فرملة المحركات المتناوبة

A.C Motors Braking

٧-١- مقدمة : Introduction

بشكل مشابه للمحرك المستمر فإن الآلات الكهربائية المتناوبة إضافة لعملها في نظام العمل كمحرك يمكن أن تعمل في أنظمة الفرملة (الكبح) المختلفة وهي :

١- الفرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة الكهربائية.

٢- الفرملة بالتوصيل على التضاد (الكبح بعكس التيار).

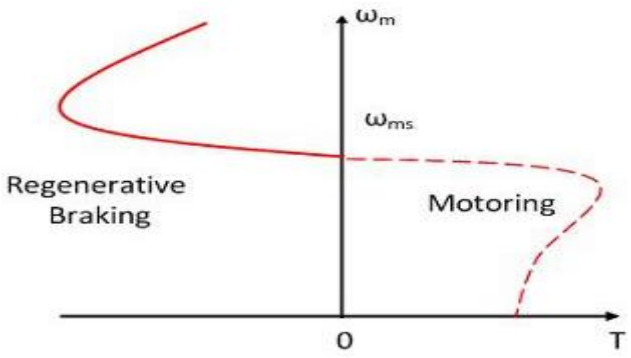
٣- الفرملة الديناميكية.

٧-٢- فرملة المحركات التحريضية : Induction Motor Braking

٧-٢-١- الفرملة بإعادة القدرة إلى الشبكة الكهربائية المغذية :

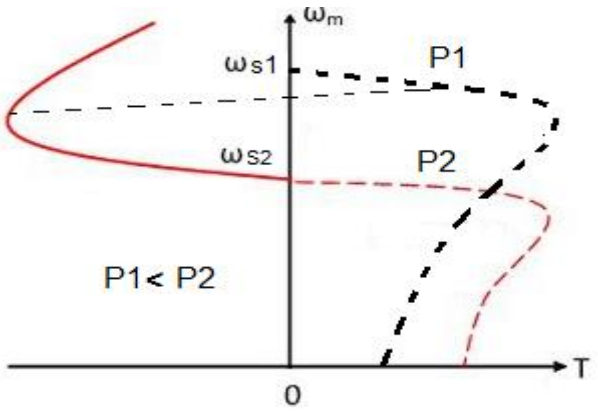
يمكن فرملة المحرك التحريضي ثلاثي الطور بإعادة قدرته إلى الشبكة الكهربائية عندما تتجاوز سرعته قيمة السرعة التزامنية، الحقل الدائر سيعكس اتجاهه مما يؤدي إلى عكس اتجاه القوة المحركة الكهربائية وعكس اتجاه التيار في الدائر ومركبات تيار الثابت، و يبق المحرك متصلاً مع الشبكة لتتمكن الاستطاعة من العودة إليها. يوضح الشكل (٧-١) المميزات الطبيعية للسرعة مع العزم في الحالة الطبيعية وعند الفرملة بإعادة القدرة. عند زيادة سرعة الدائر لتكون أعلى من السرعة التزامنية سيعمل المحرك بانزلاق سالب ويقوم بدور مولدة تحريضية موصولة على التفرع مع الشبكة. سيعيد المحرك إذاً طاقته الميكانيكية إلى الشبكة المغذية على شكل طاقة كهربائية وتقوم الشبكة بدورها بتغطية المفاقيد الردية في ثابت المحرك واللازمة لإنتاج ساحته المغناطيسية.

عند تغيير تردد المنبع نستطيع أيضاً إنجاز الفرملة مع إعادة التوليد من أجل السرعات الأقل من سرعة تواقت المحرك.



الشكل (٧-١): الفرملة بإعادة القدرة إلى الشبكة بزيادة سرعة المحرك فوق السرعة التزامنية

سينتقل المحرك للعمل في هذه الحالة على امتداد مميزاته في الربع الثاني وذلك استناداً إلى معادلات مميزاته الميكانيكية عند عمله كمولدة. يمكن تحقيق هذه الحالة عند انزال حمل ما على دوار المحرك بحيث يعطي هذا الحمل تحت تأثير ثقله سرعة للمحرك أعلى من سرعة تواقته. كما يمكن تخفيض سرعة المحرك بشكل مفاجئ بتغيير عدد أقطابه (زيادتها)، في هذه الحالة ستنخفض سرعة الساحة المغناطيسية مباشرة بينما تبقى سرعة المحرك الميكانيكية عالية وتنقص بعدها بالتدريج حتى تستقر عند نقطة تلاقي المميزات الجديدة مع مميزات عزم الحمولة في الربع الأول كما يوضح الشكل (٧-٢). هذه الحالة يمكن تحقيقها في المحركات التي تقود آلات الرفع وآلات قطع المعادن والتي يتم تخفيض سرعتها بزيادة عدد أقطابها، سينتقل المحرك للعمل في الربع الثاني من مميزاته، و خلال فترة عمله في الربع الثاني سيكون في حالة الفرملة (إعادة القدرة إلى الشبكة)، و يتم بعدها الانتقال إلى السرعة الجديدة في الربع الأول خلال الحالة العابرة من دون ضياعات حرارية، مع الاستفادة من الطاقة الكهربائية المعادة إلى الشبكة. لذلك يعد هذا النوع من الفرملة الأكثر اقتصاديةً بالمقارنة مع بقية الأنواع.



الشكل (٧-٢): الفرملة بإعادة القدرة إلى الشبكة عن طريق تغيير عدد الأقطاب

مثال ٧-١- محرك تحريضي ثلاثي الطور له 6 أقطاب يعمل بتوتر 400 V وتردد 50 Hz، موصول بشكل نجمي فيه :$R_1=R'_2=1\ \Omega$ و $X_1=X'_2=2\ \Omega$. يراد فرملة هذا المحرك بإعادة القدرة أحسب:

١- العزم الأعظمي ومجال تنظيم السرعة.

٢- سرعة المحرك عند عزم 100 N.m.

٣- عزم المحرك الأعظمي عند وصل ممانعة ردية(سعوية) قيمتها $2\ \Omega$ في كل طور من أطوار الثابت :

الحل :

١- نحسب أولاً سرعة التواقت من العلاقة :

$$n_1 = \frac{120.f}{p} = 1000\ r.p.m$$

فتكون السرعة الزاوية للمحرك :

$$\omega_1 = \frac{2.\pi.n_1}{60} = 104{,}72\ rad/sec$$

نحسب الانزلاق :

$$s_{cr} = -\frac{R_2}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (4)^2}} = -0{,}242$$

نحسب تيار الدوار :

$$I_2' = \frac{V_\phi}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(1 - \frac{1}{0.242})^2 + (4)^2}} = 45{,}5\ A$$

فيكون عزم المحرك الأعظمي :

$$T_{max} = \frac{3.I_2'^2.R_2'}{s.\omega_1} = \frac{3.(45.5)^2.(1)}{-0{,}242.(104.72)} = -244.5\ N.m$$

أما السرعة فهي :

$$(1 + 0.242).(1000) = 1242\ r.p.m$$

٢- من أجل $T_L = 100\ N.m$ نحسب السرعة التي يكون عندها التشغيل مستقراً.

$$T_L = \frac{3V^2.\frac{R_2'}{s}}{\omega_1[(R_1+\frac{R_2'}{s})^2+(X_1+X_2')^2]}$$

$$-100 = \frac{3(\frac{400}{\sqrt{3}})^2.\frac{1}{s}}{104{,}72[(1+\frac{1}{s})^2+(4)^2]}$$

حل هذه المعادلة والذي يكون عندها التشغيل مستقر هو $s = -0{,}063$، في هذه الحالة تكون سرعة المحرك :

$$n_m = (1-s)n_s = 1.063.(1000) = 1063\ r.p.m$$

٣- نحسب الانزلاق عند إضافة المكثفات :

$$s_{cr} = -\frac{R_2}{\sqrt{(R_1)^2+(X_1+X_2'+X_c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(4-2)^2}} = -0{,}447$$

نحسب تيار الدوار المنسوب إلى الثابت :

$$I_2' = \frac{V_\phi}{\sqrt{(R_1+\frac{R_2'}{s})^2+(X_1+X_2')^2}} = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(1-\frac{1}{0{,}447})^2+(4)^2}} = 98{,}2\ A$$

والعزم الأعظمي :

$$T'_{max} = \frac{3.I_2'^2.R_2'}{s.\omega_1} = \frac{3.(98{,}2)^2.(1)}{-0{,}447.(104{,}72)} = -618\ N.m$$

فتكون نسبة العزمين :

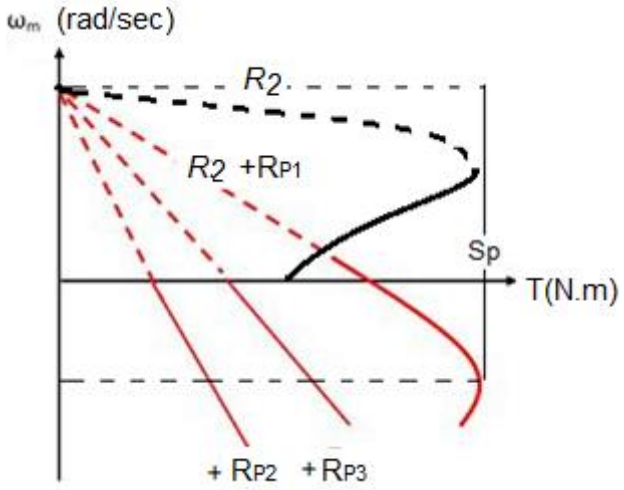
$$\frac{T'_{max}}{T_{max}} = \frac{-618}{-244.5} = 2{,}53$$

وهذا يعني أن اضافة المكثفات ساعدت على زيادة عزم المحرك.

٧-٢-٢- الفرملة بالتوصيل على التضاد (عكس التيار) :

يتم تحقيق هذا النوع من الفرملة عند دوران الحقل المغناطيسي للمحرك في الثغرة الهوائية بعكس اتجاه دوران الدائر (أي بزيادة الحمولة على محوره)، وبالتالي سينتقل المحرك للعمل على امتداد مميزاته في

الربع الرابع. هذا النوع من الفرملة يمكن تحقيقه عن طريق الحمولة نفسها والتي تمثل قوى خارجية معاكسة لاتجاه دوران المحرك، أي انزال حمولة بالاتجاه المعاكس لاتجاه الدوران. هذه الطريقة غالباً ما يتم استعمالها في المناجم وذلك لرفع حمولات كبيرة تصل لأطنان عدة. قيمة تيار الدائر في هذه الحالة ستصل إلى أكثر من خمسة أضعاف قيمة التيار الاسمي وسطياً وذلك عندما يكون الانزلاق مساوياً للواحد، وتزداد هذه القيمة كلما ازدادت قيمة الانزلاق، بينما ينقص العزم مع زيادة الانزلاق عن الواحد، كما أن المحرك في هذه الحالة سيعمل على الجزء اللاخطي من مميزاته. لجعل المحرك يعمل ضمن مجاله الخطي لابد من إضافة مقاومة إلى ملفات الدائر والتي نسميها مقاومة الفرملة على التضاد (R_P). يبين الشكل (٧-٣) المميزات الميكانيكية الموافقة لحالة الفرملة هذه وذلك بعد إضافة مقاومة أومية خارجية إلى الدائر.



الشكل (٧-٣): المميزات الميكانيكية للمحرك أثناء الفرملة بزيادة الحمولة

يمكن حساب مقاومة الفرملة على التضاد من التحليل الآتي: من أجل العزم الاسمي للمحرك (T_n) فإن نسبة الانزلاق على المميزة الاصطناعية (s_P) إلى الإنزلاق على المميزة الطبيعية (s_{nat}) تساوي نسبة المقاومتين ($R_2 + R_P$) الموافقة للمميزة الاصطناعية للمحرك إلى مقاومة الدائر R_2 الموافقة للمميزة الطبيعية، أي :

$$\frac{s_P}{s_{nat}} = \frac{(R_2 + R_P)}{R_2} \qquad (١ - ٧)$$

ومنه :

$$R_P = R_2 . \frac{s_P - s_{nat}}{s_{nat}} \qquad (٢ - ٧)$$

(s_P) يمثل الانزلاق على المميزة الاصطناعية في حالة الفرملة على التضاد، والمقابل للسرعة ($-\omega_1$).

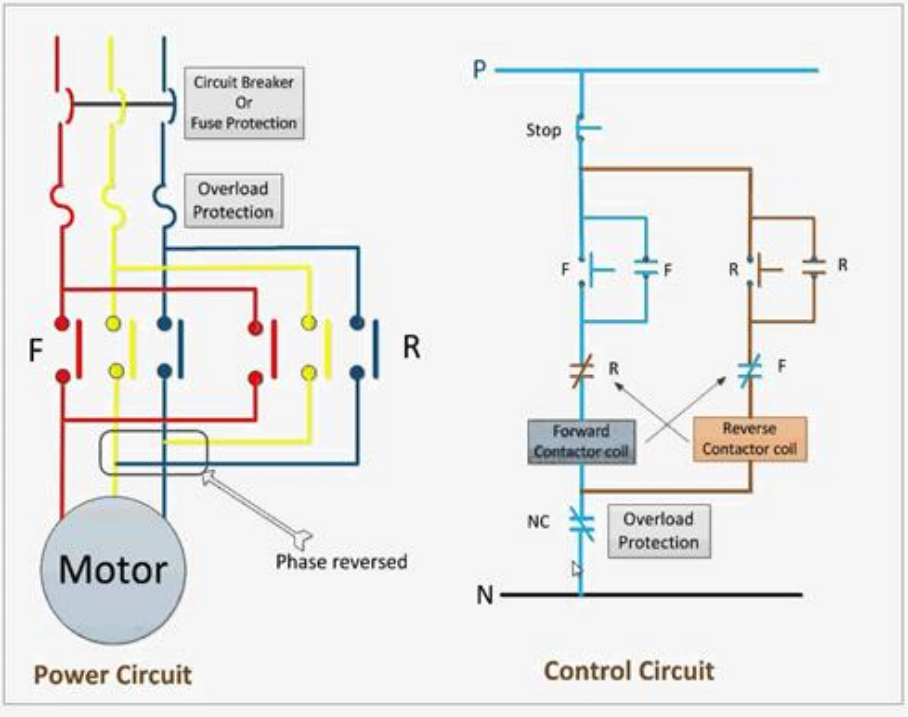
كما أن هناك طريقة أخرى لفرملة المحرك التحريضي ثلاثي الطور في حالة الفرملة على التضاد وهي عبارة عن عكس اتجاه طورين من أطوار الثابت، هذه الحالة تقابل حالة عكس اتجاه حركة المحرك. ستنشأ ساحة مغناطيسية تدور بعكس اتجاه دوران دوار المحرك، وسيتولد عزم مضاد لعزم دورانه السابق. سينتقل المحرك مباشرة ليعمل على امتداد مميزاته في الربع الثاني، ثم تبدأ سرعته بالانخفاض باتجاه الربع الثالث، ولكن عند وصولها للصفر سيتم تدخل الكوابح الميكانيكية أو الكهرطيسية.

باعتبار أن عكس الأطوار سيؤدي إلى عكس اتجاه الفيض المغناطيسي للدوار سيأخذ الانزلاق قيمة جديدة لحظية تساوي :

$$s_P = \frac{-n_1 - n_m}{-n_1} \qquad (٣-٧)$$

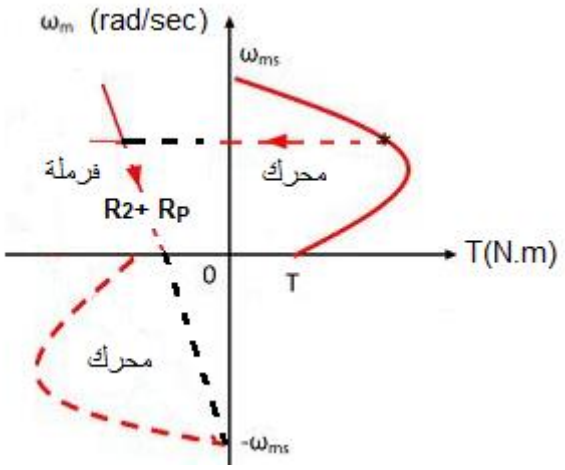
في اللحظة الأولى للفرملة بعكس التوصيلات قد يصل الانزلاق إلى القيمة 2، والجهد المتولد في الدوار سيتضاعف مرتين عن قيمته عند السرعة صفر، ويزداد التيار بشكل كبير على الرغم من انخفاض العزم.

يوضح الشكل (٧-٤) دارة القدرة والتحكم المستخدمة لعكس اتجاه دوران محرك تحريضي ثلاثي الطور عن طريق تبديل طورين من أطوار الثابت، حيث نحتاج إلى كونتاكتورين: الأول (F) لحركة المحرك بالاتجاه الأمامي والثاني (R) لعكس اتجاه سرعة الدوران.



الشكل (٧-٤): دارة القدرة والتحكم المستخدمة لعكس اتجاه سرعة المحرك التحريضي

هذه الطريقة في الفرملة تتميز بالسرعة، إلا أن تيار المحرك أثناء الفرملة سيزداد بشكل كبير (أكبر من قيمة تيار الإقلاع)، وهذا ما يستدعي إضافة مقاومة ندعوها بمقاومة الفرملة على التضاد R_P وذلك للحد من قيمة تيار الكبح إلى قيمة قريبة من قيمة التيار الاسمي، كما أنها تزيد من عزم المحرك. بطريقة عكس التوصيلات هذه إذا لم يتم إيقاف المحرك عند السرعة صفر سيدور المحرك بالاتجاه المعاكس كما يوضح الشكل (٧-٥)، وينتقل للعمل في الربع الثالث وتزداد سرعته وخاصة بعد فصل مقاومة الفرملة.



الشكل (٧-٥): مميزات المحرك التحريضي أثناء الفرملة بعكس التوصيلات

تستخدم مقاومة الدوار الكبيرة بحيث تملك المميزات ميلاً سالباً، وهكذا تكون القيادة بحالة استقرار. في هذه الحالة تطبق طاقة ميكانيكية على الدوار إما بوساطة حمل فعلي أو من طاقة حركية مخزنة في المحرك ومن عطالة الحمل، لتعطي طاقة كهربائية وتضيع في مقاومة الدوار.

مثال ٧-٢- يراد فرملة المحرك التحريضي في المثال السابق بطريقة عكس التوصيلات عند الحمولة الكاملة وعند سرعة 950 r.p.m، نسبة لفات الثابت إلى الدوار 2/3. أحسب ما يأتي :

١- تيار الفرملة الاولي والعزم وذلك كنسبة من قيمة التيار الاسمي.

٢- المقاومة الواجب وصلها إلى الدوار لانقاص تيار الفرملة الأعظمي إلى 1,5 مرة من التيار الاسمي ؟ وماهي قيمة عزم الفرملة الابتدائي ؟

الحل :

- نحسب الانزلاق عند الحمل الاسمي :

$$s = \frac{1000 - 950}{1000} = 0{,}05$$

- فيكون تيار الحمل الكلي عند هذا الانزلاق :

$$I'_{2full} = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(1 + \frac{1}{0{,}05})^2 + (4)^2}} = 10{,}8\ A$$

- والعزم عند الحمل الكامل :

$$T_{full} = \frac{3.(10{,}8)^2.(1)}{0{,}05.(104{,}72)} = 66{,}83\ \text{N.m}$$

عند عكس اتجاه التغذية الكهربائية ستنعكس جهة الساحة المغناطيسية مباشرة وتصبح اصطلاحياً سالبة، نحسب الانزلاق عند لحظة الفرملة :

$$s = \frac{-1000 - 950}{-1000} = 1{,}95$$

- نحسب تيار الفرملة الأولي :

$$I'_{2r} = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(1 + \frac{1}{1.95})^2 + (4)^2}} = 54\ A$$

فتكون النسبة بين تيار الفرملة والتيار الاسمي :

$$\frac{I'_{2r}}{I'_{2full}} = \frac{54}{10{,}8} = 5$$

- عزم الفرملة لحظة عكس التوصيلات :

$$T_r = \frac{3.(54)^2.1}{(1{,}95).(104{,}72)} = 42{,}84\ \text{N.m}$$

فتكون نسبة العزمين :

$$\frac{T_r}{T_{full}} = \frac{42{,}84}{66{,}83} = 0{,}64$$

نلاحظ نقصان عزم الفرملة على الرغم من ازدياد التيار.

٢- عند وصل مقاومة خارجية إلى الدوار لانقاص تيار الفرملة إلى 1,5 من قيمة التيار الاسمي تصبح علاقة التيار :

$$1{,}5.\,(10{,}8) = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(1+\frac{1+R_b}{1.95})^2 + (4)^2}} = 54$$

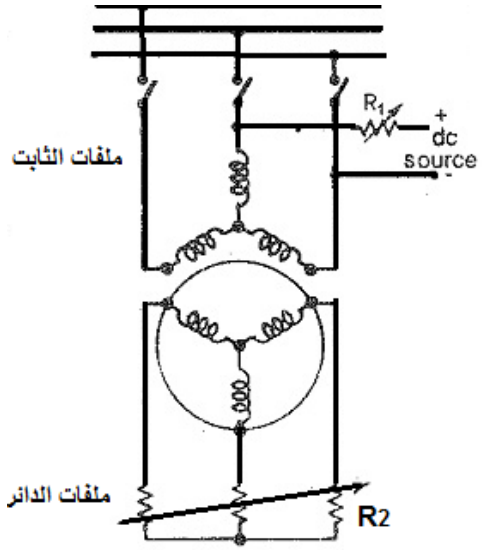
ومنه :

$$R_b = 23{,}73\ \Omega$$

نلاحظ أنه بإدخال مقاومة خارجية إلى دارة الدوار فإن تيار الفرملة قد انخفض إلى $1{,}5$ مرة من قيمة التيار الاسمي، بينما ازداد العزم إلى $1{,}43$ مرة تقريباً عن عزم الحمولة الاسمية.

٧–٢–٣– الفرملة الديناميكية :

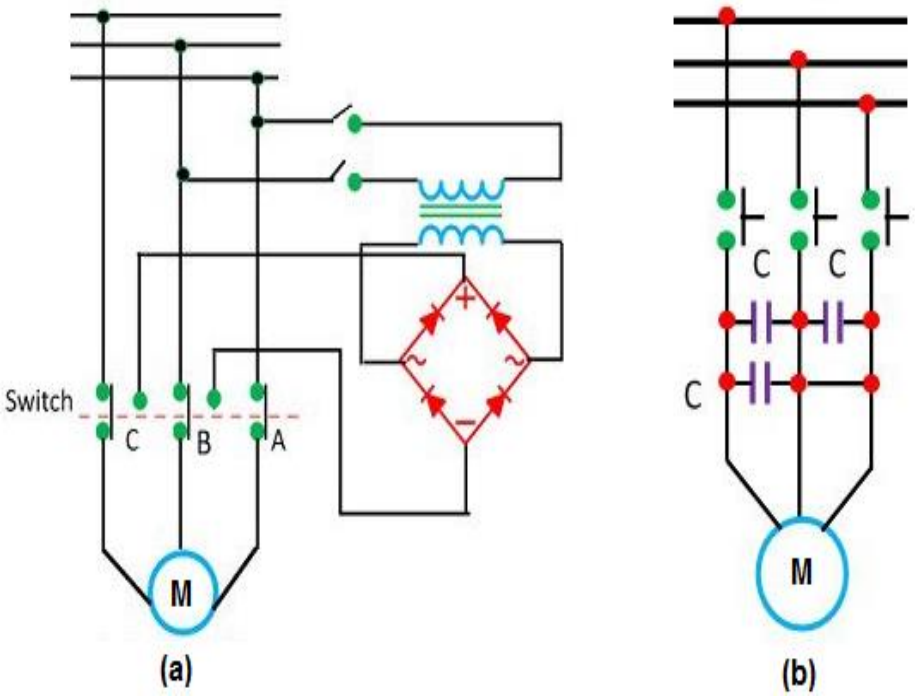
يتحقق هذا النوع من الفرملة عن طريق فصل التغذية الكهربائية عن ملفات الثابت ووصل طورين منه إلى منبع تغذية مستمر، أما ملف الدائر فيتم قصره عبر مقاومة خارجية (إذا كان المحرك ذو دائر ملفوف) ،كما هو موضح بالشكل (٧–٦).



الشكل (٧–٦): الفرملة الديناميكية للمحرك التحريضي ثلاثي الطور

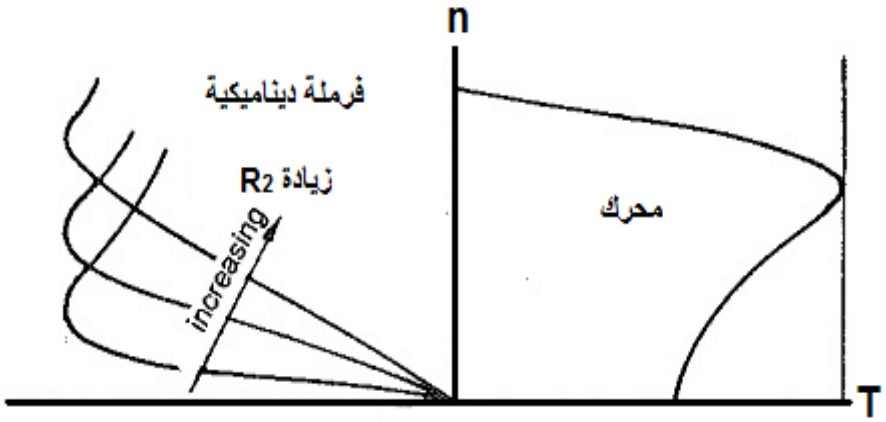
ويعود سبب تغذية ملفي الثابت بالتيار المستمر إلى أنه عند قطع التغذية الكهربائية عن ملفات الثابت ستبقى سيالة مغناطيسية صغيرة في حديد الآلة، هذه السيالة ستولد قوة محركة كهربائية صغيرة في ملفات الدائر، وسيكون التفاعل بين فيض الدائر المتحرض والفيض المتولد في الثغرة الهوائية للآلة غير كاف لإنتاج عزم كهرطيسي قادر على إيقاف المحرك مباشرة، وهذا يعني أن المحرك سيأخذ وقتاً طويلاً نسبياً ليتوقف و ذلك بسبب القدرة الحركية الكامنة للكتلة الدوارة. تغذية ملفي الثابت بالتيار المستمر سيكون من شأنه أن يزيد سيالة الآلة المغناطيسية وبالتالي إنتاج عزم فرملة كاف لإيقاف المحرك بأسرع وقت

ممكن. يمكن للتغذية المستمرة أن تأتي من الشبكة الكهربائية أو عن طريق وصل مكثفات مناسبة إلى ملفات الدائر كما يوضح الشكل (٧-٧). تسمى الحالة الأولى بالفرملة الديناميكية ذات التهييج المستقل، بينما تدعى الحالة الثانية بالفرملة الديناميكية ذات التهييج الذاتي.



الشكل (٧-٧): الفرملة الديناميكية للمحرك التحريضي (a): تهييج المستقل، (b) تهييج الذاتي.

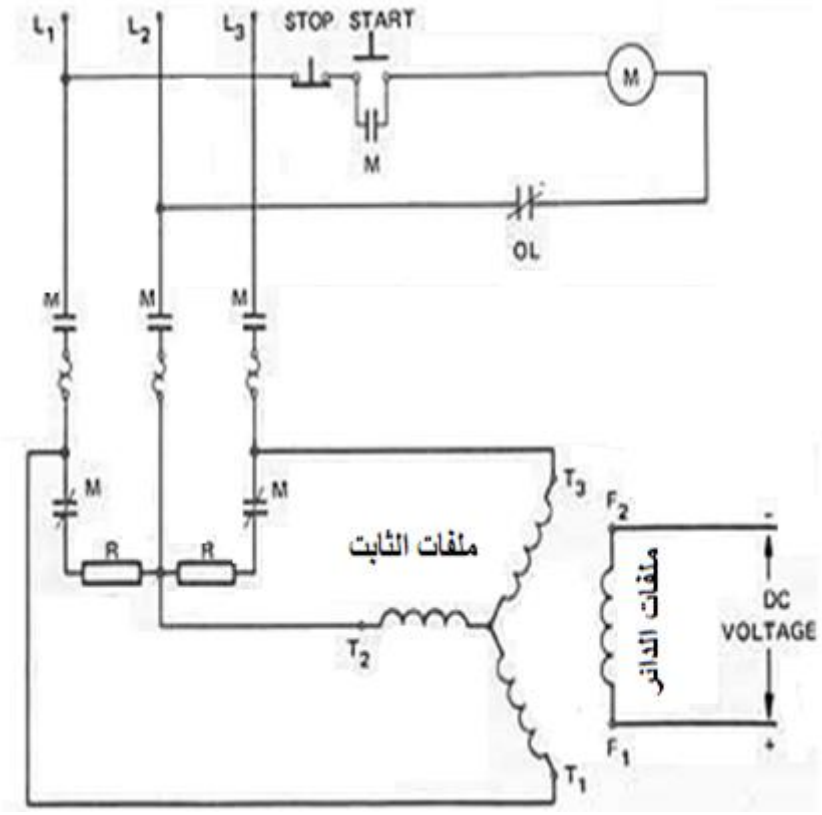
في لحظة الفرملة ينعكس العزم مباشرة بينما تبقى السرعة بالاتجاه الأمامي، ثم تبدأ بالهبوط نتيجة وجود عزم فرملة مطبق على المحور حتى وصولها للقيمة صفر، يمكن عندها إدخال المكابح الميكانيكية أو الكهرطيسية. تختلف المميزات في الربع الثاني أثناء الفرملة حسب قيمة المقاومة المضافة إلى ملفات الدائر، وهذا ما يوضحه الشكل (٧-٨).



الشكل (٧-٨): المميزات الميكانيكية للمحرك التحريضي أثناء الفرملة الديناميكية

٧-٣- فرملة المحركات المتواقتة : Synchronous Motor Braking

كما في حالة المحركات التحريضية تتم فرملة المحركات المتواقتة بطرق عدة وذلك عندما يغير عزم المحرك إشارته ويتحول من عزم محرك إلى عزم مقاوم. الفرملة بطريقة عكس التوصيلات تتم بطريقة المحركات التحريضية نفسها، أما في حال الفرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة فتتم عند زيادة سرعة المحرك لتتجاوز سرعة تواقت المحرك، حيث يعمل عندها المحرك المتواقت كمولد متواقت. تتم الفرملة الديناميكية عن طريق فصل التغذية عن المحرك ووصل مجموعة مقاومات على التسلسل مع ملفات الثابت لتتبدد استطاعة الثابت، مع بقاء التهييج مستمراً، وغالباً ما تتم فرملة المحرك المتواقت ديناميكياً حيث يعتمد زمن الفرملة على مقدار المقاومة المضافة إلى الجزء الثابت ومقدار المغناطيسية الناتجة عن تيار تهييج الجزء الدائر. عندما تحصل الآلة على تيار تهييج من مهيج موجود على محور المحرك فإن زمن الفرملة سيكون أكبر من حالة أخذ التيار المستمر من منبع مستقل، ويعود سبب ذلك إلى كون القوة المحركة الكهربائية المسببة للتهييج سوف تنخفض مع انخفاض سرعة المحرك مما يسبب ضعف تيار التهييج وبالتالي عزم الفرملة. عملياً من الصعب تحقيق الفرملة بعكس التيار بسبب حصول اضطراب عنيف في تيار الثابت مما يستوجب استعمال جهاز تحكم اضافي لفصل المحرك عند وصول سرعته إلى الصفر. يوضح الشكل (٧-٩) دارة القدرة مع التحكم بفرملة محرك متواقت ثلاثي الطور ديناميكياً.



الشكل (٧-٩): دارة القدرة و التحكم بفرملة محرك متواقت ثلاثي الطور

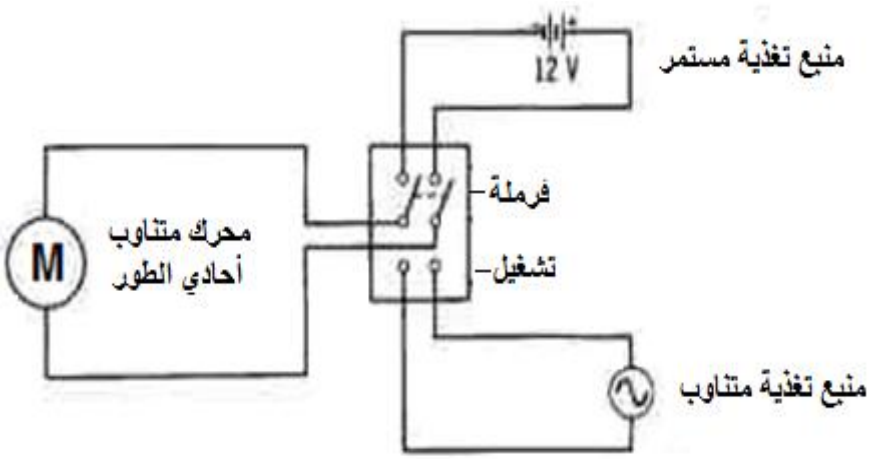
فعند الضغط على زر التشغيل Start ستغلق تماسات الكونتاكتور الرئيسي M ويدور المحرك المتواقت من دون وصل المقاومات R نتيجة فتح التماسات المغلقة طبيعياً M. عند الضغط على زر الإيقاف والفرملة Stop ستعود تماسات الكونتاكتور إلى وضعها الأصلي، وهذا يعني فصل التغذية عن ثابت المحرك ووصلها مع المقاومات R، بينما يبقى تهييج الآلة مستمراً. عندها سيتحول عمل المحرك إلى مولدة وتبدأ عملية الكبح حيث تتبدد الاستطاعة الناتجة في مقاومات الفرملة.

٧-٤- فرملة المحركات المتناوبة أحادية الطور :

Single Phase Motors Braking

نستخدم بشكل أساسي الفرملة الديناميكية لفرملة المحركات أحادية الطور، ومبدأ الفرملة هنا يكون نفسه في حالة المحركات المستمرة التسلسلية والتفرعية (قصر متحرض الدوار مع المحافظة على التهييج). تتم الفرملة في المحركات أحادية الطور بفصل التغذية المتناوبة عن الجزء الثابت واستبدالها بتغذية مستمرة، في هذه الحالة سيتحول المحرك إلى مولدة تيار مستمر ويكون دواره (المتحرض) بشكل طبيعي مقصور، وهذا من شأنه أن يخلق تيارات عالية في المتحرض تحرض بدورها فيوض عالية نسبياً في الدوار وذلك كرد فعل للفيض المستمر في الثابت. في هذه الحالة تستهلك طاقة الدوار الحركية في توليد جهد وتيار الدوار مما يؤدي إلى توقف المحرك بسرعة.

باعتبار أن أغلب التطبيقات التي تستخدم المحركات أحادية الطور لا تملك منبعاً مستمراً للتيار لذلك يتم الحصول على التيار المستمر عن طريق دارة تقويم أو بطارية، كما يوضح الشكل (٧-١٠).



الشكل (٧-١٠): طريقة الفرملة الديناميكية للمحرك المتناوب أحادي الطور

المحركات ذات الأقطاب المظللة لها ملف واحد في الثابت بينما الجزء الدائر يكون بشكل طبيعي بدارة قصر، حيث يتم إقلاعها ودورانها ببساطة عن طريق تغذية ملف الثابت، وعند فصل التغذية المتناوبة واستبدالها بتغذية مستمرة ستتم فرملة المحرك بسرعة كبيرة وفعالة.

المحركات التحريضية أحادية الطور ذات الطور المشطور يمكن أن يتم فرملتها بالطريقة نفسها، بحيث أن التيار المستمر يطبق على الملف الرئيسي أو ملف الدوران، بينما ملف الإقلاع المساعد لن يطبق عليه توتر مستمر طالما مفتاح القوة النابذة مفتوح (في حال وجوده)، لكن عند انخفاض السرعة سيطبق عليه توتر مستمر مما يؤدي إلى تسخينه. في حالة المحركات أحادية الطور ذات المكثف المؤقت فإن إعادة وصل مفتاح القوة النابذة سيؤدي إلى تطبيق توتر مستمر على ملف الإقلاع، إلا أن المكثف الموصول على التسلسل معه سيحجز هذا التيار المستمر ويمنع تسخين ملف الإقلاع.

كما يمكن فرملة المحرك التحريضي أحادي الطور بطريقة عكس التوصيلات، أي عكس اتجاه الدوران بحيث تتم فصل التغذية عن المحرك وفرملته ميكانيكياً قبل أن يعكس اتجاه دورانه. مع الملاحظة بأن المحرك أحادي الطور غير القابل لعكس اتجاه دورانه لا يمكن فرملتها بطريقة عكس التوصيلات.