

آلات التيار المتردد

المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

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

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

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

الوقت المتوقع للتدريب: 8 ساعات

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

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

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

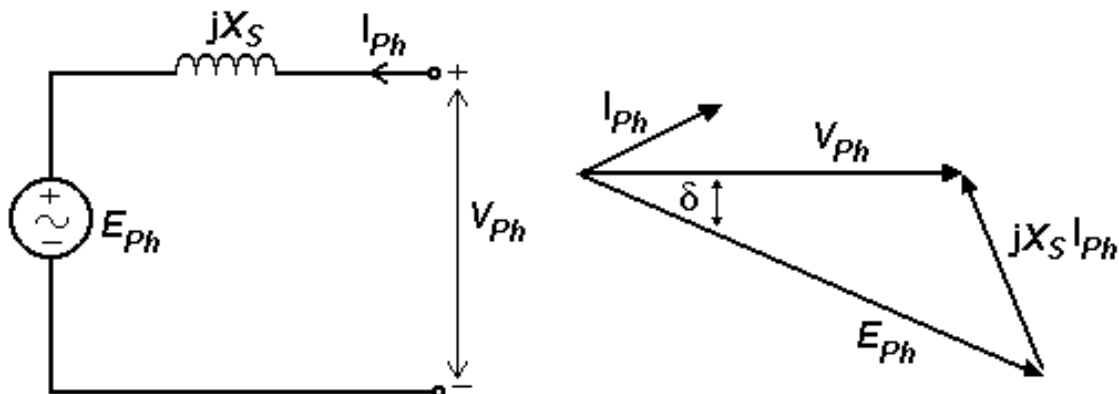
الوحدة الثالثة : المحركات التزامنية ثلاثية الأوجه

التركيب

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

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

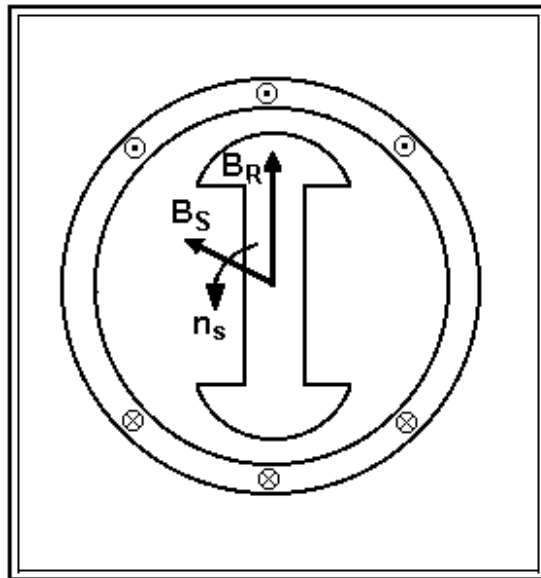
$$E_{ph} = V_{ph} - jX_S I_{ph} \quad (1 - 3)$$



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

كيفية عمل المحرك التزامني

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



الشكل رقم ٢ - ٣: المجالات المغناطيسية في المحرك التزامني

طرق بدء حركة المحرك التزامني

١- باستخدام المحرك الخارجي

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

٢- باستخدام قضبان التخميد

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

٣- باستخدام ظاهرة التيارات الدوامية

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

٤- باستخدام مصدر جهد متغير التردد

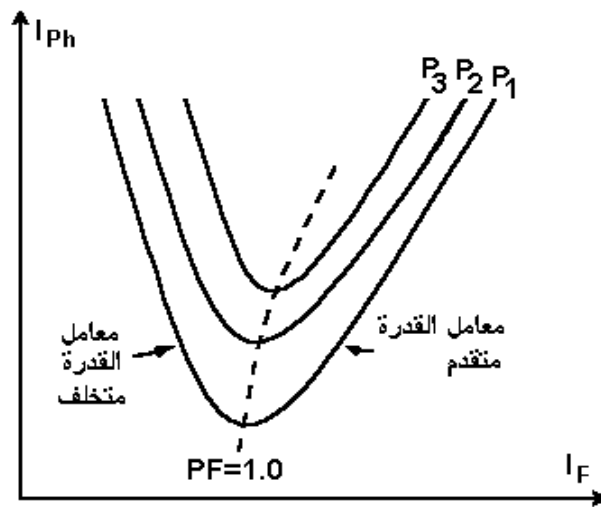
يمكن بدء دوران المحرك التزامني بسهولة إذا كان يغذى من مصدر جهد متغير التردد والذي بدأ ينتشر في السنوات الأخيرة بفضل التقدم في تقنية إلكترونيات القدرة وذلك بخفض التردد إلى أن تصبح سرعة المجال المغناطيسي الدوار قليلة جداً بحيث يتمكن العضو الدوار من أن يعلق به، وعندما يبدأ العضو

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

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

منحنيات (V) للمحرك التزامني

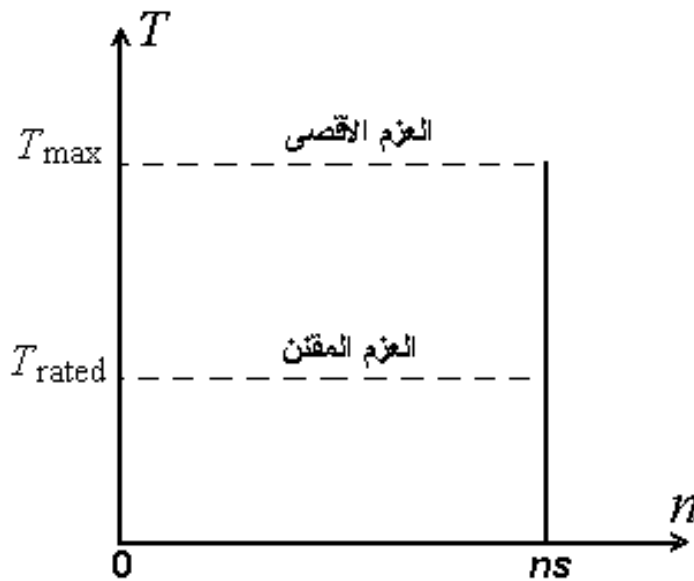
هي منحنيات تحدد خواص تشغيل المحرك التزامني وتربط بين تيار المجال I_F وتيار المنتج I_{Ph} انظر الشكل (٣ - ٣) ، وكل منحنى يمثل مستوى محدداً من القدرة الفعالة P ، في كل منحنى أقل قيمة لتيار المنتج تحدث عندما يكون معامل القدرة مساوياً للواحد وعند هذه القيمة لتيار المجال يكون المحرك مستهلكاً للقدرة الفعالة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



الشكل رقم ٣ - ٣: منحنيات V للمحرك التزامني

منحنى العزم / السرعة للمحرك التزامني

المحرك التزامني عادةً يدير أحمالاً تتطلب سرعة ثابتة وغالباً يتم تغذيته من مصدر كهربائي ضخيم 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 أنه ضمن الحمل المقنن للمحرك، وعليه فإن عزم المحرك سيبقى ثابتاً عند السرعة التزامنية مهما تغير الحمل ما دام أنه ضمن الحمل المقنن للمحرك كما هو موضح في الشكل التالي:



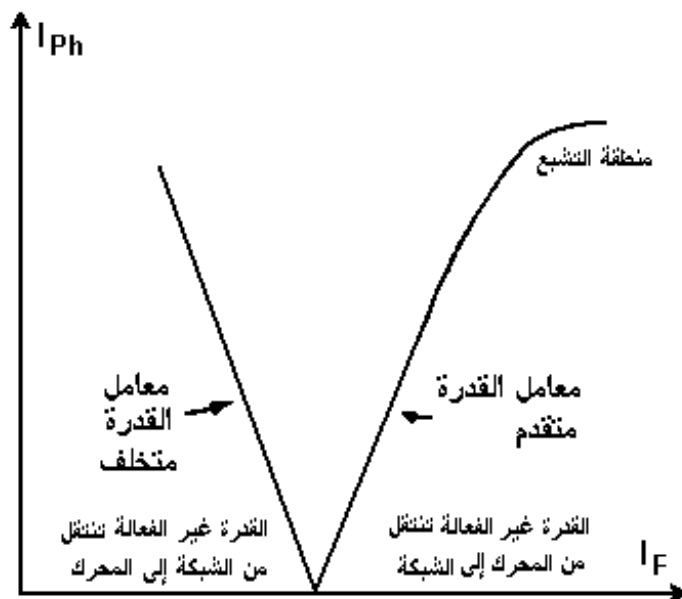
الشكل رقم ٤ - ٣: منحنى العزم / السرعة للمحرك التزامني

استخدامات المحرك التزامني

يستخدم المحرك التزامني على نطاق ضيق وذلك في التطبيقات التي يكون فيها ثبات السرعة 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 يزداد تيار المجال إلى قيمة معينة بحيث يتقدم تيار المنتج على جهد الأطراف بزاوية قريبة من ٩٠ درجة وهذا يجعله يظهر على الشبكة كأنه مكثف. الشكل (٥ - ٣) يبين منحنى V للمحرك التزامني عندما يعمل كمكثف تزامني. وما زال المكثف التزامني يوجد منه أعداد كبيرة تحت الخدمة في الأنظمة الكهربائية القديمة ، أما في الوقت الحاضر فقد بدأ يقل استخدامه لهذا الغرض ويستخدم بدلاً منه المكثفات الساكنة static capacitors التي احتلت مكانه سريعاً وذلك لقلّة ثمنها وقلة متطلبات الصيانة.

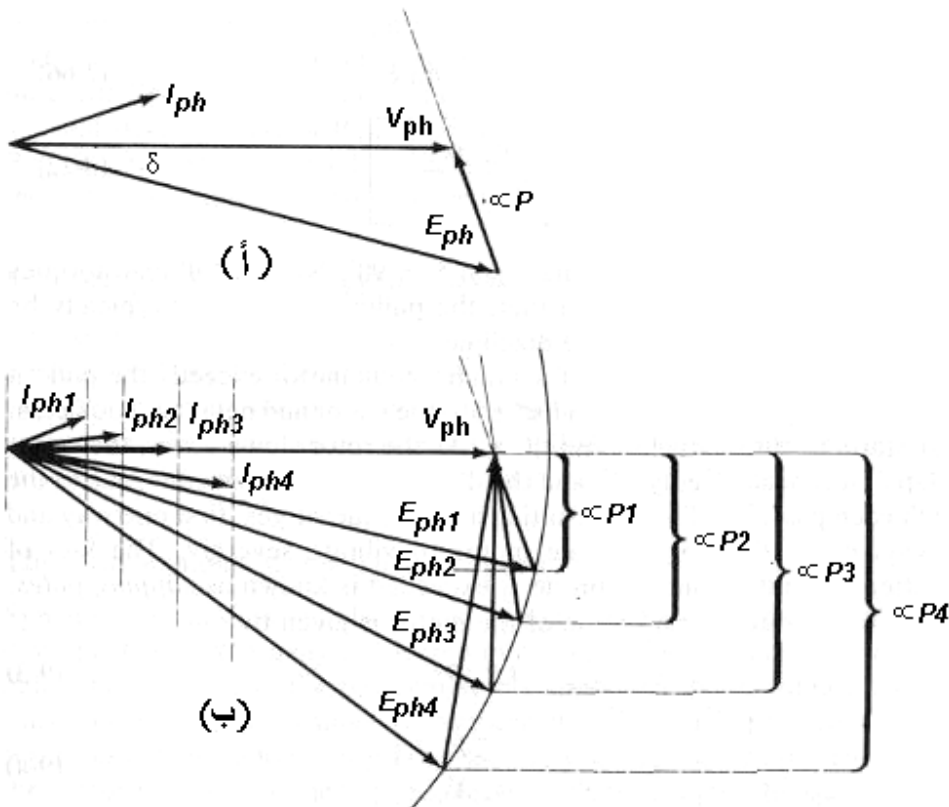


الشكل رقم ٥ - ٣: منحنى V للمكثف التزامني

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

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

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



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

مثال (١- ٣):

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

أ (ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

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

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

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

هـ) احسب معامل القدرة بعد زيادة الحمل

الحل:

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

ب) القدرة الميكانيكية الخارجة من المحرك بالكيلو واط هي:

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

أما القدرة الكهربائية الداخلة إلى المحرك فهي:

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

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

وبالتالي يمكن حساب تيار الخط كما يلي:

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

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

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

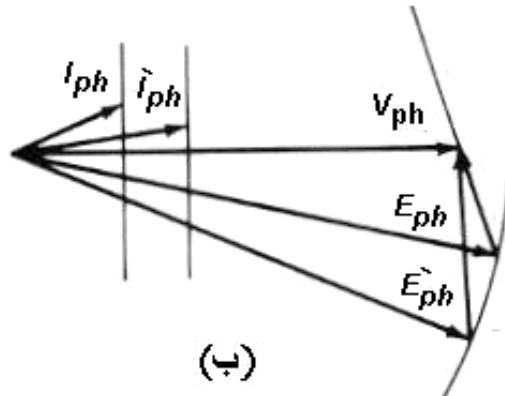
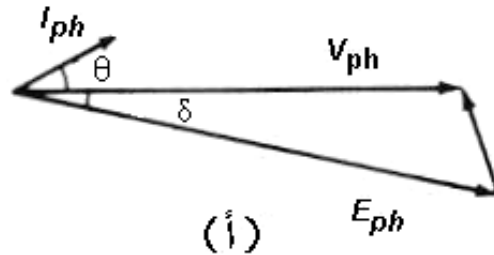
و بما أن المحرك يعمل عند معامل قدرة متقدماً فإن زاوية تيار الوجه تصبح كما يلي:

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

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

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

(ج) 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 (٧ - ٣) ب.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

وبالتالي يكون تيار الخط كما يلي:

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

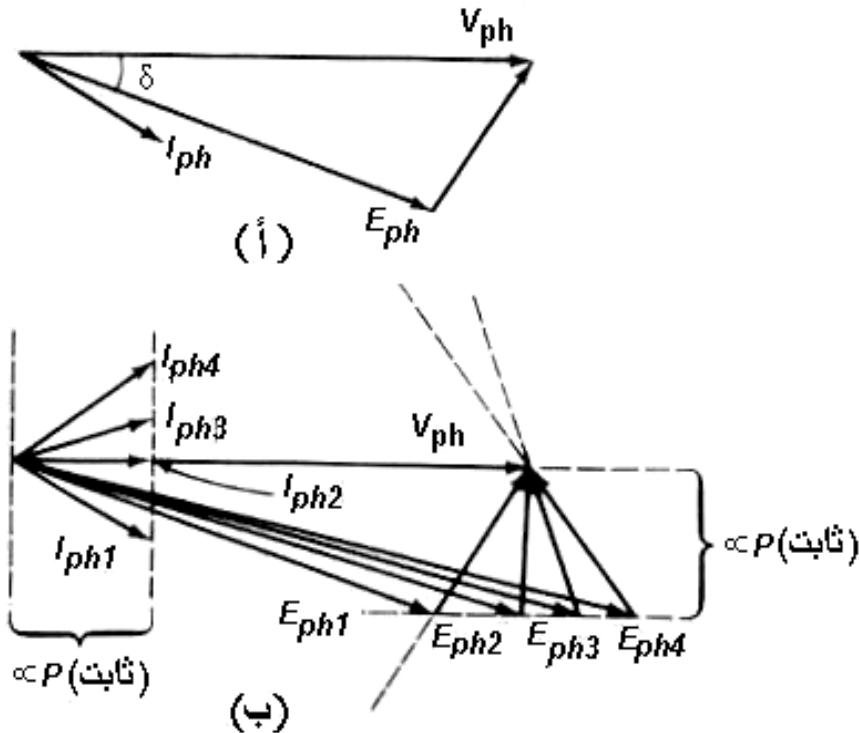
هـ) معامل القدرة بعد زيادة الحمل هو:

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

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 متخلفاً كما هو موضح في الشكل (٨ - ٣) أ ، عند زيادة تيار المجال I_F فإن E_{ph} سيزداد أما سرعة الدوران و عزم المحرك فلن يتغير ، هذا يعني أنه كلما زادت قيمة I_F فإن E_{ph} سيزداد مع ثبات القدرة الخارجة من المحرك ، وعليه فإن زيادة E_{ph} تعني النقص في قيمة I_{ph} أولاً ثم يزداد بعد ذلك كما هو موضح في الشكل (٨ - ٣) ب.

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



الشكل رقم (٨ - ٣) تأثير التغيير في تيار المجال على سلوك المحرك التزامني

مثال (٢- ٣):

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

أ (ارسم المخطط الاتجاهي للمحرك

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

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

د (احسب معامل القدرة بعد زيادة تيار المجال

الحل:

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

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

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

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

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

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

و بمأن المحرك يعمل عند معامل قدرة متخلفاً فإن زاوية تيار الوجه تصبح كما يلي:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

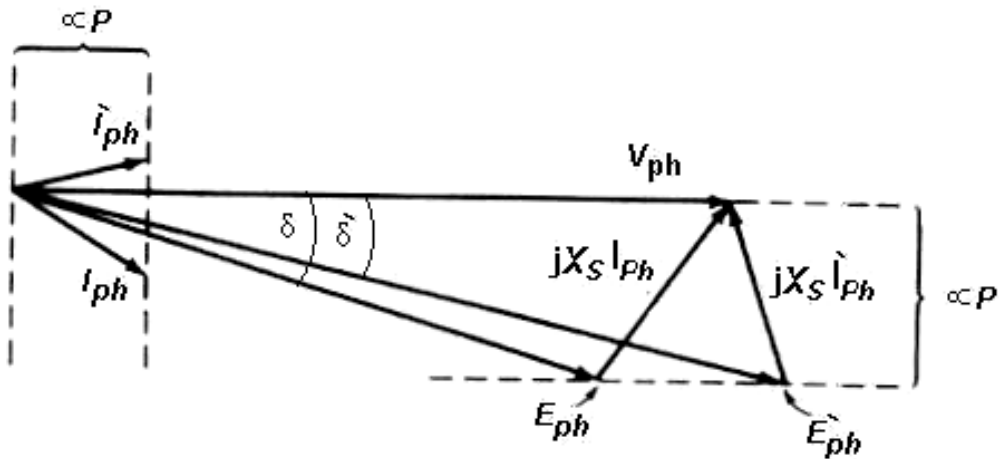
$$\begin{aligned} I_{Ph} &= \frac{V_{Ph} - E_{Ph}}{jX_S} \\ &= \frac{208 \angle 0^\circ - 227.5 \angle -13.9^\circ}{j2.5} \\ &= \frac{56.2 \angle 103.2^\circ}{j2.5} = 22.5 \angle 13.2^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

وبالتالي يكون تيار الخط كما يلي:

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

د (معامل القدرة بعد زيادة تيار المجال هو:

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



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

أسئلة وتمارين

- ١- كيف يعمل المحرك التزامني؟
- ٢- لماذا لا يستطيع المحرك التزامني البدء من تلقاء نفسه؟
- ٣- قارن بين طرق بدء المحرك التزامني من حيث: سهولة الاستخدام و التكلفة
- ٤- لماذا يجب قصر ملفات المجال أثناء عملية البدء؟
- ٥- اشرح كيف يمكن تغيير معامل القدرة للمحرك التزامني من متقدم إلى متخلف أو العكس دون حدوث تغيير في القدرة الخارجة منه
- ٦- متى يفضل استخدام المحرك التزامني على الحثي؟
- ٧- ماذا يعني فقد التزامن بالنسبة للمحرك التزامني؟
- ٨- قارن بين المحرك الحثي و التزامني من حيث : التكلفة و طرق البدء و السرعة و العزم
- ٩- محرك تزامني ملفاته موصلة على شكل نجمة ، جهد الخط للمصدر 360 V والتردد 50 Hz ، ممانعته التزامنية 2.1Ω ومقاومة ملفات المنتج مهمة ، 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_{Line}
 - ج) عندما يزداد الحمل إلى 18 kw وضع سلوك المحرك باستخدام المخطط الاتجاهي
 - د) أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} ، I_{Line} بعد زيادة الحمل
 - هـ) احسب معامل القدرة بعد زيادة الحمل
- ١٠- محرك تزامني ملفاته موصلة على شكل دلتا، يغذى من مصدر جهده 480 V ، ممانعته التزامنية 1Ω ومقاومة ملفات المنتج مهمة و المفاقيد الحديدية و مفاقيد الاحتكاك مهمة أيضاً. أوجد ما يلي:
 - أ) إذا كان يدير حملاً قدره 400 hp عند معامل قدره 0.85 متقدماً ، أوجد قيمة وزاوية كل من E_{Ph} ، I_{Ph}
 - ب) إذا زيد تيار المجال بنسبة ١٠٪ وضع سلوك المحرك باستخدام المخطط الاتجاهي ثم أوجد قيم E_{Ph} ، I_{Ph} وكذلك معامل القدرة الجديد.