



**n° 165**

**contrôle-commande  
et protection des  
moteurs HT**

**J.Y. Blanc**

**Diplomé ingénieur SUPELEC en 1979, il entre chez Merlin Gerin en 1981 comme ingénieur d'études diélectriques Moyenne Tension. Toujours à la Division MT, il est successivement chef de projet de développement :**

- d'équipements et postes primaires de la gamme Fluair,**
- de disjoncteurs à protection intégrée SF set.**

**Actuellement il est responsable du développement des disjoncteurs et équipements primaires MT.**



# contrôle-commande et protection des moteurs HT

Dans l'industrie et le grand tertiaire, la puissance unitaire des machines tournantes dépasse souvent 100 kW ; lorsque c'est le cas et/ou si la longueur de la ligne d'alimentation est importante (chute de tension, pertes), il devient avantageux d'utiliser des moteurs haute tension.

L'objet de ce cahier technique est de faire le point sur ces moteurs, leurs systèmes de démarrage et sur les différentes protections utilisables ; ceci afin de faciliter les choix techniques.

## sommaire

<b>1. Rappels sur les différents types de moteurs à courant alternatif</b>	Moteurs asynchrones à cage	p. 4
	Moteurs asynchrones à rotor bobiné	p. 5
	Moteurs synchrones	p. 6
	Tolérances de dimensionnement	p. 7
	Tenue et essais diélectriques	p. 7
<b>2. Les procédés classiques de démarrage en HT</b>	Démarrage statorique direct sous pleine tension	p. 8
	Démarrage statorique sous tension réduite	p. 8
	Démarrage statorique avec condensateurs	p. 10
	Démarrage rotorique	p. 10
	Choix du mode de démarrage	p. 12
<b>3. Appareillage de contrôle commande</b>	Solutions électromécaniques	p. 14
	Solutions électroniques	p. 16
<b>4. Protection des moteurs HT</b>	Principaux types de défauts	p. 19
	Principes de protection	p. 19
	Evolution technologique	p. 23
<b>Annexe 1 : détermination du mode de démarrage d'un moteur</b>	Hypothèses de calcul	p. 24
	Démarche globale	p. 24
<b>Annexe 2 : coordination des protections</b>		p. 27

# 1. rappels sur les différents types de moteurs à courant alternatif

Les moteurs à courant alternatif aussi bien haute que basse tension offrent une grande variété de caractéristiques électriques, dynamiques ou technologiques. Néanmoins, mis à part un petit nombre de moteurs spécifiques à des applications particulières, un classement en trois familles peut être fait :

- moteurs asynchrones à cage,
- moteurs asynchrones à rotor bobiné,
- moteurs synchrones.

Ils se différencient, entre autres, par :

- les valeurs du couple et du courant de démarrage,
- la variation de vitesse en marche normale,
- les valeurs du facteur de puissance et du rendement en fonction de la charge.

Les moteurs HT sont alimentés sous une tension qui excède rarement 7,2 kV ; leur puissance va de 100 kW à plus de 10 MW, 800 kW étant la puissance moyenne.

Les figures 1 et 2 donnent l'allure de ces courbes, en fonction de la vitesse ( $N/N_s$ ).

A noter que :

- les moteurs à simple cage présentent un couple minimal

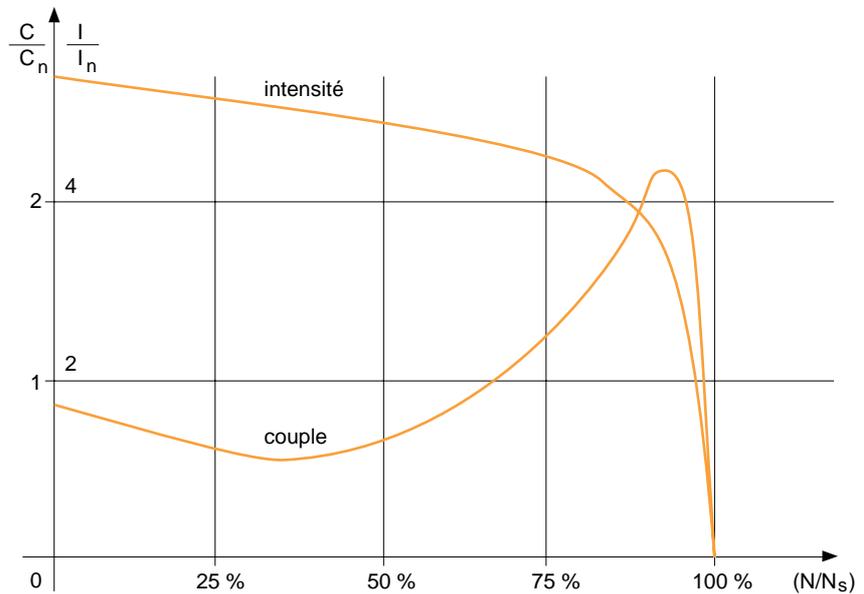


fig. 1 : courbes  $C(N)$  et  $I(N)$  d'un moteur asynchrone à simple cage.

## moteurs asynchrones à cage

Ces moteurs HT sont de deux types principaux suivant la constitution du rotor qui peut être à simple cage ou à double cage.

Ceci permet de choisir les caractéristiques de couple et d'intensité de démarrage :

- les rotors à simple cage ont :
  - un couple de démarrage relativement faible ( $0,6$  à  $1 C_n$ ),
  - un couple maximal de l'ordre de  $2$  à  $2,2 C_n$ ,
  - une intensité de démarrage variant de  $4,5$  à  $5,5 I_n$ ,
 ( $C_n$  : couple nominal,  $I_n$  : courant nominal).
- les rotors à double cage ou les rotors à encoches profondes ont :
  - un couple de démarrage légèrement plus élevé ( $0,8$  à  $1,2 C_n$ ),
  - un couple maximal de l'ordre de  $2$  à  $2,2 C_n$  (un peu plus élevé dans le cas d'encoches profondes),
  - une intensité de démarrage variant de  $5$  à  $6,5 I_n$ .

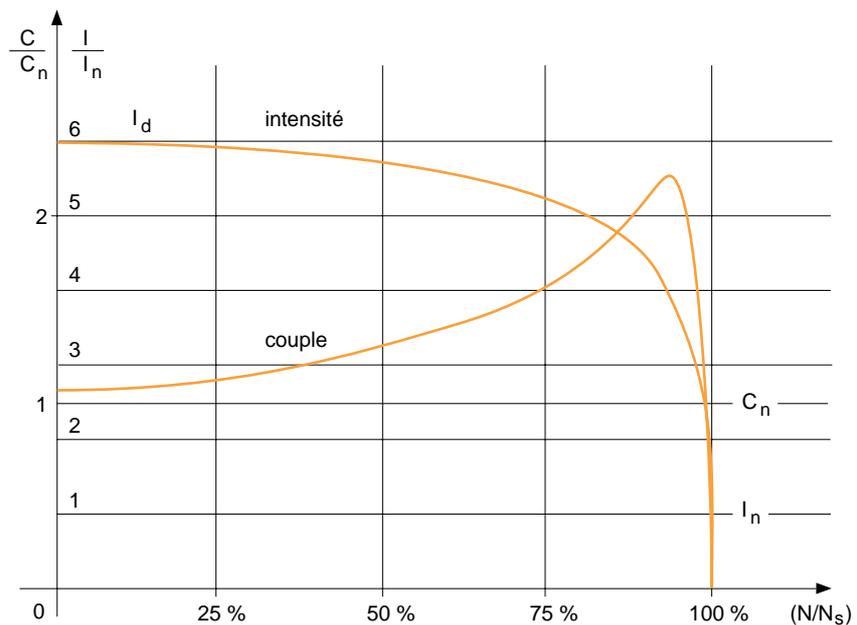


fig. 2 : courbes  $C(N)$  et  $I(N)$  d'un moteur asynchrone à double cage.

(0,5 à 0,6  $C_n$ ), alors que la courbe du couple, fonction de la vitesse des moteurs à double cage ou à encoches profondes, est continuellement croissante jusqu'au couple maximal.

- l'emploi de ces moteurs est tout indiqué pour les usages intensifs et les atmosphères dangereuses, du fait :
  - de la simplicité de conception des rotors en court-circuit qui leur confère une grande robustesse mécanique et électrique,
  - de l'absence de balais.

Ces deux particularités concourent à une maintenance des plus réduites.

Les caractéristiques de couple des moteurs asynchrones à cage sont particulièrement bien adaptées aux machines telles que : pompes centrifuges, compresseurs, groupes convertisseurs, machines-outils et ventilateurs.

Toutefois, un inconvénient inhérent à tous ces moteurs réside dans leur facteur de puissance relativement bas, de l'ordre de 0,8 à 0,9 à pleine charge, et qui décroît lorsqu'ils travaillent à faible charge (cf. fig. 3).

Si la puissance installée en moteurs asynchrones est importante, il est nécessaire de mettre en œuvre une compensation de puissance réactive. Celle-ci peut être globale, par groupe de moteurs ou par moteur (grosses unités).

### moteurs asynchrones à rotor bobiné

Du fait que ces moteurs ont un enroulement rotorique raccordé sur des bagues, la résistance de ce circuit peut être modifiée par l'introduction de résistances extérieures.

Dans la zone de stabilité du moteur, qui correspond à la pente positive de la courbe  $C = f(g)$  (cf. fig. 4), le glissement «g» est proportionnel à la résistance rotorique :

$$g = \frac{1}{A} R_r \cdot C$$

$$\text{avec } g \% = \frac{N_s - N}{N_s} \cdot 100$$

dans laquelle

$N_s$  : vitesse de synchronisme,  
 $N$  : vitesse de fonctionnement.

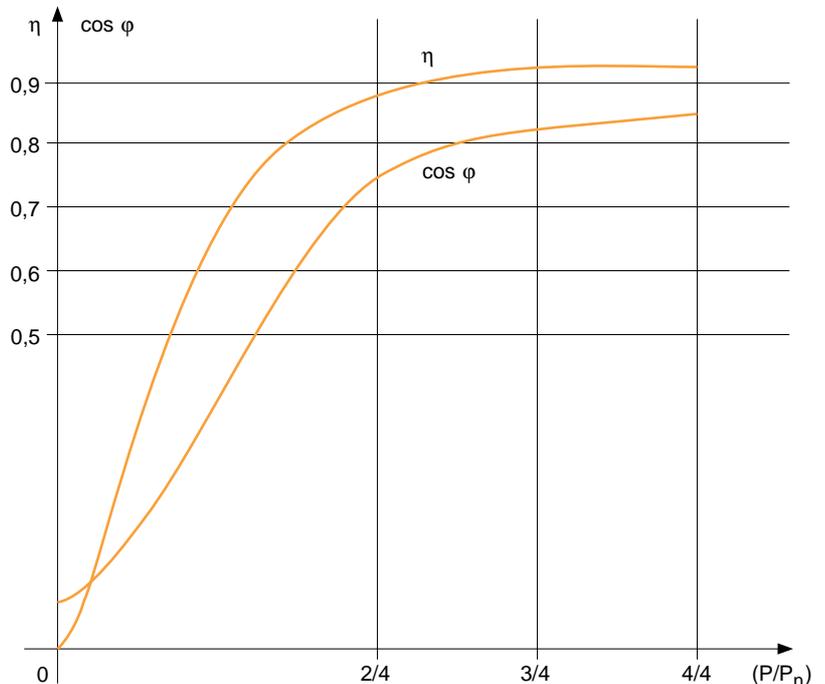


fig. 3 : courbes rendement  $\eta (P)$  facteur de puissance  $\cos \varphi (P)$  d'un moteur asynchrone à double cage.

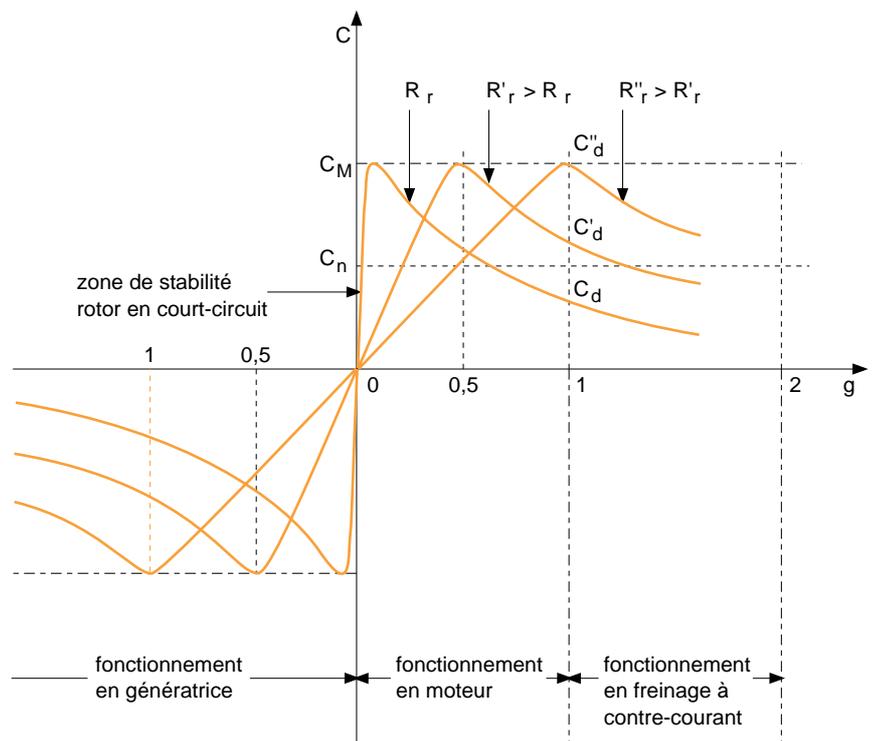


fig. 4 : courbe  $C(g)$  d'un moteur asynchrone à rotor bobiné.

$$A = 3V^2 \cdot \frac{p}{\omega} \cdot \frac{M}{L_1} = \text{constante}$$

avec :

V : tension simple d'alimentation,

p : nombre de paires de pôles,

$\omega$  : pulsation des courants d'alimentation,

M : inductance mutuelle stator-rotor,

$L_1$  : self totale du stator,

( $L_1 = M + L_s$ ),

$R_r$  : résistance rotorique = résistance propre du rotor + résistances extérieures,

C : couple moteur.

En faisant décroître la résistance extérieure au cours du démarrage, on obtient une translation de la caractéristique C(g) et l'adaptation du couple de démarrage au couple de la machine entraînée. A noter que la valeur du couple maximal est indépendante de la résistance rotorique.

D'autre part, pour les faibles glissements, le courant rotorique est inversement proportionnel à la résistance rotorique. Son module est donné par :

$$\frac{U_d}{U_n}$$

avec

$$B = V \cdot \frac{M}{L_1}$$

Le courant statorique suit la même loi au rapport de transformation et au courant magnétisant près.

En conséquence, le choix de la résistance rotorique de départ permet de résoudre pratiquement tous les problèmes de couple important au démarrage ou d'appel de courant sur le réseau et de concilier ces deux impératifs. Les différentes possibilités d'utilisation des moteurs asynchrones à rotor bobiné les rendent aptes à l'entraînement des machines à fort couple de démarrage telles que broyeurs, malaxeurs, transporteurs, etc.

De plus, les machines nécessitant un fort freinage à contre courant utilisent également ce type de moteur.

Comme pour les moteurs asynchrones à cage le facteur de puissance en marche normale est relativement bas ;

cette caractéristique et la présence de bagues et de résistances rotoriques font que son emploi tend à disparaître au profit des moteurs à double cage ou à encoches profondes.

La figure 4 représente les courbes caractéristiques C(g) suivant la valeur de la résistance rotorique ainsi que les zones de stabilité. Ces courbes font apparaître l'intérêt d'introduire une résistance importante dans le circuit rotorique pour obtenir un freinage efficace à contre courant.

## moteurs synchrones

Ces moteurs diffèrent principalement des moteurs asynchrones par :

- leur vitesse constante (vitesse de synchronisme),
  - le circuit rotorique alimenté en courant continu,
  - le facteur de puissance qui peut être réglé par le courant d'excitation.
- Ils sont technologiquement identiques aux alternateurs.

Pour obtenir un couple asynchrone et éviter des oscillations, les rotors sont munis d'une cage d'amortissement : elle permet de démarrer les moteurs synchrones avec faible couple résistant d'une façon analogue à celle des moteurs asynchrones à simple cage (dont ils ont sensiblement les mêmes courbes caractéristiques de couple et d'intensité). Pour éviter des surtensions dans le circuit d'excitation, celui-ci est shunté pendant le démarrage et lors d'un déclenchement, par une résistance dont la valeur est choisie entre 5 et 10 fois la résistance du circuit d'excitation.

Etant donné que le couple asynchrone tend vers zéro quand on s'approche de la vitesse de synchronisme, l'accrochage en fin de démarrage de ces moteurs sur le réseau ne peut se faire à la vitesse de synchronisme comme pour les alternateurs. Ceci se traduit toujours par un régime transitoire plus ou moins important suivant la vitesse acquise à la fin du démarrage, et la puissance du moteur. Pour limiter ce régime transitoire, il est possible d'utiliser :

- soit un relais contrôlant le glissement par la mesure de la fréquence du courant rotorique traversant la résistance de démarrage. Il commande

l'alimentation du circuit d'excitation au moment où le glissement est minimal. Ce dispositif est pratiquement indispensable lorsque le moteur synchrone représente une fraction importante de la puissance totale installée.

- soit appliquer le courant d'excitation en deux temps de façon automatique ou manuelle.

Les sources d'excitation peuvent être soit séparées :

- groupe moteur, excitatrice,
- redresseur à thyristors, soit placées en bout d'arbre du moteur,
- générateur inversé,
- alternateur inversé à «induit et redresseur à diodes» tournant.

Les techniques les plus couramment utilisées sont le redresseur à thyristor et les «diodes tournantes».

Ce dernier procédé élimine les balais, supprime l'armoie d'excitation et, de plus, possède souvent un dispositif de synchronisation et de réaccrochage en cas de rupture de synchronisme.

Ces moteurs sont capables de fournir de l'énergie réactive par augmentation du courant d'excitation. Leur emploi est souvent motivé par cette particularité qui permet de compenser les charges réactives d'un réseau.

Les courbes de la figure 5 montrent la variation de courant statorique en fonction du courant d'excitation pour une charge donnée constante (courbes de Mordey). L'usage de ce type de moteur pour les petites puissances est assez peu répandu. Par contre, au dessus de 2 000 kW, son emploi est

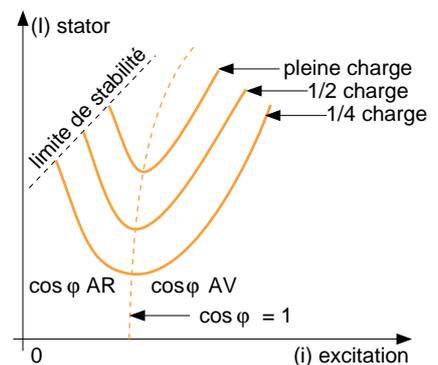


fig. 5 : moteur synchrone : courbes de Mordey.

fréquent en raison de son bon rendement et de la maîtrise de son facteur de puissance. Pour les mouvements très réguliers, le moteur synchrone s'impose : cependant les machines entraînées doivent avoir un couple résistant relativement faible pendant le démarrage et le dimensionnement de la cage d'amortissement limite la cadence de démarrage.

## tolérances de dimensionnement

Les caractéristiques électromécaniques des moteurs sont définies par la norme CEI 34-1. Pour certaines grandeurs caractéristiques assignées, la norme définit les tolérances que doit respecter le constructeur. Il est intéressant de connaître ces tolérances car, pour certaines caractéristiques, elles ont une influence directe sur le choix de la puissance du moteur et de l'appareillage ainsi que sur le réglage des protections.

Le tableau de la figure 6 donne les tolérances des principales grandeurs caractéristiques.

## tenue et essais diélectriques

Les moteurs, comme les autres composants des réseaux électriques, sont soumis aux diverses surtensions. Ils sont particulièrement sensibles aux surtensions à front raide, ou fréquence élevée, car celles-ci sont « bloquées » par les premières spires des bobinages statoriques.

### Les surtensions de manœuvre

Elles résultent des phénomènes transitoires qui apparaissent lors de changements d'états du réseau d'alimentation.

Les phénomènes ci-après, spécifiques aux circuits inductifs donc aux moteurs, sont à prendre en considération :

- arrachement de courant lors de l'interruption du courant,
- réallumages multiples à l'interruption et préamorçages à l'établissement du courant dans le cas où l'appareil de coupure est capable de couper les courants hautes fréquences correspondant à ces phénomènes.

### Les surtensions à front raide

Elles résultent des coups de foudre directs ou indirects ; elles se propagent sur le réseau et créent une contrainte diélectrique qui, même limitée par l'emploi de parafoudres, peut être importante.

L'étude des surtensions est développée dans le Cahier Technique n° 151 « Surtensions et coordination de l'isolement » et la sensibilité particulière des moteurs dans le Cahier Technique n° 143 « Disjoncteurs au SF6 et protection des moteurs HT ».

Pour vérifier la tenue des moteurs à ces différentes surtensions, ceux-ci sont soumis à des essais de type effectués selon la norme CEI 34-1.

La tension d'essais est appliquée entre l'enroulement soumis à l'essai et la carcasse de la machine à laquelle sont reliés les circuits magnétiques et tous les autres enroulements statoriques et rotoriques.

Deux types d'essais sont prescrits par les normes : les essais à fréquence industrielle et les essais de choc.

### Essai à fréquence industrielle

La tenue aux surtensions de manœuvre est, en accord avec la norme CEI 71, vérifiée par l'essai de tenue à fréquence industrielle. L'essai commence avec une tension inférieure

à  $U/2$  qui est augmentée progressivement jusqu'à  $2U + 1\,000\text{ V}$ , niveau où elle est maintenue pendant une minute.

Pour le stator,  $U$  est la tension spécifiée d'alimentation. Pour le rotor,  $U$  est la tension qui apparaît, circuit rotorique ouvert, lorsque la tension d'alimentation spécifiée au stator est appliquée alors que le rotor est bloqué en rotation. Si le moteur est réversible, (changement du sens de rotation moteur lancé), la tension d'essais appliquée au rotor sera  $4U + 1\,000\text{ V}$ .

### Essai de choc

Il consiste à appliquer une onde de tension représentative de la foudre :

- temps de montée :  $1,2\ \mu\text{s}$
- temps de descente à  $U_{\text{crête}}/2$  :  $50\ \mu\text{s}$
- tension d'essais :

$$U_{\text{crête}} = 4U + 5\,000\text{ V}$$

Les enroulements sont soumis à plusieurs ondes positives et négatives.

Les essais de choc ne sont pas obligatoires dans l'état actuel de la normalisation ; ils peuvent en effet contribuer à un vieillissement prématuré de l'isolation des têtes de bobine. Plus généralement les essais diélectriques ne doivent pas être répétés ; si un second essai est effectué, il sera fait à 80 % des tensions indiquées ci-dessus.

grandeur	tolérance
<b>moteurs asynchrones</b>	
courant à rotor bloqué et en court-circuit	+ 20 % du courant garanti (pas de limite inférieure)
couple à rotor bloqué	- 15 % à + 25 % du couple garanti
couple minimal pendant le démarrage	- 15 % du couple garanti pour les moteurs à cage $C_d \geq$ au tiers du couple assigné et $\leq$ à la moitié du couple rotor bloqué, ceci à pleine tension.
couple maximal	- 10 % du couple garanti sous réserve qu'après application de cette tolérance, le couple reste $\geq 1,6$ fois le couple assigné
<b>moteurs synchrones</b>	
courant à rotor bloqué	+ 20 % de la valeur garantie
couple à rotor bloqué	- 15 % à + 25 % du couple garanti
couple de décrochage	- 10 % de la valeur garantie sous réserve qu'après application de cette tolérance le couple reste $\geq 1,35$ fois le couple assigné (1,5 pour les moteurs synchrones à pôles saillants)

fig. 6 : tolérances sur les principales grandeurs caractéristiques selon norme CEI 34-1.

## 2. les procédés classiques de démarrage en HT

Les principaux procédés de démarrage des moteurs HT sont les suivants :

- démarrage statorique direct sous pleine tension,
- démarrage statorique sous tension réduite par couplage étoile-triangle, par réactance ou par autotransformateur,
- démarrage statorique par condensateurs,
- démarrage rotorique.

### démarrage statorique direct sous pleine tension

Ce mode de démarrage est employé pour les moteurs asynchrones avec rotor à cage et les moteurs synchrones.

La pointe de courant au démarrage est de l'ordre de 4 à 7  $I_n$  suivant les caractéristiques du moteur, et sa durée peut varier de 1 à 10 secondes environ, en fonction du moment d'inertie total (moteur + machine), du couple moteur et du couple résistant.

L'adoption de ce mode de démarrage exige donc que cette surcharge de courant puisse être supportée par le réseau sans perturbations des autres récepteurs et que la machine entraînée puisse supporter le choc mécanique dû au couple moteur. La simplicité de l'équipement et du moteur, l'économie réalisée font que ce mode de démarrage est très utilisé et même conseillé dans la mesure où la chute de tension sur le réseau au démarrage est acceptable. C'est dans le rapport puissance du moteur sur puissance de court-circuit qu'est le facteur déterminant.

### démarrage statorique sous tension réduite

#### Démarrage étoile-triangle

Ce mode de démarrage permet de réduire :

- le courant dans un rapport de  $\sqrt{3}$ ,
- au tiers le couple de démarrage.

Il est utilisé en BT et pour les faibles puissances mais rarement en HT en

raison des pointes de courant importantes au passage en triangle. Il est remplacé par le démarrage par réactance.

#### Tension réduite par résistance

Beaucoup utilisé en BT, son emploi est rare en HT du fait des calories à dissiper et des problèmes d'isolement de la résistance.

#### Tension réduite par réactance

Ce mode de démarrage (voir schéma de puissance figure n° 7) est celui qui réduit le plus simplement l'appel de courant sur le réseau ; le couple moteur au démarrage est faible et, de ce fait, les machines entraînées doivent avoir un couple résistant relativement faible pendant le lancement : compresseurs, pompes centrifuges, groupes convertisseurs, etc.

En effet, le couple d'un moteur asynchrone varie suivant le carré de la tension d'alimentation, alors que le courant absorbé reste proportionnel à cette tension.

$$C'_d = C_d \cdot \left( \frac{U_d}{U_n} \right)^2$$

avec :

$C'_d$  : couple de démarrage à tension réduite,

$C_d$  : couple de démarrage à pleine tension,

$U_d$  : tension de démarrage,

$U_n$  : tension nominale de fonctionnement,

avec :

$I'_d$  : courant de démarrage à tension réduite,

$I_d$  : courant de démarrage à pleine tension.

$$I'_d = I_d \cdot \frac{U_d}{U_n}$$

Ces relations s'écrivent aussi en valeurs relatives en utilisant les caractéristiques nominales :

avec :

$I'_d$  : courant de démarrage à tension réduite,

$I_d$  : courant de démarrage à pleine tension.

Ces relations s'écrivent aussi en valeurs relatives en utilisant les caractéristiques nominales :

$$\frac{I'_d}{I_n} = \frac{I_d}{I_n} \cdot \frac{U_d}{U_n}$$

Les courbes de la figure 7 donnent les variations des rapports en

fonction du rapport  $\frac{U_d}{U_n}$

La tension aux bornes du moteur augmente progressivement au cours du démarrage : le lancement obtenu est souple.

■ fonctionnement et schéma de principe

□ premier temps

marche à tension réduite par la fermeture de  $C_L$  contacteur de ligne.

□ deuxième temps

marche normale par la fermeture de  $C_C$  : contacteur de court-circuitage

■ détermination d'une réactance de démarrage (cf. fig. 8)

La tension de démarrage est déterminée par l'appel de courant maximal  $I'_d$  autorisé sur le réseau :

$$U_d = U_n \cdot \frac{I'_d}{I_d}$$

La chute de tension composée dans la réactance a pour valeur :

$$\vec{U}_n - \vec{U}_d = j \cdot \sqrt{3} \cdot L \cdot \omega \cdot \vec{I}'_d$$

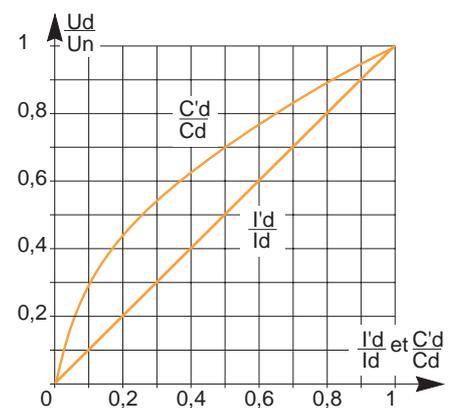


fig. 7 : courbes de démarrage sous tension réduite (par réactance ou étoile-triangle).

Le diagramme de la figure 9 montre que cette relation peut s'écrire arithmétiquement pour un moteur asynchrone, car le facteur de puissance au premier instant du démarrage correspond pratiquement à celui de l'inductance de démarrage d'où :

$$L \cdot \omega = \frac{U_n - U_d}{\sqrt{3} \cdot I'_d}$$

Pour le dimensionnement en puissance de la réactance, il faut connaître la durée du démarrage et la cadence de manœuvres.

### Tension réduite par autotransformateur

Ce mode de démarrage permet parfois de concilier la réduction d'appel de courant sur le réseau et la valeur du couple moteur. En effet, il présente l'avantage de réduire l'appel de courant suivant le carré du rapport de transformation :

$$\frac{I'_d}{I_n} = \frac{I_d}{I_n} \cdot \left( \frac{U_d}{U_n} \right)^2$$

$$\frac{C'_d}{C_n} = \frac{C_d}{C_n} \cdot \left( \frac{U_d}{U_n} \right)^2$$

avec :

$I'_d$  : courant de démarrage côté réseau à tension réduite.

Ces relations permettent de déterminer la valeur de la tension réduite en

fonction du rapport  $\frac{I'_d}{I_n}$

autorisé sur le réseau ou du

rapport  $\frac{C'_d}{C_n}$  autorisé par la machine

entraînée.

La courbe de la figure 10 donne la

variation de  $\frac{U_d}{U_n}$

en fonction de  $\frac{I'_d}{I_n}$  ou  $\frac{C'_d}{C_d}$

■ fonctionnement et schéma de principe (cf. fig. 11)

$C_L$  : contacteur de ligne

$C_C$  : contacteur de court-circuitage

$C_{PN}$  : contacteur de formation du point neutre HT

AT : autotransformateur.

□ premier temps

marche à tension réduite par la fermeture de  $C_{PN}$  qui provoque la fermeture de  $C_L$ .

□ deuxième temps  
marche en inductance par l'ouverture de  $C_{PN}$

□ troisième temps

marche à pleine tension par la fermeture de  $C_C$ .

### Remarques

■ le deuxième temps est en principe court (de l'ordre de la seconde) car il est, dans la plupart des cas, un temps ralentisseur.

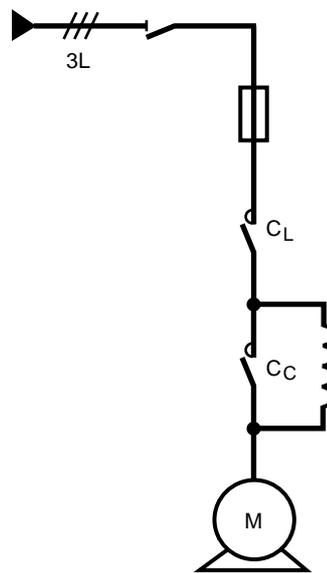


fig. 8 : schéma de puissance : démarrage par réactance.

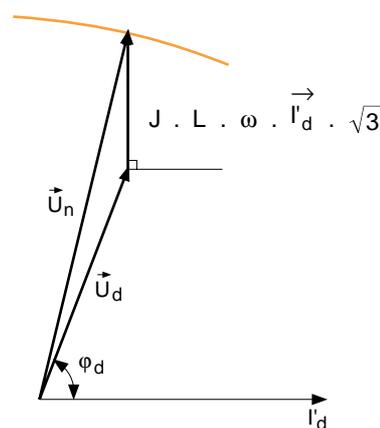


fig. 9 : diagramme vectoriel permettant de déterminer L.

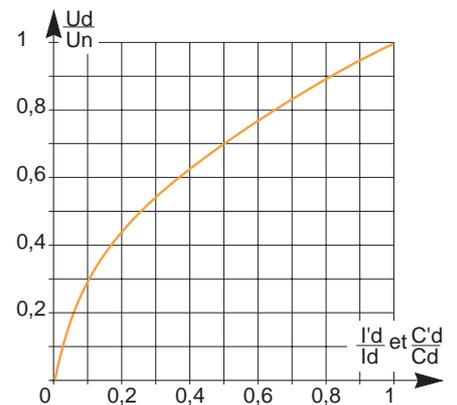


fig. 10 : courbe de démarrage sous tension réduite par autotransformateur.

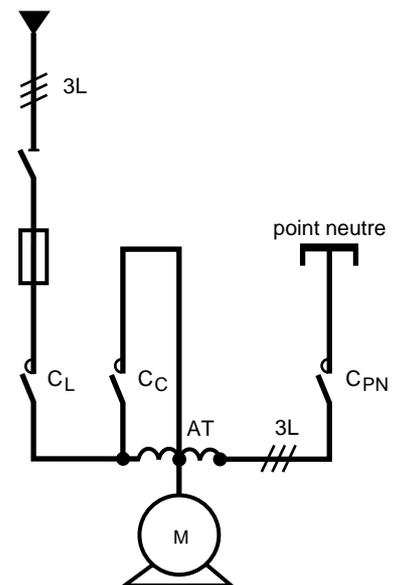


fig. 11 : schéma de puissance : démarrage par autotransformateur.

L'emploi d'autotransformateur avec entrefers réduit notablement ce défaut, mais il nécessite la connaissance de la valeur du courant absorbé par le moteur à la fin du premier temps.

- le passage à pleine tension se traduit toujours par un régime transitoire plus ou moins important suivant la vitesse acquise à la fin du premier temps et la valeur du courant absorbé.

- l'intensité qui passe dans le point neutre au démarrage est la différence entre le courant moteur et le courant en ligne, au courant magnétisant près de l'autotransformateur. C'est ce qui permet de réduire le calibre du contacteur de point neutre.

- il existe une variante de ce schéma avec suppression du contacteur de point neutre. Cette variante est à proscrire car le passage de la tension réduite à la pleine tension oblige à couper la liaison moteur-réseau.

Compte-tenu du temps relativement court de permutation et de la tension résiduelle aux bornes du moteur, un appel de courant supérieur au courant de démarrage se produirait en effet au moment du passage en marche normale : condition inadmissible pour le réseau et le moteur qui risquent de provoquer le déclenchement des protections.

## démarrage statorique par condensateurs

Ce procédé permet de conserver les caractéristiques de démarrage à pleine tension du moteur. Il est particulièrement utilisé pour conserver le couple de démarrage des moteurs synchrones, par exemple dans les cimenteries et les installations de broyage.

Les condensateurs, en parallèle avec le moteur, fournissent une partie de l'énergie réactive, pendant la phase de démarrage, le facteur de puissance du moteur étant alors faible. L'appel de

puissance sur le réseau est réduit d'autant (cf. fig. 12).

La mise en œuvre de cette technique est délicate. Elle impose une étude de l'ensemble moteur condensateurs pour éviter les résonances et les surtensions par auto-excitation du moteur, et les oscillations mécaniques sur le système de transmission.

D'autre part, les équipements de commande doivent être choisis spécialement pour la commutation des condensateurs.

## démarrage rotorique

Ce mode de démarrage résout pratiquement tous les problèmes qui peuvent se poser au démarrage soit :

- réduction de l'appel de courant sur le réseau avec augmentation du couple moteur,
- adaptation du couple moteur au couple résistant,
- démarrage long et progressif (par exemple, pour une charge de grande inertie).

Il ne peut s'employer que pour les moteurs asynchrones à rotor bobiné ou pour les moteurs asynchrones synchronisés (de moins en moins utilisés dans l'industrie).

Il est surtout utilisé pour les démarrages en charge.

### Exemple d'un démarrage rotorique en n temps.

Ce démarrage est illustré par les figures 13 et 14. Le couple moteur varie entre deux valeurs à chaque cran. La valeur inférieure est prise égale au couple nominal. A chaque cran, la résistance rotorique change de valeur, la caractéristique couple-vitesse évolue. Au dernier temps, la résistance rotorique se réduit à la résistance interne du rotor.

- premier temps alimentation statorique et démarrage sur la totalité de la résistance rotorique par fermeture de  $C_L$ .

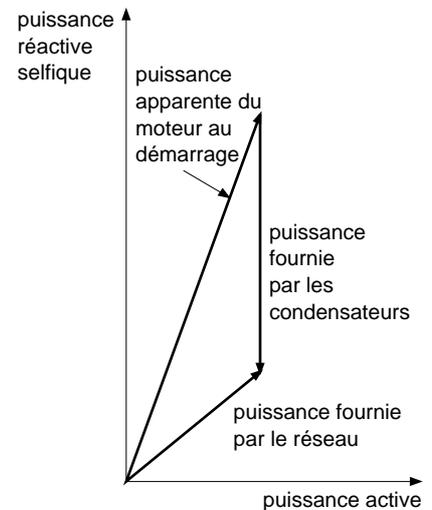


fig. 12 : diagramme vectoriel du démarrage par condensateur.

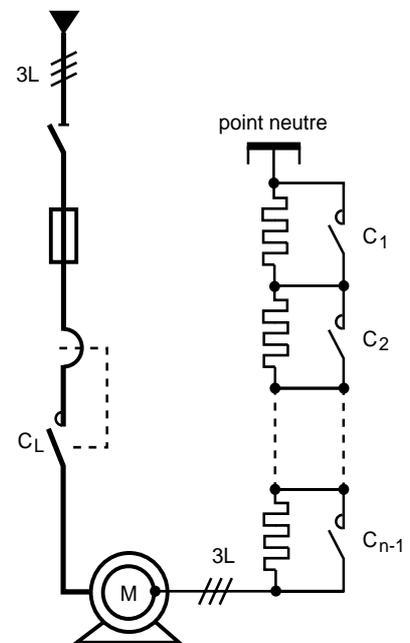


fig. 13 : schéma de puissance : démarrage rotorique.

- deuxième temps  
court-circuitage de la première section de la résistance rotorique par la fermeture de  $C_1$ .
  - troisième temps  
court-circuitage de la deuxième section de la résistance rotorique par la fermeture de  $C_2$ .
  - Nième temps  
court-circuitage de la n-1 section de la résistance rotorique par la fermeture de  $C_{n-1}$ .
- Le nombre de temps ou de crans n est toujours supérieur de 1 au nombre de sections ou contacteurs.
- Ce nombre n est déterminé approximativement par la formule :

$$n = \frac{\log g_n}{\log \frac{C_n}{C_p}}$$

ou encore

$$\frac{C_n}{C_p} = n \sqrt[n]{g_n}$$

où :  $C_p$  = couple de pointe  
 $g_n$  = le glissement nominal.

Selon les cas,  $C_p$  étant connu, n s'en déduit, ou inversement.

La détermination complète des équipements de démarrage rotorique nécessite la connaissance du service, (cadence horaire et de la durée du démarrage). En raison des carences de normalisation pour les moteurs HT, ces équipement sont déterminés cas par cas, par des spécialistes.

**Remarque**

Il est parfois nécessaire de disposer d'un démarrage linéaire. Celui-ci fait appel à l'électronique de puissance qui permet le contrôle de l'énergie rotorique ; par exemple, à l'aide d'un pont de Graëtz et d'un hacheur qui réalisent une résistance continûment variable (cf. fig. 15).

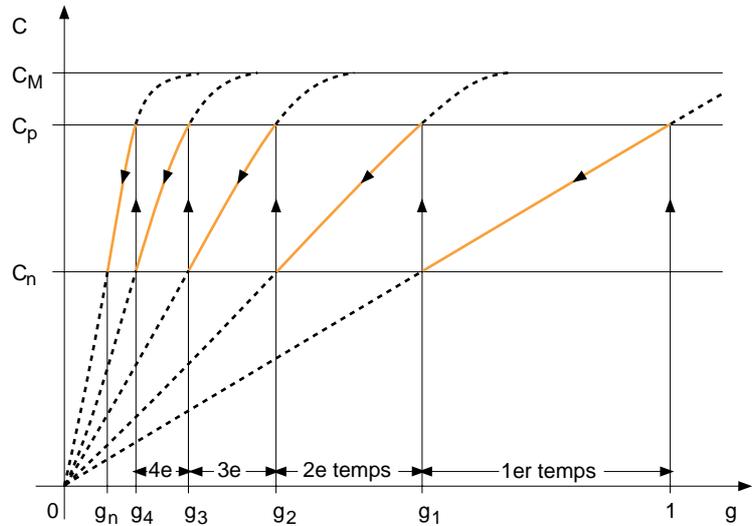


fig. 14 : diagramme de démarrage rotorique symétrique.

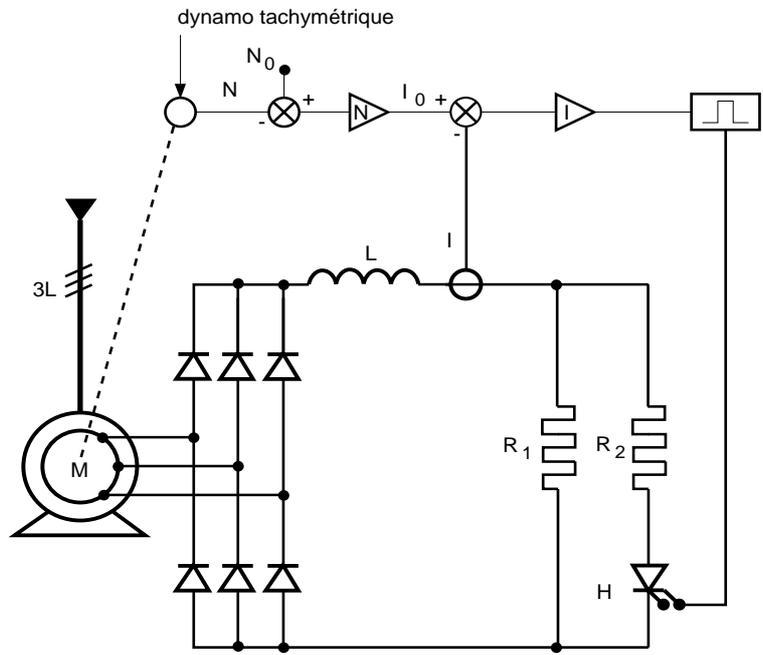


fig. 15 : réglage de la vitesse par hacheur rotorique.

## choix du mode de démarrage

Le choix du mode de démarrage est conditionné par la bonne adéquation entre le couple moteur et le couple résistant de la charge.

Il nécessite la connaissance du couple résistant (cf. fig. 16).

### Conditions de démarrage

Compte-tenu des caractéristiques du démarrage souhaité, il faut vérifier pour les types de démarrage envisagés que le démarrage peut effectivement avoir lieu dans de bonnes conditions au niveau du couple moteur, de l'appel de courant et de la durée de démarrage :

- le couple moteur reste toujours supérieur au couple résistant (cf. fig. 17),
- l'appel de courant sur le réseau et la chute de tension correspondante sont admissibles par le réseau,
- le temps de démarrage est compatible avec les matériels utilisés.

### Calcul approximatif de la durée de démarrage

Le fonctionnement de l'ensemble moteur-machine entraînée est régi par l'équation mécanique :

$$C_m - C_r = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

avec :

$C_m$  : couple moteur

$C_r$  : couple résistant

$J$  : inertie des masses tournantes (moteur et machine entraînée)

$\frac{d\omega}{dt}$  : accélération angulaire.

Sur la durée totale du démarrage  $\Delta t$ , la vitesse angulaire varie de 0 à  $\omega_n$ . Par ailleurs, un couple accélérateur moyen  $C_a$ , égal à la différence moyenne entre  $C_m$  et  $C_r$  peut être défini :

Ce qui entraîne :

$$C_a = (C_m - C_r) \text{ moyen}$$

$$= J \cdot \frac{(\omega_n - 0)}{\Delta t}$$

d'où :

$$\Delta t = \frac{J \cdot \omega_n}{C_a}$$

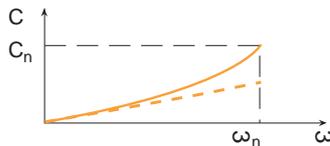
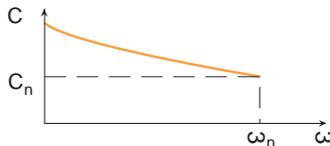
	caractéristiques	exemples
	couple constant	compresseur à piston
	couple parabolique	pompe : — vanne ouverte - - vanne fermée
	couple important au décollage	broyeur

fig. 16 : rappel des courbes de couple résistant des machines à entraîner (charges).

Sachant que le couple moteur réel varie en fonction du carré de sa tension d'alimentation :

$$\frac{C'_m}{C_m} = \left( \frac{U_{réelle}}{U_n} \right)^2$$

Le fait de réduire cette tension va, en conséquence, réduire  $C_a$  et donc augmenter le temps de démarrage.

### Tableau de choix du mode de démarrage

Le tableau de la figure 18 résume les avantages et inconvénients des principaux modes de démarrage pour les différentes applications.

Pour un couple déterminé, l'intensité absorbée sur le réseau s'établit dans l'ordre croissant suivant :

- démarrage rotorique,
- démarrage par auto-transformateur,
- démarrage par impédance statorique,
- démarrage direct.

Le choix d'un mode de démarrage nécessite une bonne communication entre le fournisseur d'énergie électrique, le constructeur du moteur et de la machine entraînée.

Les caractéristiques indispensables à ce choix sont :

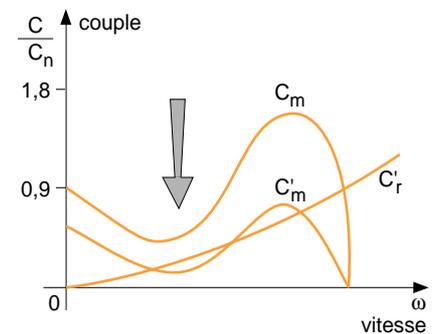


fig. 17 : cas de non démarrage.

- la puissance du réseau d'alimentation et l'appel de courant maximal autorisé,
- le couple et l'intensité du moteur à pleine tension en fonction de la vitesse de rotation,
- le couple résistant de la machine entraînée (cf fig. 16),
- le moment d'inertie des masses tournantes.

Si le rapport entre la puissance du réseau d'alimentation et la puissance du moteur est inférieur à 5, un soin particulier doit être apporté au choix du mode de démarrage comme à celui de la coordination de l'ensemble des protections (cf. annexes 1 et 2).

besoins de l'application	caractéristiques de l'application	mode de démarrage	commande par		avantages inconvénients
					
process permanent ou quasi-permanent démarrage ≤ 1/jour	machines nécessitant un fort couplage de démarrage	direct	1 ou	1	simplicité, investissement réduit. au démarrage : ■ couple important, ■ appel de courant important, ■ fortes contraintes mécaniques.
démarrages fréquents > 1/jour	moteurs à faible appel de courant ou de faible puissance	direct		1	
pompes, ventilateurs compresseurs démarrages fréquents	machines démarrant sous faible couple	statorique par réactance		2	réduction et de l'appel de courant au démarrage (ajustage possible).
optimisation des caractéristiques de démarrage	lorsque l'intensité au démarrage doit être réduite tout en conservant le couple nécessaire au démarrage	statorique par auto-transformateur		3	optimisation du couple ( <i>réduit</i> ) et de l'appel de courant au démarrage (ajustage possible).
optimisation des caractéristiques de démarrage à fort couple	démarrages les plus difficiles	rotorique		généralement 3	faible appel de courant et fort couple de démarrage.

fig. 18 : tableau de choix du mode de démarrage dans les cas les plus courants.

### 3. appareillage de contrôle commande

Le rôle de l'appareillage est triple :

- assurer la mise sous tension et l'arrêt (commande),
- déconnecter le moteur en cas de défaut (protection),
- assurer un certain contrôle du moteur (contrôle).

Par contrôle, il est sous-entendu que l'appareillage est capable (ou non) :

- de conduire le démarrage (automatisme de la séquence de démarrage),
- d'agir sur la vitesse du moteur,
- de fournir des informations sur l'état électrique du moteur et aussi de contribuer à la protection.

Cette fonction contrôle fait essentiellement appel à l'électronique de puissance et aux courants faibles (technologie numérique) ; elle est en plein développement. La protection des moteurs HT sera traitée dans le chapitre suivant.

#### solutions électromécaniques

Le choix entre les différents appareils (interrupteur, disjoncteur ou contacteur) dépend de :

- la cadence de manœuvres,
- l'endurance électrique,
- la puissance du moteur.

Les principales caractéristiques des appareils de coupure sont résumées dans le tableau de la figure 19.

#### Interrupteurs-fusibles

Les interrupteurs par conception même ont un pouvoir de coupure, une endurance mécanique et électrique faibles, ce qui limite leur emploi à de petites puissances ( $I_n = 50$  A environ, 5 500 V) et à des cadences de deux à trois manœuvres par jour.

Par ailleurs, le faible pouvoir de coupure de ces appareils rend le choix des protections délicat.

#### Disjoncteurs

Les disjoncteurs sont en général employés pour les fortes puissances de moteur, plus de 300 A, à faible cadence de manœuvres et pour des tensions de service supérieures à 6,6 kV.

Bien entendu, leur emploi peut être étendu à des puissances plus faibles, manœuvrables par interrupteur ou contacteur.

#### Contacteurs fusibles

■ cadence de manœuvres  
La mécanique de commande simple, la robustesse et la simplicité de ses contacts permettent au contacteur une cadence de fonctionnement élevée. Cette cadence ne peut être supportée par un disjoncteur même spécial et moins encore par un interrupteur.

Certaines installations utilisent des contacteurs à accrochage mécanique pour éliminer la consommation permanente de l'électro-aimant de fermeture, ce qui peut diminuer l'endurance du fait de la plus grande complexité de la chaîne cinématique.

■ puissance de court-circuit du réseau  
Ce facteur intervient peu sur un équipement à contacteur grâce à la présence des fusibles placés immédiatement après le sectionneur d'isolement ou près des pinces d'embrochage, côté jeu de barres. Ces fusibles à haut pouvoir de coupure, limitent le courant de court-circuit.

Cette particularité permet, si la puissance du réseau est augmentée, de conserver les cellules départ moteur ; les supports de jeux de barres étant éventuellement renforcés.

#### Fusibles

Le calibre des fusibles est déterminé en fonction de :

- l'intensité nominale  $I_n$ ,
- le rapport  $I_d / I_n$  ( $I_d$  = courant de démarrage),

■ la durée de démarrage déterminée à l'aide de l'abaque de la figure 20. Pour plus de précisions sur le choix du fusible, le lecteur peut se reporter au Cahier Technique n° 107.

Il convient enfin de rappeler que les fusibles protègent le moteur contre les surintensités supérieures à environ cinq fois le courant nominal du moteur et qu'ils doivent être associés à des protections complémentaires (relais thermiques... cf. chapitre protections).

#### Transformateurs de courant

L'utilisation, de plus en plus fréquente, de protections numériques rend possible l'emploi de capteurs de courant non conventionnels (par exemple, des tores de Rogowski). L'avantage de ces capteurs est d'être linéaires et donc de délivrer un signal fidèle sur toute la plage de courant utile.

Ils ne posent pas de problème au niveau de la saturation, ni sur le plan thermique comme cela peut être le cas avec les Transformateurs de Courant classiques (cf. Cahier Technique n° 112).

#### Particularités dues à l'emploi des fusibles ou des disjoncteurs

■ marche en monophasé due à une fusion fusibles, avec non fonctionnement du percuteur.

Le niveau de fiabilité des percuteurs et aujourd'hui tel que le risque est faible. Le niveau de sûreté peut encore être augmenté par l'emploi d'une protection complémentaire (relais à manque de tension ou de déséquilibre).

appareil	cadence moyenne	endurance Nb manœuvres	puissance admissible du moteur
interrupteur-fusibles	faible : 2 - 3/jour	2 000	petite $\leq 50$ A
disjoncteur	faible : 10/jour	10 000	forte $\geq 7,2$ kVA $> 300$ A
contacteur-fusibles	forte $> 10/h$	$> 100 000$	moyenne $\leq 300$ A

fig. 19 : domaine d'emploi des appareils de coupure.

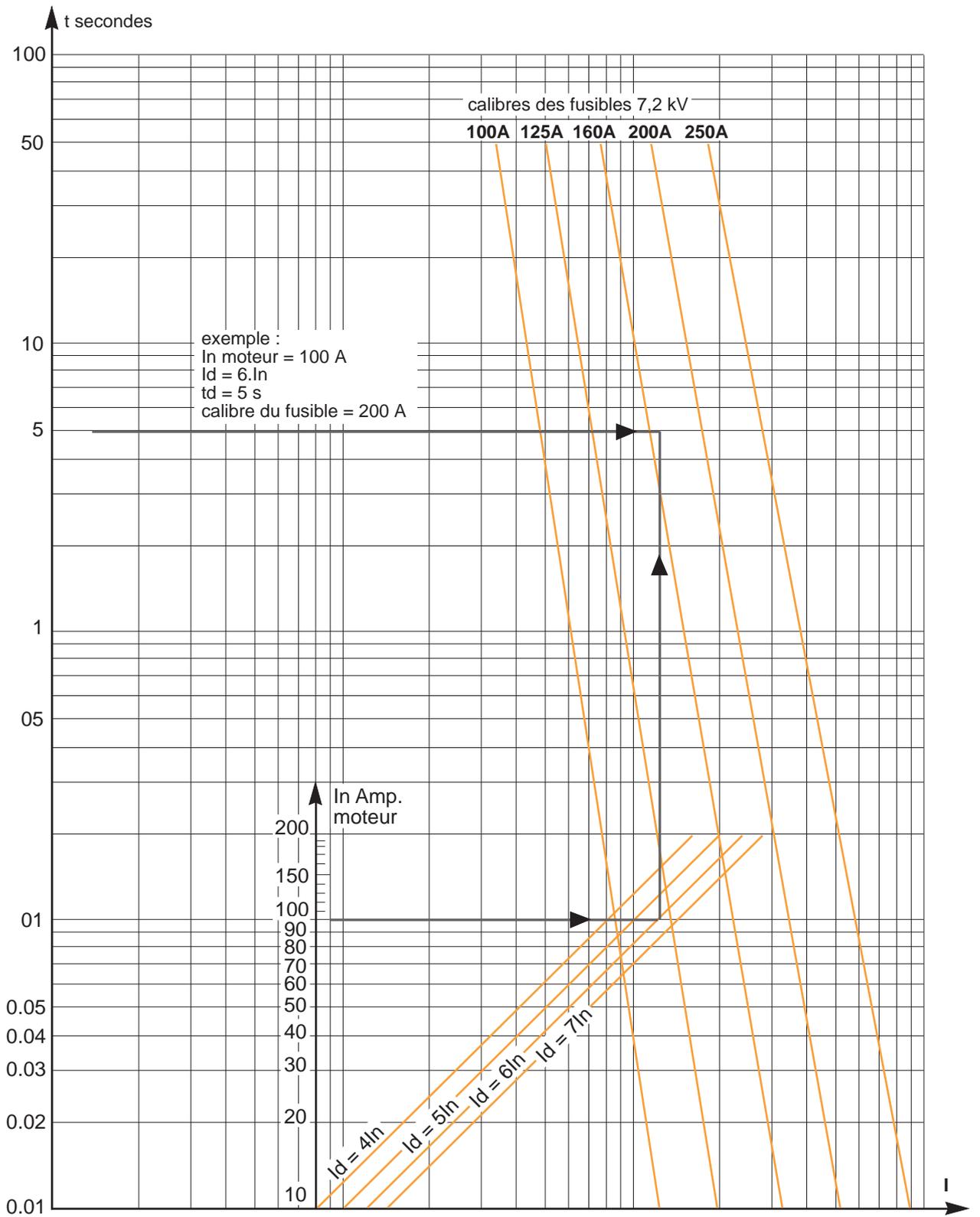


fig. 20 : abaque pour la détermination des fusibles.

■ sélectivité avec l'appareillage amont  
Elle peut être délicate à réaliser lorsque simultanément :

- les fusibles utilisés sont de fort calibre (200 A ou 250 A) ;
- le départ protégé par ces fusibles représente une fraction importante de la puissance fournie par le disjoncteur général (cf. fig. 21 et 22).

Cependant le fort pouvoir de coupure des contacteurs Rollarc associés à de tels fusibles autorise l'utilisation de relais à maximum d'intensité faiblement temporisés et permet de retrouver la sélectivité. La sélectivité est plus facile à réaliser si le départ moteur est protégé par disjoncteur mais, sur fort courant de court-circuit, le courant n'étant pas limité, il y a une augmentation des contraintes thermiques.

#### ■ surtensions

Certains types d'appareils, et notamment les appareils à coupure dans le vide, provoquent des surtensions lors de la mise sous tension ou de l'arrêt des moteurs (à cause de leur aptitude à couper des courants haute fréquence, résultant par exemple du phénomène d'arrachement du courant - cf. Cahier Technique n° 143).

Afin d'éviter que ces surtensions ne dégradent petit à petit le niveau d'isolement du moteur, les fabricants placent dans l'appareillage si cela est nécessaire, des limiteurs de surtension type ZnO.

Pour conclure, il apparaît que les solutions électromagnétiques sont aujourd'hui fiables, robustes, économiques et qu'elles conviennent parfaitement dans la grande majorité des cas.

## solutions électroniques

Elles apportent à l'utilisation des possibilités et avantages supplémentaires tels que :

- vitesse variable,
- possibilité de régulation de vitesse,
- grande cadence de manœuvres,
- économie d'énergie.

La solution électronique est rarement utilisée pour réaliser uniquement le démarrage.

Avant d'aborder les cas types de dispositifs électroniques, il faut rappeler que leur utilisation nécessite un certain

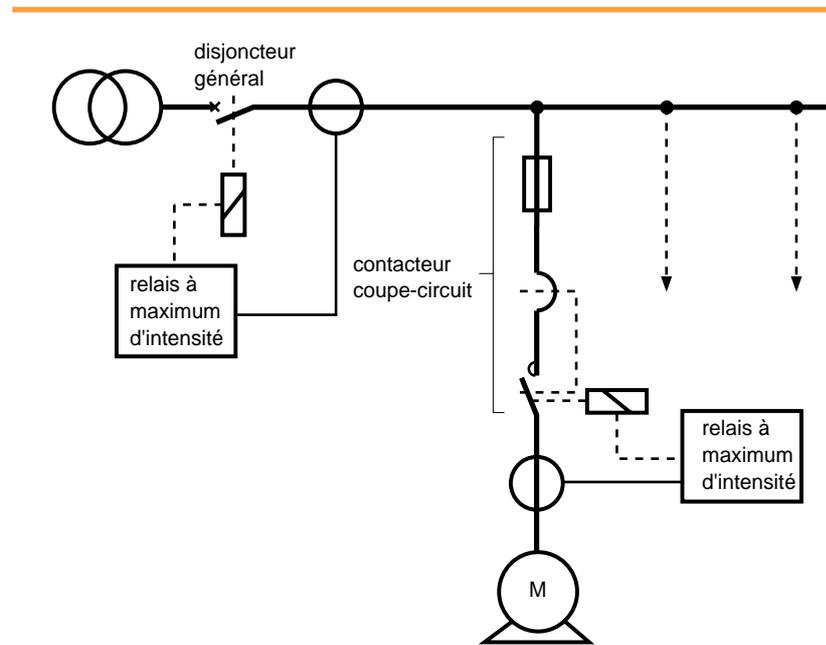


fig. 21 : schéma de protection d'un départ moteur forte intensité.

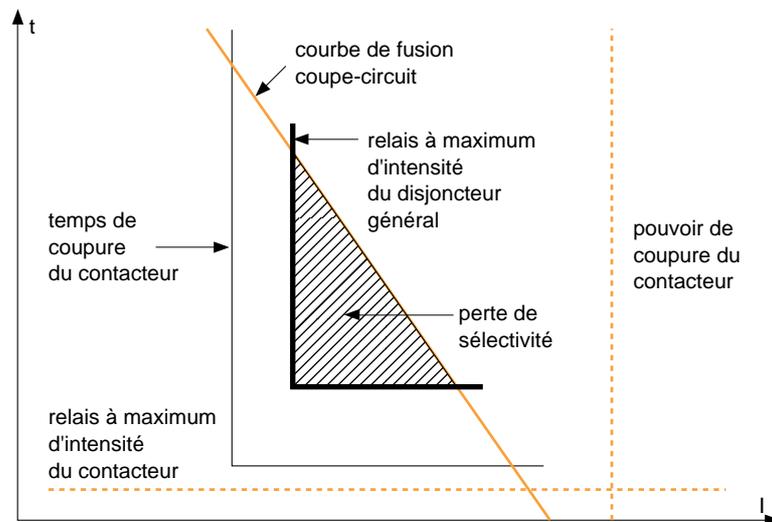


fig. 22 : diagramme de sélectivité dans le cas d'un départ moteur forte intensité.

nombre de précautions constructives au niveau du moteur :

- marge de sécurité en échauffements à cause des harmoniques : une marge de 15 % sur le courant est généralement suffisante,
- une ventilation forcée est recommandée (les moteurs pouvant fonctionner à basse vitesse),
- renforcement de l'isolement entre spires, du fait des gradients de tension importants générés par la commutation

des thyristors (pouvant atteindre l'ordre de grandeur de ceux des essais de choc).

Les dispositifs présentés ci-après sont ceux qui sont les plus utilisés en moyenne tension. Seuls les principes généraux sont exposés.

Le tableau de la figure 23 permet d'avoir une indication sur les adéquations entre le type de variateur, le type de moteur et de charge entraînée.

moteur	charges	variations vitesse	puissance	rendement global	type de variateur
asynchrone ou synchrone	pompes, ventilateurs, compresseurs, extrudeuses	0 % à plus de 100 %	quelques 10 kW à quelques 100 kW	0,85 à 0,90	redresseur/onduleur autonome
asynchrone à bague	idem	60 % à 100 %*	quelques 100 kW à quelques MW	0,90 à 0,95	cascade hyposynchrone
synchrone	idem centrifugeuses boggies TGV - A (grande vitesse)	0 % à plusieurs fois 100 %	100 kW à quelques 10 MW	0,90 à 0,95	redresseur/onduleur autopiloté
asynchrone ou synchrone	broyeurs laminoirs fours à ciment (vitesse faible)	0 % à $\pm 33$ %	100 kW à quelques 10 MW	0,85 à 0,90	cyclo convertisseur

\* : 100 % correspond à la vitesse relative au 50 Hz

fig. 23 : domaines d'application des variateurs électroniques pour moteurs alternatifs.

### Redresseurs onduleurs autonomes

Ils sont capables de délivrer une tension et une fréquence variables, ce qui permet une parfaite maîtrise de la vitesse et du couple du moteur.

Rappelons pour les moteurs asynchrones :

- le couple est proportionnel à  $U^2$  si  $f$  et  $N$  sont constants,
- le couple est inversement proportionnel à  $f$  pour une tension et une vitesse donnée.

Il existe trois types de redresseurs-onduleurs autonomes.

- redresseur-onduleur de tension
- le redresseur à thyristor règle la tension,
- l'onduleur à thyristor fournit l'alternatif à fréquence variable.

Ce schéma est aussi utilisé par les Alimentations Statiques sans Interruption (ASI), utilisées en BT, pour alimenter les ordinateurs; seule différence : fréquence et tension sont fixes.

- redresseur, onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)
- le redresseur à diodes alimente l'onduleur,
- l'onduleur génère des impulsions de tension qui permettent de reconstituer une sinusoïde de période et d'amplitude variable (cf. fig. 24).
- redresseur, onduleur de courant (commutateur)
- le redresseur à thyristor associé à une self de lissage se comporte comme un générateur de courant continu,

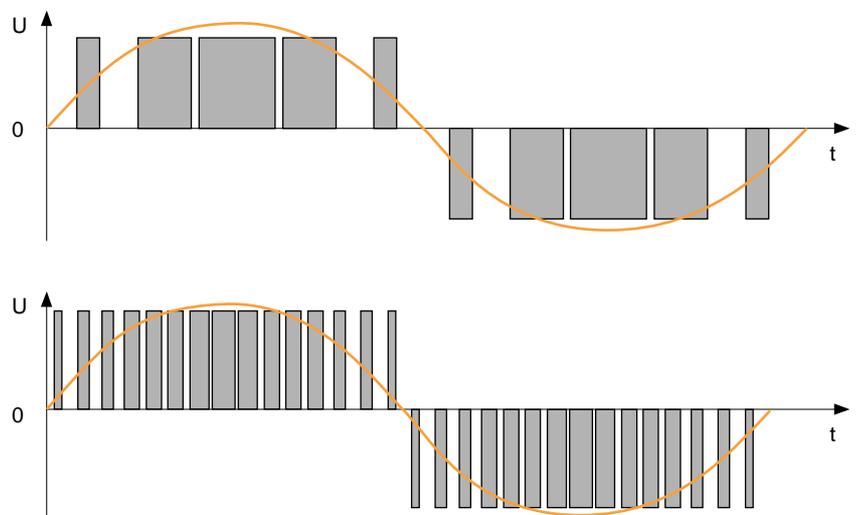


fig. 24 : génération de tensions et fréquence variables avec les variateurs à MLI.

- l'onduleur commute le courant successivement dans les enroulements du moteur avec l'aide de condensateurs.

La fréquence, et donc la vitesse du moteur, dépendent de la vitesse de commutation.

### Quelques éléments de comparaison entre ces trois types de redresseurs-onduleurs :

- l'onduleur de tension
- convient bien pour les moteurs de fortes réactances,
- nécessite souvent un filtre entre onduleur et moteur,
- permet le freinage par récupération si le redresseur est réversible.

- l'onduleur MLI
- autorise une large plage de vitesse,
- vitesse maximum limitée par la fréquence de commutation maximum autorisée par les thyristors de l'onduleur. L'utilisation de transistors de puissance (IGBT) permet de travailler à fréquence bien plus élevée, mais pour des puissances plus faibles,
- fonctionnement réversible possible (deux sens de rotation).
- le commutateur de courant
- convient pour les moteurs à faible réactance,
- permet le fonctionnement dans les quatre quadrans.

### Cascade hyposynchrone

Le moteur asynchrone à rotor bobiné est alimenté normalement par le secteur.

Pour jouer sur la vitesse, il suffit d'agir sur le courant rotorique ; ceci est réalisé par un ensemble redresseur-onduleur. Le redresseur prélève de l'énergie sur le circuit rotorique, ce qui augmente le glissement. Ce prélèvement dépend du réglage de conduction des thyristors de l'onduleur qui réinjecte de l'énergie sur le réseau (cf. fig. 25). La cascade hypo-synchrone permet une variation continue de la vitesse avec un glissement maximal de l'ordre de 40 %.

L'ensemble convertisseur n'a qu'une puissance faible par rapport à la puissance du moteur et la récupération d'énergie permet d'obtenir un excellent rendement global.

A noter que le convertisseur est mis en fonctionnement après démarrage par résistance rotorique.

Ce montage peut fonctionner au-delà de la vitesse de synchronisme (hyper synchrone) dans le cas de charges entraînant.

### Redresseur-onduleur autopiloté

Comme pour le redresseur-onduleur autonome à commutation de courant, les phases du stator du moteur (ici synchrone) sont alimentées à tour de rôle.

La commutation d'une phase du stator à la suivante est auto-pilotée par la vitesse du moteur grâce à un capteur « disque à encoches ».

Il y a ainsi correspondance entre le flux d'excitation et le flux d'induit, comme pour les machines à courant continu, et le risque de décrochage est nul.

Au démarrage et à faible vitesse, la commutation posant des problèmes, il faut modifier le système de commande des convertisseurs.

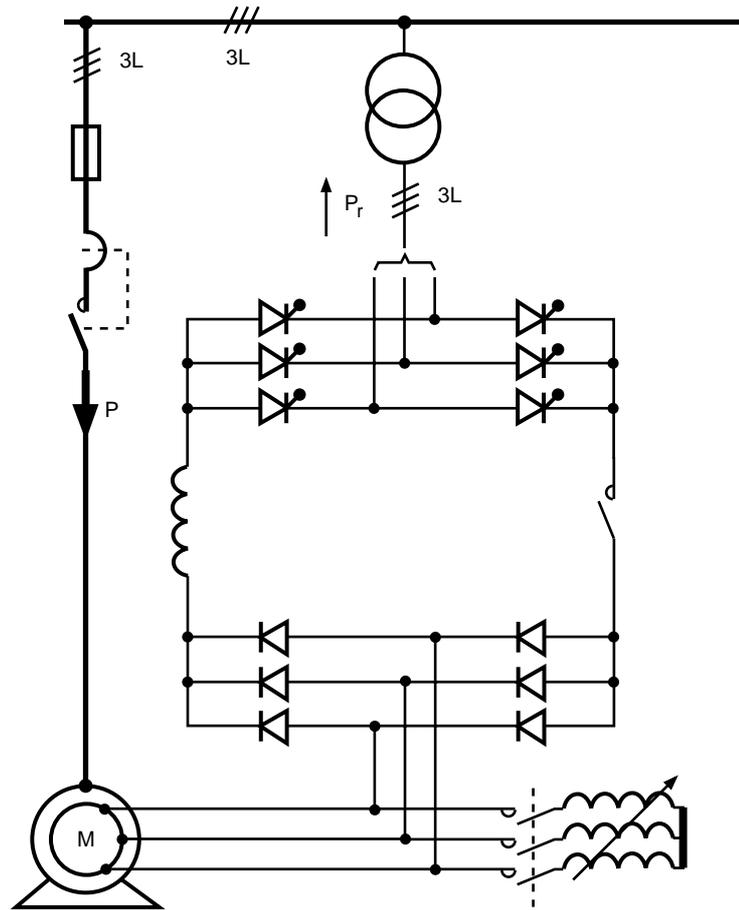


fig. 25 : schéma de puissance de la cascade hypo-synchrone.

Cette solution est bien adaptée aux moteurs synchrones.

### Cyclo convertisseur

Chaque phase du moteur est « alimentée » par un double pont triphasé.

Le premier pont sert au prélèvement de courant pendant l'alternance positive, ceci successivement sur l'une ou l'autre des phases secteur selon la fréquence désirée.

Le deuxième pont sert au retour de courant pendant l'alternance négative, ceci vers l'une ou l'autre des phases.

Le cyclo convertisseur fabrique un pseudo secteur triphasé qui nécessite un filtrage et dont la fréquence peut évoluer entre 0% et le tiers de la fréquence du réseau.

## 4. protections des moteurs HT

Une "protection moteur", regroupe l'ensemble des dispositifs permettant d'éviter des détériorations importantes inhérentes à des conditions anormales de fonctionnement au niveau alimentation, moteur ou process.

Le choix des protections à installer se fait en fonction :

- des conditions d'exploitation,
- de l'importance du service assuré par le moteur,
- du degré de sûreté recherché,
- du coût relatif de la protection vis-à-vis du moteur,
- de la probabilité d'apparition des défauts considérés.

Mais aussi :

- du type de charge entraînée,
- des perturbations pouvant apparaître sur le réseau,
- du type de moteur protégé.

Ainsi, les défauts listés ci-dessous peuvent faire l'objet d'une protection.

### principaux types de défauts

#### Moteurs asynchrones

- surcharges,
- courts-circuits,
- coupure, inversion et déséquilibres de phases,
- défaut d'isolement entre spires
- masse stator,
- minimum et maximum de tension,
- démarrage incomplet.

#### Moteurs synchrones

Aux protections précédentes s'ajoutent les protections contre :

- rupture de synchronisme,
- perte d'excitation,
- masse rotor,
- marche prolongée en asynchrone au démarrage,
- surcharges et courts-circuits dans l'enroulement d'excitation,
- retour de puissance (marche en alternateur).

#### Autres défauts liés au process ou à la charge

- démarrages trop fréquents,
- blocage rotor,
- minimum de puissance ou de courant.

Les procédés de détection/protection relatifs aux principaux types de défaut sont étudiés dans le paragraphe suivant :

### principes de protection

#### Surcharges

La surcharge peut être détectée par des relais à maximum d'intensité à temps inverse, des relais à image thermique ou encore des sondes thermiques.

Les relais traitent l'information «courant absorbé par le moteur», lequel est généralement capté par des transformateurs de courant.

Les sondes thermiques sont insérées dans les parties actives du moteur.

- les relais à maximum d'intensité à temps inverse.

Leur emploi nécessite :

- soit une courbe de fonctionnement  $I(t)$  autorisant le démarrage, soit un dispositif de blocage du relais pendant le démarrage,
- un seuil de fonctionnement  $I_0$  voisin du courant nominal  $I_n$  du moteur  $I_0 \approx 1,10 I_n$

Ces relais ne gardent pas la mémoire des surcharges.

- les relais à image thermique  
Ces relais sont certainement les mieux adaptés, car ils permettent d'utiliser au maximum les possibilités de surcharge du moteur sans entraîner de détérioration.

La courbe de fonctionnement  $I(t)$  du relais doit permettre le passage du courant de démarrage sans déclenchement et être agréée par le constructeur du moteur.

- les sondes thermiques  
Ce sont des résistances dont la valeur ohmique varie avec la température.

En principe, ces dispositifs ne sont pas utilisés seuls, ils doublent les relais utilisant le courant absorbé comme moyen de mesure.

La surcharge due à l'échauffement d'un palier est, en principe, insuffisante pour être détectée par les relais de surcharge.

La protection des paliers doit être assurée par des thermostats ou des sondes thermiques.

#### Courts-circuits

Sur les équipements à disjoncteur, les courts-circuits sont détectés par des relais à maximum d'intensité à fonctionnement instantané, réglés au-dessus du courant de démarrage.

Sur les équipements à contacteurs plus fusibles, les courts-circuits sont éliminés par les fusibles.

Toutefois, une solution intéressante consiste à associer aux fusibles, des relais à maximum d'intensité légèrement temporisés. Cette disposition permet l'utilisation du contacteur jusqu'à son pouvoir de coupure.

#### Coupages, inversion et déséquilibres de phases

Ces défauts sont détectés grâce à un filtre qui met en évidence les composantes inverses.

La surveillance de la coupure d'une phase ou d'un déséquilibre est importante car ces défauts provoquent :

- dans le stator, une augmentation de courant,
- dans le rotor, un échauffement supplémentaire par effet Joule, dû au fait que tout régime déséquilibré se traduit par l'apparition de courants inverses parcourant le rotor à deux fois la fréquence d'alimentation.

L'inversion de phases est détectée soit par les courants, soit par les tensions:

- par les courants : cette inversion est vue après la fermeture du contacteur, la machine entraînée subit le défaut,
- par les tensions : elle permet d'interdire éventuellement la fermeture du contacteur si le réseau n'a pas son ordre normal de succession des phases.

#### Défaut d'isolement dans le bobinage

Les enroulements statoriques sont susceptibles d'être le siège de défauts entre spires d'une même phase ou entre enroulements de phases différentes.

Suivant la position électrique où le défaut se produit, il peut ne pas être vu assez rapidement par la protection de surcharge et provoquer des détériorations importantes. La détection de ces défauts se fait généralement par comparaison de courants.

■ **protection différentielle longitudinale**  
Elle protège contre les défauts entre enroulements de phases différentes. Pour la réaliser, le moteur doit avoir les extrémités de ses enroulements, côté neutre, accessibles.

Les défauts sont décelés en comparant les courants d'entrée et de sortie d'une même phase (cf. fig. 26).

En l'absence de défaut, ces courants sont identiques et le relais de protection n'est pas sollicité. Il déclenche lorsque la différence entre ces courants atteint une valeur fixée par le réglage du relais.

■ **protection différentielle transversale**  
Elle protège contre les défauts entre spires d'une même phase.

Elle s'applique aux machines à phases divisées, c'est-à-dire comportant deux enroulements par phase.

Le principe de fonctionnement est identique au précédent en comparant les courants de chacun des enroulements (cf. fig. 27).

### Masse stator

Cette protection est indispensable pour répondre au décret du 14.11.1988 sur la protection des travailleurs. Son choix doit être fait en fonction du régime du neutre du réseau alimentant le moteur.

■ **protection moteur alimenté par réseau avec neutre à la terre ou impédant.**

La détection du défaut est faite par la mesure du courant homopolaire qui s'établit entre la phase en défaut et la masse du réseau. Cette mesure est faite par des relais à maximum d'intensité à seuil bas.

Le courant homopolaire est délivré par trois transformateurs de courant en parallèle ou de préférence par un tore (cf. fig. 28).

Ce dernier évite l'apparition d'une fausse composante homopolaire due à la saturation inégale des transformateurs de courant au démarrage du moteur et autorise un seuil de fonctionnement relativement bas.

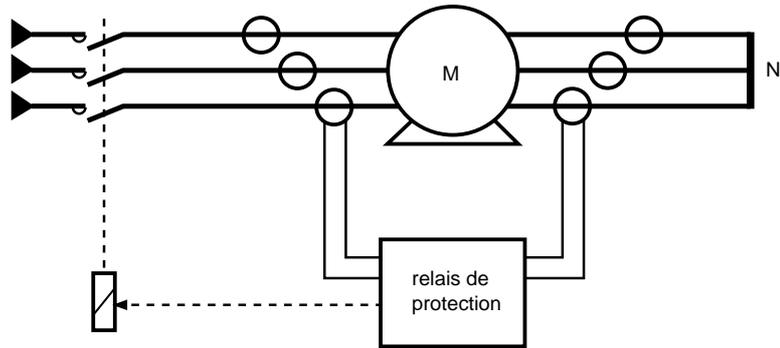


fig. 26 : schéma d'une protection différentielle longitudinale.

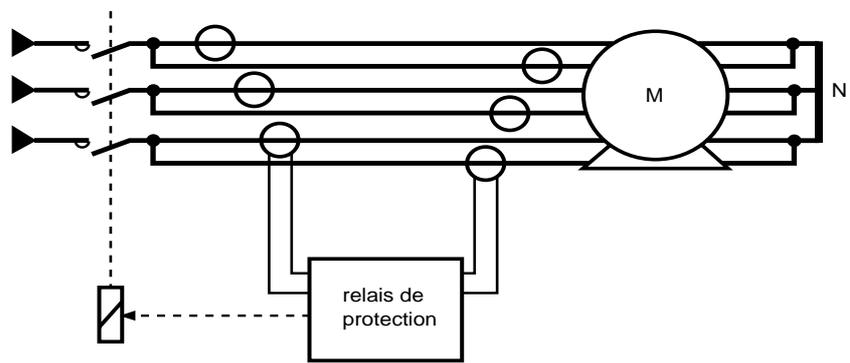


fig. 27 : schéma d'une protection différentielle transversale.

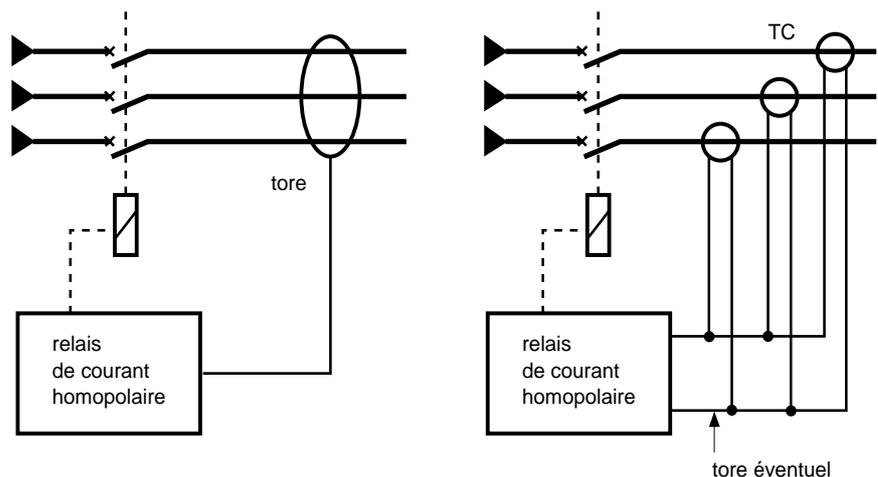


fig. 28 : schéma d'une protection homopolaire masse stator avec capteur torique ou TC + neutre à la terre ou impédant.

Ces relais doivent fonctionner pour une valeur du courant de défaut telle que le potentiel des masses par rapport à la terre ne soit jamais porté à plus de

24 V en milieu conducteur, masses interconnectées ou 50 V dans les autres cas d'installation.

La détermination de ce point de réglage nécessite par conséquent la connaissance de la valeur des prises de terre et du schéma d'interconnexion des masses.

Si les masses ne sont pas interconnectées, la valeur du seuil de fonctionnement est donnée par :

$$I_F \leq \frac{24 \text{ ou } 50 \text{ V}}{R_{TM}}$$

$R_{TM}$  étant la valeur de la résistance de terre de la masse considérée.

A noter que plus le seuil sera bas, plus la détection sera précoce et plus le risque de détérioration des circuits magnétiques sera faible.

#### ■ neutre isolé

La détection du défaut est faite par la mesure permanente de l'isolement global du réseau par rapport à la terre à l'aide de dispositifs à injection de courant continu comme les contrôleurs permanents d'isolement (cf. schéma 1 de la figure 29), ou par des relais à maximum de tension homopolaire délivrée par trois transformateurs de potentiel avec secondaire en triangle ouvert (cf. schéma 2 de la figure 29).

#### Minimum et maximum de tension

(cf. fig. 30)

##### ■ minimum de tension

Cette protection est relativement fréquente ; elle évite au moteur de travailler en surcharge et d'attendre le déclenchement par la protection surcharge. D'autre part, si la bobine du contacteur est alimentée par une source auxiliaire B.T. ne venant pas du réseau, la protection à minimum ou à manque de tension à accrochage devient indispensable pour éviter une mise en route non contrôlée au retour de la tension.

L'information «tension» est donnée par un transformateur de potentiel et traitée par un dispositif à seuil et temporisable.

##### ■ maximum de tension

Cette protection est à prévoir lorsque de fortes variations peuvent se produire sur le réseau d'alimentation. Elle évite d'attendre le fonctionnement des relais de surcharge car un maximum de tension se traduit par une surintensité du moteur et un accroissement du couple moteur pouvant être néfaste pour la machine entraînée.

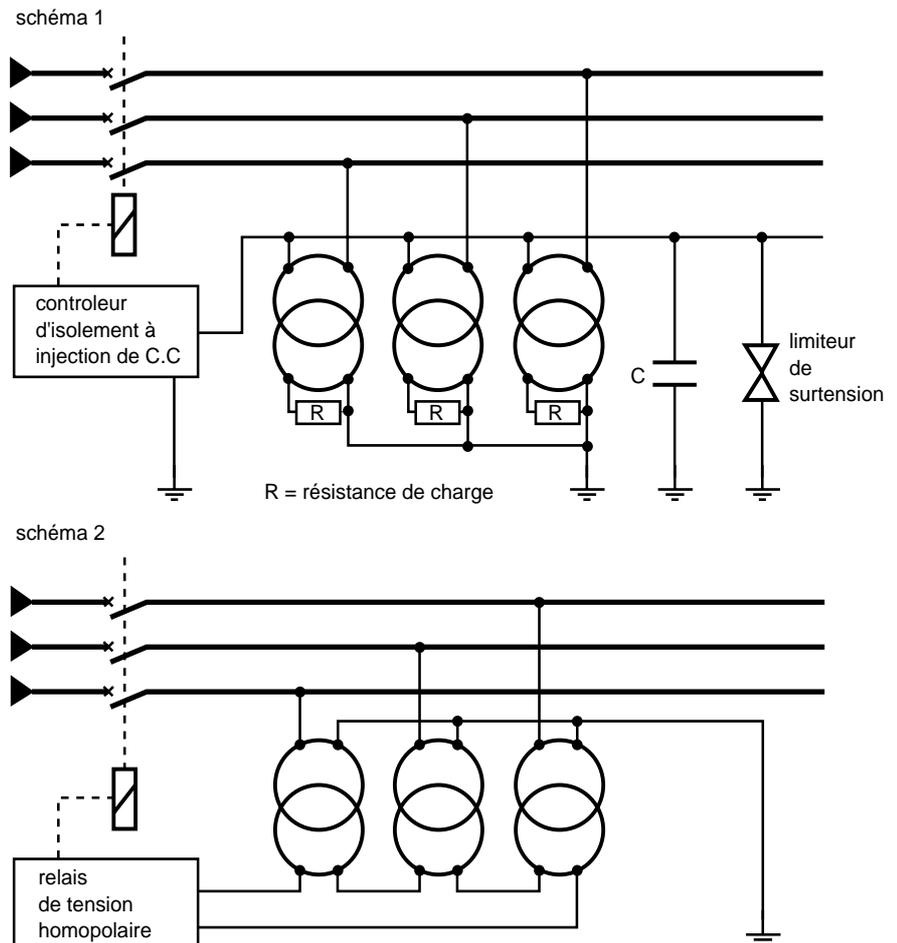


fig. 29 : schéma de contrôle des défauts d'isolement avec contrôleur permanent d'isolement ou relais de tension homopolaire - neutre isolé.

La détection est faite par des relais de mesure à maximum de tension temporisés.

#### Démarrage incomplet ou trop long

Cette protection se justifie pour un démarrage en plusieurs temps.

Elle est réalisée par un relais temporisé mis en route au début du démarrage et éliminé à la fin. La grandeur contrôlée peut être la vitesse ou le courant.

L'utilisation prolongée du système de démarrage, calculé pour fonctionner pendant un temps donné, est ainsi évitée.

#### Rupture de synchronisme

Il s'agit d'une protection importante pour les moteurs synchrones.

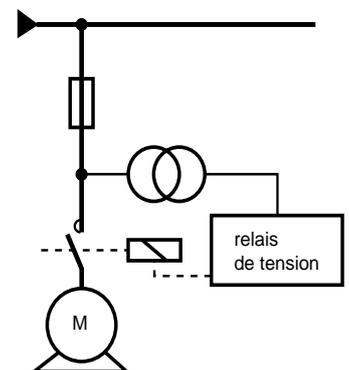


fig. 30 : schéma de la protection mini et maxi de tension. Le plus souvent deux TP fournissent les tensions composées du relais.

En effet, la cage d'amortissement d'un moteur synchrone est relativement fragile : si le moteur décroche, cette cage est le siège de courants induits qui risquent de la détruire si le moteur n'est pas déconnecté.

Ce décrochage peut se produire à la suite d'une surcharge mécanique, d'un minimum de tension, d'un manque ou d'une baisse d'excitation.

La détection de ce défaut est faite par des relais à minimum d'impédance ou de facteur de puissance alimentés par des transformateurs de potentiel et par des transformateurs de courant (cf. fig. 31).

### Perte d'excitation

Cette perte due, par exemple, à une rupture de l'enroulement rotorique provoque le décrochage du moteur. Elle peut être détectée :

- soit par la protection «rupture de synchronisme» décrite précédemment,
- soit par un relais à minimum de tension ou à minimum de courant d'excitation.

### Masse rotor d'un moteur synchrone

Cette protection est à déterminer en fonction du schéma d'alimentation et du mode de production du courant continu.

Si l'ensemble du circuit d'excitation courant continu est isolé de la masse, un défaut d'isolement n'affecte pas le fonctionnement du moteur.

Mais si un deuxième défaut se produit, il peut provoquer une surcharge ou un court-circuit avec toutes ses conséquences. Les relais de détection de ce défaut sont, en général, des appareils à injection de courant alternatif basse fréquence 10 Hz ou 20 Hz (cf. fig. 32).

La fréquence de 50 Hz est aussi employée mais elle impose de ne pas avoir de composantes à 50 Hz dans le circuit d'excitation.

### Marche prolongée en asynchrone au démarrage

Sur les moteurs synchrones, une durée de démarrage trop longue provoque un échauffement exagéré de la cage d'amortissement.

On utilise la protection «démarrage incomplet» décrite précédemment ou un dispositif thermique adapté à la

constante de temps thermique du rotor, placé en série avec l'inductance pendant le démarrage (cf. fig. 32 élément b).

### Surcharge et court-circuit dans l'enroulement d'excitation

Ces protections évitent la détérioration par échauffement de l'enroulement d'excitation et de son alimentation. La détection est faite par un relais à maximum de courant d'excitation.

De plus, on emploie généralement un relais à minimum de tension d'excitation fonctionnant sur baisse de tension, provoquée par exemple par un court-circuit.

Au démarrage, il est utilisé comme relais de présence de tension d'excitation et autorise la fermeture du contacteur d'excitation à la fin du démarrage en asynchrone (cf. fig. 32 élément g).

### Retour de puissance

Cette protection s'applique plus particulièrement aux moteurs synchrones.

Lors d'un déclenchement du disjoncteur d'alimentation, elle évite le

renvoi d'énergie sur les charges branchées sur le même jeu de barres. Elle empêche également qu'un défaut sur ce jeu de barres soit alimenté par le moteur.

La protection doit détecter une inversion du sens du courant ou de la puissance. Elle s'effectue donc par relais directionnel de puissance (cf. fig. 33).

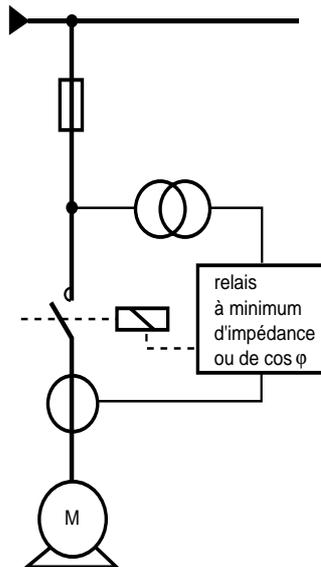
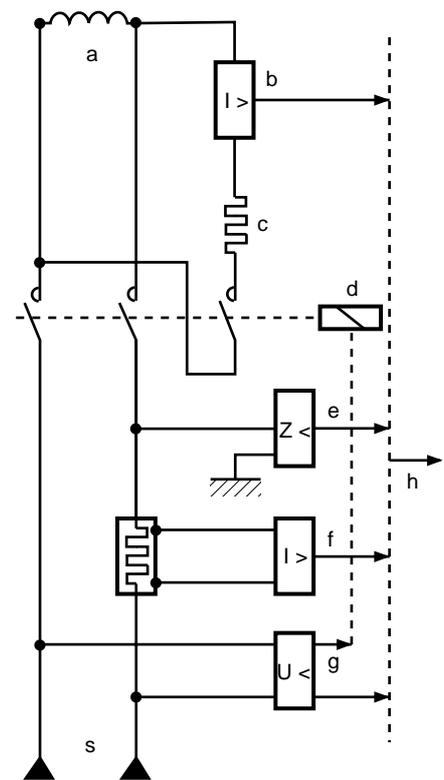


fig. 31 : protection contre la rupture de synchronisme.



- a. enroulement d'excitation
- b. protection thermique : marche prolongée en asynchrone
- c. résistance de démarrage
- d. contacteur d'excitation
- e. protection masse rotor
- f. protection à maximum d'intensité
- g. protection à minimum de tension
- h. vers déclenchement du contacteur départ moteur
- s. source continue

fig. 32 : protections du rotor au démarrage et en fonctionnement.

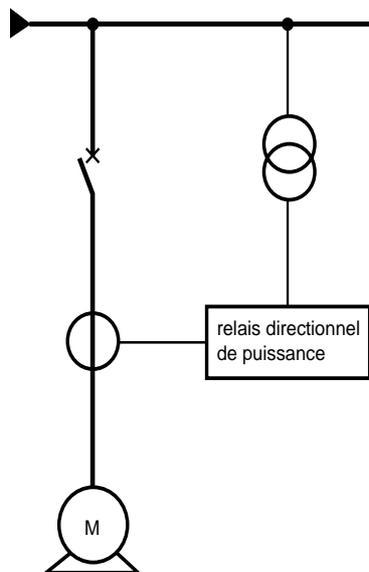


fig. 33 : protection contre le retour de puissance.

### Démarrages fréquents

Un trop grand nombre de démarrages dans un temps déterminé peut conduire à la détérioration d'un moteur si celui-ci n'est pas dimensionné pour ce service.

Cette protection est réalisée par un relais qui assure des fonctions de comptage et de temporisation et limite automatiquement :

- soit le nombre de démarrages dans un intervalle de temps donné,
- soit l'espacement de ces démarrages dans le temps.

### Blocage rotor

Le blocage d'un moteur pour une cause mécanique, provoque une surintensité sensiblement égale au courant de démarrage. L'échauffement qui en résulte est beaucoup plus important car les pertes dans le rotor sont maintenues à leur valeur maximale durant tout le blocage et la ventilation est supprimée si celle-ci est liée à la rotation du rotor. En conséquence, lorsque ce défaut mécanique risque de se produire, la protection « blocage rotor » est nécessaire car les relais de surcharge répondent parfois avec un temps trop long.

La détection de défaut est faite par un relais ampèremétrique réglé à une valeur inférieure au courant de démarrage qui est validée après une temporisation démarrée à la mise sous tension du moteur ; cette temporisation est réglée à une valeur supérieure ou égale à la durée normale du démarrage.

### Minimum d'intensité ou de puissance

Une pompe en se désamorçant peut se détériorer. Lorsque ce fonctionnement se produit, il provoque une diminution de la puissance active absorbée par le moteur. Un relais à minimum de courant protège contre ce défaut.

### évolution technologique

Dans la description des différentes protections qui vient d'être faite, le terme « relais » est souvent employé. C'est une habitude de langage (relais = un type de protection) qui correspond à l'époque durant laquelle protéger un moteur nécessitait l'emploi de « relais » séparés dédiés à une seule fonction de protection.

Dans les années 70, les constructeurs ont commercialisé des RACKS capables de recevoir plusieurs protections différentes dans un souci de souplesse d'adaptation au besoin.

Depuis les années 80, la technologie numérique a encore augmenté les possibilités d'adaptation ; ainsi un seul et unique dispositif programmable permet de réaliser les diverses fonctions de protection et contrôle-commande qui nécessite chaque cas particulier.

# annexe 1 : détermination du mode de démarrage d'un moteur

Le but de l'exemple suivant n'est pas de traiter complètement un problème mais d'illustrer, de façon concrète, une démarche guidant au choix d'un mode de démarrage.

## hypothèses de calcul

- Moteur asynchrone de :
- puissance nominale  $P_n = 1\,500$  kW
  - tension nominale  $U_n = 5\,500$  V
  - rendement x facteur de puissance :  $\eta \times \cos \varphi = 0,84$
  - rapport couple de démarrage sur couple nominal à pleine tension :

$$\frac{C_d}{C_n} = 0,8$$

- rapport courant de démarrage sur courant nominal à pleine tension :

$$\frac{I_d}{I_n} = 5$$

- couple de décollage de la machine entraînée :  $0,2 C_n$
  - puissance de transformateur principal d'alimentation :  $P_t = 3$  MVA
  - appel maximal de puissance apparente autorisé par le réseau du transformateur :  $S_t = 6$  MVA.
- Autres données nécessaires au calcul :
- caractéristique couple-vitesse  $C(N)$  du moteur
  - caractéristique couple résistant vitesse  $C_r(N)$  de la machine entraînée
  - débit du transformateur sur les départs autres que celui du moteur :  $1\,200$  kVA sous  $\cos \varphi' = 0,87$ .

## démarche globale

La démarche du concepteur est de rechercher le meilleur choix technico-économique. Pour ce faire, il convient d'essayer de valider d'abord la solution la plus simple et économique ; et si elle ne convient pas, de suivre l'ordre correspondant au tableau de la figure 34.

### Démarrage direct

Puissance apparente du moteur au début du démarrage :

$$S_m = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{I_d}{I_n}$$

$$= \frac{1\,500}{0,84} \cdot 5 = 8\,925 \text{ kVA}$$

avec, comme facteur de puissance au démarrage :  $\cos \varphi_d = 0,15$   
soit :  $\varphi_d = 81^\circ$

Cette puissance s'ajoute vectoriellement à celle que débite le transformateur sur les autres départs (cf. fig. 35).

On déduit graphiquement la valeur totale de la puissance apparente demandée au transformateur :

$$S \approx 9\,580 \text{ kVA}$$

L'appel maximum autorisé étant de  $6\,000$  kVA, le démarrage direct n'est pas possible.

### Démarrage par réactance

L'introduction d'une réactance permet de réduire la puissance apparente absorbée par le moteur.

La puissance disponible pour le démarrage est déterminée graphiquement (cf. fig. 35).

Au démarrage du moteur, la présence de la réactance fait que le facteur de puissance est voisin de zéro. Donc  $\varphi_d \approx 90^\circ$ .

$\vec{OA} = 1\,200$  kVA : puissance du transformateur utilisée sur d'autres départs.

$\vec{OB} = S_t = 6\,000$  kVA : puissance apparente maximale autorisée.

La puissance apparente disponible pour le démarrage (moteur + réactance) est déduite graphiquement

$$\vec{AB} = S_d = 5\,300 \text{ kVA}$$

Réduction de puissance que doit amener la réactance :

$$\frac{S_d}{S_m} = \frac{5\,300}{8\,925} \approx 0,6$$

$I'_d$  nouvelle valeur du courant de démarrage.

$$S_d = U_n \cdot I'_d \cdot \sqrt{3}$$

$$S_m = U_n \cdot I_d \cdot \sqrt{3}$$

$$\text{donc : } I'_d = 0,6 \cdot I_d$$

$$\text{D'autre part } \frac{I'_d}{I_d} = \frac{U_d}{U_n} = 0,6.$$

### solutions de démarrage

direct

réactance

autotransformateur

### critères principaux d'acceptation

appel de puissance compatible avec le réseau

- couple de démarrage supérieur au couple de décollage
- pointe de courant (lors du retour à pleine tension) acceptable par le réseau

idem

fig. 34 : critères déterminants du mode de démarrage d'un moteur.

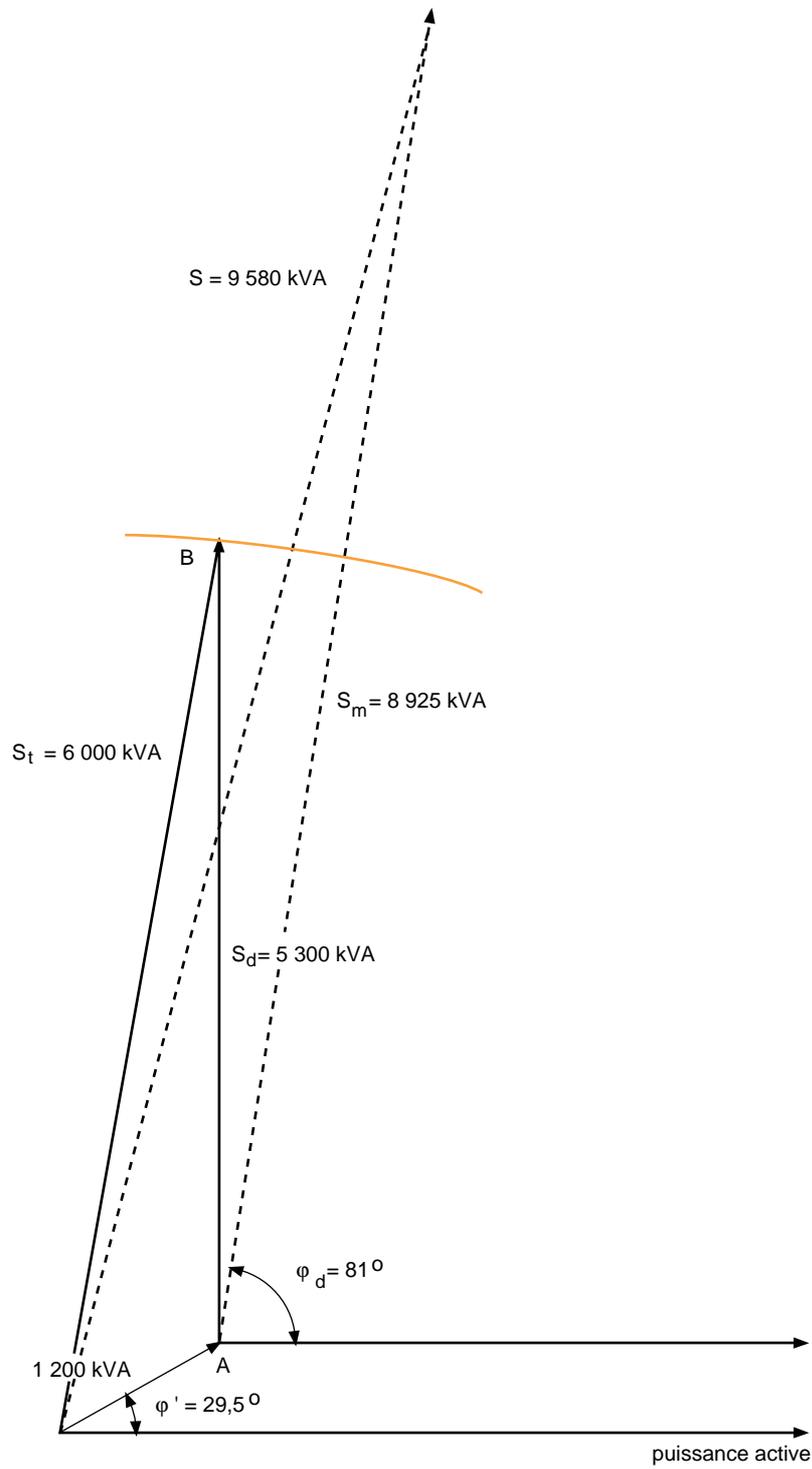


fig. 35 : diagramme des puissances de démarrage.

La tension aux bornes du moteur a pour valeur  $U_d = 0,6 U_n$ . Le problème étant résolu au point de vue électrique il reste à vérifier si cette solution est valable du point de vue mécanique. Pour le démarrage direct le couple au démarrage est égal à :  $C_d = 8 C_n$  (cf. fig. 36).

Pour le démarrage par réactance : le couple est de démarrage  $C'_d$  est égal à :

$$C'_d = 0,8 C_n \cdot \left( \frac{U_d}{U_n} \right)^2 = 0,288 C_n$$

Cette valeur est compatible avec le couple de décollage de la machine entraînée.

Un dernier point reste à contrôler : si le point d'équilibre mécanique  $C_m = C_r$  est situé à une vitesse trop faible, le passage à pleine tension risque de s'effectuer avec une pointe de courant. Si celle-ci est trop élevée pour le réseau, elle amène à reconsidérer le mode de démarrage et à choisir, par exemple, le démarrage par autotransformateur (cf. fig. 36).

#### Remarque 1

Supposons que le couple de décollage de la machine entraînée ait pour valeur  $0,35 C_n$  au lieu de  $0,2 C_n$ . Le démarrage par réactance devient incompatible avec le couple de décollage.

Il faut alors envisager la solution du démarrage par autotransformateur.

La puissance apparente disponible reste  $S_d = 5\,300$  kVA.

De cette valeur, est à déduire la puissance magnétisante de l'autotransformateur  $S_{mg}$  qui, au premier instant de démarrage, s'ajoute arithmétiquement à la puissance apparente du moteur.  $S_{mg}$  est de l'ordre de 0,2 à 0,4 fois la puissance nominale apparente du moteur.

Soit avec le coefficient 0,4 :

$$S_{mg} = 0,4 \cdot \left( \frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi} \right)$$

$$S_{mg} = 0,4 \cdot \frac{1500}{0,84} = 720 \text{ kVA}$$

Le coefficient de réduction de puissance devient alors :

$$\frac{S_d - S_{mg}}{S_m} = \frac{5\,300 - 720}{8\,925} \approx 0,513$$

A tension constante  $U_n$ , l'appel de courant côté réseau est donc :  $0,513 I_d$ .

Détermination de la tension réduite de démarrage  $U_d$ .

L'égalité des puissances primaires et secondaires de l'autotransformateur permet d'écrire :

$$0,513 \cdot I_d \cdot U_n = I''_d \cdot U_d$$

$I''_d$  courant de démarrage à tension réduite côté moteur

$$0,513 \cdot I_d \cdot U_n = I_d \cdot \frac{U_d}{U_n} \cdot U_d$$

$$\text{d'où : } \left( \frac{U_d}{U_n} \right)^2 = 0,513$$

soit  $U_d = 0,718 \cdot U_n$

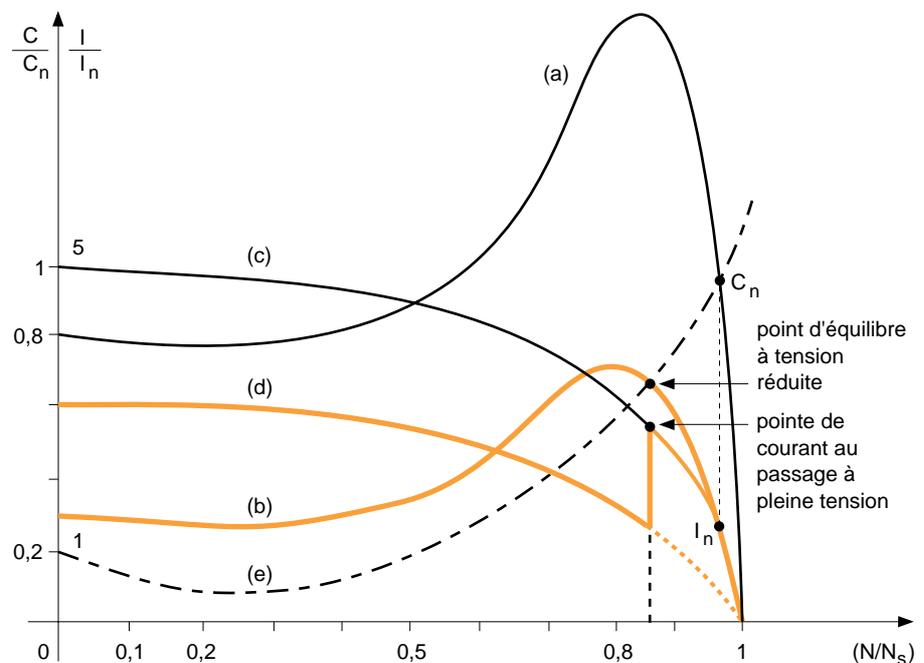
Nouveau couple de démarrage :

$$0,8 C_n \cdot \left( \frac{U_d}{U_n} \right)^2 = 0,41 C_n$$

Cette valeur est suffisante pour permettre au démarrage de s'effectuer.

#### Remarque 2

Pour un couple de décollage supérieur à  $0,41 C_n$ , le démarrage statique avec ce moteur n'est plus possible. Il est nécessaire d'utiliser soit un moteur à rotor bobiné avec démarrage rotorique, soit un moteur à cage spécialement adaptée possédant un fort couple au démarrage.



- a : courbe C (N) à pleine tension
- b : courbe C (N) à tension réduite ( $0,6 U_n$ )
- c : courbe I (N) à pleine tension
- d : courbe I (N) à tension réduite ( $0,6 U_n$ )
- e : courbe  $C_r$  (N)

fig. 36 : courbes de couple et d'intensité pour démarrage par réactance.

## annexe 2 : coordination des protections

Lorsque le choix des protections en fonction des exigences d'exploitation est fait, il faut assurer leur coordination afin de les utiliser au mieux de leurs possibilités. Un équilibre doit être recherché entre un déclenchement intempestif et un retard à l'élimination d'un défaut. L'étude des courbes  $t(I)$  des relais, du coupe-circuit et du pouvoir de coupure du contacteur résout le problème de coordination des protections. Les caractéristiques du moteur traité dans l'exemple figuré sont les suivantes :

- $P_n = 550 \text{ kW}$ ,
- $U_n = 3150 \text{ V}$ ,
- $I_n = 130 \text{ A}$ ,
- $I_d = 5 I_n$ .

Le contacteur est du type /Rollarc-fusible.

### Nature des protections :

- relais thermique à déclenchement indirect, réglé à  $I_n = 130 \text{ A}$  pour les surcharges,
- relais à composante directe réglé à  $6 I_n$ , temporisé à  $0,05 \text{ s}$  pour les défauts équilibrés,
- relais à maximum de composante inverse réglé à  $0,3$  ou  $0,4 I_n$ , temporisé à  $0,6 \text{ s}$ .

Dans le cas d'un réseau avec des déséquilibres quasi-permanents, on utilise un relais à deux seuils :

- un seuil bas temporisé, réglé juste au dessus des taux de composante inverse admis en permanence,
- un seuil haut instantané contre la coupure de phase.

Le déclenchement instantané par le relais à composante directe permet d'utiliser le contacteur au mieux de son pouvoir de coupure et évite la fusion du coupe-circuit. L'analyse des courbes de la figure 37 montre que le moteur et le réseau sont protégés contre :

- les déséquilibres de  $0,3 I_n$  à  $10 I_n$  environ,
- les défauts équilibrés de  $6 I_n$  à  $28 I_n$ .

Les fusibles interviennent seulement au delà de  $15 I_n$  pour les défauts déséquilibrés et de  $25 I_n$  pour les défauts équilibrés.

Le courant maximal que le contacteur peut être amené à couper a pour valeur :  $28 I_n = 3640 \text{ A}$ . Cette valeur reste très inférieure à son pouvoir de coupure de  $10 \text{ kA}$ .

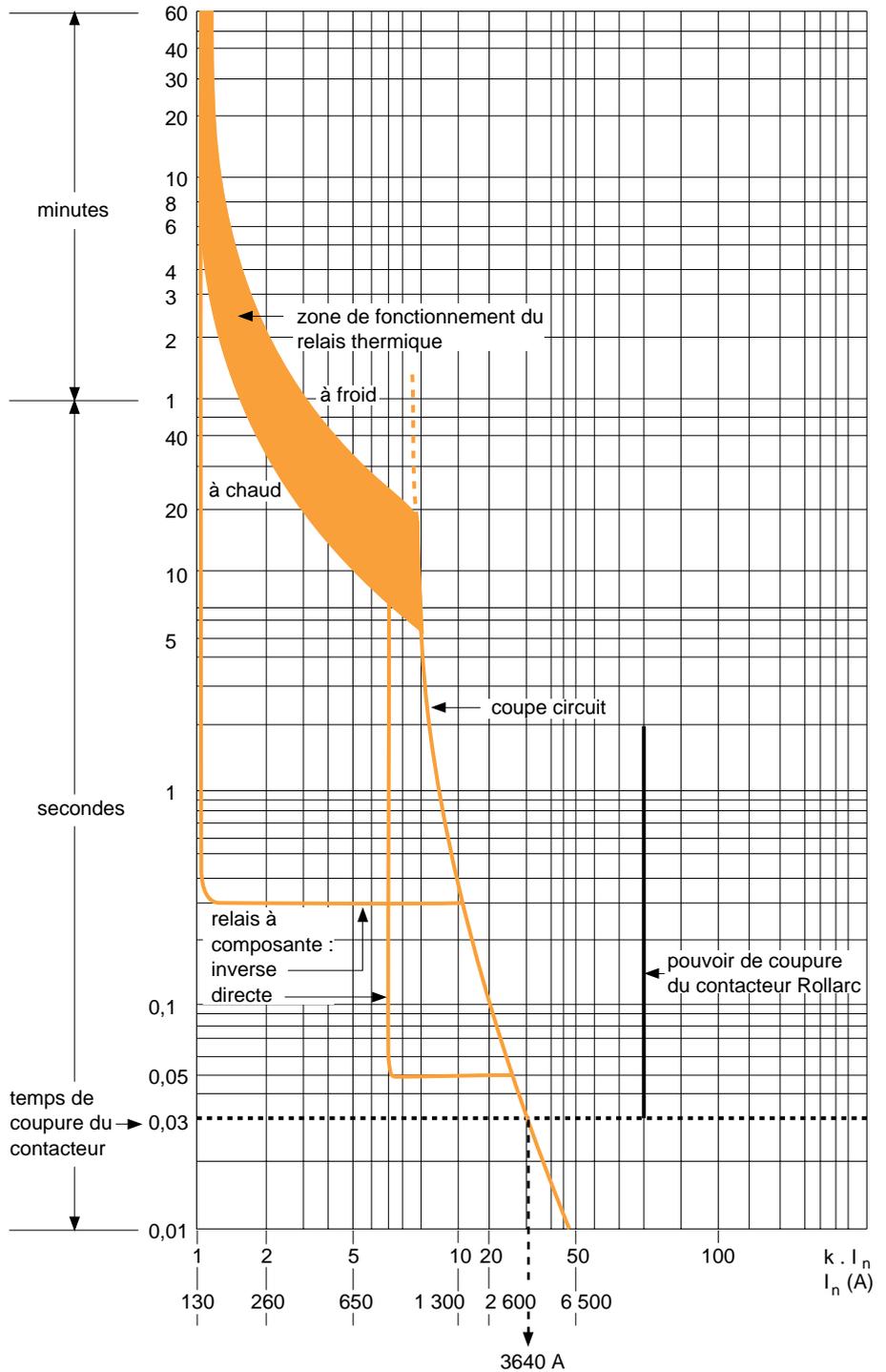


fig. 37.

