

Cahier Technique N°9 Protection des moteurs électriques



MICROENER

SOMMAIRE

INTRODUCTION :	4
CLASSEMENT DES MOTEURS:	5
FLUX TOURNANT TRIPHASE :	6
Application au moteur asynchrone :	8
Application au moteur synchrone :	9
TECHNOLOGIE DES MOTEURS :	10
Moteurs asynchrones :	10
Moteurs synchrones :	11
Utilisation des moteurs :	11
LES DEMARRAGES :	13
LES GRANDEURS ELECTRIQUES ASSOCIEES AUX MOTEURS :	17
Moteur au démarrage :	17
Mise sous tension :	19
Anomalies à la mise sous tension :	21
Moteur en fonctionnement :	23
L'échauffement	23
Définition des constantes thermiques :	27
Echauffement (du rotor) dû à la composante inverse :	31
Flux rémanent des moteurs asynchrones	34
Utilisation des moteurs :	36
COMPORTEMENT DU MOTEUR EN PRESENCE D'UN DEFAUT :	37
Cas du moteur asynchrone :	37
Cas du moteur synchrone :	38
Calcul des courants de défaut	39
Calcul de la chute de tension au démarrage et à la réaccélération :	43
PROTECTION DES MOTEURS :	46
Protection contre les surcharges thermiques :	47
Protection par mesure directe de température (F23) :	47
Protection par image thermique (F49) :	48
Protection les déséquilibres de courant (F46) les coupures de phase / inversion de phases (F47)	51
Protection contre un court-circuit entre phases (F50/51) :	52
Protection contre des défauts phase-terre (F50N/51N, F64, F67N) :	53
Neutre direct à la terre :	53
Neutre à la terre par une impédance :	54
Neutre isolé :	55
Protection contre un démarrage trop long ou un rotor bloqué :	58
Démarrage trop long (F48):	58
Rotor bloqué (F51LR):	59
Protection contre les démarrages trop fréquents (F66) :	62
Protection contre le désamorçage des pompes (F37) :	62
Protections complémentaires pour les moteurs de forte puissance :	63
Protection à minimum de tension (F27-1) :	63
Protection de tension rémanente (F27-2) :	63
Protection à minimum de tension directe (F27d) :	63
Protection à maximum de tension(F59/F59d) :	64
Protection à minimum de fréquence (F81U) :	64
Protection à maximum de fréquence (F81U) :	64

Protections spécifiques au moteur synchrone :	65
Protection contre les pertes de synchronisme (F78) :	65
Protection contre la perte d'excitation (F40) :	65
Protection contre un fonctionnement en alternateur (F32) :	66
Protection contre la mise à la masse du rotor (F64R) :	67
Protection contre $\cos \varphi$ incorrect (F55) :	67
Problèmes liés aux permutations de source (réseau avec des moteurs).....	67

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 4 sur 69

INTRODUCTION :

Pour effectuer les différentes fonctions de protection il est nécessaire de disposer d'un maximum d'informations sur les caractéristiques du moteur.

Celles-ci peuvent être connues auprès du Constructeur de moteurs ou à défaut par la lecture des plaques signalétiques. Les renseignements, dans ce dernier cas sont obligatoirement fragmentaires.

❖ Les données Constructeur :

- * Puissance nominale du moteur.
- * Tension d'utilisation.
- * Type de Service.
- * Classe de l'isolant.
- * Surcharge permanente admissible.
- * Courant nominal.
- * Cos φ nominal.
- * Rendement η nominal.
- * Courant de démarrage.
- * Temps de démarrage.
- * Temps où le rotor peut rester bloqué.
- * Nombre de démarrages autorisés à froid.
- * Dans un temps de référence à froid.
- * Temps d'attente entre deux démarrages consécutifs à froid.
- * Nombre de démarrages autorisés à chaud.
- * Dans un temps de référence à chaud.
- * Temps d'attente entre deux démarrages consécutifs à chaud.
- * Constante de temps thermique à l'échauffement.
- * Constante de temps thermique au refroidissement.
- * Courant inverse permanent admissible.
- * Courant inverse temporaire admissible pendant un temps de référence.
- * Cas des pompes : courant et cosinus φ à vide, courant minimal d'utilisation.
- * Pour les calculs d'apport de courant de défaut voir chap.6.

❖ Les données Fournisseur d'énergie sur l'alimentation :

- * Puissance de court-circuit maximum entre phases du réseau.
- * Puissance de court-circuit minimum entre phases du réseau.
- * Puissance de court-circuit maximum phase-terre du réseau.
- * Puissance de court-circuit minimum phase-terre du réseau.
- * Taux de déséquilibre (en tension) maximum garanti.

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 5 sur 69

❖ Les données des plaques signalétiques :

a) Plaque signalétique du moteur :

- * Tension nominale d'utilisation.
- * Soit la puissance active «électrique» exprimée en watt avec indication du $\cos \varphi$, du rendement η et éventuellement du courant de démarrage.
- * Soit la puissance «mécanique» exprimée en CV avec indication du $\cos \varphi$, du rendement η et éventuellement du courant de démarrage.
- * Soit la totalité des renseignements ci-dessus.

b) Plaque signalétique des transformateurs de courant:

Rapport de transformation : I_{np} / I_{ns}

➤ Exemple 1:

60 / 5 A ce qui signifie que :

- le courant nominal primaire(I_{np}) du transformateur de courant est de 60 A,
- le courant nominal secondaire(I_{ns}) du transformateur de courant est de 5 A.

Puissance et Classe de Précision

➤ Exemple 2:

15 VA classe 5 P 20 ce qui signifie que :

- l'erreur composée (angle + rapport) de précision sera de 5% à 20 fois le courant nominal (soit $5 \times 20 = 100$ A) sur une charge de 15 VA (soit une résistance équivalente de $15/5^2 = 0.6 \Omega$).

CLASSEMENT DES MOTEURS:

Ne seront évoqués ci-après que les moteurs alimentés par du courant alternatif triphasé (principalement à Service Continu), sont donc exclus les moteurs à courant continu ou à alimentation par courant alternatif monophasé.

Les moteurs sont classés par :

- * Niveau de tension (donc puissance).
 - * Principe de moteur (asynchrone & synchrone).
- BT: $U < 400$ V, S_n théorique < 132 kW, S_n pratique < 150 kW ou 200 CV = moteur asynchrone.

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 6 sur 69

MT: $400\text{ V} < U < 20\text{ kV}$ (en pratique de 2 à 6.6 kV)
 $100\text{ kW} < S_n \text{ théorique} < 2\text{ MW}$ ou 2700 CV,
 $S_n \text{ pratique maximum} < 3.5\text{ MW}$
 ou 4700 CV = moteur asynchrone.

MT: $400\text{ V} < U < 20\text{ kV}$ (en pratique de 2 à 6.6 kV)
 $S_n \text{ théorique} > 2\text{ MW}$ ou 2700 CV,
 $S_n \text{ pratique minimum} > 1.5\text{ MW}$ ou 2000 CV = moteur synchrone.

Nota:

Il y a recouvrement entre les puissances, car d'autres considérations sont à prendre en compte :

➤ **Exemple :**

- on dispose au point d'alimentation de MT.
- nécessité de compenser l'énergie réactive.
- groupe convertisseur.

Conclusion :

$2\text{ MW} > S_n$ = moteur asynchrone (BT ou MT suivant puissance)
 = coût réduit d'achat
 = rendement de 0.8 à 0.9

$S_n > 2\text{ MW}$ = moteur synchrone (MT)
 = plus onéreux à l'achat
 = rendement de 0.95

FLUX TOURNANT TRIPHASE :

- Réalisé avec 3 inductions sinusoïdales triphasées dans le même plan dont les directions sont fixes dans l'espace et décalées de 120° .

- Les expressions algébriques sont :

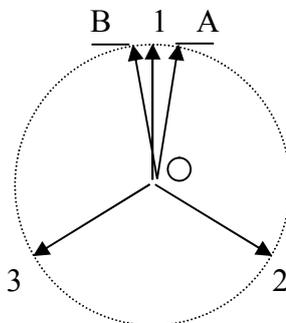
$$b_1 = B_m \sin \omega t$$

$$b_2 = B_m \sin \omega t - 2\pi/3$$

$$b_3 = B_m \sin \omega t - 4\pi/3$$

Au même instant, chaque vecteur induction est représenté par les graphiques ci-dessous :

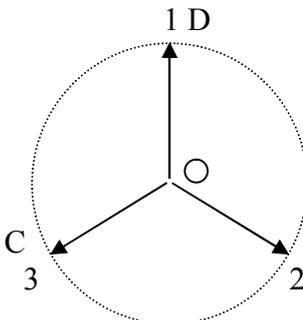
b1 à l'instant $t = \pi/2\omega$



$$b1 = B_m \sin \omega t = B_m \sin \pi/2 = B_m$$

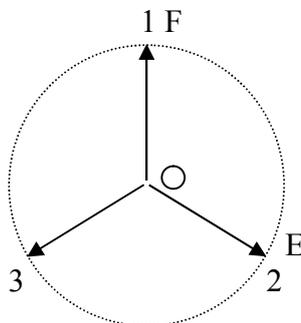
On peut remplacer b1 par 2 vecteurs circulaires OB et OA d'amplitude $B_m/2$ (vecteurs en phase à l'instant $t = \pi/2\omega$) et de vitesse angulaire ω .

b2 à l'instant $t = \pi/2\omega$
(au même instant)



On peut remplacer b2 par 2 vecteurs circulaires OD et OC d'amplitude $B_m/2$

b3 à l'instant $t = \pi/2\omega$
(au même instant)



On peut remplacer b3 par 2 vecteurs circulaires OF et OE d'amplitude $B_m/2$

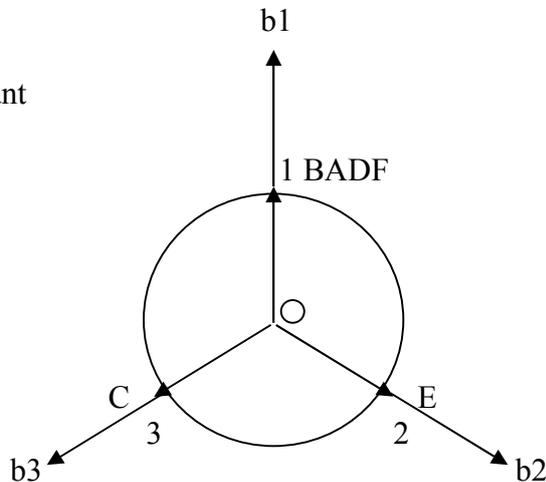
Les 3 inductions au même instant

$$b_1 = B_m \sin \omega t$$

$$b_2 = B_m \sin \omega t - 2\pi/3$$

$$b_3 = B_m \sin \omega t - 4\pi/3$$

b_1, b_2, b_3 à l'instant $t = \pi/2\omega$
(au même instant)



Conclusion :

- Les 3 inductions circulaires OB, OC, OE s'annulent.
- Les 3 inductions circulaires OA, OD, OF coïncident, leur somme est égale à $3/2 B_m$.
- Même résultat quel que soit l'instant d'observation.
- La somme en un point suivant trois directions décalées de 120° de 3 inductions sinusoïdales triphasées est une induction circulaire tournante.

Pour les moteurs 2 types de machines sont utilisés:

Application au moteur asynchrone :

Le moteur asynchrone est un moteur dont le rotor tourne à une vitesse différente du champ statorique, celle-ci est fonction de la charge mécanique résistante opposée au couple moteur. Le rotor d'un moteur asynchrone est soit un bobinage fermé sur lui-même (sauf au démarrage où pour certains types de démarrage, il peut être refermé sur une résistance) soit des barres de cuivre réparties axialement sur la périphérie du rotor et réunies en parallèles par deux couronnes circulaires frontales (moteurs dits «à cage d'écureuil»).

Le principe de fonctionnement est le suivant :

Au démarrage, le moteur se comporte comme un transformateur triphasé et des courants prennent naissance dans l'induit rotorique fermé sur lui-même. Ces courants se repoussent (loi de Laplace) et le rotor se met à tourner. Au fur et à mesure que le rotor accélère, la vitesse relative avec le champ statorique inducteur diminue, la fréquence et l'amplitude des courants induits diminuent, ce qui a pour effet de diminuer le couple moteur.

Le moteur même à vide, ne peut jamais atteindre la vitesse de synchronisme pour laquelle le couple moteur parfaitement nul ne pourrait compenser les pertes mécaniques.

Pour un couple résistant donné, un équilibre s'établit, à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme, entre les couples moteurs et résistants.

Le glissement gl (en %) est :

$$gl = \frac{V_{synchronisme} - V_{moteur}}{V_{synchronisme}} * 100$$

Quand la charge mécanique résistante, appliquée au rotor, augmente, le couple moteur augmente en même temps jusqu'à un maximum au-delà duquel le moteur «décroche» et s'arrête.

Ce point de décrochage est situé entre 5 et 10% de gl .

Application au moteur synchrone :

Le stator d'un moteur synchrone, parcouru par des courants déphasés les uns par rapport aux autres, crée un champ magnétique tournant (comme pour le moteur asynchrone).

Le champ inducteur créé (par le stator) tourne à la vitesse de synchronisme ω . Pour que le rotor tourne à la même vitesse que le champ inducteur, le rotor doit créer un champ magnétique «entraîné» par le champ statorique. Ce champ rotorique est créé par un courant continu dit courant d'excitation.

Le rotor d'un moteur synchrone tourne en synchronisme rigoureux avec le champ produit par le stator. Les variations du couple résistant n'ayant pour effet qu'une oscillation pendulaire du rotor autour de la position d'équilibre si la puissance du moteur tolère une augmentation importante de puissance, soit si le moteur ne peut la tolérer une perte de synchronisme («décrochage»).

Les oscillations pendulaires sont réduites par le montage d'amortisseurs (de «Leblanc»).

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 10 sur 69

TECHNOLOGIE DES MOTEURS :

Les moteurs comprennent 2 parties :

* le stator qui comprend :

- le circuit magnétique qui canalise le champ magnétique, il est réalisé en tôles feuilletées, isolées entre elles.
- la carcasse dont le rôle est purement mécanique.
- le bobinage triphasé.

* le rotor qui tourne à la même vitesse que le champ statorique (cas du moteur synchrone) ou moins vite (cas du moteur asynchrone) comprend :

- le circuit magnétique qui doit être en tôles feuilletées, isolées entre elles, dans le cas du moteur asynchrone (à cause des courants de Foucault induits par la différence de vitesse rotor/stator), et massif dans le cas du moteur synchrone).
- l'enroulement rotorique qui est relié au courant d'excitation (cas du moteur synchrone), il peut n'être relié à aucune source extérieure et fermé sur lui-même (cas du moteur asynchrone).

Il existe 2 types de rotor :

* Rotor à cage d'écureuil dont la partie magnétique est réalisée par l'assemblage de tôles circulaires isolées.

Le bobinage est constitué par des barres en aluminium court-circuitées par 2 couronnes.

* Rotor bobiné à enroulements triphasés en étoile qui en marche normale sont court-circuités.

Ces enroulements peuvent être reliés à des bagues frottant sur 3 balais de manière à pouvoir insérer des résistances au démarrage (démarrage «rotorique»).

Moteurs asynchrones :

Pour les moteurs asynchrones, il existe deux types de rotor : à «cage d'écureuil» ou bobiné.

a) Le rotor à simple cage :

Il est caractérisé par :

- * Variation de vitesse faible = 2%.
- * Couple de démarrage = 0.5 à 0.9*couple nominal.
- * Couple maximum = 3.5*couple nominal.
- * Courant de démarrage Idém = 4 à 6*courant nominal.
- * Cos φ nominal (charge nominale) = 0.8 à 0.9.
- * Rendement η (charge nominale) = 0.9.

b) Le rotor à double cage (ou encoches profondes) :

Il est caractérisé par :

- * Variation de vitesse faible = 2%.
- * Couple de démarrage = 2*couple nominal.
- * Couple maximum = 2*couple nominal.
- * Courant de démarrage Idém = 5 à 7*courant nominal.
- * Cos φ nominal (charge nominale) = 0.8 à 0.9.
- * Rendement η (charge nominale) = 0.9.

c) Le rotor bobiné en court-circuit :

Il est caractérisé par :

- * Variation de vitesse faible = 2%.
- * Couple de démarrage = 2*couple nominal.
- * Couple maximum = 2*couple nominal.
- * Courant de démarrage Idém = dépend du type de démarrage (voir ci-après).
= 3 à 8*courant nominal.
- * Cos φ nominal (charge nominale) = 0.8 à 0.9.
- * Rendement η (charge nominale) = 0.9.

Moteurs synchrones :

Les moteurs synchrones ont un rotor bobiné qui reçoit un courant (continu) d'excitation (généralement à diodes tournantes évitant l'inconvénient des bagues et balais) caractérisés par:

- * Pas de variation de vitesse = synchronisme.
- * Couple de démarrage = 0.5 à 0.9*couple nominal.
- * Couple maximum = 0.5 à 0.9*couple nominal.
- * Courant de démarrage Idém = dépend du type de démarrage(voir ci-après).
= 4.5 à 5.5*courant nominal(en direct).
- * Cos φ nominal (charge nominale) = 0.9.
- * Rendement η (charge nominale) = 0.95.

Utilisation des moteurs :**a) Les moteurs asynchrones à cage :**

Ils sont utilisés pour les petites et moyennes puissances :

- * Service continu ou nombre de démarrages réduits.
- * Bien adaptés aux atmosphères explosives.
- * Pour l'entraînement des machines à couple résistant parabolique :

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 12 sur 69

- * pompes centrifugeuses.
- * compresseurs.
- * machines-outils.
- * ventilateurs.
- * groupes convertisseurs.
- * génératrices asynchrones.

b) Les moteurs asynchrones à rotor bobiné :

Ils sont utilisés pour les puissances moyennes et fortes :

- * Démarrage de forte inertie.
- * Ventilateurs à grande inertie.
- * Démarrages très fréquents.
- * Engins de levage (ex : 120 démarrages/heure).
- * Couple de décollage élevé.
- * Broyeurs.
- * Malaxeurs.
- * Transporteurs.
- * Génératrices asynchrones.

c) Les moteurs synchrones :

Ils sont utilisés pour les fortes puissances :

- * Nécessité d'une vitesse constante.
- * Compensateurs synchrones : surexcités, ils fournissent de l'énergie réactive au réseau.
- * Grosses unités à vitesse lente (où le rendement est supérieur à celui des moteurs asynchrones).
- * Ventilateurs d'agglomération.
- * Compresseurs.
- * Soufflantes de hauts fourneaux.
- * Génératrices synchrones.

Nota:

Il est fait référence à une notion de petites, moyennes et fortes puissances, ceci est obligatoirement subjectif et les limites de chacune forcément imprécises.

Cette notion de par son imprécision devra être traitée comme telle.

On peut considérer qu'un moteur de 100 kW est de petite puissance, qu'un moteur de 400 kW est de puissance moyenne et qu'un moteur de 1 MW est de forte puissance, pour les valeurs intermédiaires différentes interprétations sont possibles.

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 13 sur 69

LES DEMARRAGES :

a) Démarrage direct :

❖ **Avantage :**

Solution simple.

❖ **Inconvénient :**

Fort courant d'appel donc réservé aux moteurs de «faibles» puissances (Idém de l'ordre de 7 In avec un temps T_{dém} de 1 à 20 s suivant le couple moteur, le couple résistant, l'inertie).

b) Démarrage indirect (< 500 kW) :

Principe:

Le moteur est démarré sous tension réduite (tension simple soit $1/\sqrt{3} U_n$) puis après prise de vitesse, est alimenté par la tension normale (tension composée U_n), avec éventuellement phase intermédiaire par résistances dans le triangle qui seront court-circuitées.

❖ **Avantages:**

Limite le courant d'appel au démarrage à 0.577 Idém.
 Applicable à tous les types de moteurs.

❖ **Inconvénients:**

Limite le couple moteur à

$$\frac{C'd}{Cd} = \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2$$

Nécessité que les bobinages soient sortis sur 6 bornes.

Nécessité que le couplage de fonctionnement soit triangle.

Nécessite un organe de commutation de couplage étoile-triangle.

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER PROTECTION DES MOTEURS	Cahier N°9 Rev. A Page 14 sur 69
--	---	---

c) Démarrage à intensité contrôlée :

Par réactances statoriques :

Pour les machines qui doivent démarrer à vide (couple faible pendant le lancement : compresseur, pompe centrifuge, groupe convertisseur).

❖ **Avantage:**

Ne consomme pas d'énergie active.

❖ **Inconvénient:**

Limite le couple moteur à

$$\frac{C'd}{Cd} = \left(\frac{Ic}{In} \right)$$

Nécessite des dispositifs de puissance (impédances et éléments de court-circuit).

Par résistances statoriques :

Solution limitée à la BT car problème de calories à évacuer.

❖ **Avantage:**

Solution relativement simple.

❖ **Inconvénient:**

Limite le couple moteur à

$$\frac{C'd}{Cd} = \left(\frac{Ic}{In} \right)$$

Nécessite des dispositifs de puissance (impédances et éléments de court-circuit).

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 15 sur 69

Par autotransformateur :

Principe:

Le stator est alimenté par un auto-transformateur dont le neutre est mis à la terre, après la première phase de démarrage le neutre est isolé (le bobinage primaire se trouve en série avec le stator), après la deuxième phase l'auto-transformateur est court-circuité.

❖ **Avantages:**

Ne consomme pas d'énergie active.

Permet de concilier la réduction d'appel du courant et la valeur du couple nominal.

❖ **Inconvénient:**

Limite le couple moteur à : $\frac{C'd}{Cd} = \left(\frac{Ic}{In} \right)$

Nécessite des dispositifs de puissance (impédances et éléments de court-circuit).

Par condensateurs :

Dans le cas des moteurs synchrones pour conserver le couple moteur, la puissance réactive nécessaire au moteur est fournie par les condensateurs.

Solution utilisée dans les cimenteries et les installations de broyage.

d) Démarrage rotorique (moteurs à bagues) :

Quand nécessité de démarrer les moteurs asynchrones en charge.

Principe:

Insertion de résistances dans le point neutre du rotor puis court-circuitage progressif.

❖ **Avantages:**

Réduction du courant d'appel.

Augmentation du couple moteur.

Adaptation couple moteur - couple résistant.

❖ **Inconvénient:**

Limite le couple moteur à : $\frac{C'd}{Cd} = \left(\frac{Ic}{In} \right)$

Nécessite des dispositifs de puissance (impédances et éléments de court-circuit).

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 16 sur 69

e) Démarrage par dispositifs électroniques statiques avec variateurs électroniques de vitesse :

- * Action sur tension statorique : gradateur ($S_n < 50$ kW).
- * Action sur courant rotorique : cascade hyposynchrone.
- * Action sur tension et fréquence statorique pour utilisation vitesse lente (0 à 1/3 Vitesse Nominale)
cycloconvertisseur.
- * Action sur tension et fréquence statorique pour vitesse haute (2/3 à Vitesse Nominale) :
redresseur-onduleur autonome.
- * Commutateur de courant - commutateur de tension.
- * Onduleur à modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.).
- * Action sur tension et fréquence pour moteurs synchrones :
redresseur-onduleur autopiloté.

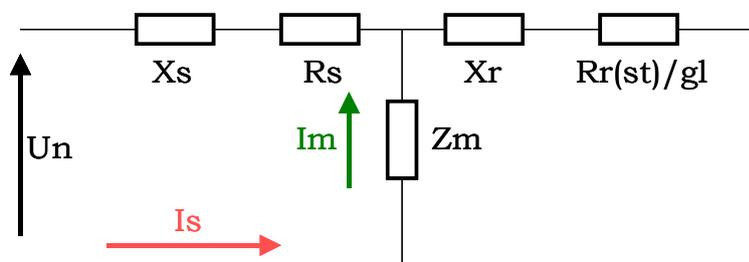
LES GRANDEURS ELECTRIQUES ASSOCIEES AUX MOTEURS :

Les impédances symétriques des moteurs sont rarement connues.

L'analyse du fonctionnement en régime perturbé est difficile à réaliser par contre l'analyse au moment privilégié du démarrage (le moteur étant préalablement à l'arrêt) permet une première analyse.

Moteur au démarrage :

A ce moment privilégié le moteur a une caractéristique de transformateur dont le secondaire est en court-circuit.



Dans laquelle :

U_n = tension nominale d'alimentation.

X_s = réactance du stator.

R_s = résistance du stator.

Z_m = impédance magnétisante.

I_m = courant magnétisant d'excitation.

X_r = réactance du rotor.

$R_r(st)/gl$ = résistance du rotor (valeur ramenée au stator) / glissement.

I_s = courant statorique.

En négligeant Z_m on a :

$$I_s = \frac{U_n}{\sqrt{(X_s + X_r)^2 + (R_s + R_r(st)/gl)^2}}$$

Au démarrage on a :

$$Z_{dém} = Z_i = Z_o$$

où :

$Z_{dém}$ = impédance directe au démarrage.

Z_i = impédance inverse de la machine.

Z_0 = impédance homopolaire de la machine.

$$Z_{dém} = \frac{V_n}{I_{dém}}$$

V_n = tension simple d'alimentation de la machine.

$I_{dém}$ = courant de démarrage de la machine.

I_i = $I_{dém}$.

Nota :

Du point de vue système inverse, lorsque la machine est à l'arrêt, la fréquence du rotor est la même que celle du stator (imposée par la fréquence du réseau).

Une fois la machine démarrée, la composante inverse dans le stator engendre dans le rotor un courant de fréquence f_r :

$$f_r = F_n (2 - g_l)$$

où :

f_r = fréquence dans le rotor (système inverse).

F_n = fréquence dans le stator (système inverse).
= fréquence du réseau.

$$g_l = \text{glissement} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

ω_s = vitesse du champ tournant dans le stator.

ω_r = vitesse du champ tournant dans le rotor.

Lorsque le moteur est arrêté $\omega_r = 0$ (rotor bloqué) d'où $g_l = 1$ et $f_r = F_n$.

Lorsque le rotor tourne à sa vitesse nominale (98% de la vitesse de synchronisme pour un moteur asynchrone et 100% de la vitesse de synchronisme pour un moteur synchrone), la composante inverse du courant dans le stator engendre dans le rotor un courant de fréquence 99 Hz (pour un moteur asynchrone) et un courant de fréquence 100 Hz (pour un moteur synchrone) ce qui provoque des pertes importantes par effet Joule.

L'image thermique, qui normalement surveille l'échauffement du stator (le plus vulnérable en fonctionnement «normal») pourra tenir compte du courant inverse «survalorisé» qui est surtout préjudiciable au rotor, il sera appliqué à l'image thermique un courant dit «équivalent» I_e .

$$I_e = \sqrt{I_d^2 + kI_i^2}$$

Dans lequel k est le coefficient de survalorisation, un déséquilibre de tension de 1% avec $k = 8$ (valeur recommandée par la NEMA) sera pris en compte pour un déséquilibre de courant de 8% et l'image thermique corrigée d'autant.

Ce coefficient de survalorisation sera développé plus loin en précisant les différentes formules retenues par les Constructeurs de Protection.

On voit que l'impédance inverse est du même ordre de grandeur que l'impédance directe de démarrage qui est beaucoup plus faible que l'impédance directe nominale (dans le rapport $I_{dém}/I_n$) et qu'une tension inverse de n% apportée par le réseau d'alimentation entraînera un courant inverse de grandeur $n\% \cdot I_{dém}/I_n$.

➤ **Exemple:**

Avec $n\% = 1\%$ (valeur maximum garantie par E.D.F.) et $I_{dém}/I_n = 5$, le courant inverse dans la machine sera de 5 % de I_n .

Nota:

Les moteurs asynchrones peuvent fonctionner en permanence avec un taux de 2% en composante inverse de tension soit 10% en intensité, lorsque $I_{dém} = 5 I_n$ (un réseau de tension est considéré comme équilibré lorsque $V_i < 2\%$ et $V_o < 2\%$).

Les moteurs synchrones comportent généralement des amortisseurs (pour supprimer les oscillations pendulaires au synchronisme).

Ceux-ci s'échauffent en présence de courant inverse.

Ils sont au minimum dimensionnés pour les mêmes valeurs de courant inverse que les moteurs asynchrones, mais dans des cas d'utilisation spécifiques (ex : Gros concasseurs) les amortisseurs peuvent être dimensionnés thermiquement pour supporter un courant inverse égal au courant direct.

Mise sous tension :

Au démarrage du moteur il va se produire un appel de courant de valeur relative $I_{dém}/I_n$. Cette surintensité est provoquée par le comportement du moteur à la mise sous tension. Au démarrage le moteur se comporte comme un transformateur triphasé dont le primaire serait constitué par le stator et le secondaire par le rotor (en court-circuit), au fur et à mesure que le rotor accélère, la vitesse relative avec le champ statorique inducteur diminue, la fréquence et l'amplitude des courants induits diminuent, ce qui a pour effet de diminuer le couple moteur. Lorsqu'il y a équilibre entre le couple moteur et le couple résistant (nominal), le courant dans le stator correspond à I_n .

La durée $T_{dém}$ du démarrage (de l'ordre de 1 à 20 s) dépendra du moment d'inertie de l'ensemble moteur-machine, du couple moteur, du couple résistant :

$$T_{dém}(s) = J * \frac{2\pi}{60} * \int_0^N \frac{dN}{C_m - C_r}$$

où :

J = moment d'inertie (en kg/m²).

N = vitesse de rotation (en t/mn).

C_m = couple moteur (en Nm).

C_r = couple résistant (en Nm).

Pendant ce démarrage il va se produire une chute de tension de la forme :

$$\frac{dU}{U_n} = \frac{S_{dém}}{S_{am} + S_{dém}}$$

Cette formule est valable pour un $dU/U_n < 10\%$ après nécessité de tenir compte des charges passives du réseau.

Mais de toute façon cette formule peut être prise comme ordre de grandeur.

où :

S_{am} = puissance de court-circuit amont du réseau (tenant compte de l'impédance de court-circuit du réseau, des impédances de liaison, de l'impédance des transformateurs etc.).

$S_{dém}$ = puissance apparente de démarrage.

$$S_{dém} = \frac{P_n}{\eta_n} * \frac{1}{\cos \varphi_n} * \frac{I_{dém}}{I_n}$$

où :

P_n = puissance mécanique assignée du moteur (en W, 1 CV = 736 W).

η_n = rendement assigné du moteur.

$\cos \varphi_n$ = facteur de puissance assigné du moteur.

$I_{dém}$ = intensité de démarrage du moteur : $3 I_n < I_{dém} < 8 I_n$.

I_n = intensité assignée du moteur.

Lors du démarrage avec $I_{dém} = 6 I_n$ (valeur moyenne d'un moteur asynchrone par exemple) sans anomalie d'alimentation les grandeurs suivantes vont être observées :

Courant I_d (I_1) = 600 %.

Courant I_i (I_2) = dI_i .

Courant I_o (I_o) = dI_o .

dI_i correspond à une dissymétrie provoquée par :

* le courant inverse provenant du déséquilibre du réseau d'alimentation.

* l'image inexacte donnée par les transformateurs de courant, qui du fait de la présence d'une composante continue (asymétrie du courant) et d'harmoniques, provoque une réponse différente suivant les phases (risque de saturation d'un seul transformateur de courant).

dI_i peut atteindre au démarrage, pendant un temps court, quelques dizaines de % en absence de défaut.

dI_o est un courant pseudo-différentiel à l'enclenchement :

Les différents enroulements forment par rapport à la cuve du moteur une certaine capacité. Lors de la mise sous tension, la charge de ces différentes capacités n'est pas rigoureusement identique dans le temps (phénomène de «pianotage» de l'organe de mise sous tension) et il se produit un courant pseudo-différentiel.

dI_o peut atteindre au démarrage, pendant un temps court, une dizaine de % en absence de défaut.

Les remarques précédentes sur I_i et I_o imposent que les fonctions de protection associées au courant inverse (I_i) et courant homopolaire (I_o) soient temporisées.

Anomalies à la mise sous tension :

Si l'enclenchement du moteur (à neutre du stator non sorti) se fait en présence d'anomalies les grandeurs suivantes seront observées :

* lors du démarrage avec I_{dém} = 6 I_n (valeur moyenne d'un moteur asynchrone par exemple) avec anomalie d'alimentation les grandeurs suivantes vont être observées :

Anomalie	Courant Id	Courant Ii	Courant Io
Défaut triphasé	I _{cc} max réseau	0*	0*
Défaut biphasé isolé	516% I _n	300% I _n	0*
Défaut biphasé à la terre (neutre à la terre)	600% I _n	198% I _n	600 % I _n
Alimentation en monophasé	600% I _n	300% I _n	0*
Manque une phase	346% I _n	346% I _n	0*
Inversion d'un TC	346% I _n	690% I _n	0*
Inversion de phases	0*	600% I _n	0*

0* = 0 en négligeant dI_i et dI_o (courant d'erreur).

dI_i peut atteindre au démarrage, pendant un temps court, quelques dizaines de % en absence de défaut.

dI_o peut atteindre au démarrage, pendant un temps court, une dizaine de % en absence de défaut.

De plus dans le cas d'une inversion de phases (1,3,2), le moteur aura un sens de rotation inverse de celui qu'il a avec un ordre de phases normal (1,2,3).

* en régime de moteur établi :

Anomalie	Courant Id	Courant Ii	Courant Io
Sans anomalie	100% I _n	0*	0*
Défaut triphasé	I _{cc} max réseau	0*	0*

Défaut biphasé isolé	170% In	100% In	0*
Défaut biphasé à la terre neutre à la terre	170% In	105% In	135% In

0* = 0 en négligeant d_{li} et d_{lo} (courant d'erreur).

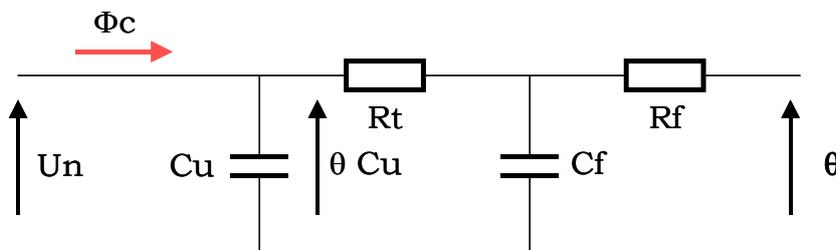
Moteur en fonctionnement :**L'échauffement**

Lorsque le démarrage est assuré, le moteur va progressivement prendre sa température de fonctionnement.

La stabilisation thermique étant obtenue lorsque la totalité de la chaleur produite est évacuée par le système de refroidissement du moteur (celui-ci peut être l'air ou un fluide de refroidissement).

Le moteur est un système thermique complexe dont une première simplification ne retient que les principaux éléments.

Le schéma thermique équivalent simplifié est le suivant :



où :

Φ_c = flux de chaleur par effet joule = $f(I^2)t$.

C_u = capacité thermique du cuivre.

Fonction de = f (masse C_u , chaleur spécifique C_u).

R_t = résistance de fuite thermique de l'isolant au contact du Cuivre, d'une part, et du fer, d'autre part.

C_f = capacité thermique du fer.

Fonction de = f (masse C_f , chaleur spécifique C_f).

R_f = résistance de fuite thermique caractérisant l'échange du Fer avec le milieu ambiant (air ou fluide).

L'échauffement du Cuivre est de la forme :

$$\theta = \theta_n \left(1 - A e^{-t/T1} - B e^{-t/T2} \right) \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

où :

θ = température à l'instant t .

θ_n = température maximale nominale (lorsque $I = I_n$ en permanence).

A = modélisation de l'échange Cuivre/Fer (au travers de l'isolant).

t = temps de calcul.

$T1$ = constante de temps thermique à l'échauffement Cuivre/Fer.

B = modélisation de l'échange Fer/fluide de refroidissement.

$T2$ = constante de temps thermique à l'échauffement Fer/fluide.

I = courant à l'instant t .

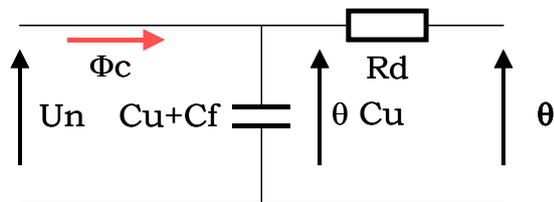
I_n = courant nominal assigné du moteur.

Les constantes thermiques $T1$ et $T2$ font intervenir les masses, capacités calorifiques, surfaces de déperdition, coefficients propres respectifs du cuivre, fer, isolants, matériau de ventilation.

Ce système complexe est difficile à exploiter faute de renseignements de la part du Constructeur de moteur, et est donc illusoire.

Une deuxième simplification (à partir du schéma équivalent simplifié ci-dessous) est d'assimiler le moteur à une résistance chauffante qui alimenterait les déperditions.

Le schéma thermique équivalent simplifié est le suivant :



où :

Φ_c = flux de chaleur par effet joule = $f(i^2)t$.

$Cu+Cf$ = capacité calorifique moyenne (Cuivre + Fer).

R_d = résistance de fuite thermique moyenne : isolant + milieu ambiant (air ou fluide).

L'échauffement est de la forme :

$$\theta = \theta_n * (1 - e^{-t/Te}) * \left(\frac{I}{I_n}\right)^2$$

où :

θ = température à l'instant t .

θ_n = température maximale nominale (lorsque $I = I_n$ en permanence).

t = temps de calcul.

Te = constante de temps thermique à l'échauffement.

I = courant à l'instant t .

I_n = courant nominal assigné du moteur.

D'après les normes, la température limite d'échauffement θ_∞ correspond à la limite de la classe d'isolation.

Les différentes classes d'isolation avec leurs températures limites d'échauffement θ_{∞} sont les suivantes :

Classe d'isolation	Température limite d'échauffement θ_{∞}
A	105°
B	130°
C	> 180°
E	120°
F	155°
H	180°

La température limite ne signifie pas que la température ne peut dépasser cette valeur mais que tout dépassement réduira la durée de vie de la machine.

➤ Exemple

classe A et classe B

Durée de vie en H	Température moyenne des enroulements	
	Classe A	Classe B
Heure		
100000	100°C	125°C
35000	110°C	139°C
15000	120°C	150°C
5500	130°C	165°C
2200	140°C	180°C
1000	150°C	195°C

La limite de la classe d'isolation est définie à partir d'une température ambiante maximale de θ_a de 40°C, compte tenu d'une sécurité de 10°C («point chaud»).

Pour une classe B ayant θ_{∞} de 130°C l'échauffement maximal de l'enroulement sera de 80°C = [130 – (40 + 10)].

Si la température ambiante maximale est inférieure à 40°C il y aura une «surpuissance thermique» disponible du moteur non utilisée.

La constante de temps à l'échauffement T_e est le temps que met la machine, en partant de la température ambiante θ_a pour arriver à 63.2 % de la température limite θ_∞ = résolution de l'équation :

$$(1 - e^{-t/T_e})$$

en faisant $t = T_e$ soit

$$(1 - e^{-1})$$

En fonction des multiples de cette constante de temps à l'échauffement T_e , l'échauffement du moteur en pourcentage de la température limite θ_∞ est le suivant :

Multiples de T_e	Pourcentage de θ_∞
0	0
0.5	39.3%
1	63.2%
1.5	77.7%
2	86.5%
3	95%
4	98.2%
5	99.3%
20	100%

La tangente à l'origine se confond avec l'adiabatique. Celle-ci est la droite matérialisant la loi d'échauffement dans les premiers instants où il n'y a pas déperdition de chaleur :

La quantité de chaleur $R_s \cdot i^2 \cdot dt$ est utilisée uniquement dans le cuivre et augmente la température de ce seul cuivre.

En prolongeant la tangente à l'origine par une droite, celle-ci coupera la droite de température limite θ_∞ en un point dont la lecture dans l'axe des temps donne la valeur de la constante thermique T_e .

De la même manière que la constante de temps thermique à l'échauffement T_e , il existe une constante de temps thermique au refroidissement T_r , elle est définie par le temps que met le moteur, en partant de la température θ_i (température initiale correspondant à l'échauffement du départ, moteur en fonctionnement) pour arriver à 36.8% de θ_i .

L'équation de refroidissement étant de la forme :

$$\theta = \theta_i * e^{-t/T_r}$$

Et la constante de temps thermique au refroidissement T_r , est la résolution de l'équation (en faisant $t = t_r$) :

$$e^{-t/Tr} = e^{-1}$$

Définition des constantes thermiques :

Le réglage de la fonction surcharge thermique s'effectuera en fonction des caractéristiques propres de la machine qui seront généralement obtenues auprès du constructeur mais sous différentes formes :

1) le constructeur de moteur donne le temps sous la forme conventionnelle exprimée en minutes :

Il suffit d'afficher la valeur la plus proche en se rappelant que le fait de choisir une valeur supérieure revient à sous-protéger le moteur et choisir une valeur inférieure revient à surprotéger le moteur (la protection à constante de temps réglée à une valeur inférieure à la valeur théorique se refroidit plus vite et intègre mal les surcharges ; lorsqu'elle est réglée à une valeur supérieure, la protection se réchauffe moins vite que le moteur et indique une disponibilité de puissance qui n'existe pas).

2) le constructeur du moteur donne une courbe d'échauffement, à partir de l'état froid, du temps en fonction de l'intensité parcourant le moteur. Il suffit de mesurer le temps au bout duquel on obtient 63.2% de l'échauffement limite. Ce temps correspond à la constante de temps (une vérification est possible avec le temps au bout duquel on obtient 86.5% de l'échauffement limite : ce temps correspond à 2 fois la constante de temps).

3) le constructeur du moteur donne :

- le courant de démarrage Idém.
- le temps de démarrage Tdém.
- le nombre de démarrage autorisé à froid nf.
- le nombre de démarrage autorisé à chaud nc.

La courbe à froid choisie doit se situer au-dessus du point de coordonnées Idém, nf*Tdém

La courbe à chaud choisie doit se situer au-dessus du point de coordonnées Idém, nc*Tdém

On choisira les temps immédiatement supérieurs.

4) le constructeur du moteur donne le temps pendant lequel le moteur peut supporter 1.26 In, ce temps correspond à la constante de temps.

5) le Constructeur du moteur donne une constante f(I²t) sous la forme :

- courant de démarrage Idém.
- temps de surcharge Ts.
- courant de surcharge Is (le rapport du TC étant Inp/Ins).

❖ Procédure pour déterminer Te :

- Effectuer le calcul de I^2t (secondaire) :

$$K1 = \left(\frac{I_{ns}}{I_{np}} * I_s \right)^2 * T_s$$

- Lire sur la courbe thermique à froid disponible dans la protection (de temps $T_{fr} = x$ mn) le temps correspondant à $I_{dém}$, soit $T1$ ce temps.
- Calculer le courant I_m : $I_m = I_{dém} * I_{ns} * 0.95$
- Calculer la valeur $K2$: $K2 = I_m^2 * T1$
- Définir la constante thermique de la machine à protéger :

$$T_e = \frac{K1}{K2} * T_{fr}$$

➤ **Exemple:**

Données Constructeur :

- Courant de démarrage $I_{dém} = 4.9$ In.
- Courant de surcharge $I_s = 100$ A.
- Temps de surcharge $T_s = 200$ s.
- Rapport de TC = 50/5 A.

$$K1 = \left(\frac{I_{ns}}{I_{np}} * I_s \right)^2 * T_s = \left(\frac{5}{50} * 100 \right)^2 * 200 = 20000$$

$T1$ lue sur une courbe 3 mn (T_{fr}) d'une protection = 8 s (à 4.9 In).

$$I_m = I_{dém} * I_{ns} * 0.95 = 4.9 * 5 * 0.95 = 23.275$$

$$K2 = I_m^2 * T1 = 23.275^2 * 8 = 4334$$

$$T_e = \frac{K1}{K2} * T_{fr} = \frac{20000}{4334} * 3mn = 13.8mn$$

La valeur retenue sera la plus proche de cette valeur.

6) le Constructeur du moteur donne une surcharge admissible à chaud et à froid sous la forme:

- surcharge admissible à chaud (à partir de 0.75 de l'état froid) Courant I_{sc} , Temps T_{sc} .
- surcharge admissible à froid Courant I_{sf} , Temps T_{sf} .

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 29 sur 69

❖ **Procédure pour déterminer Te :**

- Lire sur les courbes thermiques disponibles dans la protection

(de temps à froid Tfr = x mn et à chaud Tch = x mn) le temps correspondant :
 à chaud pour Isc soit Tlc ce temps.
 à froid pour Isf soit Tlf ce temps.

- Calculer les 2 constantes Tec & Tef :

$$Tec = Tch * \frac{Tsc}{Tlc}$$

$$Tef = Tfr * \frac{Tsf}{Tlf}$$

- Prendre pour Te la valeur la plus faible de Tec ou Tef.

➤ **Exemple:**

Données Constructeur moteur spécial :

Surcharge admissible : 1.2 In, 24 mn à chaud (à partir de 0.75 de l'état froid) et 3 In, 16 mn à froid.

On lit sur les courbes disponibles de la protection en 3 mn.

Tlc = 100 s & Tlf = 23 s

Calcul de Tec & Tef :

$$Tec = Tch * \frac{Tsc}{Tlc} = \frac{24 * 60}{100} * 3 = 43mn$$

$$Tef = Tfr * \frac{Tsf}{Tlf} = \frac{16 * 60}{23} * 3 = 42mn$$

La valeur de 42 mn sera retenue.

7) le Constructeur est inconnu ou inaccessible. Aucune autre indication que la plaque signalétique.

L'ordre de grandeur des constantes de temps thermiques T_e pour un moteur ouvert, non ventilé, à service continu est le suivant :

Puissance du moteur	Constante thermique T_e
30 kW	3 mn
50 kW	6 mn
200 kW	10 mn
500 kW	15 mn
1000 kW	20 mn
2000 kW	25 mn
Spécial lent 5 MW	40 mn

Pour les moteurs fermés prendre $T_e \cdot 0.95$.

Pour les moteurs fermés à ventilation forcée prendre $T_e \cdot 0.9$.

Dans la pratique les moteurs à protéger auront une constante de temps thermique à l'échauffement T_e , lorsque celle-ci est inconnue, inférieure à 25 mn.

Cette dernière solution n'est à utiliser que lorsqu'aucune autre n'est possible, elle ne peut en toute rigueur s'appliquer aux moteurs spéciaux.

Nota :

- La constante de temps thermique au refroidissement T_r est de l'ordre de 2 à 4 fois la constante de temps thermique à l'échauffement T_e .
- Les gros moteurs ont une constante de temps thermique à l'échauffement T_e supérieure à celles des petits moteurs (plus de fer et de cuivre pour les gros moteurs).
- Les moteurs fermés ont une constante de temps thermique à l'échauffement T_e inférieure à celles des moteurs ouverts.
- Une ventilation forcée diminue la constante thermique à l'échauffement T_e .
- Les moteurs anciens (technologie trentaine d'années) ont une constante de temps thermique à l'échauffement T_e supérieure aux moteurs de technologie récente.

Echauffement (du rotor) dû à la composante inverse :

De la même manière que la composante directe du courant chauffe les enroulements, la composante inverse participe à cet échauffement et il peut être intéressant d'intégrer ces 2 composantes dans un courant équivalent I_e :

$$I_e = \sqrt{I_d^2 + kI_i^2}$$

où :

I_d = composante directe du courant.

I_i = composante inverse du courant.

k = constante de «survalorisation» de la composante inverse.

$$k = \left(\frac{Z_i}{Z_n} \right)^2 / 10$$

où :

Z_i = impédance inverse du moteur.

Z_n = impédance nominale du moteur (correspondant à l'impédance directe du moteur en fonctionnement).

Pour un moteur à démarrage direct : $Z_i = Z_{dém}$.

$$k = \left(\frac{Z_{dém}}{Z_n} \right)^2 / 10$$

ou

$$k = \left(\frac{I_{dém}}{I_n} \right)^2 / 10$$

Pour un moteur à démarrage indirect ou à intensité de démarrage contrôlée : $Z_i = Z_{roblo}$.

$$k = \left(\frac{Z_{roblo}}{Z_n} \right)^2 / 10$$

ou

$$k = \left(\frac{I_{roblo}}{I_n} \right)^2 / 10$$

où :

Z_{roblo} = impédance directe du moteur à rotor bloqué.

I_{roblo} = courant du moteur à rotor bloqué.

Exemple:

Courant de Démarrage	Coefficient de survalorisation
Idém/In = 4	k = 1.6
Idém/In = 6	k = 3.6
Idém/In = 8	k = 6.4

Nota:

Certains Constructeurs de protections définissent le coefficient k d'une manière différente pour les moteurs asynchrones :

➤ Exemple :

❖ SCHNEIDER :

$$k = 2 * \frac{Cdém}{Cn} * \frac{1}{g \left(\frac{Idém}{In} \right)^2} - 1$$

où :

Cdém = couple de démarrage.

Cn = couple nominal.

g = glissement.

Idém = courant de démarrage.

In = courant nominal du moteur.

❖ ALSTOM - CEE - MICROENER :

La valeur de k est une constante = 3, correspondant à Idém/In de 5 à 6 (valeurs réalistes)

$$Ie = \sqrt{Id^2 + 3Ii^2}$$

❖ GENERAL ELECTRIC :

$$Ie = \sqrt{In^2 \left(1 + k \left(\frac{Ii}{Id} \right)^2 \right)}$$

où k répond à 2 équations suivant le degré de sécurité choisie :

Soit la valeur «typique» :

$$k = \frac{175}{Iroblo^2}$$

Soit la valeur «conservative» :

$$k = \frac{230}{Iroblo^2}$$

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 33 sur 69

Comparaison entre les différentes formules :

* Schneider utilise une formule faisant intervenir des grandeurs de couples, qu'il est nécessaire de connaître auprès du Constructeur de moteur.

* En prenant, à titre de comparaison, un courant direct $I_d = 100\%$ de I_n , un courant inverse $I_i = 20\%$ de I_n et un courant à rotor bloqué $I_{roblo} = 6 I_n$ (valeur moyenne pour un moteur asynchrone), le courant équivalent I_e suivant les Constructeurs de Protection est de :

- Formule retenue au chapitre 4.5.5, $I_e = 1.07 I_n$
- Formule retenue par Alstom & CEE & MicroEner, $I_e = 1.06 I_n$
- Formule «typique» retenue par GE, $I_e = 1.09 I_n$
- Formule «conservative» retenue par GE, $I_e = 1.12 I_n$
- L'ordre de grandeur est identique mais avec des approches différentes.

Nota:

La possibilité de choix de la valeur de k est illusoire, compte tenu de disposer des valeurs réelles de $I_{dém}/I_n$ de la part des constructeurs.

Le choix d'une valeur fixe de $k = 3$ est réaliste.

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 34 sur 69

Flux rémanent des moteurs asynchrones

Des anomalies de fonctionnement des moteurs peuvent être provoquées par des anomalies d'alimentation.

La coupure d'alimentation (ou creux de tension) a des origines :

- Internes au réseau industriel :
démarrage de gros moteurs.
enclenchement de charges importantes comme transformateurs, condensateurs.
- Externes au réseau industriel :
incident sur le réseau de distribution comme défauts (suivis de réenclenchement).

La durée de ces creux de tension (à 80%), en MT, est comprise entre 20 et 400 ms.

L'amplitude de ces creux de tension (à 60%), en MT, est comprise entre 10 et 20%.

Lorsqu'il se produit une coupure d'alimentation, l'installation étant en fonctionnement, les moteurs asynchrones maintiendront une tension rémanente jusqu'à l'extinction du flux des machines à cause de la présence importante de fer dans celles-ci.

Le champ tournant créé par le rotor du moteur asynchrone induit dans le stator une force électromotrice résiduelle dont l'amplitude décroît exponentiellement avec la constante de temps LR/RR du rotor, la fréquence décroît proportionnellement à la vitesse de rotation du rotor.

Le couple moteur est proportionnel au carré de la tension, le creux de tension provoquera donc une baisse du couple moteur et un ralentissement dû au couple résistant.

A la réapparition de la tension il y aura réaccélération si le couple moteur est supérieur au couple résistant.

Si la machine est pratiquement à l'arrêt, donc flux rémanent nul et glissement maximum, le courant de réaccélération sera pratiquement égal au courant de démarrage.

Si la machine est remise sous tension, avec un certain pourcentage de flux rémanent (temps inférieur à 1 s) des risques importants de détérioration existent pour la machine dûs au risque de déphasage entre la tension engendrée par le flux rémanent et la tension d'alimentation.

Une tension secourue en phase avec la tension du réseau d'alimentation dont la commutation provoque une coupure ne résout pas ce problème.

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 35 sur 69

Les risques de détérioration, lors d'une remise sous tension avec flux rémanent sont d'ordre :

- Mécaniques :
 Risque de torsion de l'arbre du rotor, vibrations, oscillations.
 Vieillessement cumulatif des composants.
- Electriques :
 Courant de réaccélération très important, qui dans le cas extrême d'une opposition de phase entre tension d'alimentation et tension avec flux rémanent important peuvent atteindre 2 fois le courant de démarrage.

Vieillessement cumulatif des composants.

Solutions :

En fonction des machines et du process :

- Remise sous tension du moteur après arrêt complet
- Remise sous tension lorsque flux rémanent est inférieur à 20%
- Mise en place de groupes de secours sans coupure (couplés au réseau avec ou sans volant d'inertie, alternateur fonctionnant en compensateur synchrone hors secours etc.).
- Mise en place d'une procédure de redémarrage des moteurs.

Nota :

Si tous les moteurs, après un creux de tension, sont réaccélérés au même instant la chute de tension occasionnée risque d'entraîner un non démarrage des moteurs.

Il est à noter que les moteurs synchrones sont plus insensibles à ces creux de tension du fait d'une meilleure stabilité provoquée par la possibilité de surexcitation (ceci ne supprimant pas le risque de décrochage).

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 36 sur 69

Utilisation des moteurs :

Les moteurs sont étudiés pour différentes utilisations, celles-ci caractérisent le type de service:

a) En Service Continu (SC) :

Moteurs fonctionnant en permanence et à l'équilibre thermique. L'équilibre thermique est atteint au bout d'un temps t (pratiquement $5 \cdot T_e$ soit 99.3% de θ_{∞}).

b) En Service Temporaire (ST) :

Moteurs dont le temps de marche est < 2 fois le temps t .

Temps $t = 1$ heure pour les petits moteurs ($T_e = 6$ mn).

Temps $t = 2$ heures pour les gros moteurs à vitesse lente.

Temps $t = 3$ à 4 heures pour les gros moteurs non ventilés.

Pour des temps de marche supérieurs voir Service Continu (SC).

Le temps de refroidissement est supérieur à 4 fois la constante de temps du moteur.

c) En Service ininterrompu à Charge Intermittente (SCI) :

Le moteur est soumis à des cycles identiques comprenant chacun, un temps de fonctionnement à vide et un temps de fonctionnement à régime constant.

Ce temps est suffisant pour que l'équilibre thermique soit atteint aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.

d) En Service à Démarrage (SD) :

Le moteur est soumis à des cycles continus identiques comprenant chacun :

un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de repos les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au bout d'un cycle.

Nota :

Le Service Continu (SC) est le plus fréquent.

Le Service Temporaire (ST) peut s'appliquer par exemple aux moteurs de levage qui ont été standardisés par l'utilisation durant : 30 - 60 - 90 ou 180 mn (il ne s'agit pas de la constante thermique du moteur mais de son temps d'utilisation).

Dans le cas du Service ininterrompu à Charge Intermittente (SCI) et du Service à Démarrage (SD) il y a lieu de demander au Constructeur de moteur la «puissance thermiquement équivalente».

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 37 sur 69

COMPORTEMENT DU MOTEUR EN PRESENCE D'UN DEFAUT :

Le moteur, lorsqu'il est en fonctionnement normal, est générateur de courant de défaut pour un défaut extérieur à ce moteur.

Les formules ci-après, les plus pénalisantes, sont dans l'hypothèse où :

$$\cos(\omega t + \alpha) = 1$$

α étant l'angle d'enclenchement définissant la phase de la tension au moment d'apparition du défaut, le cas le plus pénalisant étant lorsque $\alpha = 0$ (défaut au zéro de la tension) provoquant un défaut avec une asymétrie maximale.

Cas du moteur asynchrone :

Fourniture de courant de court-circuit triphasé I_{cc} :

Valeur de crête de I_{cc} à 10 ms :

$$I_{crête} = \frac{I_n * \sqrt{2}}{Z_{drotor}} * (e^{-0.01/T_a} + e^{-0.01/T_p})$$

Valeur apériodique de I_{cc} à 60 ms :

$$I_{apé} = \frac{I_n * \sqrt{2}}{Z_{drotor}} * e^{-0.06/T_a}$$

Valeur efficace symétrique de I_{cc} à 60 ms :

$$I_{eff} = \frac{I_n}{Z_{drotor}} * e^{-0.06/T_p}$$

Où :

I_n = courant nominal du moteur.

Z_{drotor} = impédance directe du moteur à rotor bloqué.

T_a = constante de temps apériodique.

T_p = constante de temps périodique.

Nota:

Le régime transitoire s'amortit très rapidement (de l'ordre de 1 à 2 périodes) et la machine asynchrone se comporte comme une impédance passive dont l'impédance équivalente est :

$$Z_{équi} = \frac{U_n^2}{P_n - jQ_n}$$

où :

U_n = tension nominale du moteur.

Pn = puissance nominale active du moteur.
Qn = puissance nominale réactive du moteur.

Cas du moteur synchrone :

Fourniture de courant de court-circuit triphasé Icc :

Valeur de crête de Icc à 10 ms :

$$I_{crête} = I_n * \sqrt{2} * \left(\left(\frac{1}{X''d} - \frac{1}{X'd} \right) * e^{-0.01/T''d} + \left(\frac{1}{X'd} - \frac{1}{X_s} \right) * e^{-0.01/T'd} + \left(\frac{1}{X''d} \right) * e^{-0.01/Ta} + \frac{1}{X_s} \right)$$

Valeur apériodique de Icc à 60 ms :

$$I_{apé} = \frac{I_n * \sqrt{2}}{X''d} * e^{-0.06/Ta}$$

Valeur efficace symétrique de Icc à 60 ms :

$$I_{eff} = I_n * \left(\left(\frac{1}{X''d} - \frac{1}{X'd} \right) * e^{-0.06/T''d} + \left(\frac{1}{X'd} - \frac{1}{X_s} \right) * e^{-0.06/T'd} + \left(\frac{1}{X_s} \right) \right)$$

où :

In = courant nominal du moteur en régime établi.

X''d = réactance subtransitoire du moteur (ordre de grandeur de 10 à 20%).

X'd = réactance transitoire du moteur (ordre de grandeur de 20 à 30%).

Xs = réactance synchrone du moteur (ordre de grandeur 80 à 120% pour les moteurs à pôles saillants = vitesse lente, de 150 à 300% pour les moteurs à pôles lisses = vitesse rapide).

T''d = constante de temps subtransitoire du moteur (ordre de grandeur de 10 à 25 ms).

T'd = constante de temps transitoire du moteur (ordre de grandeur de 50 à 250 ms).

Ta = constante de temps apériodique du moteur (ordre de grandeur de 10 à 200 ms).

Nota:

Les valeurs d'ordre de grandeur ci-dessus sont données à titre indicatif.

Aux valeurs inférieures correspondent les petites puissances (100 kW), aux valeurs supérieures correspondent les fortes puissances (3 MW).

Les constructeurs de moteurs synchrones assortissent les valeurs communiquées de tolérances sur les impédances qui sont :

réactance subtransitoire X''d = ± 30%

réactance transitoire X'd = ± 20%

réactance synchrone Xd = ± 15%

Pour les valeurs de réactances transitoire et subtransitoire, les constructeurs donnent les valeurs en régime saturé et en régime non saturé, du circuit magnétique du moteur, avec les tolérances sur ces valeurs.

Les valeurs de réactances en régime saturé étant les plus faibles (donc I_{cc} plus élevé).

Bien que la norme CEI 909 prévoie d'effectuer les calculs avec les valeurs saturées, les définitions de tenue du matériel peuvent être effectuées avec les valeurs saturées et la tolérance inférieure (donc I_{cc} maximum) alors que le réglage des protections pourra être effectué avec les valeurs non saturées et la tolérance supérieure (donc I_{cc} minimum).

Calcul des courants de défaut

A titre d'exemple et pour définir les ordres de grandeurs des courants de court-circuit fournis lors d'un défaut extérieur, nous allons étudier le cas de 2 moteurs de 2 MW, l'un étant asynchrone, l'autre étant synchrone, alimentés par un réseau 5.5 kV (entre phases).

Caractéristiques Constructeur des machines :

Moteur asynchrone :

Triphasé,

U_n	=	5.5kV
P_n	=	2MW
$\cos \varphi_n$	=	0.85
η_n	=	0.9
T_a	=	0.02s
T_p	=	0.03s
Z_{roblo}	=	16.7%

Triphasé,

U_n	=	0.4kV
P_n	=	0.1MW
$\cos \varphi_n$	=	0.8
η_n	=	0.85
T_a	=	0.01s
T_p	=	0.01s
Z_{roblo}	=	20%

Moteur synchrone :

Triphasé

U_n	=	5.5kV
P_n	=	2MW
$\cos \varphi_n$	=	0.9
η_n	=	0.95
T_a	=	0.03s
T''_d	=	0.02s

$$\begin{aligned} T' &= 0.2s \\ X''d &= 10\% \\ X'd &= 15\% \\ X_s &= 150\% \end{aligned}$$

Calcul du courant nominal :

$$I_n = \frac{P_n}{\eta_n * U_n * \sqrt{3} * \cos \Phi_n}$$

Moteur asynchrone :	
Exemple 2 MW	Exemple 0.1MW calcul fictif en 5.5kV
$I_n = \frac{2000000}{0.9 * 5500 * \sqrt{3} * 0.85} = 274.4A$	$I_n = \frac{1000000}{0.9 * 5500 * \sqrt{3} * 0.85} = 13.7A$

Moteur synchrone
$I_n = \frac{2000000}{0.95 * 5500 * \sqrt{3} * 0.9} = 245.6A$

Nota :

On observe qu'à puissance mécanique identique le courant nominal du moteur synchrone est inférieur de 10 % à celui du moteur asynchrone (d'où moins de puissance électrique consommée à puissance mécanique identique, dans le cas du moteur synchrone).

Calcul de la valeur de crête de I_{cc} à 10 ms :

$$\text{Moteur asynchrone 2 MW: } I_{crête} = \frac{274.4 * \sqrt{2}}{0.167} * (e^{-0.01/0.02} + e^{-0.01/0.03}) = 3074A$$

$$\text{Moteur asynchrone 0.1 MW: } I_{crête} = \frac{13.7 * \sqrt{2}}{0.2} * (e^{-0.01/0.01} + e^{-0.01/0.01}) = 71A$$

$$I_{crête} = 245.6 * \sqrt{2} * \left(\left(\frac{1}{0.1} - \frac{1}{0.15} \right) * e^{-0.01/0.02} + \left(\frac{1}{0.15} - \frac{1}{1.5} \right) * e^{-0.01/0.2} + \left(\frac{1}{0.1} \right) * e^{-0.01/0.03} + \frac{1}{1.5} \right) = 5405A$$

Moteur synchrone :

Calcul de la valeur apériodique de I_{cc} à 60 ms :

Moteur asynchrone	
Exemple 2 MW $I_{ap\acute{e}} = \frac{274.4 * \sqrt{2}}{0.167} * e^{-0.06/0.02} = 115A$	Exemple 0.1MW calcul fictif en 5.5kV $I_{ap\acute{e}} = \frac{13.7 * \sqrt{2}}{0.2} * e^{-0.06/0.01} = 0.2A$

Moteur synchrone
$I_{ap\acute{e}} = \frac{245.6 * \sqrt{2}}{0.1} * e^{-0.06/0.03} = 470A$

Calcul de la valeur efficace symétrique de I_{cc} à 60 ms :

Moteur asynchrone	
Exemple 2 MW	Exemple 0.1MW calcul fictif en 5.5kV
$I_{eff} = \frac{274.4}{0.167} * e^{-0.06/0.03} = 222A$	$I_{eff} = \frac{13.7}{0.2} * e^{-0.06/0.01} = 0.17A$

Moteur synchrone
$I_{eff} = 245.6 * \left(\left(\frac{1}{0.1} - \frac{1}{0.15} \right) * e^{-0.06/0.02} + \left(\frac{1}{0.15} - \frac{1}{1.5} \right) * e^{-0.06/0.2} + \left(\frac{1}{1.5} \right) \right) = 1296A$

A titre d'information à 100 ms le courant de défaut produit par la machine serait de 4.3 In.

Nota :

Très rapidement le moteur asynchrone ne produit plus de courant de défaut (à 60 ms I_{cc} sur défaut extérieur est égal à 0.6 In).

La contribution d'un moteur BT à 60 ms est pratiquement nulle, la constante de temps des moteurs BT est de l'ordre de 10ms.

Il n'en est pas de même pour le moteur synchrone : c'est la disparition du couple moteur et le maintien du couple résistant qui freinera le moteur et l'arrêtera. A couple résistant nul le rotor du moteur synchrone ferait l'effet de volant et maintiendrait le courant de court-circuit pendant un certain temps.

Pendant les premières périodes du défaut le moteur synchrone se comporte comme un alternateur synchrone.

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 43 sur 69

Calcul de la chute de tension au démarrage et à la réaccélération :

► Exemple 1 :

Une usine est alimentée par le réseau 63 kV dont la puissance de court-circuit minimum est de 1.2 GVA.

L'alimentation en MT de l'usine se fait par un transformateur TR1 63/20 kV, 35 MVA, $U_{cc} = 12.5\%$.

L'alimentation des moteurs MT se fait par un transformateur TR2 20/5.5 kV, 10 MVA, $U_{cc} = 10\%$,

situé à proximité de TR1 (impédance de liaison TR1-TR2 négligeable).

Pour l'exemple il est admis que le moteur asynchrone de 2 MW est démarré en intensité contrôlée

en 5.5 kV, et pourra être réaccélééré après chute de tension, sans autre charge passive sur le réseau, avec $I_{réacc} / I_n = 6$ pour réaccélération et $I_{dém} / I_n = 2$ pour démarrage à intensité contrôlée ;

$I_n = 274.4$ A.

Soit $I_{dém} = 549$ A et $I_{réacc} = 1646$ A (si le moteur a stoppé).

$S_{dém} = 549 * 5500 * \sqrt{3} = 5.2$ MVA.

$S_{réacc} = 1646 * 5500 * \sqrt{3} = 15.7$ MVA.

Calcul base 5.5 kV :

Impédance de source : $Z_s = 5.5^2 / 1200 = 0.025 \Omega$

Impédance du transfo TR1 : $Z_{tr1} = 0.125 * (5.5^2 / 35) = 0.108 \Omega$

Impédance du transfo TR2 : $Z_{tr2} = 0.1 * (5.5^2 / 10) = 0.303 \Omega$

Impédance amont vue du moteur : $Z_{am} = Z_s + Z_{tr1} + Z_{tr2} = 0.436 \Omega$

Courant de court-circuit triphasé : $I_{cc} = 5500 / (\sqrt{3} * 0.436) = 7.3$ kA.

d'où puissance de court-circuit triphasé : $P_{cc} = 5500 * \sqrt{3} * 7300 = 69.5$ MVA.

Chute de tension au démarrage :

$$\frac{dU}{U_n} = \frac{5.2}{5.2 + 69.5} = 7\%$$

Chute de tension à la réaccélération :

$$\frac{dU}{U_n} = \frac{15.7}{15.7 + 69.5} = 18.4\%$$

Dans ces conditions le couple réel de démarrage sera de :

$$C_{dr\acute{e}el} = (1 - 0.07)^2 * C_{dth\acute{e}orique}$$

$$C_{dr\acute{e}el} = 0.86 * C_{dth\acute{e}orique}$$

Dans ces conditions le couple réel de réaccélération sera de :

$$C_{dr\acute{e}el} = (1 - 0.184)^2 * C_{dth\acute{e}orique}$$

$$C_{dr\acute{e}el} = 0.67 * C_{dth\acute{e}orique}$$

➤ **Exemple 2 :**

Une usine est alimentée par le réseau 63 kV dont la puissance de court-circuit minimum est de 1.2 GVA.

L'alimentation en MT de l'usine se fait par un transformateur TR1 63/20 kV, 35 MVA, $U_{cc} = 12.5\%$.

L'alimentation de la BT se fait par un transformateur TR2 20/0.4 kV, 2 MVA, $U_{cc} = 8\%$, situé à proximité de TR1 (impédance de liaison TR1-TR2 négligeable).

Pour l'exemple il est admis que le moteur asynchrone de 100 kW est démarré en couplage étoile-triangle en 0.4 kV, et pourra être réaccélééré après chute de tension, sans autre charge passive sur le réseau, avec $I_{r\acute{e}acc} / I_n = 6$ pour réaccélération et $I_{d\acute{e}m} / I_n = 3,46$ pour démarrage étoile-triangle ;

$$I_n = 144.3 \text{ A (sous 400V)}$$

Soit $I_{d\acute{e}m} = 499 \text{ A}$ et $I_{r\acute{e}acc} = 866 \text{ A}$ (si le moteur a stoppé).

$$S_{d\acute{e}m} = 499 * 400 * \sqrt{3} = 0.346 \text{ MVA}$$

$$S_{r\acute{e}acc} = 1866 * 400 * \sqrt{3} = 0.6 \text{ MVA}$$

Calcul base 0.4 kV :

Impédance de source :	$Z_s = 0.4^2/1200$	= 0.0001 Ω
Impédance du transfo TR1 :	$Z_{tr1} = 0.125*(0.4^2/35)$	= 0.0006 Ω
Impédance du transfo TR2 :	$Z_{tr2} = 0.08*(0.4^2/2)$	= 0.0064 Ω
Impédance amont vue du moteur	$Z_{am} = Z_s + Z_{tr1} + Z_{tr2}$	= 0.0071 Ω
Courant de court-circuit triphasé :	$I_{cc} = 400/(\sqrt{3}*0.0071)$	= 32.527 kA
d'où puissance de court-circuit triphasé	$P_{cc} = 400/(\sqrt{3}*32527)$	= 22.5 MVA

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 45 sur 69

Chute de tension au démarrage :

$$\frac{dU}{Un} = \frac{0.346}{0.346+22.5} = 1.5\%$$

Chute de tension à la réaccélération :

$$\frac{dU}{Un} = \frac{0.6}{0.6+22.5} = 2.6\%$$

Dans ces conditions le couple réel de démarrage sera de :

$$C_{dr\acute{e}el} = (1 - 0.015)^2 * C_{dth\acute{e}orique}$$

$$C_{dr\acute{e}el} = 0.97 * C_{dth\acute{e}orique}$$

Dans ces conditions le couple réel de réaccélération sera de :

$$C_{dr\acute{e}el} = (1 - 0.026)^2 * C_{dth\acute{e}orique}$$

$$C_{dr\acute{e}el} = 0.95 * C_{dth\acute{e}orique}$$

Dans ces conditions la chute de tension au démarrage d'un moteur BT est négligeable, la chute de tension due à la réaccélération d'un moteur BT est aussi négligeable.

En fait il faudra, dans le cas d'une réaccélération (provenant d'une coupure d'alimentation), tenir compte de la remise sous tension de la totalité des moteurs BT (le process ne prévoyant généralement pas la remise différée sous tension des différents moteurs BT).

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 46 sur 69

PROTECTION DES MOTEURS :

Les moteurs électriques de puissances inférieures à 15 kW sont protégés d'une manière générale contre les surcharges et les court-circuits entre phases par l'intermédiaire des dispositifs suivants :

- * Dispositifs intégrés comprenant Contacteur, disjoncteur et protections.
- * Disjoncteur magnéto-thermique type « Moteur » + Contacteur.
- * Sectionneur - fusible + Contacteur + Relais thermique.
- * Disjoncteur + Contacteur + Relais thermique.

Les fusibles utilisés ont été spécialement mis au point pour être associés aux moteurs ex :

- Intensité pouvant être supportée sans fondre pendant 1 heure : 4 In
- Temps de fusion sous 7 In : 5 s

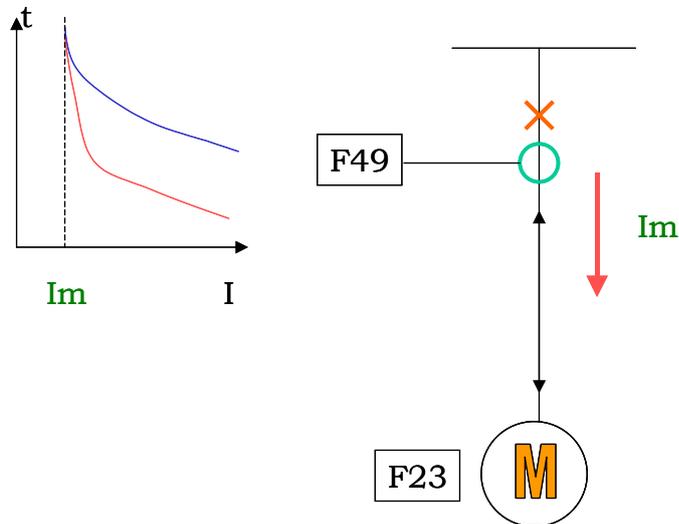
Les disjoncteurs ont un pouvoir de coupure qui leur permettent de couper le courant de court-circuit, leur temps de coupure (fonctionnement de la protection + ouverture des contacts + extinction de l'arc) sont très faibles (en général inférieurs à 30 ms).

Les contacteurs ont un pouvoir de coupure limité qui ne leur permettent pas de couper le courant de court-circuit.

Les moteurs électriques de puissances supérieures à 15 kW sont protégés d'une manière plus complète.

Ce chapitre ne concerne pas les moteurs alternatifs triphasés disposant d'un système de démarrage et de variation de vitesse électronique à onduleur-convertisseur (cycloconvertisseur, redresseurs-onduleurs autonomes et autopilotés) dont le principe même provoque une variation très importante de la fréquence. Dans ce cas une étude spécifique est nécessaire.

L'anomalie la plus fréquente que l'on puisse rencontrer, dont la répétition entraîne une diminution de la durée de vie du moteur, est :

Protection contre les surcharges thermiques :

Deux principes sont utilisables pour protéger le moteur :

Protection par mesure directe de température (F23) :

Le moteur est équipé de sondes à résistance (Pt, Cu, Ni) ou de varistances dont la résistance est une fonction de la température (ex : sondes Pt R = 100 Ω à 0°C suivant DIN 43760) logées dans les encoches du stator.

La mesure de température est faite au travers d'une mesure de résistance.

❖ Avantage:

Possibilité d'afficher la température réelle.

❖ Inconvénients:

Obligation de prévoir les moteurs avec ces sondes, qui sont généralement fragiles et qu'il faudra alimenter.

Une liaison défectueuse entre la sonde et l'élément détecteur entraînera un déclenchement intempestif.

Il existe un gradient de température entre la sonde et le cuivre provoqué par l'isolant, une forte surcharge sera mal répercutée.

Protection par image thermique (F49) :

Le moteur est assimilé à un système thermique à une seule constante et un simulateur, alimenté par l'image du courant traversant ce moteur, reproduit l'état thermique du moteur. Il va être traité dans ce chapitre une notion propre à la protection qui est l'état froid et l'état chaud.

En effet le moteur intègre thermiquement les différents états qui lui sont imposés.

Les fabricants de protection ont l'habitude de se référer à ces deux états caractéristiques.

A partir de l'état froid, le moteur est soumis à une surintensité de $n \cdot I_n$ et le temps t_f que mettra le moteur pour atteindre sa température limite de fonctionnement, en sachant que la température limite de fonctionnement est défini normalement pour $S \cdot I_n$ (il est prévu, en général une surcharge permanente admissible de 15%).

La température limite correspondant à cette surcharge est $k s^2 I_n^2$, le moteur étant mis en surcharge, à partir de l'état froid, avec une intensité de $n \cdot I_n$, la détection de dépassement sera atteinte lorsque :

$$k s^2 * I_n^2 = k n^2 * I_n^2 * (1 - e^{-t/Te})$$

$$n^2(1 - e^{-t/Te}) = s^2$$

$$(e^{-t/Te}) = \frac{n^2 - s^2}{n^2}$$

$$e^{t/Te} = \frac{n^2}{n^2 - s^2}$$

$$\frac{t}{Te} = \text{Logn} \frac{n^2}{n^2 - s^2}$$

$$t = Te * \text{Logn} \frac{n^2}{n^2 - s^2}$$

D'où l'expression :

$$t_f = Te * \text{Logn} \left(\frac{n^2}{n^2 - s^2} \right)$$

Nota:

Si la température limite de fonctionnement est défini pour I_n (pas de surcharge autorisée) l'équation devient :

$$t_f = Te * \text{Logn} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right)$$

C'est l'équation de la courbe «à froid» de la protection.

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 49 sur 69

➤ Exemple

$T_e = 15$ mn et une limite de fonctionnement de I_n le seuil de détection sera obtenu au bout d'un temps de :

258.9 s pour $n = 2 I_n$

36.7 s pour $n = 5 I_n$

9 s pour $n = 10 I_n$

Si après une surcharge de durée infinie à $n\% \cdot I_n$ (ce qui signifie que le moteur était alimenté en permanence à 50% de I_n si $n\% \cdot I_n = 0.5$) ; l'équilibre thermique est obtenu à $kn\%^2 I_n^2$, le temps t_c que mettra le moteur pour atteindre sa température limite de fonctionnement après une surcharge de $n \cdot I_n$ sera de :

la détection de dépassement sera atteinte pour :

$$((kn\%^2 \cdot I_n^2) + (kn^2 \cdot I_n^2)) \cdot (1 - e^{-t/T_e}) = ks^2 \cdot I_n^2$$

$$(n\% + n^2) \cdot (1 - e^{-t/T_e}) = s^2$$

$$e^{-t/T_e} = \frac{n\%^2 + n^2 - s^2}{n^2}$$

$$e^{t/T_e} = \frac{n^2}{n\%^2 + n^2 - s^2}$$

D'où l'expression :

$$t_c = T_e \cdot \text{Logn} \left(\frac{n^2}{n^2 - s^2 + n\%^2} \right)$$

C'est l'équation de la courbe «à chaud» de la protection.

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 50 sur 69

Conclusion:

Le simulateur n'a besoin, pour définir les temps de surcharge admissible pour atteindre la température limite de fonctionnement du moteur que de connaître :

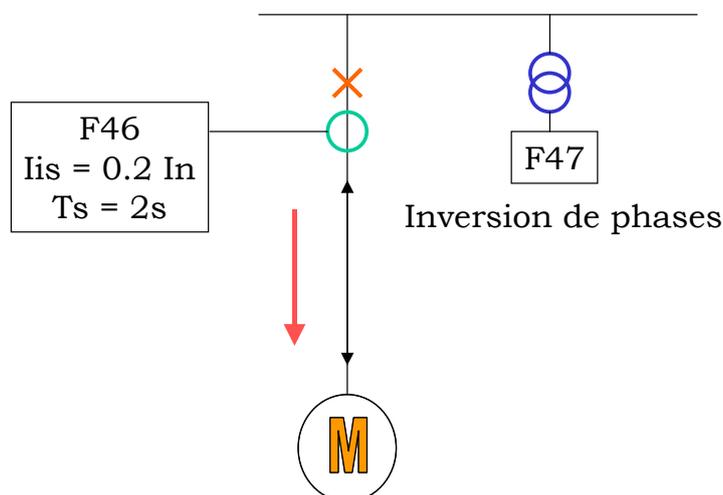
- * La constante de temps thermique à l'échauffement du moteur T_e .
- * La constante de temps thermique au refroidissement du moteur T_r (de manière à simuler, de la même manière, la déperdition de chaleur lorsque le moteur s'arrête, le réglage s'effectuant généralement sous la forme T_r/T_e).
- * La surcharge permanente admissible.
- * Du courant qui traverse le moteur, celui-ci peut être soit le courant secondaire (composante directe + composante inverse) soit un courant «équivalent» contenant la composante directe + la composante inverse survalorisée de manière à tenir compte du caractère particulier de la composante inverse sur la surcharge thermique (voir §6.2.1.2).

❖ Avantage:

Solution simple et fiable.

❖ Inconvénients:

Difficultés d'obtenir, auprès du Constructeur de moteurs, des renseignements précis.
 Ne tient ni compte des «points chauds», ni de la température réelle ambiante (surpuissance disponible quand la température ambiante est basse).

Protection les déséquilibres de courant (F46) les coupures de phase / inversion de phases (F47)

En plus d'intégrer la composante inverse dans la fonction image thermique, qui est obligatoirement une protection à détection lente, il est souhaitable, pour éviter un échauffement anormal du rotor, de protéger le moteur pour une anomalie d'alimentation ou pour une présence anormale de courant inverse.

Une phase manquante au démarrage du moteur provoquera un courant inverse de 346 % (avec $I_{dém} = 6 I_n$), qui sera détectée par $I_i \gg$.

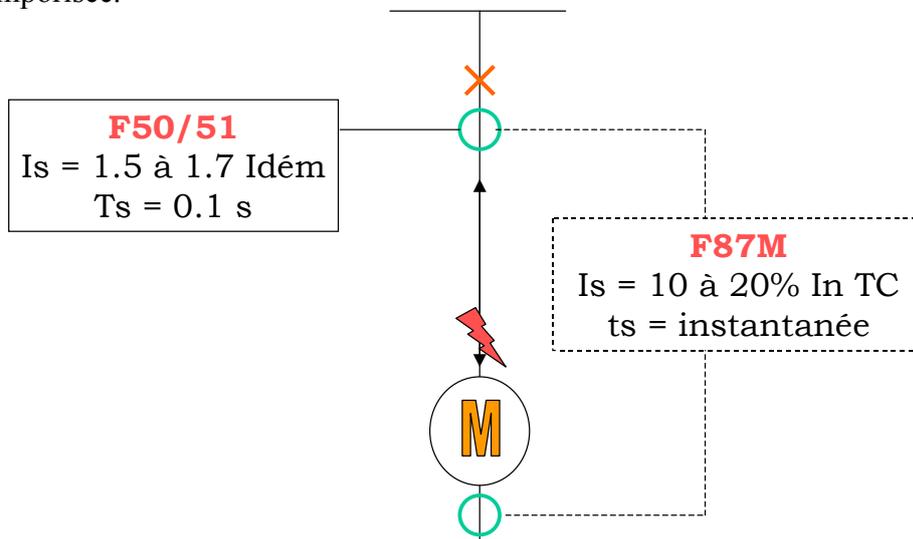
Le seuil $I_i >$ et la temporisation $t_{I_i >}$ seront réglés en fonction de la caractéristique $t = f(I_i)^2$ du moteur fourni par le constructeur.

Le seuil $I_i >$ sera réglé à $0.2 I_n$ environ.

Une temporisation minimum $t_{I_i >}$ de 2 s sera prévue pour laisser le temps aux défauts extérieurs d'être éliminés (valeur de temporisation pouvant être augmentée suivant les possibilités du moteur).

Protection contre un court-circuit entre phases (F50/51) :

En **MT**, la détection d'un court circuit entre phase se fera par une fonction ampèremétrique temporisée.



Le seuil en courant I_{cc} sera situé au-dessus du courant de démarrage (ou plus exactement du courant statorique à rotor bloqué), et tiendra compte de la présence éventuelle d'une composante inverse :

$1.5 I_{dém} < I_{cc} < 1.7 I_{dém}$ dans le cas des moteurs à démarrage direct ; et $5 I_n < I_{cc} < 9 I_n$ dans le cas des moteurs à démarrage indirect (voir 6 : moteur = générateur de courant de défaut pour défauts extérieurs).

La temporisation t_{lcc} (fonctionnement quasi-instantané) sera au minimum de 60 ms pour les moteurs asynchrones et de 100 ms pour les moteurs synchrones, une valeur de temporisation de 100 ms est conseillée pour les moteurs asynchrones et 150 ms pour les moteurs synchrones.

Nota : Dans le cas de très gros moteurs (ex > 1 à 2 MW), ce réglage peut être trop « destructif » car il correspondra à une puissance de court-circuit très élevée, cette fonction ampèremétrique sera complétée par une fonction différentielle à pourcentage dont le réglage sera de 10 à 20% de I_n .

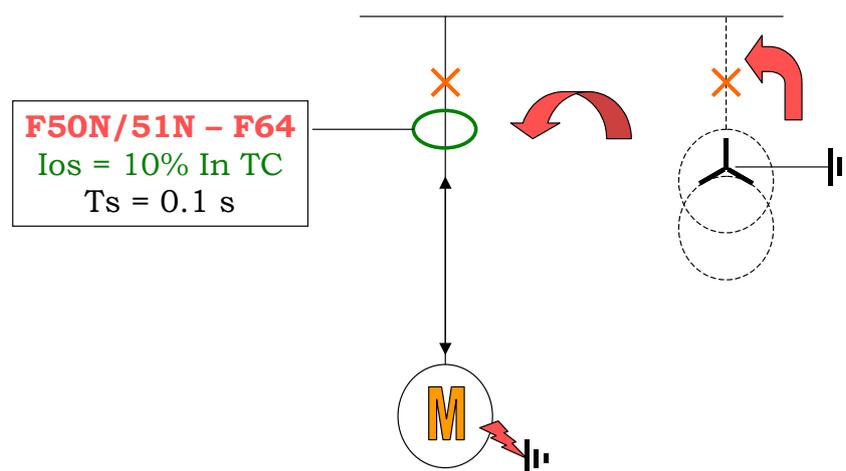
Cette protection différentielle à pourcentage comprendra, dans sa branche différentielle, une résistance de stabilisation permettant de s'affranchir des risques de déclenchement intempestif provoqués par la saturation d'un TC.

Il y a interdépendance entre le seuil I_{cc} en courant et la temporisation t_{lcc} , si le réglage du seuil retenu est $I_{cc} < 1.5 I_{dém}$ la temporisation t_{lcc} devrait être supérieure à $T_{dém} + 0.3$ s.

En **BT**, la détection se fera par un disjoncteur magnéto-thermique (notamment lorsque $S_n < 15$ kW) ou par des fusibles HPC type « moteurs » (associés à des interrupteurs ou contacteurs).

Protection contre des défauts phase-terre (F50N/51N, F64, F67N) :

Le type de détection dépendra du régime du neutre de l'installation :

Neutre direct à la terre :

La détection se fera par une fonction ampèremétrique temporisée, alimentée soit par les transformateurs de courant phases en montage résiduel :

$$I_r = 3I_o = I_1 + I_2 + I_3$$

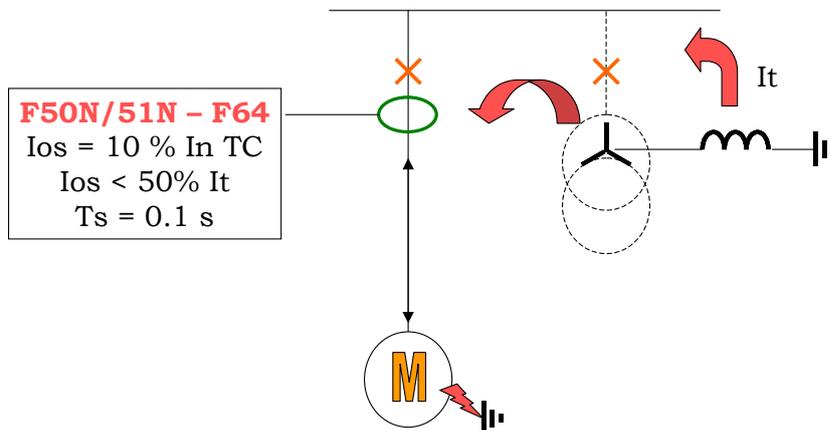
soit par un tore «homopolaire» englobant tous les conducteurs (y compris le neutre).

Compte tenu de l'erreur des transformateurs de courant, le seuil $I_{o>}$ sera volontairement limité de 10 à 20% de I_n dans le cas du montage résiduel et à 5% de I_n dans le cas du tore homopolaire (2 à 3% avec certaines précautions comme manchon métallique de flux, taille du Tore etc.).

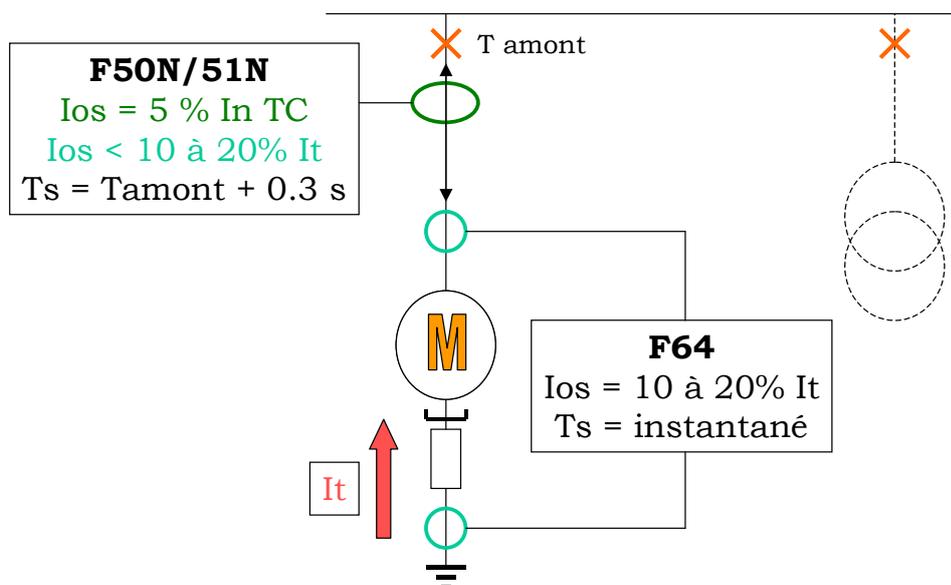
La temporisation $t_{I_{o>}}$ (fonctionnement quasi-instantané) sera de 100 ms pour éviter un intempetif sur courant pseudo-différentiel à l'enclenchement.

Neutre à la terre par une impédance :

Deux type de câblage sont possibles :



ou

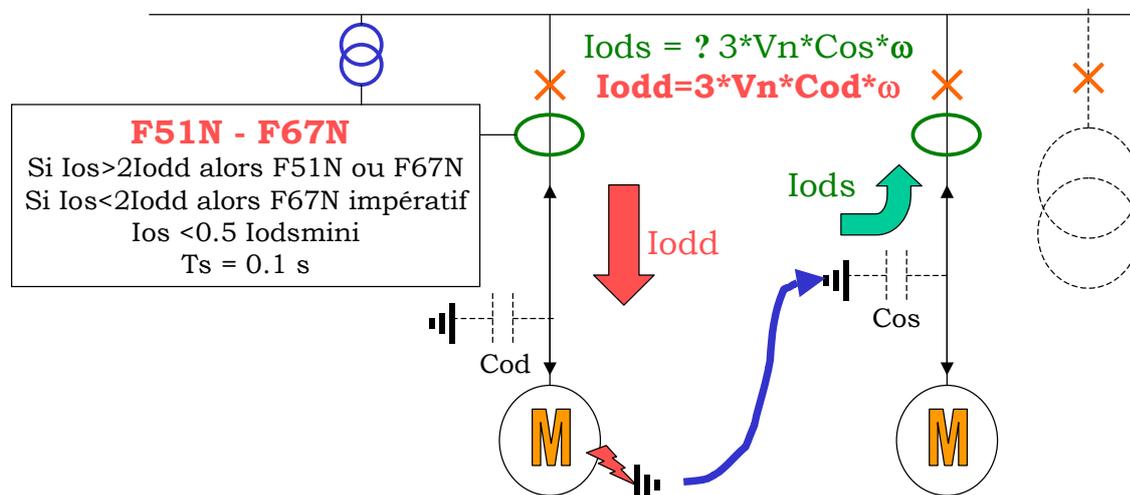


La détection se fera avec les mêmes principes que dans le cas du Neutre direct à la terre ; une attention particulière sera portée sur le choix de l'alimentation en courant (transformateurs de courant phases en montage résiduel ou tore homopolaire) le seuil $I_{o>}$ devra être au maximum de 50% du courant de limitation à la terre par l'impédance.

Si la mise à la terre a lieu au niveau du moteur, le relais de terre devra comporter un filtre d'harmonique 3, le courant d'harmonique 3 produit par la machine (qui est de l'ordre de 1 à 3% de I_n) circulera dans la connexion de mise à la terre même en absence de défaut, s'il peut se refermer par un autre chemin comme les capacités par exemple.

La temporisation $t_{I_{o>}}$ (fonctionnement quasi-instantané) sera de 100 ms pour éviter un intempestif sur courant pseudo-différentiel à l'enclenchement.

Neutre isolé :



$I_{odsmini}$ = (courant capacitif minimum du minimum de moteur pouvant rester en service) – (courant capacitif du départ supposé en défaut)

Le seul courant pouvant faire fonctionner une fonction ampèremétrique est le courant capacitif du réseau. Une étude plus complète est nécessaire pour savoir si les courants capacitifs sont suffisants, s'il n'y a pas de risques d'élévation de potentiel des masses, si la sécurité impose la seule signalisation et non le déclenchement etc.

Lorsque l'on dispose de 3 transformateurs de tension dont le primaire est couplé en étoile et P2 mis à la terre, le secondaire étant couplé en triangle «ouvert» il est possible de raccorder une mesure de tension résiduelle V_r :

$$V_r = 3V_o = V_1 + V_2 + V_3$$

celle-ci indiquera la présence d'un défaut à la terre mais sans permettre une quelconque sélectivité.

Nota :

a) Le réglage de détection de défaut terre $I_{o>}$ devra répondre à l'inégalité suivante :

$$2 * I_{défaut\ départsain} < (I_{o>}) < \frac{I_t}{2}$$

où :

I_t = courant de défaut maximum à la terre.

$I_{défaut\ départsain}$ = courant de défaut produit par les capacités du départ sain protégé, pour un défaut extérieur.

$$I_{défaut\ départsain} = 3 * V_n * C_o * \omega$$

où :

V_n = tension nominale phase-terre (tension simple).

C_o = capacité (de service) par phase du câble.

ω = pulsation du courant = 314 à 50 Hz.

L'inégalité peut donc s'écrire :

$$6 * V_n * C_o * \omega < (I_o >) < \frac{I_t}{2}$$

b) Dans le cas d'un réseau capacitif important (alimentation par câbles) et de plusieurs moteurs alimentés en parallèle sur le même réseau, il sera nécessaire d'utiliser un relais directionnel (F67N), le courant résiduel étant «polarisé» par la tension homopolaire. Cette solution nécessite l'emploi de 3 Transformateurs Tension (en Y).

c) Dans le cas de l'utilisation d'un tore homopolaire, pour la détection d'un défaut à la terre, la définition du nombre de tours n de ce tore se fait de la manière suivante :

si $I_o >$ est le réglage souhaité (directionnel ou non), répondant à l'inégalité ci-dessus

$$(I_o >) = 0.05 * I_n < \frac{I_t}{2}$$

La valeur à afficher $i_o >$ sur le relais sera :

$$(i_o >) = \frac{0.05 * I_n}{n} \quad \text{ou} \quad n = \frac{0.05 * I_n}{(i_o >)}$$

où :

I_n = courant nominal des TC.

n = nombre de tours du tore homopolaire.

d) Dans le cas où le stator du moteur serait mis à la terre par une impédance, de manière à servir de Générateur de terre pour l'ensemble du réseau, la protection de terre devrait être réalisée d'une manière différente :

$I_o >$ sera réglé comme dans les chapitres précédents (la mesure ne sera réalisée que sur la seule fréquence fondamentale, l'harmonique 3 étant filtrée).

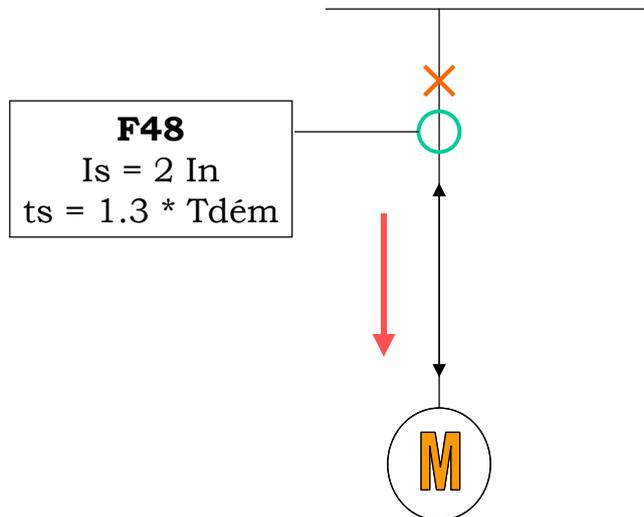
$t_{I_o >}$ sera réglé comme la protection immédiatement en aval majorée de 0.3 s.

La détection des défauts internes au moteur $I_{do >}$ se fera par une protection différentielle homopolaire qui compare la somme des courants de phases du moteur ($I_1 + I_2 + I_3$) au courant circulant dans le neutre I_r . Toute somme non nulle est significative d'un défaut extérieur.

MICROENER Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 57 sur 69

Cette protection différentielle dite à haute impédance comprendra, dans sa branche différentielle, une résistance de stabilisation permettant de s'affranchir des risques de déclenchement intempestif provoqués par la saturation d'un TC.

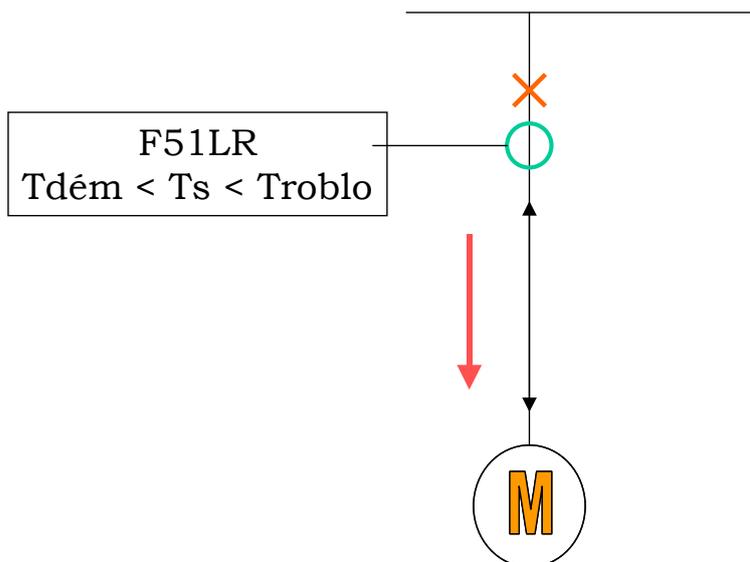
Le réglage de I_{do} sera de 10 à 20% de I_n , cette protection sera instantanée.

Protection contre un démarrage trop long ou un rotor bloqué :**Démarrage trop long (F48):**

L'examen de la courbe $i = f(t)$ au démarrage direct du moteur montre un appel de courant à la mise sous tension ($I_{dém}$) dont la valeur ne varie pratiquement pas pendant 50% du temps de démarrage pour les petites machines alors que pour les grosses machines la variation n'est sensible qu'après 80% du temps de démarrage. Pour les moteurs à démarrage indirect, dont le rôle est de limiter le courant de démarrage, la variation est encore moins significative. Il n'est donc pas possible, pour s'assurer que le démarrage se déroule normalement, d'effectuer une mesure ampèremétrique.

La seule fonction possible est de contrôler qu'après le démarrage, l'intensité absorbée par le moteur est «normale», celle-ci peut être momentanément supérieure à I_n (surtension, couple résistant momentanément plus important etc.).

Cette fonction sera donc assurée par un maximum d'intensité à temps constant dont le seuil de courant sera réglé à $2 I_n$ (maximum $0.5 * I_{dém}$, minimum $1.5 I_n$) et la temporisation à $1.3 T_{dém}$ (minimum $T_{dém} + 2 s$).

Rotor bloqué (F51LR):**a) Troblo > Tdém :**

Pour la majorité des petits moteurs, le constructeur a prévu que le temps où le rotor à chaud peut rester bloqué (Troblo) soit supérieur au temps de démarrage (Tdém). La fonction ampèremétrique rotor bloqué, dans ce cas, sera assurée par la fonction ampèremétrique démarrage trop long sans dommages pour le rotor.

La temporisation normalement associée au démarrage trop long devra satisfaire à l'inégalité :

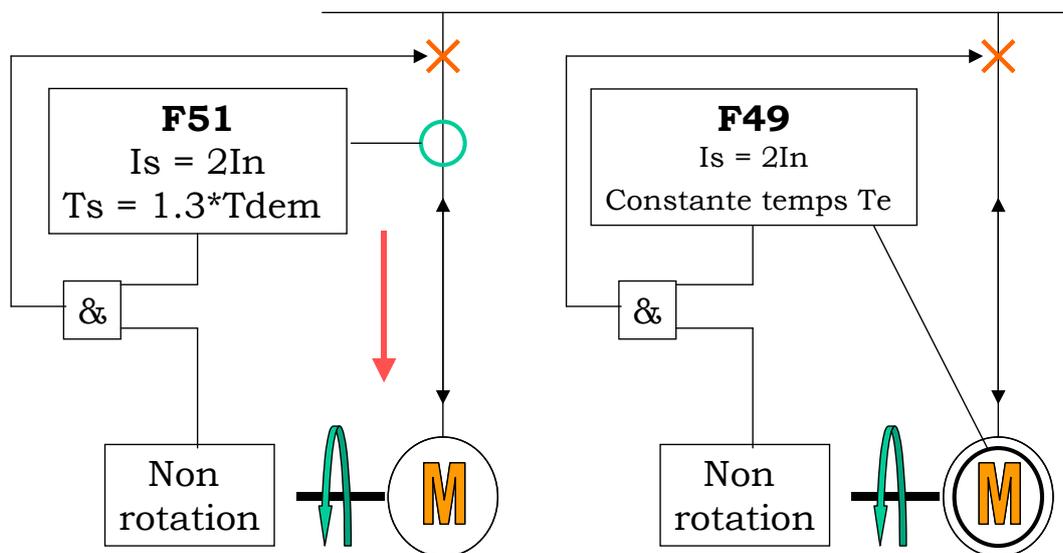
$Ttém < t < Troblo$ (t étant la temporisation affichée).

Nota:

En disposant d'une logique particulière (prenant en compte le démarrage du moteur, puis un appel de courant supérieur à $2 I_n$), il est possible de réduire la temporisation t à moins de 1 s.

b) Troblo < Tdém :

C'est le cas des très gros moteurs, la fonction démarrage trop long est inefficace car le rotor, arrêté ne se refroidissant plus par sa propre rotation, risque d'être détérioré. Il est nécessaire de prévoir une fonction spécifique.

Fonctions à contrôle tachymétrique :

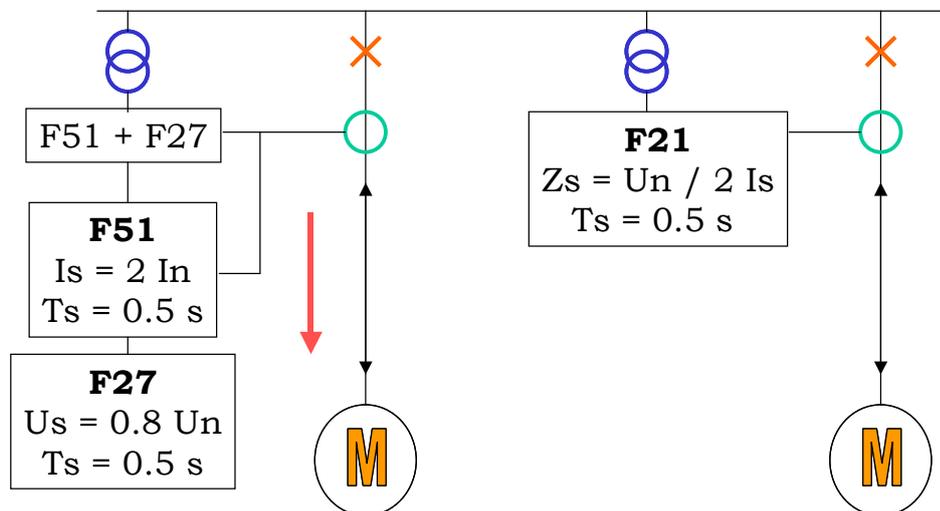
Le moteur doit être impérativement équipé d'un détecteur signalant la non rotation.

* Fonction tachymétrique + mesure de courant :

Le blocage est détecté si après une courte temporisation le seuil de courant I_s est supérieur à $2 I_n$ (+ non-rotation), cette fonction doit être inhibée au démarrage.

* Fonction tachymétrique + thermique :

Le blocage étant détecté par la non-rotation une image thermique du rotor est alors mise en route. La constante de temps du rotor, le temps de blocage à froid, le temps de blocage à chaud, seront communiqués par le Constructeur et la courbe sera choisie en fonction de ces paramètres.

Fonction à contrôle logique :

Un dispositif détecte si le moteur était au préalable en fonctionnement (courant traversant le moteur), si la tension du réseau ne présentait pas auparavant un passage à zéro (détecté par un relais à minimum de tension).

Si ces conditions sont remplies, la détection blocage rotor sera assurée par un seuil ampèremétrique (réglé à 2 In) légèrement temporisé ($t = 0.5$ s) lors de l'ordre de démarrage du moteur un ordre de verrouillage temporisé sera envoyé à la protection de détection de rotor bloqué.

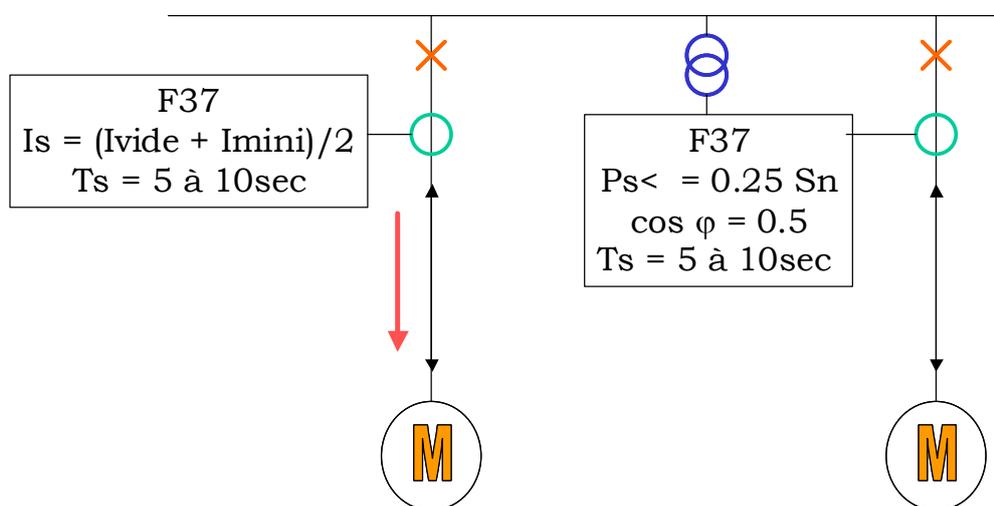
Le diagramme du moteur étant un cercle il est possible par un relais à minimum d'impédance légèrement temporisé ($t = 0.5$ s) de surveiller le moteur surtout lorsqu'il est à rotor bobiné (caractéristique de la machine réellement circulaire) :

$$Z <= U_n / 2 * I_s$$

Protection contre les démarrages trop fréquents (F66) :

Le Constructeur de moteurs impose un nombre de démarrage maximum (à froid et à chaud) dans un temps donné, ainsi que le temps de repos.

Le réglage consistera à afficher ces différents paramètres, la fonction redémarrage ne peut être autorisée, après ce repos, que si la machine est revenue à un état thermique suffisamment froid (validation par la fonction thermique).

Protection contre le désamorçage des pompes (F37) :

Le désamorçage et le barbotage se concrétisent par une diminution du courant et du cosinus. Lorsque la variation de courant est importante une seule mesure de courant est suffisante : c'est le cas des pompes centrifugeuses où un désamorçage avec cavitation se concrétise par un courant de 0.2 à 0.5 In.

Par contre dans le cas d'un barbotage avec vannes fermées le courant est de l'ordre de 0.5 à 0.8 In et dans ce cas il est préférable de faire une mesure à minimum de puissance active.

Cette fonction devra faire la différence avec l'arrêt normal du moteur (par une «mise en route» pour une fraction de quelques % de In).

Le réglage du seuil $I_{s<}$ sera :

$$I_{s<} \leq \frac{I_{vide} + I_{mini}}{2}$$

où :

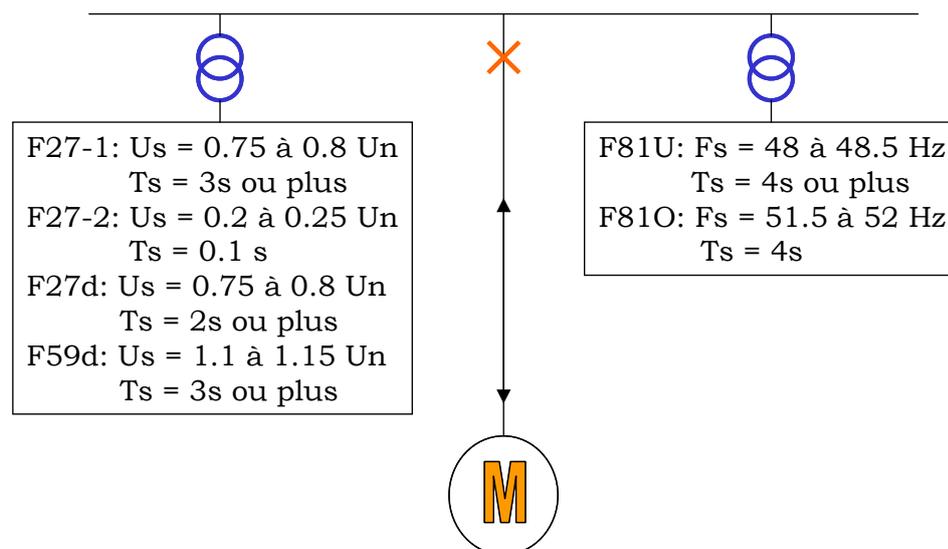
I_{vide} = courant à vide du moteur.

I_{mini} = courant minimum absorbé par le moteur.

La temporisation $t_{I_{s<}}$ associée à ce seuil sera de l'ordre de 5 à 10 s

Protections complémentaires pour les moteurs de forte puissance :

En plus de la protection différentielle de phases à pourcentage signalée au § 8.3, d'autres protections se justifient compte tenu de la taille de la machine et du coût de la remise en état suite à une détection tardive d'un défaut.



Protection à minimum de tension (F27-1) :

Cette protection est chargée de détecter les anomalies d'alimentation du réseau.

Le seuil $U_{<}$ sera réglé de 0.75 à $0.8 U_n$.

La temporisation $t_{U<}$ sera réglée au minimum à 3 s.

Protection de tension rémanente (F27-2) :

Cette protection est chargée d'assurer le découplage du réseau d'alimentation, les moteurs étant en cours d'arrêt, le réseau étant momentanément hors service et où toute remise sous tension de celui-ci pourrait provoquer des dommages pour le moteur (enclenchement en opposition de phases par exemple).

Le seuil $U_{<<}$ sera réglé de 0.20 à $0.25 U_n$.

La temporisation $t_{U_{<<}}$ sera réglée à 0.1 s.

Protection à minimum de tension directe (F27d) :

Cette protection est chargée de détecter les anomalies d'alimentation du réseau et notamment une inversion de l'ordre des phases.

Celle-ci devra autoriser la mise sous tension des moteurs s'il n'y a pas de risque d'inversion de sens de rotation.

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 64 sur 69

Le seuil $U_{d<}$ sera réglé de 0.75 à 0.8 U_n .
 La temporisation $t_{U<}$ sera réglée au minimum à 2 s.

Protection à maximum de tension(F59/F59d) :

Cette protection est chargée de détecter les anomalies d'alimentation du réseau et de protéger le matériel.

Le seuil $U_{>}$ sera réglé de 1.1 à 1.15 U_n .
 La temporisation $t_{U>}$ sera réglée au minimum à 3 s.

Protection à minimum de fréquence (F81U) :

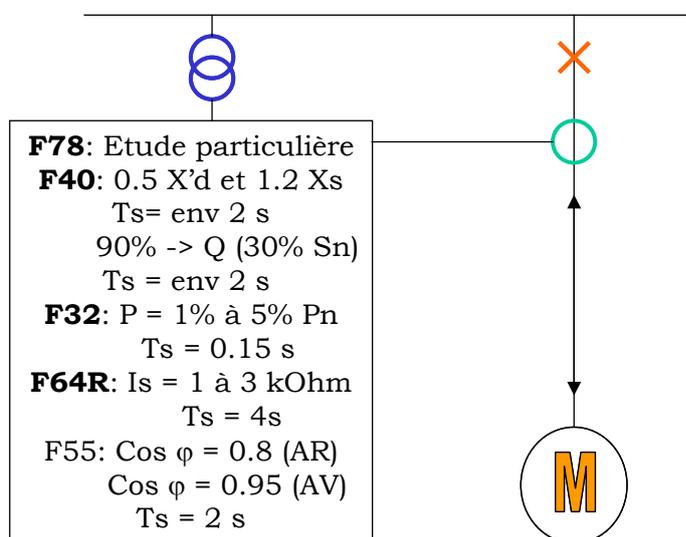
Cette protection est chargée de détecter les anomalies d'alimentation du réseau et de protéger le matériel.

Le seuil $F_{<}$ sera réglé de 48 à 48.5 Hz.
 La temporisation $t_{F<}$ sera réglée au minimum à 4 s.

Protection à maximum de fréquence (F81U) :

Cette protection est chargée de détecter les anomalies d'alimentation du réseau et de protéger le matériel.

Le seuil $F_{>}$ sera réglé de 51.5 à 52 Hz.
 La temporisation $t_{F>}$ sera réglée au minimum à 4 s.

Protections spécifiques au moteur synchrone :

La puissance des moteurs synchrones justifie, à elle seule, des fonctions supplémentaires :

Protection contre les pertes de synchronisme (F78) :

La perte de synchronisme (F78) par rapport au réseau (soit par une mesure angulaire des tensions, soit par une mesure d'oscillation de fréquence, soit par la variation du vecteur impédance stator qui en cas de perte de synchronisme décrit un parcours particulier régulier) fera l'objet d'une étude particulière.

Protection contre la perte d'excitation (F40) :

La détection de perte d'excitation (d'où risque de fonctionnement en régime asynchrone) sera réalisée :

a) Par une fonction de mesure à réactance capacitive :

(diagramme de «Blondel»)

Le relais vérifie que le moteur synchrone ne fonctionne pas en machine asynchrone : surveillance en fonction des impédances transitoire et synchrone (qui devront être impérativement connues).

Les réglages préconisés pour le cercle centré sur l'axe des X (côté - X) sont pour les 2 points extrêmes : 0.5 X'd et 1.2 Xs.

X'd = réactance directe transitoire du moteur synchrone (non saturée).

Xs = réactance synchrone (non saturée).

Une temporisation de l'ordre de 2 s sera associée, pour éviter les déclenchements intempestifs qui pourraient avoir lieu au moment des oscillations de puissance du réseau.

 Sce Technique : 01 48 15 09 03 Fax : 01 43 05 08 24	Les Cahiers Techniques de MICROENER	Cahier N°9
	PROTECTION DES MOTEURS	Rev. A Page 66 sur 69

b) Par une fonction de mesure de puissance réactive :

Elle suivra le diagramme d'excitation (en P, Q) de la machine (ce diagramme devra être impérativement connu).

Le relais sera réglé pour un fonctionnement à 90% de la zone d'instabilité (en - Q), soit sensiblement 30% de S_n .

Une temporisation de l'ordre de 2 s sera associée, pour permettre le fonctionnement du régulateur d'excitation.

Nota:

Il n'a pas été traité précédemment du démarrage des moteurs synchrones.

Ceux-ci étant de très fortes puissances, il est rarement possible de les démarrer en direct.

Les moteurs asynchrones de fortes puissances sont de type à rotor bobiné (le rotor étant en court-circuit).

Les moteurs synchrones sont à rotor bobiné et excité.

Une solution de démarrage, pour le moteur synchrone, est le démarrage en asynchrone dont le principe simplifié est le suivant :

- rotor non excité,
- dans les enroulements sont sortis sur bagues, insertion de résistances ou tout moyen compatible avec le «démarrage rotorique».
- après le lancement du moteur, et de la phase séquentielle, court-circuitage du rotor jusqu'à la vitesse en asynchrone du moteur (98 % de la vitesse de synchronisme). retrait du court-circuitage du rotor et excitation de celui-ci.

Protection contre un fonctionnement en alternateur (F32) :

Cette protection est chargée de détecter un fonctionnement anormal du moteur :

Lorsque coupé de son alimentation, il est entraîné par sa charge (effet de volant) et produit de l'énergie à la partie du réseau encore sous tension.

Le seuil $<P$ sera réglé de 1 à 5% de P_n .

La temporisation $t_{<P}$ sera réglée au minimum à 0.15 s.

Protection contre la mise à la masse du rotor (F64R) :

Le circuit d'excitation, alimenté en courant continu, est normalement isolé de la masse de la machine.

Un seul défaut d'isolement sur une polarité et la masse ne sera donc pas dangereux, par contre un deuxième défaut d'isolement sur l'autre polarité et la masse provoquera un court-circuit très dangereux pour le moteur.

L'isolement doit donc être contrôlé en permanence, par l'intermédiaire de l'injection d'une tension de fréquence < 20 Hz, et une mesure du courant de cette même fréquence ou par la mesure du courant de fuite à la terre (injection au travers d'un diviseur potentiométrique).

Généralement une platine d'injection, assurant le découplage des différents circuits est nécessaire.

Le seuil $I_{\text{roto}}<$ sera réglé de 1 à 3 k Ω .

La temporisation $t_{\text{Iroto}}<$ sera réglée à 4 s.

Protection contre $\cos \varphi$ incorrect (F55) :

La surveillance du bon fonctionnement du régulateur d'excitation du moteur (et lorsque le moteur synchrone est utilisé en pompe pour détecter un désamorçage) sera assurée par le contrôle du facteur de puissance.

Le seuil φ arrière sera $\cos \varphi = 0.8$ (AR).

Le seuil φ avant sera $\cos \varphi = 0.95$ (AV).

La temporisation $t_{\cos\varphi}$ sera réglée à 2 s.

Problèmes liés aux permutations de source (réseau avec des moteurs)

A la coupure de l'alimentation, les moteurs sont magnétisés et continuent à produire une tension qui décroît et perd le synchronisme avec la tension préalable d'alimentation.

Une remise sous tension, sans précautions (tension propre du moteur non amortie), peut entraîner un appel de courant important qui risque d'imposer des efforts importants sur l'arbre.

Pour éviter ce risque il faut :

* que la remise sous tension soit suffisamment rapide pour que la tension résiduelle du moteur soit peu amortie (étude nécessaire).

* rendre impossible le réenclenchement du moteur tant qu'une grandeur électrique, mesurée au niveau du moteur, ne soit pas inférieure à une valeur minimum :

- relais à minimum de fréquence $F_r = 20$ Hz instantané.
- relais à minimum de tension $U_s = 0.2 U_n$ instantané.



MICROENER

49 rue de l'Université - 93160 Noisy le Grand - Tél : +33 1 48 15 09 01 - Fax : +33 1 43 05 08 24
info@microener.com - www.microener.com