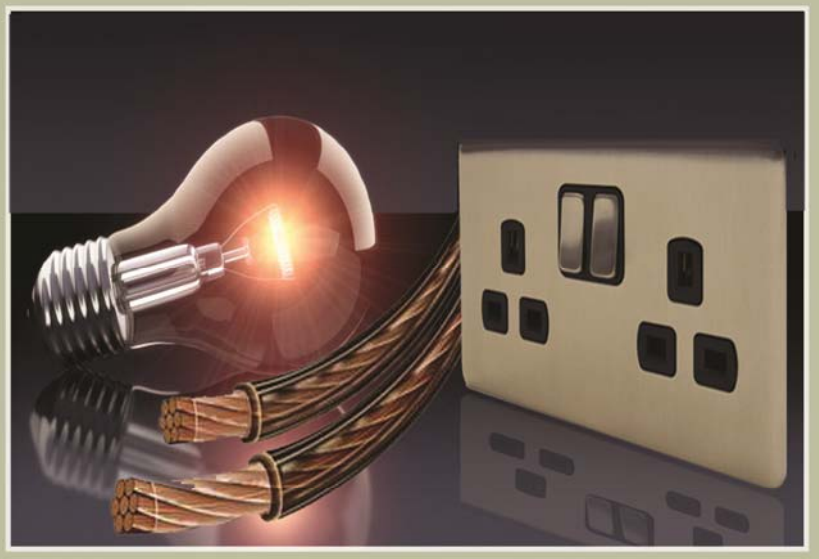
المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

الكليات التقنية

الحقيبة التدريبية :

آلات التيار المتردد (نظري)

في تخصصات
الآلات والمعدات الكهربائية
والقوى الكهربائية و مشغل لوحة التحكم



مقدمة

الحمد لله وحده،والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد بن عبدالله 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 الله ثم 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 تخصصات " **الآلات والمعدات الكهربائية والقوى الكهربائية ومشغل لوحة تحكم** " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجلً أن تسهم بالشكل المباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، مدعم 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

الفهـــرس

الموضـــوع	رقم الصفحة
مقدمة	2
الفهرس	3
تمهيد	7
الوحدة الأولى : المحركات الحثية ثلاثية الأوجه	8
الفصل الأول : التركيب و نظرية العمل	10
تمهيد	10
تركيب المحرك الحثي	10
المجال المغناطيسي الدوار	14
كيفية عمل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه	17
مفهوم الانزلاق	18
تردد الجهود و التيارات في العضو الدوار	19
أمثلة محلولة	20
أسئلة و تمارين	22
الفصل الثاني : الدائرة المكافئة لكل وجه	23
تعيين ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية	27
اختبار اللاحمل	27
اختبار عدم الحركة	28
اختبار التيار المستمر	30
أمثلة محلولة	32
أسئلة و تمارين	36

الموضـــوع	رقم الصفحة
الفصل الثالث : القدرة و العزم	38
أولا : القدرة في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه	38
أمثلة محلولة	43
ثانيا : العزم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه	45
التحكم في موضع العزم الأقصى	48
أمثلة محلولة	52
أسئلة و تمارين	55
الفصل الرابع : طرق بدء الحركة و التحكم في السرعة	58
طرق بدء الحركة	59
التحكم في السرعة	66
أسئلة و تمارين	70
الوحدة الثانية : المحركات الحثية أحادية الوجه	72
التركيب	74
نظرية المجال المغناطيسي المزدوج الدوار	74
طرق البدء و منحنيات الخواص للمحركات الحثية أحادية الوجه	78
المحرك المشطور الوجه	78
المحركات ذات المكثفات	82
المحرك ذو مكثف البدء	82
المحرك ذو المكثف الدائم	84

الموضـــوع	رقم الصفحة
المحرك ذو المكثفين	85
المحرك ذو الوجه المضلل	87
أسئلة و تمارين	89
الوحدة الثالثة : المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه	90
الفصل الأول : التركيب و نظرية العمل و الدائرة المكافئة و منحنيات الخواص	92
تركيب الآلة التزامنية ثلاثية الأوجه	92
كيفية عمل المولد التزامني	95
الدائرة المكافئة لكل وجه للمولد التزامني ثلاثي الأوجه	96
المخطط الإتجاهي للمولد التزامني ثلاثي الأوجه	100
اختبارات المولد التزامني	101
حساب الممانعة التزامنية باستخدام منحنيات الدائرة المفتوحة و المقصورة	104
معامل تنظيم الجهد	105
أسئلة و تمارين	106
الفصل الثاني : مخطط توزيع القدرة – التشغيل على التوازي	107
مخطط توزيع القدرة في الآلة التزامنية	107
تشغيل المولدات التزامنية على التوازي	110
توصيل المولدات التزامنية الى قضبان لا نهائية	111
أمثلة محلولة	114
أسئلة و تمارين	122

الموضـــوع	رقم الصفحة
الوحدة الرابعة : المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه	124
التركيب	126
كيفية عمل المحرك التزامني	127
طرق بدء حركة المحرك التزامني	128
منحنيات (V) للمحرك التزامني	129
منحنى العزم مع السرعة للمحرك التزامني	130
استخدامات المحرك التزامني	131
المكثف التزامني	131
سلوك المحرك التزامني في حالة تغيير الحمل مع ثبات تيار المجال	132
سلوك المحرك التزامني في حالة تغيير تيار المجال	136
أسئلة و تمارين	141
المراجع	143

تمهيد

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

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

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

الوحدة الأولى

المحركات الحثية ثلاثية الأوجه

الهدف العام للوحدة: الإلمام الشامل بتركيب ونظرية العمل وأداء المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

الأهداف التفصيلية:

1- أن يلم المتدرب بأنواع وتركيب المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

2- أن يلم المتدرب بكيفية توليد المجال المغناطيسي الدوار في هذه المحركات.

3- أن يفهم المتدرب نظرية عمل المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

4- أن يتمكن المتدرب من بخواص المحركات الحثية ثلاثية الأوجه وطبيعة عملها.

5- أن يلم المتدرب بطرق عكس اتجاه دوران المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

6- أن يتمكن المتدرب من إجراء الاختبارات الروتينية على هذه المحركات.

7- أن يتمكن المتدرب من حساب ثوابت الدائرة المكافئة لهذه المحركات.

8- أن يفهم المتدرب المنحنيات الخاصة بأداء هذه المحركات.

9- أن يتمكن المتدرب من إجراء الحسابات المتعلقة بهذه المحركات مثل حساب القدرة والعزم

والكفاءة .

10- أن يلم المتدرب بطرق بدء الحركة للمحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

11- أن يلم المتدرب بكيفية تغيير سرعة دوران المحركات الحثية ثلاثية الأوجه.

الوحدة الأولى : المحركات الحثية ثلاثية الأوجه

الفصل الأول : التركيب ونظرية العمل

تمهيد :

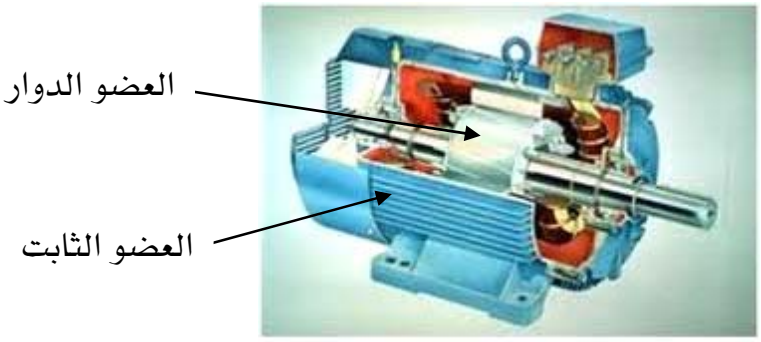
المحرك الحثي ثلاثي الأوجه الذي قام باختراعه نيكولا تسلا عام 1886م يعتبر المحرك الأكثر انتشاراً في عالم الصناعة اليوم، ويقدر أن في مصانع أمريكا وحدها ما يزيد عن خمسين مليون محرك من هذا النوع تعطي جميعها ما مقداره 150 مليون حصان (1hp=746W)، ويعتقد أن هذا العدد يزداد بما يقارب مليون محرك كل عام .

هذا الانتشار الواسع لهذا المحرك جاء نتيجةً لما يتمتع به من مزايا مثل: المتانة و بساطة التركيب ، و قلة الصيانة و انخفاض الثمن مقارنة بالمحركات الأخرى. كما أنه يتوفر بقدرات تتراوح من جزء من الحصان إلى أكثر من 10000 حصان ولا يحتاج إلى أي وسيلة إثارة بالإضافة إلى كفائتة العالية إذ أن مميزات تشغيله حسنة ومرضية في الأعمال التي لا تتطلب تغيراً في السرعة.

ومما يعيب هذا المحرك أنه ليس من السهل التحكم في سرعته كما أن تيار البدء لهذا المحرك عالٍ (6-8 أضعاف تيار الحمل الكامل) وكذلك معامل القدرة منخفض عند الأحمال الخفيفة. ولكننا نجد أن مميزات هذا المحرك تفوق عيوبه في معظم التطبيقات الصناعية كما أنه وجد حديثاً وسائل تحكم إلكترونية أدت إلى التغلب على هذه العيوب.

تركيب المحرك الحثي :

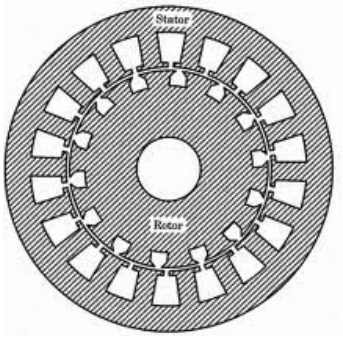
المحرك الحثي ثلاثي الأوجه Three Phase Induction Motor يتركب من عضوين رئيسين كأي محرك آخر: هما العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor ، انظر الشكل (1-1).



الشكل (1-1): مقطع في محرك حثي

العضو الثابت:

يتكون العضو الثابت من شرائح متراصة من الحديد المغناطيسي يتراوح سمكها من 0.3 مم إلى 0.6 مم حسب حجم المحرك ، ومعزولة عن بعضها بعازل كهربائي بحيث تكون مع بعضها جسماً أسطوانياً محفوراً بداخله عدد من المجاري وذلك لتركيب الملفات ، انظر الشكل (2-1).

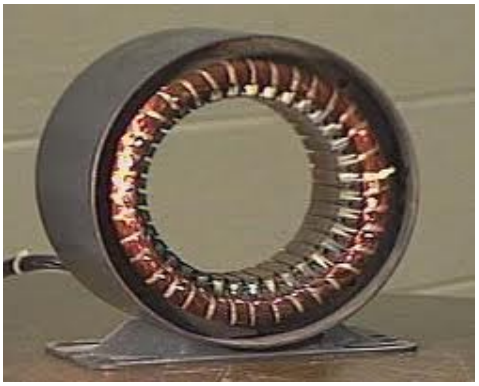


الشكل (2-1): شريحة عضو ثابت

الهدف من تصنيع العضو الثابت بهذه الطريقة هو تقليل حرارة الحديد الناتجة عن التيارات الدوامية التي تتكون بسب تعر ض الحديد للمجال المغناطيسي المتغير داخل المحرك ، كما أنه يوجد في المحركات الكبيرة عادةً فتحات تهوية بين الشرائح في العضو الثابت. بعد اكتمال تصنيع العضو الثابت يتم تقسيمه إلى العدد المطلوب من الأقطاب وتقسم المجاري تحت كل قطب على الأوجه الثلاثة ثم بعد ذلك يتم تركيب ملفات كل وجه في المجاري الخاصة بها

تحت كل قطب بحيث يفصل بين كل وجه وآخر 120^{o} كهربائية وفي نهاية عملية اللف يكون قد تم تركيب ثلاثة ملفات في العضو الثابت لكل ملف طرفان.

من خلال هذه الأطرف الستة يتم تغذية العضو الثابت بعد توصيلها إما على شكل نجمة أو دلتا ، انظر الشكل (3-1).



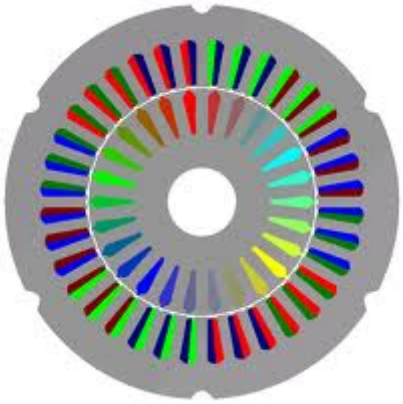
الشكل (3-1): عضو ثابت مكتمل لمحرك صغير

العضو الدوار:

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

العضو الدوار الملفوف (ذو حلقات الانزلاق):

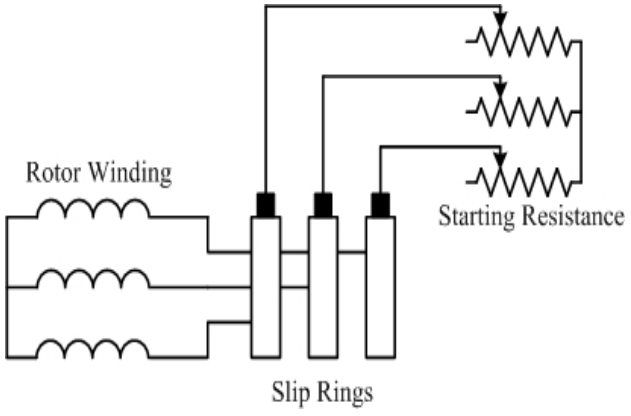
العضو الدوار الملفوف Wound Rotor يتركب من شرائح متراصة من الحديد المغناطيسي معزولة عن بعضها البعض مركبة على عمود المحرك ومحفور عليها عدد من المجاري لتركيب الملفات ، انظر الشكل (4-1).



الشكل (1-4): شريحة العضو الدوار

يقسم العضو الدوار إلى عدد من الأقطاب مساوٍ لأقطاب العضو الثابت الذي سيركب فيه وتقسم المجاري في كل قطب إلى ثلاثة أقسام كل قسم يركب فيه ملفات أحد الأوجه الثلاثة بحيث يكون بين كل وجه وآخر 120^{o} كهربائية ، عادةً هذه الملفات الثلاثة توصل على شكل نجمة حيث تقصر ثلاثة أطراف مع بعضها البعض داخل العضو الدوار بينما الثلاثة الأخرى يتم توصيلها إلى ثلاث حلقات انزلاق Slip Rings مركبة على نفس العمود.

من خلال حلقات الانزلاق وعن طريق فرش كربونية مماسه لحلقات الانزلاق أثناء الدوران يتم توصيل ملفات العضو الدوار إلى خارج المحرك على التوالي مع مقاومات خارجية متغيرة وذلك من أجل التحكم في بدء دوران المحرك أو في تنظيم سرعته ، لذلك فإن هذا النوع من المحركات يتميز بإمكانية تغيير خواص تشغيله على نطاق واسع عن طريق توصيل ملفات العضو الدوار بدائرة خارجية ، انظر الشكل (1-5).

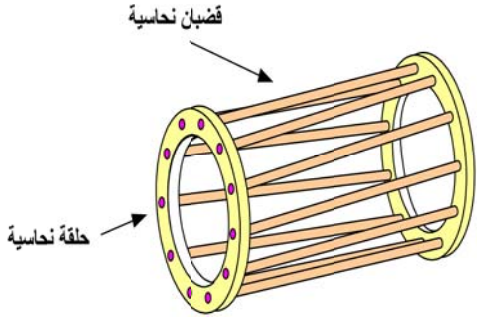


الشكل (1-5): عضو دوار ملفوف (ذو حلقات الانزلاق)

العضو الدوار ذو القفص السنجابي:

العضو الدوار ذو القفص السنجابي Squirrel cage مشابه تماماً للعضو الدوار ذو حلقات الانزلاق من حيث التركيب الميكانيكي ولكن بدلاً من وضع ملفات في المجاري فإنه توضع قضبان من النحاس أو الألمنيوم وهذه القضبان مقصورة أطرافها مع بعض من الجهتين بحلقتين من نفس مادة القضبان . هذا النوع لا يقسم إلى عدد معين من الأقطاب وإنما يستطيع التكيف تلقائياً مع عدد الأقطاب والأوجه للعضو الثابت الذي سيركب فيه. وحيث إنه لا يوجد به حلقات انزلاق فإنه لا يمكن توصيله بدائرة خارجية وبالتالي لا يمكن تغيير خواص تشغيل هذا المحرك أو التحكم في سرعته انظر الشكلين (1-6a) و(1-6b).

الشكل (1-6a): عضو دوار ذو القفص السنجابي



الشكل (1-6b): قضبان القفص السنجابي

المجال المغناطيسي الدوار

حيث إن ملفات العضو الثابت موصلة إما على شكل نجمة أو دلتا ويوجد بين كل ملف وآخر زاوية فراغية قدرها 120^o فإنه عند توصيل هذه الملفات بمصدر جهد متردد ثلاثي الأوجه بين كل وجه وآخر 120^o فإنه سيمر في هذه الملفات تيارات متزنة بين كل تيار وآخر 120^o ، ونتيجة لمرور هذه التيارات بهذه الصفة في تلك الملفات التي يفصل بين كل ملف و آخر زاوية قدرها 120^o فإنه سينشأ في الثغرة الهوائية مجال مغناطيسي دوار منتظم ، انظر الشكل (1-7).

هذا المجال المغناطيسي يدور بسرعة تسمى السرعة التزامنية Synchronous speed وتحسب من المعادلة التالية :

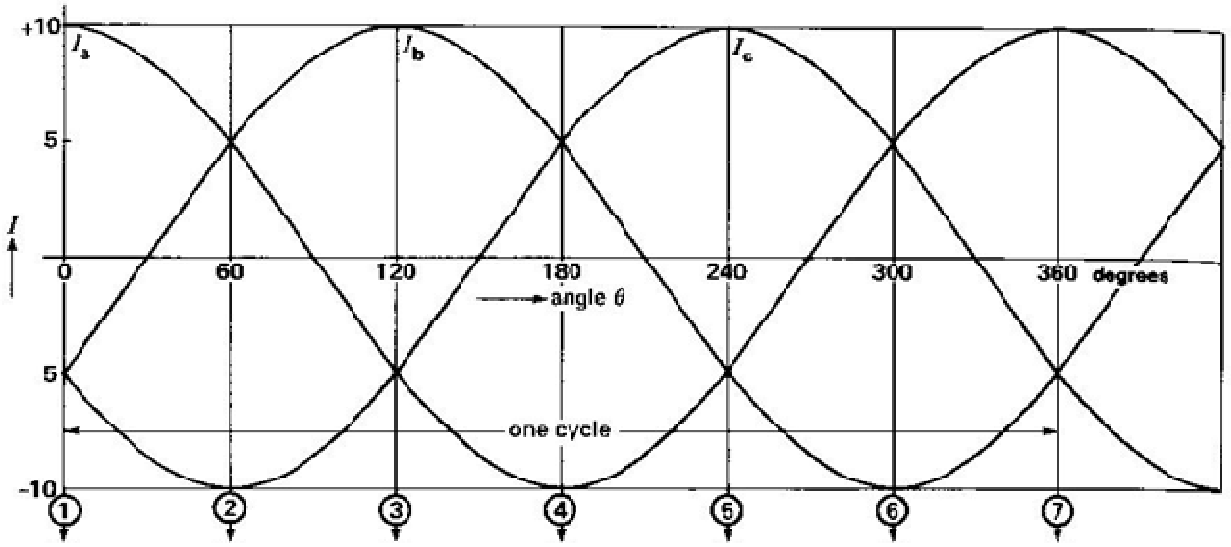
$$n_s = \frac{120 f_s}{p} \qquad (1\text{-}1)$$

حيث:

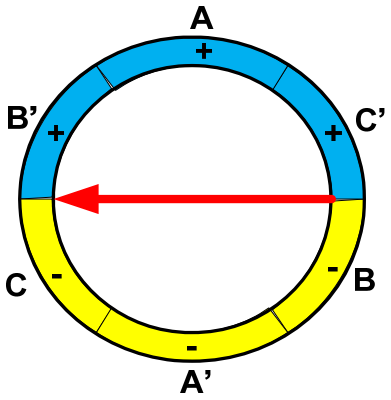
n_s: السرعة التزامنية .

f_s: تردد تيار العضو الثابت .

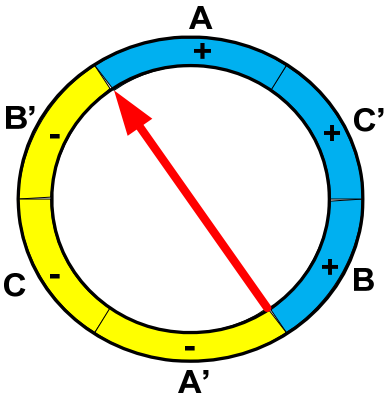
p: عدد أقطاب الآلة .



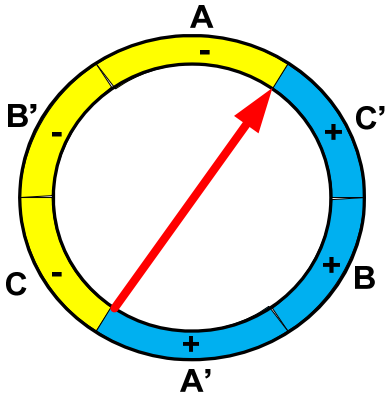
التيارات اللحظية في الأوجه الثلاثة لمحرك حثي ثلاثي الأوجه



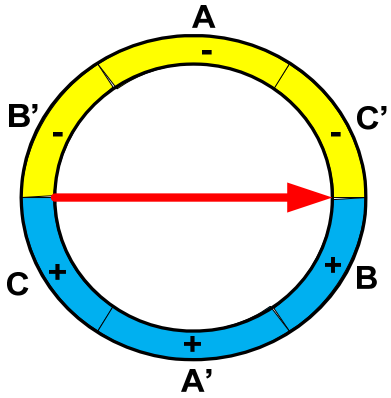
اللحظة الأولى عند الزاوية صفر



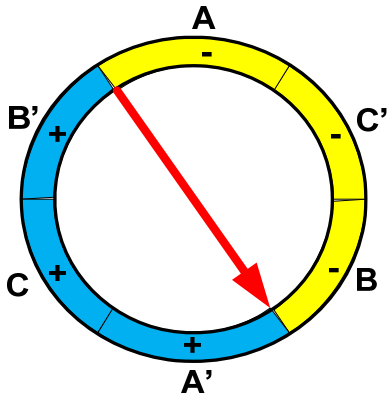
اللحظة الثانية عند الزاوية 60^o



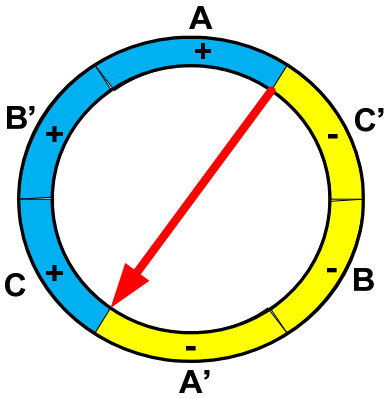
اللحظة الثالثة عند الزاوية 120^{o}



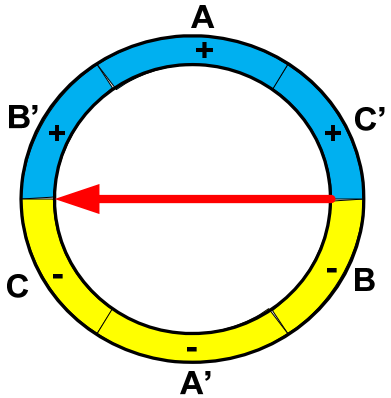
اللحظة الرابعة عند الزاوية 180^{o}



اللحظة الخامسة عند الزاوية 240^{o}

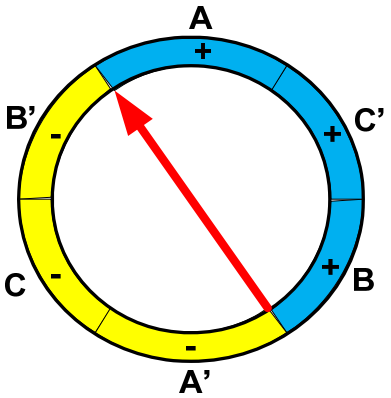


اللحظة السادسة عند الزاوية 300^{o}



اللحظة السابعة عند الزاوية 360^{o}

نفس اتجاه المجال عند اللحظة الأولى



اللحظة الثامنة عند الزاوية 420^{o}

نفس اتجاه المجال عند اللحظة الثانية

الشكل (7-1): رسم توضيحي للمجال المغناطيسي الدوار في محرك ذو قطبين

يتضح من تتبع اتجاه محصلة المجال الناتج عن الأوجه الثلاثة للمحرك، نتيجة لمرور التيارات اللحظية ثلاثية الأوجه بملفات العضو الثابت، عند اللحظات المتتالية المبينة في الشكل (7-1) أن المجال يدور 60^o في الفراغ كلما مرت لحظة زمنية معينة، ويكتمل دوران المجال 360^o كل دورة كاملة للتيار.

يلاحظ أنه إذا تم عكس طرفين من بين الأطراف الثلاثة فان اتجاه المجال سيتغير و بالتالي يمكن عكس اتجاه دوران المحرك.

كيفية عمل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

عند توصيل أطراف العضو الثابت بمصدر جهد متردد ثلاثي الأوجه فإنه سينشأ مجال مغناطيسي دوار . هذا المجال المغناطيسي الدوار سيولد قوة دافعة كهربائية ثلاثية الأوجه في موصلات العضو الدوار وذلك طبقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي ، بما أن موصلات العضو الدوار مقصورة من الطرفين فإنه سيمر فيها تيارات ثلاثية الأوجه بين كل وجه وآخر 120^o و من ثم سيتولد مجال مغناطيسي دوار آخر في الثغرة الهوائية نتيجةً لمرور تلك التيارات. في هذه الحالة أصبح لدينا مجالان مغناطيسيان دواران الأول ناتج عن العضو الثابت ويدور بالسرعة التزامنية (n_s) والثاني ناتج عن العضو الدوار ويدور بالسرعة (n_s -n) بالنسبة للعضو الدوار (n هي سرعة العضو الدوار) و بالسرعة التزامنية (n_s) بالنسبة للعضو الثابت. وحيث أن هذين المجالين المغناطيسيين يدوران بنفس السرعة والاتجاه فإنه سيتولد عزم فعال على العضو الدوار يؤدي إلى دورانه بنفس اتجاه دوران المجالين وذلك طبقاً لمبدأ إنتاج العزم.

بعدما يبدأ العضو الدوار بالتسارع فإن سرعة تعرض موصلاته لقطع خطوط المجال المغناطيسي الدوار ستقل كلما زادت سرعة العضو الدوار وبالتالي فإن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في موصلات العضو الدوار ستقل مع ازدياد سرعة العضو الدوار وذلك لأن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بسبب الحث الكهرومغناطيسي تتناسب طردياً مع السرعة (n_s -n) بين موصلات العضو الدوار والمجال الذي يتعرض له. وبالتالي فإن قيمة التيارات المارة في موصلات العضو الدوار ستقل وكذلك شدة المجال المغناطيسي المتولد ومن ثم يقل العزم المؤثر على العضو الدوار ، وهكذا حتى تصل سرعة العضو الدوار إلى سرعة قريبة من السرعة التزامنية، عندها تصبح التيارات المتولدة في موصلات العضو الدوار صغيرة وبالتالي

يضعف المجال المغناطيسي الناشئ عنها مما يؤدي إلى انخفاض العزم المؤثر على العضو الدوار. وعندما تستقر سرعة العضو الدوار فإن العزم المؤثر عليه يكون مساوياً لقوة الاحتكاك التي يتعرض لها العضو الدوار.

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

مفهوم الانزلاق

القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في موصلات العضو الدوار تعتمد على السرعة النسبية بين سرعة العضو الدوار وسرعة المجال المغناطيسي الدوار الناتج عن العضو الثابت ، فإذا كانت سرعة المجال المغناطيسي الدوار هي n_s والتي تحسب من المعادلة (1-1) ، وإذا كانت سرعة العضو الدوار هي n فإن السرعة النسبية بين سرعة العضو الدوار وسرعة المجال المغناطيسي الدوار هي الفرق بين السرعتين (n_s-n) وتسمى سرعة الانزلاق Slip speed:

$$n_{slip} = n_s - n \qquad (1-2)$$

حيث: n_{slip} تعني سرعة الانزلاق

وإذا نسبت سرعة الانزلاق إلى السرعة التزامنية للآلة نفسها فإنها تعطي معاملاً هاماً ومفيداً جداً عند دراسة الآلات الحثية يسمى معامل الانزلاق Slip ويرمز له بالرمز (S) وتتراوح قيمته في المحركات الصغيرة ما بين 0.01 إلى 0.02 وقد تصل إلى 0.005 في المحركات الكبيرة في حالة عدم التحميل وعند التحميل يتراوح الانزلاق من 0.03 إلى 0.05 ، ويمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \qquad (1-3)$$

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

من الممكن حساب سرعة العضو الدوار بدلالة السرعة التزامنية والانزلاق وذلك بعد حل المعادلة (1-3) كما يلي:

$$n = n_s(1-S) \qquad (1-4)$$

تردد الجهود والتيارات في العضو الدوار

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

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

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

وعندما تكون $(n=n_s)$ فإن $(S=0)$ والتردد $(f_r=0)$

عند أي سرعة للعضو الدوار بين الصفر والسرعة التزامنية فإن تردد التيار في العضو الدوار سيتناسب طردياً مع الفرق بين السرعة التزامنية (n_s) وسرعة العضو الدوار(n) ،و بما أن الانزلاق هو الفرق بين هاتين السرعتين منسوباً إلى السرعة التزامنية (المعادلة 3-1) فإنه يمكن التعبير عن تردد التيارات في العضو الدوار بالمعادلة التالية:

$$f_r = S \cdot f_s \qquad (1-5)$$

أمثلة محلولة:

مثال (1-1):

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

أ) السرعة التزامنية لهذا المحرك

ب) سرعة العضو الدوار عند الحمل الكامل

جـ) تردد التيارات في العضو الدوار عند الحمل الكامل

الحـل:

أ) من المعادلة (1-1):

$$n_s = \frac{120 f_s}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500\ rpm$$

ب) من المعادلة (1-4):

$$n = n_s(1 - S) = 1500(1 - 0.05) = 1425\ rpm$$

جـ) من المعادلة (1-5):

$$f_r = Sf_s = 0.05 \times 50 = 2.5\ Hz$$

مثال (2-1):

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

الحـل:

تحسب السرعة التزامنية من المعادلة (1-1):

$$n_s = \frac{120 f_s}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800\ rpm$$

سرعة الانزلاق عند الحمل الكامل تحسب من المعادلة (2-1):

$$n_{slip} = n_s - n = 1800 - 1740 = 60\ rpm$$

معامل الانزلاق عند الحمل الكامل يحسب من المعادلة (3-1):

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

مثال(3-1):

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

الحـل:

معامل الانزلاق يحسب من المعادلة (5-1):

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

لحساب سرعة العضو الدوار :

أولاً: تحسب السرعة التزامنية من المعادلة (1-1):

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

ثانيا: تحسب سرعة العضو الدوار من المعادلة (4-1):

$$n = n_s(1 - S) = 1000(1 - 0.05) = 950\ rpm$$

أسـئلة و تمارينــن

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

2- ما المقصود بالحث الكهرومغناطيسي؟

3- ما المقصود بالتيارات الدوامية ؟ وكيف تنشأ؟

4- ما فائدة وجود حلقات الانزلاق؟

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

6- اشرح كيف يتولد عزم فعال يؤدي إلى دوران العضو الدوار.

7- هل يمكن لسرعة العضو الدوار أن تصل إلى السرعة التزامنية؟

8- ما المقصود بمعامل الانزلاق؟

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

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

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

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

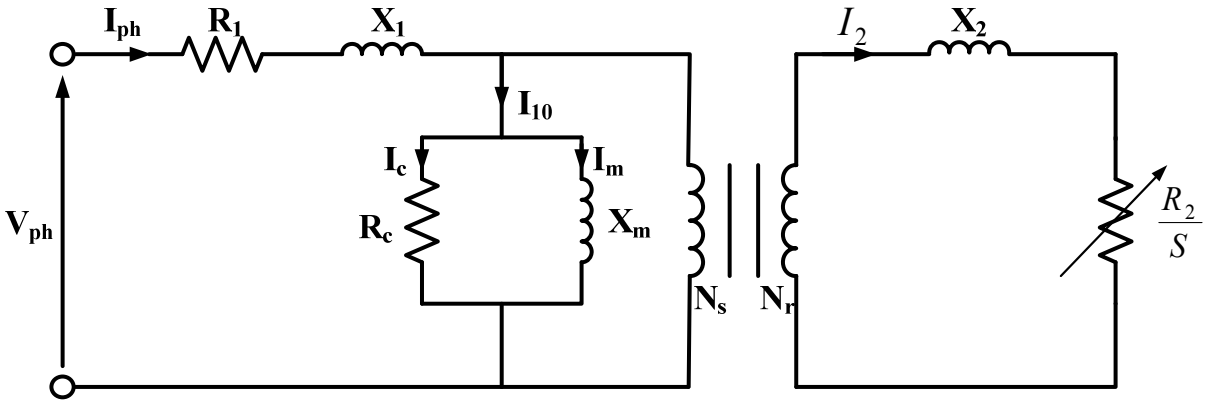
أ) السرعة التزامنية لهذا المحرك

ب) سرعة العضو الدوار عند الحمل الكامل

جـ) تردد التيارات في العضو الدوار عند الحمل الكامل

الفصل الثاني : الدائرة المكافئة لكل وجه

الدائرة المكافئة لكل وجه للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه تشبه تماماً الدائرة المكافئة للمحول، غير أن المحرك دوار لذلك تم تمثيل الحركة في الدائرة المكافئة بالمقاومة ($\frac{R_2}{S}$) كما هو موضح في الشكل (8-1):

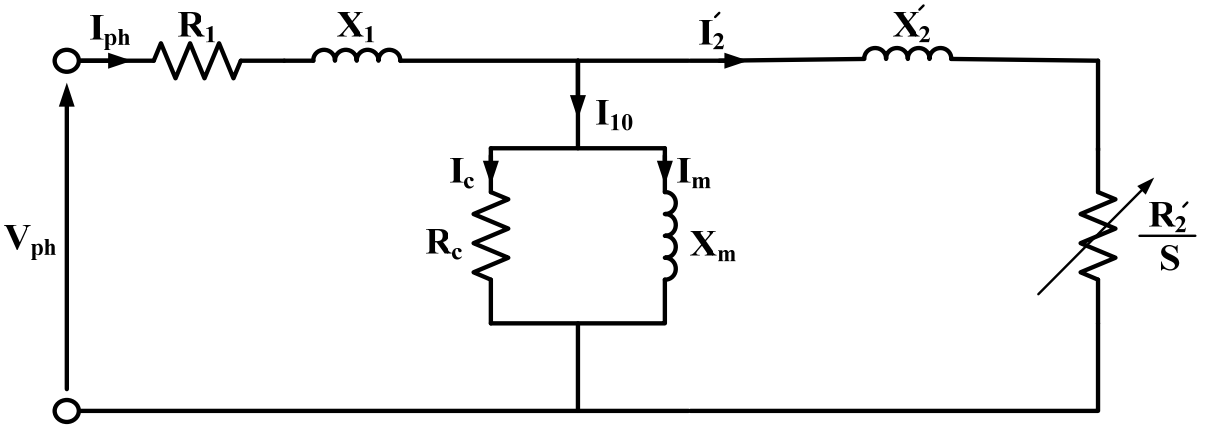


الشكل رقم (8-1): الدائرة المكافئة لكل وجه للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

حيث:

V_{ph} جهد الوجه (الطرف)	I_{ph} و I_2 تيار العضو الثابت والدوار لكل وجه
R_1 و R_2 مقاومة ملفات العضو الثابت والدوار لكل وجه	X_1 و X_2 ممانعة التسرب الحثية لملفات العضو الثابت والدوار لكل وجه
I_{10} التيار الابتدائي عند اللاحمل	I_c التيار الفعال
I_m التيار الغير فعال (تيار التمغنط)	N_s و N_r عدد لفات العضو الثابت والدوار لكل وجه
R_c مقاومة القلب الحديدي: تمثل المفاقيد الحديدية	X_m ممانعة القلب الحديدي: تمثل المفاقيد المغناطيسية

ويمكن أن ترسم الدائرة المكافئة بحيث تكون دائرة العضو الدوار منسوبة إلى العضو الثابت للتخلص من الدائرة المغناطيسية كما هو موضح في الشكل (9-1):



الشكل (9-1): الدائرة المكافئة لكل وجه للمحرك الحثي منسوبة إلى العضو الثابت

حيث:

$$\frac{R_2^{'}}{S} = \frac{R_2}{S}\left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2$$

$$X_2^{'} = X_2\left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2$$

$$I_2^{'} = I_2\left(\frac{N_r}{N_s}\right)$$

كما أن مقاومة ملفات العضو الدوار($\frac{R_2^{'}}{S}$) يمكن تقسيمها إلى مقاومتين كما يلي:

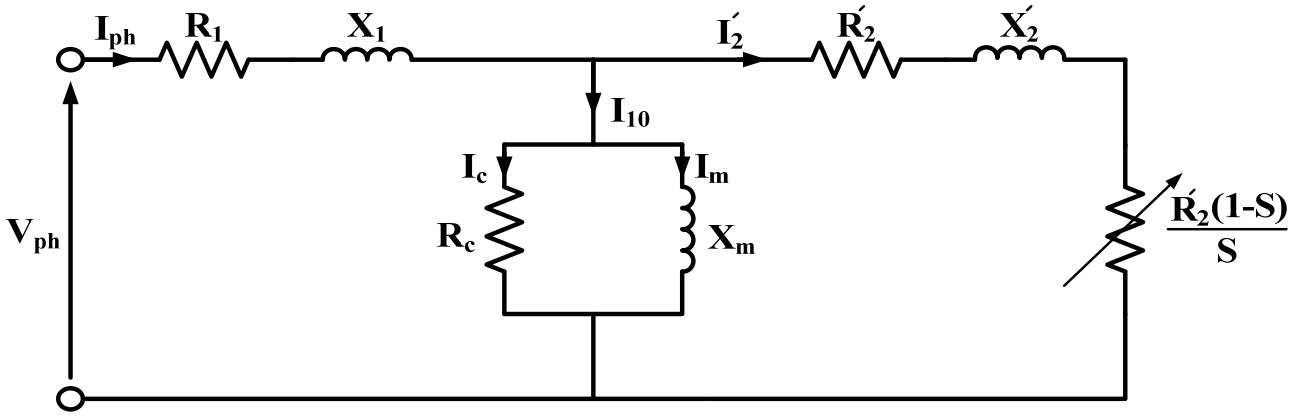
$$\frac{R_2^{'}}{S} = \frac{R_2^{'}}{S} + R_2^{'} - R_2^{'}$$

$$= R_2^{'} + \frac{R_2^{'}}{S} - R_2^{'}$$

$$= R_2^{'} + R_2^{'}\left(\frac{1}{S} - 1\right)$$

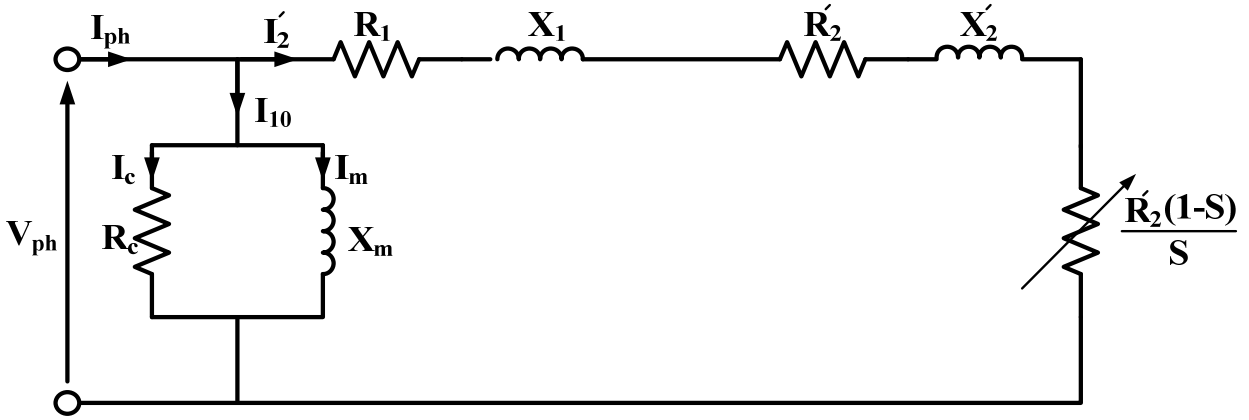
$$= R_2^{'} + R_2^{'}\left(\frac{1-S}{S}\right)$$

وبالتالي يمكن إعادة رسم الدائرة المكافئة كما يلي:



الشكل رقم (1-10): الدائرة المكافئة لكل وجه للمحرك الحثي في وضعها النهائي

ويمكن أيضاً الحصول على الدائرة المكافئة التقريبية عندما نهمل تيار اللاحمل (I_{10}) وذلك لأن قيمته صغيرة جداً عند مقارنتها بتيار الحمل (I_{ph}). وعلى هذا الأساس يمكن نقل الفرع الممثل للدائرة المغناطيسية إلى جهة جهد الابتدائي(V_{ph}) كما هو موضح في الشكل (1-11).



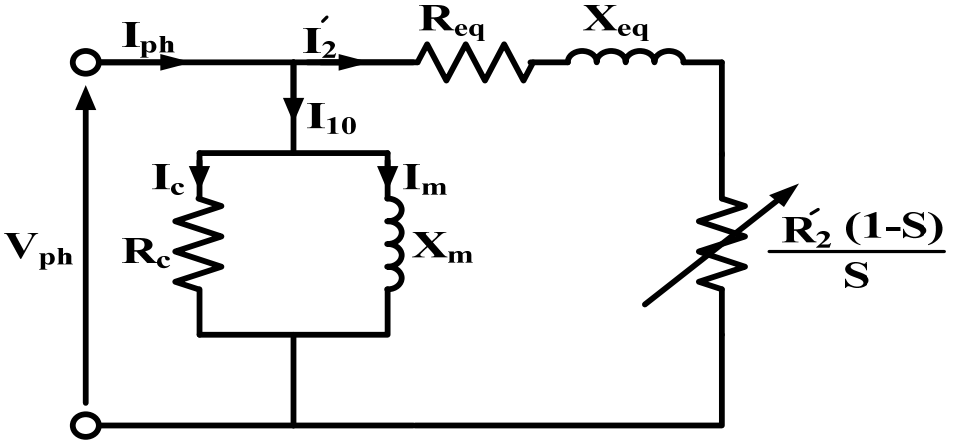
الشكل (1-11): الدائرة المكافئة التقريبية لكل وجه للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

ونتيجة لهذا التقريب يمكن أن نعتبر أن:

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

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

وبالتالي يمكن إعادة رسم الدائرة المكافئة كما في الشكل التالي:



الشكل (12-1): الدائرة المكافئة التقريبية لكل وجه للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

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

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

تعيين ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية

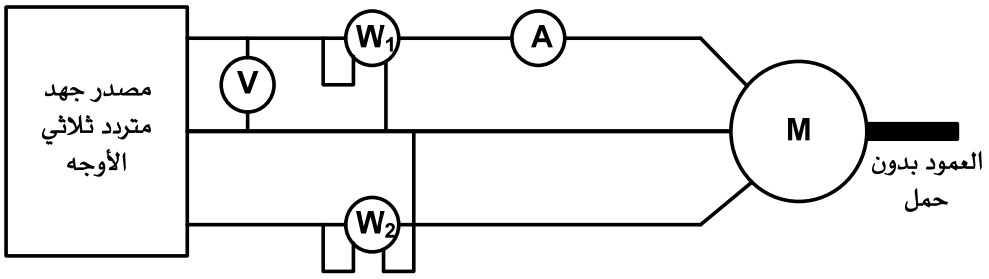
تعتبر الدائرة المكافئة للمحرك الحثي أداةً مفيدةً جداً لتحديد استجابة المحرك عند التغير في الأحمال ، وإذا أردنا تطبيقها على آلة حقيقية فإن ذلك يتطلب تحديد قيم ثوابت الآلة ($R_1, R_2, X_1, X_2, R_c, X_m$). ولكي يتم تحديد قيم هذه الثوابت يتوجب القيام عمليا بالاختبارات التالية:

اختبار اللاحمل No load Test:

في هذا الاختبار يوصل المحرك كما هو موضح في الشكل (13-1) ثم يسلط الجهد المقنن على أطراف المحرك و يترك العضو الدوار يدور بحرية تامة بدون أي حمل ، بعد ذلك تسجل قراءات الأجهزة .

القدرة الكلية هي مجموع قراءتي الواتميتر. $P_{10} = W_1 + W_2$

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



الشكل (13-1): اختبار اللاحمل للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

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

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

من الدائرة المكافئة في الشكل رقم (1-12) يمكن إيجاد قيم R_c , X_m كما يلي:

$$R_c = \frac{V_{ph}}{I_c} \qquad (1-6)$$

$$X_m = \frac{V_{ph}}{I_m} \qquad (1-7)$$

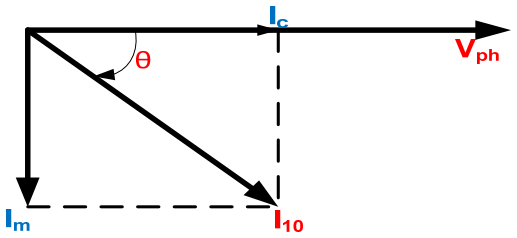
من المخطط الاتجاهي: شكل (1-14) يمكننا إيجاد قيم I_m , I_c بدلالة I_{10} كما يلي:

$$I_c = I_{10}\cos\theta \qquad (1-8)$$

$$I_m = I_{10}\sin\theta \qquad (1-9)$$

حيث :

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{P_{10}}{3V_{ph}I_{10}}\right) \qquad (1-10)$$



الشكل (1-14): المخطط الاتجاهي في حالة اللاحمل

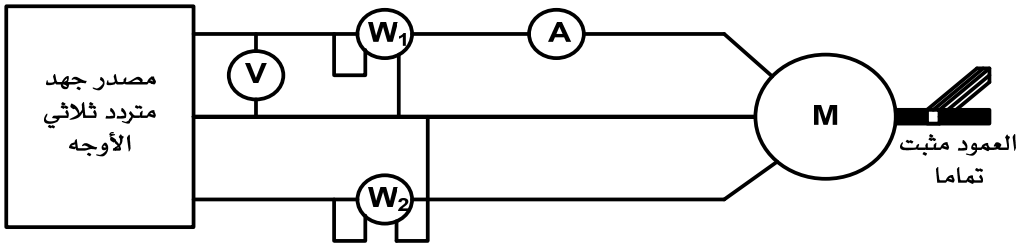
اختبار إعاقة الحركة Locked Rotor Test:

في هذا الاختبار يوصل المحرك كما هو موضح في الشكل (1-15) ولكن العضو الدوار يمنع من الحركة بأي وسيلة مناسبة ، بعد ذلك يتم زيادة الجهد المسلط على أطراف المحرك تدريجياً حتى يصل التيار المار في ملفات المحرك إلى القيمة المقننة. وذلك لأن توصيل

المحرك على الجهد المقنن سوف يتسبب في مرور تيار كبير جداً قد يتلف ملفات المحرك ، بعد ذلك تسجل قراءات الأجهزة

القدرة الكلية هي مجموع قراءتي الواتميتر. $P_{sc} = W_1 + W_2$

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



الشكل (1-15): اختبار إعاقة الحركة للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه

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

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

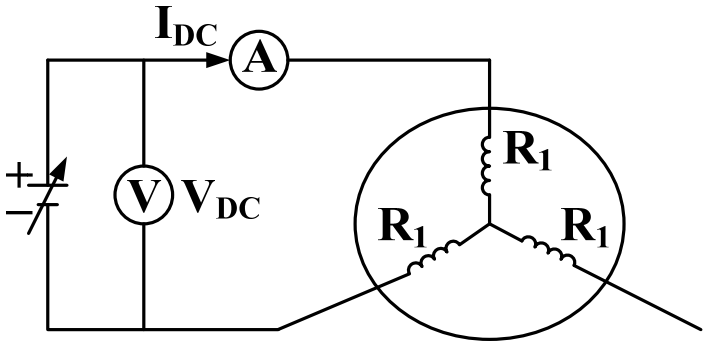
$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{3I_{sc}^2} \qquad (1\text{-}11)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \qquad (1\text{-}12)$$

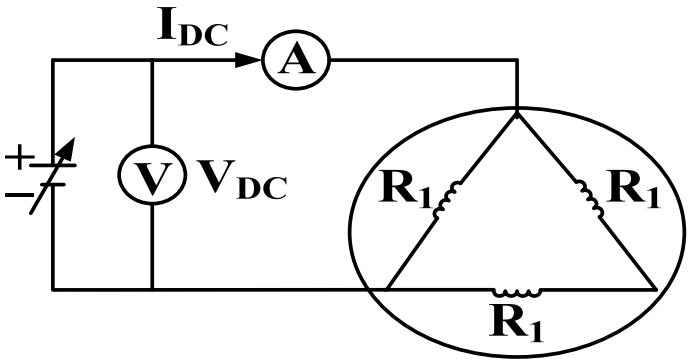
$$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)} \qquad (1\text{-}13)$$

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 (16-1) أو الشكل (17-1).



الشكل (16-1): دائرة قياس مقاومة ملفات العضو الثابت إذا كانت موصلة نجمة



الشكل (17-1): دائرة قياس مقاومة ملفات العضو الثابت إذا كانت موصلة دلتا

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

- في حالة التوصيلة نجمة.

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

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \qquad (1\text{-}14)$$

- في حالة التوصيلة دلتا.

$$\frac{2}{3}R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_1 = \frac{3V_{DC}}{2I_{DC}} \qquad (1\text{-}15)$$

وحيث أن المحرك يعمل بالتيار المتردد فيجب أن يؤخذ تأثير الخاصية القشرية skin effect في الاعتبار و ذلك بإضافة حوالي 10% من قيمة المقاومة المقاسة عند مرور التيار المتردد داخل الملفات.

أمثلة محلولة

مثال (4-1):

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

تجربة عدم الحمل	تجربة عدم الحركة
$V_L = 220$ V	$V_L = 30$ V
$P_{10} = 600$ W	$P_{sc} = 1500$ W
$I_L = 20$ A	$I_L = 50$ A

احسب مكونات الدائرة المكافئة التقريبية لهذا المحرك.

الحـل:

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

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة

إذا :

$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127\,V$$

$$I_{10} = I_L = 20\,A$$

باستخدام المعادلات من (6-1) إلى (10-1) نجري الحسابات التالية:

$$\cos\theta = \frac{P_{10}}{3V_{ph}I_{10}} = \frac{127}{3\times 127\times 20} = 0.0787$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.0787) = 85.48^\circ$$

$$R_c = \frac{V_{ph}}{I_{10}\cos\theta} = \frac{127}{20\times 0.0787} = 80.68\,\Omega$$

$$X_m = \frac{V_{ph}}{I_{10}\sin\theta} = \frac{127}{20\times \sin(85.48^\circ)} = 6.37\,\Omega$$

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

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل نجمة:

$$V_{sc} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32\,V$$

$$I_{sc} = I_L = 50\,A$$

باستخدام المعادلات من (1-11) إلى (1-13) نحصل على ما يلي:

$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{3I_{sc}^2} = \frac{1500}{3\times 50^2} = 0.2\,\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{17.32}{50} = 0.3464\,\Omega$$

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

مثال (1-5):

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

اختبار التيار المستمر	اختبار الدائرة المفتوحة	اختبار الدائرة المقصورة
$V_{DC} = 9$ V	$V_L = 127$ V	$V_L = 39.3$ V
$I_{DC} = 20$ A	$I_L = 7.53$ A	$I_L = 34.64$ A
	$P_{10} = 179$ W	$P_{sc} = 1265$ W

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

الحـل:

أولاً: من اختبار التيار المستمر تحسب قيمة R_1 من المعادلة (15-1) كما يلي:

$$R_1 = \frac{3V_{DC}}{2I_{DC}} = \frac{3\times 9}{2\times 20} = 0.675\,\Omega$$

ثانياً: من نتائج اختبار الدائرة المفتوحة (عدم الحمل) نستطيع حساب قيم R_c , X_m كما يلي:

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا

إذا :

$$V_{ph} = V_L = 127\,V$$

$$I_{10} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{7.53}{\sqrt{3}} = 4.347\ A$$

باستخدام المعادلات من (6-1) إلى (10-1) نجري الحسابات التالية:

$$\cos\theta = \frac{P_{10}}{3V_{ph}I_{10}} = \frac{179}{3\times 127\times 4.347} = 0.108$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.0787) = 83.8^\circ$$

$$R_c = \frac{V_{ph}}{I_{10}\cos\theta} = \frac{127}{4.347\times 0.108} = 270.78\,\Omega$$

$$X_m = \frac{V_{ph}}{I_{10}\sin\theta} = \frac{127}{4.347\times \sin(83.8^\circ)} = 29.435\,\Omega$$

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

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا

إذا :

$$V_{sc} = V_L = 39.3\,V$$

$$I_{sc} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{34.64}{\sqrt{3}} = 20\ A$$

باستخدام المعادلات من (1-11) إلى (1-13) نجري الحسابات التالية:

$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{3I_{sc}^2} = \frac{1265}{3 \times 20^2} = 1.054\,\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{39.3}{20} = 1.965\,\Omega$$

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

بما أن:

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

$$R_1 = 0.675\,\Omega$$

إذا:

$$R_2^{'} = R_{eq} - R_1 = 1.054 - 0.675 = 0.379\,\Omega$$

بما أن:

$$X_1 = X_2^{'}$$

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

إذا:

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

أسـئلة و تمارين

1- لماذا يسمى اختبار عدم الحمل أحياناً اختبار الدائرة المفتوحة؟

2- لماذا يسمى اختبار عدم الحركة أحياناً اختبار الدائرة المقصورة ؟

3- لماذا تحدد R_c , X_m باستخدام اختبار عدم الحمل وليس اختبار عدم الحركة؟

4- لماذا تحدد R_{eq} , X_{eq} باستخدام اختبار عدم الحركة وليس اختبار عدم الحمل؟

5- لماذا يسلط الجهد تدريجياً على المحرك في اختبار عدم الحركة؟

6- ما المقصود بالخاصية القشرية skin effect ؟

7- محرك حثي ثلاثي الأوجه 5 hp ذو أربعة أقطاب ، عند إجراء تجربتي اللاحمل والقصر له أعطى النتائج التالية:

تجربة اللاحمل: 220 V, 3.86 A , 550 W

تجربة القصر: 35 V, 12.9 A , 490 W

فإذا كانت ملفات المحرك موصلة على شكل Δ احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا المحرك.

8- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته 29.84 KW ملفاته موصلة على شكل Δ عند اختباره أعطى النتائج التالية :

تجربة اللاحمل: 415 V, 21 A , 1250 W

تجربة عدم الحركة: 100 V, 45 A , 2730 W

احسب مكونات الدائرة المكافئة التقريبية لهذا المحرك.

9- محرك حثي ثلاثي الأوجه قدرته 20 hp ملفاته موصلة على شكل Y عند إجراء تجربتي اللاحمل والقصر له أعطى النتائج التالية :

تجربة اللاحمل: 380 V, 16.5 A , 1050 W

تجربة القصر: 86 V, 32 A , 1854 W

احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا المحرك إذا كان $X_1 = X'_2$ & $R_1 = R'_2$

الفصل الثالث : القـدرة و العـزم

أولاً : القدرة في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

عادةً ما يوصف المحرك الحثي ثلاثي الأوجه بأنه محول دوار و الدخل قدرة كهربائية في شكل جهود وتيارات ثلاثية الأوجه والخرج هو قدرة ميكانيكية تظهر على عمود الدوران. العلاقة بين القدرة الكهربائية الداخلة و القدرة الميكانيكية الخارجة موضحه في الشكل (1-18) الذي يصف كيفية انسياب القدرة داخل المحرك.

القدرة الداخلة إلى العضو الثابت تعتمد قيمتها على حمل المحرك والمتمثل في التيار و معامل القدرة .وتعطى من المعادلة التالية:

$$P_{in} = 3V_{ph}I_{ph}\cos\theta$$

$$P_{in} = \sqrt{3}\mathrm{V_L I_L}\cos\theta \qquad (1\text{-}16)$$

حيث:

$\mathrm{V_{ph}}$: جهد الوجه للعضو الثابت

$\mathrm{I_{ph}}$: تيار الوجه للعضو الثابت

$\mathrm{V_L}$: جهد الخط للعضو الثابت

$\mathrm{I_L}$: تيار الخط للعضو الثابت

θ: الزاوية بين الجهد والتيار وجيب تمامها هو معامل القدرة

هذه القدرة الداخلة P_{in} سيفقد منها جزء في مقاومة ملفات العضو الثابت R_1 على شكل حرارة وتسمى مفاقيد نحاسية في العضو الثابت و تحسب من المعادلة التالية:

$$P_{cu1} = 3R_1 I_{ph}^2 \qquad (1\text{-}17)$$

الجزء المتبقي من القدرة الداخلة P_{in} سيفقد جزء منها في القلب الحديدي للعضو الثابت وذلك بسبب وجود التيارات الدوامية وظاهرة التخلف المغناطيسي وتسمى مفاقيد حديدية P_{Cor} ، هذه القدرة المفقودة تمثلها المقاومة R_c في الدائرة المكافئة. مجموع هذين النوعين من المفاقيد في العضو الثابت (المفاقيد النحاسية في R_1 و المفاقيد الحديدية في R_c) تسمى مفاقيد العضو الثابت ويرمز لها بالرمز P_S.

$$P_S = P_{cu1} + P_{cor} \qquad (1\text{-}18)$$

الجزء المتبقي من القدرة الداخلة P_{in} سينتقل عبر الثغرة الهوائية إلى العضو الدوار و يسمى القدرة المنتقلة عبر الثغرة الهوائية من العضو الثابت إلى العضو الدوار ويرمز لها بالرمز P_g.

$$P_g = P_{in} - P_S \qquad (1\text{-}19)$$

ويمكن حسابها أيضا من المعادلة التالية:

$$P_g = 3\frac{R_2^{'}}{S} I_2^{'2} \qquad (1\text{-}20)$$

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

$$P_{cu2} = 3R_2^{'} I_2^{'2} \qquad (1\text{-}21)$$

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

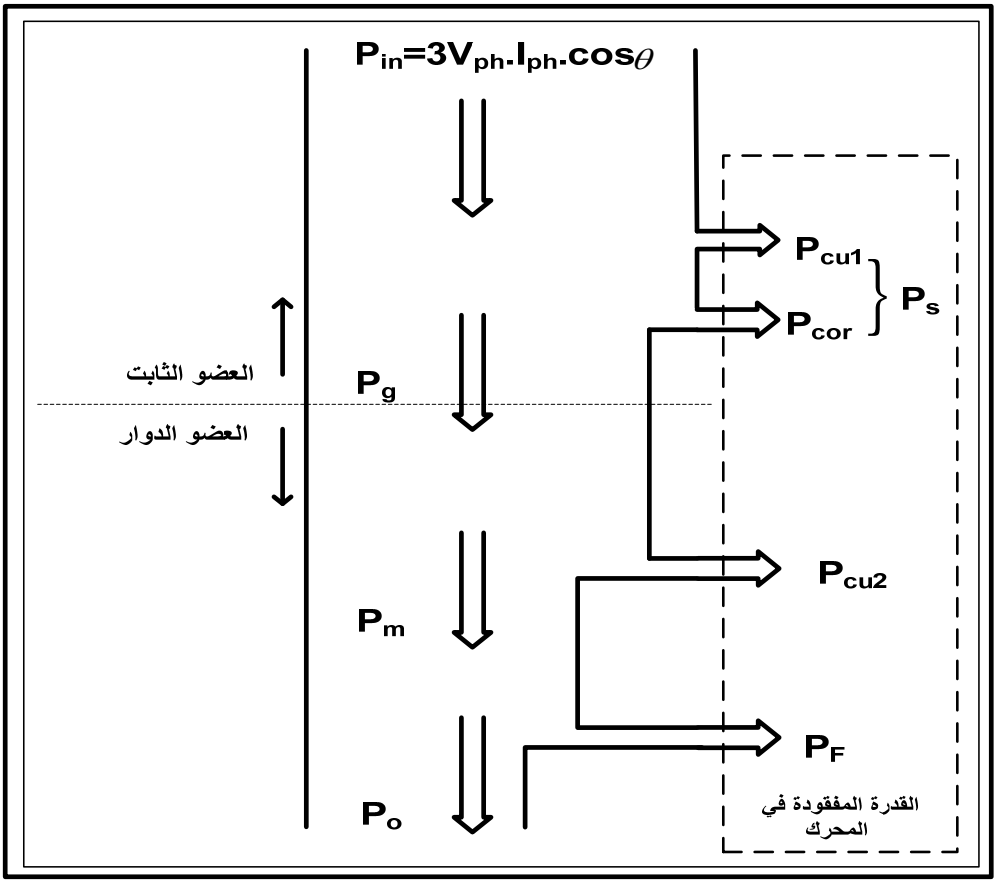
$$P_m = P_g - P_{cu2} \qquad (1-22)$$

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

$$P_m = 3R_2' \frac{(1-S)}{S} I_2'^2 \qquad (1-23)$$

القدرة الميكانيكية المتحولة P_m سيفقد جزءاً منها بسبب الاحتكاك الذي يتعرض له العضو الدوار مع الهواء و كراسي التحميل. مفاقيد الاحتكاك هذه يرمز لها بالرمز P_F. وبالتالي فإن القدرة الميكانيكية الخارجة P_o هي الجزء المتبقي من القدرة الميكانيكية المتحولة بعد خصم القدرة المفقودة بسبب الاحتكاك كما يلي:

$$P_o = P_m - P_F \qquad (1-24)$$



الشكل (18-1): مخطط سريان القدرة داخل المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

يلاحظ أن المفاقيد الحديدية في العضو الدوار مهملة وذلك لارتباطها بتردد تيارات العضو الدوار.

من المعادلات (20-1) و(21-1) و (23-1) يمكن لنا إجراء المقارنة التالية:

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

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

$$P_{cu2} = SP_g \qquad (1-25)$$

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

$$P_m = (1-S)P_g \qquad (1-26)$$

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

إذا تم معرفة القدرة الداخلة للمحرك و القدرة الخارجة منه، تحسب الكفاءة بالقانون التالي:

$$\eta_{\%} = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100 \qquad (1-27)$$

أمثلة محلولة:

مثال (6-1):

محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ستة أقطاب يعمل على مصدر جهده 440 V وتردده 50 Hz فإذا كانت القدرة الداخلة إلى العضو الدوار 80 kw وتردد التيار في العضو الدوار 1.67 Hz احسب ما يلي:

أ) الانزلاق

ب) سرعة العضو الدوار

جـ) القدرة الميكانيكية المتحولة

د) القدرة المفقودة في العضو الدوار

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

الحـل:

أ) من المعادلة (1-3)

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

ب) نحسب أولاً السرعة التزامنية من المعادلة (1-1):

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

ثم نوجد سرعة العضو الدوار من المعادلة (1-4):

$$n = n_s(1 - S) = 1000(1 - 0.0334) = 966.6\ rpm$$

جـ) من المعادلة (1-26)

$$P_m = (1 - S)P_g = (1 - 0.0334) \times 80 = 77.33\ kw$$

د) من المعادلة (1-25)

$$P_{cu2} = SP_g = 0.0334 \times 80 = 2.67 kw$$

هـ) من المعادلة (1-21) نستطيع إيجاد مقاومة ملفات العضو الدوار كما يلي:

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

مثال (1-7):

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

أ) معامل الانزلاق

ب) القدرة الميكانيكية الخارجة بالحصان

جـ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار

د) كفاءة المحرك

الحـل:

أ) نحسب أولاً السرعة التزامنية من المعادلة (1-1):

$$n_s = \frac{120 f_s}{p} = \frac{120\times 50}{8} = 732 rpm$$

ثم نحسب الانزلاق من المعادلة (1-3):

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

ب) بتتبع مسار انتقال القدرة داخل المحرك في الشكل (1-18) نستطيع إيجاد القدرة الميكانيكية الخارجة كما يلي:

$$P_g = P_{in} - P_s = 40 - 1 = 39\,kw$$

$$P_m = (1-S)P_g = (1-0.024)\times 39 = 38.064\,kw$$

$$P_o = P_m - P_F = 38.064 - 2 = 36.064\,kw$$

$$P_o(hp) = \frac{36.064}{0.746} = 48.343\,\text{hp}$$

جـ) من المعادلة (1-25):

$$P_{cu2} = SP_g = 0.024\times 39 = 0.936\,kw$$

د) كفاءة المحرك تحسب كما يلي:

$$\eta_{\%} = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100 = \frac{36.064}{40} \times 100 = 90.16\%$$

ثانياً: العـزم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه

العزم أو عزم الدوران (Torque) هو القوة المؤثرة على جسم ما فينتج عنها دوران ذلك الجسم حول مركزه ، ويقاس بوحدة نيوتن متر Nm ، هذا هو التعريف العام للعزم. أما العزم الذي يؤثر على عمود الدوران في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه فهو حاصل قسمة القدرة الميكانيكية المتحولة P_m على السرعة الزَّاوِيّة لدوران العمود طبقاً للمعادلة التالية:

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

حيث: ω هي السرعة الزَّاوِيّة للعمود.

T هو العزم الميكانيكي الناشئ على عمود الدوران

وحيث أن السرعة الزاوية لعمود الدوران متغيرة بتغير الحمل ، لذلك يفضل استخدام السرعة التزامنية الزاوية بدلاً منها ، ولكن نستخدم معها القدرة المنقولة خلال الثغرة الهوائية P_g بدلاً من استخدام القدرة الميكانيكية المتحولة P_m طبقاً للمعادلة التالية:

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

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

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

بالرجوع إلى المعادلة (1-20) والمعادلة (1-30) والتعويض عنهما في المعادلة (1-29) يمكن أن نعبر عن العزم كما يلي:

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

وبعد قليل من الترتيب تصبح المعادلة السابقة كما يلي:

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

حيث K يسمى ثابت المحرك الحثي ثلاثي الأوجه و يحسب كما يلي:

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

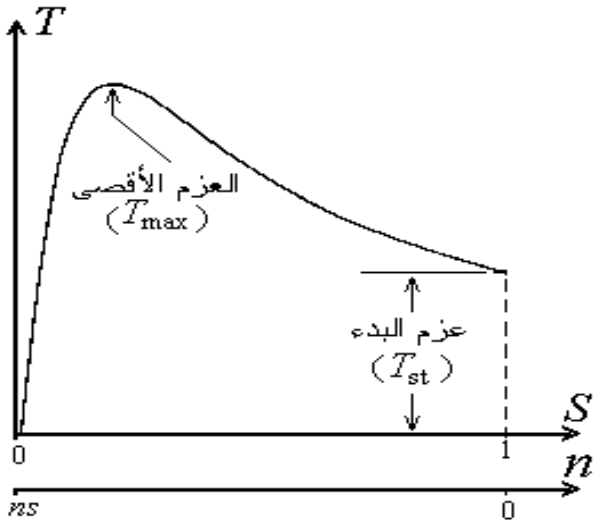
بالرجوع إلى الدائرة المكافئة التقريبية في الشكل (1-12) يمكن أن نوجد التيار $I_2^{'}$ كما يلي:

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

بالتعويض عن قيمة التيار $I_2^{'}$ في المعادلة رقم (1-31) يصبح العزم كما يلي:

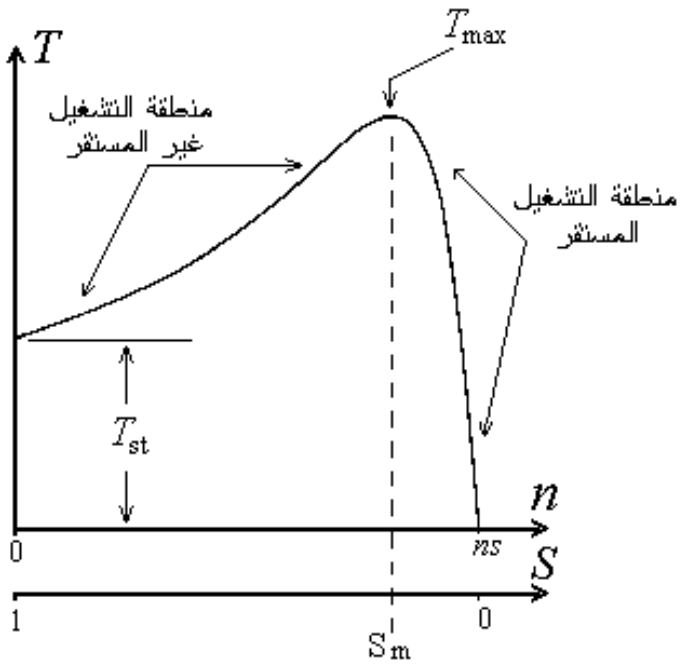
$$T = \frac{KV_{ph}^2 R_2^{'}}{\left[(R_1 + \frac{R_2^{'}}{S})^2 + X_{eq}^2\right] S} \qquad (1-34)$$

المعادلة (1-34) تمثل العلاقة بين العزم و معامل الانزلاق ومنها يمكن حساب العزم عند أي قيمة للانزلاق. عند رسم العلاقة بين (العزم ومعامل الانزلاق) في المعادلة (1-34) فإننا نحصل على منحنى مشابه للمنحنى الموضح في الشكل (1-19):



الشكل (19-1): العلاقة بين (العزم و الانزلاق) أو (العزم و السرعة)

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



الشكل (20-1): العلاقة بين (العزم و معامل الانزلاق) أو (العزم و السرعة)

منحنى (العزم و السرعة) الموضح في الشكل (20-1) ينقسم إلى منطقتين: الأولى منطقة التشغيل غير المستقر وهي المنطقة التي تسبق موضع العزم الأقصى ، في هذه المنطقة لا يستطيع المحرك إدارة أي حمل وإذا حدث أن حمل المحرك في هذه المنطقة فإنه سوف يتباطأ حتى يتوقف عن الدوران.

المنطقة الأخرى هي منطقة التشغيل المستقر وهي المنطقة التي بعد موضع العزم الأقصى ، و التي يستطيع المحرك إدارة الحمل المقنن له ، وعادةً يكون عزم الحمل الكامل مساوياً تقريباً لنصف العزم الأقصى للمحرك بشرط أن لا يزيد عن عزم البدء ، وفي حالة كون عزم الحمل أكبر من عزم البدء فإن المحرك لا يستطيع بدء الدوران ، لذلك ينصح في هذه الحالة بدء تشغيل المحرك بحمل خفيف وبعد أن يصل إلى منطقة التشغيل المستقر تضاف بقية الأحمال.

التحكم في موضع العزم الأقصى:

معادلة العزم (34-1) تعتبر دالة رياضية بدلالة الانزلاق (S) ، القيمة العظمى لها (T_{max}) يتغير موضعها بتغير ثوابت الدائرة المكافئة الداخلة فيها، وإذا أردنا إيجاد قيمة الانزلاق الذي تتحقق عنده القيمة العظمى لهذه الدالة فإن ذلك ممكن ، وذلك بعد مفاضلتها ثم مساواتها بالصفر كما يلي :

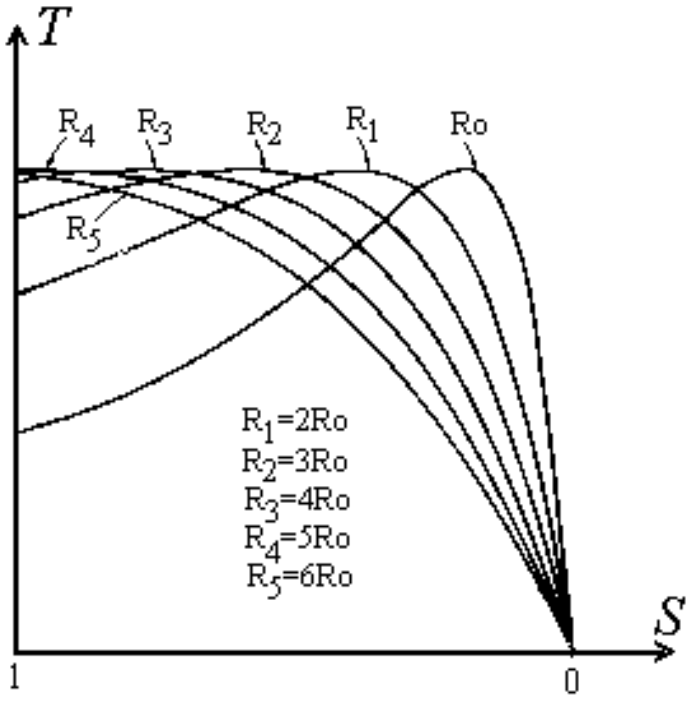
قبل إجراء عملية التفاضل يفضل إهمال معاوقة العضو الثابت للتبسيط لتصبح المعادلة كما يلي:

$$T = \frac{KV_{ph}^2 R_2^{'}}{\left[(\frac{R_2^{'}}{S})^2 + X_2^{'2}\right]S} \qquad (1-35)$$

بعد مفاضلة المعادلة (1-35) بالنسبة للانزلاق ثم مساواتها بالصفر نحصل على قيمة الانزلاق الذي يتحقق عنده العزم الأقصى للمحرك كما يلي:

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

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



الشكل (21-1): تأثير تغير مقاومة العضو الدوار على موضع العزم الأقصى

ويمكن أيضا من المعادلة (34-1) حساب قيمة العزم الأقصى للمحرك وذلك عندما ننقل موضع العزم الأقصى إلى لحظة البدء أي أن ($S_m = 1$ & $R_2' = X_2'$) فتصبح المعادلة كما يلي:

$$T_{\max} = \frac{KV_{ph}^2}{2X_2'} \qquad (1-37)$$

حساب عزم البدء:

يلاحظ من الشكل رقم (21-1) أن عزم البدء يزداد كلما زادت مقاومة ملفات العضو الدوار، أي أنه يمكن التحكم في قيمة عزم البدء وذلك بتغيير قيمة مقاومة ملفات العضو الدوار R_2' وذلك بإضافة مقاومة موصلة على التوالي مع ملفات العضو الدوار كما هو واضح من المنحنيات في الشكل (21-1). أما قيمة عزم البدء فيمكن إيجادها مباشرة من المعادلة (34-1) عندما يكون ($S = 1$) كما يلي:

$$T_{st} = \frac{KV_{ph}^2 R_2^{'}}{\left[(R_1 + R_2^{'})^2 + X_{eq}^2\right]} \qquad (1-38)$$

أمثلة محلولة :

مثال (8-1):

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

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

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

أ) تيار الحمل الكامل

ب) عزم الحمل الكامل

جـ) تيار البدء

د) عزم البدء

هـ) أقصى عزم للمحرك وعند أي انزلاق يحدث

الحـل:

بما أن ملفات المحرك موصلة على شكل دلتا فإن: $V_{ph} = V_L = 240\,V$

أ) لحساب تيار الحمل الكامل أو عزم الحمل الكامل يجب أولاً أن نحسب الانزلاق الذي يحدث عنده الحمل الكامل كما يلي: $S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1800 - 1710}{1800} = 0.05$

في الدائرة المكافئة التقريبية يعتبر أن $I_{ph} \cong I_2^{'}$ وبالتالي يمكن حساب تيار الحمل الكامل من (1-33) كما يلي:

$$I_2^{'} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2^{'}}{S})^2 + X_{eq}^2}}$$

$$I_2^{'} = \frac{240}{\sqrt{(0.4 + \frac{0.6}{0.05})^2 + (1+1)^2}} = 19.11\ A$$

ب) عزم الحمل الكامل يحسب بعد إيجاد التيار من المعادلة (1-31) كما يلي:

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

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

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

جـ) تيار البدء يحسب من المعادلة (1-33) عندما S=1 كما يلي:

$$I_{2st}^{'} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_1 + R_2^{'})^2 + X_{eq}^2}}$$

$$I_{2st}^{'} = \frac{240}{\sqrt{(0.4 + 0.6)^2 + (1+1)^2}} = 107.33\ \text{A}$$

د) عزم البدء يحسب مباشرة من المعادلة (1-38) أو باستخدام المعادلة (1-31) بعد التعويض عن قيمة تيار البدء في الفقرة (جـ) والتعويض عن الانزلاق بالواحد كما يلي:

$$T_{st} = K R_2^{'} I_{2st}^{'2}$$

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

هـ) العزم الأقصى يحسب مباشرة من المعادلة (37-1) ، أما الانزلاق الذي يحدث عنده هذا العزم فيحسب من المعادلة (36-1) كما يلي:

$$T_{\max} = \frac{KV_{ph}^2}{2X_2^{'}} = \frac{0.0159 \times (240)^2}{2 \times 1} = 457.92\ Nm$$

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

أسـئلة و تمارينــن

1- هل زيادة معامل الانزلاق أو نقصانه يؤثر على كفاءة المحرك؟ وَضّحْ ذلك؟
2- لماذا تهمل المفاقيد الحديدية في العضو الدوار ؟
3- هل تؤثر زيادة المفاقيد النحاسية في العضو الدوار على سرعة المحرك؟ بيّنْ ذلك؟
4- ما المقصود بعزم الدوران Torque ؟
5- ما المقصود بالسرعة الزاوية؟
6- كيف يمكن التحكم في موضع العزم الأقصى للمحرك؟
7- كيف يمكن التحكم في عزم البدء؟
8- هل التحكم في موضع العزم الأقصى يؤثر على كفاءة المحرك؟ بَيّنْ ذلك؟

9- محرك حثي ثلاثي الأوجه سرعته التزامنية 1000 rpm يعطي قدره ميكانيكية متحولة قدرها 5 hp عندما تكون سرعة العضو الدوار 935 rpm ، احسب القدرة الداخلة إلى هذا المحرك إذا كانت مفاقيد العضو الثابت 400 w.
10- محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو ستة أقطاب يتغذى من مصدر جهده 500 V وتردده 60 Hz ، يعطي قدره ميكانيكية خارجة قدرها 20 hp عندما تكون سرعته 1140 rpm ، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك 1 hp ، احسب ما يلي:
أ) معامل الانزلاق
ب) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار
جـ) القدرة الداخلة إلى المحرك إذا كانت مفاقيد العضو الثابت 1500 W
د) تيار الخط الداخل إلى المحرك إذا كان معامل القدرة 0.86

11- إذا كانت القدرة الكهربائية الداخلة إلى محرك حثي ثلاثي الأوجه ذو أربعة أقطاب هي 200 KW عندما تكون سرعته 1710 rpm ويتغذى من مصدر جهده 450 V وتردده 60Hz فإذا كانت مفاقيد العضو الثابت3 KW و المفاقيد الميكانيكية 6 KW .

احسب ما يلي:

أ) معامل الانزلاق

ب) القدرة الميكانيكية المتحولة

جـ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار

د) كفاءة المحرك

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

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار .

ب) تردد التيارات في العضو الدوار .

جـ) تيار الخط .

د) كفاءة المحرك

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

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار

ب) تردد التيارات في العضو الدوار

جـ) تيار الخط

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

أ) المفاقيد النحاسية في العضو الدوار .

ب) كفاءة المحرك .

جـ) عزم المحرك عند الحمل الكامل .

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

$$R_1 = 0.12\Omega \qquad R_2' = 0.16\Omega$$

$$X_1 = 0.45\Omega \qquad X_2' = 0.52\Omega$$

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

أ) تيار البدء .

ب) عزم البدء .

جـ) العزم الأقصى للمحرك وعند أي انزلاق .

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

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

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

$$X_1 = 0.82\Omega \qquad X_2' = 0.86\Omega$$

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

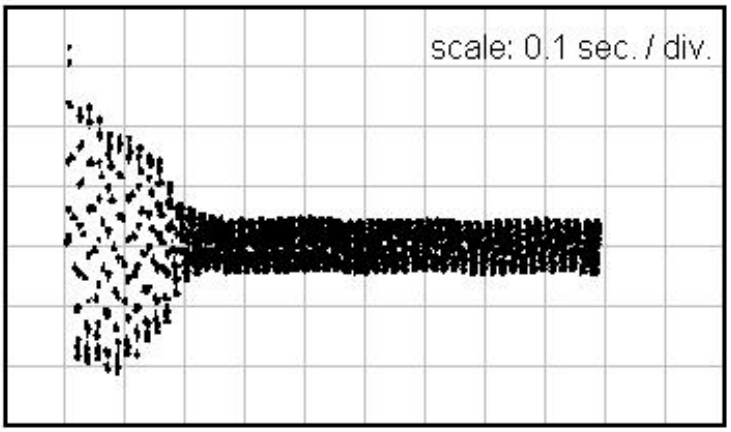
أ) عزم الحمل الكامل

ب) عزم البدء

الفصل الرابع : طرق بدء الحركة والتحكم في السرعة

أولا : طرق بدء الحركة

بالرجوع إلى الدائرة المكافئة نجد أن المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ تعتمد على قيمة الانزلاق ، وحيث إن قيمة الانزلاق تكون مساوية للواحد عند بدء تشغيل المحرك ، فهذا يعني أن المقاومة $R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ أصبحت مقصورة عند البدء لأن ($R_2'\left(\frac{1-1}{1}\right)=0$) وهذا يعني أن تيار البدء أصبح عالياً جداً. (تيار البدء عادةً يتراوح من 6 إلى 8 أضعاف التيار المقنن) ،انظر الشكل (22-1).



الشكل رقم 22-1 : تيار البدء لمحرك صغير (الصورة بواسطة الأوسيلسكوب)

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

1- رفع درجة حرارة ملفات المحرك مما يؤدي مع تكرار البدء إلى انهيار عزلها .

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

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

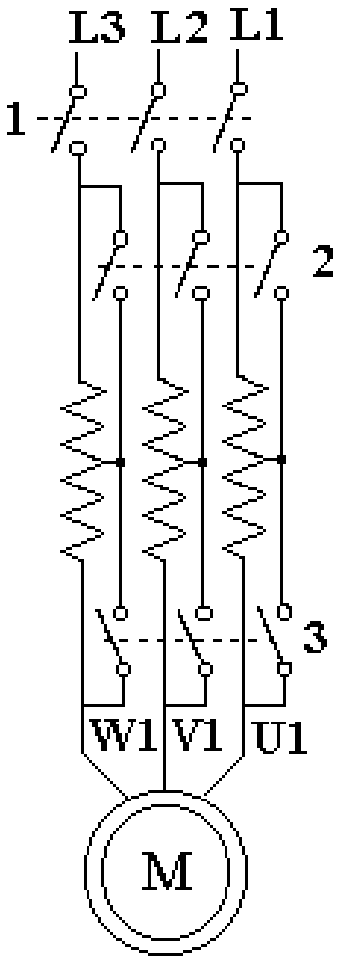
لذلك لابد من إيجاد وسائل لتقليل قيمة تيار البدء خصوصاً في المحركات الكبيرة.

فيما يلي عدة طرق لتقليل تيار البدء جميعها تعتمد على المعادلة (39-1) وذلك إما بتقليل البسط (الجهد) و إما بزيادة المقام (مقاومات العضو الثابت أو الدوار).

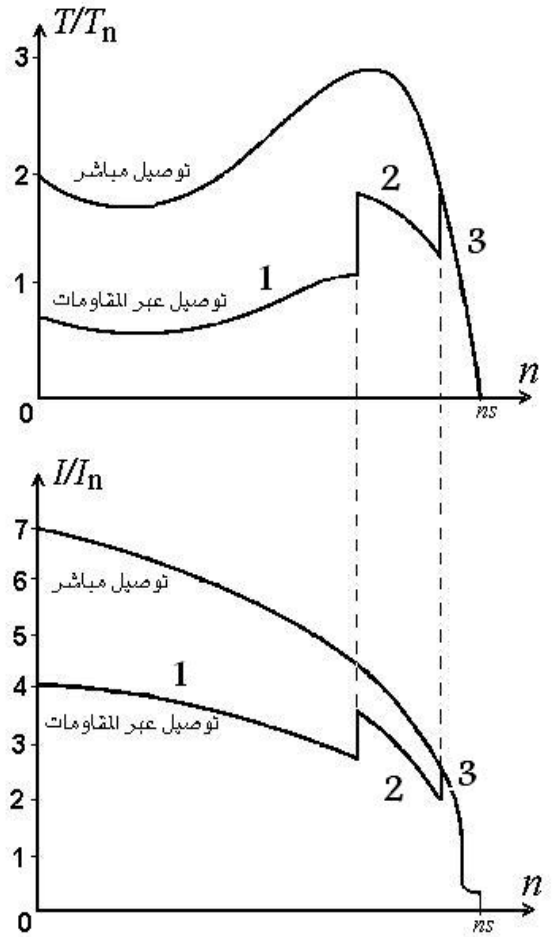
$$I'_{2st} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + X_{eq}^2}} \qquad (1-39)$$

1ـ توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت :

إن توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت يؤدي إلى تقليل الجهد المسلط على العضو الثابت وبالتالي يقل تيار البدء طبقاً للمعادلة (1-39) ، ثم بعد اجتياز فترة البدء يمكن إلغاء هذه المقاومات.تدريجياً. عيب هذه الطريقة هو زيادة المفاقيد النحاسية مما يجعلها غير مناسبة للاستخدام خصوصاً مع المحركات الكبيرة انظر الشكلين (1-23) و (1-24).



الشكل (1-23): مخطط التوصيل باستخدام مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت



الشكل (1-24): منحنى العزم والتيار

مراحل التشغيل:

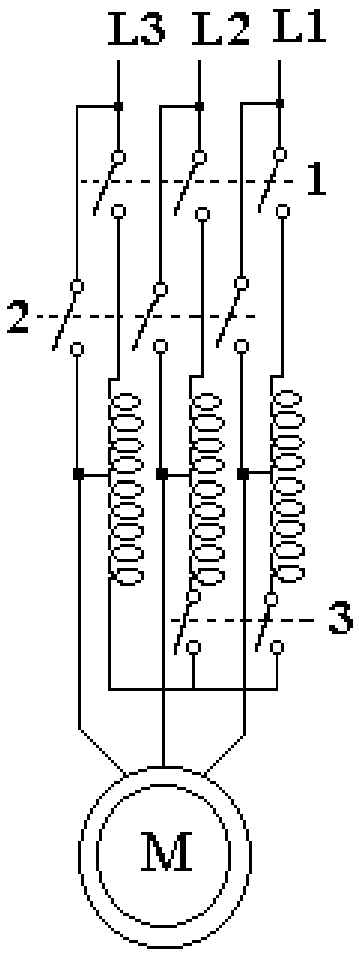
المرحلة الأولى: يتم التوصيل عبر كامل المقاومة بواسطة إغلاق القاطع رقم 1 ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 1.

المرحلة الثانية: يتم التوصيل عبر نصف المقاومة بواسطة إغلاق القاطع رقم 2 ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 2.

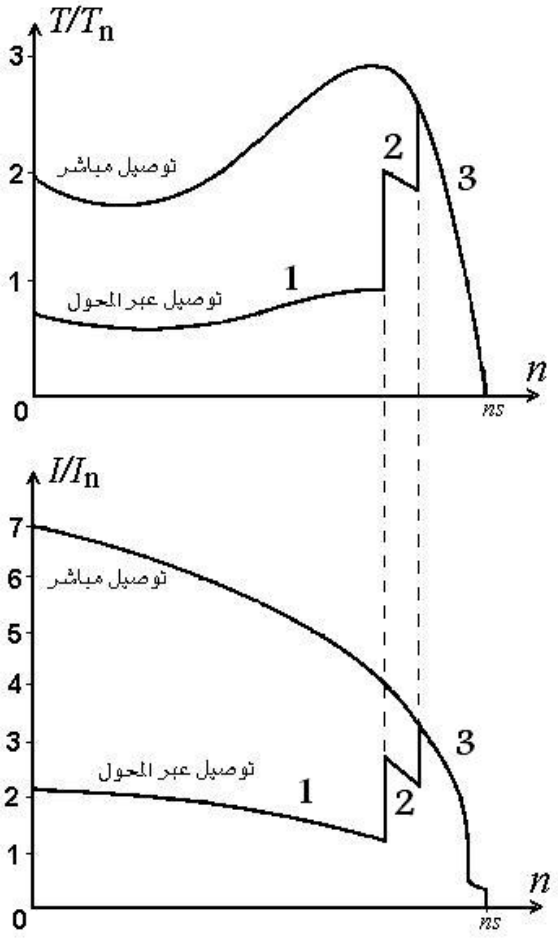
المرحلة الثالثة: يتم التوصيل المباشر بإزالة الجزء المتبقي من المقاومة بواسطة إغلاق القاطع رقم 3 ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 3.

2- باستخدام محول ذاتي (التحكم في الجهد):

في هذه الطريقة يتم توصيل أطراف العضو الثابت إلى محول ذاتي ثلاثي الأوجه بحيث يخفض الجهد المسلط على ملفات العضو الثابت إلى قيمة تتناسب مع تيار البدء المسموح به ، وبعد اجتياز المحرك لفترة البدء يتم تسليط جهد المصدر كاملاً على ملفات العضو الثابت وذلك بفصل المحول. هذه الطريقة مثالية جداً حيث لا يوجد فيها أي قدره مفقودة. كما أنها تعتبر الخيار الأفضل للمحركات التي تم توصيل ملفاتها داخلياً من قبل المصنع على شكل نجمة. انظر الشكلين (25-1) و (26-1).



الشكل (25-1): مخطط التوصيل باستخدام محول ذاتي



الشكل (26-1): منحنى العزم والتيار

مراحل التشغيل:

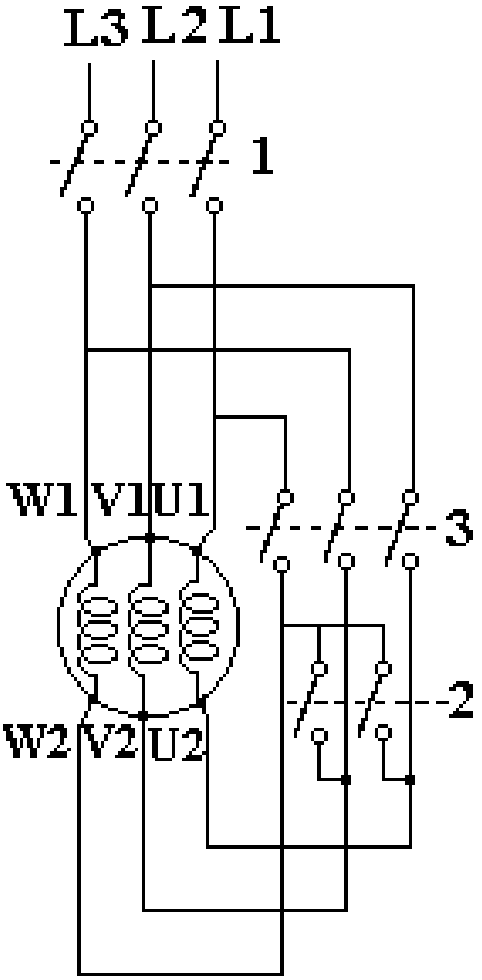
المرحلة الأولى: يتم التوصيل عبر المحول الذاتي بواسطة إغلاق القاطعين رقم 3 و 1 معاً ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 1.

المرحلة الثانية: يتم فتح القاطع رقم 3 مع بقاء القاطع رقم 1 مغلقاً ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 2.

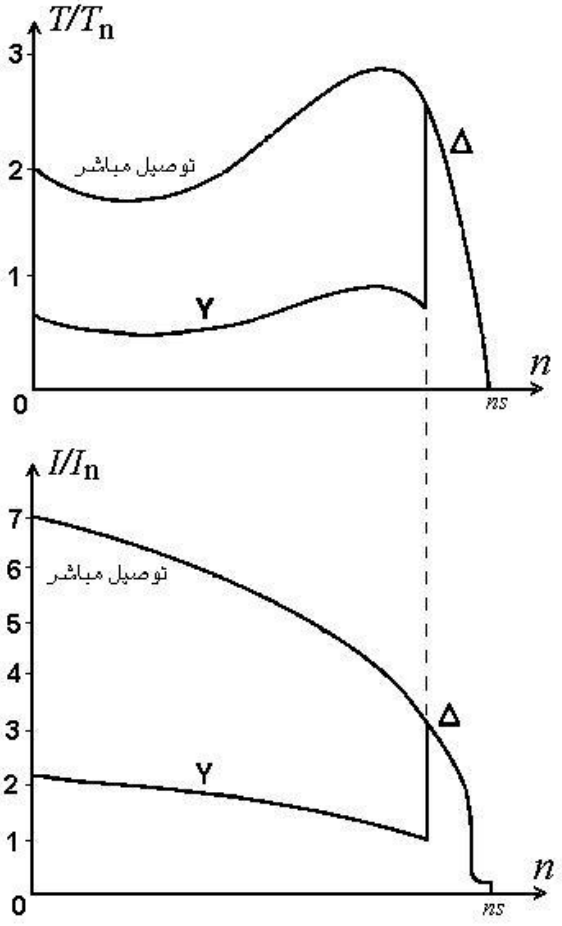
المرحلة الثالثة: يتم التوصيل المباشر بإزالة المحول الذاتي تماماً بواسطة إغلاق القاطع رقم 2 ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 3.

3ـ طريقة تغيير توصيل ملفات العضو الثابت من نجمة إلى دلتا:

هذه الطريقة مناسبة للمحركات ذات الستة أطراف والتي توصل ملفاتها على شكل دلتا أثناء التشغيل العادي حيث توصل ملفات العضو الثابت عند البدء على شكل نجمة ونتيجةً لذلك فإن جهد الوجه سيقل إلى ($1/\sqrt{3}$) من جهد المصدر وينخفض تيار الخط إلى (1/3) التيار المار في حالة التوصيل على شكل دلتا، وبعد أن يجتاز المحرك فترة البدء يتم إعادة توصيل الملفات على شكل دلتا ، انظر الشكلين (27-1) و (28-1).



الشكل (27-1): مخطط التوصيل باستخدام توصيلة نجمة دلتا



الشكل (28-1): منحنى العزم والتيار

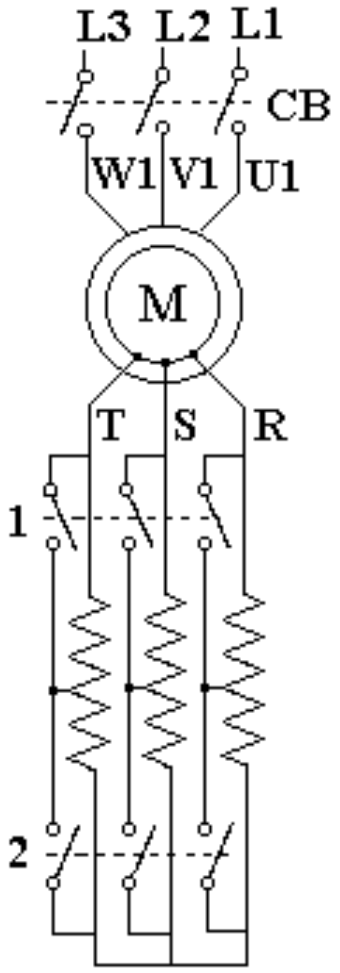
مراحل التشغيل:

المرحلة الأولى: يتم التشغيل بواسطة إغلاق القاطعين رقم 2 و1 وبهذه الحالة تكون ملفات المحرك موصلة على شكل Y ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرمز Y.

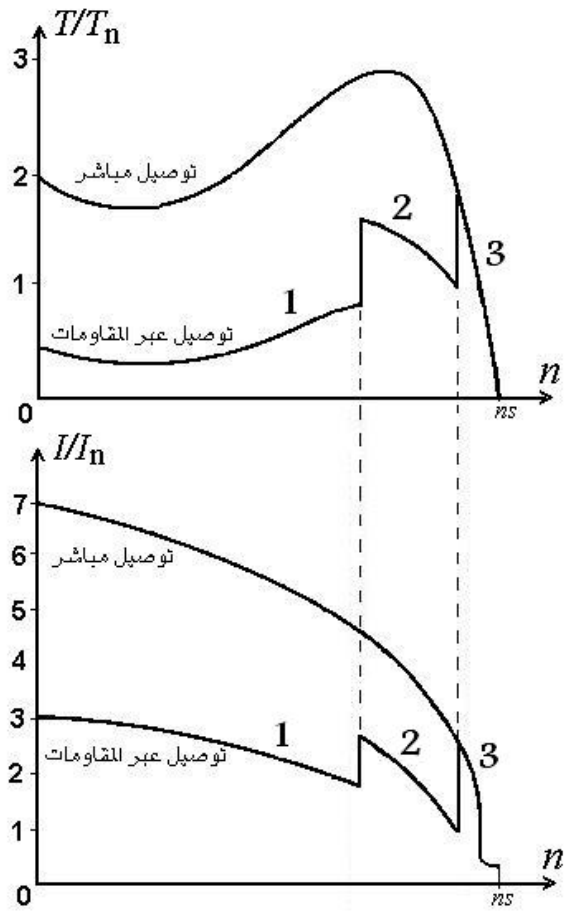
المرحلة الثانية: يتم التشغيل بواسطة فتح القاطع رقم 2 وإغلاق القاطع رقم 3 مع بقاء القاطع رقم 1 مغلقاً وبهذه الحالة تكون ملفات المحرك موصلة على شكل Δ ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرمز Δ.

4ـ إضافة مقاومات موصلة على التوالي مع ملفات العضو الدوار:

هذه الطريقة خاصة فقط بالمحرك ذو حلقات الانزلاق حيث يمكن توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدوار، وبالتالي فإن تيار البدء يقل نتيجة لزيادة المقاومة في المعادلة (1-39) ، وبعد أن يجتاز المحرك فترة البدء يتم إزالة هذه المقاومات تدريجياً وذلك لتجنب زيادة المفاقيد في دائرة العضو الدوار. هذه الطريقة تعتبر الأفضل للمحركات ذات حلقات الانزلاق ، كما أنها تزيد من عزم البدء للمحرك وذلك لأن مقاومة البدء تضاف إلى R_2' وبالتالي فإن الانزلاق الذي يحدث عنده أعلى عزم يزداد وبالتالي ينتقل موضع العزم الأقصى إلى الأمام مما يؤدي إلى زيادة عزم البدء، انظر الشكلين (1-29) و (1-30).



الشكل (1-29): مخطط التوصيل باستخدام مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدوار



الشكل (1-30): منحنى العزم والتيار

مراحل التشغيل:

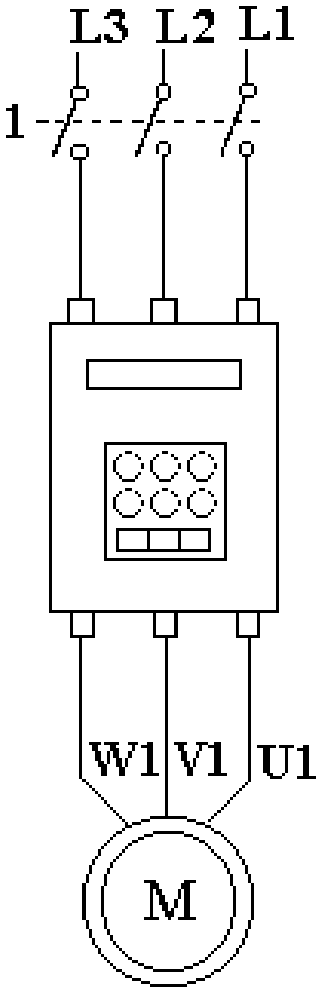
المرحلة الأولى: يتم قصر أطراف العضو الدوار عبر كامل المقاومة المضافة بواسطة فتح القاطعين رقم 2 و1 ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 1.

المرحلة الثانية: يتم القصر عبر نصف المقاومة المضافة بواسطة إغلاق القاطع رقم 1 فقط ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 2.

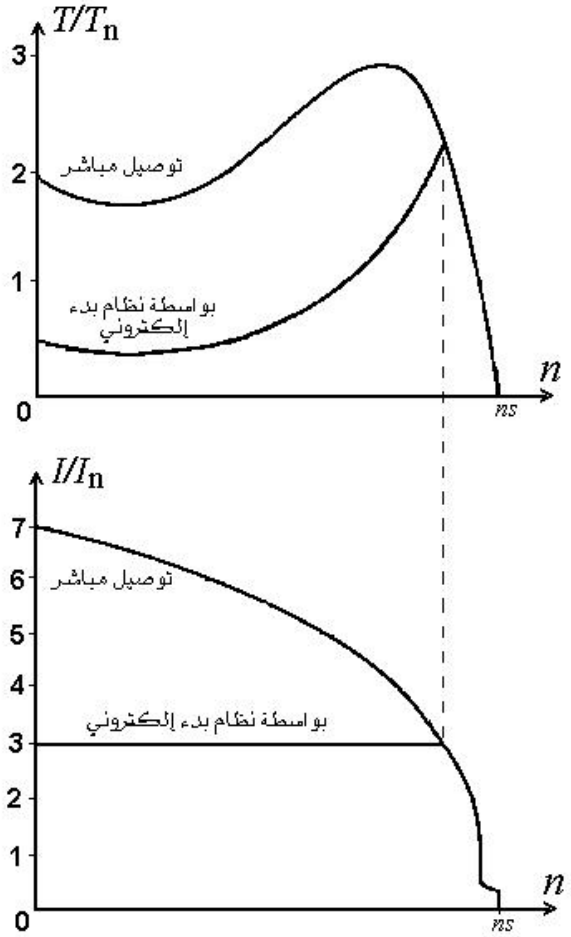
المرحلة الثالثة: يتم قصر أطراف العضو الدوار مباشرة بواسطة إغلاق القاطع رقم 2 بالإضافة إلى القاطع رقم 1 ويقابله على منحنيات التشغيل الجزء المشار إليه بالرقم 3.

5ـ باستخدام أجهزة إلكترونية:

ظهرت حديثاً أجهزة لبدء المحركات الكهربائية تستخدم تقنية إلكترونيات القدرة ، هذه الأجهزة تعتمد على مبدأ التحكم الدقيق والناعم في الجهد مع مراقبة التيار في نفس الوقت وبالتالي تجعل التيار ثابتاً طيلة فترة البدء مع عزم مستقر. هذه الطريقة تعتبر الأفضل وذلك لأنها توفر للمحرك تسارعاً ناعماً بدون وقفات أو قفزات مفاجئة أو تذبذب أو إجهاد ميكانيكي كما هو الحال في الطرق التقليدية ، كما أن هذه الأجهزة تتوفر فيها جميع أنواع الحماية التي يتطلبها المحرك عادةً مما يعني توفير تكلفة أجهزة الحماية مقابل ارتفاع ثمن الجهاز، كما أنها أيضا تستخدم أثناء فرملة المحرك. هذه الأجهزة متوفرة بقدرات تصل إلى 500 kw، انظر الشكلين (31-1) و (32-1).



الشكل (1-31): مخطط التوصيل باستخدام أجهزة الكترونية



الشكل (1-32): منحنى العزم والتيار

ثانيا : التحكم في السرعة

المحرك الحثي ثلاثي الأوجه يعتبر المحرك المثالي للتطبيقات التي لا تتطلب تغيراً في السرعة وذلك لأن سرعته ثابتة تقريباً عند قيمة أقل من السرعة التزامنية بقدر بسيط وعندما يتغير الحمل تتغير سرعته بشكل طفيف. ، ولذلك فهو يعتبر محركاً ذا سرعة ثابتة تقريباً. ونظراً لوجود بعض التطبيقات التي تتطلب التحكم في السرعة. يمكن التحكم المحدود في سرعة المحرك بعدد من الطرق. بالرجوع إلى المعادلة رقم (4-1) نجد أن سرعة العضو الدوار يمكن التحكم فيها إما بتغيير الانزلاق أو بتغيير السرعة التزامنية، التي يمكن أن تتغير بتغير عدد الأقطاب أو بتغير تردد المصدر وذلك طبقاً للمعادلة (1-1). وبناءً عليه يمكن التحكم في سرعة المحرك الحثي ثلاثي الأوجه بإحدى ثلاث طرق: بتغيير الانزلاق أو بتغيير عدد الأقطاب أو بتغيير تردد المصدر.

1ـ تغيير قيمة الانزلاق:

هذه الطريقة تستخدم فقط مع المحركات ذات حلقات الانزلاق وذلك بتوصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدوار ، انظر الشكل (29-1). إن أي تغيير في مقاومة ملفات العضو الدوار سيؤدي إلى تغيير موضع العزم الأقصى طبقاً للمعادلة (37-1) وبالتالي تتغير السرعة مع تغير الانزلاق طبقاً للمعادلة (4-1).

هذه الطريقة تعطي تحكماً محدوداً في السرعة و يجبذ أن لا يزيد عن 15% من السرعة التزامنية وذلك لأن زيادة هذه المقاومة تؤدي إلى زيادة المفاقيد النحاسية في العضو الدوار وبالتالي قلة كفاءة المحرك.

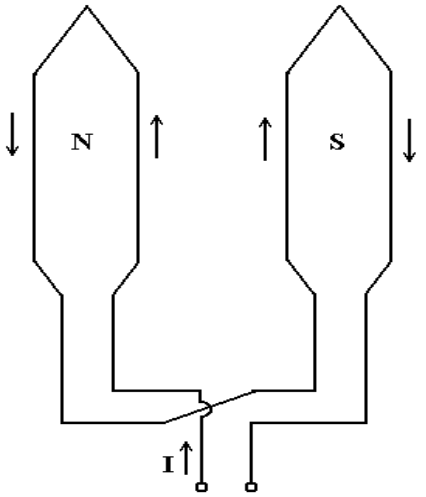
2ـ تغيير عدد الأقطاب:

يمكن تغيير عدد أقطاب العضو الثابت في المحرك الحثي ذو القفص السنجابي بإعادة توصيل ملفاته بطريقة مختلفة بحيث نحصل على نصف عدد الأقطاب أو الضعف و بهذه الطريقة يصبح لدينا سرعتان تزامنيتان. فإذا كانت الأقطاب الأساسية قطبين كما هو موضح في الشكل (33-1) يمكن إعادة التوصيل بحيث تصبح أربعة أقطاب و بالتالي تقل السرعة إلى النصف كما هو موضح في الشكل (34-1) .

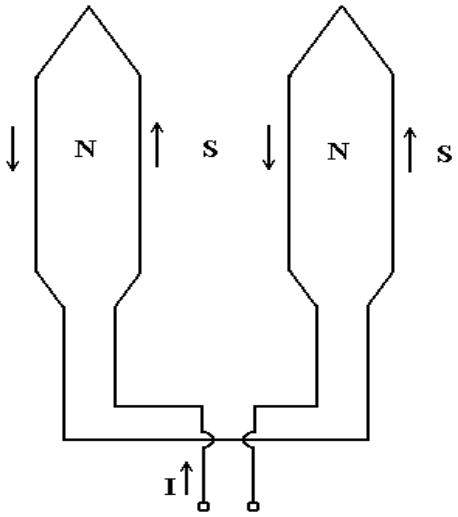
إذا كانت هذه الطريقة لا تعطي السرعة المطلوبة فإنه بالإمكان وضع طبقتين منفصلتين من الملفات في العضو الثابت كل طبقة ذات عدد من الأقطاب يختلف عن الآخر ، مثلاً يمكن أن

تكون الطبقة الأولى ذات ثمانية أقطاب بينما الثانية تكون ذات ستة أقطاب، كما أنه بالإمكان دمج الطريقتين معاً لنحصل على محرك ذي أربع سرعات.

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



الشكل (1-33): توصيل الملفات على شكل قطبين



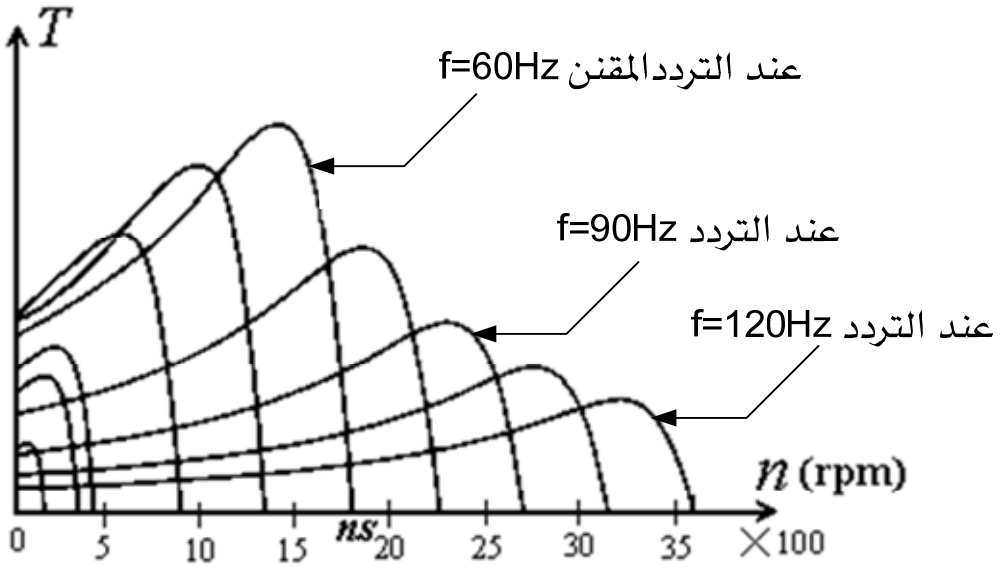
الشكل (1-34): توصيل الملفات على شكل أربعة أقطاب

3ـ تغيير تردد المصدر:

يمكن التحكم في السرعة التزامنية للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه عن طريق التحكم في تردد المصدر المغذي لملفات العضو الثابت، و هذا يتطلب وجود مصدر جهد ثلاثي الأوجه ذو تردد قابل للتغيير. هذا النوع من المصادر هو عبارة عن أجهزة تحكم إلكترونية ذات قدرات عالية (cycloconverter).

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 إلى تحكم دقيق في السرعة.

الشكل (35-1) يوضح منحنيات (العزم و السرعة) لمحرك ذو أربعة أقطاب عند ترددات مختلفة، ويلاحظ أن العزم يزداد عند انخفاض التردد وذلك بسبب زيادة الجهد والعكس يحدث عند زيادة التردد وذلك للمحافظة على كمية ثابتة للفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية.



الشكل (35-1): منحنيات (العزم و السرعة) لمحرك ذو أربعة أقطاب عند ترددات مختلفة

أسـئلة وتمـارين

1- لماذا يكون تيار البدء عالياً في المحركات الحثية؟

2- هل يفضل توصيل المقاومات على التوالي مع ملفات العضو الثابت من أجل تقليل تيار البدء، ولماذا؟

3- ما مميزات استخدام المحول الذاتي في عملية البدء؟

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

5- اشرح كيف تؤدي إضافة مقاومة إلى ملفات العضو الدوار إلى تقليل تيار البدء؟

6- اذكر مميزات أجهزة البدء الإلكترونية؟

7- وَضّحْ كيف يمكن التحكم في سرعة المحرك عن طريق إضافة مقاومة إلى دائرة العضو الدوار

8- كيف يمكن الحصول على محرك حثي ذو أربع سرعات؟

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

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

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

ب) عند زيادة مقاومة العضو الدوار فإن تيار البدء (يقل / يزداد)

جـ) عند زيادة مقاومة العضو الدوار فإن سرعة المحرك (تقل / تزداد)

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

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

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

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

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

الوحدة الثانية

المحركات الحثية أحادية الوجه

الهدف العام للوحدة: معرفة أنواع وتركيب ونظرية عمل وخواص المحركات الحثية أحادية الوجه وطرق

بدء حركتها واستخداماتها.

الأهداف التفصيلية :

1- أن يلم المتدرب بأنواع و تركيب و استخدامات المحركات الحثية أحادية الوجه.

2- أن يفهم المتدرب نظرية عمل المحركات الحثية أحادية الوجه.

3- أن يلم المتدرب بأنواع وخواص وتطبيقات المحركات الحثية أحادية الوجه.

4- أن يعرف المتدرب تركيب وكيفية عمل الأنواع المختلفة من المحركات الحثية أحادية

الوجه.

5- أن يفهم المتدرب كيفية تحليل المجال المغناطيسي إلى مجالين دوارين كأساس لحساب

العزم المتولد في المحركات الحثية أحادية الوجه.

6- أن يعرف المتدرب استخدامات المحركات الحثية أحادية الوجه.

7- أن يميزالمتدرب بين الطرق المختلفة لبدء حركة المحركات الحثية أحادية الوجه ومميزات كل منها.

8- أن يعرف المتدرب منحنيات الخواص لأنواع المحركات الحثية أحادية الوجه.

الوحدة الثانية :المحركات الحثية أحادية الوجه

التركيب:

تتكون المحركات الحثية أحاديه الوجه، من ملفات أحادية الوجه على العضو الثابت، وعضو دوار ذو قفص سنجابي كما يبين ذلك الشكل (1-2)، فتركيبها يشبه المحركات الحثية ثلاثية الأوجه ذات القفص السنجابي، عدا ما يختص بملفات العضو الثابت حيث تكون أحادية الوجه. هذه الملفات موزعة في مجاري العضو الثابت بطريقة تجعلنا نحصل على قوة دافعة مغناطيسية موزعة توزيع جيبي في الفراغ، وبالتالي نحصل على منحنى جيبي لكثافة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية. ومن أهم سمات هذه المحركات أنها لا تمتلك عزم لبدء الحركة، ولكن إذا بدأت حركتها بأي وسيلة مساعدة في اتجاه معين فسوف تستمر في الدوران في نفس ذلك الاتجاه.

الشكل رقم (1-2): العضو الثابت والعضو الدوار لمحرك حثي أحادي الوجه

نظرية المجال المغناطيسي المزدوج الدوار:

عند تغذية ملف العضو الثابت من مصدر جهد متردد، ذو موجة جيبيه ، فإن موجة القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة، تكون موزعة توزيعاً جيبياً في الثغرة الهوائية (θ)، و متناسبة جيبياً مع الزمن (t)، ويمكن كتابتها كدالة جيبيه في الفراغ والزمن كما توضح ذلك المعادلة (1-2):

$$F_1 = F_{1max}\cos(\omega_s \cdot t).\cos(\theta) \qquad (2-1)$$

هذه القوة الدافعة المغناطيسية تولد مجالا مغناطيسيا، له نفس الخواص في الفراغ و الزمن، ويمكن تمثيله رياضيا بالمعادلة (2-2):

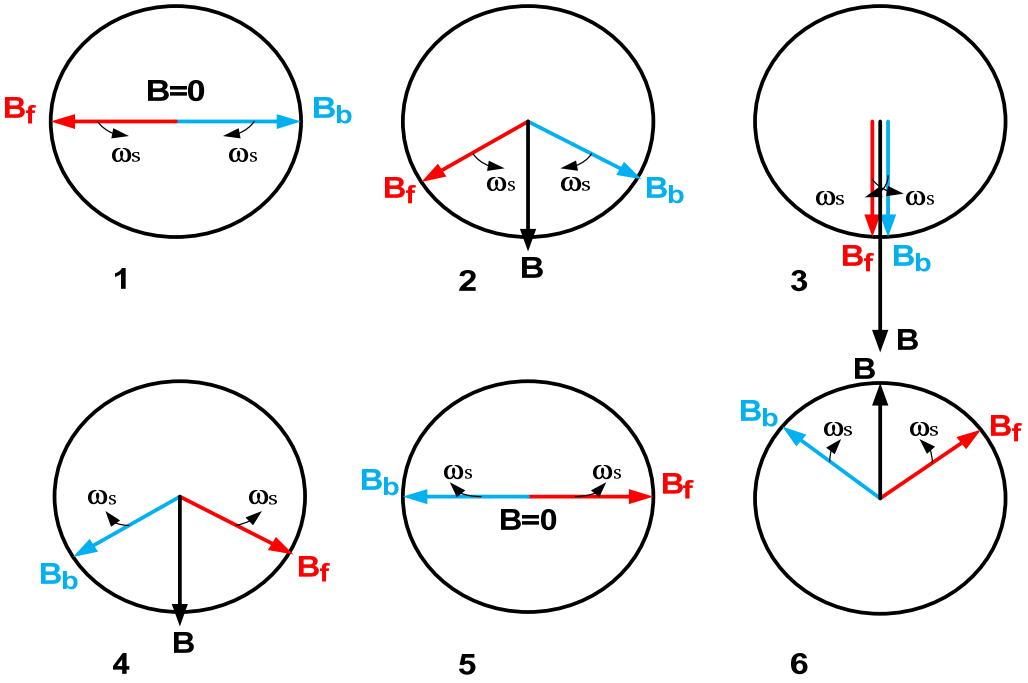
$$B_1 = B_{1max}\ \cos(\omega_s \cdot t).\cos(\theta) \qquad (2-2)$$

يمكن تحليل هذا المجال المغناطيسي إلى مجالين مغناطيسيين دوارين، الأول يدور عكس عقارب الساعة ويسمى بالمجال المغناطيسي الدوار الأمامي، والمجال الآخر يدور في اتجاه عقارب الساعة ويسمى بالمجال المغناطيسي الدوار الخلفي، المعادلة (2-3) توضح هذا التحليل:

$$B_1 = \frac{1}{2} B_{1max}\ \cos(\theta - \omega_s \cdot t) + \frac{1}{2} B_{1max}\ \cos(\theta + \omega_s \cdot t) \qquad (2-3)$$

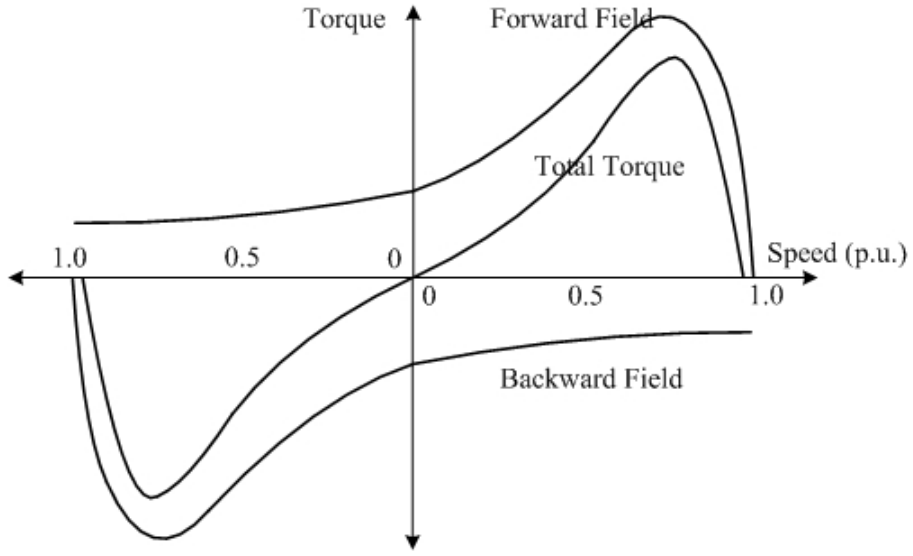
حيث يمثل الحد الأول مجالاً مغناطيسياً جيبياً دوارا بالسرعة التزامنية وذو كثافة عظمى $\frac{1}{2}B_{1max}$، كما يمثل الحد الثاني مجالاً مغناطيسياً جيبياً دوارا بنفس الكثافة العظمى، ويدور المجالان في اتجاهين متضادين بنفس السرعة التزامنية ω_s حول محيط الثغرة الهوائية. كلاهما يولد عزم دوران في الاتجاه الذي يدور فيه، كما في حالة المحركات الحثية ثلاثية الأوجه. ، باستخدام الرسم التوضيحي المبين في الشكل (2-2)، حيث المتجه الدوار $\vec{B}_f$ يمثل المجال الأمامي والمتجه $\vec{B}_b$ يمثل المجال الخلفي يلاحظ أن مجموع هذين المتجهين $\vec{B}$ يكون دائماً في اتجاه رأسي وتتغير قيمته مع دوران المتجهين $\vec{B}_f$ و $\vec{B}_b$ و هو يعادل المجال المغناطيسي النابض الناشئ عن ملف أحادي الوجه.

$$\vec{B} = \vec{B}_f + \vec{B}_b \qquad (2-3)$$



الشكل (2-2): كيفية تحليل المجال النابض إلى مجالين دوارين

إذا يمكننا الحصول على خواص المحرك الحثي أحادي الوجه، بجمع خواص محركين متماثلين، كل منهما ثلاثي الأوجه و يدور عكس الآخر. إذا قمنا برسم منحنى العلاقة بين العزم والسرعة، لكل من المجالين، نستطيع الحصول على منحنى خواص المحرك الحثي أحادي الوجه (مجموع خواص المحركين)، كما هو مبين في الشكل (2-3)



الشكل رقم (2-3): منحنى العزم مع السرعة للمجالين الأمامي والخلفي والمحصلة.

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).

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:

$$S_f = S = \frac{(n_s - n)}{n_s} \qquad (2-4)$$

بينما يدور المجال الخلفي عكس الاتجاه بالسرعة n_s، أي أنه يدور بالسرعة (n_s+n) بالنسبة للعضو الدوار، فيكون معامل الانزلاق للمجال الخلفي S_b مساوياً:

$$S_b = \frac{(n_s + n)}{n_s} = 2 - \mathrm{S} \qquad (2-5)$$

عند ظروف التشغيل العادية بمعامل انزلاق في حدود 5% (S=0.05) للمجال الأمامي، تكون قيمة معامل الانزلاق للمجال الخلفي كبيرة جداً مقارنة بقيمة معامل الانزلاق للمجال الأمامي (S_b=1.95).

مثال (2-1):

محرك حثي أحادي الوجه، 230V، 60Hz، ذو أربعة أقطاب يعمل عند الحمل الكامل بانزلاق مقداره 4% احسب ما يلي:

أ) معامل الانزلاق للمجال الخلفي S_b

ب) السرعة التزامنية n_s

ج) سرعة المحرك عند الحمل الكامل n.

الحل:

أ) معامل الانزلاق للمجال الخلفي

$$S_b = 2 - S = 2 - 0.04 = 0.96$$

ب) السرعة التزامنية

$$n_s = \frac{120 f_s}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800\ rpm$$

ج) سرعة المحرك عند الحمل الكامل

$$n = n_s (1 - S) = 0.96 \times 1800 = 1728\ rpm$$

طرق البدء ومنحنيات الخواص للمحركات الحثية أحادية الوجه :

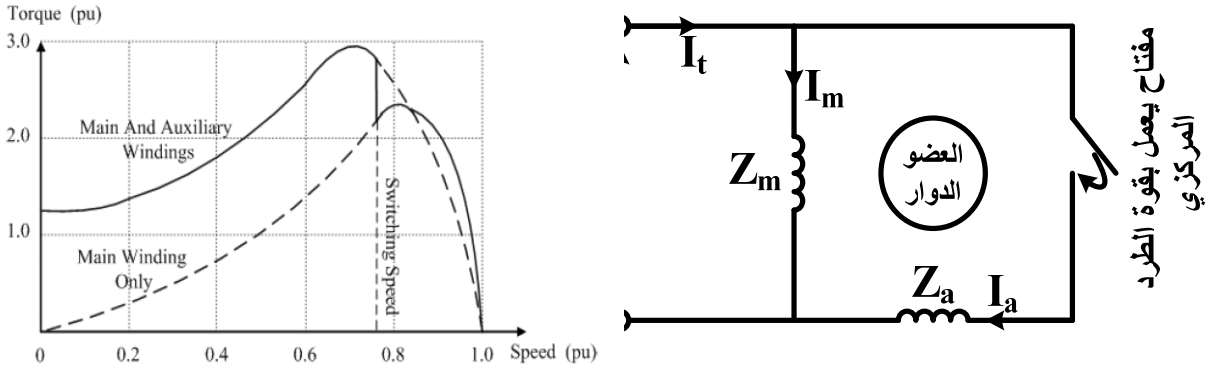
المحركات الحثية أحادية الوجه تصنف طبقاً للطريقة المستخدمة لبدء حركتها، كما يطلق عليها أسماء تصف الطريقة التي استخدمت لبدء حركتها، في ما يلي نتناول وصفا لأنواع المحركات الحثية أحادية الوجه الشائعة الاستخدام:

المحرك المشطور الوجه : (Split-Phase Motor)

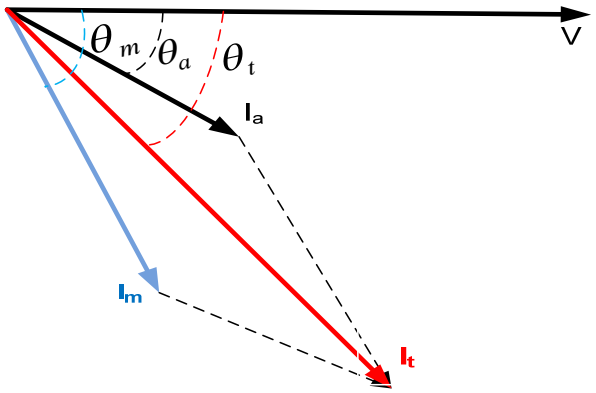
المحرك المشطور الوجه يحتوي على ملفين في العضو الثابت، الأول هو الملف الرئيسي، والثاني هو الملف المساعد (أو ملف بدء الحركة)، كل من هذين الملفين موزع في مجاري العضو الثابت، بحيث تكون الزاوية بين محوري الملفين تسعون درجة كهربائية في الفراغ، وبطريقة تجعلنا نحصل على مجال مغناطيسي موزع توزيعاً جيبياً في الفراغ، لكل من الملفين على حدة، الشكل (2-4) يبين دائرة توصيل هذين الملفين و كذلك منحنى العزم مع السرعة لهذا المحرك . تستعمل أسلاك ذات مساحة مقطع صغيرة للملفات المساعدة ، فتكون نسبة مقاومتها إلى ممانعتها الحثية كبيرة ($Z_a = R_a + jX_a$)، في حين تكون نسبة المقاومة إلى الممانعة الحثية للملفات الرئيسة أقل من ذلك ($Z_m = R_m + jX_m$)، وحيث أن 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 (2-5). 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.

إذا تيار الملفين يمثل نظاماً ثنائي الوجه غير متزن، والمحرك يكافئ محركاً ذو وجهين غير متزن، فينشأ مجال مغناطيسي دوار، ينتج عنه عزم دوران يمكن العضو الدوار من الدوران.



الشكل (2-4): كيفية التوصيل وخواص المحرك المشطور الوجه.



الشكل (2-5): مخطط المتجهات عند بدء الحركة للمحرك 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 (75%)من سرعة التزامن، ويستمر المحرك بعد ذلك في الدوران بالملف الرئيسي فقط.

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 حركة متوسط القيمة وتيار منخفض أثناء بدء الحركة، وتستخدم في المراوح و والشفاطات ومضخات الطرد المركزي وفي الأجهزة المنزلية والمكتبية.

مثال (2-2):

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

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

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

احسب عند بدء الحركة:

1- التيار المار في الملف الرئيسي

2- التيار المار في الملف المساعد

3- التيار الكلي للمحرك

4- معامل القدرة

5- الزاوية بين تياري الملف الرئيسي والملف المساعد.

الحل:

التيار في كل من الملف الرئيسي والملف المساعد:

التيار الملف الرئيسي:

$$I_m = \frac{V}{Z_m} = \frac{110\angle 0}{1.2 + j25} = \frac{110\angle 0}{25.03\angle 87.252}$$

$$I_m = 4\angle -87.252^\circ \quad A$$

$$I_a = \frac{V}{Z_a} = \frac{110\angle 0}{12+j5} = \frac{110\angle 0}{13\angle 22.62}$$

تيار الملف المساعد:

$$I_a = 8.46\angle -22.62^\circ \quad A$$

التيار الكلي المسحوب من المصدر:

$$I_t = I_m + I_a$$

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

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

$$I_t = 8.02 - j7.25 = 10.8\angle -42.11^\circ \quad A$$

معامل القدرة

$$Cos(-42.11) = 0.742$$

الزاوية بين تياري الملف الرئيسي والملف المساعد:

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

$$I_m \ lags \ \ I_a \ by \ \ 64.62^\circ$$

المحركات ذات المكثفات: (Capacitor Motors)

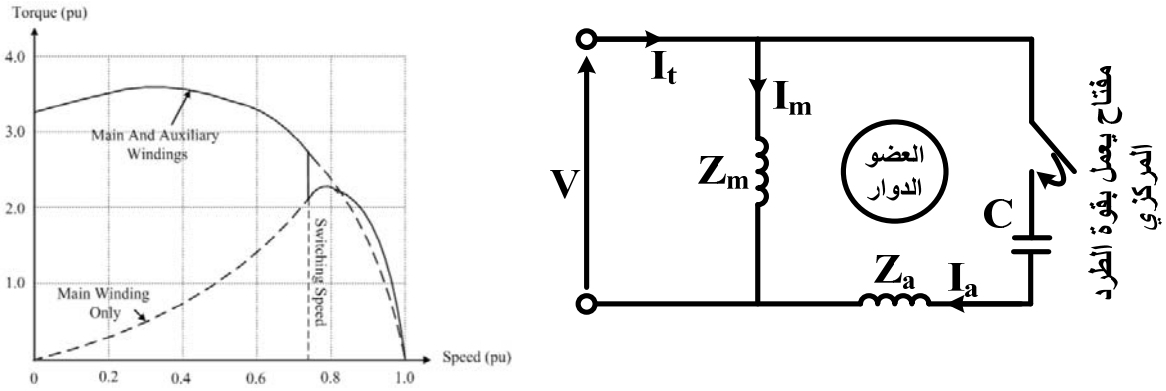
يمكن أن تستخدم المكثفات لتحسين خواص وأداء المحرك الحثي أحادي الوجه، أثناء بدء الحركة أو أثناء التشغيل أو كليهما، اعتماداً على حجم ونوع المكثف المستخدم وطريقة توصيله.

محرك ذو مكثف

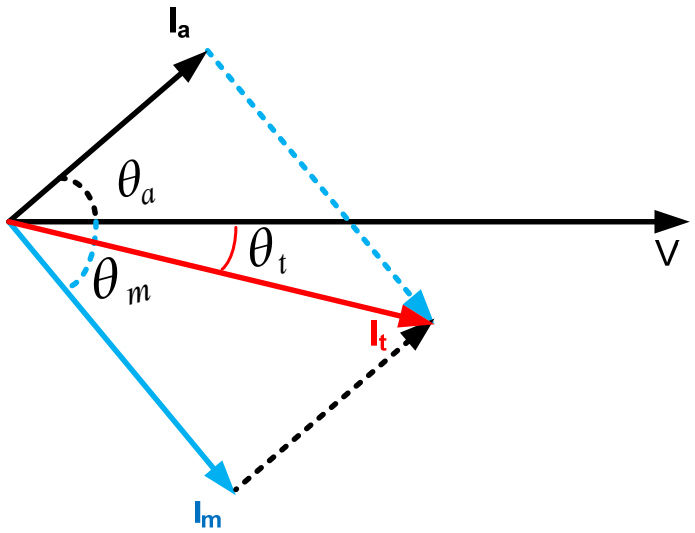
محرك ذو مكثفين

المحرك ذو مكثف البدء: Capacitor –Start Motor

يحتوي المحرك ذو مكثف بدء الحركة على ملفات رئيسة وملفات مساعدة على العضو الثابت، الزاوية بين تياري الملفين، نحصل عليها بواسطة مكثف موصل على التوالي مع الملفات المساعدة، كما هو مبين في الشكل (6-2)، يتم فصل الملف المساعد بعد بدء الحركة مثل النوع السابق، وبالتالي يمكن تصميم الملفات المساعدة والمكثف، بحيث يكون تشغيلهما تشغيلاً متقطعاً، مما يساعد على تقليل كلفة كل منهما ومن الممكن استخدام مكثف بدء الحركة ذو 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 كما يبين ذلك الشكل (7-2)، وبذلك نحصل على خصائص محرك متزن ذو وجهين عند بدء الحركة.



الشكل (2-6): كيفية توصيل وخواص المحرك ذو مكثف البدء

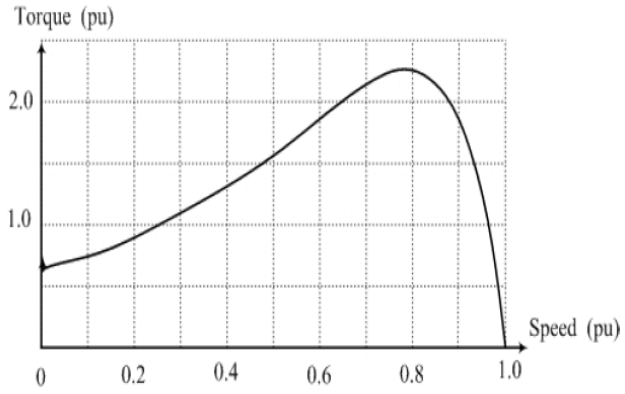


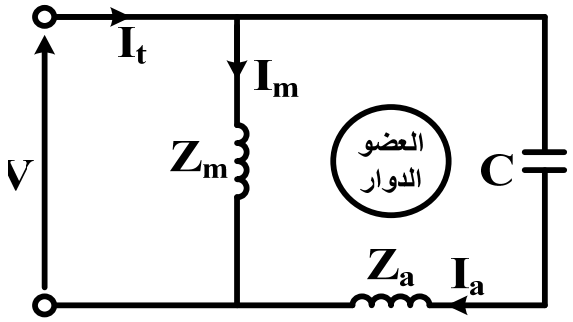
الشكل (2-7): مخطط المتجهات للمحرك ذو مكثف البدء

كما يبين الشكل (2-6) أيضا منحنى الخواص للمحرك ذو مكثف البدء ، ومن أهم خصائصه العزم الكبير المتولد عند بدء الحركة، حيث يبدأ المحرك الدوران والملفين موصلين مما يعطي عزم دوران كبير ثم تفصل الملفات المساعدة ويستمر المحرك في الدوران بالملف الرئيسي فقط أثناء التشغيل. يستخدم هذا النوع من المحركات في الضواغط والمضخات والثلاجات، وأجهزة التبريد والتكييف وفي الأحمال التي تتطلب عزماً كبيراً لبدء حركتها.

المحرك ذو المكثف الدائم: Permanent-Capacitor Motor

في المحرك ذو 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 (8-2) يبين كيفية توصيل الملفات كما يبين أيضاً منحنى خواص المحرك.

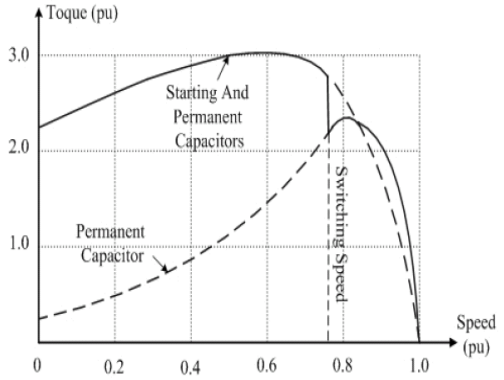


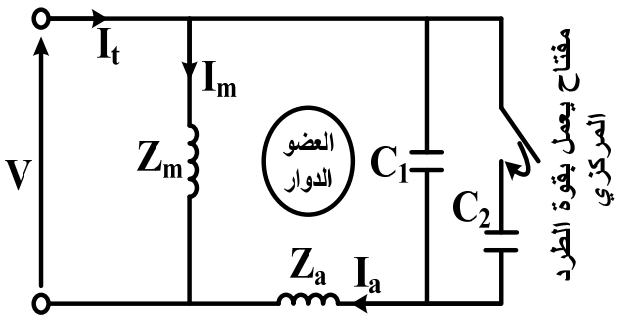


الشكل (8-2): كيفية توصيل وخواص المحرك ذو المكثف الدائم

تصمم الملفات المساعدة والمكثف على أساس التشغيل المستمر، بحيث يصبح المحرك مكافئ لمحرك مثالي ذو وجهين عند حمل بعينه، فيختفي وجود المجال الخلفي مما يؤدي إلى تحسين الكفاءة، كما تختفي أيضا الضجة التي كان يسببها المجال الخلفي، فتكون النتيجة محرك 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 (9-2): كيفية توصيل وخواص المحرك ذو 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 (9-2) يبين طريقة توصيل هذين المكثفين، كما يبين أيضا منحنى الخواص للمحرك. يستخدم المكثف C_1 من النوع الورقي المشبع بالزيت ويوصل على التوالي بصفة مستديمة ، مع الملفات المساعدة لتحسين خواص التشغيل. كما يستخدم المكثف C_2 من النوع ذي السائل الكهربي لتحسين عزم بدء الحركة، حيث يوصل مع مفتاح طرد مركزي خاص به، على التوازي مع المكثف الدائم، ليعملا معاً أثناء فترة البدء فقط، ويعتبر هذا النوع من المحركات أكثر تكلفة من الأنواع السابقة، ويستخدم في التطبيقات التي تتطلب تشغيلاً هادئاً مع عزم كبير لبدء الحركة.

مثال (3-2):

محرك حثي أحادي الوجه، ذو مكثف البدء ، جهده 127V وتردده 60Hz، ثوابت الملفات الرئيسة والمساعدة عند البدء كما يلي:

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

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:

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

زاوية معاوقة الملفات المساعدة يجب أن تكون:

$$\theta_a = 90 - \theta_m = 47.86^\circ$$

ممانعة المكثف X_c يجب أن تحقق العلاقة:

$$\frac{X_c - 3.3}{8.8} = \tan(47.86) = 1.1 \qquad \tan^{-1}\left(\frac{X_c - 3.3}{8.8}\right) = 47.86$$

$$X_c = 1.1 \times (8.8) + 3.3 = 12.98\,\Omega$$

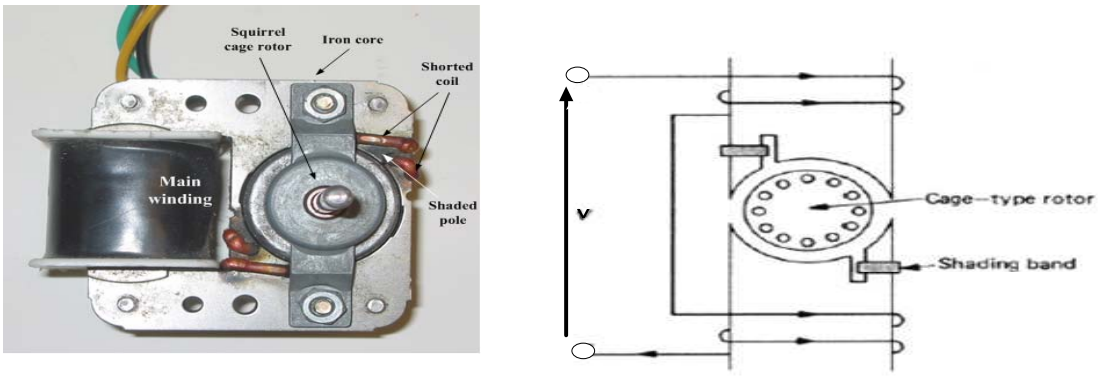
سعة المكثف يمكن حسابها من:

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

$$c = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{1}{377 \times 12.98} = 204\mu F$$

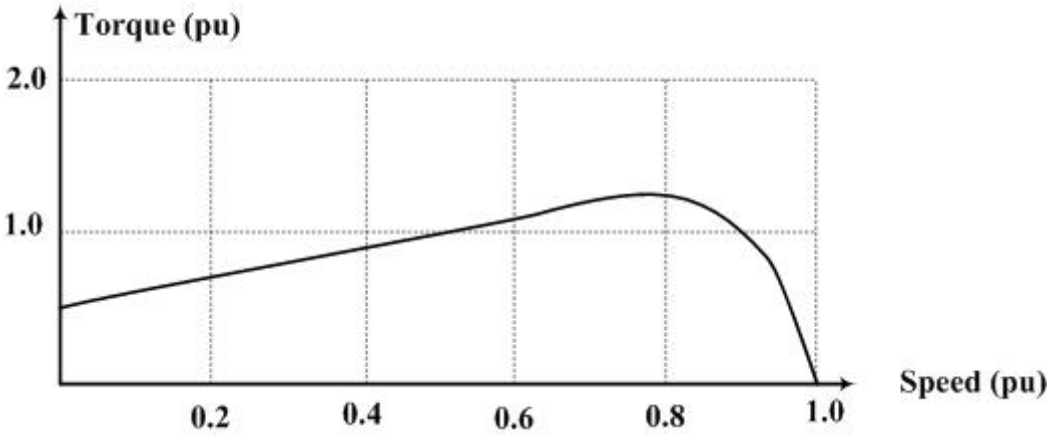
المحرك ذو الوجه المظلل: Shaded-Pole motor

يتكون العضو الثابت لهذا المحرك من أقطاب بارزة ملفوف عليها ملفات العضو الثابت، كل قطب مقسوم إلى جزئين بواسطة مجرى صغير، حيث يتم إحاطة (تطويق) جزء من كل قطب بحلقة مقصورة من النحاس، تسمى الملف المظلِل (Shading Coil) ، كما هو موضح في الشكل (10-2).



الشكل (10-2): تركيب المحرك ذو 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، ينتج عنه عزم دوران صغير يعمل على دوران المحرك كما يوضح ذلك منحنى العزم مع السرعة المبين بالشكل (11-2).



الشكل (11-2): خواص المحرك ذو الوجه المظلل

يتميز هذا المحرك برخص الثمن وبساطة التركيب، ويستخدم في المراوح الصغيرة ومضخات المياه المستخدمة في المكيفات الصحراوية و غسالات الملابس.

أسئلة وتمارين

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

2- اذكر الطرق المختلفة المستخدمة لبدء حركة المحركات أحادية الوجه.

3- ما أهم مميزات المحرك ذو مكثف البدء مقارنة بالمحرك المشطور الوجه؟

4- ما أهم مميزات المحرك ذو المكثف الدائم مقارنة بالمحرك المشطور الوجه؟

5- ما أهم مميزات المحرك ذو المكثفين مقارنة بالمحرك ذو المكثف الدائم؟

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

7- محرك حثي أحادي الوجه 220V، 50Hz ذو ستة أقطاب يعمل عند الحمل الكامل بانزلاق مقداره 5% احسب:

أ) الانزلاق للمجال الخلفي (S_b).

ب) سرعة التزامن n_s

ج) سرعة المحرك عند الحمل الكامل.

8- محرك حثي أحادي الوجه ذو مكثف البدء، جهده 120v وتردده 60Hz، ثوابت الملفات الرئيسة والمساعدة عند البدء:

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

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

الوحدة الثالثة

المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

الهدف العام للوحدة: الإلمام الشامل بتركيب وأساسيات تشغيل وأداء المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

الأهداف التفصيلية:

1- أن يلم المتدرب بأنواع وتركيب الآلات التزامنية.

2- أن يلم المتدرب بنظرية عمل المولدات التزامنية.

3- أن يلم المتدرب بكيفية ضبط جهد وتردد المولدات التزامنية.

4-أن يتمكن المتدرب من إجراء الحسابات المتعلقة بتشغيل المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه.

5- أن يتمكن المتدرب من إجراء الاختبارات الروتينية على المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه.

6- أن يتمكن المتدرب من تحديد عناصر الدائرة المكافئة للمولدات التزامنية.

7- أن يتمكن المتدرب من حساب القدرة والعزم والكفاءة للمولدات التزامنية.

8- أن يتمكن المتدرب من حساب معامل تنظيم الجهد للمولدات التزامنية.

9- أن يتمكن المتدرب من إجراء عملية ربط للمولد التزامني على الشبكة العامة.

10- أن يتمكن المتدرب من استنتاج وفهم المنحنيات المميزة لهذه المولدات.

11- أن يتمكن المتدرب من رسم المخطط الاتجاهي وكيفية استخدامه للتحكم في هذه المولدات.

الوحدة الثالثة : المولدات التزامنية ثلاثية الأوجه

الفصل الأول : التركيب و نظرية العمل و الدائرة المكافئة و منحنيات الخواص

تمهيد

أكثر من 98% من الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم يتم توليدها باستخدام الآلة التزامنية فهي الأكثر استخداماً لغرض تحويل الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية، والآلة التزامنية كما أنها تستخدم كمولد تزامني تستخدم أيضاً كمحرك تزامني «كما سيأتي في الوحدة القادمة » وقد اكتسبت هذه التسمية (التزامنية) بسبب التزامن أو التوافق التام بين سرعة دوران المجال المغناطيسي و العضو الدوار ولذلك تسمى بالآلة التزامنية أو التوافقية.

تركيب الآلة التزامنية ثلاثية الأوجه

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

1- التيار المسحوب من الآلة كبير لذا يفضل أن يؤخذ مباشرةً وليس عن طريق حلقات انزلاق.
2- التخلص من حلقات الانزلاق أو تقليلها إلى (2) بدلاً من (6) حلقات.
3- سهولة تبريد ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية عندما تكون ثابتة.
4- حماية ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية من قوة الطرد المركزية بسبب وزنها الكبير

لذا فإننا في دراستنا لهذه الآلة سيكون العضو الثابت حاملا لملفات إنتاج الطاقة الكهربائية بينما يكون العضو الدوار حاملا لملفات المجال المغناطيسي.

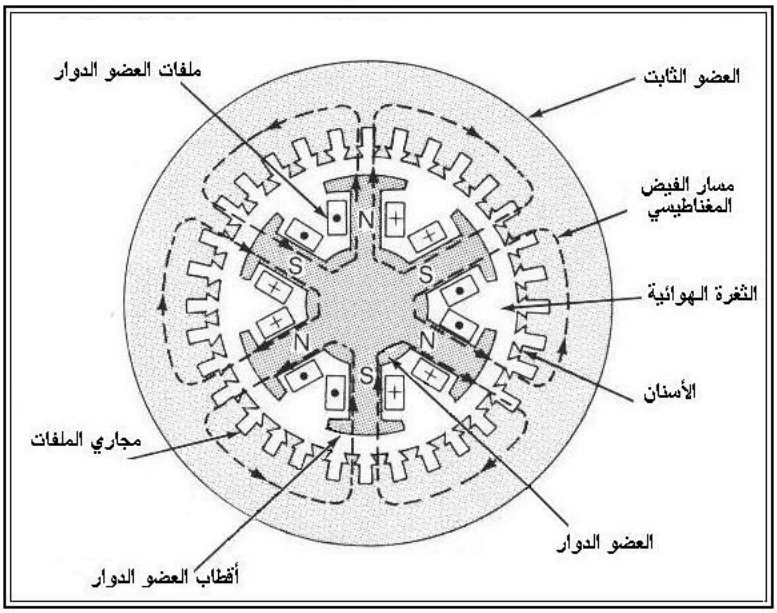
العضو الثابت:

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

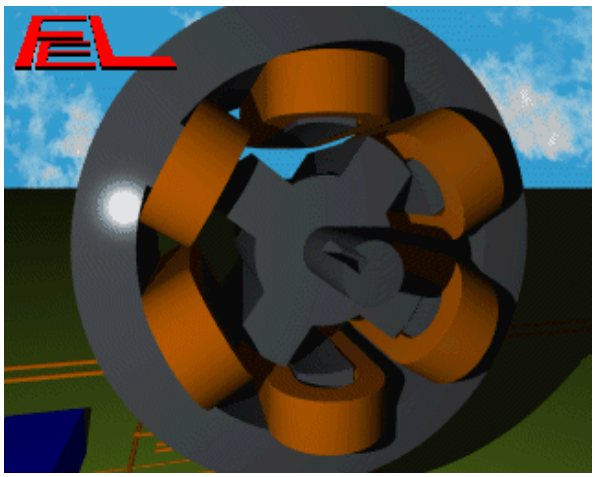
العضو الدوار:

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

1- عضو دوار ذو أقطاب بارزة Salient Pole Rotor يستخدم مع الآلات التزامنية ذات السرعات المنخفضة مثل الآلات المركبة على مساقط المياه و ذلك لأن سرعتها عادةً تقل عن 1000 لفة لكل دقيقة انظر الشكل رقم (1-3) والشكل رقم (2-3).

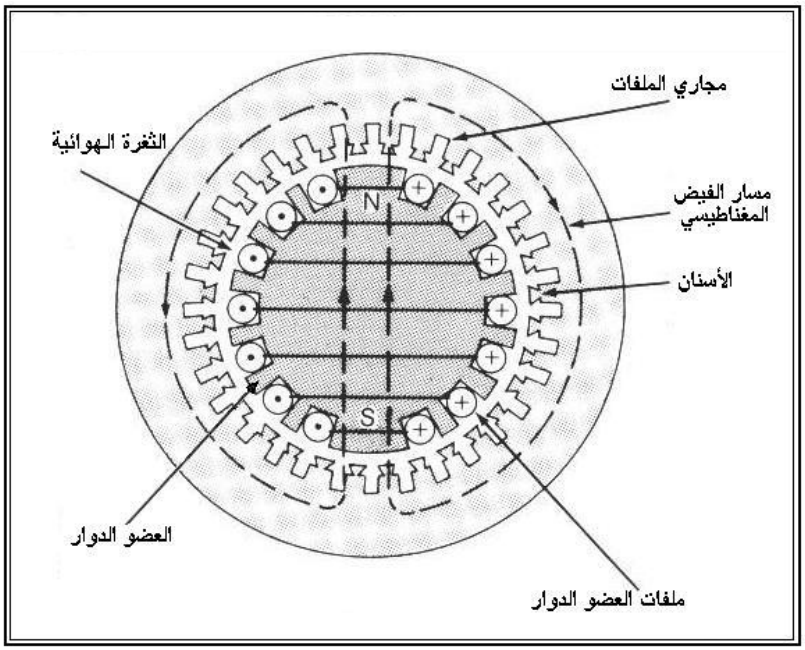


الشكل (1-3): آلة تزامنية ذات عضو دوار ذو أقطاب بارزة

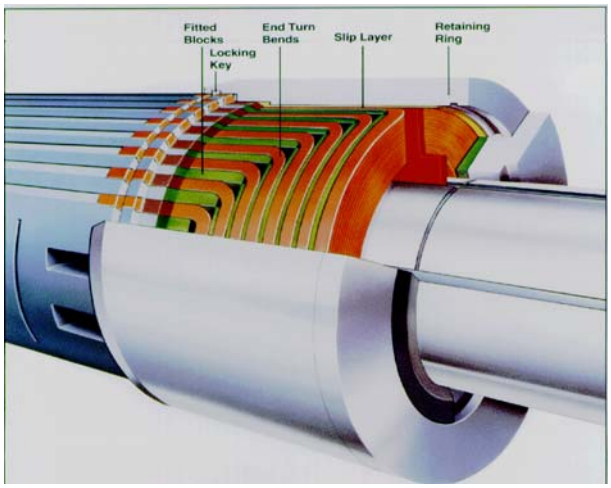


الشكل (2-3): عضو دوار ذو أقطاب بارزة

2- عضو دوار إسطوانية Cylindrical Rotor و يستخدم في الآلات التزامنية ذات السرعات العالية التي تدار بواسطة توربينات غازية أو بخارية حيث تكون السرعة إما 1500 أو 1800 أو 3000 أو 3600 لفة لكل دقيقة حسب التردد المطلوب وعدد الأقطاب. ويلاحظ أنه يجب أن يكون عدد أقطاب العضو الدوار مساوياً لعدد الأقطاب في العضو الثابت ، انظر الشكل (3-3) والشكل (3-4).



الشكل (3-3): آلة تزامنية ذات عضو دوار اسطواني



الشكل (4-3): عضو دوار اسطواني

كيفية عمل المولد التزامني

يتم تدوير العضو الدوار للآلة التزامنية بواسطة وسيلة مناسبة (محرك ديزل أو توربينة غازية أو بخارية مائية أو محرك تيار مستمر) وعندما تصل سرعته إلى السرعة التزامنية يتم تغذية ملفات العضو الدوار من مصدر جهد مستمر ، وبالتالي ينتج في الثغرة الهوائية مجال مغناطيسي دوار يدور بنفس سرعة العضو الدوار (السرعة التزامنية) ولذلك سميت هذه الآلة بالآلة التزامنية.

هذا المجال المغناطيسي الدوار سيقطع ملفات العضو الثابت ويولد فيها قوة دافعة كهربائية متناوبة طبقاً لمبدأ الحث الكهرومغناطيسي. هذه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في المنتج (العضو الثابت) ستكون قوة دافعة كهربائية ثلاثية الأوجه بين كل وجه وآخر $120°$ وذلك لأن العضو الثابت يحمل ثلاثة ملفات بين كل ملف وآخر زاوية قدرها $120°$ ، وتعتمد قيمة القوة الدافعة الكهربائية على شدة المجال المغناطيسي وسرعة العضو الدوار ، وحيث أن سرعة العضو الدوار يجب أن تكون ثابتة للحصول على تردد ثابت ، لذا فإن الخيار الوحيد للتحكم بمقدار القوة الدافعة الكهربائية هو التحكم في شدة المجال المغناطيسي وذلك بتغيير قيمة التيار المستمر الداخل إلى ملفات العضو الدوار. أما تردد القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في المنتج فيعتمد على سرعة العضو الدوار وعدد الأقطاب ويحسب من المعادلة التالية:

$$f = \frac{n \times p}{120} \qquad (3\text{-}1)$$

و تحسب القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج لكل وجه من المعادلة التالية:

$$E_{ph} = \sqrt{2} \times \pi \times f \times \phi \times T_{ph} \times k_W \qquad (3\text{-}2)$$

حيث:

f : التردد

ϕ : شدة الفيض المغناطيسي

T_{ph} : عدد اللفات في كل وجه

k_W : معامل اللف (< 1)

الدائرة المكافئة لكل وجه للمولد التزامني ثلاثي الأوجه

إن وجود ثغرة هوائية غير منتظمة في المولد التزامني ذو الأقطاب البارزة سيضفي بعض التعقيد على الدائرة المكافئة للمولد التزامني لذا فإننا هنا سنفترض أن الثغرة الهوائية منتظمة أي أننا سنستخدم نموذج المولد التزامني ذو العضو الدوار الاسطواني ، كما أن هذا الافتراض يعطي نتائج مقبولة في حالة المولد التزامني ذو الأقطاب البارزة عندما يعمل في حالة الاستقرار steady state. إن الجهد المتولد في ملفات المنتج E_{ph} والمعطى بالمعادلة (2-3) يعتبر الجهد الداخلي للمولد ولا يظهر على أطراف المنتج إلا في حالة عدم مرور تيار في ملفات المنتج (حالة اللاحمل) ، أما في حالة تحميل المولد فإنه سيظهر جهد آخر مختلف على أطراف المنتج يسمى الجهد الخارجي V_{ph}.

من أهم العوامل التي تسبب الاختلاف بين E_{ph} و V_{ph} عند التحميل نذكر ما يلي:

1- تشوه الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بسبب مرور تيارات في ملفات المنتج وهو ما يسمى بظاهرة رد فعل المنتج Armature Reaction .
2- وجود مقاومة لملفات المنتج .
3- وجود ممانعة حثيه ذاتية لملفات المنتج .

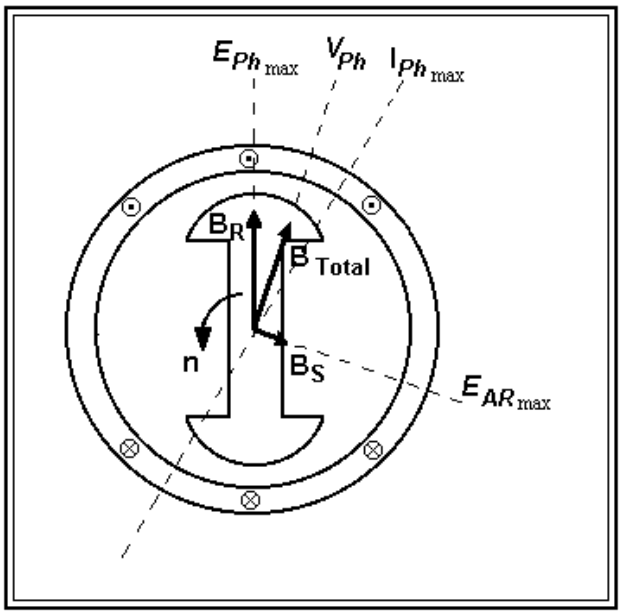
ما هو رد فعل المنتج ؟

عند تحميل المولد التزامني سيمر في كل وجه من أوجه العضو الثابت تيار كهربائي، وحيث أن ملفات العضو الثابت رتبت بحيث يفصل بين كل وجه وآخر زاوية فراغية مقدارها $120°$ فإن التيارات المارة في هذه الأوجه ستفصل بين كل تيار وآخر زاوية طور مقدارها $120°$، ونتيجة لمرور هذه التيارات مجتمعة بهذه الصفة سيتولد مجال مغناطيسي دوار في العضو الثابت يدور بنفس سرعة واتجاه المجال المغناطيسي الدوار الناتج من ملفات العضو الدوار، هذا المجال المغناطيسي الجديد هو رد فعل المنتج كنتيجة لمرور تيارات كهربائية في ملفاته أثناء التحميل.

و بالتالي فإن المجال المغناطيسي المؤثر في الثغرة الهوائية هو محصلة المجالين المتولدين من العضو الدوار و العضو الثابت ، وكما أن المجال المغناطيسي المتولد من العضو الدوار سينتج جهداً في ملفات العضو الثابت هو E_{ph} ، كذلك المجال المغناطيسي الناتج بسبب رد فعل المنتج سينتج جهداً في ملفات العضو الثابت هو E_{AR} ، ولذا فإن الجهد الذي سيظهر على أطراف المولد V_{ph} هو محصلة هذين الجهدين أو لنقل هو الجهد المتولد بسبب محصلة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية B_{Total}، انظر الشكل (3-5).

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

$$V_{ph} = E_{ph} + E_{AR} \qquad (3-4)$$



الشكل (3-5): المجالات المغناطيسية المؤثرة في المولد التزامني أثناء التحميل

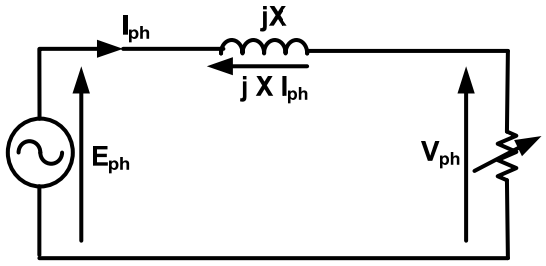
في الشكل (3-5) نجد أن التيار I_{Ph} نتج بسبب تحميل المولد بحمل حثي وذلك لأنه متأخر عن الجهد E_{Ph} بزاوية ما ، هذا التيار بدوره تسبب في المجال المغناطيسي B_S الذي بدوره أنتج جهداً في ملفات المنتج هو E_{AR}، هذا الجهد E_{AR} الناتج بسبب رد فعل المنتج يتناسب طردياً مع التيار المسبب له كما أنه متأخر بزاوية قدرها $90°$، وبناءً على ذلك نستطيع أن نعبر عن هذا الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج كما يلي:

$$E_{AR} = -jXI_{ph} \qquad (3-5)$$

وبعد التعويض في المعادلة (3-4) نجد أن :

$$V_{ph} = E_{ph} - jXI_{ph} \qquad (3-6)$$

يمكن تمثيل المعادلة ((3-6) بالدائرة التالية:



الشكل (3-6): دائرة تمثيل للمعادلة (3-6)

إذا يمكن التعبير عن الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج بمحاثة موصلة على التوالي مع مصدر الجهد الداخلي.

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

$$V_{ph} = E_{ph} - R_A I_{ph} - jXI_{ph} - jX_A I_{ph} \qquad (3-7)$$

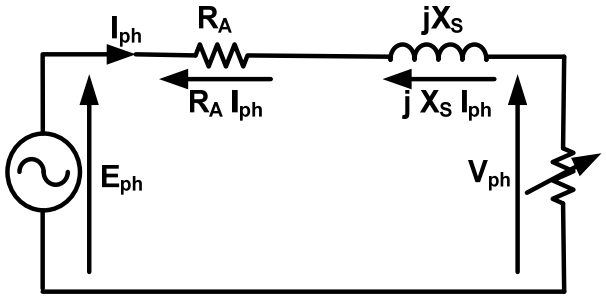
من أجل تبسيط المعادلة (3-7) يمكننا دمج ممانعة التسرب الحثية للملفات المنتج (X_A) مع الممانعة الحثية التي تمثل رد فعل المنتج (X) لتصبح ممانعة حثية واحدة تسمى الممانعة التزامنية (X_S).

$$X_S = X + X_A \qquad (3-8)$$

وبالتالي يصبح جهد أطراف المولد كما يلي:

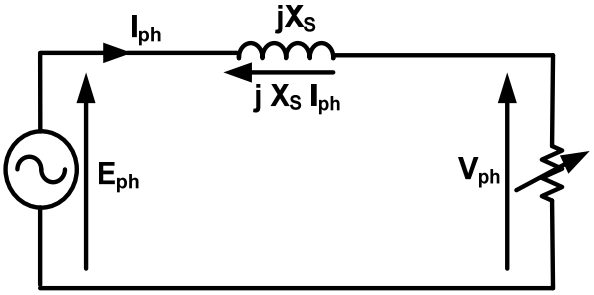
$$V_{ph} = E_{ph} - R_A I_{ph} - jX_S I_{ph} \qquad (3-9)$$

المعادلة (3-9) هي المعادلة النهائية التي يحسب منها جهد أطراف المولد لكل وجه ، من هذه المعادلة يمكننا أن نرسم الدائرة المكافئة للمولد التزامني كما هو موضح في الشكل (3-7) مع ملاحظة أنها تمثل وجه واحد فقط من أوجه المنتج وذلك للتشابه التام بين الأوجه الثلاثة.



الشكل (3-7): الدائرة المكافئة لكل وجه للمولد التزامني

الشكل (3-7) يمثل الدائرة المكافئة النهائية لكل وجه للمولد التزامني ذو العضو الدوار الإسطواني ، كما أنه يمكن تبسيط هذه الدائرة وذلك بإهمال مقاومة ملفات المنتج لأنها صغيرة مقارنةً بالممانعة التزامنية خصوصاً في المولدات الكبيرة فتصبح الدائرة المكافئة التقريبية لكل وجه كما هو موضح في الشكل(3-8).



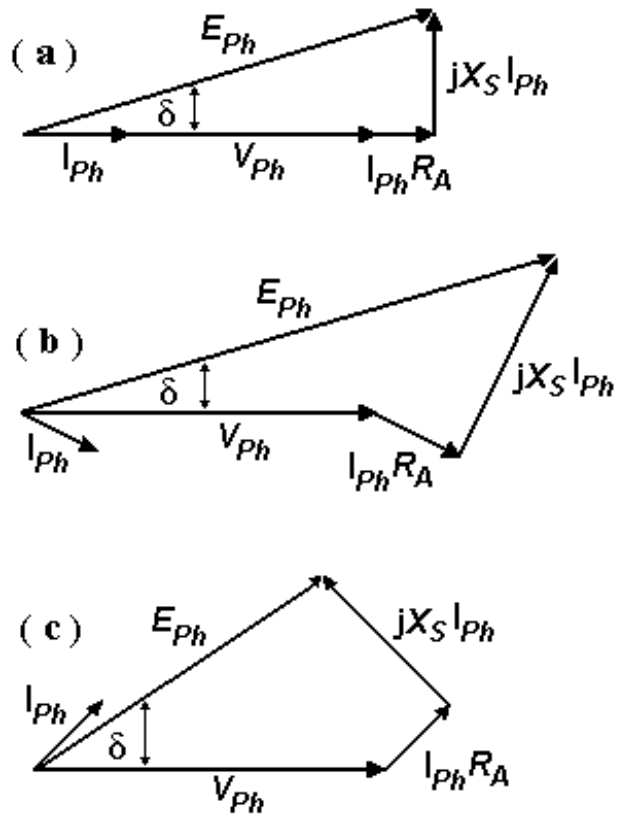
الشكل (3-8): الدائرة المكافئة التقريبية لكل وجه

وفي هذه الحالة يحسب جهد الأطراف لكل وجه كما يلي:

$$V_{ph} = E_{ph} - jX_S I_{ph} \qquad (3\text{-}10)$$

المخطط الاتجاهي للمولد التزامني ثلاثي الأوجه

بما أن الجهود والتيارات المتولدة في المولدات 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 للمولد التزامني. هذا المخطط الاتجاهي يعتبر أداةً مهمة جداً لأنه يسهل فهم ودراسة وتحليل أداء المولد التزامني ، فمثلاً الشكل (3-9) يوضح المخطط الاتجاهي المصاحب للمعادلة (3-9) في ثلاث حالات عند تحميل المولد التزامني (حمل مادي أو حمل حثي أو حمل 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 (3-7).



الشكل (3-9): المخطط الاتجاهي للمولد التزامني عندما يكون الحمل مادي (a) و عندما يكون الحمل حثي (b) و عندما يكون الحمل سعوي (c)

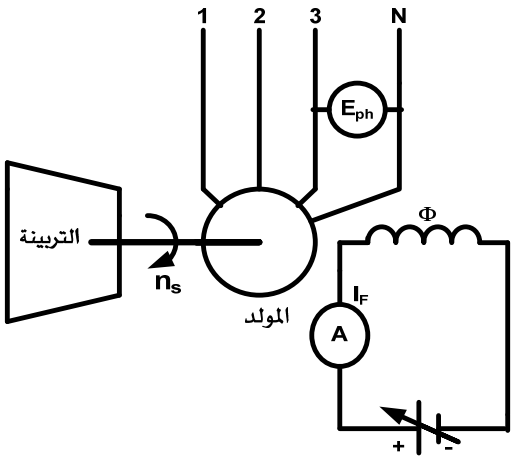
اختبارات المولد التزامني

يستفاد من اختبار اللاحمل واختبار القصر في تحديد منحنيات الخواص للمولد وحساب عناصر الدائرة المكافئة.

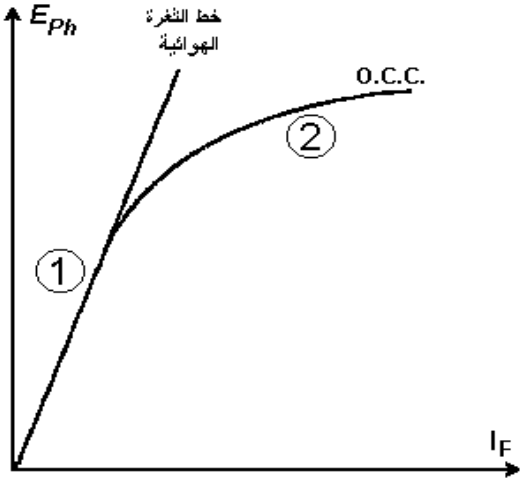
أولاً: اختبار اللاحمل (الدائرة المفتوحة Open Circuit)

في هذا الاختبار تترك أطراف المنتج مفتوحة وتدار الآلة حتى تصل إلى سرعتها التزامنية ثم يتم زيادة تيار المجال تدريجياً ابتداءً من الصفر، هذه الزيادة في تيار المجال تؤدي إلى زيادة الفيض المغناطيسي و بالتالي زيادة الجهد المتولد على أطراف المنتج المفتوحة وتسجل قيم التيار والجهد في جدول ثم ترسم العلاقة بينهما كما هو موضح في الشكل (3-11) ، هذه العلاقة تسمى منحنى المغنطة Magnetization Curve أو منحنى الدائرة المفتوحة

Open Circuit Characteristic (O.C.C) راجع الأشكال (3-10) و (3-11)



الشكل (3-10): الآلة التزامنية أثناء اختبار اللاحمل



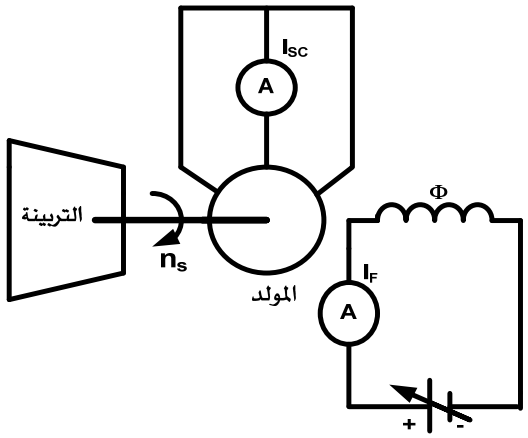
الشكل (3-11): منحنى اللاحمل للآلة التزامنية

يلاحظ من المنحنى السابق أنه ينقسم إلى منطقتين واضحتين: في المنطقة (1) الفيض المغناطيسي منخفض ولذا فإن ممانعة الحديد تكون صغيرة جداً وهذا يعني أن الممانعة الموجودة هي ممانعة الهواء فقط وهذا يؤدي إلى أن الجهد يتغير تغيراً خطياً مع تيار المجال. يمثل امتداد المنحنى في هذه المنطقة الخط الفاصل بين المنطقتين و يسمى خط الثغرة الهوائية. في المنطقة (2) يزداد الفيض المغناطيسي مما يؤدي إلى زيادة ممانعة الحديد.

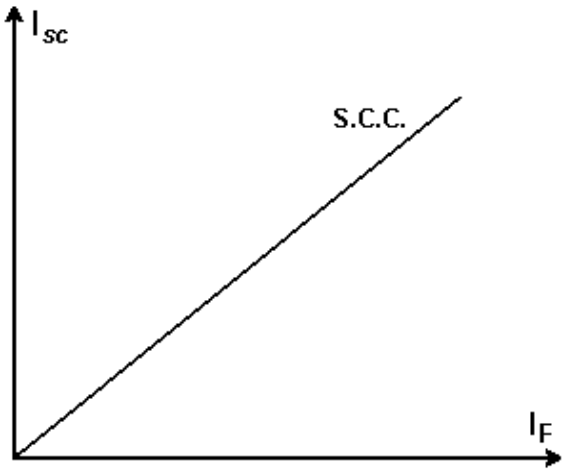
أي أن الحديد بدأ يصل إلى حالة التشبع . مما يؤدي إلى تناقص معدل الارتفاع في جهد أطراف المنتج مقابل تيار المجال كما هو ملاحظ من المنحنى.

ثانياً: اختبار القصر Short Circuit Test:

في هذا الاختبار تقصر أطراف المنتج الثلاثة مع بعضها البعض وتدار الآلة حتى تصل إلى السرعة التزامنية ثم يقع زيادة تيار المجال تدريجياً وتسجل قيمة تيار المنتج وقيمة تيار المجال المقابلة في جدول ثم ترسم العلاقة بينهما كما هو موضح في الشكل (3-13) ، هذه العلاقة تسمى منحنى القصر Short Circuit Characteristic (S.C.C) ويجب أن لا يترك تيار القصر يزداد عن القيمة المقننة، راجع الأشكال (3-12) و (3-13).



الشكل (3-12): الآلة التزامنية أثناء اختبار الدائرة المقصورة



الشكل (3-13): منحنى الدائرة المقصورة للآلة التزامنية

حساب الممانعة التزامنية باستخدام منحنيات الدائرة المفتوحة (O.C.C) و المقصورة (S.C.C).

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

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

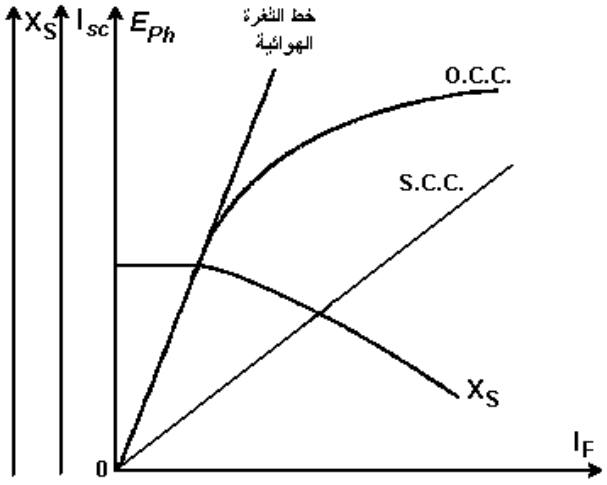
$$Z_S = \frac{E_{ph}}{I_{SC}} \qquad (3\text{-}11)$$

2- تحسب (X_S) من المعادلة التالية:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} \qquad (3\text{-}12)$$

حيث R_A هي مقاومة ملفات المنتج ويمكن قياسها مباشرة باستخدام الأوممتر. أو عن طريق اختبار التيار المستمر.

يمكن أيضاً أن ترسم العلاقة بين I_F و X_S كما هو موضح في الشكل (3-14) ، ويلاحظ أن قيمة X_S تكون ثابتة في منطقة التغير الخطي لمنحنى الدائرة المفتوحة(O.C.C) وتقل كلما زادت الممانعة المغناطيسية للحديد.



الشكل (3-14): العلاقة بين الممانعة التزامنية و تيار المجال

معامل تنظيم الجهد

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

ويعبر عنه رياضياً كما يلي:

$$V_R\,\% = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} \times 100 \qquad (3\text{-}13)$$

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

أسئلة وتمارين

1- ممَّ اكتسبت الآلة التزامنية تسميتها؟

2- كيف يمكن التحكم في مقدار القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج؟

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

4- كيف يمكن التحكم في تردد الآلة التزامنية؟

5- ما المقصود برد فعل المنتج؟

6- ما هي الممانعة التزامنية؟

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

8- ارسم المخطط الاتجاهي للآلة التزامنية المصاحب للدائرة المكافئة التقريبية في حالة الأحمال الثلاثة (حمل مادي، حمل حثي و حمل سعوي)

9- ما المقصود بالتشبع المغناطيسي في الحديد؟

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

11- ما هو معامل تنظيم الجهد؟

12- ما أهمية معرفة معامل تنظيم الجهد للمولد؟

13- أيهما أفضل أن يكون معامل تنظيم الجهد كبيرا أم صغيرا؟

الفصل الثاني : مخطط توزيع القدرة – التشغيل على التوازي

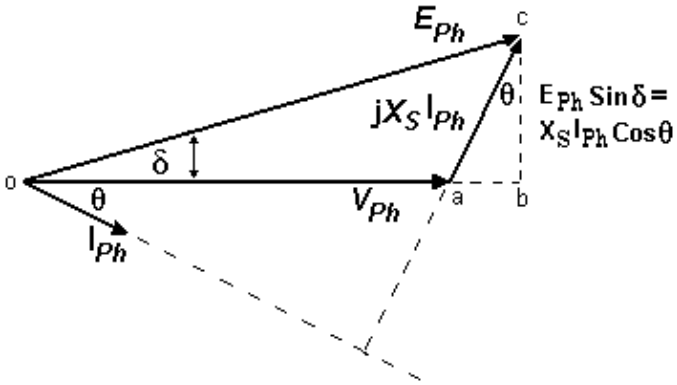
مخطط توزيع القدرة في الآلة التزامنية

القدرة الفعالة الخارجة من المولد التزامني تعطى من المعادلة التالية:

$$P_o = 3V_{ph}I_{ph}\cos\theta \qquad (3\text{-}14)$$

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

إذا أهملنا مقاومة ملفات المنتج R_A وذلك لصغر قيمتها عندما تقارن بالممانعة التزامنية X_S كما في الشكل (3-8) فإننا نستطيع إيجاد معادلة مهمة جداً لحساب القدرة الخارجة من الآلة التزامنية. لكي نوجد هذه المعادلة نستعين بالمخطط الاتجاهي في حالة الحمل الحثي الموضح في الشكل (3-15).



الشكل (3-15): المخطط الاتجاهي للمولد التزامني في حالة الحمل الحثي مع إهمال R_A

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

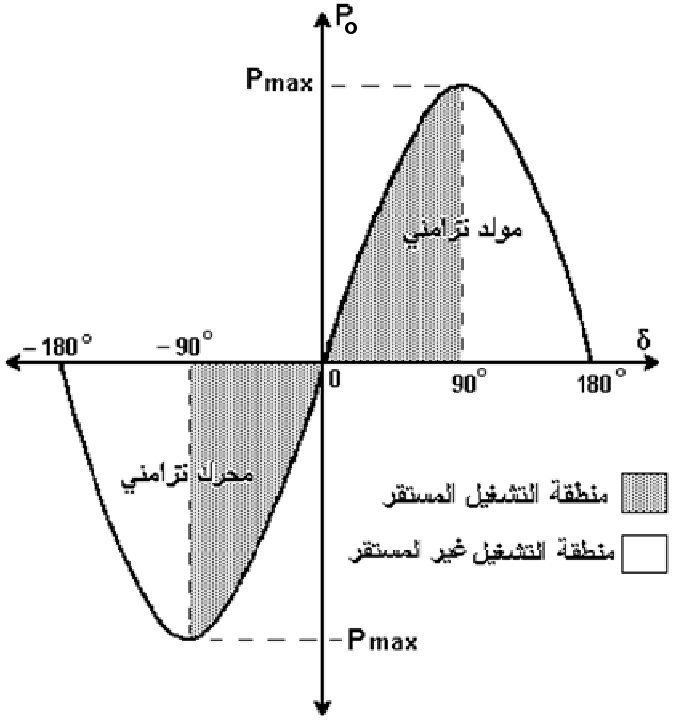
$$I_{Ph}\,Cos\;\theta = \frac{E_{Ph}\,Sin\;\delta}{X_S}$$

وبعد التعويض في المعادلة (3-14) تصبح معادلة القدرة كما يلي:

$$P_o = \frac{3V_{ph}E_{ph}\sin\delta}{X_S} \qquad (3\text{-}15)$$

من خلال معادلة القدرة (3-15) يمكن أن نرسم العلاقة بين P_o و δ كما هو موضح في الشكل (3-16) ، العلاقة (3-15) توضح أن القدرة الخارجة من المولد التزامني تعتمد على الزاوية δ بين E_{Ph} و V_{Ph} ، هذه الزاوية δ تسمى زاوية القدرة Power angle أو زاوية العزم Torque angle ، كما يلاحظ أيضا أن أكبر قدرة يمكن أن تؤخذ من المولد نظرياً عندما تكون قيمة الزاوية δ تسعون درجة ، أي أن ($\sin\delta=1$) وبالتالي:

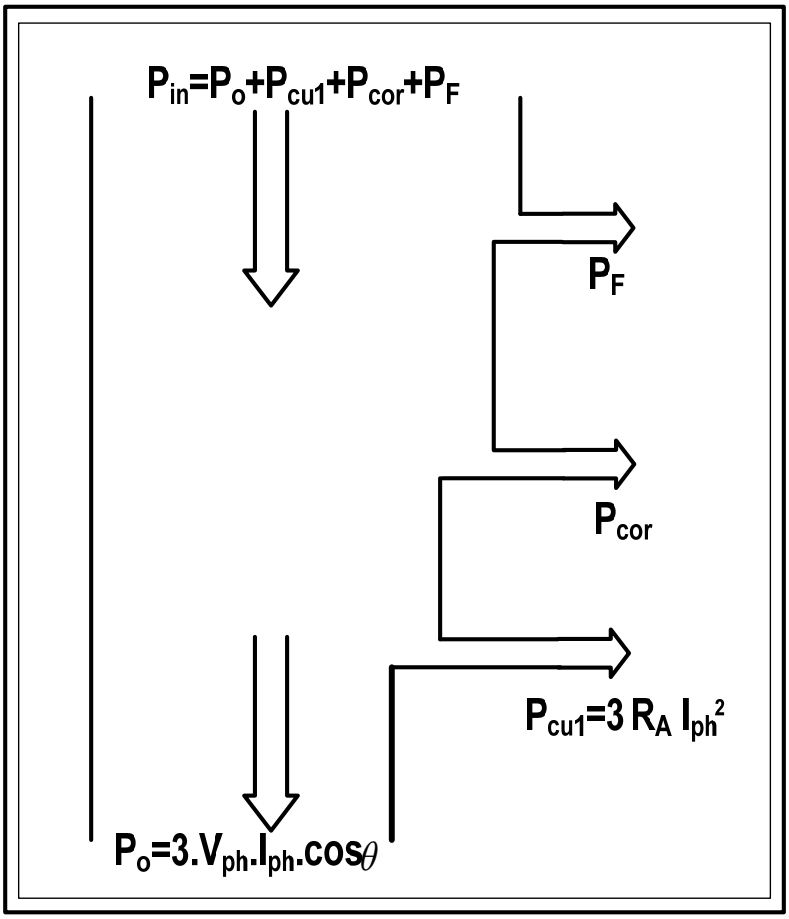
$$P_{\max} = \frac{3V_{ph}E_{ph}}{X_S} \qquad (3\text{-}16)$$



الشكل (3-16): العلاقة بين القدرة الخارجة و زاوية القدرة δ

منطقة التشغيل الآمن أو المستقر للآلة التزامنية عندما تكون (δ <90) في حالة التشغيل كمولد أو عندما تكون (δ >-90) في حالة التشغيل كمحرك كما هو موضح في الشكل (3-16).

أثناء تحويل الطاقة الميكانيكية (P_{in}) إلى طاقة كهربائية (P_o) بواسطة المولد، يفقد جزء من الطاقة في الدائرة المغناطيسية (P_{cor}) و جزء في الدائرة الكهربائية (P_{cu1})، علاوة على ذلك يفقد جزء في صورة فقد ميكانيكي (P_F).
يلخص الشكل (3-17) كيفية انتقال القدرة داخل المولد التزامني ثلاثي الأوجه.



الشكل (3-17): مخطط سريان القدرة داخل المولد التزامني ثلاثي الأوجه

تشغيل المولدات التزامنية على التوازي

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

هناك مميزات عديدة لتشغيل المولدات على التوازي أهمها ما يلي:

1- المولدات المربوطة على التوازي تستطيع أن تغذي أحمال أكبر من الحمل الذي يغذيه مولد واحد.
2- وجود عدة مولدات مربوطة على التوازي يزيد موثوقية النظام ، لأنه في حالة تعطل أي مولد فإن المولدات الأخرى تتقاسم حصة ذلك المولد.
3- وجود عدة مولدات مربوطة على التوازي يسمح بإجراء أعمال الصيانة لمولد أو أكثر دون قطع القدرة عن الأحمال.
4- وجود عدة مولدات صغيرة مربوطة على التوازي أكبر كفاءة من مولد وحيد مكافئ لها خصوصاً عندما تكون الأحمال صغيرة.

من أجل ربط المولدات على التوازي يجب أن تتحقق الشروط التالية:

1- القيمة الفعالة (rms value) لجهد الأطراف في كلا المولدين يجب أن تتساوى.
2- التردد يجب أن يكون متساوياً في كلا المولدين.
3- نفس تتابع الأطوار لكلا المولدين إما ABC أو ACB.
4- يجب أن تكون الجهود في نفس الطور (زاوية الطور للوجه a متساوية لكلا المولدين)

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

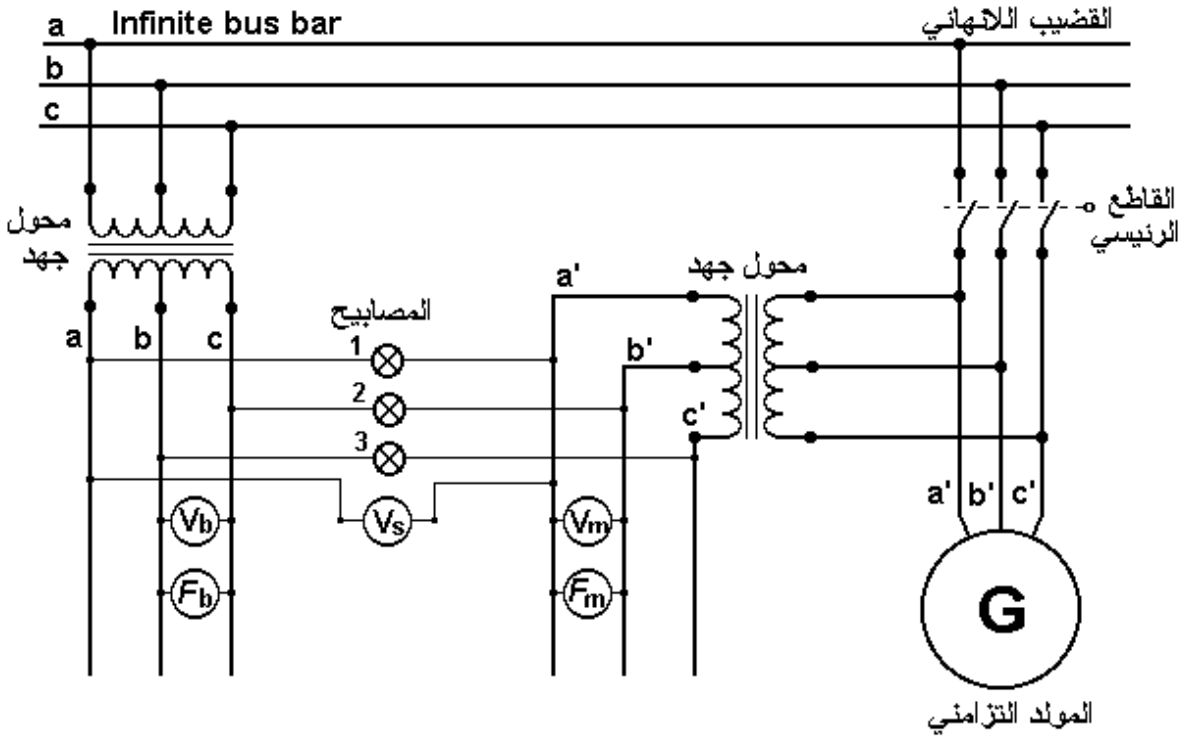
توصيل المولدات التزامنية إلى قضبان لا نهائية

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

طريقة المصابيح المضيئة

في هذه الطريقة توصل ثلاث لمبات بين الآلة والقضبان اللانهائية كما هو موضح في الشكل رقم (3-18) بحيث توصل الأولى بين الخطين a و a' والثانية بين الخطين b و c' والثالثة بين الخطين c ،b' كما يوصل ثلاثة أجهزة فولتميتر: V_S بين الوجهين a و a' و V_m لقياس جهد المولد و V_b لقياس جهد القضبان اللانهائية ، كذلك يتم توصيل جهازين لقياس تردد المولد والقضبان اللانهائية كما هو موضح في الشكل (3-18) ، وبهذه الطريقة يمكن التأكد من تحقق شروط التزامن الأربعة كما يلي:

1- لكي يتحقق الشرط الأول يجب أن تتساوى قراءة أجهزة قياس الجهد ($V_m = V_b$)
2- لكي يتحقق الشرط الثاني يجب أن تتساوى قراءة أجهزة قياس التردد ($F_m = F_b$)
3- الشرط الثالث يتحقق عندما يكون انطفاء واشتعال المصابيح بشكل منتظم.
4- الشرط الرابع يتحقق عندما يكون فرق الجهد بين وجهين متماثلين في الآلة والقضيب مساوياً للصفر ($V_S = 0$) .



الشكل (18-3): عملية التزامن بطريقة المصابيح المضيئة

أما عملية التزامن فيتم إجراؤها كما يلي:

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

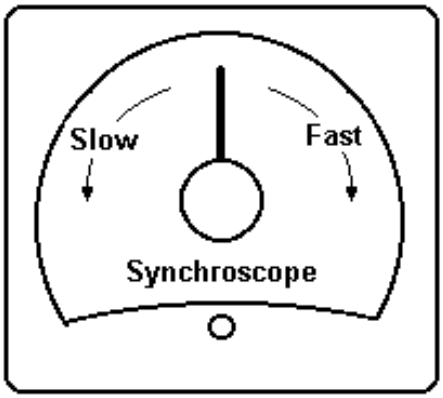
2- يضبط تردد المولد بحيث يكون قريباً من تردد القضيب وذلك بزيادة سرعة الدوران.

3- عند محاولة ضبط سرعة الدوران يحدث إحدى حالتين بالنسبة للمصابيح ، الحالة الأولى: جميع المصابيح تضيء وتنطفئ بشكل عشوائي و هذا يعني أن شرط تتابع الأطوار للمولد و القضبان مختلف وعندها يجب المبادلة بين أي طرفين من أطراف المولد من أجل عكس تتابع أطوار المولد وبعدها نلاحظ أن إضاءة المصابيح أصبحت بشكل منتظم ومتتابع. الحالة الثانية : جميع المصابيح تضاء وتنطفئ بشكل منتظم ومتتابع و هذا يعني أن تتابع الأطوار للمولد والقضيب اللانهائي متماثل.

4- إذا تحققت الحالة الثالثة يبقى ضبط التردد وذلك عن طريق التحكم في السرعة التزامنية للآلة، ويتضح ذلك في سرعة تتابع الإضاءة فإذا زادت سرعة تتابع إضاءة المصابيح يلزم زيادة أو تقليل سرعة المولد بحيث يكون تتابع إضاءة المصابيح بطيئاً قدر الإمكان وفي اللحظة التي يكون فيها ($V_S = 0$) أو المصباح الأول منطفئاً بينما الثاني والثالث مضاءان يكون الشرط الرابع قد تحقق ، في هذه اللحظة تكون الآلة في لحظة تزامن مع القضيب اللانهائي وعندها يمكن إغلاق القاطع الرئيسي بأمان.

باستخدام جهاز التزامن

جهاز التزامن (Synchroscope) الشكل رقم (19-3) يستخدم للتأكد من أن جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهائية وأن لهما نفس التردد،أي أنه يعتبر بديلاً للمصابيح في الشكل (18-3) ، و هو عبارة عن محرك حثي يتعرض لمجالين مغناطيسيين الأول من القضبان اللانهائية والآخر من المولد التزامني و العضو الدوار مركب عليه مؤشر يتحرك باتجاه عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة يعتمد على تردد المولد التزامني أهو أعلى أم أقل من تردد القضبان اللانهائية، و عندما يقف المؤشر بشكل عمودي (في مكان الساعة 12) فهذا يعني أن جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضبان اللانهائية في هذه الحالة يمكن توصيل المولد التزامني بالقضبان اللانهائية بأمان عن طريق القاطع الرئيسي.



الشكل (19-3): جهاز التزامن

أمثلة محلولة :

مثال (1-3):

مولد تزامني ذو أربعة أقطاب ملفاته موصلة على شكل دلتا ، جهد الأطراف له 480 V والتردد 60 Hz، منحنى اللاحمل موضح في الشكل (19-3) ، الممانعة التزامنية له 0.1 Ω ومقاومة ملفات المنتج 0.015 Ω ، عند الحمل الكامل يعطي تياراً مقداره 1200 A عند معامل قدرة 0.8 متأخر ، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك 40 kw و المفاقيد الحديدية 30 kw عند الحمل الكامل احسب ما يلي:

أ) سرعة العضو الدوار

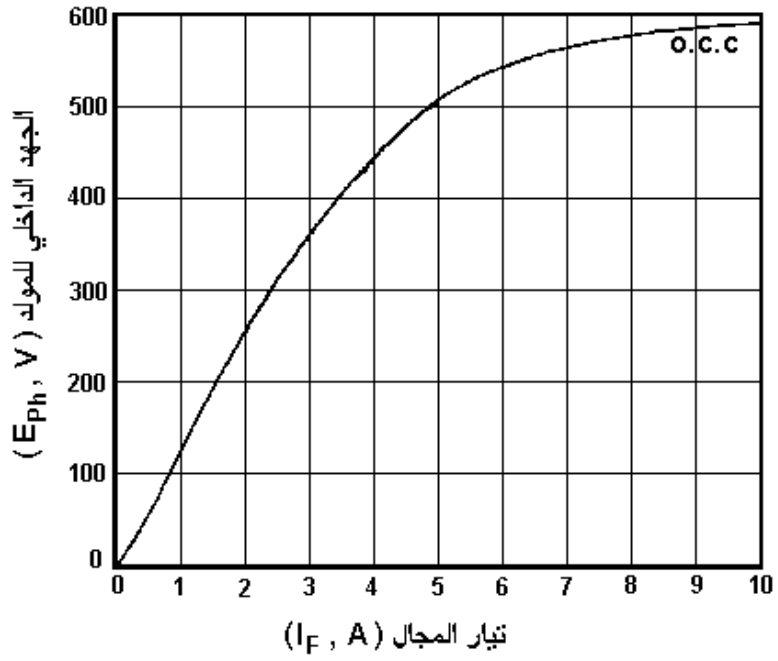
ب) تيار المجال لكي يحافظ المولد على جهد الأطراف عند 480 V

جـ) تيار المجال لكي يحافظ المولد على جهد الأطراف عند 480 V إذا كان يغذي حمل بتيار مقداره 1200 A عند معامل قدرة 0.8 متأخر ، كم يجب أن يكون

د) كفاءة المولد

هـ) جهد الأطراف إذا فصل الحمل عن المولد فجأة

و) تيار المجال لكي يبقى جهد الأطراف عند 480 V إذا كان المولد يغذي حمل بتيار قدره 1200 A عند معامل قدره 0.8 متقدم ،



الشكل (19-3): منحنى اللاحمل

الحـــل:

بما أن ملفات المولد موصلة على شكل دلتا

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

أ) من المعادلة رقم (3-1)

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

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

وبعد الرجوع إلى منحنى اللاحمل للمولد في الشكل (3-19) نجد أن تيار المجال المقابل هو 4.5 A

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

$$I_{Ph} = \frac{1200}{\sqrt{3}} = 692\ .8 \quad \text{A}$$

ومتأخر عن الجهد بزاوية:

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

وبتطبيق المعادلة (3-9) يمكننا إيجاد الجهد الداخلي E_{Ph} كما يلي:

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

لكي يبقى جهد الأطراف V_{Ph} عند 480 V يجب أن نضبط الجهد الداخلي E_{Ph} عند 532 V ولكي يتحقق ذلك يجب زيادة تيار المجال I_F إلى 5.7 A طبقاً لمنحنى الدائرة المفتوحة للمولد الموضح في الشكل (3-19)

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

القدرة الخارجة من المولد:

$$P_o = 3V_{ph} I_{ph} \cos\theta$$

$$P_o = 3 \times 480 \times 692.8 \times 0.8 = 798\ kw$$

القدرة الداخلة إلى المولد:

$$P_{in} = P_o + P_{cu1} + P_{cor} + P_F$$

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

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

إذا:

$$P_{in} = 798 + 21.6 + 30 + 40 = 889.6\, kw$$

كفاءة المولد هي:

$$\eta\% = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100 = \frac{798}{889.6} \times 100 = 89.7\%$$

هـ) إذا فصل الحمل بشكل مفاجئ عن المولد يعني أن التيار سيصبح صفراً وهذا يعني أن ($E_{Ph}=V_{Ph}$) طبقاً للمعادلة (3-9) ، وإذا لم يعاد ضبط تيار المجال فإن جهد الأطراف سيرتفع إلى قيمة الجهد الداخلي أي أن (V_{Ph}= 532 V)

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

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

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

مثال (3-2):

مولد تزامني ذو ستة أقطاب ملفاته موصلة على شكل نجمة جهد الأطراف له 480 V عند تردد 60 Hz ، الممانعة التزامنية 1Ω لكل وجه و مقاومة ملفات المنتج مهملة ، تيار الحمل الكامل له 60 A عند معامل قدرة 0.8 متأخر، مفاقيد الاحتكاك 1.5 kw والمفاقيد الحديدية 1 kw عند الحمل الكامل ، و بما أن مقاومة ملفات المنتج مهملة افترض أن المفاقيد النحاسية في ملفات المنتج مهملة أيضا ، تيار المجال ضبط بحيث يكون جهد الأطراف 480 V عند عدم الحمل. احسب ما يلي:

أ) سرعة دوران هذا المولد

ب) جهد الأطراف عند الحمل الكامل في الحالات التالية:

1- معامل القدرة 0.8 متأخر

2- معامل القدرة 1.0

3- معامل القدرة 0.8 متقدماً

جـ) كفاءة المولد عند الحمل الكامل إذا كان معامل القدرة 0.8 متأخر

د) العزم الداخل إلى المولد

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

الحـل:

أ) من المعادلة رقم (3-1)

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

ب) لحساب جهد الأطراف عند تحميل المولد يستحسن استخدام المخطط الاتجاهي لذلك بدلاً من استخدام المعادلة (3-9) لأنها في هذه الحالة ستحتوي على مجهولين هما زاوية الجهد الداخلي (δ) بالإضافة إلى جهد الأطراف V_{Ph}

بما أن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة

$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \qquad I_{ph} = I_L$$

عند عدم الحمل:

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

الحالة (1) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60A) عند معامل قدره 0.8 متأخر فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابهاً للمخطط الموضح في الشكل (20-3) الحالة(1)

بما أن معامل القدرة متأخر ، إذا التيار سيكون متأخر عن الجهد بزاوية θ

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

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

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

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

وحيث إن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

$$V_L = \sqrt{3} V_{ph} = \sqrt{3} \times 236.8 = 410\,V$$

الحالة (2) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60 A) عند معامل قدرة واحد فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابهاً للمخطط الموضح في الشكل(20-3) الحالة (2)

في هذه الحالة سيكون التيار في نفس الطور مع جهد الأطراف ، بالرجوع إلى المخطط الاتجاهي وباعتبار المثلث القائم الزاوية oab يمكن حساب جهد الأطراف كما يلي:

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

وحيث إن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

$$V_L = \sqrt{3} V_{ph} = \sqrt{3} \times 270.4 = 468.4\, V$$

الحالة (3) :

عند تحميل المولد بالحمل الكامل (60A) عند معامل قدرة 0.8 متقدماً فإن المخطط الاتجاهي لهذه الحالة سيكون مشابهاً للمخطط الموضح في الشكل(20-3) الحالة (3)

وبما أن معامل القدرة متقدم ، إذا التيار سيكون متقدماً عن الجهد بزاوية θ

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

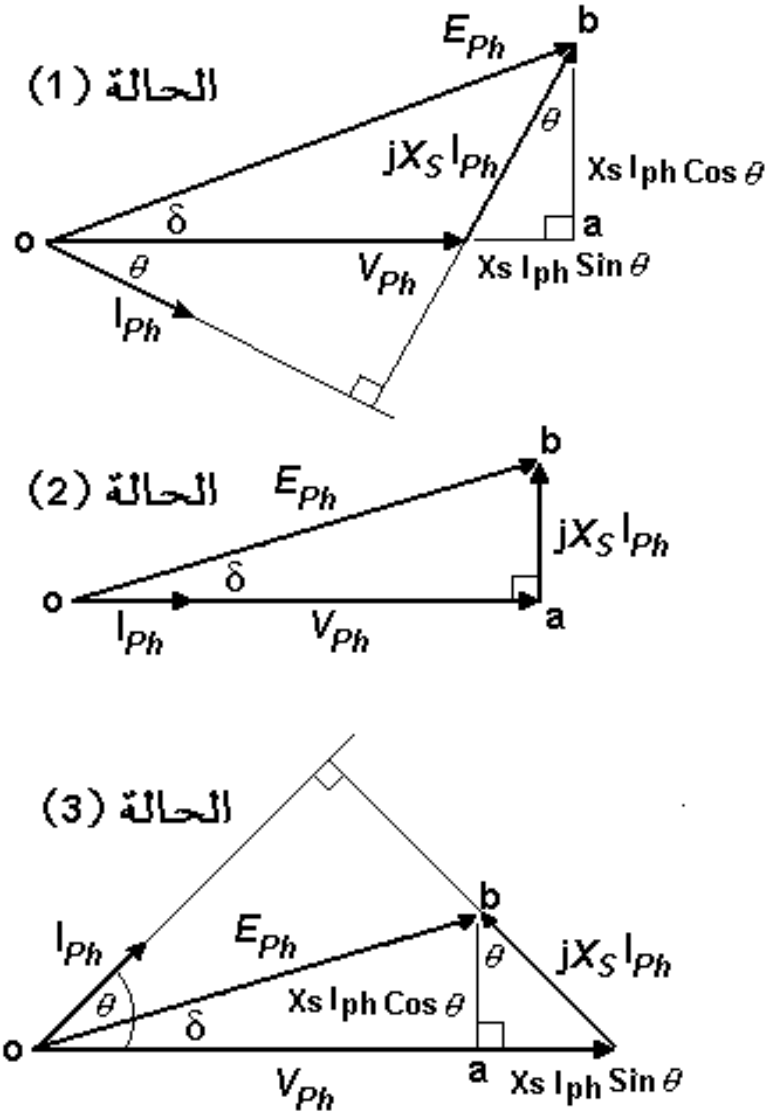
في هذا المخطط الاتجاهي جهد الأطراف V_{Ph} مجهول و E_{Ph} يساوي 277 V

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

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

وحيث إن ملفات المولد موصلة على شكل نجمة فإن:

$$V_L = \sqrt{3} V_{ph} = \sqrt{3} \times 308.8 = 535\, V$$



الشكل (20-3): المخطط الاتجاهي للمولد التزامني في حالات تحميل مختلفة

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

القدرة الخارجة من المولد عند الحمل الكامل (60 A) و معامل قدرة 0.8 متأخر

$$P_o = 3V_{ph} I_{ph} \cos\theta$$

$$P_o = 3 \times 308.8 \times 60 \times 0.8 = 34.1\,kw$$

القدرة الداخلة إلى المولد:

$$P_{in} = P_o + P_{cu1} + P_{cor} + P_F$$

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

إذا:

$$P_{in} = 34.1 + 0 + 1.0 + 1.5 = 36.6\ kw$$

كفاءة المولد هي:

$$\eta\% = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100 = \frac{34.1}{36.6} \times 100 = 93.2\%$$

د) العزم الداخل إلى المولد يحسب كما يلي:

$$T_{in} = \frac{P_{in}}{\omega}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi 1200}{60} = 125.7\ rad/s$$

$$T_{in} = \frac{36.6 \times 10^3}{125.7} = 191.2\ Nm$$

هـ) معامل تنظيم الجهد للمولد يمكن حسابه باستخدام المعادلة(13-3) للحالات الثلاثة كما يلي:

$$V_R\% = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} \times 100$$

الحالة (1) :

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

الحالة (2) :

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

الحالة (3) :

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

أسئلة وتمارين

1- لماذا يفضل ربط المولدات التزامنية على التوازي؟

2- ما شروط ربط المولدات التزامنية على التوازي؟

3- ما مخاطر توصيل المولد التزامني على التوازي بدون تحقق شرط أو أكثر من شروط التزامن؟

4- ما المقصود بالقضيب اللانهائي؟

5- بعد توصيل المولد بالقضيب اللانهائي ، هل يمكن التحكم في سرعة المولد؟

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

7- متى تفقد الآلة التزامن؟

8- مولد تزامني ثلاثي الأوجه 10MW ملفاته موصلة على شكل نجمة ،جهد أطرافه 11kV والتردد 60 Hz ،ممانعته التزامنية 0.66 Ω ومقاومة ملفات المنتج 0.1 Ω ، احسب الجهد الداخلي E_{Ph} عند الحمل الكامل و معامل قدرة 0.85 متأخر

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

أ) 0.72 متأخر ، ب) 0.72 متقدماً ، جـ) مساوياً للواحد

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

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

ممانعته التزامنية 1.1 Ω ومقاومة ملفات المنتج 0.15 Ω ، عند الحمل الكامل يعطي تياراً مقداره 250 A عند معامل قدرة 0.8 متأخر، فإذا كانت مفاقيد الاحتكاك 24 kw و المفاقيد الحديدية 18 kw عند الحمل الكامل:

أ) ارسم منحنى الدائرة المفتوحة للمولد

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

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

د) احسب القدرة الداخلة للمولد

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

11- مولد تزامني ذو أربعة أقطاب ملفاته موصلة على شكل دلتا جهد أطرافه 280V عند تردد 60 Hz ، الممانعة التزامنية 1.05 Ω لكل وجه و مقاومة ملفات المنتج مهملة ، تيار حمله الكامل 100 A عند معامل قدرة 0.78 متأخر و مفاقيد الاحتكاك 1.75 kw والمفاقيد الحديدية 1.2 kw عند الحمل الكامل و تيار المجال ضبط بحيث يكون جهد الأطراف 280 V عند عدم الحمل .

احسب ما يلي:

أ) سرعة دوران هذا المولد

ب) جهد الأطراف عند الحمل الكامل في الحالات التالية:

1- معامل القدرة 0.78 متأخر

2- معامل القدرة 1.0

3- معامل القدرة 0.78 متقدم

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

د) العزم الداخل للمولد

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

الوحدة الرابعة

المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

الهدف العام للوحدة: الإلمام الشامل بكيفية تشغيل وأداء المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه و تطبيقاتها

الأهداف التفصيلية:

1- أن يلم المتدرب بنظرية عمل المحركات التزامنية.
2- أن يلم المتدرب بطرق بدء حركة المحركات التزامنية.
3- أن يفهم المتدرب كيفية التحكم في معامل القدرة ومنحنيات (V) للمحرك التزامني
4- أن يلم المتدرب بكيفية استخدام المحرك التزامني كمكثف تزامني
5- أن يتمكن المتدرب من إجراء الحسابات المتعلقة بتشغيل المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه.
6- أن يتمكن المتدرب من حساب القدرة والعزم والكفاءة للمحركات التزامنية.
7- أن يفهم المتدرب سلوك المحرك التزامني عند تغير الحمل أو تيار المجال
8- أن يتمكن المتدرب من رسم المخطط الاتجاهي وكيفية استخدامه للتحكم في هذه المحركات.

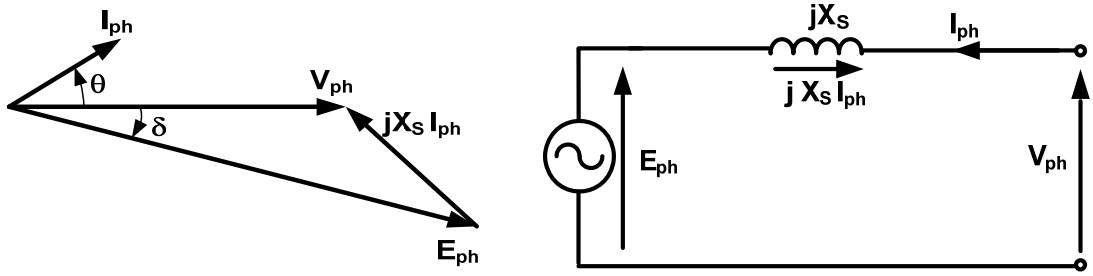
الوحدة الرابعة : المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

التركيب

الآلة التزامنية يمكن تشغيلها كمحرك تزامني Synchronous Motor وذلك بتغذية العضو الثابت من مصدر جهد ثلاثي الأوجه وتغذية ملفات المجال بتيار مستمر كالمعتاد وعند ذلك ينتج مجالان مغناطيسيان أحدهما يدور بالسرعة التزامنية حسب تردد مصدر الجهد وهو المجال الناتج عن العضو الثابت والآخر يدور حسب سرعة العضو الدوار وعندما تصل سرعة العضو الدوار إلى سرعة المجال الناتج عن ملفات العضو الثابت تستقر سرعة المحرك عند هذه السرعة ولا تتغير مهما تغير حمل المحرك مادام ضمن الحمل المقنن له. الشكل (3-16) يبين أنه عندما تكون زاوية العزم (δ) سالبة فإن الآلة التزامنية تتحول إلى محرك وعندها تكون القدرة الكهربائية داخلة إلى الآلة.

جميع العلاقات الرياضية الخاصة بالمولد التزامني تنطبق تماماً على المحرك التزامني مع الأخذ في الاعتبار تغير اتجاه القدرة وبالتالي يتغير اتجاه التيار في العضو الثابت ، وعلى هذا الأساس تصبح الدائرة المكافئة للمحرك التزامني كما هو موضح في الشكل (1-4) مع إهمال مقاومة ملفات العضو الثابت للتبسيط وبالتالي يمكن إيجاد قيمة الجهد الداخلي من المعادلة التالية:

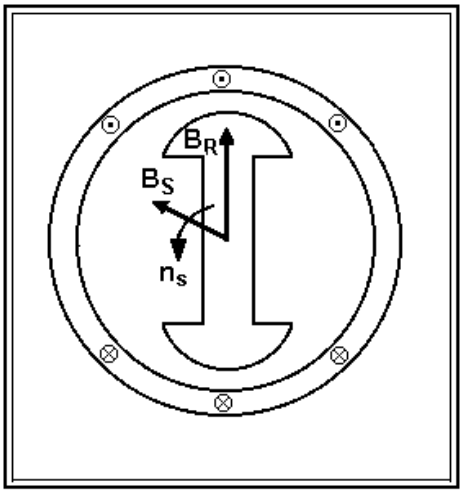
$$E_{ph} = V_{ph} - jX_S I_{ph} \qquad (4\text{-}1)$$



الشكل (1-4): الدائرة المكافئة والمخطط الاتجاهي للمحرك التزامني

كيفية عمل المحرك التزامني

لكي نفهم كيف يعمل المحرك التزامني ، انظر الشكل (2-4) الذي يوضح محركاً تزامنياً ذا قطبين. عندما تغذى ملفات المجال بالتيار المستمر سيتولد مجال مغناطيسي ثابت في العضو الدوار ، أما العضو الثابت فعندما يوصل إلى مصدر الجهد فستمر فيه تيارات ثلاثية الأوجه والتي بدورها ستولد مجالاً مغناطيسياً دواراً منتظماً وبالتالي سيتواجد داخل الآلة مجالان مغناطيسيان هما B_R و B_S ، كما في الشكل (2-4). مجال العضو الدوار B_R سيحاول أن يكون متعامداً مع مجال العضو الثابت B_S " تماماً كما يحدث عندما توضع قطعتان من المغناطيس قرب بعضهما البعض " وحيث أن مجال العضو الثابت يدور فإن مجال العضو الدوار سيحاول اللحاق به (ومعه العضو الدوار نفسه) ولكن لن يتمكن من ذلك بسبب اتساع الزاوية بينهما ، وبالتالي لابد من أيجاد وسيلة تجعل العضو الدوار يحافظ على زاوية صغيرة بين مجاله ومجال العضو الثابت و لكي يتحقق ذلك يجب أن يدار العضو الدوار بالسرعة التزامنية أو قريب منها قبل تغذية ملفاته من مصدر جهد مستمر وعند التغذية ستكون الزاوية بين المجالين صغيرة وسيستمر مجال العضو الدوار (ومعه العضو الدوار نفسه) في اللحاق بمجال العضو الثابت وسيدور بنفس سرعته (السرعة التزامنية) ولا تتغير مهما تغير حمل المحرك مادام ضمن الحمل المقنن له ، وفي حالة زيادة الحمل عن العزم الأقصى للمحرك (أي أن $\delta > -90$) فإن العضو الدوار سيفقد التزامن ويبدأ بالتباطؤ التدريجي حتى يتوقف.



الشكل (2-4): المجالات المغناطيسية في المحرك التزامني

طرق بدء حركة المحرك التزامني

1- باستخدام المحرك الخارجي

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

2- باستخدام قضبان التخميد

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

3- باستخدام ظاهرة التيارات الدوامية

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

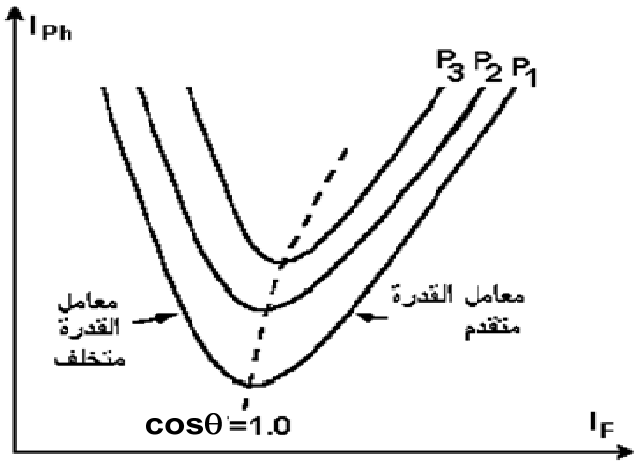
4- باستخدام مصدر جهد متغير التردد

يمكن بدء دوران المحرك التزامني بسهولة إذا كان يغذى من مصدر جهد متغير التردد والذي بدأ ينتشر في السنوات الأخير بفضل التقدم في تقنية إلكترونيات القدرة وذلك بخفض التردد إلى أن تصبح سرعة المجال المغناطيسي الدوار قليلة جداً بحيث يتمكن العضو الدوار من أن يعلق به ، وعندما يبدأ العضو الدوار في الدوران يرفع التردد تدريجياً حتى يصل المحرك إلى السرعة المطلوبة. وسيستمر العضو الدوار في الدوران بنفس سرعة المجال المغناطيسي ما لم يفقد التزامن.

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

منحنيات (V) للمحرك التزامني

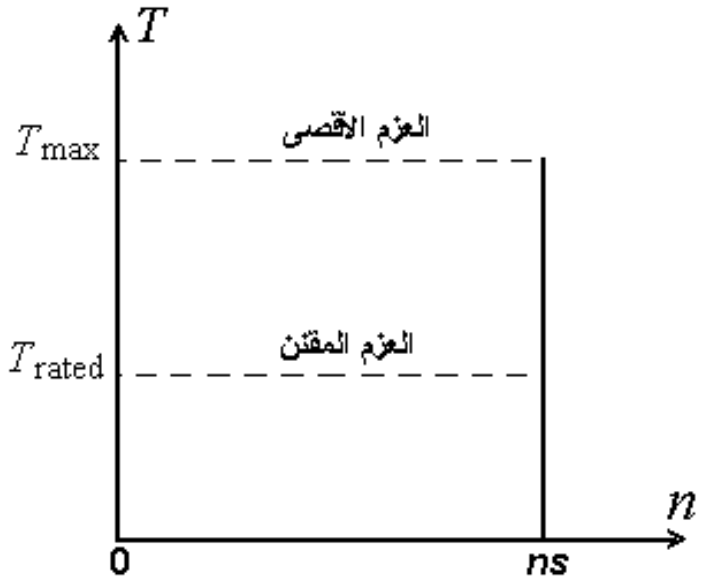
هي منحنيات تحدد خواص تشغيل المحرك التزامني وتربط بين تيار المجال I_F وتيار المنتج I_{Ph} انظر الشكل (3-4)، وكل منحنى يمثل مستوى محدداً من القدرة الفعالة P ، في كل منحنى أقل قيمة لتيار المنتج تحدث عندما يكون معامل القدرة مساوياً للواحد وعند هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلكاً للقدرة الفعالة P فقط ، وعند أي قيمة أقل من هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلكاً للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى القدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متأخر ، إلا أنه عندما يكون تيار المجال أكبر من هذه القيمة يكون المحرك معطياً للقدرة غير الفعالة Q بالإضافة إلى استهلاكه للقدرة الفعالة P ويكون معامل القدرة متقدماً في هذه الحالة. وهذا يعني أنه يمكننا بالتحكم في تيار المجال أن نجعل المحرك التزامني إما مستهلكاً للقدرة غير الفعالة أو مزوداً للشبكة بالقدرة غير الفعالة أي أن المحرك التزامني يمكن أن يعمل كأنه ملف أو مكثف.



الشكل (3-4): منحنيات V للمحرك التزامني

منحنى العزم مع السرعة للمحرك التزامني

المحرك التزامني عادةً يدير أحمالاً تتطلب سرعة ثابتة وغالباً يتم تغذيته من مصدر كهربائي ضخم بحيث يظهر بالنسبة للمحرك كأنه قضيب لا نهائي وهذا يعني أن جهد الأطراف للمحرك وتردد المصدر لا يمكن أن يتغيرا مهما تغيرت القدرة المسحوبة من المصدر بواسطة المحرك، وبما أن سرعة المحرك مرتبطة بتردد المصدر فهذا يعني أن سرعة المحرك لن تتغير مهما تغير الحمل المسلط عليه ما دام ضمن الحمل المقنن ، وعليه فإن عزم المحرك سيبقى ثابتاً عند السرعة التزامنية مهما تغير الحمل ما دام ضمن الحمل المقنن كما هو موضح في الشكل (4-4):



الشكل (4-4): منحنى العزم و السرعة للمحرك التزامني

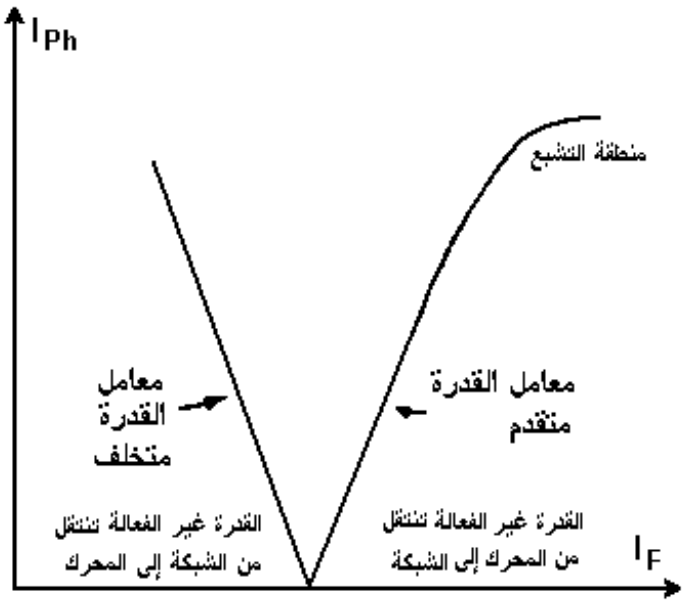
استخدامات المحرك التزامني

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

المكثف التزامني

من التطبيقات الهامة للمحرك التزامني استخدامه كمكثف تزامني وذلك من أجل تحسين معامل القدرة، ولهذا الغرض يصنع المحرك التزامني بدون عمود خارج منه وذلك لأنه يعمل بدون حمل، من أجل ذلك يزاد تيار المجال إلى قيمة معينه بحيث يتقدم تيار المنتج على جهد الأطراف بزاوية قريبة من 90^{o} وهذا يجعله يظهر على الشبكة كأنه مكثف. يبين الشكل (4-5) منحنى V للمحرك التزامني عندما يعمل كمكثف تزامني. ولا يزال المكثف التزامني متواجد بأعداد كبيرة في الأنظمة الكهربائية القديمة ، أما في الوقت الحاضر فقد بدأ

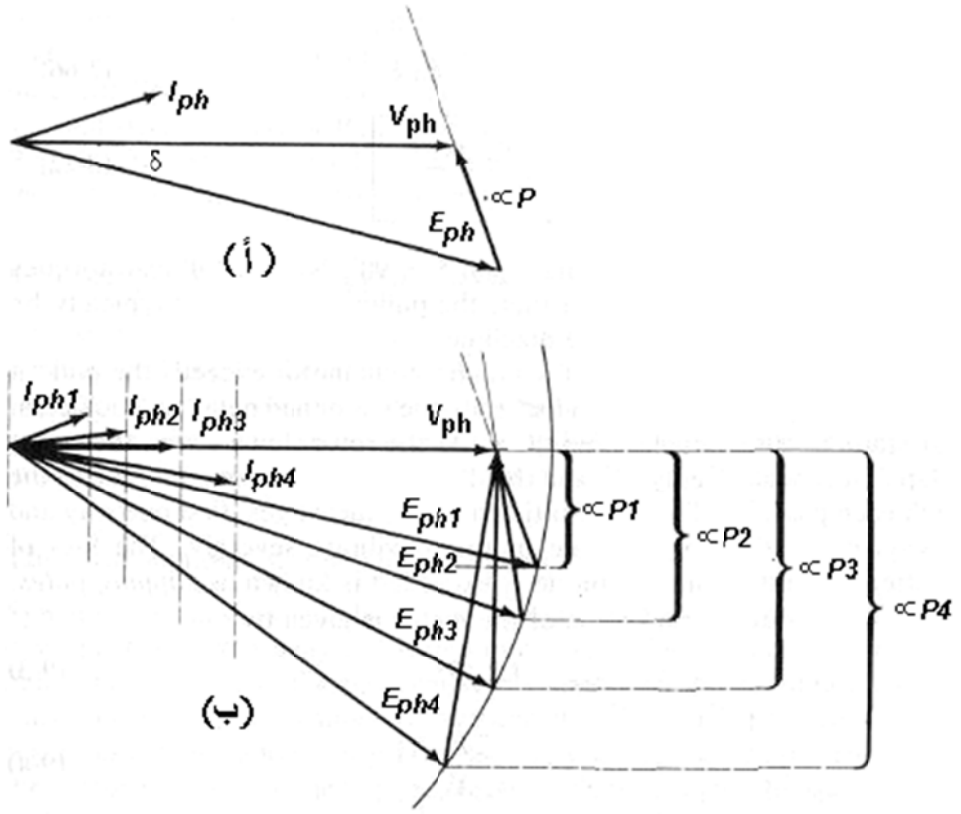
يقل استخدامه لهذا الغرض حيث تم استبداله بالمكثفات الساكنة static capacitors نضرا لقلة ثمنها و قلة متطلبات صيانتها.



الشكل (5-4): منحنى V للمكثف التزامني

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

عندما يدار حمل ما بمحرك تزامني فإن المحرك سوف ينتج ما يكفي من العزم لكي يحافظ على سرعة دورانه عند السرعة التزامنية. لكي نفهم ما يحدث عند تغير الحمل ، نفترض أن المحرك يعمل عند معامل قدرة متقدماً كما هو موضح في الشكل (6-4)أ ، فإذا ازداد الحمل على عمود الدوران فإن سرعة المحرك ستقل ونتيجة لذلك زاوية العزم (δ) سوف تزداد وبالتالي سوف يزداد العزم المتولد طبقاً للمعادلة (17-3) والذي بدوره سيزيد من سرعة العضو الدوار إلى أن تصل إلى السرعة التزامنية مرة أخرى ولكن عند زاوية عزم (δ) أكبر ، مما يعني استهلاكاً لقدرة أكبر ، وهكذا كلما ازداد الحمل على المحرك كما هو واضح من المخطط الاتجاهي في الشكل (6-4) ب ، ويحدث العكس تماماً عندما يقل الحمل على المحرك ، مع ملاحظة أن قيمة E_{Ph} تبقى ثابتة دائماً بسبب عدم تغير قيمة تيار المجال و في المخطط الاتجاهي يتحرك المتجه E_{Ph} راسماً دائرة يمثل نصف قطرها ، المثال التالي يوضح هذا السلوك للمحرك التزامني.



الشكل (6-4): تأثير تغير الحمل على سلوك المحرك التزامني

مثال (1-4):

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

أ) ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

ب) أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} ، I_L

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

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

هـ) احسب معامل القدرة بعد زيادة الحمل

الحـل:

أ) المخطط الاتجاهي موضح في الشكل (7-4)أ

ب) القدرة الميكانيكية الخارجة من المحرك بالكيلو وات هي:

$$P_o = 15hp \times 0.746kw/hp = 11.19\ kw$$

القدرة الكهربائية الداخلة إلى المحرك هي:

$$P_{in} = P_o + P_{cu1} + P_{cor} + P_F$$

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

وبالتالي يمكن حساب تيار الخط كما يلي:

$$I_L = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_{ph}\cos\theta}$$

$$I_L = \frac{13.69\times10^3}{\sqrt{3}\times208\times0.8} = 47.5\ A$$

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

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{47.5}{\sqrt{3}} = 27.4\ A$$

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

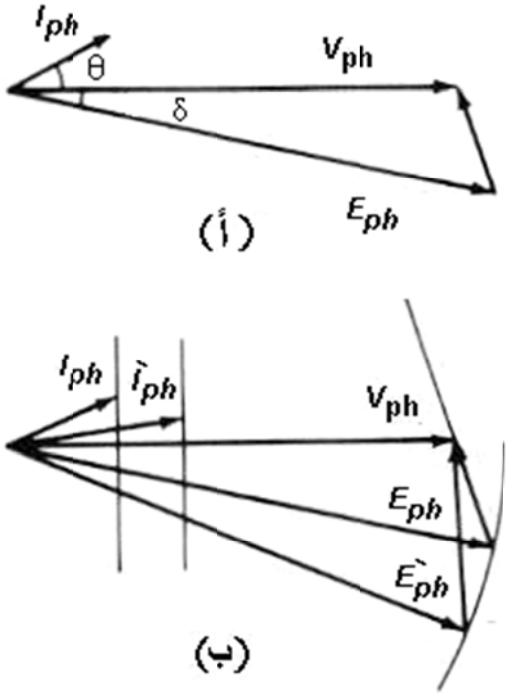
$$I_{ph} = 27.4\angle 36.87^\circ\ A$$

أما E_{Ph} فيمكن حسابه مباشرة بتطبيق المعادلة (4-1) كما يلي:

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

جـ) عند زيادة الحمل إلى 30 hp فإن العضو الدوار سيتباطأ قليلاً وعندها تزداد الزاوية (δ) بين المجالين مما يعني ازدياد عزم المحرك لكي تصل سرعته إلى وضعها السابق وهذا يعني

انفراج الزاوية بين V_{Ph} و E_{Ph} كما هو موضح في المخطط الاتجاهي في الشكل رقم (7-4)ب.



الشكل (7-4): المخطط الاتجاهي للمحرك التزامني في حالات تحميل مختلفة

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

$$P_{in} = P_o + P_{cu1} + P_{cor} + P_F$$

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

بعد زيادة الحمل قيمة E_{Ph} لم تتغير وإنما ازدادت الزاوية (δ) بينها وبين V_{Ph} هذه الزاوية الجديدة يمكن إيجادها بتطبيق المعادلة (3-15) كما يلي:

$$\delta = Sin^{-1}(\frac{X_S P}{3V_{Ph}E_{Ph}})$$
$$= Sin^{-1}(\frac{2.5\times 24.88\times 10^3}{3\times 208\times 255})$$
$$= Sin^{-1}(0.391)$$
$$= 23°$$

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

$$E_{Ph} = 255 \angle -23°$$

وبالتالي يمكن إيجاد تيار المنتج I_{Ph} من المعادلة (1-4) كما يلي:

$$I_{Ph} = \frac{V_{Ph} - E_{Ph}}{jX_S}$$
$$= \frac{208\angle 0° - 255\angle -23}{j2.5}$$
$$= \frac{103.1\angle 105°}{j2.5} = 41.2\angle 15° \quad A$$

وبالتالي يكون تيار الخط كما يلي:

$$I_L = \sqrt{3} I_{ph} = \sqrt{3}\times 41.2 = 71.4\ A$$

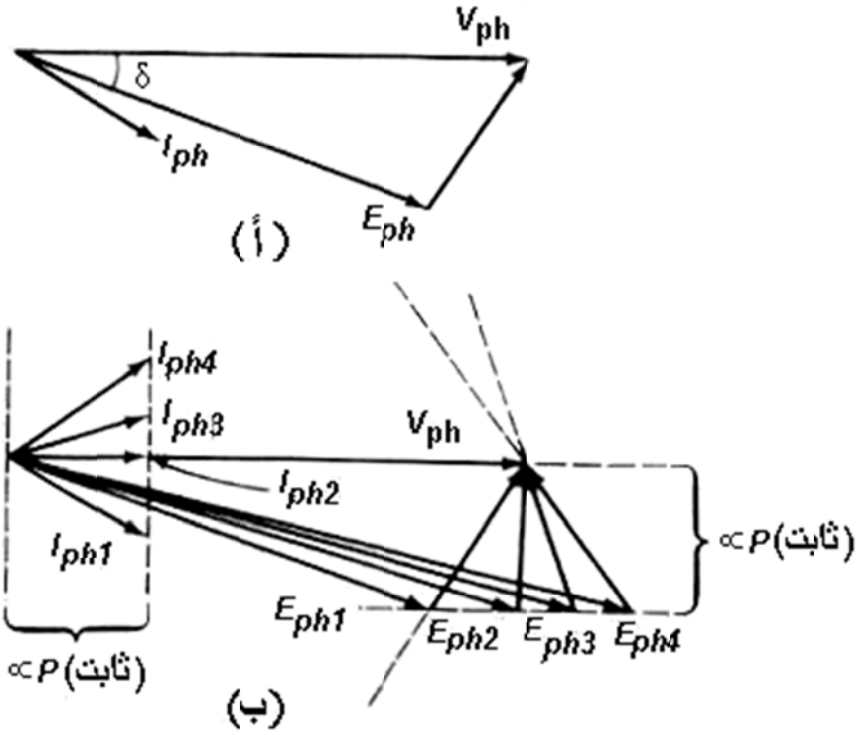
هـ) معامل القدرة بعد زيادة الحمل هو:

$$\cos\theta = \cos(15^\circ) = 0.966$$

سلوك المحرك التزامني في حالة تغيير تيار المجال:

لكي يتضح تأثير التغيير في تيار المجال على سلوك المحرك التزامني، افترض أن محركاً تزامنياً يعمل عند معامل قدرة متأخر كما هو موضح في الشكل (8-4) أ ، عند زيادة تيار المجال I_F فإن E_{Ph} سيزداد أما سرعة الدوران و عزم المحرك فلن يتغيرا، هذا يعني أنه كلما زادت قيمة I_F فإن E_{Ph} سيزداد مع ثبات القدرة الخارجة من المحرك، وعليه فإن زيادة E_{Ph} تعني النقص في قيمة I_{Ph} أولاً ثم يزداد بعد ذلك كما هو موضح في الشكل (8-4)ب.

ويلاحظ أنه عند القيم المنخفضة للجهد الداخلي E_{Ph} يكون تيار المنتج متأخر وبالتالي نجد أن المحرك يعمل كأنه حمل حثي Inductive Load بينما عند القيم المرتفعة للجهد الداخلي E_{Ph} يكون تيار المنتج متقدم وبالتالي نجد أن المحرك يعمل كأنه حمل سعوي Capacitive Load ، هذا السلوك للمحرك التزامني موضح في المثال (2-4).



الشكل (8-4): تأثير التغير في تيار المجال على سلوك المحرك التزامني

مثال (2-4):

افترض أن المحرك التزامني في المثال السابق يدير حملاً قدرته 15 hp عند معامل قدرة 0.85 متأخر:

أ) ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

ب) أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} ، I_L

جـ) إذا ازداد تيار المجال بنسبة 25% وضح سلوك المحرك باستخدام المخطط الاتجاهي ثم أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} ، I_L بعد زيادة تيار المجال

د) احسب معامل القدرة بعد زيادة تيار المجال

الحـل:

أ) المخطط الاتجاهي موضح في الشكل (4-9)

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

$$I_L = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_{ph} \cos\theta}$$

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

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

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{44.7}{\sqrt{3}} = 25.8\ A$$

و بما أن المحرك يعمل عند معامل قدرة متأخر فإن زاوية تيار الوجه تصبح كما يلي:

$$I_{ph} = 25.8 \angle -31.8^\circ\ A$$

أما E_{Ph} فيمكن حسابه مباشرة بتطبيق المعادلة (4-1) كما يلي:

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

جـ) عند زيادة تيار المجال I_F بنسبة 25% فإن الفيض المغناطيسي سيزداد بنفس النسبة وبالتالي الجهد الداخلي E_{Ph} سيزداد بنفس النسبة كما يلي:

$$E'_{Ph} = 1.25\, E_{Ph}$$
$$= 1.25\,(182) = 227.5 \quad V$$

ورغم زيادة E_{Ph} إلا أن القدرة الخارجة من المحرك تبقى ثابتة و تتناسب مع طول المتجه $(E_{Ph}\text{Sin}\,\delta)$ كما هو موضح في الشكل (4-9).

بما أن طول المتجه $(E_{Ph}\text{Sin}\,\delta)$ يبقى ثابتاً قبل زيادة تيار المجال وبعد ذلك ، لذا يمكننا حساب زاوية العزم الجديدة كما يلي:

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

وبالتالي يمكن إيجاد تيار المنتج I_{Ph} من المعادلة (4-1) كما يلي:

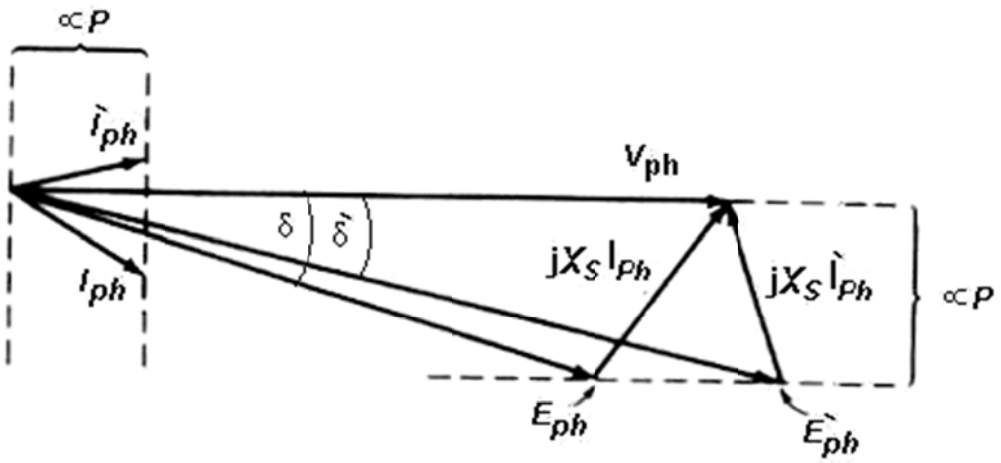
$$I_{Ph} = \frac{V_{Ph} - E_{Ph}}{jX_S}$$
$$= \frac{208\angle 0° - 227.5\angle -13.9°}{j2.5}$$
$$= \frac{56.2\angle 103.2°}{j2.5} = 22.5\angle 13.2° \quad A$$

وبالتالي يكون تيار الخط كما يلي:

$$I_L = \sqrt{3} I_{ph} = \sqrt{3} \times 22.5 = 38.97 A$$

د) معامل القدرة بعد زيادة تيار المجال هو:

$$\cos\theta = \cos(13.2^\circ) = 0.974$$



الشكل (4-9): المخطط الاتجاهي للمحرك التزامني في حالة تغير تيار المجال

أسـئلة وتمـارين

1- كيف يعمل المحرك التزامني؟

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

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

4- لماذا يجب قصر ملفات المجال أثناء عملية البدء؟

5- اشرح كيف يمكن تغيير معامل القدرة للمحرك التزامني من متقدم إلى متأخر أو العكس دون حدوث تغيير في القدرة الخارجة منه

6- متى يفضل استخدام المحرك التزامني على الحثي؟

7- ماذا يعني فقد التزامن بالنسبة للمحرك التزامني؟

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

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

أ) ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

ب) أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} ، I_L

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

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

هـ) احسب معامل القدرة بعد زيادة الحمل

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

أ) إذا كان يدير حملاً قدرته 400 hp عند معامل قدره 0.85 متقدماً ، أوجد قيمة و زاوية كل من E_{Ph} ، I_{Ph}

ب) إذا ازداد تيار المجال بنسبة 10% وضح سلوك المحرك باستخدام المخطط الاتجاهي ثم أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} وكذلك معامل القدرة الجديد.

المراجـع

اسم المرجع	المؤلف
Electric Machinery Fundamentals McGRAW-Hill, 1991	Stephen J . Chapman
An Introduction to Electrical Machines and Transformers, 1981	George McPherson, John Wiley & Sons
Electric Machines, 1994	M . S . Sarma, West Publishing Company
Electrical Technology Construction & Development, 1989.	Theraja and A . K . Theraja, Nirja
Electric Machines and Power Systems	Vincent del toro 1985