر الأساس الذي تم عليه التقريب؟

١٠- ارسم المخطط الاتجاهي للآلات التزامنية المصاحب للدائرة المكافئة التقريبية في حالة كون معامل القدرة مساو لواحد ومتأخر ومتقدم

١١- ما المقصود بالتشبع المغناطيسي في الحديد؟

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

١٣- ما معامل تنظيم الجهد؟

١٤- ما أهمية معرفة معامل تنظيم الجهد للمولد؟

١٥- هل يزداد أم يقل جهد الأطراف عند تحميل المولد التزامني بحمل حثي؟

١٦- هل يزداد أم يقل جهد الأطراف عند تحميل المولد التزامني بحمل سعوي؟

١٧- ما أهمية معرفة معامل تنظيم الجهد للمولد التزامني؟

١٨- أي المولدات أفضل أن يكون معامل تنظيم الجهد لها كبير أم صغير؟

١٩- لماذا يفضل ربط المولدات التزامنية على التوازي؟

٢٠- ما الشروط الواجب توفرها قبل توصيل مولدين تزامنيين علي التوازي؟

٢١- ما جهاز التزامن؟

٢٢- ما المقصود بالقضيب اللانهائي؟

٢٣- بعد توصيل المولد التزامني بالقضيب اللانهائي، هل يمكن التحكم في سرعته؟

٢٤- بعد توصيل المولد التزامني بالقضيب اللانهائي، هل القدرة تنتقل من المولد إلى القضيب أم العكس؟

٢٥- متى يفقد المولد التزامني تزامنه مع الشبكة الكهربائية؟

٢٦- مولد متزامن ثلاثي الأوجه يولد جهد على أطرافه عند اللاحمل مقدره ١٣,٢ كيلو فولت، إذا تم تحميله بحمل ذي معامل قدرة ٠,٨ متأخراً، فهل يجب زيادة تيار المجال أم نقصانه للمحافظة على نفس جهد الأطراف بعد التحميل؟

٢٧- مولدان متزامنان موصلان على التوازي قدرة كل منهما ٣٠٠٠كيلوفولت أمبير، منحني خواص المنظم للمولد الأول ينخفض خطياً من ٦٠ هيرتز عند اللاحمل حتى ٥٨ هيرتز عند الحمل الكامل، منحنى خواص المنظم للمولد الثاني ينخفض خطياً من ٦٠ هيرتز عند اللاحمل حتى ٥٧ هيرتز عند الحمل الكامل:

١- كيف يقتسم المولدان قدرة فعالة مقدارها ٥٠٠٠ كيلووات؟ وعند أي تردد؟

٢- ما أقصي حمل يتحمله المولدان معاً دون زيادة التحميل على أي منهما، وكيفية توزيع ذلك الحمل بين المولدين؟.

٣- ماذا يجب أن نفعله إذا كان المطلوب أن يقتسم المولدان الحمل مناصفة؟

٢٨- مولد تزامني ثلاثي الأوجه ١٠ ميجاوات ملفاته موصلة على شكل نجمة وجهد الأطراف ١١كيلوفولت والتردد ٦٠ هيرتز والممانعة التزامنية له ٠,٦٦أوم ومقاومة ملفات المنتج ٠,١أوم، احسب الجهد الداخلي (E_{ph}) وزاوية الحمل عند الحمل الكامل و معامل قدره ٠,٨٥متأخراً.

٢٩- مولد تزامني ثلاثي الأوجه ١٨٠كيلوفولت أمبير ملفاته موصلة على شكل دلتا وجهد الأطراف له ٢٢٠فولت والتردد ٥٠هيرتز والممانعة التزامنية له٠,٠٧أوم ومقاومة ملفات المنتج ٠,٠١٦أوم،احسب الجهد الداخلي (E_{ph}) وزاوية الحمل وارسم مخطط المتجهات، عند الحمل الكامل ومعامل قدره:
أ) ٠,٧٢متأخراً، ب) ٠,٧٢متقدماً، جـ) مساوياً للواحد.

٣٠- مولد تزامني ثلاثي الأوجه قدرته١٠ميجاوات ملفاته موصلة على شكل نجمة وجهد الأطراف ١١كيلوفولت وتردده ٦٠هيرتز،مفاعلته التزامنية ٠,٦٦أوم ومقاومة ملفات المنتج ٠,١أوم، احسب الجهد الداخلي (E_{ph}) وزاوية العزم عند الحمل الكامل و معامل قدره ٠,٨متأخراً

٣١- مولد تزامني ثلاثي الأوجه ذو عضو دوار اسطواني موصل على شكل نجمة قدرته الظاهرية ٢٥كيلوفولت أمبير وجهده ٤٠٠فولت والممانعة التزامنية ١,٦أوم لكل وجه ومقاومة ملفات المنتج٠,٠٥أوم لكل وجه، احسب التغير النسبي في الجهد في حالة الحمل الكامل عند:

١- معامل قدرة ٠,٨ متأخراً.

٢- معامل قدرة قدره واحد.

٣- معامل قدرة ٠,٨ متقدماً.

الإجابة: ١- ٢٢، ٢٪ ٢- ١٠,٦٪ ٣- (- ٥,٥٪)

٣٢- في السؤال السابق عين زوايا القدرة (زوايا العزم) في الحالات الثلاث المبينات.

الإجابة: ١- (٧,٢ درجة) ٢- (١٣ درجة) ٣ – (١٥ درجة)

٣٣- في السؤال السابق أيضاً، إذا أريد أن يكون التغير النسبي في الجهد صفراً عند الحمل الكامل، أوجد معامل القدرة والقدرة المتولدة.

الإجابة: ١- (٠,٩٩٧متقدم) ٢- (١٢,٥ كيلووات).

٣٤- مولد تزامني ثلاثي الأوجه موصل على شكل نجمة، قدرته الظاهرية المقننة ٥٠٠كيلوفولت أمبير وجهده ٥٠٠فولت يحتوي على ستة أقطاب ومعاوقته التزامنية $(0.1+j1.5)$ أوم لكل وجه، .فإذا دار المولد عند سرعة قدرها ١٠٠٠ لفة في الدقيقة، فما هو تردد الجهد المتولد؟ عين جهد الإثارة وزاوية القدرة في حالة الحمل الكامل بمعامل قدرة ٠,٨متأخراً.

الإجابة(٥٠ هيرتز) (١٠٧٥ فولت، ٣٧,٦ درجة)

٣٥- مولد متزامن ثلاثي الأوجه موصل على شكل نجمة، قدرته الظاهرية المقننة ٣٠كيلوفولت أمبير وجهده ٢٣٠فولت ومعاوقته التزامنية $(0+j0.8)$ أوم لكل وجه، احسب التغير المئوي في الجهد عند:

١- الحمل الكامل بمعامل قدرة ٠,٨متقدماً.

٢- نصف الحمل الكامل بمعامل قدرة واحد.

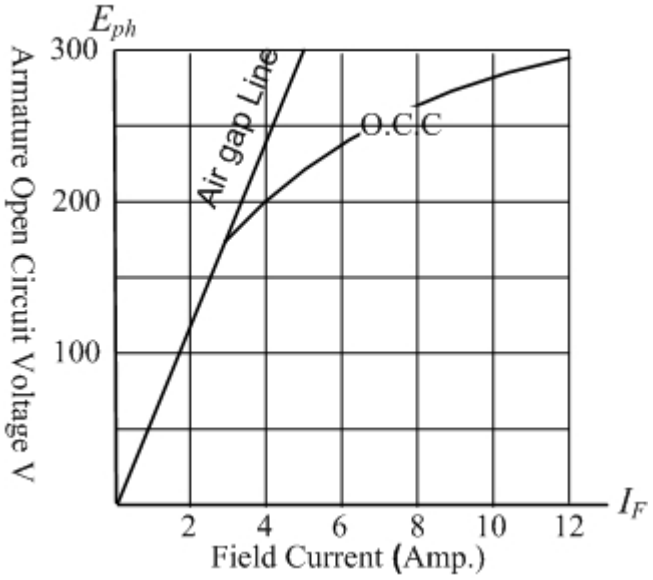
٣- ربع الحمل الكامل بمعامل قدرة ٠,٨متأخراً.

الإجابة:١- (- ١٨,٧٪) ٢- (٢,٥٪) ٣- (٧,٢٪)

٣٦- احسب زوايا القدرة لكل الحالات الثلاث المبينات في السؤال السابق.

الإجابة:١- (٢٦,٥ درجة) ٢- (١٢,٨ درجة) ٣- (٤,٨ درجة)

٣٧- مولد تزامني ثلاثي الأوجه ذو عضو دوار اسطواني موصل على شكل نجمة ٢٣٠ فولت ومعاوقته التزامنية (0.4+j1.2) أوم لكل وجه. يغذي حملاً قدرته ٣٠كيلوفولت أمبير بجهده ٢٢٠فولت ومعامل قدرة ٠,٨متأخراً، فإذا كان منحني الدائرة المفتوحة للمولد كما هو مبين في الشكل(٢-٣٣). احسب زاوية العزم وتيار المجال



الشكل(٢- ٣٣): منحنى الدائرة المفتوحة للمولد في السؤال ٣٧

الإجابة:١- (١٥ درجة) ٢- (٥,٢ أمبير)

٣٨- مولد تزامني ذو قطبين ملفاته موصلة على شكل نجمة، جهد الأطراف له ٢٣٠٠فولت والتردد ٦٠هيرتز، 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

الممانعة التزامنية له ١,١ أوم ومقاومة ملفات المنتج ٠,١٥أوم، عند الحمل الكامل يعطي تياراً قدره ٢٥٠ أمبير عند معامل قدره ٠,٨متأخراً، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك ٢٤ كيلووات و المفاقيد الحديدية١٨ كيلووات عند الحمل الكامل، أجب ما يلي:

أ) ارسم منحنى الدائرة المفتوحة للمولد.

ب) كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يكون جهد الأطراف٢٣٠٠ فولت عند اللاحمل.

جـ) إذا كان المولد يغذي حملاً بتيار قدره ٢٥٠ أمبير عند معامل قدره ٠,٨٥متأخراً، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يحافظ على جهد الأطراف عند ٢٣٠٠ فولت.

د) احسب القدرة الداخلة إلى المولد.

هـ) افترض أن المولد يغذي حملاً بتيار قدره ٢٥٠ أمبير عند معامل قدره ٠,٨ متقدماً، كم يجب أن يكون تيار المجال لكي يبقى جهد الأطراف عند ٢٣٠٠ فولت.

٣٩- مولد تزامني ذو أربعة أقطاب ملفاته موصلة على شكل دلتا جهد الأطراف له ٢٨٠ فولت عند تردد ٦٠ هيرتز، الممانعة التزامنية ١,٠٥ أوم لكل وجه ومقاومة ملفات المنتج مهملة، تيار الحمل الكامل له١٠٠ أمبير عند معامل قدره ٠,٧٨متأخراً، مفاقيد الاحتكاك ١,٧٥ كيلووات والمفاقيد الحديدية ١,٢ كيلووات عند الحمل الكامل، تيار المجال ضبط بحيث يكون جهد الأطراف ٢٨٠ فولت عند اللاحمل احسب ما يلي:

أ) ما السرعة التزامنية للمولد.

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

١- معامل القدرة ٠,٧٨ متأخراً.

٢- معامل القدرة واحد.

٣- معامل القدرة ٠,٧٨متقدماً.

جـ) احسب كفاءة المحرك عند الحمل الكامل إذا كان معامل القدرة ٠,٧٨ متأخراً.

د) احسب العزم الداخل إلى المولد.

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

المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

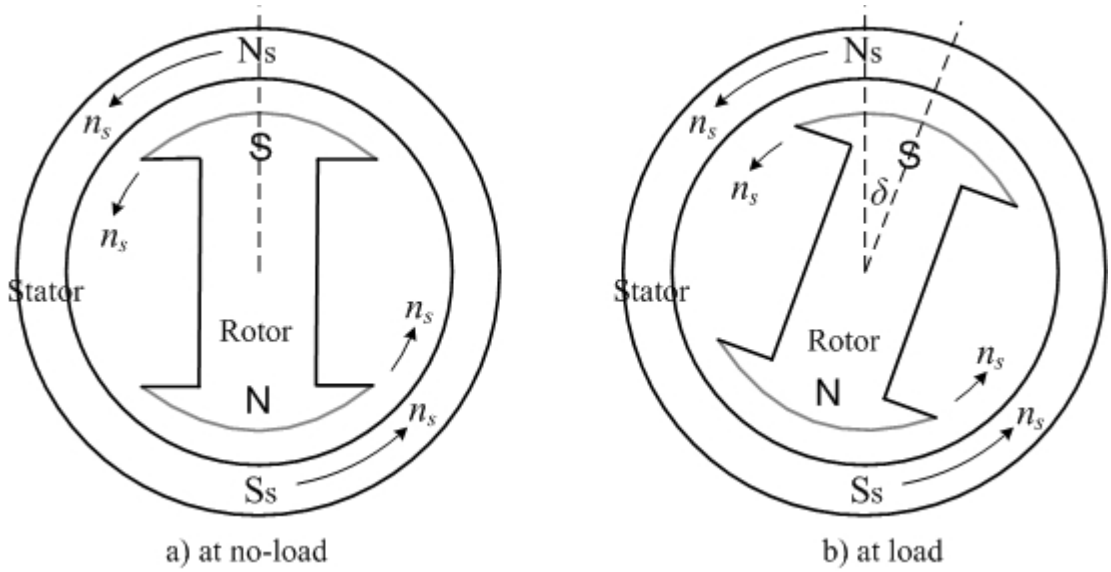
٢- ١٤ تركيب المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه :

هو نفس تركيب المولدات التزامنية حيث أن الآلة التزامنية يمكن تشغيلها كمولد أو كمحرك تزامني Synchronous Motors وذلك بتغذية ملفات العضو الثابت من مصدر جهد ثلاثي الأوجه، وتغذية ملفات العضو الدائر (ملفات المجال) بتيار مستمر، عند ذلك ينتج مجالان مغناطيسيان أحدهما يدور بالسرعة التزامنية حسب تردد مصدر الجهد وهو المجال الناتج من العضو الثابت والآخر يدور حسب سرعة العضو الدائر، وعندما يدور العضو الدائر بسرعة المجال الدوار الناتج من ملفات العضو الثابت تستقر سرعة المحرك عند هذه السرعة ولا تتغير بتغير حمل المحرك طالما أنه لم يتعد الحمل الأقصى.

٢- ١٥ كيفية عمل المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه :

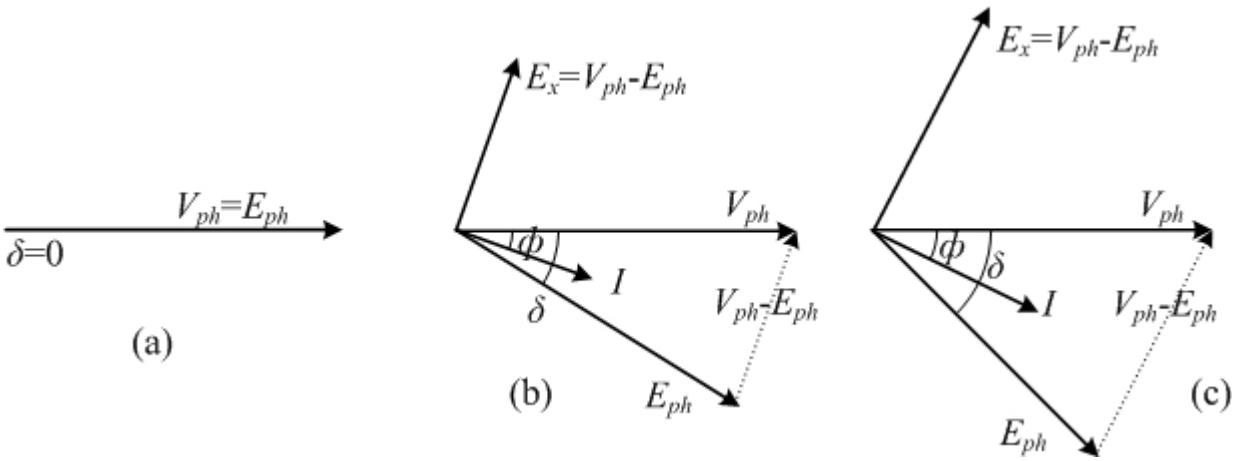
عندما يعمل المحرك التزامني ثلاثي الأوجه بدون حمل فإن محور أقطاب العضو الدائر تكون منطبقة مع محور أقطاب المجال المغناطيسي الدوار المتولد من العضو الثابت، بحيث يكون القطب الجنوبي للعضو الدائر مقابل القطب الشمالي للمجال الدوار والقطب الشمالي للعضو الدائر مقابل القطب الجنوبي للمجال الدوار، ويدور المحوران معاً بنفس سرعة التزامن. عند تحميل المحرك بحمل ميكانيكي فإن محور أقطاب العضو الدائر يتأخر قليلاً (بزاوية δ) عن محور المجال المغناطيس الدوار، ولكنه يستمر في الدوران بنفس السرعة التزامنية. الزاوية δ بين محاور الأقطاب تزداد بزيادة الحمل الميكانيكي، ويزداد أيضاً العزم المتولد من المحرك بحيث يكون قادراً على إدارة الحمل، ويحدث ذلك حتى الحمل الأقصى للمحرك حيث إن أية زيادة طفيفة في الحمل تفقد المحرك تزامنه، فتنخفض سرعة المحرك ويتوقف عن الدوران. أقصي حمل للمحرك يكون حوالي ضعف الحمل المقنن (أو من ١,٥ إلى ٢,٥الحمل المقنن). الشكل (٢- ٣٤) يبين محور أقطاب العضو الدائر ومحور المجال الدوار للعضو الثابت عند اللاحمل حيث ينطبق المحوران، وعند التحميل حيث يتأخر محور أقطاب العضو الدائر عن محور أقطاب المجال الدوار بالزاوية δ.

وبصيغة أخري، فإن أقطاب المجال المغناطيسي الدوار تجذب وراءها أقطاب العضو الدائر بحيث تكون الزاوية بين محاورها صفراً عند اللاحمل وتزداد الزاوية δ بين محاورها بزيادة الحمل الميكانيكي حتى تصل إلى أقصي قيمة لها وهي تسعون درجة عندها يصل عزم المحرك إلى أقصي قيمة له، ويستمر المحرك في الدوران بسرعة التزامن طالما أن الحمل لم يتعد الحمل الذي يخرج المحرك عن التزامن.



الشكل ٢- ٣٤: محوري أقطاب العضو الثابت والعضو الدائر عند اللاحمل وعند التحميل

إذا تم ضبط قيمة تيار المجال بحيث تصبح قيمة E_{ph} مساوية V_{ph} وكان المحرك يدور بدون حمل، فإن قيمة التيار ستكون صفراً، أي أن المحرك سيكون عائماW(floating) على الشبكة الكهربائية لا يأخذ ولا يعطي أية قدرة. فإذا تم بعد ذلك تحميل المحرك بالحمل الميكانيكي، مع المحافظة على نفس تيار المجال، سوف يتأخر محور مجال العضو الدائر عن المجال المغناطيسي الدوار بزاوية δ، تعتمد قيمتها على مقدار الحمل، تبعاً لذلك سيتأخر المتجه E_{ph} عن المتجه V_{ph} في مخطط المتجهات بنفس الزاوية δ، كما في الشكل(٢- ٣٥)، الفرق E_x بين المتجهين سوف يعمل على إمرار التيار I خلال Xs في دائرة المحرك. التيار Iسيتأخر بزاوية ٩٠ درجة عن E_x بسبب الممانعة Xs، ولكنه سيصنع زاوية صغيرة مع V_{ph} الشكل(٢- ٣٥)، بناء عليه سيسحب المحرك قدرة فعالة من مصدر الجهد، هذه القدرة ستتحول إلي قدرة ميكانيكية.



الشكل(٢- ٣٥)المحرك التزامني في حالة: (أ)اللاحمل(عائم) وبقيم مختلفة من الحمل (ب وجـ)

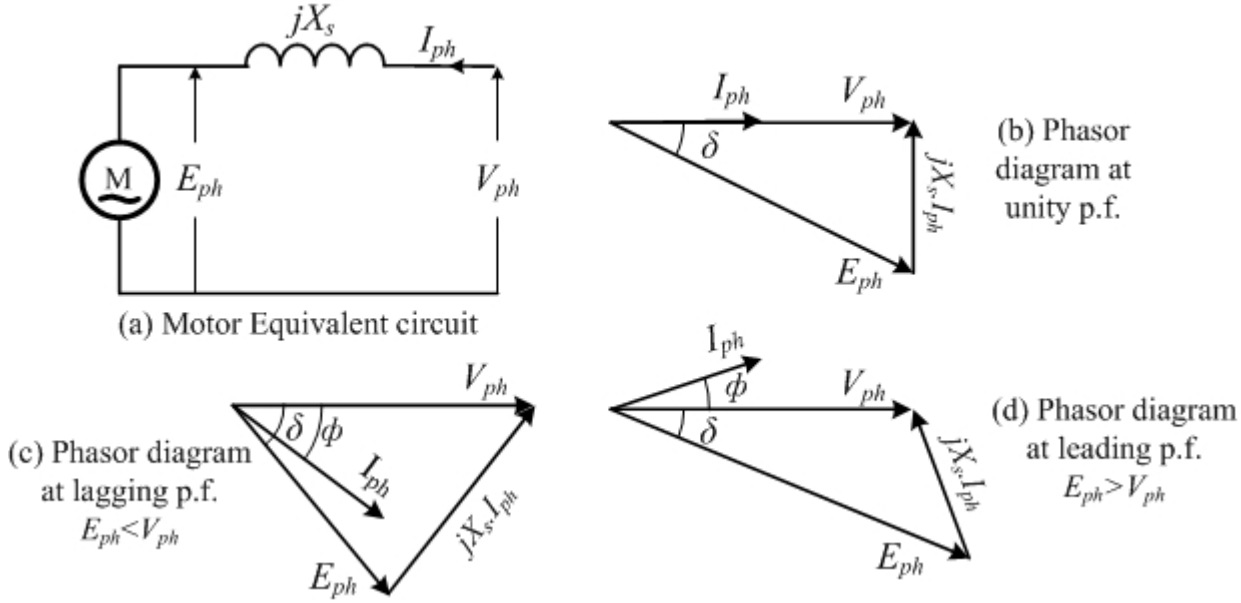
المعادلة(٢- ١٨):
$$E_x = V_{ph} - E_{ph}$$

المعادلة(٢- ١٩):
$$I = \frac{V_{ph} - E_{ph}}{jX_s} = \frac{E_x}{jX_s} = -jE_x / X_s$$

جميع العلاقات الرياضية الخاصة بالمولد التزامني تنطبق على المحرك التزامني مع الأخذ في الاعتبار تغير اتجاه التيار العضو الثابت إلى داخل الآلة، يمكن إيجاد قيمة الجهد الداخلي للمحرك E_{ph} (ويسمى القوة الكهربائية العكسية المتولدة في المحرك) من المعادلة(٢- ٢٠):

المعادلة(٢- ٢٠):
$$V_{ph} = E_{ph} + jX_s \cdot I_{ph}$$
$$E_{ph} = V_{ph} - jX_s \cdot I_{ph}$$

الدائرة المكافئة التقريبية التي تمثل المحركات التزامنية هي نفسها الدائرة المكافئة التقريبية التي تمثل المولدات مع الأخذ في الاعتبار تغيير اتجاه التيار في العضو الثابت إلى داخل الآلة الشكل(٢- ٣٦أ)، ويلاحظ في الشكل تغيير اتجاه التيار إلى داخل الآلة.



الشكل ٢- ٣٦: (ا)الدائرة المكافئة التقريبية والمخطط الاتجاهي للمحركات التزامنية عند معامل قدرة (ب) واحداً (جـ) متأخراً (د) متقدماً

من مخطط المتجهات للمحركات التزامنية المبين في الشكل (٢- ٣٦) يلاحظ أن المتجه E_{ph} دائماً متأخر عن المتجه V_{ph}، في جميع حالات معامل القدرة (واحداً أو متأخراً أو متقدماً)، أي أن زاوية الحمل (δ) أصبحت سالبة كما في الشكل (٢- ٣٢) مما يعني أن القدرة الكهربائية متجهه إلى داخل الآلة، وأن E_{ph} أصغر من V_{ph} ($E_{ph}<V_{ph}$) في حالة معامل القدرة المتأخر وأن E_{ph} أكبر من V_{ph} ($E_{ph}>V_{ph}$)

في حالة معامل القدرة المتقدم، فتحولت الآلة إلى محرك تزامني بصرف النظر عن أيهما أكبر E_{ph} أم V_{ph}

مثال (٢- ١٢):

محرك تزامني ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل نجمة يتغذي من مصدر جهده ٣٩٨٠ فولت خطي، جهد الوجه المتولد داخل المحرك١٧٩٠ فولت عندما كان تيار المجال ٢٥ أمبير. إذا كانت الممانعة التزامنية ٢٢ أوم وزاوية الحمل δ تساوي ٣٠ درجة احسب:

١- الفرق الاتجاهي بين جهد المصدر والجهد المتولد من المحرك.

٢- تيار الخط.

٣- معامل القدرة.

الحل:

١- نوجد الفرق الاتجاهي بين جهد المصدر والجهد المتولد من المحرك من المعادلة(٢- ١٨):

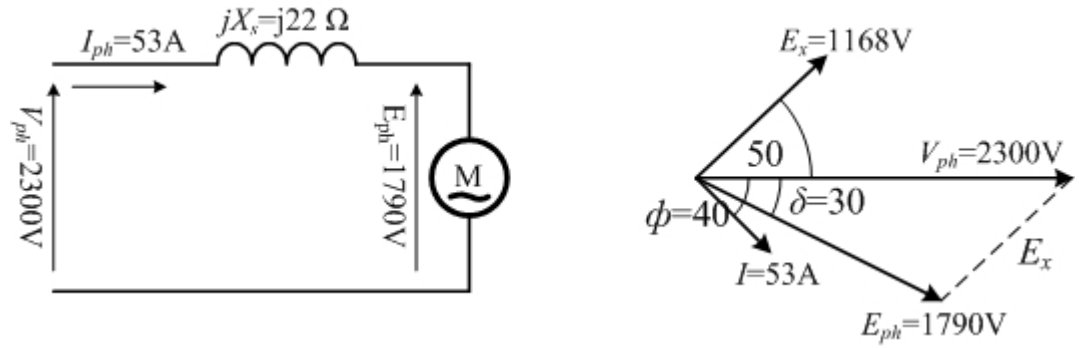
$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{3980}{\sqrt{3}} = 2300\angle 0 \quad \text{V}$$

$$E_{ph} = 1790\angle -30^o \quad \text{V}$$

$$E_x = V_{ph} - E_{ph}$$

$$E_x = 2300\angle 0 - 1790\angle -30 = 1168\angle 50^o \quad \text{V}$$

المتجه E_x ذو قيمة عددية ١١٦٨ فولت ويسبق متجه الجهد V_{ph} بزاوية مقدارها ٥٠ درجة كما في الشكل(٢- ٣٧).



الشكل (٢- ٣٧) الدائرة المكافئة ومخطط المتجهات المثال (٢- ١٢)

٢- نوجد التيار من المعادلة(٢- ١٩):

$$I = \frac{E_x}{jX_s} = \frac{1168\angle 50}{22\angle 90} = 53\angle -40^o \quad \text{A}$$

متجه التيار I ذو قيمة عددية ٥٣ أمبير ويتأخر عن متجه V_{ph} بزاوية مقدارها ٤٠ درجه.

٣- معامل القدرة:

$$\text{The power factor} = Cos\phi = Cos(-40) = 0.677 \quad \text{lagging}$$

مثال (٢- ١٣):

محرك تزامني ثلاثي الأوجه ذو عضو دائر اسطواني، موصل نجمة، جهده ٢٣٠٠ فولت وله ممانعته التزامنية ٢ أوم ومقاومة ملفات المنتج ٠,١أوم. فإذا كان المحرك يسحب تياراً ٣٥٠ أمبير عند معامل قدرة ٠,٨٦٦متقدماً، أوجد قيمة جهد الوجه المتولد وزاوية القدرة.

الحل:

في حالة التشغيل كمحرك نجد أن:

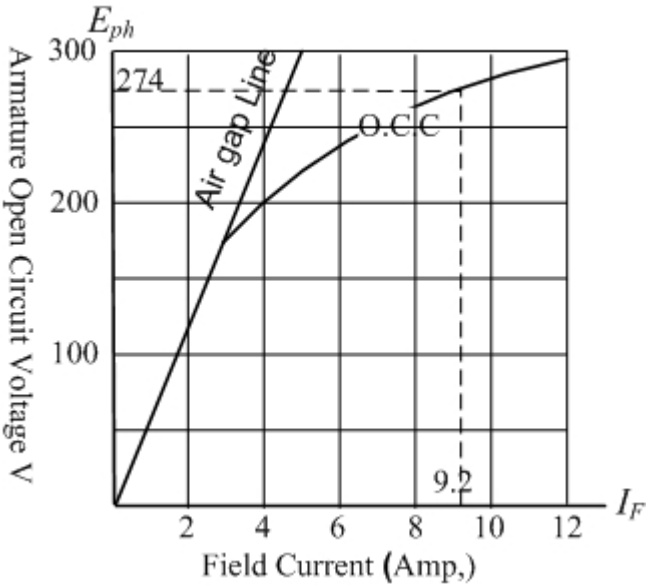
$$E_{ph} = V_{ph} - R_a \cdot I_{ph} - jX_s \cdot I_{ph}$$
$$E_{ph} = V_{ph} - I_{ph} Z_s$$
$$I_{ph} = 350\angle 30^o$$
$$E_{ph} = \frac{2300}{\sqrt{3}}\angle 0^o - \left[(350\angle 30^o)\times(0.1 + j2)\right]$$
$$E_{ph} = 1328\angle 0^o - \left[-318 + j624\right]$$
$$E_{ph} = 1328\angle 0^o + 318 - j624 = 1646 - j624$$
$$E_{ph} = 1760\angle -21^o \quad \text{V}$$

مثال (٢- ١٤):

محرك تزامني ثلاثي الأوجه، موصل نجمة وجهده المقنن٤٠٠ فولت وكفاءته عند الحمل الكامل ٩٠٪ وله ممانعة تزامنية ٣ أوم لكل وجه ومقاومة ملفات المنتج ٠,١٥أوم لكل وجه. وكان المحرك يعمل عند الحمل الكامل بمعامل قدرة متقدماً ٠,٨، الشكل (٢- ٣٨) يبين منحني اللاحمل للآلة عين:

١- زاوية القدرة.

٢- تيار المجال.



الشكل(٢- ٣٨): منحنى اللاحمل للمثال٢- ١٤

الحل:

$$V_{ph} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \quad \text{V}$$

$$\text{The input power} = P_{inp} = \frac{P_{out}}{efficiency} = \frac{15 \times 746}{0.9} = 12433 \quad \text{W}$$

$$I_a = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot (p.f.)} = \frac{12433}{\sqrt{3} \times 400 \times 0.8} = 22.4 \angle 36.87^o \quad \text{A}$$

$$I_{ph} \cdot Z_s = 22.4 \angle 36.87 \times (0.15 + j3) = 22.4 \angle 36.87^o \times 3 \angle 87.13^o \quad \text{V}$$

$$I_{ph} \cdot Z_s = 67.2 \angle 124 = -37.58 + j55.7 \quad \text{V}$$

$$E_{ph} = V_{ph} - I_{ph} \cdot Z_s$$

$$E_{ph} = 231 \angle 0^o - (-37.58 + j55.7) \quad \text{V}$$

$$E_{ph} = 268.58 - j55.7 = 274 \angle -11.7^o \quad \text{V}$$

قيمة E_{ph} تساوي ٢٧٤ فولت وتتأخر بزاوية δ مقدارها (١١,٧درجة) عن V_{ph}.

١- زاوية الحمل δ تساوي ١١,٧ درجة

٢- من منحنى اللاحمل، نجد أن تيار المجال المناظر للجهد ٢٧٤ فولت هو ٩,٢ أمبير.

٢- ١٦ القدرة والعزم في المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه :

عند تحميل المحرك بحمل ميكانيكي فإنة سيسحب قدرة فعالة من مصدر الجهد ، القدرة تعطي من نفس المعادلة(٢- ١٥) المستخدمة في حالة المولد التزامني مع تذكر أن الزاوية δ سالبة ، وبإهمال المفاقيد يمكن اعتبار أن هذه القدرة هي القدرة الميكانيكية المتولدة من المحرك.

المعادلة(٢- ٢١):

$$P = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{X_s} Sin\delta$$

المعادلة (٢- ٢١) توضح أن القدرة الميكانيكية المتولدة من المحرك تزداد مع زيادة زاوية الحمل δ وتصل إلى قيمتها القصوى عندما تصل قيمة δ إلي ٩٠درجة راجع الشكل(٢- ٣٢)

المعادلة(٢- ٢٢):

$$P_{\max} = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{X_s}$$

العزم يتناسب تناسباً مباشراً مع القدرة الميكانيكية المتولدة، ويعطى من المعادلة(٢- ٢٣)

المعادلة(٢- ٢٣):

$$T = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{\omega_s \cdot X_s} Sin\delta$$

$$T_{\max} = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{\omega_s \cdot X_s}$$

مثال (٢- ١٥):

محرك تزامني ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل نجمة قدرته ١٥٠ كيلووات يتغذى من مصدر جهد ثلاثي ٤٦٠ فولت خطي وجهد الوجه المتولد داخل المحرك٣٠٠ فولت. إذا كانت الممانعة التزامنية ٠,٨أوم أوجد :

٤- العلاقة بين القدرة الفعالة وزاوية الحمل. δ.

٥- العلاقة بين العزم وزاوية الحمل. δ.

٦- أقصى عزم يولده المحرك.

الحل:

٤- نوجد العلاقة بين القدرة الفعالة وزاوية الحمل. δ.من المعادلة(٢- ٢١):

$$V_{ph} = V_L / \sqrt{3} = 460 / \sqrt{3} = 266 \quad V$$

$$P = \frac{3 \cdot V_{ph} \cdot E_{ph}}{X_s} Sin\delta$$

$$P = \frac{3 \times 266 \times 300}{0.8} Sin\delta = 300 \times Sin\delta \qquad \text{kw}$$

٥- نوجد العلاقة بين العزم وزاوية الحمل. δ من المعادلة (٢- ٢٣):

٦- نوجد أقصى عزم يولده المحرك أيضاً من المعادلة (٢- ٢٣):

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{300 \times Sin\delta}{2 \cdot \pi \cdot n_s / 60} = \frac{300}{(2 \times \pi \times 1200)/60} Sin\delta$$

$$T = 240 \cdot Sin\delta \qquad \text{Nm}$$

$$\text{Pull-Out torque } = T_{\max} = 240 \qquad \text{Nm}$$

مثال (٢- ١٦):

محرك تزامني ثلاثي الأوجه ذو عضو دائر اسطواني، موصل نجمة وجهده ٢٣٠٠ فولت وله ممانعة تزامنية ٣ أوم لكل وجه ومقاومة ملفات المنتج ٠,٢٥أوم لكل وجه. فإذا كان المحرك يدير حملاً بحيث تكون زاوية القدرة (- ١٥) درجة، بينما ضبط الجهد المتولد E_{ph} ليكون مساوياً في القيمة لجهد الأطراف V_{ph} عين:

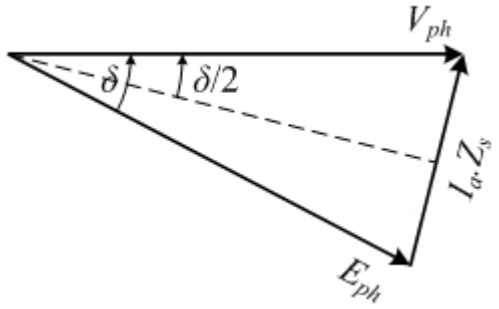
١- تيار المنتج (التيار المسحوب من المصدر).

٢- معامل القدرة.

الحل:

نرسم مخطط المتجهات بحيث يكون $(E_{ph}=V_{ph})$ كما في الشكل(٢- ٣٩) ومنه يمكن استنتاج أن:

$I_a \cdot Z_s = 2 \cdot V \cdot Sin(\delta/2)$	
$E_{ph} = V_{ph} = V = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1328$	V
$Z_s = \sqrt{(0.23)^2 + (3)^2} \approx 3$	Ω
$I_a = \frac{2 \cdot V}{Z_s} Sin(\delta/2) = \frac{2 \times 1328}{3} Sin(7.5^o) = 115.6$	A



الشكل ٢- ٣٩: مخطط المتجهات للمثال ٢- ١٦

بإهمال مقاومة المنتج فإن القدرة تعطى بالعلاقة:

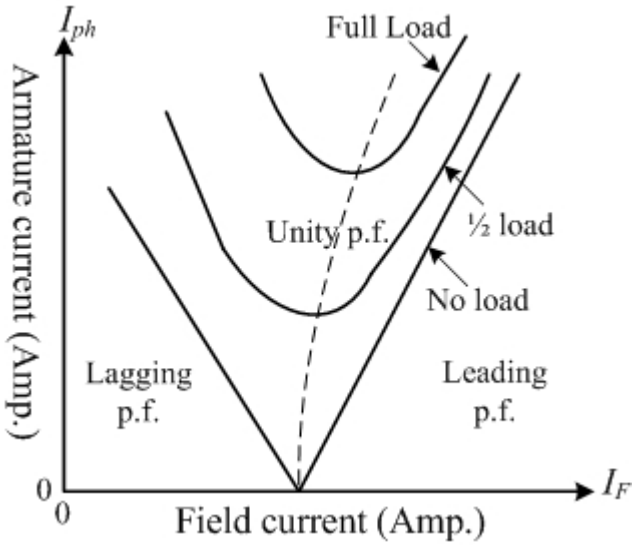
$$P = V_{ph} \cdot I_a \cdot Cos\phi = \frac{V_{ph} \cdot E_{ph}}{X_s} Sin\delta \qquad \text{W}$$

إذن يمكن حساب معامل القدرة من المعادلة السابقة:

$$p.f. = Cos\phi = \frac{E_{ph}}{I_a \cdot X_s} Sin\delta = \frac{1328}{115.6 \times 3} Sin(15) = 0.991 \qquad \text{lagging}$$

٢- ١٧ منحنيات (V) للمحركات التزامنية:

هي مجموعة منحنيات تظهر كيفية تغير تيار المنتج I_{ph} مع تغير تيار المجال I_F ، عند قدرة دخل ثابتة P الشكل (٢- ٤٠)، كل منحنى يمثل قدرة فعالة محددة، في كل منحنى تحدث أقل قيمة لتيار المنتج عندما يكون معامل القدرة مساوياً للواحد وعند هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلكاً للقدرة الفعالة P فقط، وعند أي قيمة أقل من هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلكاً للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى القدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متأخراً، بينما عندما يكون تيار المجال أكبر من هذه القيمة يكون المحرك معطياً للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى استهلاكه للقدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متقدماً في هذه الحالة. هذا يعني أنه يمكننا بالتحكم في تيار المجال أن نجعل المحرك التزامني إما مستهلكاً للقدرة غير الفعالة أو مزوداً للشبكة بالقدرة غير الفعالة، أي أن المحرك التزامني يمكن أن يعمل كأنه ملف أو مكثف.



الشكل ٢- ٤٠ : منحنيات V للمحركات التزامنية

مثال (٢- ١٧):

محرك تزامني ثلاثي الأوجه قدرته ١٠ حصان وكفاءته ٠,٨٥٪، موصل على شكل نجمة ويتغذي من شبكة كهربائية جهدها ٤٠٠ فولت، الممانعة التزامنية ١٠ أوم لكل وجه ومقاومة ملفات المنتج مهملة، احسب أقل قيمة ممكنة لتيار المنتج في حالة الحمل الكامل وقيمة القوة الدافعة الكهربائية العكسية المتولدة(E_{ph}). وارسم مخطط المتجهات للمحرك.

الحل:

قدرة الخرج للمحرك ١٠ حصان، أي ما يعادل ٧، ٤٦ كيلووات:

$$P_{out} = 10 \times 0.746 = 7.47 \quad \text{kw}$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{efficiency} = \frac{7.46}{0.85} = 8.775 \quad \text{kw}$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot Cos\phi$$

أقل قيمة ممكنة لتيار المنتج عند أي حمل تحدث عندما يكون معامل القدرة واحداً.

$$I_L = I_{ph} = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot Cos\phi} = \frac{8775}{\sqrt{3} \times 400 \times 1} = 12.67\angle 0^o \quad \text{A}$$

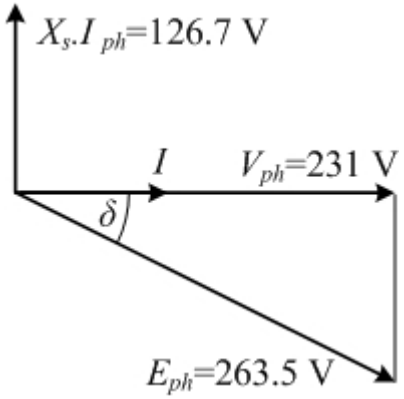
تحسب قيمة E_{ph} من:

$$E_{ph} = V_{ph} - jX_s \cdot I_{ph}$$

$$E_{ph} = \left(400/\sqrt{3}\right) - \left(10\angle 90^o\right) \cdot \left(12.67\angle 0^o\right)$$

$$E_{ph} = 231 - 126.7\angle 90 = 263.5\angle -28.74^o \quad \text{V}$$

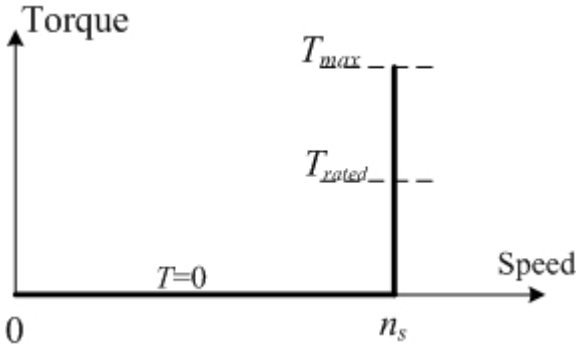
قيمة E_{ph} ٢٣٦,٥ فولت وتتأخر بزاوية δ مقدارها (٢٨,٧٤درجة) عن V_{ph} ، مخطط المتجهات كما في الشكل(٢- ٤١)



الشكل ٢- ٤١ :مخطط المتجهات للمثال(٢- ١٧)

٢- ١٨ علاقة العزم / السرعة للمحركات التزامنية :

المحرك التزامني يستخدم ليدير أحمالاً تتطلب سرعة ثابتة ويتم تغذيته من مصدر كهربائي بحيث يظهر المصدر بالنسبة للمحرك كأنه قضيب لا نهائي، هذا يعني أن الجهد والتردد لا يتغيران مهما تغيرت القدرة المسحوبة من المصدر بواسطة المحرك، و بما أن سرعة المحرك مرتبطة بتردد المصدر فهذا يعني أن سرعة المحرك لن تتغير مهما تغير الحمل المسلط عليه ما دام أنه لم يتخط الحمل الأقصى (العزم الأقصى) للمحرك، وعليه سرعة المحرك ستبقى ثابتة عند السرعة التزامنية مهما تغير عزم الحمل ابتداء من الصفر وحتى العزم الأقصى(T_{max}) للمحرك كما هو موضح في الشكل(٢- ٤٢):



الشكل ٢- ٤٢ : علاقة العزم/السرعة للمحركات التزامنية

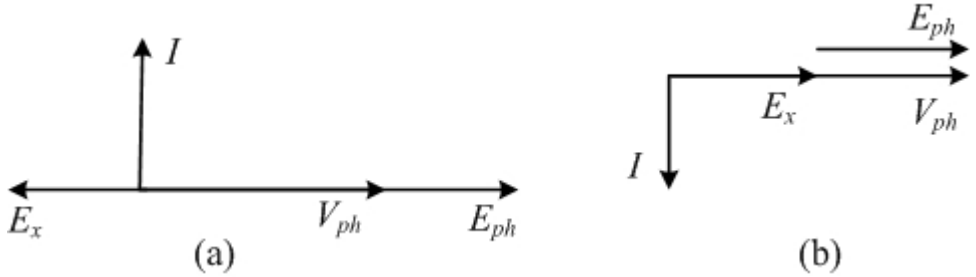
٢- ١٩ استخدامات المحركات التزامنية:

تستخدم المحركات التزامنية فقط في التطبيقات التي يكون فيها ثبات السرعة مطلب أساسياً، وفي حالة كون ثبات السرعة ليس مطلباً أساسياً فيستغني عن المحرك التزامني بغيره نظراً لارتفاع ثمنه واحتياجه صيانة وإلى تيار مجال وطرق لبدء حركته، ومن أشهر تطبيقاتها استخدامها كمكثفات تزامنية Synchronous Condenser

المكثف التزامني: The Synchronous Condenser:

من التطبيقات الهامة للمحركات التزامنية استخدامها كمكثفات تزامنية وذلك من أجل تحسين معامل القدرة، والمكثف التزامني هو عبارة عن محرك تزامني يدور بدون حمل ولهذا الغرض يصنع المحرك بدون عمود خارج منه. الوظيفة الأساسية للمكثف التزامني هي أن يعطي أو يأخذ قدرة غير فعالة إلى الشبكة الكهربائية الموصل معها لتغيير معامل القدرة.

لكي يعمل المحرك التزامني كمكثف يدار أولا بدون حمل ثم يزاد تيار المجال بحيث يكون الجهد المتولد داخل المحرك E_{ph} أكبر من جهد الشبكة V_{ph} وتكون الزاوية بينهما صفراً(δ=0)، ويصنع الفرق بينهما E_x (E_x=V_{ph}-E_{ph}) زاوية ١٨٠ مع كل منهما، وحيث أن التيار I يتأخر بزاوية ٩٠ درجة عن E_x فسيكون متقدماً بزاوية مقدارها ٩٠ درجة عن V_{ph} كما هو موضح في الشكل (٢- ٤٣a)، وبما أن التيار متقدم عن جهد الشبكة V_{ph} ب٩٠ درجة، فيظهر المحرك على الشبكة كأنه مكثف فلذلك يسمي بالمكثف التزامني. كلما ازداد تيار المجال تزداد بالتبعية قيمة E_{ph}، فتزداد أيضاً قيمة E_x وبالتالي قيمة التيار I، فتعمل الآلة كمكثف يمد الشبكة الكهربائية بالقدرة غير الفعالة، ويمكن التحكم في سعة المكثف بواسطة التحكم في تيار المجال.



الشكل ٢- ٤٣: مخطط المتجهات للآلة التزامنية أثناء عملها كمكثف تزامني

في بعض الحالات عندما يكون معامل القدرة على الشبكة متقدماً أي أن يكون الحمل سعوياً، فلتصحيحه يجب أن يعمل المحرك التزامني كمحاثة تمتص قدرة غير فعالة من الشبكة لتصحيح معامل

القدرة. من أجل ذلك يخفض تيار المجال بحيث يكون الجهد المتولد داخل المحرك E_{ph} أصغر من جهد الشبكة V_{ph} ويكون الفرق بينهما E_x $(E_x = V_{ph} - E_{ph})$ منطبقاً مع V_{ph}، وحيث أن التيار I يتأخر بزاوية ٩٠ درجة عن E_x فسيكون متأخراً أيضاً بنفس الزاوية عن V_{ph} كما هو موضح في الشكل (٢- ٤٣b)، أي أن المحرك يعمل كمحاثة تأخذ قدرة غير فعالة من الشبكة.

المكثفات التزامنية الموجودة في الحياة العملية تتراوح قدرتها من ٢٠ إلى ٢٠٠ كيلو فولت أمبير، والكثير منها يتم تبريده بواسطة الهيدروجين. وتبدأ الآلة حركتها كمحرك تزامني، وسيتم توضيح ذلك عند الحديث عن طرق بدء حركة المحركات التزامنية.

مثال (٢- ١٨):

مكثف تزامني ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل نجمة قدرته ١٦٠ميجافولت أمبير موصل مع مصدر جهد ثلاثي ١٦كيلوفولت خطي، .إذا كانت الممانعة التزامنية ١,٢٨ أوم أوجد قيمة الجهد المتولد داخل الآلة E_{ph} (القوة الدافعة الكهربية العكسية) من أجل أن الآلة:

١- تعطي الشبكة قدرة غير فعالة ١٢٠ميجافولت أمبير

٢- تأخذ من الشبكة قدرة غير فعالة ١٦٠ميجافولت أمبير

الحل:

١- تيار الخط لقدرة غير فعالة ١٦٠ميجافولت أمبير:

$$I = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{120 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 16000} = 4335 \quad \text{A}$$

$$V_{ph} = V_L / \sqrt{3} = 16000 / \sqrt{3} = 9250 \angle 0 \quad \text{V} \qquad \text{جهد الوجه}$$

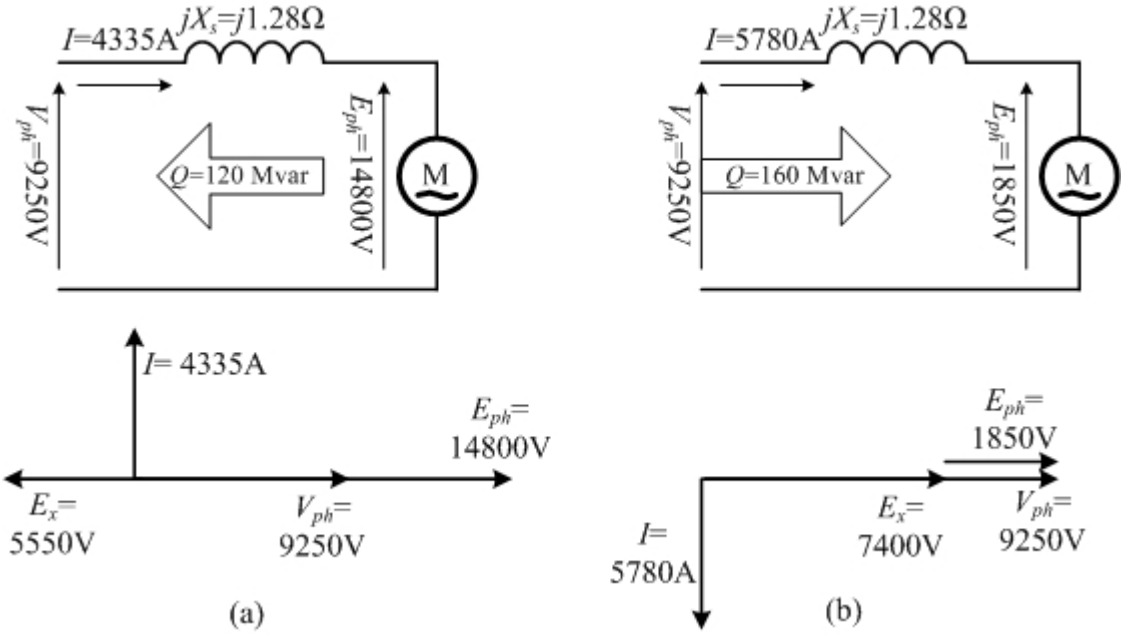
حيث إن الآلة تعطي الشبكة قدرة غير فعالة فإن التيار I يكون متقدما عن الجهد V_{ph} ب ٩٠درجة، إذا:

$$I = 4335 \angle 90 \quad \text{A}$$
$$E_x = I \cdot jX_s = 4335 \angle 90 \times 1.28 \angle 90 = 5550 \angle 180 \quad \text{V}$$

يمكننا إيجاد E_{ph} ما يلي:

$$E_{ph} = V_{ph} - jI \cdot X_s = V_{ph} - E_x$$
$$E_{ph} = 9250 \angle 0 - (4335 \angle 90 \times 1.28 \angle 90)$$
$$E_{ph} = 9250 \angle 0 - (5550 \angle 180) = 14800 \angle 0 \quad \text{V}$$

لاحظ أن قيمة E_{ph} أكبر بكثير عن قيمة V_{ph} الشكل(٢- ٤٤a)



الشكل ٢- ٤٤ حل مثال(٢- ١٨)

٢- تيار الخط لقدرة غير فعالة ١٦٠ميجافولت أمبير:

$$I = \frac{Q}{\sqrt{3}\cdot V_L} = \frac{160\times10^6}{\sqrt{3}\times16000} = 5780 \quad \text{A}$$

حيث إن الآلة تأخذ من الشبكة قدرة غير فعالة فإن التيار I يكون متأخراً عن الجهد V_{ph} ٩٠درجة، إذا:

$$I = 5780\angle -90 \quad \text{A}$$
$$E_x = I\cdot jX_s = 5780\angle -90\times1.28\angle90 = 7400\angle0 \quad \text{V}$$

$$E_{ph} = V_{ph} - jI\cdot X_s$$
$$E_{ph} = 9250\angle0 - (5780\angle -90\times1.28\angle90)$$
$$E_{ph} = 9250\angle0 - (7400\angle0) = 1850\angle0 \quad \text{V}$$

لاحظ أن قيمة E_{ph} أقل كثيراً عن قيمة V_{ph} (٢- ٤٤b)

٢- ٢٠ طرق بدء حركة المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه :

المحرك التزامني لا يبدأ الحركة من تلقاء نفسه، لأن العزم التزامني لا يظهر إلا عند دوران العضو الدائر بسرعة التزامن، لذا لزم استخدام عدة طرق لبدء حركته حتى وصول المحرك لسرعة التزامن ومن هذه الطرق:

أ- استخدام محرك خارجي

يدار المحرك التزامني بواسطة محرك صغير (pony motor)يركب على نفس العمود حتى تصل السرعة إلى السرعة التزامنية، ثم تغذى ملفات المجال بالتيار المستمر فيظهر عزم الدوران التزامني ويفصل محرك البدء، مما يجعل المحرك يحافظ على السرعة التزامنية مهما تغير الحمل ضمن الحمل المقنن.

ب- استخدام قضبان إخماد

يتم تركيب مجموعة من القضبان في أحذية الأقطاب (في الآلات ذات العضو الدائر ذي الأقطاب البارزة) ثم تقصر هذه القضبان بحلقات نحاسية من الجهتين بحيث تكون ما يشبه القفص السنجابي في المحركات الحثية، في هذه الحالة وعند توصيل التيار الكهربائي يبدأ المحرك في الدوران على أساس أنه محرك حثي وعندما تصل السرعة إلى قرب السرعة التزامنية تغذى ملفات المجال بالتيار المستمر، عندها يتكون مجال مغناطيسي دوار آخر يؤدي وجوده مع المجال الناتج من العضو الثابت إلى نقل المحرك إلى السرعة التزامنية فيتلاشى تأثير القضبان لأن التيارات المارة بها عند السرعة التزامنية تساوي صفراً، يكون العزم الناتج في هذه الحالة هو عزم المحرك التزامني وليس الحثي، يستمر المحرك في الدوران بالسرعة التزامنية مهما تغير الحمل ضمن الحمل المقنن.

ت- استخدام العضو الدائر الملفوف

في هذه الطريقة يكون العضو الدائر للمحرك التزامني مشابهاً تماماً للعضو الدائر للمحرك الحثي ذي العضو الدائر الملفوف (راجع الوحدة الأولى من هذه الحقيبة التدريبية)، يبدأ المحرك حركته كمحرك حثي بعزم بدء حركة كبير وذلك بتوصيل ثلاث مقاومات خارجية متغيرة إلى حلقات الانزلاق، فعند تلاشي المقاومات الخارجية واقتراب سرعة المحرك من سرعة التزامن يتم تغذية ملفات العضو الدائر بالتيار المستمر فيدخل في التزامن مع المجال المغناطيسي الدوار للعضو الثابت ويحافظ المحرك على سرعة التزامن عند أي حمل ما لم يتخط الحمل الأقصى للمحرك حيث يفقد التزامن. ويسمي المحرك في هذه الحالة بالمحرك الحثي التزامني (synchronous-induction motor).

ث- استخدام ظاهرة التيارات الدوامية:

الآلات ذات العضو الدائر الاسطواني حيث يصنع العضو الدائر من حديد مصمت بدون قضبان إخماد، تبدأ حركتها نتيجة للعزم المتولد من تأثير التيارات الدوامية المتولدة في العضو الدائر المصمت، فعندما يتسارع العضو الدائر تحت تأثير هذا العزم وتصل سرعته قرب السرعة التزامنية يتم تغذية ملفاته بالتيار المستمر فيدخل في التزامن مع المجال المغناطيسي الدوار للعضو الثابت، وعندئذ ستتلاشى التيارات الدوامية ويحافظ المحرك على سرعة التزامن عند أي حمل ما لم يتخط الحمل الأقصى للمحرك، هذه الطريقة مناسبة للمحركات التزامنية الصغيرة

ج- استخدام مصدر جهد متغير التردد

يمكن بدء دوران المحرك التزامني بسهولة إذا كان يتغذى من مصدر جهد متغير التردد والذي بدأ ينتشر في السنوات الأخيرة بفضل التقدم في تقنية إلكترونيات القوي وذلك بخفض التردد إلى أن تصبح سرعة المجال المغناطيسي الدوار بطيئة جداً بحيث يتمكن العضو الدائر من أن يتبعه، وعندما يبدأ العضو الدائر في الدوران، يرفع التردد تدريجياً حتى يصل المحرك إلى السرعة المطلوبة، فيستمر العضو الدائر في الدوران بنفس سرعة المجال المغناطيسي ما لم يفقد التزامن.

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

أسـئلة وتمـارين:

١- كيف تعمل المحركات التزامنية؟

٢- لماذا لا تستطيع المحركات التزامنية بدء حركتها من تلقاء نفسها؟

٣- لماذا يجب قصر ملفات المجال أثناء عملية بدء حركة المحركات التزامنية؟

٤- كيف يمكن تغيير معامل القدرة في المحركات التزامنية دون حدوث تغير في القدرة الخارجة منها؟

٥- متى يفضل استخدام المحركات التزامنية على الحثية؟

٦- متى يفقد المحرك التزامني تزامنه مع الشبكة الكهربائية؟ وماذا يحدث له حينئذ؟

٧- ما وظيفة المكثف التزامني؟

٨- كيف يعمل المكثف التزامني؟

٩- يعمل محرك متزامن عند نصف الحمل، وبسبب زيادة تيار المجال تناقص تيار المنتج. هل كان تيار المنتج متقدماً أو متأخراً عن الجهد قبل حدوث التغير في تيار المجال؟ حقق إجابتك.

الإجابة: (متأخراً).

١٠- محرك متزامن ذو عضو دائر اسطواني موصل علي شكل نجمة وجهده ٤٠٠ فولت يعمل بمعامل قدرة واحد عندما كان يعطي قدرة (ميكانيكيه) ٦٠ كيلووات. فإذا كانت ممانعة التزامن ١ أوم ومقاومة المنتج مهملة احسب ١- الجهد المتولد لكل وجه E_{ph}. ٢- زاوية القدرة δ.

الإجابة:١- (٢٤٦,٦ فولت) ٢- (- ٢٠,٥درجة)

١١- محرك تزامني ملفاته موصلة على شكل نجمة ويتغذي من مصدر جهده الخطي ٣٦٠ فولت وتردده ٥٠ هيرتز والممانعة التزامنية له ٢,١ أوم ومقاومة ملفات المنتج مهملة والمفاقيد الحديدية ٩٦٠ وات و مفاقيد الاحتكاك ١٤٢٠ وات ويدير حملاً قدره ١١ كيلووات بمعامل قدره ٠,٨ متقدماً، أوجد ما يلي:

أ - ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

ب- أوجد قيم E_{Ph}، I_{Ph}، I_{Line}

جـ- العلاقة بين القدرة الفعالة P وزاوية الحمل δ.

د- العلاقة بين العزم T وزاوية الحمل δ.

هـ- أقصي عزم يولده المحرك T_{max}.

١٢- محرك تزامني ملفاته موصلة على شكل دلتا ويغذى من مصدر جهده٤٨٠ فولت والمقاومة التزامنية له ١ أوم ومقاومة ملفات المنتج مهملة والمفاقيد الحديدية ومفاقيد الاحتكاك مهملة. إذا كان المحرك يدير حملاً قدره ٤٠٠ حصان عند معامل قدره ٠، ٨٥ متقدماً أوجد ما يلي:

أ- قيمة وزاوية كل من E_{Ph} ، I_{Ph}

ب- العلاقة بين القدرة الفعالة P وزاوية الحمل δ.

جـ- العلاقة بين العزم T وزاوية الحمل δ.

د- أقصي عزم يولده المحرك T_{max}.

١٣- محرك تزامني ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل نجمة قدرته ٢٠٠ كيلووات يتغذي من مصدر جهد ثلاثي ٣٨٠ فولت خطي وجهد الوجه المتولد داخل المحرك٢٤٠ فولت. إذا كانت المانعة التزامنية ١ أوم اوجد:

أ- العلاقة بين القدرة الفعالة P وزاوية الحمل δ.

ب- العلاقة بين العزم T وزاوية الحمل δ.

جـ- أقصي عزم يولده المحرك T_{max}.

١٤- مكثف تزامني ثلاثي الأوجه ملفاته موصلة على شكل دلتا قدرته ١٤٠ ميجافولت أمبير موصل مع مصدر جهد ثلاثي ١٦ كيلوفولت خطي، .إذا كانت المانعة التزامنية ١,٢٥ أوم أوجد قيمة الجهد المتولد داخل الآلة E_{ph} (القوة الدافعة الكهربية العكسية) من أجل أن الآلة:

ا- تعطي الشبكة قدرة غير فعالة ١٠٠ ميجافولت أمبير.

ب- تأخذ من الشبكة قدرة غير فعالة ١٤٠ ميجافولت أمبير.

المراجع

- Electric Machinery Fundamentals, *Stephen J. Chapman, McGraw-Hill, 1991*.
- An Introduction to Electrical Machines and Transformers, *George McPherson, John Wiley & Sons, 1981*.
- Electrical Technology, *B. L. Theraja and A. K. Theraja, Nirja Construction & Development, 1989.*
- Electrical Technology , *Edward Hughes*, *ISBN:0-07-02134-5*
- Electric Machines *G. R. Slemon and A. Straughan, Eddison-Weslley, 1980*
- Electrical Machines and Transformers-Principles and applications, *P. F. Ryff, D. Platnick, and J. A. Karnas, Printice Hall*
- Electric Machinery, *M. S. Sarma, West Publishing Company*, 1994

الفهرس

Induction Motors ٣

المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : Three Phase Induction Motors ٣

تمهيد : ٣

١- ١- تركيب المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : ٤

١- ١- ١ تكوين العضو الثابت ٤

١- ١- ٢ تكوين العضو الدائر: ٥

أ- العضو الدائر ذو حلقات الانزلاق: ٥

ب- العضو الدائر ذو القفص السنجابي: ٦

١- ٢ كيفية تكوين المجال المغناطيسي الدوار: ٧

١- ٣ كيفية عمل المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : ١٠

١- ٤ الانزلاق: ١١

١- ٥ تردد الجهود والتيارات في العضو الدائر: ١٢

أسـئلة و تمارين : ١٥

١- ٦ الدائرة المكافئة للمحركات الحثية ثلاثية الأوجه : The Equivalent Circuit ١٨

١- ٦- ١ تعيين ثوابت الدائرة المكافئة للمحركات الحثية ثلاثية الأوجه : ٢١

أ- اختبار اللاحمل (اختبار الدائرة المفتوحة): No Load Test or Open Circuit Test: ٢٢

ب- اختبار عدم الحركة (اختبار دائرة القصر): ٢٤
Locked Rotor Test (or Short Circuit Test):

ج- اختبار التيار المستمر: Dc Test: ٢٥

أسـئلة و تمارين : ٢٩

١- ٧ القـدرة و العـزم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : ٣١

١- ٧ - ١القدرة في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : ٣١

١- ٧- ٢ العـزم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : ٣٧

١- ٧- ٢- ١ التحكم في قيمة الانزلاق الذي يحدث عنده العزم الأقصى (s_m) : ٣٩

أسـئلة وتمارين : ٤٦

١- ٨ طرق بدء الحركة والتحكم في سرعة المحركات الحثية ثلاثية الأوجه : ٥٢
١- ٨- ١ طرق بدء الحركة : ٥٢
١- ٨- ١- ١ توصيل مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الثابت: ٥٢
١- ٨- ١- ٢ باستخدام محول ذاتي: (Auto-Transformer): ٥٣
١- ٨- ١- ٣ باستخدام مفتاح نجمة دلتا : ٥٤
١- ٨- ١- ٤ إضافة مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الدائر: ٥٤
١- ٨- ١- ٥ باستخدام أجهزة بدء إلكترونية: ٥٥
١- ٨- ٢ التحكم في السرعة : ٥٥
١- ٨- ٢- ١ تغيير الانزلاق باستخدام مقاومة ثلاثية على التوالي مع ملفات العضو الدائر: ٥٦
١- ٨- ٢- ٢ تغيير عدد الأقطاب: ٥٦
١- ٨- ٢- ٣ تغيير تردد المصدر: ٥٧
أسـئلة وتمـارين : ٥٨

المحركات الحثية أحادية الوجه

١- ٩ المحركات الحثية أحادية الوجه : Single Phase Induction Motors ٦٠
١- ٩- ١- التركيب: ٦٠
١- ٩- ٢ نظرية المجال المغناطيسي المزدوج الدوار: ٦٠
١- ٩- ٣ طرق البدء ومنحنيات الخواص للمحركات الحثية أحادية الوجه : ٦٤
١- ٩- ٣- ١المحرك المشطور الوجه: (Split-Phase Motor) ٦٤
١- ٩- ٣- ٢ المحركات ذات المكثفات: (Capacitor Motors) ٦٧
ت. المحرك ذو مكثف البدء: ٦٧
ث. المحرك ذو المكثف الدائم: (Permanent-Capacitor Motor.) ٦٩
ج. ذو المكثفين: (Two-Values Capacitor Motor.) ٧٠
ح. المحرك ذو الوجه المظلل: (Shaded-Pole Motor) ٧٢
اختبار ذاتي: ٧٤
أسئلة وتمارين: ٧٦

الآلات التزامنية		٧٩
المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه		٧٩
تمهيد :		٧٩
٢- ١ تركيب الآلات التزامنية ثلاثية الأوجه :		٨٠
٢- ١- ١ العضو الثابت:		٨٠
٢- ١- ٢ العضو الدائر:		٨١
أ- عضو دائر ذو أقطاب بارزة	Salient Pole Rotor	٨١
ب- عضو دائر اسطوا ني	Cylindrical Rotor	٨٣
٢- ٢ طرق تبريد الآلات التزامنية :		٨٤
٢- ٣ كيفية عمل المولدات التزامنية :		٨٥
٢- ٤ الدائرة المكافئة للآلات التزامنية :		٨٦
٢- ٥ رد فعل المنتج :	**Armature Reaction**	٨٧
٢- ٦ مخطط المتجهات للآلات التزامنية :	**Phasor Diagram**	٩٠
٢- ٧ اختبارات الآلات التزامنية :		٩١
أ- اختبار اللاحمل (اختبار الدائرة المفتوحة):	Open Circuit Test	٩٢
ب- اختبار القصر:	Short Circuit Test	٩٣
٢- ٨ حساب الممانعة التزامنية باستخدام منحنيي الدائرة المفتوحة ودائرة القصر:		٩٦
٢- ٩ معامل تنظيم الجهد :	**Voltage Regulation:**	٩٧
٢- ١٠ تشغيل المولدات التزامنية على التوازي:		١٠٧
مميزات تشغيل المولدات على التوازي		١٠٧
شروط توصيل المولدات على التوازي		١٠٧
٢- ١١ كيفية توزيع الأحمال بين المولدات التزامنية الموصلة على التوازي:		١٠٨
٢- ١٢ توصيل المولدات التزامنية إلى قضبان لا نهائية :		١١٢

أ- طريقة المصابيح المضيئة: ١١٢
ب- باستخدام جهاز التزامن (السينكروسكوب): (Synchroscope) ١١٤
٢- ١٣ القدرة والعزم في الآلات التزامنية: ١١٦
أسئلة وتمارين: ١٢١
المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه ١٢٦
٢- ١٤ تركيب المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه: ١٢٦
٢- ١٥ كيفية عمل المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه: ١٢٦
٢- ١٦ القدرة والعزم في المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه: ١٣٢
٢- ١٧ منحنيات (V) للمحركات التزامنية: ١٣٤
٢- ١٨ علاقة العزم / السرعة للمحركات التزامنية: ١٣٦
٢- ١٩ استخدامات المحركات التزامنية: ١٣٧
أ- المكثف التزامني: The Synchronous Condenser: ١٣٧
٢- ٢٠ طرق بدء حركة المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه: ١٤٠
أ- باستخدام محرك خارجي: ١٤٠
ب- باستخدام قضبان إخماد: ١٤٠
ت- باستخدام العضو الدائر الملفوف: ١٤٠
ث- باستخدام ظاهرة التيارات الدوامية: ١٤١
ج- باستخدام مصدر جهد متغير التردد: ١٤١
أسـئلة وتمـارين: ١٤٢
المراجع ١٤٤