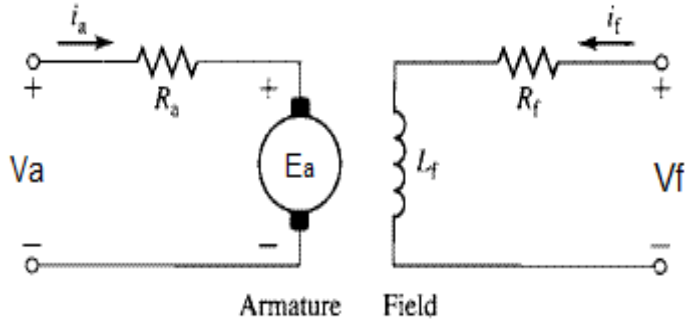
المحاضرات من٣ حتى النهاية
آلات التيار المستمر
السنة الثانية: تغذية كهربائية

المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر :

بشكل رئيسي يضم محرك التيار المستمر قسمين رئيسين وهما: الجزء الثابت ويسمى أيضاً بالمحرض وفيه تتواجد ملفات الحقل أو ملفات التهييج (وفي بعض الأحيان مغناطيس دائم لتوليد حقل مغناطيسي ثابت)، والجزء الدائر والذي يحوي على ملفات المتحرض ويمر فيها تيار الحمل. قبل دراسة مميزات محركات التيار المستمر لابد من التمييز بين المميزات الطبيعية للآلة المستمرة وتلك الاصطناعية. المميزات الطبيعية تهتم بدراسة خصائص المحرك التصميمية فقط، بينما الاصطناعية تهتم بدراسة تأثير وجود مقاومات خارجية تسلسلية مع دارة المتحرض على مميزات عمل المحرك.

٣-٢-١- المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر المستقلة والتفرعية :

بالنسبة لمحركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل تتم تغذية ملفات التهييج من مصدر خارجي وبشكل مستقل عن ملفات المتحرض كما يوضح الشكل (٣-١).



الشكل (٣-١): الدارة الكهربائية المكافئة لمحرك تيار مستمر ذو تهييج مستقل

حيث V_f و V_a يمثلان الجهود المطبقة على دارتي التهييج والمتحرض على الترتيب، بينما I_f و I_a هما تيارات ملفات التهييج والمتحرض على الترتيب. E_a تمثل القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في الدائر ذو المقاومة R_a . R_f تمثل مقاومة ملفات التهييج والتي تكون كبيرة نسبياً أمام مقاومة ملف المتحرض. في المحركات ذات التهييج المستقل وعند توتر ومقاومة ثابتة لدارة التهييج فإن الفيض المغناطيسي ϕ يبقى ثابتاً و لا يتأثر بتغيرات الحمولة (المتمثلة بالتيار I_a)، لذلك وعند عمل الآلة ضمن مجالها الخطي يمكننا أن نكتب علاقة تناسب الفيض مع تيار التهييج (ثابت التناسب α) بالشكل المبسط التالي :

$$\phi = \alpha . I_f \qquad (١-٣)$$

بالاعتماد على الدارة المكافئة للمحرك يمكننا كتابة العلاقات الكهربائية المميزة بالشكل الآتي :

$$V_f = R_f . I_f$$
$$I_L = I_a$$
$$V = E_a + R_a . I_a$$
$$T_a = C_m . \phi . I_a$$
$$E_a = C_e . \phi . n$$
$$E_a = C_m . \phi . \omega \qquad (٢-٣)$$

حيث:

V : يمثل الجهد على مرابط الآلة (V)

I_L : يمثل تيار المحرك المسحوب من الشبكة وهو نفسه تيار المتحرض I_a (A).

T_a : تمثل عزم المتحرض (N.m).

C_e : يمثل ثابت الآلة الكهربائي.

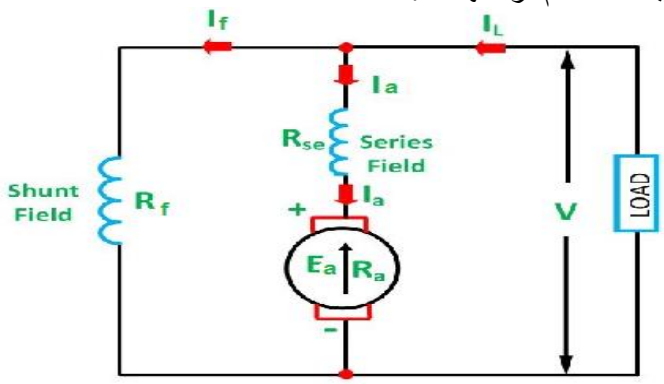
C_m : يمثل ثابت الآلة الميكانيكي.

n : سرعة دوران محور المحرك (r.p.m).

ω : السرعة الزاوية (rad/sec) ($\omega = \frac{2\pi n}{60}$).
عند عمل الآلة كمحرك سينعكس اتجاه التيار I_L وسيعطى الجهد الكهربائي المتولد بدلالة القوة المحركة الكهربائية بالشكل :

$$V = E_a - R_a . I_a \qquad (٣ - ٣)$$

أما فيما يخص محرك التيار المستمر التفرعي والموضح بالشكل (٣-٢) فإنه يعد حالة خاصة من محركات التيار المستمر ذات التهييج المستقل، حيث الفيض ثابت ولا يتعلق بالحمل، لذلك يمكن اعتبار أن مميزات هذين النوعيين متشابهة تقريباً لذلك ستتم دراستها معاً.



الشكل (٣-٢): الدارة المكافئة لمحرك التيار المستمر التفرعي

بالاعتماد على العلاقات (٣ – ٢) يمكننا كتابة علاقة الجهد الكهربائي بالشكل:

$$V = C_e . \phi . n + R_a . I_a \qquad (٤ - ٣)$$

أو

$$V = C_m . \phi . \omega + R_a . I_a \qquad (٥ - ٣)$$

انطلاقاً من العلاقتين الأخيرتين يمكننا أن نكتب :

$$n = \frac{V}{C_e . \phi} - \frac{R_a}{C_e . \phi} I_a \qquad (٦ - ٣)$$

أو

$$\omega = \frac{V}{C_m . \phi} - \frac{R_a}{C_m . \phi} I_a \qquad (٧ - ٣)$$

العلاقتين (٣-٦) و (٣-٧) تمثلان المميزات الكهروميكانيكية لمحركات التيار المستمر المستقلة و التفرعية. باعتبار أن الفيض في هذه الأنواع من المحركات يعد ثابتاً لذلك فإن الجداء $C_e . \phi$ أو $C_m . \phi$ يعتبر أيضاً ثابتاً، وهذا يعني أن الطرف الأول من كلا المعادلتين السابقتين هو مقدار ثابت وذلك عند جهد تغذية ثابت و يمثل سرعة المحرك على فراغ.

$$n_0 = \frac{V}{C_e . \phi} \quad , \quad \omega_0 = \frac{V}{C_m . \phi} \qquad (٨ - ٣)$$

أما الحد الثاني من العلاقتين فهو متغير مع الحمل والمتمثل بالتيار I_a، وهذا الحد يمكن اعتباره بمثابة هبوط سرعة المحرك بسبب الحمل ويساوي :

$$\Delta n = \frac{R_a . I_a}{C_e . \phi} \quad , \quad \Delta\omega = \frac{R_a . I_a}{C_m . \phi} \qquad (٩ - ٣)$$

بالاعتماد على ما سبق يمكن إعادة كتابة معادلة المميزات الكهروميكانيكية لمحركات التيار المستمر المستقلة و التفرعية بالشكل المبسط الآتي :

$$n = n_0 - \Delta n \,, \quad \omega = \omega_0 - \Delta\omega \qquad (١٠ - ٣)$$

بالعودة إلى معادلة عزم المحرك والمبينة بالمعادلات (٣-٢) يمكن أن نستنتج علاقة تيار الحمل I_a مع العزم T_a بالشكل الآتي :

$$I_a = \frac{T_a}{C_m . \phi} \qquad (١١ - ٣)$$

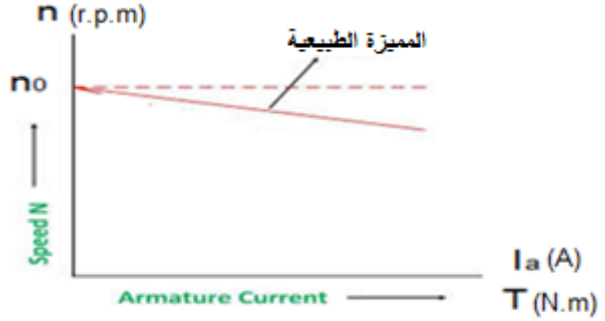
بتبديل قيمة التيار I_a من العلاقة (٣-١١) في المعادلات (٣-٦) و (٣-٧) نجد :

$$n = \frac{V}{C_e.\phi} - \frac{R_a}{C_e.C_m.\phi^2}T_a \qquad (١٢-٣)$$

أو

$$\omega = \frac{V}{C_m.\phi} - \frac{R_a}{C_m^2.\phi^2}T_a \qquad (١٣-٣)$$

المعادلتان (٣-١٢) و (٣-١٣) تمثلان المميزات الميكانيكية الطبيعية لمحرك التيار المستمر ذي التهييج المستقل والتفرعي، وهي مشابهة لنظيرتها الكهروميكانيكية، فهناك حد أول ثابت لا يتعلق بالحمولة (حالة العمل على فراغ) وحد ثاني يرتبط بالحمولة ويمثل هبوط سرعة المحرك. الشكل (٣-٣) يبين الميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية الطبيعية لمحرك تيار مستمر ذي تهييج مستقل أو تفرعي.



الشكل (٣-٣): المميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية الطبيعية للمحرك المستمر ذي التهييج المستقل والتفرعي

نلاحظ من الشكل السابق بأن للميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية الطبيعية للمحرك ميل طفيف يزداد مع زيادة حمولة المحرك، كما أنه من الواضح أنَ تغيرات سرعة المحرك مع الحمولة تعتبر محدودة نسبياً وهذا ما يجعلنا نعتبر وبتقريب مقبول أن سرعة المحرك المستمر المستقل والتفرعي تبقى تقريباً ثابتة مع زيادة الحمل. عدم تغير سرعة المحرك التفرعي بشكل كبير مع الحمولة تجعله مناسباً للتطبيقات المنزلية وبعض التطبيقات الصناعية التي لا يتطلب عملها تغيير في السرعة.

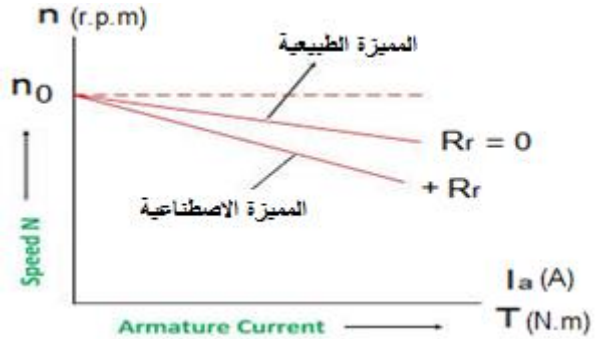
أما المميزة الاصطناعية للمحرك المستقل والتفرعي فإننا نحصل عليها عند إضافة مقاومة أو مجموعة مقاومات تسلسلية إلى دارة المتحرض بغرض الحد من قيمة تيارات الإقلاع الخطرة. في هذه الحالة سيبقى الحد الأول من معادلات المميزات ثابت (المتمثل بسرعة العمل على فراغ)، والذي سيتغير فقط هو الحد اليميني الثاني (الذي يمثل هبوط سرعة المحرك)، والذي يصبح بالنسبة للمميزة الكهروميكانيكية، إذا اعتبرنا أننا اضفنا مقاومة واحدة تسلسلية إلى دارة المتحرض، كالآتي :

$$\Delta n = \frac{(R_a + R_r).I_a}{C_e.\phi} \;, \Delta\omega = \frac{(R_a + R_r).I_a}{C_m.\phi} \qquad (١٤-٣)$$

وبالنسبة إلى الميزة الميكانيكية الاصطناعية يصبح هبوط السرعة :

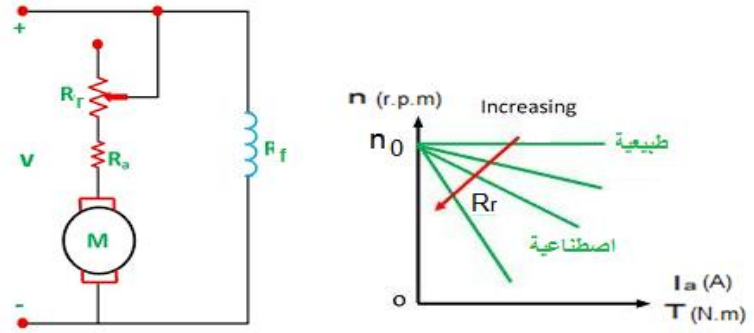
$$\Delta n = \frac{(R_a + R_r).T_a}{C_e.C_m.\phi^2} \;, \Delta\omega = \frac{(R_a + R_r).T_a}{C_m^2.\phi^2} \qquad (١٥-٣)$$

وجود هذه المقاومة التسلسلية يجعل المميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية الاصطناعية أكثر ميلاً (أقل قساوة) من المميزة الطبيعية وذلك تبعاً لقيمة R_r كما يبين الشكل (٣-٤).



الشكل (٣-٤): المميزة الاصطناعية للمحرك ذي التهييج المستقل والتفرعي بإضافة مقاومة واحدة

يمكن أن تتم إضافة مجموعة مقاومات إلى دارة المتحرض لنحصل على حزمة من المستقيمات تنطلق جميعها من نقطة واحدة على محور السرعة وهي n_0 كما يوضح الشكل (٣-٥).



الشكل (٣-٥): المميزة الاصطناعية للمحرك ذي التهييج المستقل والتفرعي بإضافة عدة مقاومات

٣-٢-١-١- إنشاء المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر المستقلة والتفرعية :

وجدنا سابقاً بأن مميزة المحرك المستقل والتفرعي عبارة عن خط مستقيم، و رياضياً يكفي لرسم هذا المستقيم معرفة احداثيات نقطتين فقط. نختار احداثيات النقطة الأولى بسهولة من اللوحة الإسمية للمحرك بحيث تكون $(I_n,\ n_n)$ للمميزة الكهروميكانيكية و$(T_n,\ n_n)$ للميزة الميكانيكية. يمكننا استبدال سرعة الدوران n بالسرعة الزاوية ω. أما عزم المحرك الاسمي T_n فيمكننا تحديده من الاستطاعة الاسمية للمحرك P_n بالاعتماد على العلاقة الآتية :

$$T_n = 9{,}55.\frac{P_n}{n_n} \qquad (١٦-٣)$$

أما النقطة الثانية فهي النقطة المقابلة للسرعة على فراغ، وهذه النقطة تكون نفسها في المميزات الطبيعية وكذلك الاصطناعية، واحداثياتها $(0,\ n_0)$، ويمكننا استنتاجها على النحو الآتي :

من العلاقات (٣-٢) نستنتج سرعة المحرك على فراغ (E=0) :

$$n_0 = \frac{V}{C_e.\phi}$$

$$E_n = C_e.\phi.n_n = V - I_{an}.R_a$$

$$C_e.\phi = \frac{V - I_{an}.R_a}{n_n}$$

فتكون العلاقة بين سرعة العمل على فراغ وتلك الاسمية كالآتي :

$$n_0 = \frac{V}{V - I_{an}.R_a}.n_n \qquad (١٧-٣)$$

ولرسم هذه المميزات لابد من تحديد قيمة مقاومة المتحرض R_a، يمكننا ذلك بالاعتماد على فرضية تساوي ضياعات المحرك الكلية مع الضياعات النحاسية للمتحرض وذلك عند المردود الأعظمي للمحرك η_{max} أي :

$$\sum \Delta P = 2.I^2.R_a = P_{in} - P_{out} = P_{in}(1-\eta_{max}) \ = V_n.I.(1-\eta_{max})$$

$$\sum \Delta P = 2.I^2.R_a$$

ومنه :

$$R_a = \frac{V_n}{2I}(1-\eta_{max}) = 0{,}5(1-\eta_{max})\frac{V_n}{I} \qquad (١٨-٣)$$

حيث I هو التيار عند المردود الأعظمي.

بتقريب مقبول يمكن اعتبار أن المردود الأعظمي يحصل عند المردود الاسمي، في هذه الحالة يمكن أن نعيد صياغة المعادلة (٣-١٨) على النحو الآتي :

$$R_a = \frac{V_n}{2I}(1-\eta_n) = 0{,}5(1-\eta_n)\frac{V_n}{I_n} \qquad (١٩-٣)$$

أما بالنسبة للميزة أو المميزات الاصطناعية فهي كالمميزة الطبيعية عبارة عن خطوط مستقيمة تنطلق من نفس النقطة (سرعة العمل على فراغ n_0)، أما بالنسبة لإحداثيات النقطة الثانية فهي المقابلة للقيم الاسمية للسرعة والتيار والعزم. عند الحمولة الاسمية يمكن تحديد قيمة السرعة الاسمية n_{nr} من العلاقة الآتية :

$$n_{nr} = n_0 \left[1 - \frac{I_n(R_a + R_r)}{V}\right] \qquad (٢٠ - ٣)$$

حيث R_r هي المقاومة المضافة إلى دارة المتحرض.

مثال: ٣-٢- محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي يملك القيم الاسمية التالية:

V_n=220 V, I_n=101 A, P_n=18 Kw, n_n=800 r.p.m, R_a=0,242 Ω

والمطلوب رسم المميزة الميكانيكية الطبيعية والاصطناعية للمحرك عند اضافة مقاومة تسلسلية للمتحرض قدرها 0,97 Ω.

الحل:

١- لرسم المميزة الطبيعية نقوم بتحديد احداثيات نقطتين: الأولى توافق عمل المحرك على فراغ وهي (T=0, n=n_0) والتي نحسبها من العلاقة الآتية :

$$n_0 = n_n * \frac{V}{V - I_{an}.R_a} = 800 * \frac{220}{220 - 101 * 0{,}242}$$

$$n_0 = 900\ r.p.m$$

وهي نفسها من أجل الاحداثيات (0,900)فتكون احداثيات النقطة الأولى الاصطناعية.

أما النقطة الثانية فهي الموافقة للحمولة الاسمية (T_n, n_n)

$$T_n = 9{,}55 * \frac{P_n}{n_n} = 9{,}55 * \frac{18000}{800} = 214{,}875\ N.m$$

فتكون احداثيات النقطة الثانية للمميزة الطبيعية هي: (800 , 214.8).

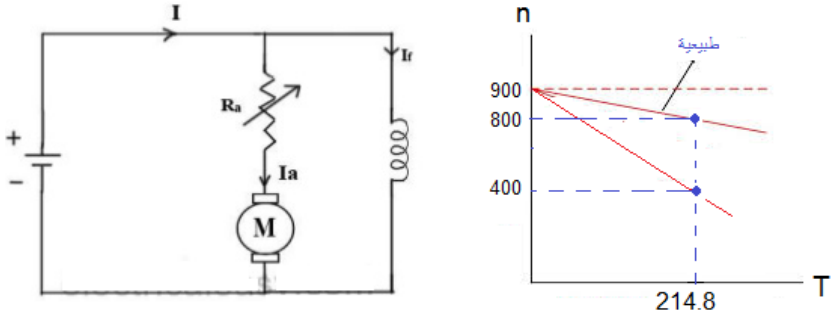
٢- لرسم المميزة الاصطناعية يكفي تحديد احداثيات النقطة الثانية الموافقة لعمل المحرك عند الحمولة الاسمية. (T_n, n_{nr}). نقطة العمل على فراغ هي نقطة مشتركة لجميع المميزات لذلك يكفي أن نحسب السرعة الاسمية بعد اضافة المقاومة التسلسلية :

$$n_{nr} = n_0 \left[1 - \frac{I_n(R_a + R_r)}{V}\right] = 900 \left[1 - \frac{101 * (0{,}242 + 0{,}97)}{220}\right]$$

$$n_{nr} = 400\ r.p.m$$

نحدد النقطة ذات الأحداثيات (400 , 214,8) .

يمكننا الآن رسم المميزتين الطبيعية والاصطناعية للمحرك على الشكل التالي :



الدارة المكافئة والمميزتين الطبيعية والاصطناعية للمحرك التفرعي في المثال

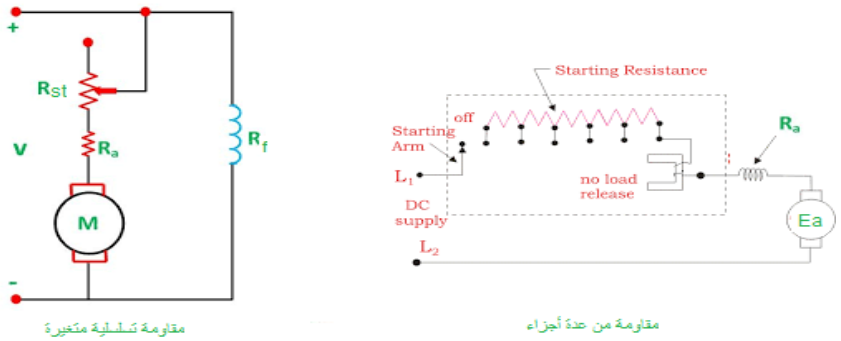
٣-٢-١-٢- إقلاع محركات التيار المستمر المستقلة والتفرعية :

عند تغذية المحرك المستمر المستقل أو التفرعي ومن دون وجود مقاومات إقلاع تكون قيمة القوة المحركة الكهربائية مساوية للصفر (E_a=0) باعتبار أن المحرك في حالة توقف). وبما أن مقاومة المتحرض

صغيرة نسبياً بالنسبة إلى مقاومة التهييج عندئذٍ سيمر تيار كبير جداً في متحرض المحرك (قد يصل إلى عشرات أضعاف التيار الاسمي)، هذا التيار يساوي تيار الدارة القصيرة ويتم حسابه من العلاقة الرياضية الآتية :

$$I_{st} = \frac{V - 0}{R_a} = \frac{V}{R_a} \qquad (٢١ - ٣)$$

مثل هذا التيار لا يتلاءم والشروط الحرارية للمحرك فمروره سينشر حرارة عالية داخل المحرك، لذلك لابد من حماية ملفات متحرض المحرك من هذا التيار (كون تيار التهييج مستقل و لا يتعلق بشروط الاقلاع والتحميل)، ويتم ذلك عن طريق الحد من قيمته العالية إلى قيم مقبولة يمكن للمحرك أن يتحملها خلال فترة الاقلاع (بما لا يزيد عن ضعفين ونصف ضعف التيار الاسمي). تقليل قيمة تيار الاقلاع يتم عن طريق إضافة مقاومة خارجية ثابتة أو متغيرة تسمى مقاومة الإقلاع (R_{st}) أو (ريوستات) تتصل على التسلسل مع ملفات المتحرض كما هو مبين على الشكل (٣-٦). هذه المقاومة يمكن أن تكون مؤلفة من أجزاء عدة يتم اخراجها على مراحل خلال فترة الإقلاع بما يناسب شروط عمل المحرك الحرارية. مقاومات الإقلاع هذه تستهلك جزءاً من القدرة الكهربائية نتيجة لمرور التيار فيها، لذلك لابد من تبريدها بالهواء أو الزيت واخراجها بعد انتهاء مهمتها في الإقلاع مالم يكن لها دور في التحكم بالسرعة.

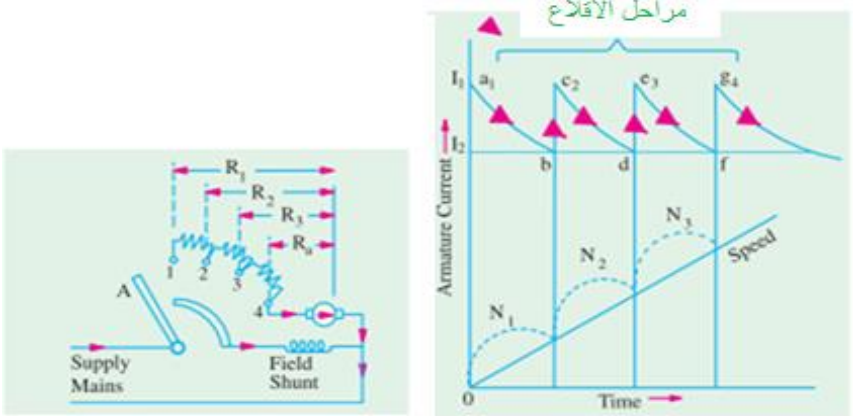


الشكل (٣-٦) مقاومات الإقلاع التسلسلية في المحرك التفرعي

في بداية الإقلاع يتم ادخال كامل مقاومة الإقلاع ومن ثم يتم اخراجها تدريجياً بعد فترة زمنية محددة أو تبعاً لسرعة المحرك. تيار الإقلاع سيتأرجح طيلة فترة الإقلاع بين قيمتين حديتين هما :

- I_1 : تيار الإقلاع الأعظمي المسموح به (تبعاً للشروط الحرارية للمحرك) وتقع قيمته ضمن المجال $(2\text{-}2{,}5)I_n$.
- I_2 : تيار الإقلاع الأصغري والذي يحدد اللحظة الزمنية المناسبة لإخراج إحدى مقاومات الإقلاع التسلسلية، وتكون قيمته محصورة ضمن المجال $(1{,}1\text{-}1{,}25)I_n$.

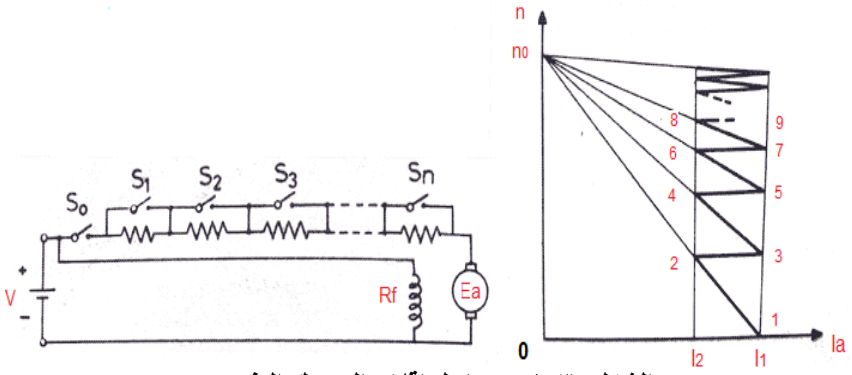
يبين الشكل (٣-٧) تأرجح تيار الإقلاع بين القيمتين I_2 و I_1 وذلك مع زيادة السرعة ومع إخراج مقاومة تسلسلية من دائرة المتحرض.
فعند زيادة السرعة ينخفض التيار إلى القيمة I_2 بينما يقفز من I_2 إلى I_1 نتيجة لفصل إحدى المقاومات، وهكذا حتى الوصول إلى السرعة الاسمية المقابلة للتيار الاسمي.



الشكل (٣-٧): تغير تيار الإقلاع وسرعة الدوران أثناء الإقلاع

٣-٢-١-٣- آلية إقلاع محركات التيار المستمر المستقلة والتفرعية :

يوضح الشكل (٣-٨) مخطط المميزة الكهروميكانيكية الاصطناعية لمحرك تيار مستمر تفرعي، أثناء فترة إقلاع المحرك على مراحل يتأرجح تيار الإقلاع بين القيمتين I_2 و I_1 كما ذكرنا سابقاً (يمكننا اختيار أربع مراحل مثلاً). ولتحقيق أكبر عزم إقلاع ممكن يتم الإقلاع بوجود مقاومة ملف التهييج فقط (من دون أي مقاومة تسلسلية مع ملف التهييج). عند الإقلاع نطبق كامل جهد الشبكة على متحرض المحرك ويقلع المحرك بوجود كامل مقاومات إقلاعه، ولتكن هنا أربع مقاومات (R_{st}=r1+r2+r3+r4).



الشكل (٣-٨): مراحل إقلاع المحرك التفرعي

النقطة (1) تمثل لحظة إقلاع المحرك والتي تقابل تيار الإقلاع I_1 حيث السرعة والقوة المحركة الكهربائية مساوية للصفر (لحظة الإقلاع)، يساوي تيار الإقلاع في هذه اللحظة :

$$I_{st} = I_1 = \frac{V - 0}{R_a + R_{st}} = \frac{V}{R_a + R_{st}} \qquad (٢٢ - ٣)$$

تبدأ بعدها سرعة الدوران بالازدياد وتبدأ معها القوة المحركة الكهربائية بالظهور والازدياد، وهذا يؤدي إلى تناقص قيمة تيار الإقلاع حتى يصل إلى القيمة I_2 عند النقطة (2) بالشكل، وعند هذا التيار تكون السرعة مساوية إلى القيمة n_1. نحسب I_2 من العلاقة الآتية :

$$I_{st} = I_2 = \frac{V - E_{a1}}{R_a + R_{st}} \; ; \; E_{a1} = C_e.\phi.n_1 \qquad (٢٣ - ٣)$$

عند النقطة (2) نقوم بفصل المقاومة r_1 فيقفز التيار مباشرة إلى القيمة I_1 المقابلة للنقطة (3)، بينما تبقى القوة المحركة والسرعة دون تغيير (الاستجابة الكهربائية أسرع من الميكانيكية)، لذلك تكون السرعة والقوة المحركة الكهربائية بين النقطتين (2) و (3) ثابتة. التيار عند النقطة (3) يساوي إلى :

$$I_1 = \frac{V - E_{a1}}{R_a + r_2 + r_3 + r_4} \qquad (٢٤ - ٣)$$

عند النقطة (3) تبدأ سرعة الدوران بالازدياد وتزداد معها القوة المحركة الكهربائية حتى تساوي E_{a2} و المقابلة للسرعة n_2 ($E_{a2} = C_e.\phi.n_2$). مع زيادة السرعة ينقص التيار حتى يصل إلى القيمة I_2 وذلك عند النقطة (4) :

$$I_2 = \frac{V - E_{a2}}{R_a + r_2 + r_3 + r_4} \qquad (٢٥ - ٣)$$

عند النقطة (4) نقوم بفصل المقاومة r_2 فيقفز التيار مباشرة إلى القيمة I_1 المقابلة للنقطة (5) بينما تبقى القوة المحركة والسرعة دون تغيير، لذلك تبقى السرعة والقوة المحركة الكهربائية بين النقطتين (4) و(5) ثابتة. التيار عند النقطة (5) يساوي إلى :

$$I_1 = \frac{V - E_{a2}}{R_a + r_3 + r_4} \qquad (٢٦ - ٣)$$

عنـد النقطـة (5) تعـود السـرعة والقـوة المحركـة الكهربائيـة للازديـاد مـن جديـد حتـى القيمـة E_{a3} المقابلـة للسرعة n_3 $(E_{a3} = C_e.\phi.n_3)$، ويتناقص بالنتيجة تيار الإقلاع حتى القيمة I_2 وذلك عند النقطة (6)، ويساوي في هذه الحالة :

$$I_2 = \frac{V - E_{a3}}{R_a + r_3 + r_4} \qquad (٢٧ - ٣)$$

عند النقطة (6) المقابلة للتيار I_2 نقوم بفصل المقاومة r_3 فيقفز التيار مجدداً إلى قيمته العظمى I_1 وذلك عند النقطة (7)، بينما تبقى السرعة والقوة المحركة الكهربائية ثابتة بين النقطتين (6) و(7). نحسب I_1 من العلاقة الآتية :

$$I_1 = \frac{V - E_{a3}}{R_a + r_4} \qquad (٢٨ - ٣)$$

تستمر السرعة بالازدياد ومعها القوة المحركة الكهربائية حتى تصل إلى القيمة n_4 والتي تقابلها قوة محركة كهربائية قدرها E_{a4} $(E_{a4} = C_e.\phi.n_4)$ وذلك عند النقطة (8). وينخفض معها التيار حتى القيمة I_2 التي يمكن حسابها رياضياً من العلاقة الآتية :

$$I_2 = \frac{V - E_{a4}}{R_a + r_4} \qquad (٢٩ - ٣)$$

عند النقطة (8) يتم فصل آخر مقاومة إقلاع (المقاومة r_4) مما يسبب زيادة مباشرة للتيار I_2 إلى القيمة I_1 وذلك عند النقطة (9) مع بقاء السرعة والقوة المحركة الكهربائية دون تغيير. نحسب I_1 بعد فصل جميع مقاومات الإقلاع من العلاقة الآتية :

$$I_1 = \frac{V - E_{a4}}{R_a} \qquad (٣٠ - ٣)$$

عند النقطة (9) تعود سرعة المحرك وبالتالي قوته المحركة الكهربائية للازدياد حتى تصل السرعة إلى قيمتها الاسمية n_n وكذلك تيار المتحرض I_n، وينتقل المحرك للعمل على مميزته الطبيعية.
بإخراجنا للمقاومة r_4 نكون قد أخرجنا جميع مقاومات الإقلاع في مثالنا السابق. مع الملاحظة أن عدد مراحل الإقلاع يمكن أن يكون أكثر أو أقل من ذلك وهذا يعود إلى طبيعة المحرك وشروط اقلاعه الآمنة. كما أن عملية ادخال واخراج هذه المقاومات يمكن أن يكون يدوياً او آلياً.

٣-٢-١-٤- حساب مقاومات الإقلاع ودرجاتها تحليلياً :

بالعودة إلى الشكل (٣-٨)، عند لحظة الإقلاع (الموافقة للنقطة 1) تكون لدينا السرعة و القوة المحركة الكهربائية مساويتان للصفر والتيار مساوياً للقيمة I_1، يمكننا أن نكتب معادلات المحرك الكهربائية بالشكل الآتي :

$$I = I_1 \ ; \ E_{a1} = 0$$
$$U = 0 + I_1(R_a + R_{st})$$
$$R_{st} = \frac{V}{I_1} - R_a \qquad (٣١ - ٣)$$

عند لحظة فصل إحدى مقاومات الإقلاع ستبقى السرعة والقوة المحركة الكهربائية ثابتة، مما يعني ثبات السرعة n وكذلك القوة المحركة الكهربائية E بين النقاط (2 و 3)، (4 و 5)، (6 و 7)، (9 و 8). لذلك فعند النقطة(2) و (3) يكون لدينا :

$$E_{a2} = E_{a3}$$
$$V - I_2(R_a + R_{st}) = V - I_1(R_a + R_{st} - r_1)$$
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a + R_{st} - r_1}{R_a + R_{st}}$$
$$r_1 = (R_a + R_{st}).(1 - \frac{I_2}{I_1}) \qquad (٣٢ - ٣)$$

ويمكننا الآن أن نكتب معادلات المحرك الموافقة للحظة فصل المقاومة r_2، أي بين النقطتين (4) و (5) بالشكل الآتي :

$$E_{a4} = E_{a5}$$

$$V - I_2(R_a + R_{st} - r_1) = V - I_1(R_a + R_{st} - r_1 - r_2)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a + R_{st} - r_1 - r_2}{R_a + R_{st} - r_1}$$

$$r_2 = (R_a + R_{st} - r_1).(1 - \frac{I_2}{I_1}) \qquad (٣٣ - ٣)$$

وبشكل مشابه بين النقاط (6) و (7) وكذلك (8) و (9) إلى أن ننتهي من فصل جميع مقاومات الإقلاع والتي في حالتنا تساوي 4 مقاومات.
لو فرضنا أن لدينا m درجة إقلاع يمكن أن نحسب المقاومة الأخيرة r_m كما يأتي :

$$E_{a(m-1)} = E_{a(m)}$$
$$V - I_2(R_a + R_{st} - r_1 - r_2 - \cdots - r_{m-1}) = V - I_1.(R_a)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a}{(R_a + R_{st} - r_1 - r_2 - \cdots - r_{m-1})}$$

$$r_m = R_{st} - r_1 - r_2 - \cdots - r_{m-1} \qquad (٣٤ - ٣)$$

بضرب جميع النسب السابقة للتيار $\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$ ببعضها البعض والتي عددها (m) نحصل على ما يأتي :

$$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^m = \frac{R_a}{R_a + R_{st}} \qquad (٣٥ - ٣)$$

ومنه:

$$I_2 = I_1.\sqrt[m]{\frac{R_a}{R_a + R_{st}}} \qquad (٣٦ - ٣)$$

يمكننا القول بأنه لحساب مقاومة الإقلاع ودرجاتها تحليلياً علينا تحديد ما يلي :

١. قيمة تيار الإقلاع الأعظمي I_1 بحيث يقع ضمن المجال (2-2.5) من قيمة تيار المحرك الاسمي.
٢. قيمة تيار الإقلاع I_2 بحيث يكون أكبر من قيمة التيار الاسمي I_n وأصغر من قيمة تيار الإقلاع الأعظمي I_1.
٣. مقاومة الإقلاع الكلية من العلاقة التالية : ($R_{st} = \frac{V}{I_1} - R_a$).
٤. عدد درجات الإقلاع m من العلاقة (٣ – ٣٦) بعد تحديد قيمة تياري الإقلاع ومقاومة الإقلاع وذلك بأخذ لوغاريتم الطرفين :

$$m = \frac{\ln(\frac{R_a + R_{st}}{R_a})}{\ln(\frac{I_1}{I_2})} \qquad (٣٧ - ٣)$$

مثال: ٣-٤- لدينا محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي يملك القيم الاسمية الآتية :
$V_n = 200$ V, $P_n = 10$ hp, $R_a = 0{,}25\ \Omega$, $\eta = 85\%$.
أحسب قيمة مقاومة الإقلاع اللازمة للحد من تيار الإقلاع إلى 1.5 مرة من قيمة تيار المحرك الاسمي. أحسب قيمة القوة المحركة الكهربائية الكلية للمحرك عندما يهبط التيار إلى قيمته الاسمية معتبراً أن مقاومة الإقلاع الكلية لاتزال في الدارة. ملاحظة: يمكن إهمال تيار التهييج.
الحل :

$$I_L = \frac{P_2}{V.\eta} = \frac{7460}{200 * (0{,}85)} = 43{,}88\ A$$

فيكون تيار الإقلاع الأعظمي I_1 مساوياً للقيمة :

$$I_1 = 1.5 * I_L = 66{,}83\ A$$

نحسب مقاومة الإقلاع الكلية R_{st} مع مقاومة المتحرض R_a من العلاقة الآتية :

$$R_T = R_a + R_{st} = \frac{V}{I_1} = \frac{200}{66{,}83} = 3{,}038\ \Omega$$

فتكون مقاومة الإقلاع الكلية :

$$R_{st} = R_T - R_a = 3{,}038 - 0{,}25 = 2{,}788\ \Omega$$

نحسب قيمة القوة المحركة الكهربائية بوجود كامل مقاومة الإقلاع وعند الحمل الاسمي من العلاقة الآتية :

$$E_a = V_a - I_n.\ R_T = 200 - (43{,}88 * 3{,}038) = 67\ V$$

مثال: ٣-٥- لدينا محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي يملك القيم الاسمية الآتية :

V_n = 220 V, P_n =15 Kw, R_a = 0,328 Ω, I_n=83A,
n_n =770 rpm

أحسب ما يأتي :

١- مقاومة الإقلاع الكلية ودرجاتها الثلاثة اللازمة لخفض تيار الإقلاع إلى ضعف قيمة التيار الاسمي.

٢- حساب سرعة المحرك على فراغ، وكذلك في كل مرحلة من مراحل الإقلاع.

الحل :

١- نحسب مقاومة الإقلاع الكلية :

$$R_T = R_a + R_{st} = \frac{V}{I_1} = \frac{V}{2.\ I_n} = \frac{220}{166} = 1{,}328\ \Omega$$

$$R_{st} = 1{,}328 - 0{,}328 = 1\ \Omega$$

نحسب تيار الإقلاع I_2 من العلاقة التالية باعتبار أن m هي عدد درجات الإقلاع وتساوي في حالتنا 3 مراحل :

$$I_2 = I_1.\sqrt[m]{\frac{R_a}{R_a + R_{st}}} = 166 * \sqrt[3]{\frac{0{,}328}{1{,}328}} = 104\ A$$

نحسب درجات الإقلاع الثلاثة كما يأتي :

$$r_1 = (R_a + R_{st}).(1 - \frac{I_2}{I_1}) = (1{,}328) * \left(1 - \frac{104}{166}\right) = 0{,}496\ \Omega$$

$$r_2 = (R_a + R_{st} - r_1).(1 - \frac{I_2}{I_1}) = (1{,}328 - 0{,}496) * (1 - \frac{104}{166}) = 0{,}311\ \Omega$$

$$r_3 = (R_{st} - r_1 - r_2) = (1 - 0{,}496 - 0{,}311) = 0{,}193\ \Omega$$

٢- حساب سرع المحرك المختلفة :

نستخدم كعلاقة اساسية لحساب السرع علاقة نسب القوى المحركة الكهربائية، وذلك باعتبار أن تهييج الآلة ثابت، كما نعتبر أن تيار الآلة الكلي المسحوب من الشبكة الكهربائية مساو لتيار المتحرض، حيث يمكننا أن نهمل تيار التهييج أمام تيار المتحرض.

في حالة العمل على فراغ فإن القوة المحركة الكهربائية ستساوي لقيمة الجهد المطبق :

$$E_{a0} = V_n = 220\ V$$

نحسب سرعة عمل المحرك على فراغ n_0 من النسبة الآتية :

$$\frac{E_{a0}}{E_{an}} = \frac{n_0}{n_n} \rightarrow n_0 = n_n * \left(\frac{E_{a0}}{E_{an}}\right) = n_n * (\frac{V}{V - I_n.\ R_a})$$

$$n_0 = 770 * (\frac{220}{220 - 83 * 0.328}) = 878{,}7\ r.p.m$$

_ نحسب سرعة المحرك n_1 والتي نحصل عليها بعد فصل المقاومة r_1 :

$$\frac{E_{a1}}{E_{a0}} = \frac{n_1}{n_0} \rightarrow n_1 = n_0 * \left(\frac{E_{a1}}{V}\right) = n_0 * (\frac{V - I_2.\ (R_a + R_{st})}{V})$$

$$n_1 = 878{,}7 * (\frac{220 - 104 * (1{,}328)}{220}) = 327\ r.p.m$$

وبنفس الطريقة نحسب سرعة المحرك n_2 و n_3 بعد فصل المقاومات r_2 و r_3 على التوالي كما يأتي :

$$\frac{E_{a2}}{E_{a0}} = \frac{n_2}{n_0} \rightarrow\ n_2 = n_0 * \left(\frac{E_{a2}}{V}\right) = n_0 * (\frac{V - I_2.\ (R_a + R_{st} - r_1)}{V})$$

$$n_2 = 878{,}7 * (\frac{220 - 104 * (1{,}328 - 0{,}496)}{220}) = 533\ r.p.m$$

وكذلك نحسب n_3 :

$$\frac{E_{a3}}{E_{a0}} = \frac{n_3}{n_0} \rightarrow\ n_3 = n_0 * \left(\frac{E_{a3}}{V}\right) = n_0 * (\frac{V - I_2.\ (R_a + R_{st} - r_1 - r_2)}{V})$$

$$n_3 = 878{,}7 * (\frac{220 - 104 * (1{,}328 - 0{,}496 - 0{,}311)}{220}) = 622{,}3\ r.p.m.$$

مثال: ٣-٦- محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي يملك القيم الاسمية الآتية :

V_n = 250 V, P_n =100 hp, R_a = 0,05 Ω, I_n =350 A.

يراد تصميم مقاومة إقلاع لهذا المحرك بحيث تحد من قيمة تيار الإقلاع الأعظمي إلى ضعف قيمة التيار الاسمي (جزء من المقاومة يتم قصره في كل مرة يهبط فيها تيار الإقلاع إلى قيمته الاسمية)، والمطلوب :

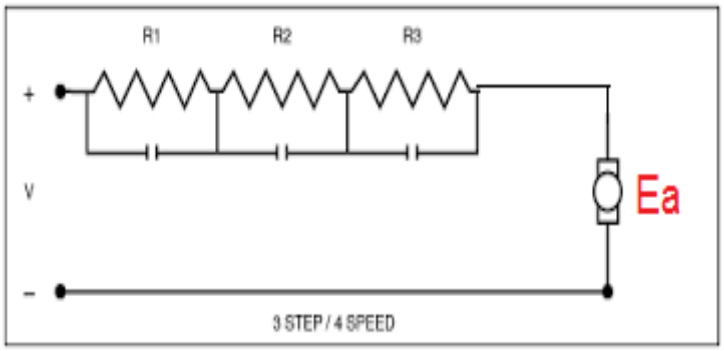
١- تحديد مقاومة الإقلاع الواجب اضافتها وعدد درجاتها للحد من قيمة التيار إلى القيمة المحددة.

٢- تحديد قيمة كل جزء من المقاومة وكذلك قيمة القوة المحركة الكهربائية عند كل مرحلة فصل للمقاومة.

الحل :

١- لتحديد عدد درجات الإقلاع يمكننا أن نتبع الخطوات الآتية :

- نحدد قيمة مقاومة الإقلاع الكلية R_T اللازمة لانقاص تيار الإقلاع إلى قيمته المطلوبة، ثم نحسب نسبة تلك المقاومة على مقاومة المتحرض ($a_1 = R_T / R_a$).
- نحدد نسبة تيار الإقلاع الأعظمي إلى تيار الإقلاع الأصغري ($a_2 = I_1 / I_2$).
- نحسب نسبة المقاومات على نسبة تيارات الإقلاع فتكون هي تقريباً عدد مراحل الإقلاع.



مقاومات الإقلاع التسلسلية مع متحرض المحرك

تيار الإقلاع الأعظمي I_1 يساوي ضعف قيمة التيار الاسمي أي 700A وذلك عند لحظة الإقلاع أي عندما E_a=0 ، ومنه يمكن حساب مقاومة الإقلاع الكلية من العلاقة الآتية :

$$R_T = \frac{V}{I_1} = \frac{250}{700} = 0{,}357\ \Omega$$

فتكون نسبة مقاومة الإقلاع :

$$a_1 = \frac{R_T}{R_a} = \frac{0{,}357}{0{,}05} = 7{,}14$$

أما نسبة تيارات الإقلاع فهي :

$$a_2 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{700}{350} = 2$$

نحسب عدد درجات الإقلاع تقريباً من النسبة الآتية :

$$n = \frac{a_1}{a_2} = \frac{7{,}14}{2} = 3{,}57$$

يمكننا إذاً اختيار ثلاث مراحل لإقلاع المحرك.

عند الإقلاع تكون E_a=0V و $I_a = I_1$=700A , ومقاومة الإقلاع الكلية $R_T = 0{,}357\Omega$. هذه المقاومة عبارة عن ثلاثة أجزاء موصولة تسلسلياً في الدارة، وذلك من لحظة الإقلاع حتى هبوط تيار الإقلاع إلى القيمة I_2=350A ، عند هذه القيمة للتيار تكون القوة المحركة الكهربائية قد زادت نتيجة لزيادة السرعة لتصبح :

$$E_{a1} = V - I_2 . R_T = 250 - 350 * (0{,}357) = 125 \text{ V}$$

عند هذه القيمة للقوة المحركة الكهربائية وعند تيار الإقلاع I_2=350 A يمكننا فصل أولى مقاومات الإقلاع r_1 فيزداد التيار مباشرة إلى القيمة I_1=700 A بينما تبقى السرعة والقوة المحركة الكهربائية عند قيمتها قبل الفصل مباشرة، المقاومة المتبقية في هذه الدارة هي :

$$R_a + r_2 + r_3 = \frac{250 - 125}{700} = 0{,}1786\ \Omega$$

بعد فصل r_1 تبدأ السرعة بالازدياد وتزداد معها القوة المحركة الكهربائية ويتناقص التيار حتى يصل إلى القيمة I_2=350 A . نحسب القوة المحركة الكهربائية في هذه اللحظة :

$$E_{a2} = V - I_2 . (R_T - r_1) = 250 - 350 * (0{,}1786\ ) = 187{,}5 \text{ V}$$

عند هذه القيمة للقوة المحركة الكهربائية وعند تيار الإقلاع I_2=350A يمكننا فصل ثاني مقاومات الإقلاع r_2 فيزداد التيار من جديد ومباشرة إلى القيمة I_1=700A . المقاومة المتبقية في الدارة هي :

$$R_a + r_3 = \frac{250 - 187{,}5}{700} = 0{,}0893\ \Omega$$

ستبقى هذه المقاومة في الدارة حتى يهبط التيار من جديد إلى I_2=350 A نتيجة لازدياد سرعة المحرك وبالتالي قوته المحركة الكهربائية. نحسب قوة المحرك الكهربائية عند وصول التيار إلى القيمة 350 A :

$$E_{a3} = V - I_2 * (R_T - r_1 - r_2) = 250 - 350 * (0{,}0893) = 218{,}75 \text{ V}$$

عند هذه القيمة للقوة المحركة الكهربائية وعند تيار الإقلاع I_2=350 A يمكننا فصل آخر مقاومة في دارة المتحرض وهي المقاومة r_3 , سيزداد التيار إلى القيمة I_a :

$$I_a = \frac{a_1}{a_2} = \frac{250 - 218{,}75}{0{,}05} = 625 \text{ A}$$

وهي قيمة مقبولة للتيار باعتبار أنها أقل من قيمة تيار الإقلاع الأعظمية المسموحة.

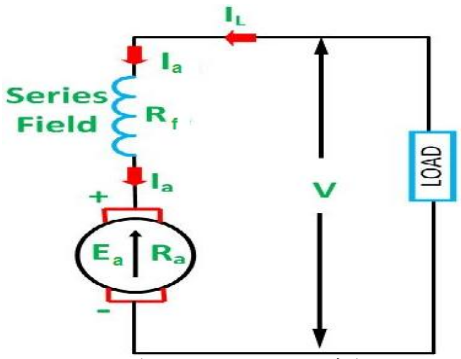
يمكننا الآن حساب قيم مقاومات الإقلاع الثلاث على النحو التالي :

$$r_3 = 0{,}0893 - 0{,}05 = 0{,}0393\ \Omega$$
$$r_2 = 0{,}1786 - 0{,}0393 - 0{,}05 = 0{,}0893\ \Omega$$
$$r_1 = 0{,}357 - 0{,}0893 - 0{,}0393 - 0{,}05 = 0{,}178\ \Omega$$

فتكون قيم القوة المحركة الكهربائية المقابلة لفصل المقاومات r_1 و r_2 و r_3 على الترتيب هي : (125V, 187,5 V , 218,75 V).

٣-٢-٢- المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر التسلسلية:

تتميز محركات التيار المستمر التسلسلية بعزم إقلاع عال وسرعات كبيرة عند الأحمال الصغيرة مما يجعلها من أهم المحركات المستخدمة في الجر الكهربائي والرافعات وقطارات المترو والباصات الكهربائية. تختلف المحركات التسلسلية عن محركات التيار المستمر المستقلة والتفرعية من حيث أن الفيض المغناطيسي فيها غير ثابت ومرتبط بتغيرات الحمولة، حيث ملفا التهييج والمتحرض موصولان على التسلسل كما يوضح الشكل (٣-٩).



الشكل (٣-٩): الدارة المكافئة للمحرك المستمر ذي التهييج التسلسلي

المعادلات الكهربائية والميكانيكية المميزة للمحرك المستمر ذي التهييج التسلسلي هي :

$$V_f = R_f . I_f$$
$$I_L = I_f = I_a$$
$$V = E_a + (R_a + R_f) . I_a$$
$$T_a = C_m . \phi . I_a$$
$$E_a = C_e . \phi . n$$
$$E_a = C_m . \phi . \omega \qquad (٣٨ - ٣)$$

في المحرك التسلسلي يكون الفيض المغناطيسي تابع مباشرة لتيار الحمولة I_a، باعتبار أن الآلة تعمل في المجال الخطي فقط.

$$\phi = \alpha . I_a \qquad (٣٩ - ٣)$$

بالاعتماد على العلاقات (٣-٣٨) يمكننا كتابة علاقة الجهد الكهربائي بالشكل الآتي :

$$V = C_e . \phi . n + (R_a + R_f) . I_a \qquad (٤٠ - ٣)$$

أو

$$V = C_m . \phi . \omega + (R_a + R_f) . I_a \qquad (٤١ - ٣)$$

انطلاقاً من العلاقتين الأخيرتين يمكننا أن نكتب :

$$n = \frac{V}{C_e . \phi} - \frac{(R_a + R_f)}{C_e . \phi} I_a \qquad (٤٢ - ٣)$$

أو

$$\omega = \frac{V}{C_m . \phi} - \frac{(R_a + R_f)}{C_m . \phi} I_a \qquad (٤٣ - ٣)$$

المعادلتان الأخيرتان تمثلان المميزات الكهروميكانيكية الطبيعية لمحركات التيار المستمر التسلسلية، وهذه العلاقات هي علاقات غير خطية ومعقدة نسبياً نظراً لارتباط الفيض المغناطيسي بتيار الحمولة. إلا أننا ولتبسيط معادلات المميزات فرضنا سابقاً بأن العلاقة بين فيض الآلة المغناطيسي وتيار المتحرض هي علاقة خطية.
نظراً لارتباط الفيض المغناطيسي للمحرك ϕ مع تيار المتحرض I_a لذلك يمكننا كتابة معادلة عزم الآلة المستمرة على الشكل الآتي :

$$T_a = C_m . \phi . I_a = C_m . \alpha . I_a^2 \qquad (٤٤ - ٣)$$

ومنه فإن تيار المتحرض بدلالة العزم الكهربائي يعطى بالعلاقة الآتية :

$$I_a = \sqrt{\frac{T_a}{C_m . \alpha}} \qquad (٤٥ - ٣)$$

بتعويض قيمة الفيض المغناطيسي في العلاقة (٣-٣٩) وكذلك قيمة التيار في العلاقة (٣-٤٥) بالمعادلات (٣-٤٢) و (٣-٤٣) نجد :

$$n = \frac{V}{C_e . \alpha . \sqrt{\frac{T_a}{C_m . \alpha}}} - \frac{(R_a + R_f)}{C_e . \alpha} \qquad (٤٦ - ٣)$$

أو

$$\omega = \frac{V}{C_m.\alpha.\sqrt{\frac{T_a}{C_m.\alpha}}} - \frac{(R_a + R_f)}{C_m.\alpha} \qquad (٤٧ - ٣)$$

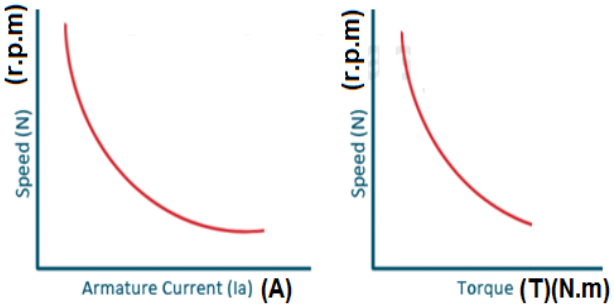
المعادلتان الأخيرتان تمثلان معادلات المميزة الميكانيكية الطبيعية للآلة المستمرة التسلسلية، ونظراً لثبات العناصر C_m, V, $(R_a + R_f)$ و كذلك α فإن المعادلة (٣-٤٦) يمكن إعادة كتابتها بالشكل المبسط الآتي :

$$n = \frac{A}{\sqrt{T_a}} - \mathrm{B} \qquad (٤٨ - ٣)$$

حيث :

$$A = \frac{V}{C_e}\sqrt{\frac{C_m}{\alpha}} \quad , \quad \mathrm{B} = \frac{(R_a + R_f)}{C_e.\alpha}$$

رياضياً فإن المعادلات المعبرة للمميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لها شكل قطع زائد يمكن تمثيله بيانياً على الشكل (٣-١٠).



الشكل (٣-١٠) المميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحرك المستمر التسلسلي

من الملاحظ أن سرعة المحرك تزداد مع تناقص العزم وتصل هذه السرعة إلى اللانهاية عند T=0، لذلك يحذر من تشغيل المحرك التسلسلي على فراغ حتى لا يؤدي ذلك إلى خروج المحرك عن مجال عمله الطبيعي وبالتالي إلى تلفه.

إلا أنه ومن الناحية العملية فإن المميزات الحقيقية للمحرك المستمر التسلسلي تختلف عما توصلنا إليه نظرياً وذلك نتيجة للإشباع المغناطيسي للآلة. يتم اللجوء للطرق التحليلية البيانية لإنشاء تلك المميزات والتي تستند إلى معطيات محددة موجودة ضمن جداول مرفقة مع النشرات الفنية الخاصة بهذه المحركات تبعاً لتصميمها واستطاعتها (غالباً ما يتم التعامل مع القيم الواحدية في هذه الجداول والنشرات). يتم الحصول على هذه المخططات والجداول من الشركات المصنعة وذلك بعد القيام بتجارب عملية على تلك المحركات بعد الانتهاء من عملية تصنيعها. أما المميزة الاصطناعية للمحرك التسلسلي فإننا نحصل عليها عند اضافة مقاومة أو مجموعة مقاومات إلى دارة المتحرض والتهييج، هذه المقاومة يمكن استخدامها كمقاومة إقلاع على مرحلة أو أكثر، وكذلك للتحكم بسرعة المحرك من أجل حمولة محددة. لإنشاء المميزة الاصطناعية نعود للمعادلتين (٣-٤٦) و (٣-٤٧) ونضيف إلى الحد الثاني المقاومة R_r لنحصل على :

$$n = \frac{V}{C_e.\alpha.\sqrt{\frac{T_a}{C_m.\alpha}}} - \frac{(R_a + R_f + R_r)}{C_e.\alpha} \qquad (٤٩ - ٣)$$

أو

$$\omega = \frac{V}{C_m.\alpha.\sqrt{\frac{T_a}{C_m.\alpha}}} - \frac{(R_a + R_f + R_r)}{C_m.\alpha} \qquad (٥٠ - ٣)$$

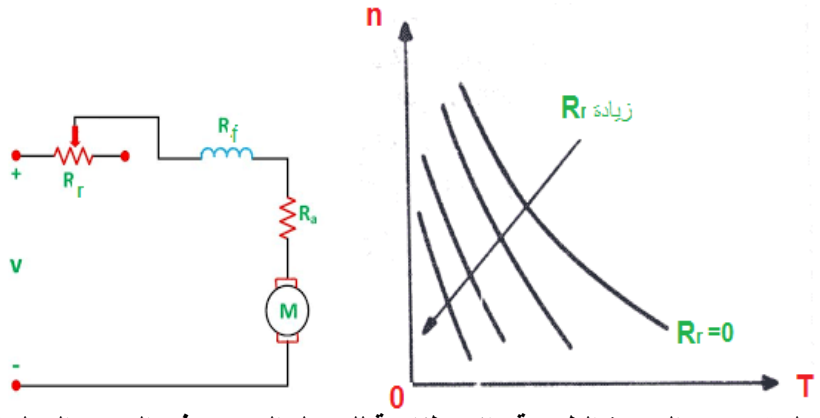
نلاحظ أن الحد الثاني من معادلات المميزة الطبيعية قد تغير، وبالتالي يمكننا كتابة المعادلة السابقة (٣-٤٨) بالنسبة للمميزة الاصطناعية بالشكل الآتي :

$$n = \frac{A}{\sqrt{T_a}} - B' \qquad (٥١ - ٣)$$

حيث :

$$B' = \frac{(R_a + R_f + R_r)}{C_e . \alpha} \qquad (٥٢ - ٣)$$

يبين الشكل (٣-١١) المميزات الطبيعية مع الاصطناعية للمحرك المستمر التسلسلي من أجل عدة قيم للمقاومات الخارجية المضافة إلى دارة المحرك. نلاحظ أن المميزات الاصطناعية أقل ليونة من المميزات الطبيعية وتزداد درجة انحدارها كلما ازدادت قيمة تيار الحمولة وعزمها.



الشكل(٣-١١): المميزة الطبيعية والاصطناعية للمحرك المستمر ذي التهييج التسلسلي

مثال: ٣-٧- محرك تيار مستمر ذو تهييج تسلسلي يتغذى بتوتر قدره 110V ويسحب تياراً قدره 30A عندما يدور بسرعة 1200 r.p.m. أحسب سرعة دوران هذا المحرك عندما يستهلك تياراً مقداره 20 A، علماً بأن مقاومته الكلية تساوي 0,4 Ω.

الحل :

أولاً نفرض أن منحني تمغنط المحرك خطي وأن رد فعل المتحرض مهمل.

لحساب سرعة المحرك الجديدة نقوم بنسب القوى المحركة الكهربائية في الحالتين (عند التيار 30 A وعند 20 A) إلى بعضهما البعض. نحسب أولاً القوى المحركة في حالتين :

- في الحالة الأولى حيث التيار المسحوب 30 A :

$$E_{a1} = V - (R_a + R_f).I_{a1} = 110 - 30 * (0{,}4) = 98\,V$$

- في الحالة الثانية حيث التيار المسحوب 20 A :

$$E_{a2} = V - (R_a + R_f).I_{a2} = 110 - 20 * (0{,}4) = 102\,V$$

وبنسب هاتين العلاقتين نجد :

$$\frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{n_2}{n_1}.\frac{\phi_2}{\phi_1} \rightarrow n_2 = n_1 * \left(\frac{E_{a2}}{E_{a1}}.\frac{I_{a1}}{I_{a2}}\right)$$

$$n_2 = 1873{,}5\,r.p.m$$

٣-٢-٣- مقارنة أداء عمل محركي التيار المستمر التفرعي والتسلسلي :

بالمقارنة بين أداء المحركين التفرعي والتسلسلي نجد أن العزم في المحركات التفرعية يتناسب مع تيار المتحرض ($T_a = \alpha.I_a$) باعتبار أن الفيض ثابت، في حين أن هذا العزم يتناسب مع مربع التيار ($T_a = \alpha.I_a^2$) في المحركات التسلسلية، وهذا يعني أن المحرك المستمر التسلسلي ينتج عزم اقلاع أعلى مما ينتجه المحرك التفرعي، وهذا ما يجعل من المحركات التسلسلية محركات ذات أهمية كبيرة في التطبيقات التي تتطلب عزوم إقلاع عالية كآلات الجر والقطارات الكهربائية على سبيل المثال.

فيما يخص السرعة فإنه وكما رأينا بأن سرعة دوران المحرك المستمر التفرعي تقريباً ثابتة (حالة المميزة الطبيعية)، بينما تتغير السرعة بشكل كبير مع الحمل في المحركات التسلسلية، وتذهب للانهاية في حالة العمل على فراغ.

استطاعة العمل المفيدة تعطى بالعلاقة الآتية :

$$P_{out} = \omega . T = \frac{2.\pi . n}{60} . T \qquad (٦٧ - ٣)$$

باعتبار أن السرعة في المحرك المستمر التفرعي ثابتة لذلك فإن الاستطاعة تتناسب طرداً مع العزم ($P_{out} = \alpha . T_a$)، بينما تتناسب الاستطاعة مع جذر العزم في المحرك المستمر التسلسلي ($P_{out} = \alpha . \sqrt{T}_a$) (كون السرعة تتناسب عكسياً مع جذر العزم). هذا يعني أن تغيرات الحمولة ضمن مجال واسع في المحركات التسلسلية سيكون له تغيرات في العزم أقل حدة منها في المحركات التفرعية، وهذا ما يفسر قدرة المحركات المستمرة التسلسلية على تحمل زيادة في التحميل أكثر منها في المحركات التفرعية والمستقلة.

فرملة المحركات المستمرة التفرعية :

Braking of Shunt Excited D.C. Motors

هنالك ثلاث طرق رئيسية لفرملة محركات التيار المستمر التفرعية كهربائياً وهي :

١- الفرملة مع اعادة القدرة إلى الشبكة الكهربائية Regenerative Braking.

٢- الفرملة الديناميكية Dynamic Braking.

٣- الفرملة بالتوصيل على التضاد Plugging Counter-Current Braking.

وستتم دراسة بعض انواع الفرملة فقط

٤-٢-٢- الفرملة الديناميكية : Dynamic Braking حتى تتحقق الفرملة الديناميكية لابد من القيام بما يأتي :

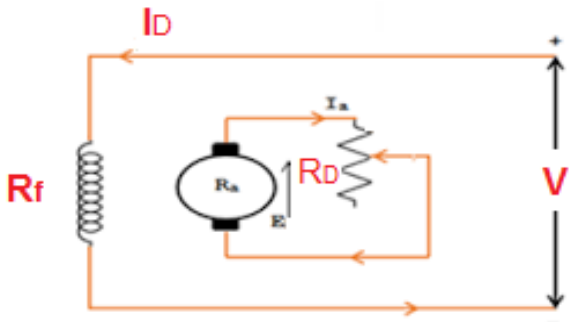
١- فصل دارة المتحرض عن التغذية الكهربائية.

٢- وصل ملفات المتحرض مع مقاومة R_D ندعوها بمقاومة الفرملة الديناميكية.

٣- المحافظة على تغذية ملف التهييج لكي يولد فيضاً مغناطيسياً يولد بدوره قوة محركة كهربائية في ملف المتحرض، هذه القوة تكون كافية لتوليد عزم مضاد، الشكل (٤-٥).

إن هذا النوع من الفرملة يستخدم في بعض الحالات الطارئة عندما نريد إيقاف الآلة بشكل سريع ودقيق، وتعد فرملة ذات موثوقية عالية وكذلك اقتصادية ولكن أقل اقتصادية من تلك مع إعادة القدرة إلى الشبكة الكهربائية.

في هذه الفرملة يتحول المحرك إلى مولدة تيار مستمر ذات تهييج مستقل حيث تتحول قدرته الميكانيكية مع قدرة الآلة التي يقوم بتدويرها لحظة الفرملة إلى قدرة كهربائية سرعان ما تتبدد في المقاومة R_D والموضحة بالشكل (٤-٥).



الشكل (٤-٥): دارة الفرملة الديناميكية للمحرك التفرعي

عند فصل المتحرض عن التغذية الكهربائية سيصبح التيار الذي يستجره المتحرض مساوياً للصفر، إلا أن المحرك يبقى مستمراً بالدوران تحت تأثير عطالته. باعتبار أن ملف التهييج ما يزال موصولاً بالتغذية الكهربائية، إذاً ستتولد فيه قوة محركة كهربائية $(E_a = C_e.\phi.n)$، هذه القوة المحركة الكهربائية ستسبب مرور تيار بملف المتحرض مقداره I_D ندعوه بتيار الفرملة، ويساوي إلى :

$$I_D = I_a = \frac{0 - E}{R_a + R_D} = \frac{-E}{R_a + R_D} \qquad (٥ - ٤)$$

الإشارة السالبة للتيار تعني أن التيار سيخرج من المتحرض ليتبدد في المقاومة R_D، وهذا التيار سيولد عزماً مفرملاً (كابحاً) مساوياً إلى :

$$T_D = C_m.\phi.I_D = C_m.\phi.(\frac{-E}{R_a + R_D})$$

$$T_D = -C_m.C_e.\frac{n.\phi^2}{R_a + R_D} \qquad (٦ - ٤)$$

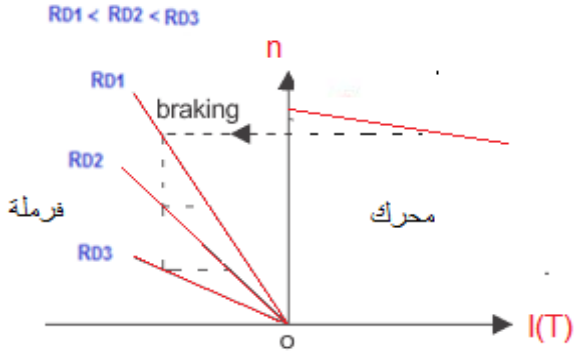
التيار سيعكس اتجاهه بشكل مباشر لحظة الفرملة بينما تبقى السرعة موجبة (باتجاه دوران المحرك) وتتناقص تدريجياً حتى تصبح مساوية للصفر. تبين العلاقة (٤-٦) أنه ومن أجل فيض مغناطيسي ϕ ثابت فإن عزم الفرملة يتعلق بمقاومة الفرملة وبسرعة الدوران.

المميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحرك التفرعي في حالة الفرملة الديناميكية تصبح على التتالي :

$$n = \frac{-(R_a + R_D)}{C_e.\phi} I_D \qquad (٤ - ٧)$$

$$n = \frac{-(R_a + R_D)}{C_m.C_e.\phi^2} T_D \qquad (٤ - ٨)$$

العلاقتين (٤ – ٧) و (٤ – ٨) عبارة عن مستقيمات تابعة لمقاومة الفرملة الديناميكية، تقع في الربع الثاني من المستوي (I ,n) ومارة من المبدأ كما هو موضح على الشكل (٤-٦).



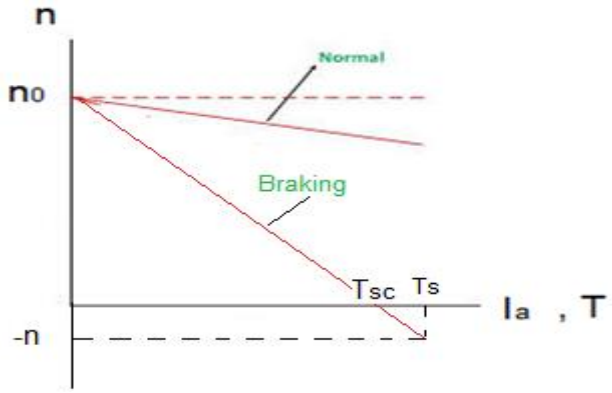
الشكل (٤-٦): المميزات الميكانيكية للمحرك المستمر التفرعي في حالة الفرملة الديناميكية

٤-٢-٣- الفرملة بعكس التوصيلات (التوصيل على التضاد) :

Plugging Counter-Current Braking

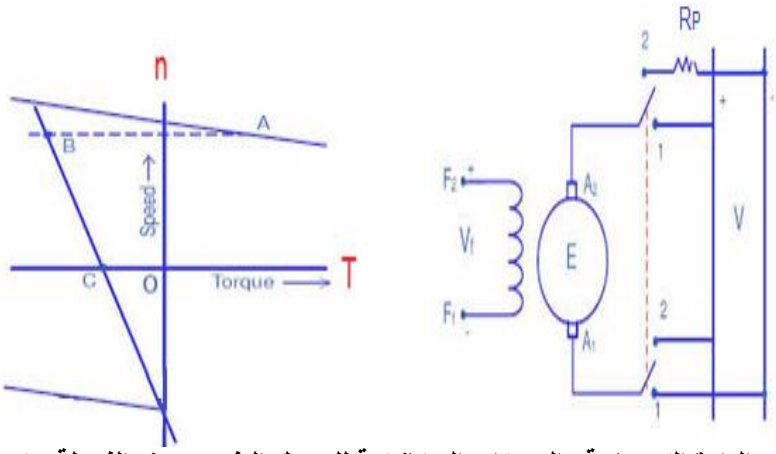
تتحقق حالة الفرملة على التضاد في حالتين :

١- عند دوران المحرك بعكس اتجاه عزمه الدوراني: وذلك تحت تأثير عزم الحمولة أو بسبب قدرته الحركية الكامنة فيه. يتحقق ذلك عندما يصبح عزم دارة القصر (T_{sc}) في الربع الأول من مميزاته أقل من عزم حمولته (T_s)، ويمكن تنفيذ ذلك عند انتقال المحرك للعمل على مميزاته الاصطناعية التي تصبح أكثر ليونة وذلك من أجل إنزال حمولات كبيرة بسرعات منخفضة، بحيث تستقر سرعة المحرك على امتداد ميزاته في الربع الرابع كما يوضح الشكل (٤-٧). في هذه الحالة يعمل المحرك على رفع الحمولة المطبقة على محوره بينما ينزل الحمل تحت تأثير ثقله بسرعة معاكسة لسرعة الدوران التي يسعى المحرك لتوليدها.



الشكل (٤-٧): المميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحرك التفرعي عند الفرملة على التضاد تحت تأثير الحمولة

٢- عند عكس اتجاه منبع التغذية: نلجأ لهذه الطريقة عند الحاجة لإيقاف المحرك بسرعة فائقة وكذلك عندما نريد تغيير اتجاه الدوران. في هذه الطريقة نقوم بعكس اتجاه جهة التغذية فتصبح اشارة الجهد (**V**) سالبة مباشرة بينما يبقى المحرك محافظاً على جهة دورانه لفترة بسبب قدرته الحركية الكامنة وعطالته قبل انتقاله للعمل في الربع الثالث. يصبح عزم المحرك لحظة التبديل سالباً، أي عزما مقاوماً للحركة مما يؤدي إلى تباطؤ سرعة المحرك حتى الصفر. باعتبار أن ما نريده هو إيقاف المحرك لذلك نقوم عند توقف المحرك باستخدام مكابح ميكانيكية خاصة بعد فصل التغذية عن المحرك، لأن عدم فصل التغذية سيؤدي إلى دوران المحرك بالاتجاه المعاكس (الربع الثالث) كما يوضح الشكل (٤-٨).



الشكل (٤-٨): الدارة الكهربائية والمميزات الميكانيكية للمحرك التفرعي عند الفرملة بعكس التوصيلات

عند عكس اتجاه جهد التغذية سيصبح تيار المتحرض مساوياً إلى :

$$I_P = I_a = \frac{-V - E}{R_a} \qquad (٩ - ٤)$$

وهي قيمة كبيرة جداً بحيث تخالف شروط المحرك الحرارية لذلك لابد من ادخال مقاومة تسلسلية مع دارة المتحرض لحظة عكس اتجاه التغذية، هذه المقاومة تدعى بمقاومة الفرملة على التضاد (R_P) وهي أكبر من مقاومة الإقلاع. بعد ادخال المقاومة R_P تصبح المعادلات العامة للمميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحرك التفرعي على التتالي كما يأتي :

$$n = \frac{-V}{C_e.\phi} + \frac{(R_a + R_P)}{C_e.\phi} I_a \qquad (١٠ - ٤)$$

$$n = \frac{-V}{C_e.\phi} + \frac{(R_a + R_P)}{C_m.C_e.\phi^2} T_a \qquad (١١ - ٤)$$

لحظة الفرملة ستنتقل نقطة العمل من النقطة (A) إلى النقطة (B) في الربع الثاني كما هو موضح على الشكل(٤-٨)، ثم تبدأ السرعة بالتناقص تدريجياً نتيجة لعزم الفرملة عندما تصبح السرعة مساوية للصفر عند النقطة(C). عند عدم قطع التغذية عن المحرك ولا كبحه ميكانيكياً سيبدأ المحرك بالدوران بالاتجاه المعاكس حتى تستقر سرعته عند نقطة تقاطع عزم الحمولة مع المميزة الميكانيكية المناسبة في الربع الثالث.

مثال ٤-١- محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي يملك القيم الاسمية الآتية :

V_n=220 V, P_n=32 Kw, I_n= 172 A, n_n=1000 r.p.m, R_a=0,062 **Ω**.

والمطلوب :

١- إنشاء المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية.

٢- حساب قيمة مقاومة الفرملة الديناميكية (R_D) المناسبة مع إنشاء المميزة الموافقة لهذه الحالة.

علماً بأن مميزاته الكهروميكانيكية تمر من النقطة الموافقة لتيار الفرملة الديناميكي (I_D=I_a) وللسرعة $(\omega_1 = 0{,}5\omega_n)$.

٣- حساب قيمة المقاومة (R_P) اللازم اضافتها إلى دارة المتحرض عند فرملته على التضاد، وذلك عندما يدور بسرعة 600 r.p.m وتيار حمولة ($I_P = -110$ A). مع إنشاء المميزة الموافقة لهذه الحالة.

الحل :

١- يمكن أن نرسم المميزة بدلالة سرعة الدوران n أوالسرعة الزاوية ω ، لحساب قيمة السرعة الزاوية الاسمية نطبق القانون الآتي :

$$\omega_n = \frac{2.\pi.n_n}{60} = \frac{2.\pi.1000}{60} = 105\ rad/sec$$

نحسب السرعة الزاوية على فراغ :

$$\omega_0 = \frac{V}{V - I_{an}.R_a}.\omega_n = \frac{220}{220 - 172 * (0{,}062)} * 105$$

$$\omega_0 = 110\ rad/sec$$

نحسب قيمة المقاومة (R_D) من معادلة التيار في حالة الفرملة الديناميكية :

$$I_D = \frac{-E_a}{R_a + R_D} \rightarrow R_D = \frac{+E_1}{I_n} - R_a$$

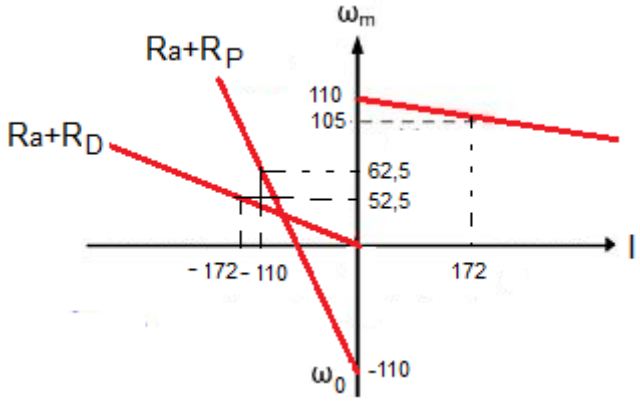
نحسب القوة المحركة الكهربائية E_1 من أجل السرعة ω_1 :

$$E_1 = C.\omega_1 = \mathrm{C}.0{,}5\omega_n$$

$$C = \frac{V}{\omega_0} = \frac{220}{110} = 2 \;\rightarrow\; E_1 = 0{,}5 * 2 * 105 = 105\,V$$

$$R_D = \frac{105}{172} - 0{,}062 = 0{,}55\,\Omega$$

يمكننا الآن رسم المميزة الكهروميكانيكية بحيث تمر من نقطتين الأولى نقطة الصفر والثانية النقطة ذات الاحداثيات (-172, 52,5) كما هو مبين في الشكل الآتي :



المميزة الطبيعية وفي حالة الفرملة الديناميكية والوصل على التضاد

٢- نحسب قيمة المقاومة (R_P) في حالة الفرملة على التضاد من معادلة التيار الآتية :

$$I_D = -\frac{V + E_a}{R_a + R_P} \rightarrow 110 = \frac{220 + E_2}{R_a + R_P}$$

$$E_2 = C.\omega_2$$

$$\omega_2 = \frac{2\pi.600}{60} = 62{,}8\frac{rad}{sec} \rightarrow\; E_2 = 2 * (62{,}8)$$

$$\omega_2 = 125{,}6\,V$$

$$R_P = \frac{220 + 125{,}6}{110} = 3{,}08\,\Omega$$

ننشأ المميزة في حالة الفرملة على التضاد على الشكل السابق، والتي تمر من النقطة (0,-110) والنقطة (110, -62,8).

التحكم بسرعة محركات التيار المستمر التفرعية :

Speed Control of D.C. Shunt Motors

بشكل عام تعطى سرعة محركات التيار المستمر بالعلاقة الآتية :

$$n = \frac{V - I_a . R_T}{C_e . \phi} \qquad (١ - ٥)$$

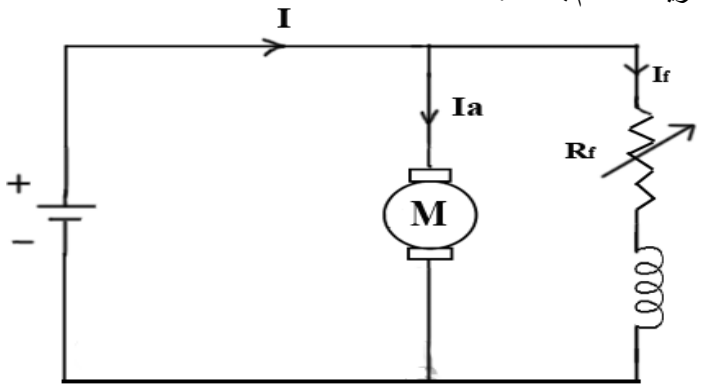
إن سرعة المحرك المستمر تتغير بتغير أي متحول في المعادلة السابقة، وبناءً عليه فإن سرعة المحرك المستمر التفرعي يمكن التحكم بها بإحدى الطرق الآتية :

١- تغيير تدفق الحقل المغناطيسي ϕ بوساطة مقاومة تسلسلية أو تفرعية مع ملف التهييج. هذه الطريقة تدعى بطريقة التحكم بالحقل.

٢- تغيير الجهد على طرفي المتحرض V_a وتيار المتحرض I_a بوساطة مقاومة متغيرة مربوطة على التسلسل أو على التفرع مع ملف المتحرض، وتسمى هذا الطريقة بطريقة التحكم بمقاومة المتحرض. ويمكن أيضاً استخدام منبع جهد مستمر متغير لتغذية متحرض المحرك، وتسمى هذه الطريقة بطريقة التحكم بجهد المتحرض.

٥-٢-١- التحكم بالسرعة بتغيير مقاومة التهييج (التحكم بالحقل) :

عندما نطبق الجهد الاسمي على المتحرض في محرك التيار المستمر التفرعي ونقوم يدوياً أو آلياً بتغيير الفيض المغناطيسي عن طريق تغيير قيمة مقاومة موصولة تسلسلياً مع ملف التهييج، كما يوضح الشكل (٥-١)، نسمي هذه الطريقة بطريقة التحكم بالحقل.



الشكل (٥-١): الدارة المكافئة لمحرك تيار مستمر تفرعي مع مقاومة متغيرة مع ملف التهييج

لفهم عملية تغير السرعة مع مقاومة التهييج المتغيرة R_f نفرض أن هذه المقاومة قد زادت، في هذه الحالة سينخفض تيار التهييج $(I_f = \frac{V}{R_f})$ وبالتالي ينخفض الفيض المغناطيسي $(\phi = \alpha . I_f)$. انخفاض الفيض المغناطيسي سيسبب انخفاض في القوة المحركة الكهربائية $(E_a = C_e . \phi . n)$. من أجل قيم ثابتة للجهد ولمقاومة المتحرض فإن انخفاض القوة المحركة الكهربائية سيسبب زيادة في تيار المتحرض، كما توضح العلاقة الآتية :

$$I_a = \frac{V - E_a}{R_a} \qquad (٢ - ٥)$$

باعتبار أن العزم المتحرض في المحرك متناسب طردياً مع تيار المتحرض $(T_a = C_m . \phi . I_a)$ لذلك فزيادة التيار ستسبب زيادة في عزم المحرك المتحرض، وهذا بدوره سيزيد من سرعة دوران المحرك.

ولفهم تأثير تغير الفيض المغناطيسي على السرعة نوضح ذلك بالمثال العددي الآتي :

مثال ٥-١: لدينا محرك تيار مستمر تفرعي يعمل بجهد 250V، مقاومة متحرضه 0,25Ω وقوته المحركة الكهربائية الداخلية 245V. ماذا يحدث إذا انخفض الفيض بمقدار 1% ؟

الحل:

بناءً على معطيات المحرك نحسب تيار المتحرض I_a كما يأتي :

$$I_a = \frac{250 - 245}{0,25} = 20\ A$$

انخفاض الفيض 1% يعني انخفاض القوة المحركة الكهربائية بالمقدار نفسه :

$$E_{a2} = 0,99 . E_{a1} = 242,55\ V$$

سيرتفع تيار المتحرض إلى :

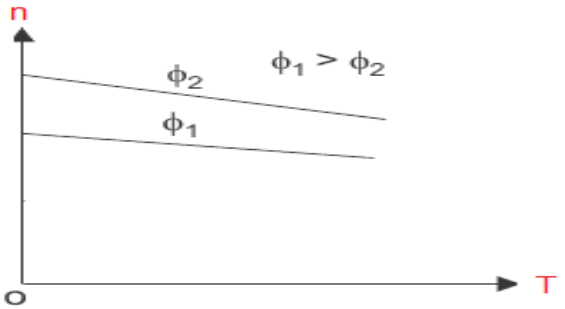
$$I_a = \frac{250 - 242{,}55}{0{,}25} = 29{,}8\ A$$

من الملاحظ أن انخفاض طفيف بالفيض بمقدار 1% سيسبب زيادة كبيرة بالتيار بمقدار 50% تقريباً. وهذه الزيادة في تيار المتحرض ستتغلب على انخفاض الفيض، وبالتالي سيزداد العزم المتحرض T_a. في هذه الحالة سيصبح عزم المحرك المتحرض أكبر من عزم الحمولة وهذا سيسبب تسارع المحرك. نتيجة لزيادة سرعة المحرك ستزداد قوته المحركة الكهربائية الداخلية E_a المرتبطة بالسرعة، وهذا سيسبب انخفاض في تيار المتحرض تبعاً للعلاقة (٥-٢). انخفاض تيار المتحرض سيسبب انخفاض في عزم المحرك المتحرض حتى يساوي عزم الحمولة، وبالتالي انخفاض في السرعة حتى تستقر عند قيمة محددة ولكن أعلى من قيمتها قبل انخفاض الفيض.

يمكننا أن نلخص تأثير انخفاض الفيض المغناطيسي على السرعة بما يأتي :

١- ازدياد R_f سيسبب انخفاض I_f
٢- انخفاض I_f سيسبب انخفاض الفيض ϕ
٣- انخفاض الفيض ϕ سيسبب انخفاض القوة المحركة الكهربائية E_a
٤- انخفاض E_a سيزيد التيار I_a
٥- ازدياد التيار I_a سيزيد من العزم المتحرض T_{ind}
٦- ازدياد العزم T_{ind} سيزيد السرعة n لأن $T_{ind} > T_{load}$
٧- ازدياد السرعة سيزيد E_a
٨- زيادة E_a سيقلل التيار I_a
٩- انخفاض التيار I_a سيخفض العزم المتحرض T_{ind} حتى يساوي عزم الحمولة $(T_{ind} = T_{load})$ وذلك عند سرعة أعلى.

إن تأثير انقاص الفيض المغناطيسي أو زيادة مقاومة دارة التهييج على مميزة المحرك الميكانيكية موضحة بالشكل (٥-٢)، نلاحظ أنه بإنقاص تهييج الآلة تزداد سرعة المحرك على فراغ ويزداد ميل منحني السرعة-عزم. كما أن انقاص مقاومة التهييج سوف يعكس العملية وتنقص سرعة المحرك.



الشكل (٥-٢): مميزات المحرك المستمر التفرعي عند تغير الفيض المغناطيسي

مما سبق يتبين لدينا بأن طريقة التحكم بالحقل تستخدم فقط من أجل الحصول على سرع أعلى من السرعة الأسمية للمحرك.

- **هذه الطريقة بالتحكم تمتاز بما يلي :**

١- هذا النوع من التحكم اقتصادي وبسيط نسبياً ويمكن تحقيقه يدوياً أوآلياً.
٢- باعتبار أن مقاومة التهييج كبيرة نسبياً، إذاً فهذا النوع من التحكم لا يرافقه ضياعات كبيرة بالاستطاعة وبالتالي فمردود هذه الطريقة جيد نسبياً.
٣- يعد هذا النوع من التحكم مرن ولا يرافقه قفزات بالسرعة طالما تغيير الحقل يتم ضمن حدود معينة.

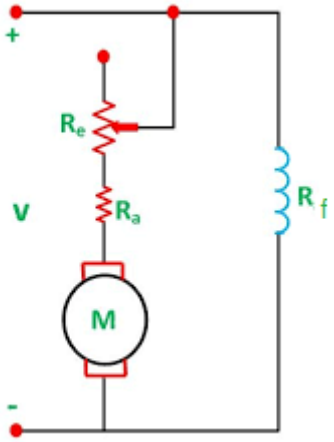
باعتبار أن انخفاض بسيط بالتدفق المغناطيسي قد سبب، كما رأينا في المثال (٥-١)، زيادة كبيرة في تيار المتحرض وبالتالي بالعزم و السرعة، لذلك فإن تضعيف الحقل المغناطيسي لابد أن يتم ضمن حدود ضيقة، وهذا ما يفرض علينا بأن يتم إقلاع المحرك المستمر بتيار تهييج كامل (اسمي) ومن ثم يتم تخفيض الحقل بزيادة مقاومة الحقل.

- **من مساوئ طريقة التحكم بالحقل :**

١- عدم القدرة على الحصول على سرعات أقل من السرعة الاسمية.
٢- عدم الاستقرار عند سرعات عالية بسبب ردة فعل المتحرض.
٣- صعوبة التبديل وامكانية ضرر المبدل (المجمع) عند سرعات عالية.

٥-٢-٢- التحكم بالسرعة بتغيير مقاومة المتحرض التسلسلية :

تعتمد هذه الطريقة في التحكم على تخفيض الجهد على طرفي المتحرض بوساطة مقاومة موصولة على التسلسل مع دارة المتحرض، كما يبين الشكل (٥-٣).



الشكل (٥-٣): التحكم بسرعة المحرك التفرعي بوساطة تغيير مقاومة دارة المتحرض

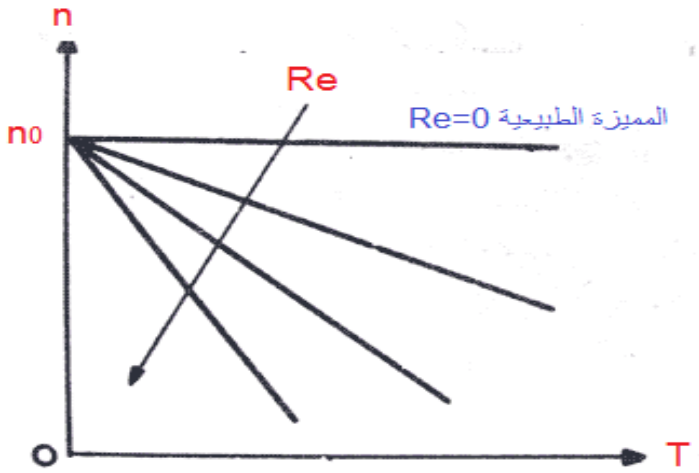
إن زيادة مقاومة دارة المتحرض ستخفض الجهد على طرفي المتحرض، مما يسبب بالنتيجة انخفاض بسرعة المحرك. لذلك نلجأ لهذه الطريقة عندما نريد الحصول على سرعات أقل من السرعة الاسمية للمحرك.

أما فيما يخص مميزات المحرك الميكانيكية فإن ميل منحني المميزة يزداد بزيادة مقاومة المتحرض، إلا أن سرعة المحرك على فراغ تبقى ثابتة كما يوضح الشكل (٥-٤).

فكلما كانت قيمة مقاومة المتحرض أكبر كان تنظيم السرعة أسوأ، وهذا ما تعبر عنه رياضياً معادلة المميزة الميكانيكية للمحرك :

$$n = \frac{V}{C_e.\phi} - \frac{(R_a + R_e)}{C_e.C_m.\phi^2} T_a \; = \; n_0 \; - \Delta n \qquad (٣-٥)$$

يمكن أيضاً الاستفادة من المقاومة المضافة في مرحلة إقلاع المحرك المستمر بهدف تخفيض تيار الإقلاع. إلا أن ادخال مقاومة متغيرة للتحكم بالسرعة تعتبر طريقة غير مجدية عملياً وذلك بسبب ضياعات الاستطاعة الكبيرة في المقاومة التسلسلية المضافة وخاصة عند الاستطاعات العالية، لذلك فإنه نادراً ما يتم استخدام هذه الطريقة في التطبيقات التي تكون فيها استطاعة المحرك كبيرة نسبياً.



الشكل (٥-٤): المميزات الميكانيكية للمحرك التفرعي عند تغيير مقاومة المتحرض

يمكننا تلخيص ميزات التحكم بمقاومة المتحرض بما يأتي :

١- بساطة الدارة وسهولة التنظيم.

٣- امكانية الاستفادة من المقاومة التسلسلية أثناء إقلاع المحرك.

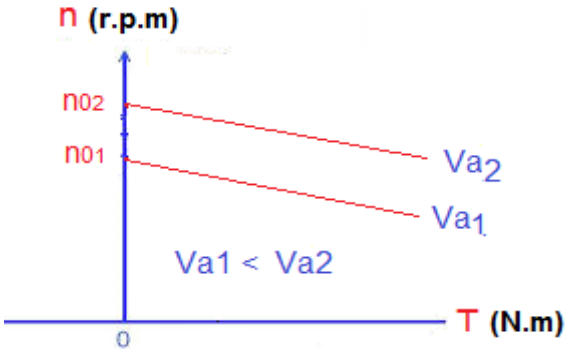
أما فيما يخص سيئات هذه الطريقة فهي :

١- لا يمكن تنظيم السرعة إلا في المجال تحت المميزة الطبيعية، أي عند السرع المنخفضة فقط.

٢- الكلفة العالية نسبياً لمقاومات متغيرة كبيرة قادرة على تبديد كميات كبيرة من الحرارة (خاصة عند الاستطاعات العالية).
٣- تنظيم السرعة يعتبر سيئاً من أجل أي سرعة على فراغ بسبب زيادة ليونة المحرك مع زيادة المقاومة.
٤- مردود منخفض بسبب الضياعات الكبيرة في مقاومة التنظيم.
٥- صعوبة الحصول على تحكم دون قفزات في السرعة عند الاستطاعات العالية.
٦- من أجل العزوم الصغيرة لا يمكن التحكم بسرعة الدوران وتنظيمها إلا في حدود ضيقة.

التحكم بالسرعة بتغيير الجهد على المتحرض :

من الطرق العملية المتبعة للتحكم بعزم وسرعة محركات التيار المستمر هي طريقة تغيير قيمة جهد تغذية ملف المتحرض، من دون تغيير الجهد على ملف التهييج. بشكل عام قد لا يكون مردود المحركات الكهربائية الصغيرة مهماً بينما يعتبر مهماً للغاية في حالة المحركات ذات الاستطاعة العالية. كما أن العزم والتنظيم الجيد للسرعة والتحكم الناعم بسرعة المحركات ومن بدون قفزات يعد من الأمور المهمة في تشغيل أغلب المحركات، الكبيرة منها والصغيرة.
كل هذه الأمور يمكن تحقيقها عن طريق استخدام منبع جهد مستمر متغير لتغذية متحرض المحرك المستمر. هذه الطريقة تستغني عن استخدام مقاومات تسلسلية للحد من قيمة تيارات الإقلاع العالية. بزيادة الجهد المطبق على متحرض المحرك سيزداد تيار المتحرض وبالتالي يزداد العزم المتحرض للمحرك، وهذا بدوره سيزيد من سرعة الدوران لأن عزم المحرك المتحرض أصبح أكبر من عزم الحمولة. بزيادة السرعة تزداد القوة المحركة الكهربائية للمحرك وهذا يؤدي إلى نقصان تيار المتحرض حتى يتساوى عزم المحرك مع عزم الحمولة $(T_{ind} = T_{load})$، وبالتالي تنقص سرعة الدوران حتى تستقر عند قيمة جديدة ولكن أعلى من السرعة قبل زيادة الجهد. يبين الشكل (٥-٧) المميزة الميكانيكية للمحرك المستمر التفرعي عند زيادة الجهد. نلاحظ أن ميل المنحني يبقى ثابتاً، إلا أن سرعة اللاحمل تنزاح للأعلى مع زيادة الجهد المطبق على المتحرض.



الشكل (٥-٧): المميزة الميكانيكية للمحرك المستمر التفرعي عند تغير الجهد

٥-٢-٥- مقارنة بين طرق التحكم بالسرعة السابقة :

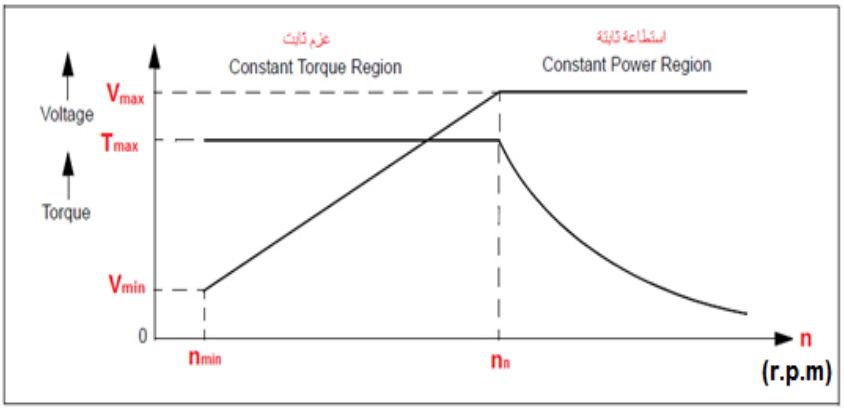
رأينا سابقاً بأن زيادة تيار التهييج تنقص سرعة المحرك وذلك عند عمل المحرك عند قيمه الاسمية (جهد اسمي، تيار اسمي، سرعة اسمية، تيار تهييج اسمي..)، لذلك يمكن القول بأن التحكم بمقاومة التهييج من شأنها أن تزيد السرعة فوق السرعة الاسمية للمحرك.
بطريقة التحكم بجهد المتحرض وجدنا أن سرعة المحرك تتناسب طرداً مع الجهد فهي تزيد مع زيادته وتنقص مع نقصانه، إلا أن هناك سرعة عظمى يحددها الجهد الأعظمي المسموح تطبيقه على المحرك. لذلك تستخدم طريقة التحكم بجهد المتحرض للتحكم بالمحرك عند السرع الأقل من السرعة الاسمية.
بالنتيجة تعد طريقتي التحكم بمقاومة التهييج والتحكم بجهد المتحرض أكثر الطرق استخداماً لتغيير سرعة المحرك، كما تعتبر هاتان الطريقتين متممتان بعضهما لبعض، وبجمع هاتين الطريقتين يمكننا التحكم بسرعة المحرك ضمن مجال واسع.
عند التحكم بجهد المتحرض فإن الفيض المغناطيسي في المحرك يبقى ثابتاً باعتبار أن جهد تهييج الآلة يبقى ثابتاً، وبالتالي فإن العزم الأعظمي للمحرك يبقى ثابتاً على الرغم من تغير سرعة المحرك:

$$T_{max} = C_m . \phi . I_{max} \qquad (٥ - ٤)$$

تعطى استطاعة المحرك الاعظمية بالعلاقة الآتية :

$$P_{max} = \omega . T_{max} \qquad (٥ - ٥)$$

وهذا يعني أن استطاعة الخرج الميكانيكية متعلقة بالسرعة وتتناسب طرداً معها، بينما في طريقة التحكم بالتهييج فإن فيض الآلة سينقص وهذا يسبب زيادة في السرعة. وحتى لا يتجاوز تيار المتحرض القيمة المسموحة لابد من أن ينقص العزم الحدي عند زيادة السرعة. في هذه الحالة فإن استطاعة المحرك تبقى ثابتة بينما يتناقص العزم الأعظمي مع السرعة، وهذا ما يوضحه الشكل (٥-٨).



الشكل (٥-٨): تغيرات العزم والاستطاعة مع السرعة

مثال ٥-٢- محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي يملك القيم الاسمية الآتية :

$V_n = 250\ V$, $P_n = 100\ hp$, $R_f = 41{,}67\ \Omega$, $R_a = 0{,}03\ \Omega$

بفرض أن تيار الحمل هو 126A عند سرعة أولية 1103 r.p.m. أوجد سرعة دوران المحرك إذا زادت مقاومة التهييج حتى $50\ \Omega$، باعتبار أن عزم المحرك يبقى ثابتاً.

الحل :

نحسب أولاً تيار المتحرض قبل زيادة مقاومة التهييج :

$$I_{a1} = I_{L1} - I_{f1} = 126 - \frac{250}{41{,}67} = 120\ A$$

فتكون القوة المحركة الكهربائية E_{a1} :

$$E_{a1} = V - I_{a1}.R_a = 250 - 120 * (0{,}03) = 246{,}4\ V$$

تيار التهييج الجديد بعد زيادة مقاومة التهييج :

$$I_{f2} = \frac{V}{R_{f2}} = \frac{250}{50} = 5\ A$$

لحساب السرعة الجديدة نلجأ إلى طريقة نسب القوى المحركة الكهربائية :

$$\frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{C_e.\phi_2.n_2}{C_e.\phi_1.n_1}$$

نفرض أن العلاقة خطية بين الفيض وتيار التهييج فيكون :

$$\frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{I_{f2}.n_2}{I_{f1}.n_1}$$

لحساب E_{a2} علينا ايجاد I_{a2}، و لحساب تيار المتحرض I_{a2} نلجأ لنسب العزوم:

$$\frac{T_{a2}}{T_{a1}} = \frac{C_m.\phi_2.I_{a2}}{C_m.\phi_1.I_{a1}}$$

باعتبار أن عزم المحرك يبقى ثابتاً إذاً يمكننا أن نكتب العلاقة السابقة بالشكل الآتي :

$$1 = \frac{I_{f2}.I_{a2}}{I_{f1}.I_{a1}}$$

$$I_{a2} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}}.I_{a1} = \frac{6}{5} * 120 = 144\ A$$

وبالتالي تكون E_{a2} :

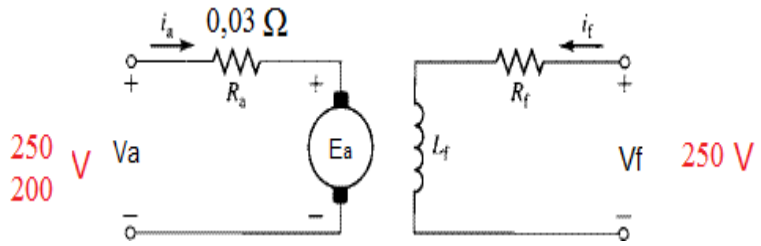
$$E_{a2} = V - I_{a2}.R_a = 250 - 144 * (0{,}03) = 245{,}7\ V$$

تصبح سرعة المحرك الجديدة n_2 :

$$n_2 = n_1.\frac{I_{f1}.E_{a2}}{I_{f2}.E_{a1}} = 1103 * \frac{245{,}7 * (6)}{246{,}4 * (5)} = 1320\ r.p.m.$$

مثال ٥-٣- من أجل المحرك السابق نفسه، لو فرضنا أنه تم تغذية ملف التهييج بشكل منفصل عن المتحرض، من أجل عزم حمولة ثابت أحسب سرعة المحرك الجديدة وذلك عند انقاص جهد المتحرض إلى 200V.

الحل:



باعتبار أن تيار المتحرض 120A وجهد المتحرض 250V، لذلك تكون القوة المحركة الكهربائية:

$$E_{a1} = V - I_{a1}.R_a = 250 - 120 * (0{,}03) = 246{,}4\ V$$

وبنسب القوى المحركة الكهربائية نحصل على :

$$\frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_2 = \frac{E_{a2}}{E_{a1}}.n_1$$

- نحسب E_{a2} :

$$E_{a2} = V - I_{a2}.R_a = 200 - 120 * (0{,}03) = 196{,}4\ V$$

فتكون السرعة الجديدة للمحرك :

$$n_2 = \frac{246{,}4}{196{,}4} * 1103 = 879\ r.p.m.$$