مميزات محركات التيار المستمر وطرق إقلاعها

تتمتع محركات التيار المستمر بمجموعة من الخصائص تتمثل بسرعاتها وعزوم إقلاعها العالية وكذلك سهولة تغيير سرعتها ضمن مجال واسع (خاصة محركات التيار المستمر التسلسلية)، وهذا ما يجعلها في مقدمة المحركات المستخدمة في الباصات الكهربائية وقطارات الميترو وحافلات الترام وفي عمليات الجر الكهربائي.

قبل البدء بدراسة طرق إقلاع محركات التيار المستمر لابد أن نسلط الضوء على مميزات هذه المحركات الكهروميكانيكية والميكانيكية. يقصد بالمميزات الكهروميكانيكية العلاقة بين سرعة دوران المحرك n والتيار المار بملفات المتحرض I_a أي $n = f(I_a)$ أو $\omega = f(I_a)$، أما المميزات الميكانيكية فهي التي تربط المقادير الميكانيكية الأساسية للمحرك مع بعضها البعض، أي علاقة سرعة الدوران مع عزم المحركT، أي $n = f(T)$ أو $\omega = f(T)$، حيث ω هي السرعة الزاوية للمحرك.

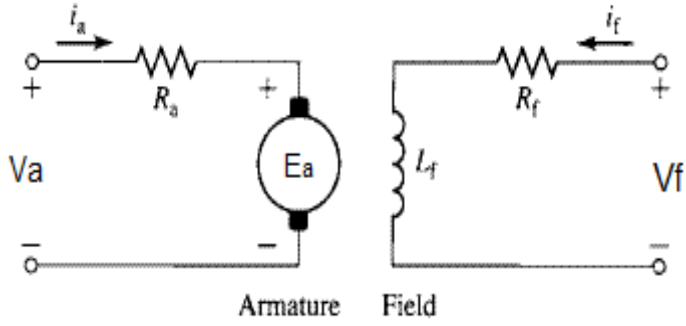
تختلف مميزات المحركات المستمرة من حيث شكلها وخصائصها ودرجة قساوتها من آلة إلى أخرى، كما أنها تختلف في الآلة الواحدة بالحالة الطبيعية وبوجود مقاومات تسلسلية مضافة، مما يجعلنا نميز نوعين من المميزات: المميزات الطبيعية والمميزات الاصطناعية.

سنأتي على دراسة هذه المميزات بالتفصيل لأهم أنواع محركات التيار المستمر: المستقلة، التفرعية، التسلسلية وكذلك المختلطة.

.

– 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



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 :

$$\phi = \alpha . I_f$$

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

$$V_f = R_f . I_f$$
$$I_L = I_a$$
$$V = E_a + R_a . I_a$$
$$T_a = C_m . \phi . I_a$$
$$E_a = C_e . \phi . n$$
$$E_a = C_m . \phi . \omega$$

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.

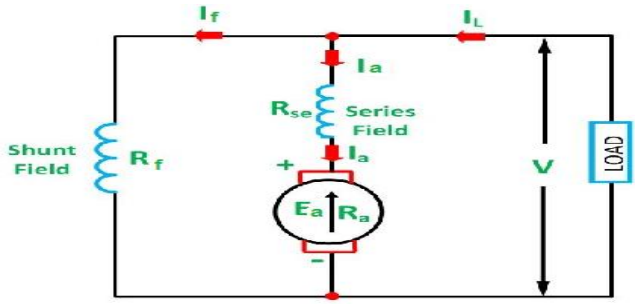
n : سرعة دوران محور المحرك (r.p.m).

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 :

$$V = E_a - R_a . I_a$$

محرك التيار المستمر التفرعي 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.



الدارة المكافئة لمحرك التيار المستمر التفرعي

يمكننا كتابة علاقة الجهد الكهربائي بالشكل:

$$V = C_e . \phi . n + R_a . I_a$$

أو

$$V = C_m . \phi . \omega + R_a . I_a$$

انطلاقاً من العلاقتين الأخيرتين يمكننا أن نكتب :

$$n = \frac{V}{C_e . \phi} - \frac{R_a}{C_e . \phi} I_a$$

أو

$$\omega = \frac{V}{C_m . \phi} - \frac{R_a}{C_m . \phi} I_a$$

العلاقتين 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.

$$n_0 = \frac{V}{C_e.\phi} \quad , \quad \omega_0 = \frac{V}{C_m.\phi}$$

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

$$\Delta n = \frac{R_a.I_a}{C_e.\phi} \quad , \quad \Delta\omega = \frac{R_a.I_a}{C_m.\phi}$$

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

$$n = n_0 - \Delta n \, , \quad \omega = \omega_0 - \Delta\omega$$

بالعودة إلى معادلة عزم المحرك يمكن أن نستنتج علاقة تيار الحمل I_a مع العزم T_a بالشكل الآتي :

$$I_a = \frac{T_a}{C_m.\phi}$$

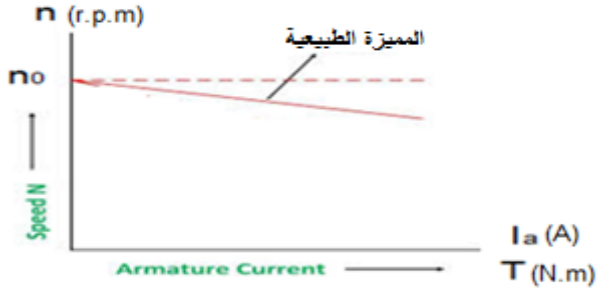
بتبديل قيمة التيار I_a نجد :

$$n = \frac{V}{C_e.\phi} - \frac{R_a}{C_e.C_m.\phi^2}T_a$$

أو

$$\omega = \frac{V}{C_m.\phi} - \frac{R_a}{C_m^2.\phi^2}T_a$$

المعادلتان الاخيرتان 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.



المميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية الطبيعية للمحرك المستمر ذي التهييج المستقل والتفرعي

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.

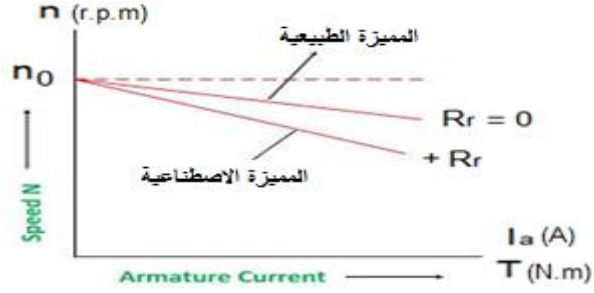
أما المميزة الاصطناعية للمحرك المستقل والتفرعي فإننا نحصل عليها عند إضافة مقاومة أو مجموعة مقاومات تسلسلية إلى دارة المتحرض بغرض الحد من قيمة تيارات الإقلاع الخطرة. في هذه الحالة سيبقى الحد الأول من معادلات المميزات ثابت (المتمثل بسرعة العمل على فراغ)، والذي سيتغير فقط هو الحد اليميني الثاني (الذي يمثل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

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

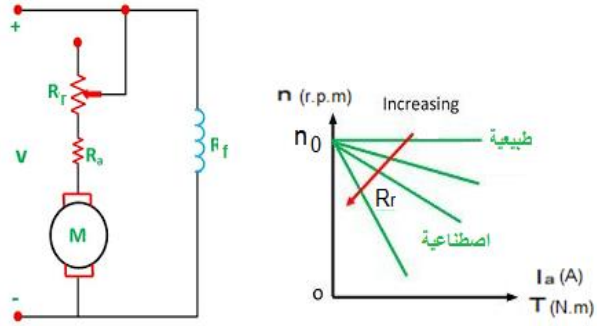
وبالنسبة إلى الميزة الميكانيكية الاصطناعية يصبح هبوط السرعة :

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

وجود هذه المقاومة التسلسلية يجعل المميزة الكهروميكانيكية والميكانيكية الاصطناعية أكثر ميلاً (أقل قساوة) من المميزة الطبيعية وذلك تبعاً لقيمة R_r.



نحصل على المميزة الاصطناعية للمحرك ذي التهييج المستقل والتفرعي بإضافة مقاومة واحدة أو مجموعة مقاومات إلى دارة المتحرض لنحصل على حزمة من المستقيمات تنطلق جميعها من نقطة واحدة على محور السرعة وهي $\mathbf{n_0}$ كما يوضح الشكل.



المميزة الاصطناعية للمحرك ذي التهييج المستقل والتفرعي بإضافة عدة مقاومات

مميزة المحرك المستقل والتفرعي عبارة عن خط مستقيم، 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 :

$$T_n = 9{,}55.\frac{P_n}{n_n}$$

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 :
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 :

$$n_0 = \frac{V}{V - I_{an}.R_a}.n_n$$

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 :

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

حيث I هو التيار عند المردود الأعظمي.
بتقريب مقبول يمكن اعتبار أن المردود الأعظمي يحصل عند المردود الاسمي،

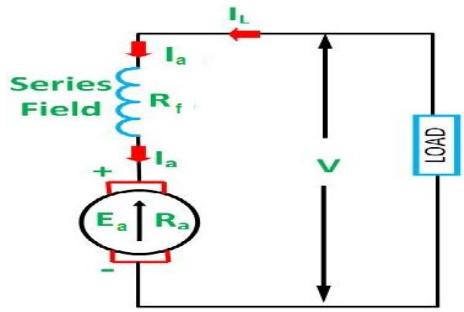
$$R_a = \frac{V_n}{2I}(1-\eta_n) = 0{,}5(1-\eta_n)\frac{V_n}{I_n}$$

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 :

$n_{nr} = n_0\left[1 - \frac{I_n(R_a+R_r)}{V}\right]$ حيث R_r هي المقاومة المضافة إلى دارة المتحرض.

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.



المعادلات الكهربائية والميكانيكية المميزة للمحرك المستمر ذي التهييج التسلسلي هي :

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

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

$$\phi = \alpha . I_a$$

يمكننا كتابة علاقة الجهد الكهربائي بالشكل الآتي :

$$V = C_e . \phi . n + (R_a + R_f) . I_a$$

أو

$$V = C_m . \phi . \omega + (R_a + R_f) . I_a$$

انطلاقاً من العلاقتين الأخيرتين يمكننا أن نكتب :

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

أو

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

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 ،يمكننا كتابة

معادلة عزم الآلة المستمرة على الشكل الآتي :

$$T_a = C_m.\phi.I_a = C_m.\alpha.I_a^2$$

ومنه فإن تيار المتحرض بدلالة العزم الكهربائي يعطى بالعلاقة الآتية :

$$I_a = \sqrt{\frac{T_a}{C_m.\alpha}}$$

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

أو

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

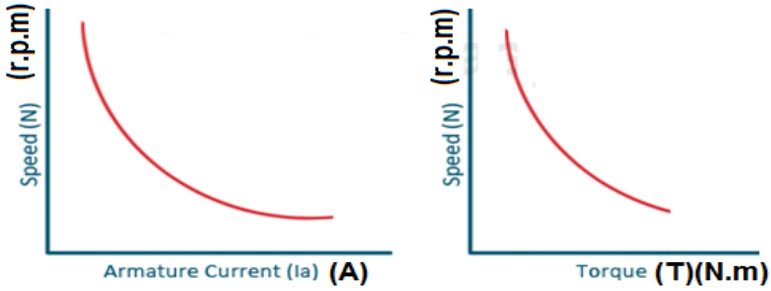
المعادلتان الأخيرتان تمثلان معادلات المميزة الميكانيكية الطبيعية للآلة المستمرة التسلسلية، ونظراً لثبات العناصر C_m ,V ,$(R_a + R_f)$و كذلك α فإن معادلة السرعة يمكن إعادة كتابتها بالشكل المبسط الآتي :

$$n = \frac{A}{\sqrt{T_a}} - \mathrm{B}$$

حيث :

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

المعادلات المعبرة للمميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لها شكل قطع زائد يمكن تمثيله بيانياً



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.. لإنشاء المميزة الاصطناعية ونضيف إلى الحد الثاني المقاومة R_r لنحصل على :

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

أو

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

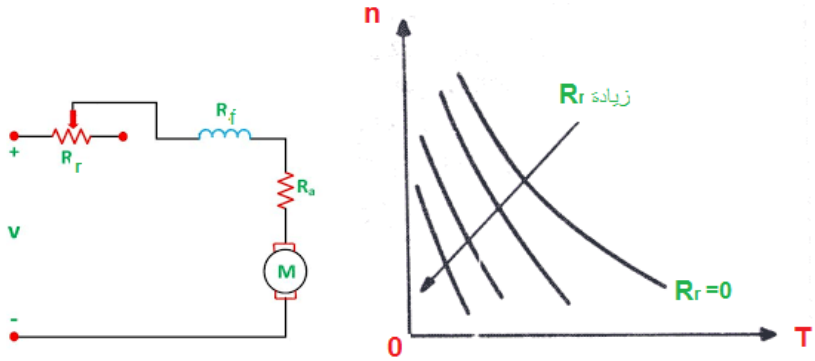
نلاحظ أن الحد الثاني من معادلات المميزة الطبيعية قد تغير، وبالتالي يمكننا كتابة المعادلة السابقة بالنسبة للمميزة الاصطناعية بالشكل الآتي :

$$n = \frac{A}{\sqrt{T_a}} - B'$$

حيث :

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

يبين الشكل 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.



المميزة الطبيعية والاصطناعية للمحرك المستمر ذي التهييج التسلسلي

مثال: 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 :

$$\frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{n_2}{n_1}.\frac{\phi_2}{\phi_1} \rightarrow n_2 = n_1 * \left(\frac{E_{a2}}{E_{a1}}\right) = 1200\left(\frac{102}{98}\right)$$

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

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 :

$$P_{out} = \omega.T = \frac{2.\pi.n}{60}.T$$

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.

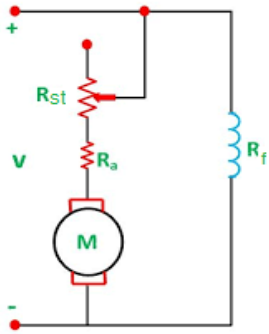
إقلاع محركات التيار المستمر المستقلة والتفرعية

عند تغذية المحرك المستمر المستقل أو التفرعي ومن دون وجود مقاومات إقلاع تكون قيمة القوة المحركة الكهربائية مساوية للصفر (E_a=0)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 :

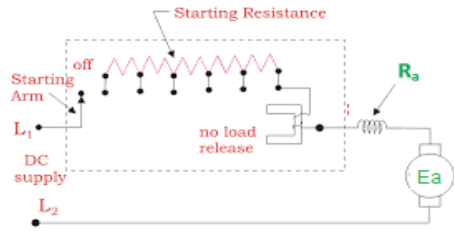
$$I_{st} = \frac{V - 0}{R_a} = \frac{V}{R_a} \qquad (٢١ - ٣)$$

مثل هذا التيار لا يتلاءم والشروط الحرارية للمحرك فمروره سينشر حرارة عالية داخل المحرك، لذلك لابد من حماية ملفات متحرض المحرك 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. 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 اخراجها بعد انتهاء مهمتها في الإقلاع مالم يكن لها دور في التحكم بالسرعة.



مقاومة تسلسلية متغيرة



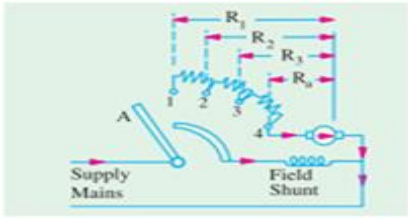
مقاومة من عدة أجزاء

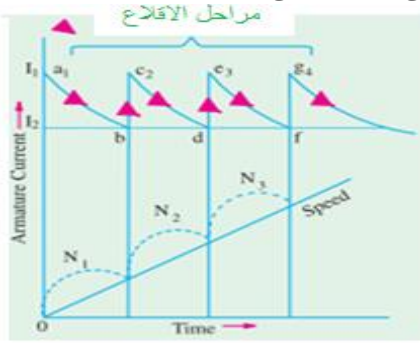
مقاومات الإقلاع التسلسلية في المحرك التفرعي

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 I_n(2-2,5).
- I_2 : تيار الإقلاع الأصغري والذي يحدد اللحظة الزمنية المناسبة لإخراج إحدى مقاومات الإقلاع التسلسلية، وتكون قيمته محصورة ضمن المجال I_n(1,1-1,25).

يبين الشكل 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.

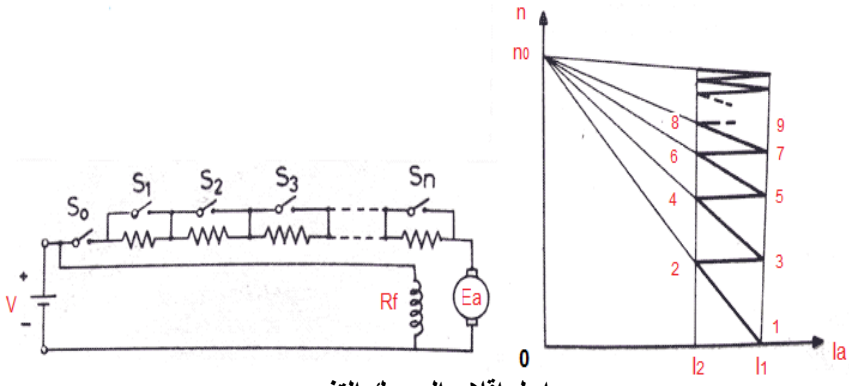




تغير تيار الإقلاع وسرعة الدوران أثناء الإقلاع

آلية إقلاع محركات التيار المستمر المستقلة والتفرعية :

يوضح الشكل 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).



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 :

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

عند النقطة (5) تعود السرعة والقوة المحركة الكهربائية للازدياد من جديد حتى القيمة E_{a3} المقابلة 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:

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

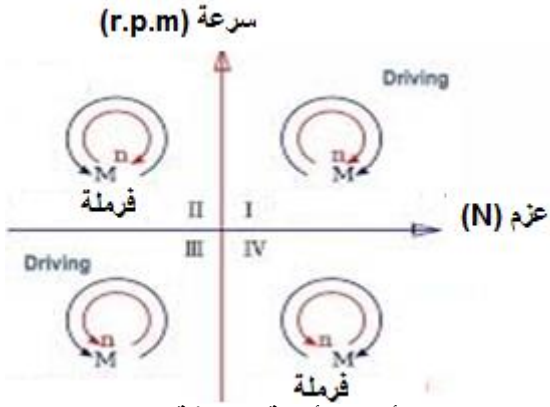
يمكننا القول بأنه لحساب مقاومة الإقلاع ودرجاتها تحليلياً علينا تحديد ما يلي :

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 :

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

فرملة محركات التيار المستمر

في الفرملة الكهربائية يتم الاعتماد على عزم المحرك نفسه في عملية الفرملة، ويتم ذلك عند عمل المحرك باستطاعة سالبة (الربع الثاني والرابع في مميزات المحرك) حيث يقوم بتقديم الاستطاعة إلى الشبكة الكهربائية بدلاً من سحبها (حالة العمل كمولدة)، كما يوضح الشكل (٤-١).



الشكل (٤-١): الأرباع الأربعة لعمل آلة التيار المستمر

وسنقوم بدراسة فرملة كلا نوعي المحركات المستمرة: المستقلة أوالتفرعية والتسلسلية.

فرملة المحركات المستمرة التفرعية :

ثلاث طرق رئيسية لفرملة محركات التيار المستمر التفرعية كهربائياً ولكننا سنستعرض طريقتين فقط :

١- الفرملة الديناميكية Dynamic Braking.

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

وستتم دراسة كل طريقة على حدة وبالتفصيل مع أمثلة رقمية.

الفرملة الديناميكية :

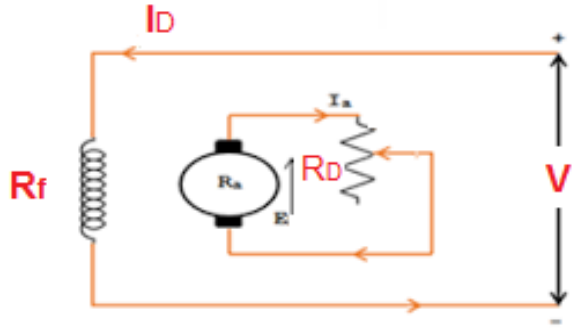
حتى تتحقق الفرملة الديناميكية لابد من القيام بما يأتي :

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،



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 :

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

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

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

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

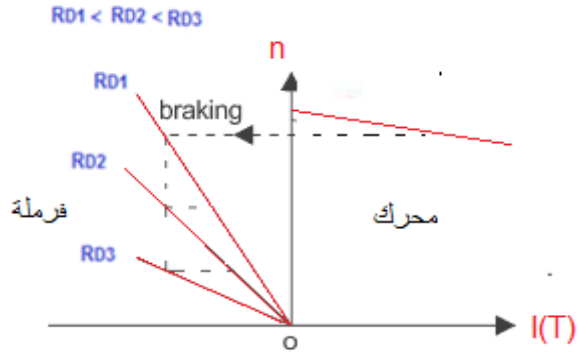
التيار سيعكس اتجاهه بشكل مباشر لحظة الفرملة بينما تبقى السرعة موجبة (باتجاه دوران المحرك) وتتناقص تدريجياً حتى تصبح مساوية للصفر. تبين العلاقة (٤-٦) أنه ومن أجل فيض مغناطيسي ϕ ثابت فإن عزم الفرملة يتعلق بمقاومة الفرملة وبسرعة الدوران.

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

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

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

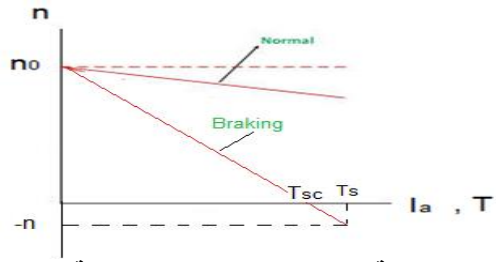
العلاقتين (٤ – ٧) و (٤ – ٨) عبارة عن مستقيمات تابعة لمقاومة الفرملة الديناميكية، تقع في الربع الثاني من المستوي (n ,I) ومارة من المبدأ.



٢- الفرملة بعكس التوصيلات (التوصيل على التضاد) :

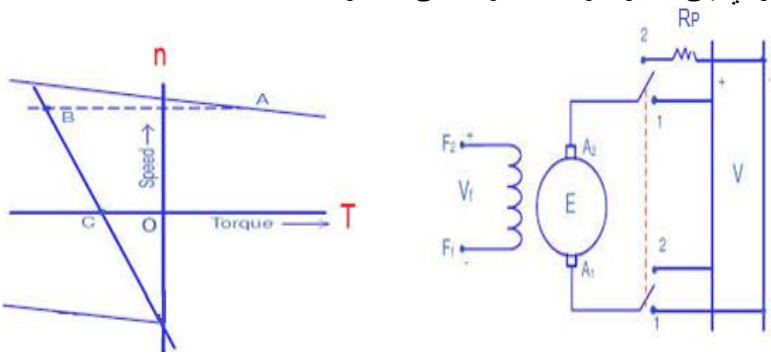
تتحقق حالة الفرملة على التضاد في حالتين :

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)، كما يوضح الشكل.



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 عزماً مقاوماً للحركة مما يؤدي إلى تباطؤ سرعة المحرك حتى الصفر.



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 :

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

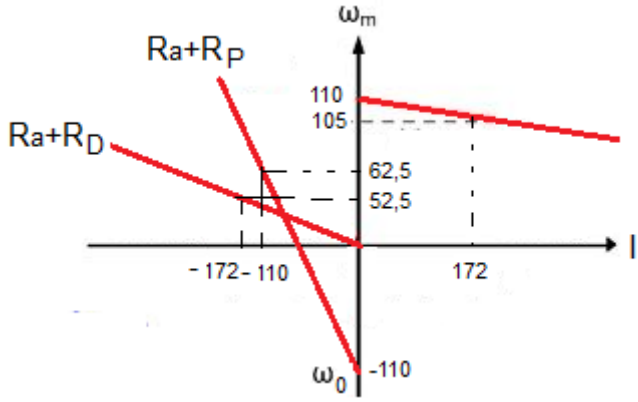
نحسب القوة المحركة الكهربائية E_1 من أجل السرعةω_1 :

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

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

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

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).

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

V_n=440 V, P_n=29 Kw, I_n= 76 A, n_n=1000 r.p.m, R_a=0,384 Ω

والمطلوب :

١- أحسب قيمة المقاومة الواجب اضافتها على التسلسل مع دارة المتحرض حتى تصبح سرعة دورانه 500 r.p.m مع المحافظة على نفس قيمة تيار المتحرض الاسمي.

٢- عند فرملة المحرك ديناميكياً عند السرعة 500 r.p.m وعند التيار الاسمي في المتحرض، حدد قيمة مقاومة الفرملة الديناميكية الواجب اضافتها وكذلك العزم المقاوم على محور المحرك.

٣- عند فرملة المحرك على التضاد عند السرعة 600 r.p.m والتيار $I_a = 50$ A، حدد قيمة المقاومة الواجب اضافتها إلى دارة المتحرض وكذلك العزم الذي سيظهر على محور المحرك. حدد أيضاً القدرة المستجرة من الشبكة وكذلك القدرة الخارجة من محور المحرك، والقدرة الضائعة في مقاومات دارة المتحرض.

٤- حدد سرعة دوران المحرك عند فرملته بإعادة القدرة إلى الشبكة الكهربائية عندما يكون تيار المتحرض $I_a = 60$ A ومن دون إضافة أي مقاومة إلى دارة المتحرض.

الحل :

١- باعتبار أن تيار التهييج وتيار المتحرض ثابتان لذلك لابد من اضافة مقاومة على التسلسل مع المتحرض كي تصبح السرعة مساوية إلى 500 r.p.m، نحدد قيمتها كما يأتي :
نحسب أولاً الثابت الكهربائي C :

$$C = \frac{V_n - I_n.R_a}{n_n} = \frac{440 - 76 * 0{,}384}{1000} = 0{,}411\ V/r.p.m$$

$$500 = \frac{V - I_n.(R_a + R_r)}{C} \rightarrow\ R_r = 2{,}7\ \Omega$$

٢- عند الفرملة الديناميكية (V=0)

$$R_D = \frac{n.C}{I_a} - R_a = \frac{500 * (0{,}411)}{76} = 2{,}32\ \Omega$$

- عزم المحرك الكهرومغناطيسي المتحرض عند التيار الاسمي :

$$T_a = C_m.\phi.I_a$$

$$T_a = \frac{60}{\pi}.C_e.\phi.I_a = 9{,}55.C.I_a = 3{,}925 * (76)$$

$$T_a = 298{,}3\ N.m$$

ومنه فإن العزم الاسمي على محور المحرك يكون :

$$T_n = \frac{9{,}55P_n * 10^3}{n_n} = \frac{9{,}55 * (29) * 10^3}{1000} = 277\ N.m$$

- العزم الضائع على فراغ هو :

$$T_{LOSS} = 298{,}3 - 277 = 21{,}3\ N.m$$

- العزم المقاوم على محور المحرك لحظة الفرملة الديناميكية :

$$T = T_{LOSS} + T_a = 298 + 21{,}3 = 319{,}3\ N.m$$

٣- مقاومة الفرملة على التضاد (عكس اتجاه التيار) :

$$R_P = \frac{V_n + C_e.n}{I_a} - R_a = \frac{440 + 0{,}411 * (600)}{76} - 0{,}384$$

$$R_P = 13{,}348\ \Omega$$

- عزم المحرك الكهرومغناطيسي لحظة الفرملة على التضاد :

$$T_P = \frac{60}{\pi}.C_e.\phi.I_a = 3{,}925 * (50) = 196\ N.m$$

- العزم على محور المحرك لحظة الفرملة على التضاد :

$$T = T_P + T_{LOSS} = 196 + 21{,}3 = 217{,}3\ N.m$$

- القدرة المستجرة من الشبكة الكهربائية عند الفرملة على التضاد :

$$P_P = V_n.I_P = 440 * (50) = 22000\ W = 22\ KW$$

- القدرة الكهربائية الضائعة في مقاومات دارة المتحرض والفرملة على التضاد :

$$P_a + P_P = I^2.R_T = (50)^2 * 13{,}732 = 34300\ W = 34{,}3\ KW$$

- القدرة الميكانيكية المقدمة من محور المحرك مع اهمال الضياعات على فراغ :

$$P_m = 34{,}3 - 22 = 12{,}3\ KW$$

٤- الفرملة بإعادة القدرة إلى الشبكة الكهربائية :

- سرعة المحرك المساعد :

$$n = \frac{V_n}{C} + \frac{I_a . R_a}{C} = \frac{440}{0{,}411} + \frac{60 * (0{,}384)}{0{,}411}$$

$$n = 1127\ r.p.m$$

مثال ٤-٥- محرك تيار مستمر ذو تهييج تفرعي 500V مردوده 85% يشغل رافعة مردودها 70%، أحسب التيار الذي يسحبه المحرك من منبع التغذية ليرفع حمولة قدرها 500kg بسرعة 3 m/s.
إذا استخدمت فرملة ديناميكية ماهي قيمة المقاومة الواجب ربطها مع دارة المتحرض لتخفيض الحمولة عند نفس السرعة ؟

الحل :

- استطاعة خرج الرافعة :

$$\mathrm{T}_a = (500) * (9{,}81) * (3) = 14715\ W$$

- استطاعة دخل المحرك :

$$\mathrm{P}_m = \frac{14715}{0{,}85 * (0{,}7)} = 24730\ W$$

- التيار الذي يسحبه المحرك :

$$\mathrm{I} = \frac{24730}{500} = 49{,}46\ A$$

عند تطبيق فرملة ديناميكية سيعمل المحرك كمولد، وستقوم الحمولة بتدوير المولد. في هذه الحالة تكون استطاعة خرج المولد :

$$\mathrm{P}_g = (500) * (9{,}81) * (3) * (0.85) * (0.7) = 8754\ W$$

إذا أهملنا مقاومة المتحرض ستكون القوة المحركة المتولدة هي نفسها القوة المحركة العكسية عند العمل كمحرك، لذلك سيكون تيار المولدة عند بدء الفرملة الديناميكية :

$$I_g = \frac{8754}{500} = 17{,}508\ A$$

وتكون قيمة مقاومة الفرملة :

$$R_b = \frac{500}{17{,}508} = 28{,}56\ \Omega.$$

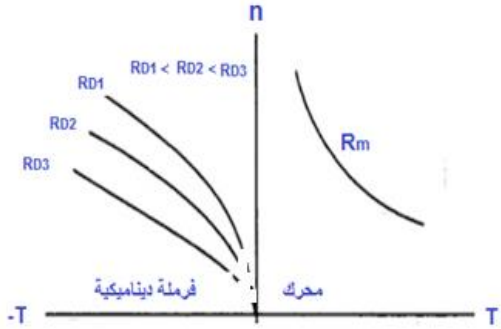
فرملة المحركات المستمرة التسلسلية :

١- الفرملة الديناميكية : Dynamic Braking

بالطريقة نفسها التي تتم فيها فرملة المحرك المستمر التفرعي تتم فيها فرملة المحرك المستمر، وذلك بفصل دارة المتحرض عن التغذية الكهربائية وقصرها عبر مقاومة ندعوها بمقاومة الفرملة الديناميكية (R_D)، مع الاستمرار بتغذية ملف التهييج. يمكننا القول بأن الفرملة الديناميكية في المحركات المستمرة التسلسلية يتحقق بطريقتين: الطريقة الأولى هي طريقة الفرملة بالتهييج الذاتي والطريقة الثانية هي طريقة الفرملة بالتهييج المستقل.

١-١- الفرملة الديناميكية بالتهييج الذاتي :

في هذه الطريق يتم فصل التغذية عن ملفي المتحرض والتهييج معاً ووصلهما إلى مقاومة الفرملة الديناميكية (R_D)،



الدارة الكهربائية والمميزات الميكانيكية للمحرك التسلسلي في حالة الفرملة الديناميكية (طريقة التهييج الذاتي)

يتغير اتجاه تيار المتحرض لذلك ينتقل المحرك للعمل في الربع الثاني، وتصبح المعادلة العامة المميزة الكهروميكانيكية من الشكل :

$$n = -\frac{(R_m + R_D)}{C_e.\phi}.\mathrm{I} \qquad (١٢-٤)$$

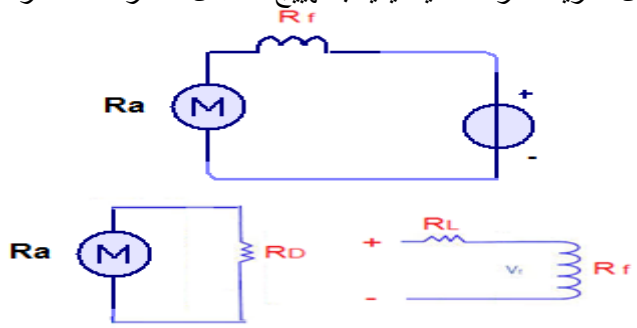
أما المميزة الميكانيكية فتصبح :

$$n = -\frac{(R_m + R_D)}{C_e.C_m.\phi^2}.\mathrm{T}_a \qquad (١٣-٤)$$

وهي عبارة عن مميزات لاخطية نظراً لتابعية الفيض للتيار الكهربائي، مع هبوط السرعة تقل قيمة التيار I وبالتالي قيمة الفيض المغناطيسي ϕ . نلاحظ أيضاً من الشكل أن حالة الفرملة الديناميكية تكاد تتلاشى عندما تقترب سرعة المحرك من الصفر نظراً لانخفاض قيمة الفيض المغناطيسي، وتعد هذه من أكبر سيئات هذه الطريقة بالفرملة. عملية الفرملة تتم بالبداية بانحدار شديد مما يسبب قفزة حادة في قيمة عزم الفرملة وهذا قد يسبب صدمات ميكانيكية غير مرغوب بها وخاصة عند فرملة محرك ذو عطالة كبيرة، لذلك غالباً ما يتم اللجوء إلى طريقة الفرملة الديناميكية بالتهييج المستقل لفرملة المحرك المستمر.

١-٢- الفرملة الديناميكية بالتهييج المستقل :

يوضح الشكل طريقة الفرملة الديناميكية بالتهييج المستقل للمحرك المستمر التسلسلي.



دارة الفرملة الديناميكية بالتهييج المستقل للمحرك المستمر التسلسلي

في هذه الطريقة يتم فصل التغذية عن ملف المتحرض فقط و وصلها إلى مقاومة الفرملة الديناميكية R_D مع المحافظة على تغذية ملف التهييج من الشبكة الكهربائية عبر مقاومة R_L مساوية لمقاومة ملف المتحرض($R_L = R_a$)، وهذا ما يضمن خطية العلاقة بين الفيض المغناطيسي(ϕ) والتيار الكهربائي (I) القادم من الشبكة. سيتغير اتجاه التيار في المتحرض لذلك سينتقل المحرك للعمل في الربع الثاني، وستصبح مميزاته في الربع الثاني مشابهة لتلك المميزات للمحرك المستمر المستقل أي :

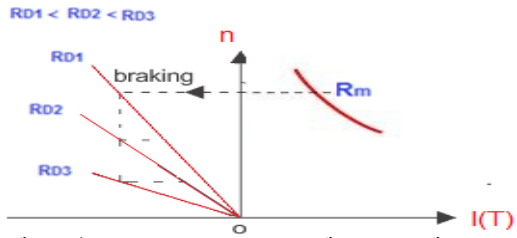
$$n = -\frac{(R_a + R_D)}{C_e.\phi}.I \qquad (١٤ - ٤)$$

وذلك للمميزة الكهروميكانيكية، أما بالنسبة للمميزة الميكانيكية فهي كالآتي :

$$n = -\frac{(R_a + R_D)}{C_e.C_m.\phi^2}.T_a \qquad (١٥ - ٤)$$

مع الملاحظة بأنه يمكن استبدال سرعة الدوران n بالسرعة الزاوية ω عل أن نستبدل الثابت الكهربائيC_e بالثابت الميكانيكي C_m في المعادلات السابقة.

يبين الشكل المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهييج التسلسلي عند فرملتها ديناميكياً وبتهييج مستقل. نلاحظ بأن المميزات تزداد ليونة مع زيادة قيمة مقاومة الفرملة الديناميكية R_D.



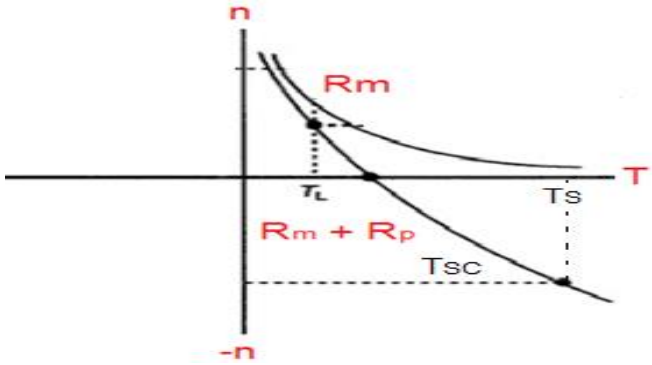
المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحرك المستمر التسلسلي في حالة الفرملة الديناميكية (طريقة التهييج المستقل)

الفرملة بالتوصيل على التضاد :

يمكن تحقيق هذا النوع من الفرملة بإحدى طريقتين: إما بزيادة الحمولة أو بطريقة عكس اتجاه تيار التغذية.

١ـ الفرملة بزيادة الحمولة :

يتحقق هذا النمط من الفرملة عندما يكون عزم الحمولة المطبق (T_s) أكبر من عزم دارة قصر المحرك (T_{sc})، سينتقل عندها المحرك للعمل على امتداد مميزاته في الربع الرابع كما هو موضح في الشكل، و يتحقق ذلك عند انزال حمولات كبيرة بسرعات منخفضة. في هذه الحالة سيسعى المحرك لرفع الحمولة المطبقة على محوره بينما ينزل الحمل تحت تأثير ثقله وبسرعة معاكسة لسرعة دوران المحرك الأصلية. تتحدد قيمة السرعة بقيمة مقاومة الفرملة على التضاد (R_P).

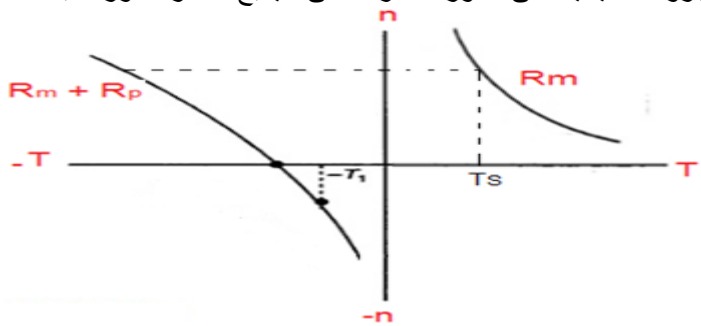


الفرملة بالتوصيل على التضاد (الكبح بزيادة الحمولة)

ـ٢ـ الفرملة بعكس جهة التيار :

تتحقق عند عكس اتجاه جهد التغذية كما يوضح الشكل، مع مراعاة إضافة مقاومة خارجية على التسلسل مع دارة المحرك تدعى مقاومة الفرملة على التضاد (R_P)، وذلك للحماية من التيارات العالية أثناء عملية الفرملة.

المحرك سينتقل للعمل على امتداد مميزاته في الربع الثاني ثم تمتد تلك المميزات حتى الربع الثالث، كما هو مبين في الشكل. التيار والعزم يعكسان اشارتهما وتقفز قيمتهما فجأة إلى الربع الثاني حيث تتحدد بمقاومة الفرملة على التضاد (R_P). تبدأ السرعة بالهبوط حتى تصل إلى الصفر، حينئذ تطبق الفرامل الميكانيكية أو الكهرومغناطيسية على محور المحرك حتى لايتابع المحرك دورانه بالاتجاه المعاكس.



المميزات الميكانيكية للمحرك التسلسلي في حالة الفرملة بعكس التيار

مثال ٤-٦- محرك تيار مستمر ذو تهييج تسلسلي يملك القيم الاسمية الآتية :

V_n=220V, P_n=17Kw, I_n=94A, n_n=630r.p.m, R_m=R_a+ R_f =0,321 Ω

والمطلوب :

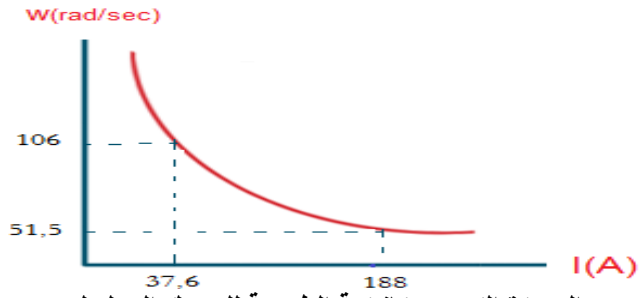
١- حدد قيمة المقاومات الاضافية في دارة المتحرض عند إنزال حمل في حالة الفرملة على التضاد عندما يكون I_P =1,5I_n، وذلك عند سرعة زاوية $\omega_1 = 20{,}9\ rad/sec$، و سرعة زاوية ثانية تساوي $\omega_2 = 41{,}8\ rad/sec$.

ثم أنشئ المميزات الموافقة لها علماً بأن مميزاته الكهروميكانيكية الطبيعية موضحة بالجدول الآتي :

I(A)	37,6	56,4	75	94	113	131	150	168	188
$\omega_n(\frac{rad}{sec})$	106	81	71,8	66	62	58,6	56	53,4	51,5

الحل :

١- بالاعتماد على الجدول السابق ننشئ المميزة الطبيعية كما هو مبين على الشكل الآتي.



المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية للمحرك التسلسلي

- من أجل I_P =1,5 I_n=141 A نستنتج أن $\omega = 56{,}5(\frac{rad}{sec})$، ومنه :

$$C_m.\phi = \frac{V - I_P.R_m}{\omega} = \frac{220 - (141 * 0{,}321)}{56{,}5}$$

$$C_m.\phi = 3{,}1\ (\frac{V.sec}{rad})$$

أما القوة المحركة الكهربائية في حالة الفرملة على التضاد وعند التيار 141 A فتساوي :

- من أجل $\omega_1 = 20{,}9\ rad/sec$:

$$E_{a1} = C_m.\phi.\omega_1 = 3{,}1 * (20{,}9) = 64{,}79\ V$$

فيكون تيار المتحرض :

$$I_P = \frac{V + E_{P1}}{R_m + R_{P1}} \rightarrow R_{P1} = \frac{V + E_{P1}}{I_P} - R_m = \frac{220 + 64{,}79}{141} - 0{,}321$$

$$R_{P1} = 1{,}69\ \Omega$$

- ومن أجل $\omega_2 = 41{,}8\ rad/sec$:

$$E_{a2} = C_m.\phi.\omega_2 = 129{,}58\ V$$

$$R_{P2} = \frac{V + E_{P2}}{I_P} - R_m = \frac{220 + 129{,}58}{141} - 0{,}321$$

$$R_{P2} = 2{,}16\ \Omega$$

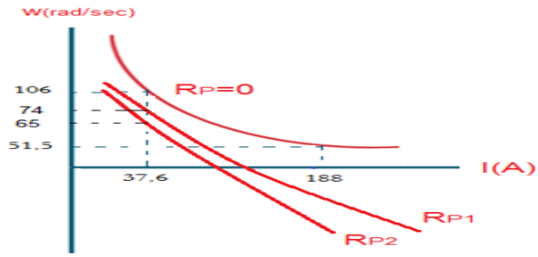
بالاعتماد على العلاقة العامة :

$$\omega = \omega_n \frac{V - I(R_m + R_P)}{V - I.R_m}$$

يمكننا أن نحسب المميزات الكهروميكانيكية الموافقة لهذه الحالة من أجل ω_1 و ω_2، ونقوم بترتيب النتائج في الجدول الآتي :

I(A)	37,6	56,4	75	94	113	131	150	168	188
$\boldsymbol{\omega_n}(\frac{rad}{\sec})$	106	81	71,8	66	62	58,6	56	53,4	51,5
$\boldsymbol{\omega_1}(\frac{rad}{\sec})$	74	43	26	10	2,7	-15	-27	-39	-52
$\boldsymbol{\omega_2}(\frac{rad}{\sec})$	65	32	12	4,15	-21	-35	-49	-65	-80

وبناءً عليه يمكننا رسم المميزة الكهروميكانيكية للمحرك في حالة الفرملة على التضاد كما هو موضح بالشكل الآتي :



التحكم بسرعة محركات التيار المستمر التفرعية

بشكل عام تعطى سرعة محركات التيار المستمر بالعلاقة الآتية :

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

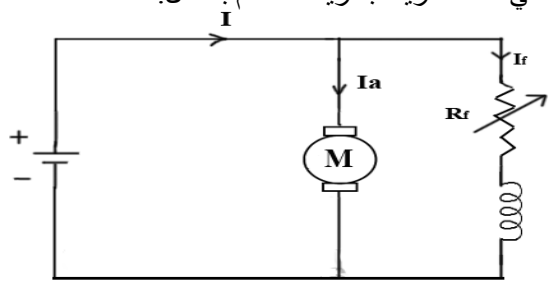
إن سرعة المحرك المستمر تتغير بتغير أي متحول في المعادلة السابقة، وبناءً عليه فإن سرعة المحرك المستمر التفرعي يمكن التحكم بها بإحدى الطرق الآتية :

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.

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.



: 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 :

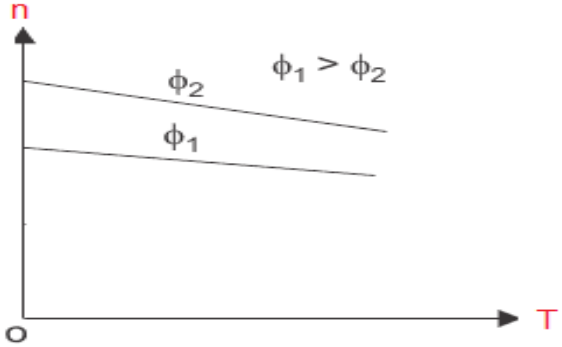
$$E_{a2} = 0{,}99.E_{a1} = 242{,}55\ V$$

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.

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.



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

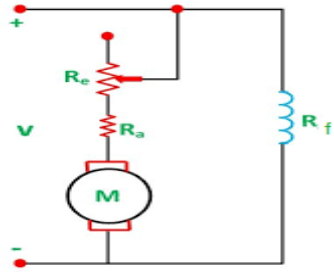
ضيقة، وهذا ما يفرض علينا بأن يتم إقلاع المحرك المستمر بتيار تهييج كامل (اسمي) ومن ثم يتم تخفيض الحقل بزيادة مقاومة الحقل.

- **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).



التحكم بسرعة المحرك التفرعي بوساطة تغيير مقاومة دارة المتحرض

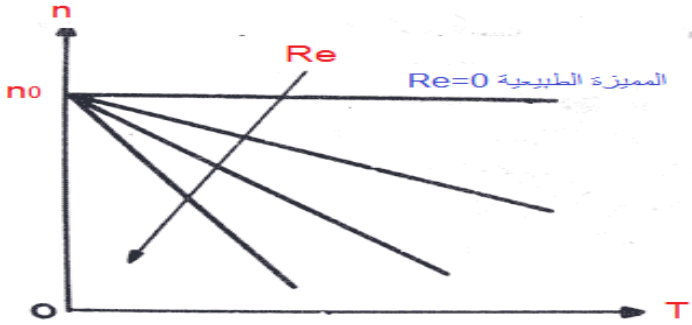
إن زيادة مقاومة دارة المتحرض ستخفض الجهد على طرفي المتحرض، مما يسبب بالنتيجة انخفاض بسرعة المحرك. لذلك نلجأ لهذه الطريقة عندما نريد الحصول على سرعات أقل من السرعة الاسمية للمحرك.

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.

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.



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.

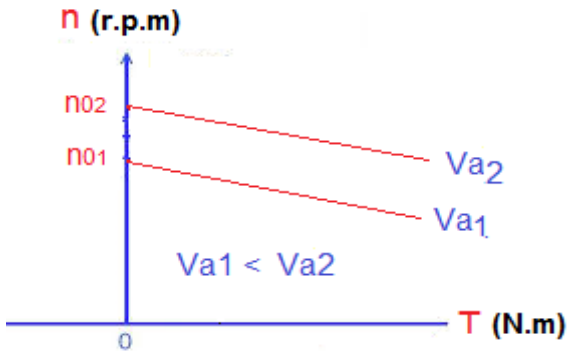
٥- صعوبة الحصول على تحكم دون قفزات في السرعة عند الاستطاعات العالية.

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.



المميزة الميكانيكية للمحرك المستمر التفرعي عند تغير الجهد

مقارنة بين طرق التحكم بالسرعة السابقة :

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.

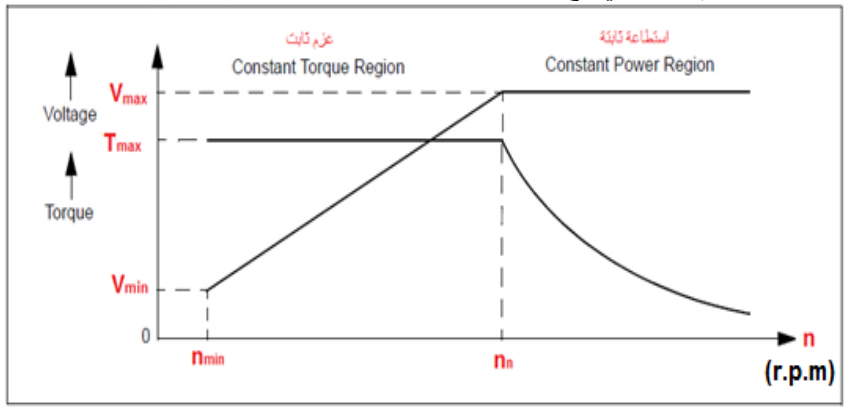
عند التحكم بجهد المتحرض فإن الفيض المغناطيسي في المحرك يبقى ثابتاً باعتبار أن جهد تهييج الآلة يبقى ثابتاً، وبالتالي فإن العزم الأعظمي للمحرك يبقى ثابتاً على الرغم من تغير سرعة المحرك:

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

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.



تغيرات العزم والاستطاع