

Les fiches techniques

32

Les machines tournantes Le procédé de démarrage



32 Procédé de démarrage

Le schéma équivalent proposé néglige les effets dus à l'inductance de fuite au stator, ce schéma représente une phase du moteur.

- V tension aux bornes d'un enroulement stator.
- R_1 résistance d'un enroulement stator.
- R_0 résistance représentative du stator (pertes fer).
- X_0 réactance représentative du stator.
- R_2 résistance équivalente de l'enroulement rotor.
- l_2 inductance équivalente de l'enroulement rotor.
- ω pulsation des courants statoriques.
- g glissement du rotor : $g = \Omega - \Omega' / \Omega$.
- I_1 intensité dans un enroulement stator.
- I_0 intensité à vide dans un enroulement stator.
- I'_1 intensité équivalente dans un enroulement stator.

SCHÉMA ÉQUIVALENT

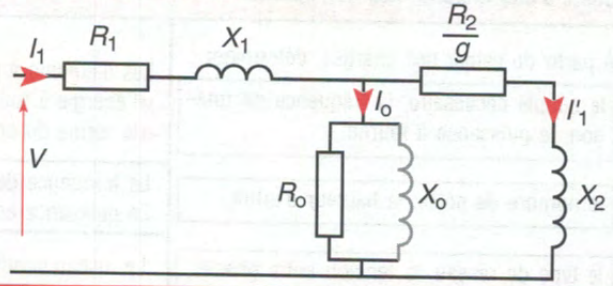
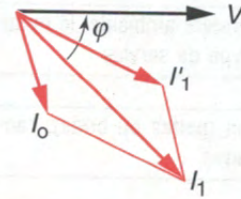


DIAGRAMME DE FRESNEL



32.1 Mesure des grandeurs

- R_1 se mesure en continu par la méthode volt-ampèremétrique.
- R_0 et X_0 se déterminent par un essai à vide, à fréquence de rotation nominale.
- R_2 et L_2 se déduisent d'un essai à tension réduite et à rotor bloqué ($\Omega' = 0$).

À vide : $P_0 = 3 V \cdot I_0 \cos \varphi_0$ et $P_0 = 3 R_0 \cdot I_0^2$

À tension réduite :

$P_{cc} = 3 V_{cc} I_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$ $P_{cc} = 3 (R_1 + R_2) I_{cc}^2$

Les pertes fer peuvent être négligées car la tension est très faible.

32.2 Simplification du schéma équivalent

La transformation du circuit parallèle en circuit série donne :

$R_0' = R_0 X_0 / (R_0^2 + X_0^2)$
 $jX_0' = jR_0^2 X_0 / (R_0^2 + X_0^2)$

Enfin, le schéma équivalent peut se ramener à un circuit simple RL dont les éléments sont :

- R résistance équivalente à R_1 , R_0' et R_2 ,
- X réactance équivalente à X_0' et $X_2 (L_2 \omega)$.

SCHÉMA ÉQUIVALENT

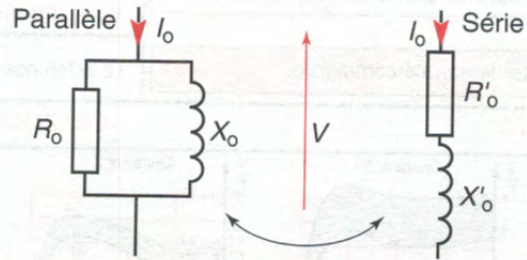
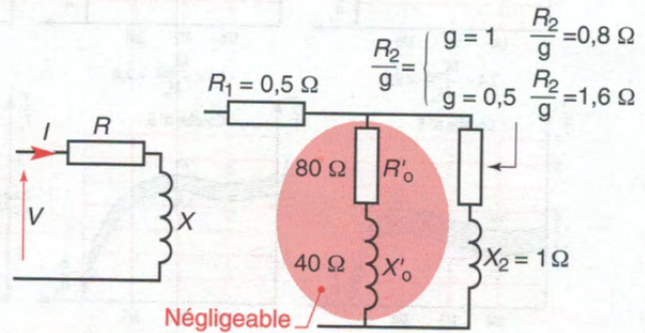
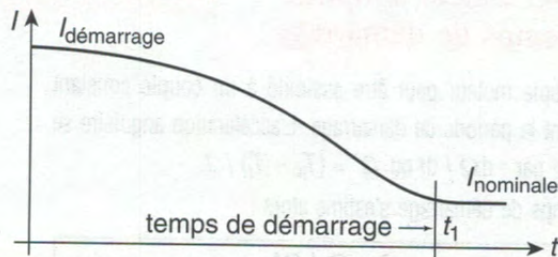


SCHÉMA SIMPLIFIÉ



ÉVOLUTION DU COURANT DE DÉMARRAGE (COUPLAGE DIRECT)

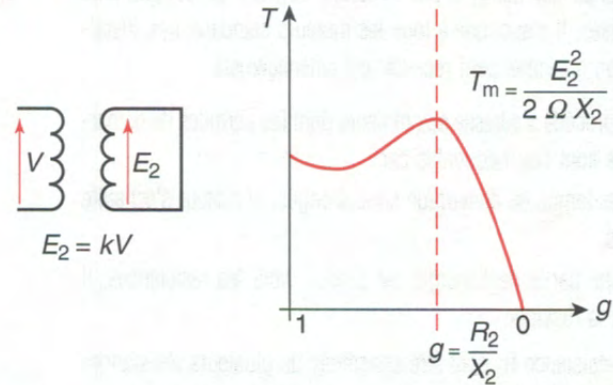


Au démarrage, $g = 1$; le moteur se comporte comme un transformateur dont l'enroulement secondaire est un court-circuit, l'intensité absorbée est grande devant l'intensité nominale du moteur. $I_d = 5 \text{ à } 8 I_n$.

Les procédés de démarrage permettent de diminuer cette intensité au démarrage afin de :

- limiter l'énergie appelée au réseau et diminuer les contraintes sur l'installation ;
- réduire les chutes de tension en ligne pour ne pas gêner les autres utilisateurs ;
- modifier le couple moteur lorsque la chaîne cinématique réclame un couple de démarrage qui varie avec l'application mécanique (couple faible ou important nécessaire au démarrage).

COUPLE MOTEUR



k est le rapport du nombre de spires du rotor divisé par le nombre de spires du stator. $k = N_R / N_S$.

32.3 Expression du couple moteur

$$T = \frac{g \cdot R_2 \cdot E_2^2}{\Omega (R_2^2 + g^2 \cdot X_2^2)} \quad T_d = \frac{R_2 \cdot E_2^2}{\Omega (R_2^2 + X_2^2)}$$

Le couple maximal dépend du rapport entre la résistance et la réactance du rotor T_m pour $g = R_2 / X_2$ a pour valeur $T_m = E_2^2 / 2 \Omega X_2$. La valeur de ce couple maximal est indépendante des éléments extérieurs au moteur.

32.4 Insertion de résistances statoriques

L'insertion de résistances additionnelles en série avec chaque enroulement limite l'intensité absorbée mais aussi le couple moteur.

Intensité par phase :

$$I = V / Z \quad Z = \sqrt{(R_a + R)^2 + X^2}$$

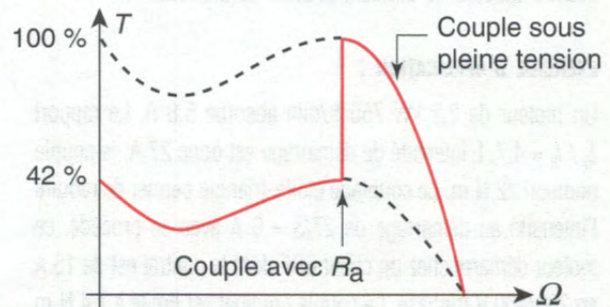
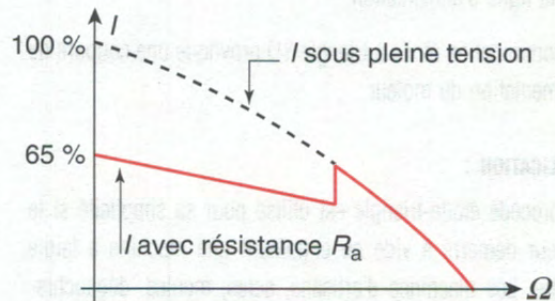
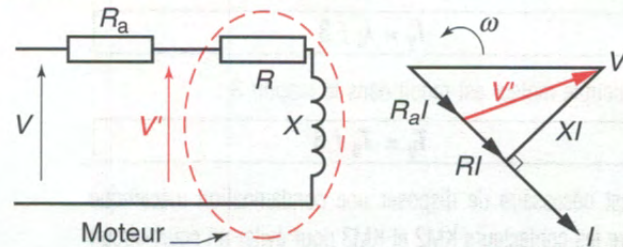
Couple moteur :

$$T' = T \cdot (V' / V)^2$$

EXERCICE D'APPLICATION :

Un moteur 2 pôles de 9 kW démarre avec une résistance de 1Ω ; l'intensité de démarrage sera 95 A, le couple moteur $T' = 0,42 T$, la tension aux bornes d'un enroulement vaut 148 V, l'intensité en direct aura été $I_d = 147$ A. Une réduction de 35 % de l'intensité provoque une réduction de 58 % du couple moteur. Le couple accélérateur est réduit. Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux chaînes cinématiques qui réclament un faible couple pendant la période de démarrage (pompes centrifuges, ventilateurs).

RÉSISTANCES STATORIQUES



Ce procédé est simple et économique à l'installation, la maintenance est facilitée par le faible nombre de constituants utilisés. Il s'applique à tous les moteurs standard, une installation ancienne peut recevoir cet aménagement.

Ce procédé s'adresse aux moteurs dont les périodes de démarrage sont peu fréquentes car :

- les temps de démarrage sont allongés, le moteur s'échauffe plus,
- une partie de l'énergie est perdue dans les résistances, il faut la dissiper.

La résistance R_a peut être constituée de plusieurs résistances en série afin de multiplier le nombre de temps de démarrage.

32.5 Couplage étoile-triangle

Le procédé de démarrage étoile-triangle est réalisé par simple couplage de ses enroulements, il n'y a donc pas de composant extérieur au moteur.

L'intensité est réduite dans le rapport 3 :

$$I_y = I_d / 3$$

Le couple moteur est réduit dans le rapport 3 :

$$T_y = T_d / 3$$

Il est nécessaire de disposer une condamnation mécanique entre les contacteurs KM2 et KM3 pour éviter un court-circuit sur la ligne d'alimentation.

La commutation étoile à triangle YD provoque une coupure de l'alimentation du moteur.

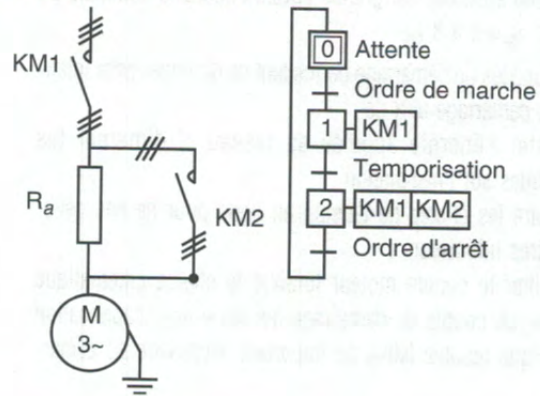
APPLICATION :

Le procédé étoile-triangle est utilisé pour sa simplicité si le moteur démarre à vide en entraînant une machine à faible inertie. Les machines d'artisans, scies, meules, dégauchisseuses, raboteuses utilisent souvent ce procédé.

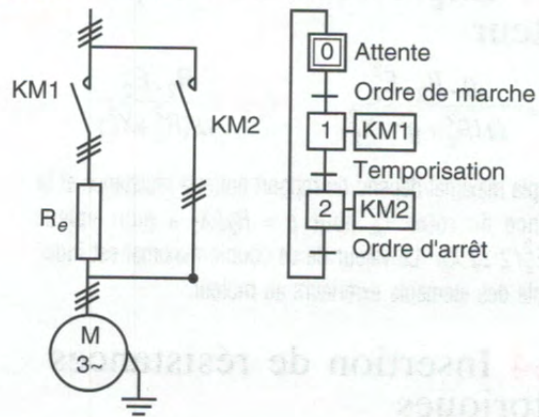
EXERCICE D'APPLICATION :

Un moteur de 2,2 kW 750 tr/min absorbe 5,8 A. Le rapport $I_d / I_n = 4,7$. L'intensité de démarrage est donc 27 A, le couple nominal 22 N.m. Le couplage étoile-triangle permet de réduire l'intensité au démarrage de $27/3 = 9$ A avec ce procédé, ce moteur démarre chez un client EDF dont le contrat est de 15 A en 230/400 V triphasé. Le couple nominal est limité à 7,4 N.m ($T/3$).

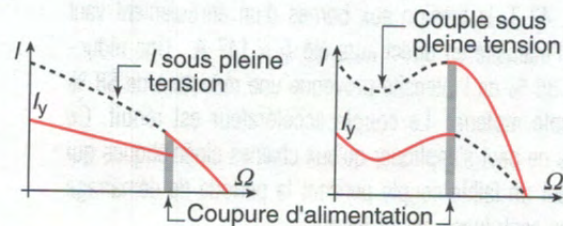
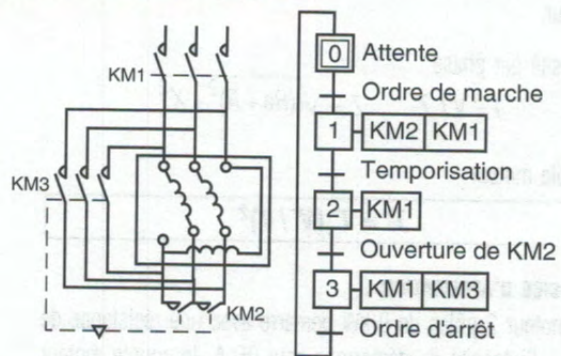
SCHÉMA DE PUISSANCE (RÉSISTANCES STATORIQUES R_a)



VARIANTE



COUPLAGE ÉTOILE-TRIANGLE



32.6 Tension réduite par auto-transformateur

À partir d'une certaine puissance, la réduction de l'intensité de démarrage est obtenue par un auto-transformateur qui adapte la tension d'alimentation du moteur.

Le coût du transformateur augmente le prix global de l'installation, ce procédé s'adresse aux fortes puissances.

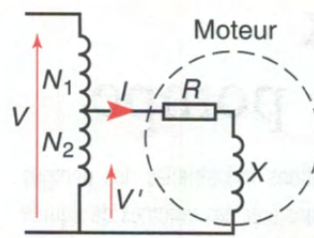
L'intensité, le couple de démarrage sont choisis par le rapport de transformation, ce procédé s'adapte à beaucoup de situations.

Les pertes Joule externes au moteur sont limitées aux pertes dans les enroulements du transformateur. Toutefois, il faut ajouter les pertes dans le circuit magnétique du transformateur.

L'inductance du transformateur réduit le facteur de puissance pendant le démarrage, ce dispositif est généralement utilisé pour les démarrages peu fréquents.

Le risque de court-circuit d'un enroulement est éliminé par un verrouillage mécanique entre les contacteurs. Le nombre de temps avec insertion d'inductance en série n'est pas limité.

L'auto-transformateur ne sert que pendant la période de démarrage, sa puissance est souvent réduite car il est éliminé dès la fin du démarrage. Son temps de fonctionnement reste court. Son refroidissement s'effectue pendant l'utilisation du moteur en couplage direct sur le réseau.



1^{er} temps : Tension réduite

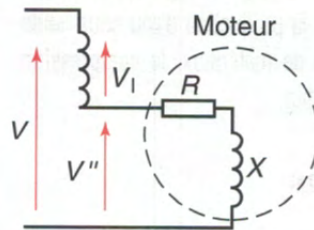
$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$k = \frac{N_2}{N_1 + N_2}$$

$$\vec{V}' = k\vec{V}$$

$$I = \frac{kV}{Z}$$

$$T' = T \left(\frac{V'}{V}\right)^2$$

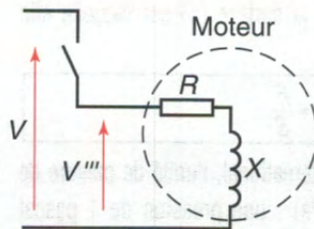


2^e temps : Insertion d'inductance

$$\vec{V}'' = \vec{V} - \vec{V}_L$$

$$I = \frac{V''}{Z}$$

$$T'' = T \left(\frac{V''}{V}\right)^2$$



3^e temps : Couplage direct

$$\vec{V}''' = \vec{V}$$

Fonctionnement du moteur sous pleine tension

