

## Électrotechnique de puissance : les moteurs électriques expliqués aux électroniciens

2<sup>e</sup> édition

En téléchargement gratuit :

- Circuits imprimés
- Corrigés des évaluations

Auteur : Gérard GUIHÉNEUF

Éditeur : Elektor

ISBN : 978-2-86661-194-1

Format : 14 × 21 cm

Nbre de pages : 432

Prix : 46,50 €

**Ce fichier contient le sommaire suivi de 16 pages  
représentatives de l'ensemble du livre qui en compte 432.**

### Le sujet

L'électronique a investi le domaine de l'électrotechnique : les hacheurs de puissance, les démarreurs-ralentisseurs progressifs et les variateurs de vitesse associés à des moteurs électriques à courant continu ou alternatif de plusieurs dizaines de kilowatts se sont démocratisés. Curieusement, alors que l'électronique et l'électrotechnique fusionnent dans des applications industrielles ou domestiques qui mettent en œuvre des moteurs électriques, ces deux technologies demeurent des filières distinctes au sein de l'Éducation Nationale. Ainsi chacun (enseignant ou élève) suit sa voie dans sa filière en se privant des progrès du voisin électronicien ou électrotechnicien !

Face à ce divorce consommé avant mariage, l'auteur s'adresse dans cet ouvrage autant aux électroniciens qu'aux électrotechniciens. Les électroniciens découvriront le monde des moteurs électriques tandis que les électrotechniciens admettront qu'électronique n'est pas obligatoirement synonyme de complexité. Quatre chapitres s'appuient sur une information accessible et digeste : constitution, fonctionnement, caractéristiques, domaines d'utilisation des différents types de moteurs ainsi que des réalisations électroniques simples et concrètes.

Le **premier chapitre** détaille les principes de variation de la vitesse des **moteurs à courant continu** : conversion alternatif/continu (redresseurs commandés par des thyristors) et conversion continu/continu (hacheurs à transistors IGBT). Mise en pratique immédiate avec un variateur pour mini-perceuse et un variateur de vitesse pour train miniature.

Les **moteurs à alimentation alternative monophasée** (à induction, à bagues de déphasage, universel) du **deuxième chapitre** font appel à une électronique de puissance. La puissance des réalisations proposées s'exprime

en kW : démarreur à contacteur statique à deux points de commande pour moteur asynchrone monophasé à induction et variateur de vitesse pour moteur universel.

Dans le **troisième chapitre**, l'auteur s'intéresse au moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie : le **moteur asynchrone triphasé**. L'auteur aborde entre autres : les différents principes de démarrage, de variation de vitesse et de freinage ; le démarreur électromécanique à contacteurs, le démarreur-ralentisseur, le convertisseur de fréquence ou le couplage des pôles pour la variation de vitesse, le moteur frein, le freinage par injection de courant...

Construisez le démarreur inverseur statique pour moteur asynchrone triphasé et découvrez la proximité entre électronique et électrotechnique : des portes NON-OU alimentées sous 12 V commandent le sens de rotation d'un moteur de 1,5 kW alimenté sous une tension triphasée 3 × 400 V.

Cette nouvelle édition s'enrichit d'un **quatrième chapitre** consacré aux **moteurs sans balais** (brushless), du moteur synchrone triphasé de plusieurs centaines de kW au moteur à courant continu de quelques centaines de watts, en passant par les moteurs pas à pas ou encore le très surprenant moteur linéaire. Le lecteur découvrira les différents modes de commande : codeurs incrémentaux ou absolus associés à un onduleur commandé en courant ou en tension ou bien capteurs à effet Hall pour l'autopilotage, commande en pas entiers/demi-pas/micro-pas... L'auteur propose également de réaliser un banc d'essai pour moteurs pas à pas unipolaires.

Enfin, le lecteur pourra mesurer l'évolution de ses connaissances grâce à des questionnaires d'évaluation intermédiaire, intégrés à chaque chapitre, corrigés à télécharger sur [www.elektor.fr/moteurs](http://www.elektor.fr/moteurs).

## Autres titres du même auteur

G. Guihéneuf

### comprendre et dimensionner les installations domestiques à énergies renouvelables

- chauffage par géothermie ou par aérothermie
- chauffage par bio-masse solide (bois)
- chauffe-eau solaire
- centrale électrique photovoltaïque
- centrale électrique éolienne

technique pratique

**e** Documentation pédagogique en ligne sur [www.elektor.fr/NRJ](http://www.elektor.fr/NRJ)

elektor - publitronic

ISBN 978-2-86661-170-5  
[www.elektor.fr/nrj](http://www.elektor.fr/nrj)

### PHOTOVOLTAÏQUE

## alimentation électrique autonome de sites isolés

Réalisez vous-même l'électrification d'un abri de jardin, d'un garage ou d'un mobile home

G. Guihéneuf

- onduleurs 230 V - 50 Hz (160 et 300 VA)
- régulateurs de charge 12 V et 24 V
- indicateur de taux de charge
- suiveur solaire

technique pratique

**e** Téléchargement gratuit en ligne des fichiers des circuits imprimés sur [www.elektor.fr/NRJSOL](http://www.elektor.fr/NRJSOL)

elektor

ISBN 978-2-86661-181-1  
[www.elektor.fr/nrjsol](http://www.elektor.fr/nrjsol)

elektor Gérard Guihéneuf

## réalisez & programmez 12 applications pratiques pour maîtriser le PICBASIC PB-3B

- Automate programmable
- Thermomètre
- Station météo
- Alimentation numérique
- Capacimètre
- Luxmètre
- CO-mètre
- Centrale d'alarme
- Gradateur à 2 voies
- Centrale domotique
- Disjoncteur programmable
- Variateur de vitesse à commande PWM

**e**

ISBN : 978-2-86661-166-8  
[www.elektor.fr/picbasic](http://www.elektor.fr/picbasic)

Mariline Thiebaut-Brodier & Gérard Guihéneuf

## eau de pluie récupération & utilisation

### montages électroniques PICBASIC pour le recyclage des eaux de pluie

Credit d'impôt : réglementation & législation

Pour la mesure, le contrôle de qualité et l'automatisation : 6 réalisations électroniques

- pluviomètre
- conductivimètre
- unité d'arrosage
- jauge numérique
- pH-mètre numérique
- compteur de consommation

**e** elektor

ISBN : 978-2-86661-176-7  
[www.elektor.fr/eau](http://www.elektor.fr/eau)

## Sommaire

### 1. Électronique appliquée au moteur à courant continu

- 1.1 Domaines d'utilisation des moteurs à courant continu
  - E4 ✦ Dimensionnement et choix des constituants d'un système (convoyeur)
- 1.2 Constitution du moteur à courant continu
- 1.3 Fonctionnement du moteur à courant continu
- 1.4 Différents modes d'alimentation de l'induit et de l'inducteur
- 1.5 Principe de la variation de vitesse d'un moteur à courant continu
- 1.6 Variation de vitesse par convertisseur alternatif/continu (redresseurs commandés par des thyristors)
  - 1.6.1 Pont redresseur à diode P1 sur charge RLE
  - 1.6.2 Pont redresseur à diodes PD2 sur charge RLE
  - 1.6.3 Pont redresseur commandé par des thyristors PD2 sur charge RLE
  - 1.6.4 Conduction continue d'un pont redresseur à thyristors
  - 1.6.5 Quadrants de fonctionnement de l'association variateur/moteur
- 1.7 Analyse fonctionnelle du schéma de mise en œuvre d'un variateur de vitesse industriel
- 1.8 Dimensionnement des constituants d'un système industriel (exemple)
  - 1.8.1 Cahier des charges simplifié
  - 1.8.2 Dimensionnement et choix du moteur
  - 1.8.3 Dimensionnement et choix du variateur
  - 1.8.4 Dimensionnement et choix des protections (fusibles)
- 1.9 Optimisation de l'association moteur/variateur (paramétrage d'un variateur de vitesse)
- 1.10 Évaluation intermédiaire (exercices E1 à E4)
  - E1 ✦ Questionnaire VRAI/FAUX (quiz)
  - E2 ✦ Questionnaire à choix multiples (QCM)
  - E3 ✦ Grue portuaire (calculs de grandeurs électriques complémentaires)
- 1.11 Variation de vitesse par convertisseur continu/continu (hacheurs à transistors IGBT)
  - 1.11.1 Hacheur série sur charge résistive
  - 1.11.2 Commutation statique par transistor MOSFET ou IGBT
  - 1.11.3 Hacheur série non réversible sur charge RLE (moteur à courant continu)
  - 1.11.4 Hacheur réversible en courant (hacheur à deux quadrants)
  - 1.11.5 Hacheur réversible à quatre quadrants
- 1.12 Évaluation intermédiaire (exercices E5 à E7)
  - E5 ✦ Questionnaire VRAI-FAUX (quiz)
  - E6 ✦ Questionnaire à choix multiples (QCM)
  - E7 ✦ Vélo à assistance électrique
- 1.13 Réalisation d'un variateur de vitesse pour mini-perceuse à courant continu
  - 1.13.1 Cahier des charges
  - 1.13.2 Obtention d'une vitesse variable
  - 1.13.3 Analyse du schéma
  - 1.13.4 Dimensionnement des résistances R3 et R4
  - 1.13.5 Réalisation pratique
  - 1.13.6 Liste des composants
  - 1.13.7 Essais – Mise au point
- 1.14 Réalisation d'un variateur de vitesse pour train miniature
  - 1.14.1 Cahier des charges
  - 1.14.2 Analyse du schéma *Alimentation réglable*  
*Hacheur série à transistors*
  - 1.14.3 Réalisation pratique
  - 1.14.4 Liste des composants
  - 1.14.5 Essais – Mise au point
- 1.15 Conclusion

### 2. Électronique appliquée aux moteurs monophasés

- 2.1 Applications domestiques des moteurs monophasés
- 2.2 Moteur asynchrone monophasé à induction
  - 2.2.1 Constitution
  - 2.2.2 Fonctionnement du moteur asynchrone monophasé
  - 2.2.3 Interprétation des informations du constructeur
  - 2.2.4 Démarrage et inversion du sens de rotation
  - 2.2.5 Conception d'un schéma et dimensionnement de constituants  
*Cahier des charges simplifié d'un portail électrique*  
*Lecture commentée du schéma électrique*

- Dimensionnement et choix des composants électriques du circuit de puissance*
- 2.3 Moteur asynchrone monophasé à bagues de déphasage
    - 2.3.1 Constitution
    - 2.3.2 Fonctionnement du moteur monophasé à bagues de déphasage
    - 2.3.3 Caractéristiques et domaines d'utilisation
  - 2.4 Moteur universel
    - 2.4.1 Constitution
    - 2.4.2 Fonctionnement du moteur universel – Inversion du sens de rotation
    - 2.4.3 Caractéristiques et domaines d'utilisation
  - 2.5 Variation de vitesse des moteurs monophasés
    - 2.5.1 Variation de vitesse des moteurs asynchrones monophasés
    - 2.5.2 Variation de vitesse du moteur universel
  - 2.6 Évaluation
    - E1 ⇨ Questionnaire VRAI/FAUX (quiz)
    - E2 ⇨ Questionnaire à choix multiples (QCM)
    - E3 ⇨ Interprétation des informations mentionnées sur la plaque signalétique d'un moteur
  - E4 ⇨ Maintenance du système électrique du portail semi-automatique
  - E5 ⇨ Remplacement du moteur du système électrique du portail semi-automatique
  - E6 ⇨ Variation de vitesse d'un moteur universel de perceuse
  - 2.7 Démarreur à contacteur statique à deux points de commande pour moteur asynchrone monophasé à induction
    - 2.7.1 Cahier des charges
    - 2.7.2 Analyse du schéma électronique
    - 2.7.3 Réalisation pratique
    - 2.7.4 Liste des composants
    - 2.7.5 Essais – Mise au point
  - 2.8 Variateur de vitesse pour moteur universel
    - 2.8.1 Cahier des charges et choix technologique retenu
    - 2.8.2 Analyse du schéma électronique
    - 2.8.3 Réalisation pratique
    - 2.8.4 Liste des composants
    - 2.8.5 Essais – Mise au point
  - 2.9 Conclusion

### 3. Électronique appliquée aux moteurs asynchrones triphasés

- 3.1 Applications industrielles du moteur asynchrone triphasé
- 3.2 Caractéristiques couple/vitesse et puissance/vitesse des charges entraînées
- 3.3 Constitution et principe de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé
  - 3.3.1 Constitution du moteur asynchrone triphasé
    - Le stator*
    - Le rotor*
  - 3.3.2 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé
- 3.4 Interprétation des informations fournies par les constructeurs
  - 3.4.1 Données techniques consultables dans le catalogue du constructeur
  - 3.4.2 Informations techniques disponibles sur la plaque signalétique
  - 3.4.3 Dédution de données complémentaires
- 3.5 Couplage de la plaque à bornes
- 3.6 Démarreurs électromécaniques à contacteurs
  - 3.6.1 Problématique
  - 3.6.2 Démarreur direct à contacteur (un seul sens de rotation)
  - 3.6.3 Démarreur direct inverseur (deux sens de rotation)
  - 3.6.4 Démarreur « Étoile – Triangle »  
*Fonctionnement du démarreur « Étoile – Triangle » proposé par le constructeur SCHNEIDER*
  - 3.6.5 Démarrage par rhéostat électrolytique  
*Moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné*  
*Principe du démarrage par rhéostat électrolytique*
- 3.7 Incidences sur le moteur d'une variation de la tension d'alimentation
- 3.8 Temps de démarrage d'un moteur asynchrone triphasé
  - Détermination du temps de démarrage*
  - Moment d'inertie de l'ensemble moteur-ventilateur centrifuge (J)*
  - Détermination du couple accélérateur moyen (Ma)*
  - Calcul du temps de démarrage*
  - Compatibilité avec la surintensité de démarrage du moteur*
- 3.9 Alimentation d'un moteur asynchrone triphasé avec une tension monophasée
- 3.10 Évaluation intermédiaire (exercices E1 à E5)
  - E1 ⇨ Questionnaire VRAI/FAUX (quiz)
  - E2 ⇨ Questionnaire à choix multiples (QCM)
  - E3 ⇨ Lecture d'une plaque signalétique
  - E4 ⇨ Choix d'un rhéostat électrolytique (démarreur RLV)

- E5 ✦ Détermination du temps de démarrage d'un moteur
- 3.11 Démarreurs-ralentisseurs progressifs électroniques
  - 3.11.1 Principe de fonctionnement
  - 3.11.2 Démarrage et ralentissement progressifs avec le démarreur Altistart 01 (SCHNEIDER)
  - 3.11.3 Possibilité de sous-calibrer un démarreur électronique
  - 3.11.4 Mise en œuvre d'un contacteur de court-circuitage
  - 3.11.5 Conséquences électromécaniques de l'association démarreur-moteur
- 3.12 Variation de vitesse des moteurs asynchrones triphasés
  - 3.12.1 Moteur asynchrone triphasé à deux vitesses à enroulements séparés
  - 3.12.2 Moteurs asynchrones triphasés à couplage de pôles (moteurs « Dahlander »)
  - 3.12.3 Variateurs de vitesse ou convertisseurs de fréquence  
*Facilité de mise en œuvre (simplicité des schémas préconisés par les constructeurs)*  
*Structure interne et fonctionnement des variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence)*  
*Commande MLI et conséquences électromécaniques de l'association variateur/moteur*
- 3.13 Freinage des moteurs asynchrones triphasés
  - 3.13.1 Solution mécanique : le moteur frein
  - 3.13.2 Solution électrique : freinage par injection d'un courant continu  
*Dimensionnement de certains constituants*
  - 3.13.3 Solution électronique : dissipation thermique dans une résistance de freinage
- 3.14 Évaluation intermédiaire (exercices E6 à E9)
  - E6 ✦ Questionnaire VRAI/FAUX (quiz)
  - E7 ✦ Questionnaire à choix multiples (QCM)
  - E8 ✦ Station de pompage (association démarreur électronique/moteur asynchrone triphasé)
  - E9 ✦ Variation de vitesse d'un groupe de ventilation
- 3.15 Démarreur inverseur statique pour moteur asynchrone triphasé
  - 3.15.1 Cahier des charges
  - 3.15.2 Relais statique à thyristors CX380D5R
  - 3.15.3 Analyse du schéma  
*Sous-ensemble « Puissance »*  
*Sous-ensemble « Commande »*
  - 3.15.4 Réalisation pratique
  - 3.15.5 Liste des composants
  - 3.15.6 Essais – Mise au point  
*Contrôle du fonctionnement de la partie « commande »*  
*Contrôle de la partie « puissance »*
  - 3.15.7 Adjonction d'un contact au disjoncteur de moteur
- 3.16 Conclusion

## 4. Électronique appliquée aux moteurs sans balais

- 4.1 Applications des moteurs sans balais
- 4.2 Moteur synchrone triphasé
  - 4.2.1 Constitution et principe de fonctionnement
  - 4.2.2 Couple électromagnétique produit par le moteur
  - 4.2.3 Modélisation du fonctionnement en charge du moteur synchrone triphasé  
*Préambule*  
*Schéma équivalent d'un enroulement statorique du moteur*  
*Détermination du facteur de puissance (cos(j)) du moteur de 105 kW*  
*Calcul et détermination graphique de la force contre-électromotrice E*  
*Calcul du couple mécanique (méthode 1)*  
*Calcul du couple mécanique (méthode 2) – Déduction de paramètres à réguler*  
*Calcul du couple mécanique (méthode 3) – Déduction de paramètres à réguler*
- 4.3 Principes d'autopilotage du moteur synchrone triphasé
  - 4.3.1 Schéma de principe
  - 4.3.2 Les différents capteurs de position  
*Codeurs incrémentaux*  
*Codeurs absolus*
  - 4.3.3 Moteur synchrone alimenté par un onduleur de courant (commutateur de courant)
  - 4.3.4 Moteur synchrone alimenté par un onduleur de tension
- 4.4 Évaluation intermédiaire (exercices E1 à E4)
  - E1 ✦ Constitution d'un moteur synchrone triphasé – Questionnaire VRAI / FAUX (quiz)
  - E2 ✦ Fonctionnement du moteur synchrone triphasé autopiloté – Questionnaire VRAI / FAUX (quiz)
  - E3 ✦ Moteur synchrone triphasé à aimants permanents
  - E4 ✦ Moteur synchrone triphasé

- 4.5 Moteur à courant continu sans balais (moteur BLDC)
  - 4.5.1 Structure interne
  - 4.5.2 Principe de fonctionnement – Autopilotage par capteurs à effet Hall
  - 4.5.3 Autopilotage par la force contre-électromotrice des enroulements statoriques
  - 4.5.4 Interprétation des informations du constructeur – Formules d'électrotechnique
- 4.6 Évaluation intermédiaire (exercices E5 à E7)
  - E5 ✧ Constitution du moteur à courant continu sans balais – Questionnaire VRAI / FAUX (quiz)
  - E6 ✧ Autopilotage du moteur à courant continu sans balais – Questionnaire VRAI/FAUX (quiz)
  - E7 ✧ Détermination d'informations complémentaires à partir des données fournies par le constructeur
- 4.7 Moteurs pas à pas
  - 4.7.1 Moteurs à aimants permanents  
*Constitution et différents types*  
*Structures d'alimentation*  
*Modes de commande*
  - 4.7.2 Moteurs à réluctance variable
  - 4.7.3 Moteurs hybrides
  - 4.7.4 Caractéristiques électromécaniques (courbes couple/fréquence)
- 4.8 Évaluation intermédiaire (exercices E8 à E12)
  - E8 ✧ Constitution des moteurs pas à pas (quiz)
  - E9 ✧ Modes de commande des moteurs pas à pas (quiz)
  - E10 ✧ Résolution d'un moteur pas à pas à aimants permanents
  - E11 ✧ Résolution d'un moteur pas à pas hybride
  - E12 ✧ Conditions d'utilisation d'un moteur pas à pas
- 4.9 Moteurs linéaires  
*Principe de fonctionnement d'un moteur linéaire synchrone triphasé*
- 4.10 Réalisation électronique : banc d'essai pour moteurs pas à pas unipolaires
  - 4.10.1 Cahier des charges
  - 4.10.2 Analyse du schéma électronique
  - 4.10.3 Réalisation pratique
  - 4.10.4 Liste des composants
  - 4.10.5 Essais – Mise au point  
*Procédure*
- 4.11 Conclusion

## Conclusion

Annexe 1 – Glossaire

Annexe 2 – Conseils de sécurité

*Isolation en classes*

*En pratique*

*Accessoires*

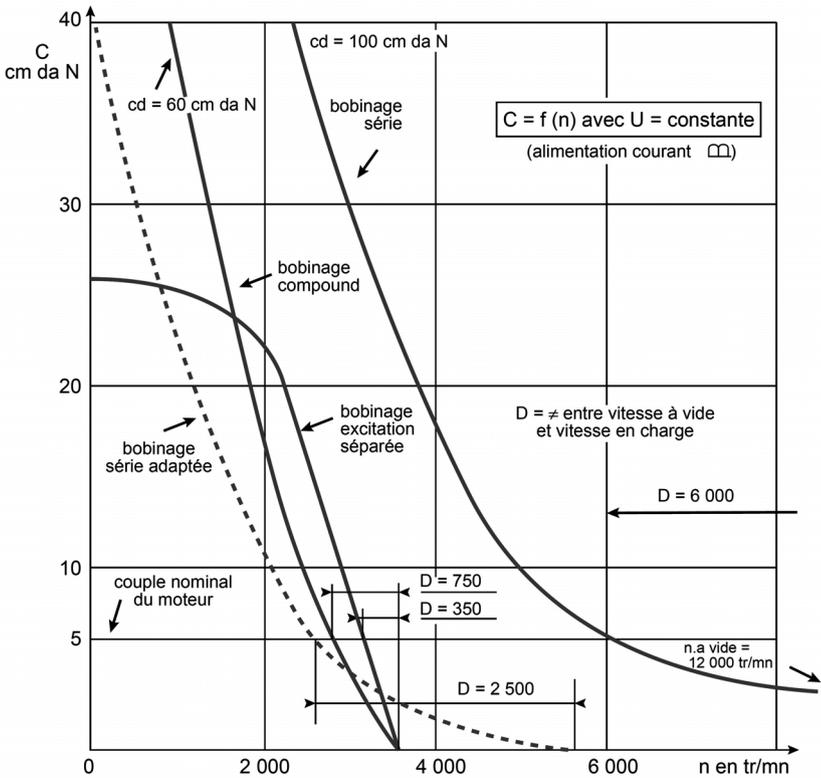
*Rude épreuve*

*Transformateurs*

Annexe 3 – Liens

Index

## 1.5 Principe de la variation de vitesse d'un moteur à courant continu

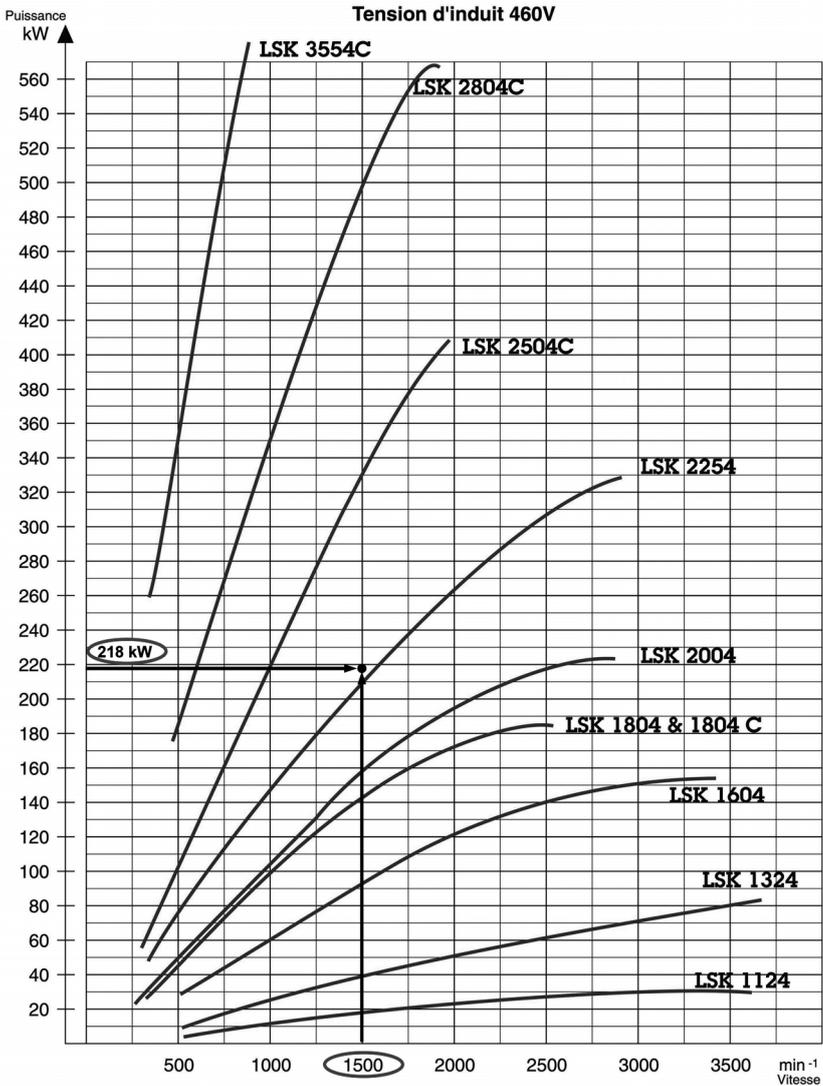


**Figure 1-14** - En fonction du mode de raccordement des enroulements de l'inducteur, sous une tension d'alimentation constante du moteur (induit et inducteur), chaque moteur à courant continu se distingue par une relation couple/vitesse spécifique.

(Source : constructeur LEROY SOMER)

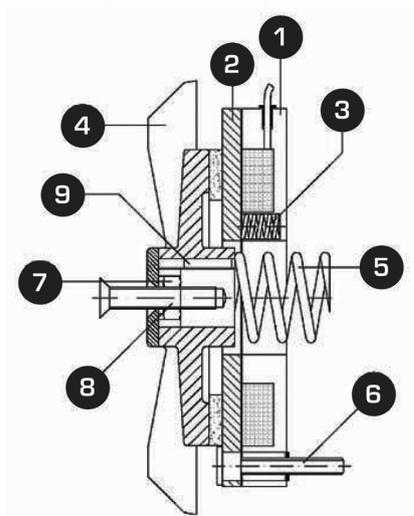
Pour un moteur à excitation séparée, la relation entre le couple produit par le moteur et sa vitesse de rotation montre une réduction de la vitesse en charge par rapport à la vitesse à vide lorsque la tension d'alimentation de l'induit est constante (se reporter à la figure 1-12). Qu'en est-il pour les autres moteurs à excitation shunt, série ou composée ? La figure 1-14 montre l'allure des relations couple/vitesse pour ces moteurs dont l'induit et l'inducteur sont alimentés sous une tension constante (moteurs fractionnaires LEROY SOMER d'une puissance inférieure à 1 kW – le qualificatif « fractionnaire » indique que la puissance de ces moteurs est une fraction du kilowatt). Pour ces moteurs dont le couple nominal est de 5 Nm, la figure 1-14 montre que le moteur à excitation séparée est celui dont la

# 1. Électronique appliquée au moteur à courant continu



**Figure 1-31** - Pour faciliter le choix de la gamme du moteur, le constructeur LEROY SOMER propose un abaque de présélection.

## 1. Électronique appliquée au moteur à courant continu



- 1 - Électroaimant
- 2 - Armature de l'induit
- 3 - Ressort de pression
- 4 - Rotor de ventilation en fonte
- 5 - Ressort
- 6 - Vis
- 7 - Écrou auto-bloquant
- 8 - Goujon
- 9 - Clavette

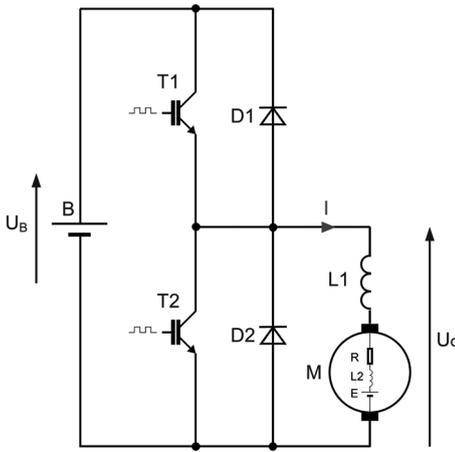
**Figure 1-34b** - Un frein électrique permanent dit « à manque de courant » est composé d'un électroaimant qui nécessite d'être alimenté pour déplacer linéairement le disque de freinage pour libérer l'axe de rotation du moteur. (Source : constructeur EMG)

Par ailleurs, l'exploitation du moteur amène à considérer trois quadrants de fonctionnement gérés par le variateur de vitesse :

- ◆ Quadrant n°1 : levage d'un conteneur vide ou plein.
- ◆ Quadrant n°3 : descente d'un conteneur vide ou dont la masse n'entraîne pas par gravité le moteur à une vitesse supérieure à la vitesse de descente souhaitée.
- ◆ Quadrant n°4 : descente d'un conteneur plein dont la séquence de fonctionnement ou de freinage s'opère par restitution d'énergie sur le réseau. Dans ce cas, par gravité, la masse du conteneur entraîne le moteur en rotation à une vitesse supérieure à la vitesse souhaitée si bien que le moteur devient un générateur.

Enfin, l'alimentation du variateur de vitesse se caractérise par un réseau d'alimentation triphasé  $3 \times 400$  V.

Par exemple, les trois critères précédents conduisent à choisir le variateur de vitesse LEROY SOMER référencé DMV 2342 – 550 A (se reporter à la figure 1-35). Dans cette référence, le chiffre 4 représente le nombre de quadrants de fonctionnement gérés par le variateur de vitesse tandis que la valeur 550 A



**Figure 1-45** - Pour obtenir un hacheur réversible en courant, il est nécessaire de mettre en œuvre par exemple deux transistors IGBT munis chacun d'une diode antiparallèle. Cette structure permet au hacheur de faire fonctionner le moteur dans les quadrants n°1 et n°2 du système d'axes vitesse-couple.

la diode D2 entraîne également une décharge de l'énergie emmagasinée par les inductances et fait que le courant I décroît.

Le fonctionnement décrit se rapproche de celui du hacheur série non réversible. Par conséquent, la relation qui exprime la valeur moyenne de la tension  $U_C$  reste inchangée :

$$U_C \text{ moyen} = U_B \times \frac{t_h}{T} = U_B \times \alpha$$

Comme le montre la figure 1-46, la tension moyenne  $U_C$  et le courant moyen  $I$  sont positifs, cela permet d'affirmer que le moteur fonctionne à vitesse variable dans le quadrant n°1 du système d'axes vitesse-couple.

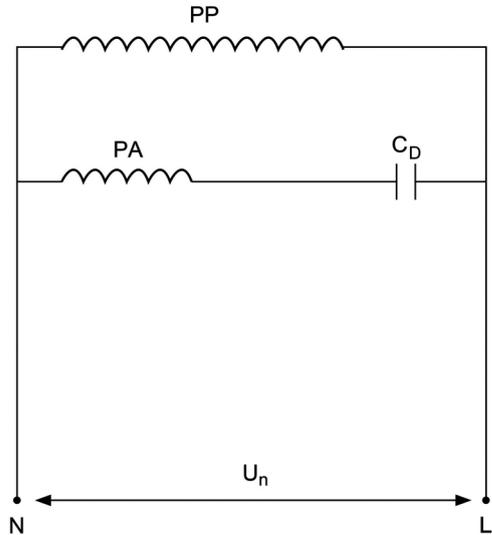
### ♦ Fonctionnement dans le quadrant n°2

Maintenu en rotation par l'énergie inertielle de la machine qu'il entraîne, le moteur peut se comporter en générateur à condition d'inverser uniquement le sens du courant qui circule dans l'induit. Pour cela, le transistor T2 est commandé pour devenir passant pendant une durée  $(T - \alpha T)$ . L'état passant du transistor T2 provoque la circulation d'un courant débité par le moteur devenu générateur. La tension de saturation  $V_{CE}$  du transistor T2 fixe une tension nulle aux bornes de l'ensemble inductance  $L_1$ -moteur M. Ensuite, à l'instant où le transistor T2 est volontairement bloqué, la diode D1 devient conductrice pour entretenir la circulation d'un courant débité par le moteur devenu générateur. Ce courant traverse successivement l'inductance  $L_1$ , la

## 2. Électronique appliquée aux moteurs monophasés

### 2.2.2 Fonctionnement du moteur asynchrone monophasé

Pour comprendre le fonctionnement d'un moteur monophasé à induction, nous allons considérer un moteur simplifié composé d'un enroulement principal (PP) et d'un condensateur  $C_D$  raccordé en série avec un enroulement auxiliaire (PA) (se reporter à la figure 2-04). Cet ensemble est alimenté entre la phase L et le neutre N sous une tension alternative sinusoïdale  $U_n$  de 230 V et d'une fréquence de 50 Hz (se reporter à la figure 2-05).



**Figure 2-05** - Par la mise en série d'un condensateur avec l'enroulement auxiliaire PA, la tension d'alimentation aux bornes de celui-ci est en avance sur la tension d'alimentation aux bornes de l'enroulement principal PP.

(Source : constructeur LEROY SOMER)

Sans prendre en compte l'enroulement PA, l'enroulement PP alimenté sous la tension alternative 230 V produit, grâce à l'organisation du bobinage, des pôles magnétiques nord et sud qui s'alternent aux instants  $t = 5$  ms et  $t = 15$  ms (se reporter à la figure 2-6). Cette alternance des pôles magnétiques créés par le seul enroulement PP ne permet pas d'affirmer l'existence d'un champ magnétique tournant nécessaire à la rotation du rotor. Afin de déterminer quel est le sens du champ magnétique tournant créé dans le moteur, il faut considérer l'action de l'enroulement auxiliaire de démarrage PA. En raison du condensateur  $C_D$ , la tension aux bornes de l'enroulement PA est déphasée, en avance sur la tension aux bornes de l'enroulement PP. Par les valeurs spécifiques des impédances des deux enroulements PP et PA, la tension aux bornes de l'enroulement auxiliaire PA est plus faible que la tension aux bornes de l'enroulement principal PP mais suffisante pour créer des pôles magnétiques. Ces pôles magnétiques sont déphasés dans le temps

ment d'un portail semi-automatique, il importe d'inverser le sens de rotation de l'arbre du moteur en fonction du mouvement souhaité. Cette ébauche de cahier des charges peut s'étoffer pour nous amener à construire un schéma électrique complet et choisir les principaux appareils de commande et de protection.

### Cahier des charges simplifié d'un portail électrique

- ◆ Le moteur asynchrone monophasé retenu pour mettre en mouvement le portail est un moteur LEROY SOMER LS 71 P de 0,37 kW.
- ◆ Il est possible d'ordonner la marche ou l'arrêt du moteur à partir de deux boîtiers de commande situés respectivement dans le hall d'entrée de la maison et sur la structure métallique fixe du portail.
- ◆ Chaque boîtier de commande comporte trois boutons-poussoirs :
  - hall d'entrée :
    - S1 : bouton-poussoir (verrouillable à clef), ouverture du portail
    - S2 : bouton-poussoir (verrouillable à clef), fermeture du portail
    - S3 : bouton-poussoir : arrêt du portail
  - structure métallique fixe du portail :
    - S4 : bouton-poussoir (verrouillable à clef), ouverture du portail
    - S5 : bouton-poussoir (verrouillable à clef), fermeture du portail
    - S6 : bouton-poussoir : arrêt du portail.
- ◆ Arrivé en fin de course, le portail s'arrête automatiquement par l'action sur un interrupteur de position : S7 = fin d'ouverture, S8 = fin de fermeture.

### Lecture commentée du schéma électrique

La figure 2-15 montre le schéma électrique qui répond au cahier des charges simplifié. La partie gauche du schéma composée de l'interrupteur sectionneur Q1, du disjoncteur de moteur Q2, des contacteurs KM1 et KM2 et du moteur M1 constitue le « circuit de puissance ». La partie droite du schéma où l'on trouve les boutons-poussoirs, les interrupteurs de position, les bobines et les contacts des contacteurs KM1 et KM2 s'appelle le « circuit de commande ». Intercalé entre le circuit de puissance et le circuit de commande, un transformateur de sécurité abaisse la tension alternative 230 V à une valeur non dangereuse alternative 24 V sous laquelle sont alimentés les boutons-poussoirs actionnés par l'utilisateur.

Le fonctionnement de ce schéma est simple. Si on appuie brièvement sur le bouton-poussoir S1 ou S4, la bobine du contacteur KM1 est alimentée. Dans le même temps, les contacts 1/L1-2/T1 et 3/L2-4/T2 du contacteur KM1 insérés dans le circuit de puissance se ferment pour alimenter l'enroulement principal (PP) du moteur. Par la fermeture des contacts 5/L3-6/T3 et 7/L4-8/T4 du même contacteur, le condensateur CP est relié à la phase L tandis que l'extrémité W2 de

## 2. Électronique appliquée aux moteurs monophasés

---

- C. Le glissement est un paramètre qui traduit le fait que l'arbre d'un moteur asynchrone monophasé tourne moins vite que le champ magnétique créé par les enroulements statoriques à l'intérieur du moteur.  $\Leftrightarrow$  VRAI/FAUX.
- D. Pour inverser le sens de rotation d'un moteur asynchrone monophasé à induction, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'enroulement principal ou dans l'enroulement auxiliaire de démarrage.  $\Leftrightarrow$  VRAI/FAUX.
- E. Le moteur universel est un moteur à courant continu capable de fonctionner sous une tension alternative sinusoïdale.  $\Leftrightarrow$  VRAI/FAUX.
- F. Pour inverser le sens de rotation d'un moteur asynchrone monophasé à bagues de déphasage, il suffit d'inverser les conducteurs d'alimentation raccordés à l'enroulement statorique du moteur.  $\Leftrightarrow$  VRAI/FAUX.
- G. Si l'on augmente la fréquence de la tension d'alimentation d'un moteur asynchrone monophasé à induction, on diminue sa vitesse.  $\Leftrightarrow$  VRAI/FAUX.

### E2 $\diamond$ Questionnaire à choix multiples (QCM)

---

- Que se passe-t-il si on met sous tension un moteur asynchrone monophasé à induction dont l'enroulement auxiliaire est coupé ?
  - l'arbre du moteur tourne deux fois plus vite que la vitesse nominale
  - le moteur démarre lentement
  - associé à une charge qui oppose un couple résistant, le moteur ne démarre pas.
- Sur un moteur muni de deux condensateurs CP et CD (se reporter à la figure 2-12, page 113), le condensateur CD est défaillant : celui-ci est équivalent à un circuit ouvert. Quelle conséquence entraîne cette défaillance ?
  - le moteur démarre brutalement
  - le couple de démarrage produit par le moteur est plus faible que celui mentionné par le constructeur du moteur
  - le moteur absorbe un courant plus élevé que son courant nominal dès que le démarrage est achevé.
- Quels sont les deux principes qui permettent de faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone monophasé à induction ?
  - Agir sur la fréquence de la tension d'alimentation du moteur

### 3. Électronique appliquée aux moteurs asynchrones triphasés

Vitesses de synchronisme  
fonction du nombre de pôles et de la fréquence du courant

Nombre de pôles	Vitesse de rotation en tr/mn		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

**Figure 3-11** - En fonction de la fréquence du réseau triphasé d'alimentation des enroulements statoriques et du nombre de paires de pôles magnétiques créés à tout instant dans le moteur, la vitesse de synchronisme du champ tournant est différente. (Source : constructeur SCHNEIDER)

Or, ce couple mécanique ne peut exister que si les conducteurs en aluminium logés dans les encoches du rotor sont parcourus par un courant induit qui résulte d'une variation de flux magnétique. En d'autres termes, il faut qu'il y ait une différence de vitesse entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor. Cette différence justifie le qualificatif « asynchrone » attribué à ce type de moteur. De plus, cette différence entre la vitesse de synchronisme ( $N_s$  en  $\text{min}^{-1}$ ) et la vitesse réelle du rotor du moteur ( $N$ ) est appelée « glissement » ( $g$ ) et s'exprime en pourcentage de la vitesse de synchronisme :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100$$

🔗 **Exemple** – Un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles dont la plaque signalétique indique une vitesse nominale ( $N$ ) de  $1430 \text{ min}^{-1}$  se caractérise par un glissement de 4,66% :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 = \frac{1500 - 1430}{1500} \times 100 = 4,66$$

400 V/24 V ; tension 24 V à laquelle sont soumis les boutons-poussoirs sur lesquels agit tout utilisateur. Pour terminer, il est possible d'ajouter un point supplémentaire de commande à distance doté de deux boutons-poussoirs S3 et S4. Raccordé en parallèle avec le bouton-poussoir S1, le bouton-poussoir S3 muni d'un contact à fermeture permet la mise en marche du moteur. Implanté en série avec le contact du bouton-poussoir S2, un contact à ouverture du bouton-poussoir S4 ordonne l'arrêt du moteur.

Cependant, en dépit d'une solution fonctionnelle qui assure à la fois la protection du moteur et la sécurité des personnes, le schéma de la figure 3-19 ne montre pas un inconvénient majeur spécifique au démarrage direct. En effet, à la mise sous tension du moteur, celui-ci absorbe un courant dont l'intensité peut atteindre jusqu'à huit fois son intensité nominale (se reporter à la figure 3-20). Comme cette surintensité de démarrage est temporaire, elle n'est pas néfaste d'un point de vue thermique pour le câble d'alimentation du moteur. Par contre, cette surintensité temporaire provoque une chute de tension transitoire dans l'installation électrique au point de perturber des matériels électroniques proches et sensibles (ordinateurs). Pour remédier à cet inconvénient, des procédés de démarrage autres que les démarreurs directs visent à réduire cette chute de tension par la diminution de la surintensité de démarrage du moteur.

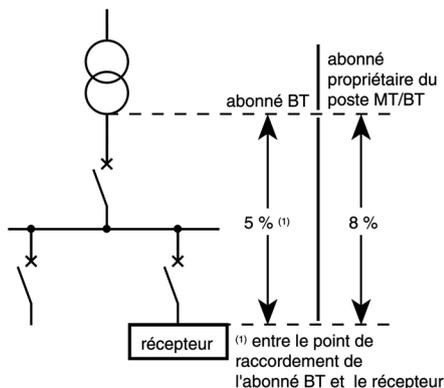
#### 3.6.3 Démarreur direct inverseur (deux sens de rotation)

Pour inverser le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé, le principe est simple : il suffit de permuter deux des trois phases d'alimentation raccordées au moteur. Comme ce problème de l'inversion du sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé est fréquent, le constructeur SCHNEIDER propose des solutions précâblées en coffret (se reporter à la figure 3-21).

En face avant du coffret, un commutateur à trois positions (S2) permet de commander les bobines des deux contacteurs KM1 et KM2 en charge de l'obtention de chaque sens de rotation. À ce sujet, une lecture attentive du circuit de puissance montre que la permutation des phases destinée à inverser le sens de rotation du moteur s'opère entre les phases L1 et L3. De plus, les deux contacteurs KM1 et KM2 sont mécaniquement verrouillés pour interdire tout enclenchement simultané qui provoquerait un court-circuit entre les phases L1 et L3. Ce verrouillage mécanique est renforcé dans le circuit de commande par un verrouillage électrique matérialisé par les contacts KM1 (21-22) et KM2 (21-22). Le fonctionnement de cette solution précâblée est simple. Suite à une manœuvre brève du commutateur S2 dans la position 1, le contacteur KM1 s'auto-alimente par son contact (13-14) et provoque le démarrage direct du moteur dans un premier sens de rotation. Dans le même temps, l'ouverture du contact KM1 (21-22) fait qu'une manœuvre brève

### 3.7 Incidences sur le moteur d'une variation

La norme NF C 15-100 impose que la chute de tension entre l'origine de l'installation BT et tout point d'utilisation n'excède pas les valeurs du tableau ci-dessous. D'autre part la norme NF C 15-100 § 552-2 limite la puissance totale des moteurs installés chez l'abonné BT tarif bleu. Pour des puissances supérieures aux valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous, l'accord du distributeur d'énergie est nécessaire.



#### Chute de tension maximale entre l'origine de l'installation BT et l'utilisation

	éclairage	autres usages (force motrice)
abonné alimenté par le réseau BT de distribution publique	3 %	5 %
abonné propriétaire de son poste HT-A/BT	6 %	8 % <sup>(1)</sup>

(1) Entre le point de raccordement de l'abonné BT et le moteur.

#### Puissance maxi de moteurs installés chez un abonné BT

(I < 60 A en triphasé ou 45 A en monophasé)

moteurs	triphasés (400 V)		monophasés (230 V)	
	à démarrage direct pleine puissance	autres modes de démarrage		
locaux d'habitation	5,5 kW	11 kW	1,4 kW	
autres	réseau aérien	11 kW	22 kW	3 kW
locaux	réseau souterrain	22 kW	45 kW	5,5 kW

**Figure 3-28** - En matière de force motrice électrique, la norme NF C 15-100 stipule des chutes maximales de tension en dessous desquelles les performances mécaniques des moteurs (couple) sont fortement altérées. (Source : constructeur SCHNEIDER)

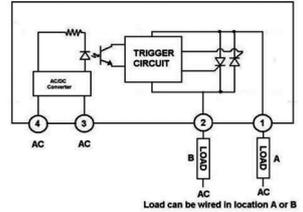
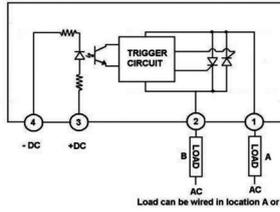
les bornes U2 et W1 sans modifier la position des condensateurs. Plus concrètement, la borne U2 doit être reliée à la phase L1 et la borne W1 doit être raccordée au neutre N.

## 3.10 Évaluation intermédiaire (exercices E1 à E5)

### E1 ✧ Questionnaire VRAI/FAUX (quiz)

---

- A. Le moteur asynchrone triphasé est le moteur électrique le plus utilisé dans le contexte industriel en raison de sa simplicité de mise en œuvre.  
⇒ VRAI/FAUX
- B. Un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné comporte au total six enroulements : trois enroulements statoriques et trois enroulements rotoriques. ⇒ VRAI/FAUX
- C. Un moteur asynchrone triphasé à bagues comporte un collecteur identique à celui qui équipe les moteurs à courant continu pour assurer une liaison électrique entre les trois extrémités des enroulements rotoriques (partie tournante) et les trois bornes K, L et M du boîtier de raccordement. ⇒ VRAI/FAUX
- D. Le nombre de pôles magnétiques créés par les enroulements statoriques détermine la vitesse du champ magnétique tournant dans un moteur asynchrone triphasé. ⇒ VRAI/FAUX
- E. Le démarrage « Étoile – Triangle » permet de diviser par deux la surintensité de démarrage d'un moteur asynchrone triphasé par comparaison à la surintensité que le même moteur provoque quand il démarre en mode « Direct ». ⇒ VRAI/FAUX
- F. Quand les deux tensions 230 V et 400 V figurent sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé, cela signifie que le moteur peut fonctionner alimenté par deux réseaux triphasés différents :  $3 \times 230$  V ou  $3 \times 400$  V.  
⇒ VRAI/FAUX
- G. La puissance indiquée sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé correspond à la puissance électrique absorbée par le moteur.  
⇒ VRAI/FAUX



## OUTPUT SPECIFICATIONS (1)

Description	CX240x5	CX380x5	CX480x5
Operating Voltage (47-63Hz) [Vrms]	12-280	48-530	48-660
Transient Overvoltage [Vpk]	600	1200	1200
Maximum Off-State Leakage Current @ Rated Voltage [mA rms]	0.1	0.1	0.1
Minimum Off-State dv/dt @ Maximum Rated Voltage [V/uscd] (2)	500	500	500
Maximum Load Current [Arms]	5	5	5
Minimum Load Current [Arms]	0.06	0.06	0.06
Maximum Surge Current (16.6ms) [A pk]	250	250	250
Maximum On-State Voltage Drop @ Rated Current [Vpk]	1.4	1.4	1.4
Maximum I <sup>2</sup> t for fusing (8.3 msec) [A <sup>2</sup> sec]	260	260	260
Minimum Power Factor (with Maximum Load)	0.5	0.5	0.5

## INPUT SPECIFICATIONS (1)

Description	CX240Dx	CX380Dx	CXExxxDx	CX240A5	CXE240A5
Nominal Voltage	5 VDC	5 VDC	24 VDC	120 VAC	24 VAC
Control Voltage Range	3-15 VDC	4-15 VDC	15-32 VDC	90-140 VAC	18-36 VAC
Minimum Turn-On Voltage	3.0 VDC	4.0 VDC	15.0 VDC	90.0 Vrms	18.0 Vrms
Drop Out Voltage	1.0 VDC	1.0 VDC	1.0 VDC	10.0 Vrms	2.0 Vrms
Typical Input Current	15 mAdc	15 mAdc	15 mAdc	10 mA rms	10 mA rms
Nominal Input Impedance	300 Ohm	240 Ohm	1500 Ohm	14.1K Ohm	2.1K Ohm
Maximum Turn-On Time [msec] (3)	1/2 Cycle	1/2 Cycle	1/2 Cycle	10	10
Maximum Turn-Off Time [msec]	1/2 Cycle	1/2 Cycle	1/2 Cycle	40	40

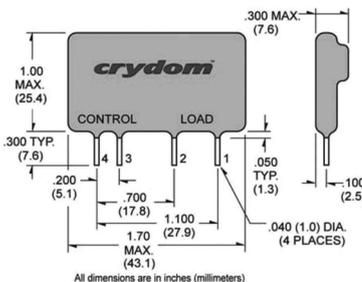
## GENERAL SPECIFICATIONS

Description	Parameters
Dielectric Strength, Input/Output/Base (50/60Hz)	4000 Vrms
Minimum Insulation Resistance (@ 500 VDC)	10 <sup>9</sup> Ohm
Maximum Capacitance, Input/Output	10 pF
Ambient Operating Temperature Range	-30 to 80 °C
Ambient Storage Temperature Range	-30 to 125 °C
Weight (typical)	0.4 oz. (11g)
Encapsulation	Thermally Conductive Epoxy

## GENERAL NOTES

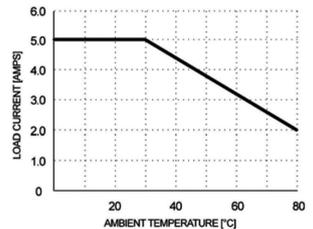
- 1) All parameters at 25°C unless otherwise specified.
- 2) Off-State dv/dt test method per EIA/NARM standard RS-443, paragraph 13.1.1.
- 3) Turn-On time for random turn-on versions is 0.1 msec (DC Control Models).

## MECHANICAL SPECIFICATIONS



DC CONTROL  
 PIN 1: AC LOAD  
 PIN 2: AC LOAD  
 PIN 3: +DC CONTROL  
 PIN 4: -DC CONTROL

AC CONTROL  
 PIN 1: AC LOAD  
 PIN 2: AC LOAD  
 PIN 3: AC CONTROL  
 PIN 4: AC CONTROL



Max. Load Current vs. Temp.

**Figure 3-69** - Par l'application d'une tension de commande comprise entre 4 et 15 V entre les broches 3 (+) et 4 (-) du composant, le relais statique CX380D5R peut alimenter des charges résistives ou inductives à condition de ne pas dépasser un courant d'une valeur efficace de 5 A. (Source : constructeur CRYDOM)

$$\cos \psi = \frac{V \times \cos \varphi}{E}$$

$$\cos \psi = \cos^{-1} \left( \frac{V \times \cos \varphi}{E} \right)$$

$$\cos \psi = \cos^{-1} \left( \frac{220 \times \cos(39,8)}{307} \right) = 56,6^\circ$$

Par déduction, la valeur de l'angle  $\theta$  est obtenue par la formule suivante :

$$\theta = \psi - \varphi = 56,6 - 39,8 = 16,8^\circ$$

Dorénavant, toutes les valeurs des variables figurant sur le diagramme de Behn-Eschenbourg sont connues. Celles-ci permettent pour l'exemple qui nous concerne de calculer selon trois méthodes le couple électromagnétique produit par le moteur de 105 kW, couple électromagnétique dont la différence avec le couple mécanique nominal (668 Nm – se reporter à la figure 4-08) donne une estimation des pertes mécaniques dues aux frottements de l'axe du rotor.

### Calcul du couple mécanique (méthode 1)

⇒ **Remarque préliminaire** : le moteur LSRPM de 105 kW comporte deux pôles magnétiques statoriques et huit pôles magnétiques rotoriques. Les caractéristiques nominales mentionnées sur sa plaque signalétique imposent de considérer un réseau triphasé d'alimentation à une fréquence de 100 Hz.

Sur la base du moteur synchrone modélisé dont on ne prend en compte qu'un enroulement statorique, l'expression du couple électromagnétique (ou couple mécanique si on néglige les pertes mécaniques) est :

$$T_{\text{méthode 1}} = \frac{3 \cdot V \cdot p_s \cdot p_r \cdot I \cdot \cos \varphi}{\omega}$$

$$T_{\text{méthode 1}} = \frac{3 \cdot V \cdot p_s \cdot p_r \cdot I \cdot \cos \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$T_{\text{méthode 1}} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 215 \cdot 0,768}{2 \cdot \pi \cdot 100} = \mathbf{693 \text{ Nm}}$$

Cette valeur est supérieure au couple nominal (668 Nm) et quantifie les pertes mécaniques à une première valeur estimative de 25 Nm.

## 4. Électronique appliquée aux moteurs sans balais

---

### 4.5.4 Interprétation des informations du constructeur – Formules d'électrotechnique

- ⇒ **Remarque préliminaire** : les informations théoriques qui vont être développées ci-après ne s'appliquent qu'aux moteurs BLDC dont les enroulements statoriques sont raccordés en « Étoile ». Dans cette configuration, le courant qui parcourt chaque bobinage statorique correspond au courant qui circule dans le fil d'alimentation correspondant.

Pour chaque moteur qu'il fabrique, tout constructeur établit une fiche technique qui regroupe les informations utiles à la bonne exploitation du moteur. Par exemple, la figure 4-35 rapporte les principales caractéristiques fournies par le constructeur *FAULHABER* pour trois moteurs BLDC de la série 4490...BS. À partir de ces informations, deux aspects techniques peuvent être mis en évidence :

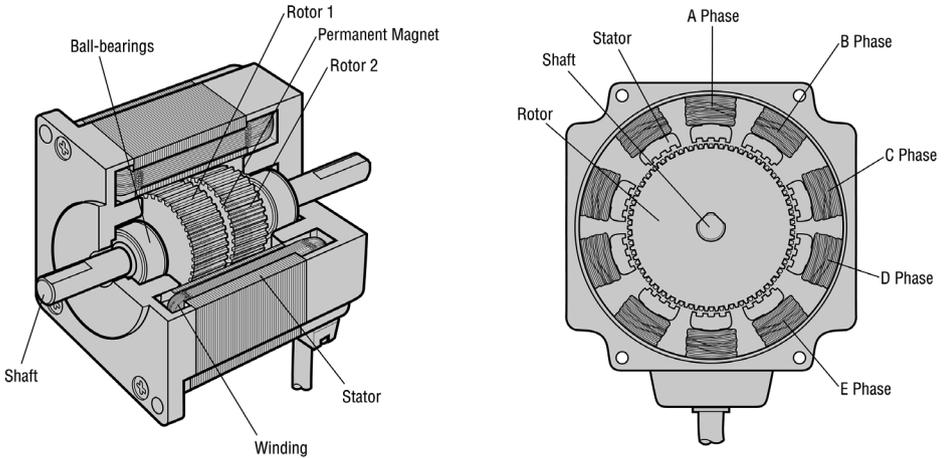
- ◆ Les règles de proportionnalité qui relient entre elles certaines grandeurs électromécaniques.
- ◆ Les calculs simples qui permettent de déterminer : la puissance électrique nominale absorbée ( $P_{AN}$ ), la vitesse nominale ( $N_N$ ), la force contre-électromotrice à vide ( $E_0$ ) et le courant nominal absorbé par chaque enroulement statorique du moteur.

Une première lecture de la figure 4-35 renvoie à quatre lignes repérées par les indices numériques 10 à 13 pour lesquels des coefficients constants sont mentionnés. Ces coefficients constants traduisent des règles de proportionnalité entre certaines grandeurs significatives du moteur. Ainsi, le constructeur précise successivement que :

- ◆ La vitesse du moteur est proportionnelle à sa tension d'alimentation (coefficient  $k_n$ ).
- ◆ La force contre-électromotrice dépend directement de la vitesse du moteur (coefficient  $k_E$ ).
- ◆ Le couple mécanique demandé au moteur conditionne la valeur du courant absorbé par chaque enroulement statorique (coefficient  $k_M$ ).
- ◆ Le courant absorbé par chaque enroulement statorique dépend du couple mécanique demandé au moteur (coefficient  $k_I$ ).

En plus de ces coefficients, la figure 4-35 indique la puissance mécanique de chaque moteur assortie du rendement énergétique.

Il est désormais possible de calculer par exemple des grandeurs électromécaniques complémentaires à celles initialement fournies par le constructeur pour le moteur de référence 4490024BS :



**Figure 4-55** - Avec la possibilité de recevoir jusqu'à cinq phases, le stator d'un moteur hybride présente des pôles saillants dentés. Cette forme dentée est également appliquée aux deux cylindres (Rotor 1 et Rotor 2) qui composent le rotor du moteur.  
(Source : catalogue ORIENTALMOTOR)

magnétiques cylindriques dentés et séparés par un aimant permanent (disque – se reporter à la figure 4-56). Comme chaque cylindre entre en contact avec l'aimant discoïdal, il subit une influence polaire, ce qui nous amène à considérer que le rotor est composé d'un cylindre denté « nord » et d'un cylindre denté « sud ». Enfin, dans un plan axial, les dents des deux cylindres ne sont pas alignées ; un angle équivalent à une dent décale le premier cylindre du second.

La conjugaison d'un nombre élevé de phases statoriques et de dents à la périphérie d'un rotor permet d'atteindre des valeurs de résolution conséquentes pour le moteur hybride, ce que démontre le calcul. Il s'effectue par l'application de la formule suivante :

$$N = 2 \cdot N_{\text{phase}} \cdot Z_r$$

avec

$N$  : résolution du moteur en nombre de pas par tour

$N_{\text{phase}}$  : nombre de phases du moteur

$Z_r$  : nombre de dents à la périphérie d'un cylindre denté qui compose un demi-rotor

- B. À partir de la figure 4-64, DÉTERMINER graphiquement la fréquence maximale à laquelle on peut démarrer le moteur. En DÉDUIRE la vitesse de démarrage du moteur.
- C. Dès que le moteur est démarré, DÉTERMINER graphiquement la fréquence maximale des impulsions de commande que peuvent recevoir les phases du moteur.
- D. DÉFINIR la conséquence qui résulte d'une commande à une fréquence visant à porter la vitesse du moteur à  $900 \text{ min}^{-1}$ .

NOTA : le moteur fonctionne initialement à une vitesse de  $600 \text{ min}^{-1}$ .

### 4.9 Moteurs linéaires

Dans l'esprit du néophyte, le moteur électrique est synonyme d'une machine qui permet d'obtenir un mouvement de rotation. Avec une certaine ouverture d'esprit, il convient néanmoins de se poser une question : comment faire pour que ce moteur produise un mouvement transversal ou linéaire ? Une première solution mécanique repose sur des systèmes élémentaires de conversion tels que les associations roue dentée – crémaillère, poulie – bielle – piston ou vis sans fin – écrou.

Cette énumération non exhaustive prouve que la technologie mécanique est une première solution de conversion de mouvement pour que le moteur électrique produise indirectement un mouvement linéaire.

Cependant, ces solutions posent le problème du contrôle permanent de la position effective de l'élément mécanique mis en mouvement ; problème renforcé par celui de la précision avec laquelle il est possible de gérer automatiquement les mouvements transversaux produits.

Pour comprendre comment il est possible de créer électriquement un mouvement linéaire, il suffit d'imaginer l'ouverture axiale et la mise à plat de la structure d'un moteur asynchrone ou d'un moteur synchrone à aimant permanent (se reporter à la figure 4-65). Ce développement de la constitution du moteur dans un plan fait ressortir que le rotor devient la partie mobile capable d'effectuer un déplacement linéaire. Cette première approche présente cependant un inconvénient. Pour augmenter la distance de déplacement du rotor, il est nécessaire de fabriquer un stator plus long qui comporte plus de bobinages. Dans la réalité, l'application de ce principe est inversée par les constructeurs : le rotor devient la partie fixe composée d'un grand nombre aimants permanents juxtaposés. Quant au stator, il présente des