

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

I- Présentation

- 1- Constitution
- 2- Principe de fonctionnement
- 3- Couplage des enroulements
- 4- Inversion du sens de rotation

II- Bilan énergétique et rendement

III- Caractéristiques $T_u(n)$ et $I(n)$

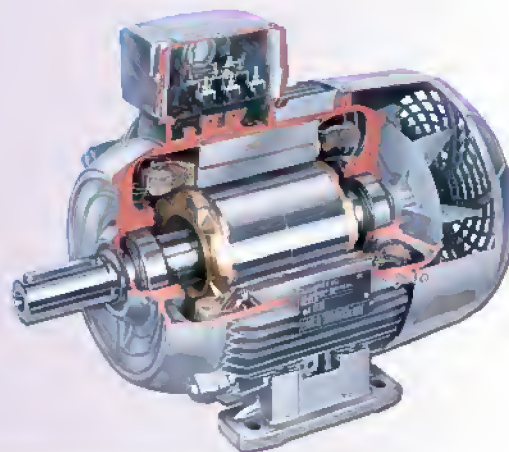
IV- Point de fonctionnement

V- Commande et protection

1- Démarrage direct

- a. Un seul sens de rotation
 - ✎ Circuit de puissance
 - ✎ Circuit de commande
- b. Deux sens de rotation
 - ✎ Circuit de puissance
 - ✎ Circuit de commande

2- Démarrage étoile-triangle dans un seul sens de rotation.



CONTENU
DU PROGRAMME

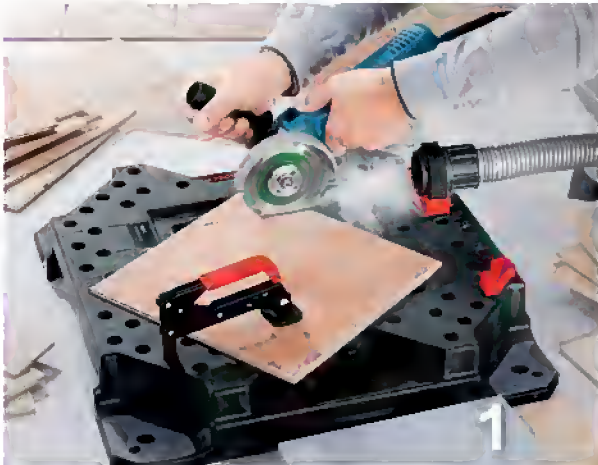
OBJECTIFS
DU PROGRAMME

- ✎ OS B₃₁ – Identifier un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage dans un système technique.
- ✎ OS B₃₂ – Etablir le bilan énergétique d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage.
- ✎ OS B₃₃ – Choisir un moteur asynchrone triphasé répondant aux exigences d'un cahier des charges.
- ✎ OS B₃₄ – Choisir les éléments de la chaîne de commande et de protection d'un moteur asynchrone triphasé.
- ✎ OS B₃₅ – Représenter le schéma de la chaîne de commande et de protection d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage.
- ✎ OS B₃₅ – Mettre en œuvre un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage.

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

A. MISE EN SITUATION

Les photos ci-dessous représentent deux systèmes techniques :



La photo 1 représente une meuleuse portable et légère, permettant de tronçonner et polir des carreaux en marbre. L'élément essentiel équipant cette dernière n'est autre qu'un moteur électrique.

La photo 2 représente une machine de découpe de blocs de marbre elle aussi est constituée essentiellement d'un moteur électrique pour entrainer le disque en rotation.

Le moteur électrique équipant la meuleuse est alimenté par un réseau alternatif monophasé. Il est appelé **moteur asynchrone monophasé**.

Le moteur électrique équipant la machine de découpe de blocs de marbre est beaucoup plus puissant que celui de la meuleuse. Il est alimenté par un réseau alternatif triphasé et appelé **moteur asynchrone triphasé**.

Les moteurs asynchrones triphasés cumulent de multiples avantages : ils sont simples, robustes et faciles d'entretien. Toutes ces raisons légitiment leur popularité en milieu industriel.

Leurs applications sont nombreuses. On les retrouve, par exemple dans:

- ✎ les pompes;
- ✎ les convoyeurs;
- ✎ les élévateurs;
- ✎ les palans;
- ✎ les machines outils;
- ✎ etc...

Leur puissance varie d'une fraction de KW à plusieurs centaines de KW.

À puissance égale, le moteur asynchrone triphasé est moins volumineux que son homologue monophasé. Par ailleurs son rendement et son facteur de puissance sont aussi meilleurs.

On distingue deux types de moteurs asynchrones triphasés :

- ✎ le moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit ou à cage d'écurieil utilisé pour les machines industrielles de faible puissance ;
- ✎ le moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné ou à bagues utilisé pour les machines industrielles de forte puissance.

Dans la suite de ce chapitre, on s'intéressera à l'étude des moteurs asynchrones triphasés à **rotor en court-circuit**.

Problématique:

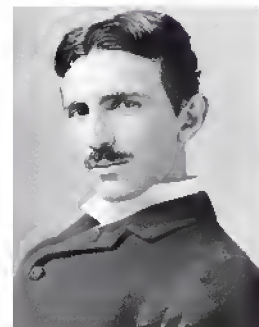
- ✎ Comment un moteur asynchrone triphasé transforme-t-il l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation?
- ✎ Quelles sont les puissances mises en jeu dans un moteur asynchrone triphasé en fonctionnement ?
- ✎ Comment brancher un tel moteur au réseau triphasé ? comment inverser son sens de rotation? et comment le démarrer en toute sécurité?
- ✎ Comment déterminer le point de fonctionnement d'un tel moteur ?
- ✎ Comment choisir le moteur adéquat pour une application donnée?

B. MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

I- Aperçu historique

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs :

- ✎ en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en Mai de l'année suivante cinq autres brevets. Son nom a été donné au tesla (symbole : T) qui est l'unité d'induction magnétique du système international d'unités.
- ✎ en 1885, Galileo Ferraris publie ses travaux sur les machines tournantes, avec une expérimentation puis une théorie sur le moteur asynchrone en 1888.
- ✎ en 1889, Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écurieil qui sera construit industriellement à partir de 1891.



MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

II- Présentation

1- Constitution

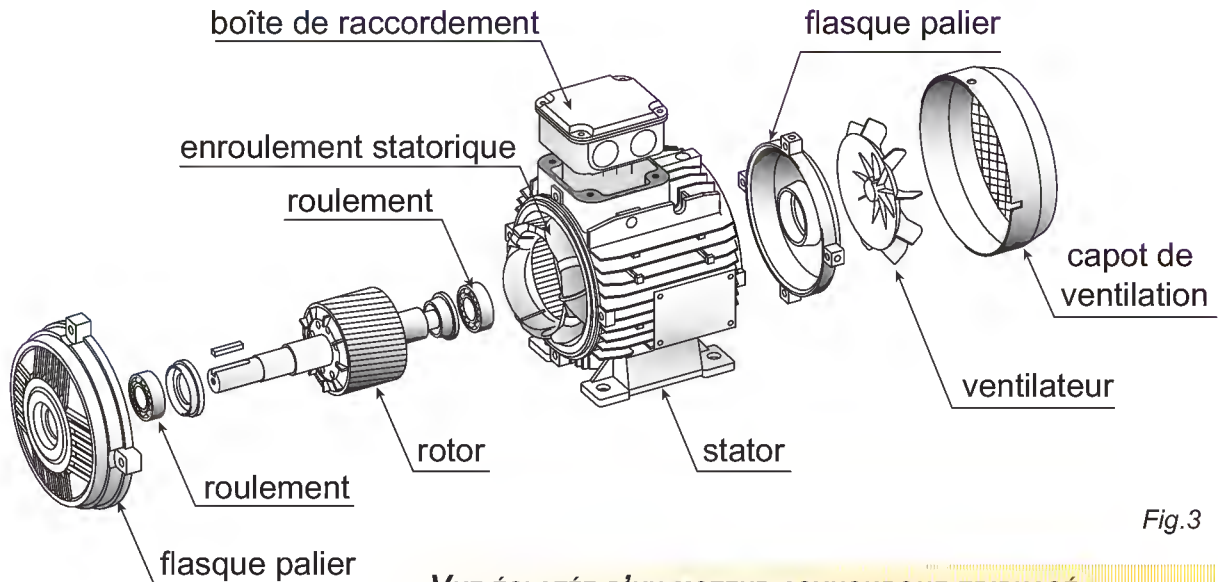
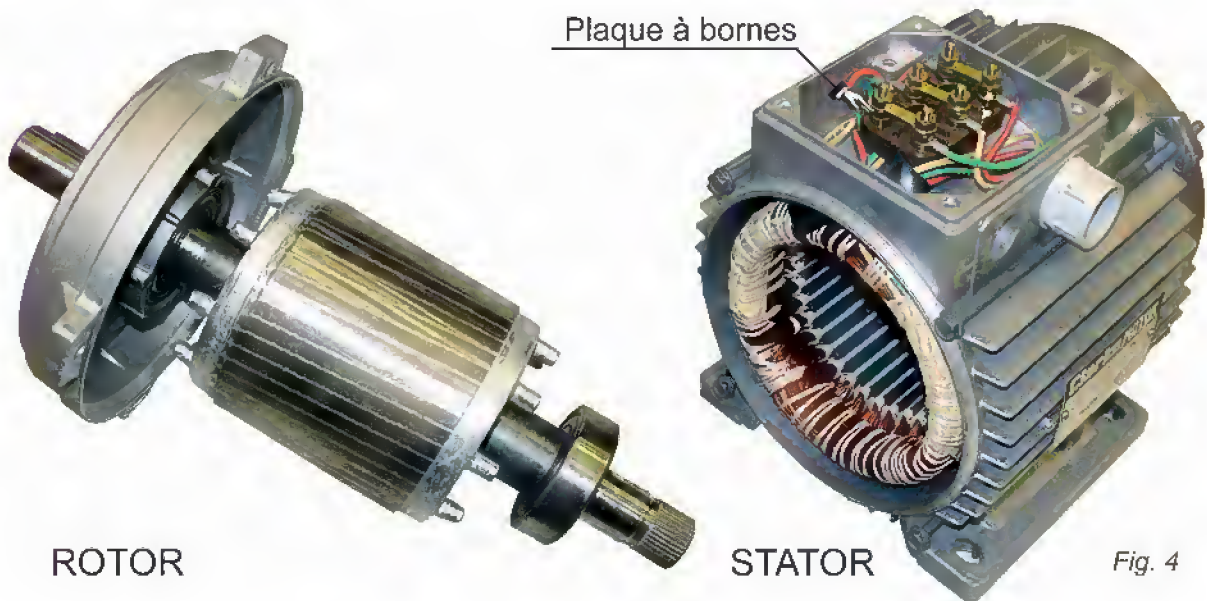


Fig.3

VUE ÉCLATÉE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

Le moteur asynchrone triphasé est principalement constitué de deux parties :

- ✂ une partie fixe appelée stator ;
- ✂ une partie mobile appelée rotor.



ROTOR

STATOR

Fig. 4

a. Le stator

Le stator est un électro aimant constitué d'un circuit magnétique en tôles feuilletées. Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé).

Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines.
Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.

b. Rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces, isolées entre elles, et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur.

Cet élément, de part sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrones : ceux dont le rotor est en court-circuit, dits à "**cage**" et ceux dont le rotor est bobiné, dits "**à bagues**".

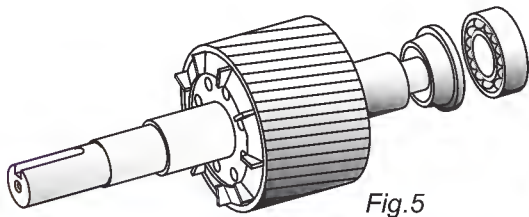


Fig.5

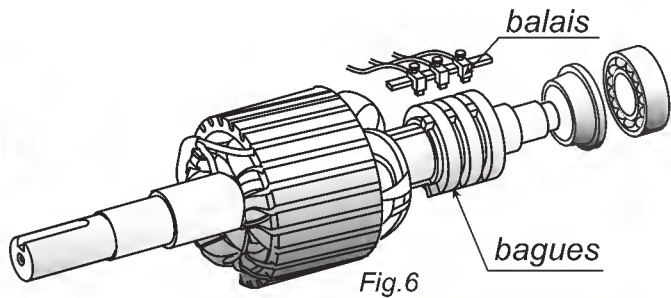


Fig.6

Rotor à cage ou en court-circuit

Rotor bobiné ou à bagues

ROTOR À CAGE D'ÉCUREUIL

Le rotor est un cylindre en fer comportant sur sa périphérie des conducteurs en aluminium, moulés sous pression dans des canaux et reliés entre eux par des anneaux moulés aussi aux deux extrémités du rotor. Cet ensemble conducteur en aluminium est appelé **cage d'écureuil**.

Il n'y a aucun contact électrique entre le rotor et l'extérieur.

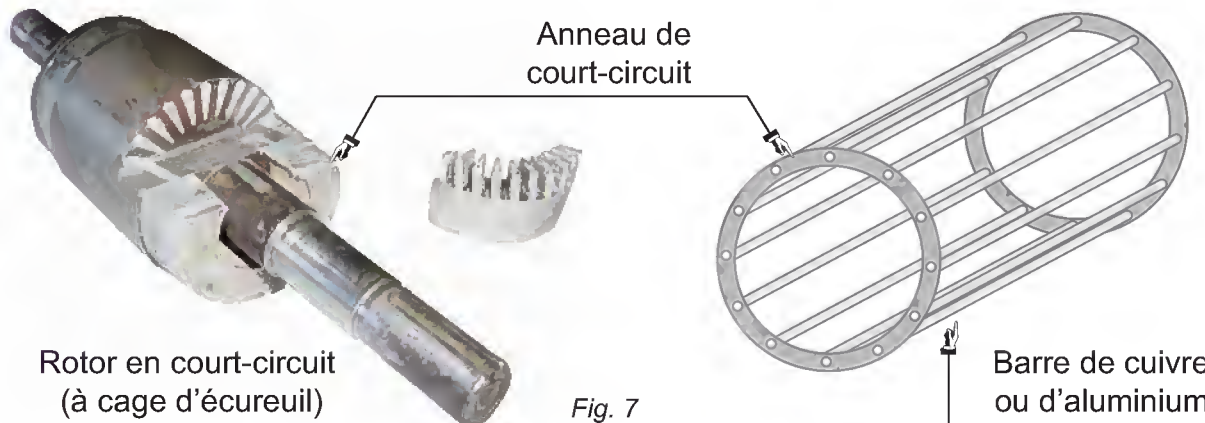


Fig. 7

Rotor en court-circuit
(à cage d'écureuil)

Barre de cuivre
ou d'aluminium

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

2- Principe de fonctionnement

a. Champ magnétique tournant

Faisant tourner un aimant en forme de "U" autour d'un axe vertical par un procédé mécanique simple. On constate que le disque métallique placé en dessous de l'aimant tourne dans le même sens à une vitesse légèrement inférieure à celle de l'aimant.

La rotation de l'aimant a provoqué la création d'un champ magnétique tournant.

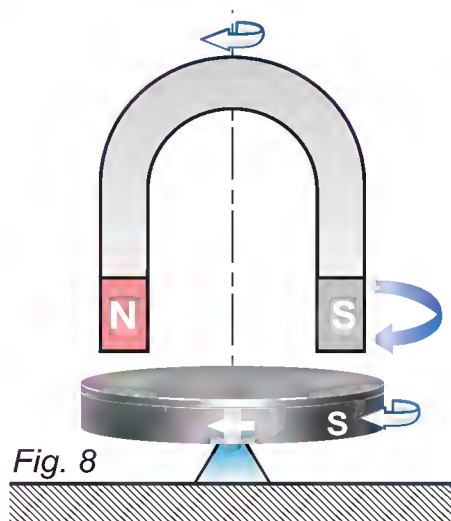


Fig. 8

b. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

Remplaçons l'aimant par trois bobines identiques placées à 120° géométrique l'une par rapport à l'autre et branchons les au réseau triphasé.

On constate que le disque métallique placé au centre O de ces trois bobines commence à tourner spontanément. Cette rotation est due à un champ magnétique tournant créé par ces trois bobines lorsqu'elles sont alimentées (fig. 9).

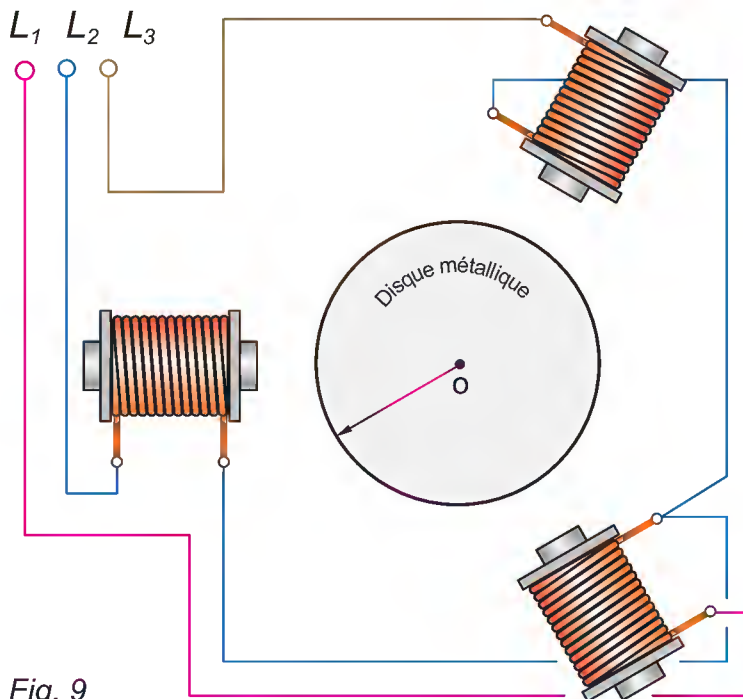


Fig. 9

Si on remplace le disque par une aiguille aimantée, on constate que l'aiguille tourne un peu plus vite que le disque. On dit que la rotation du disque est **asynchrone**. D'où le nom **moteur asynchrone triphasé**.

3- Définition

Un moteur électrique est un système électromagnétique permettant de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation.

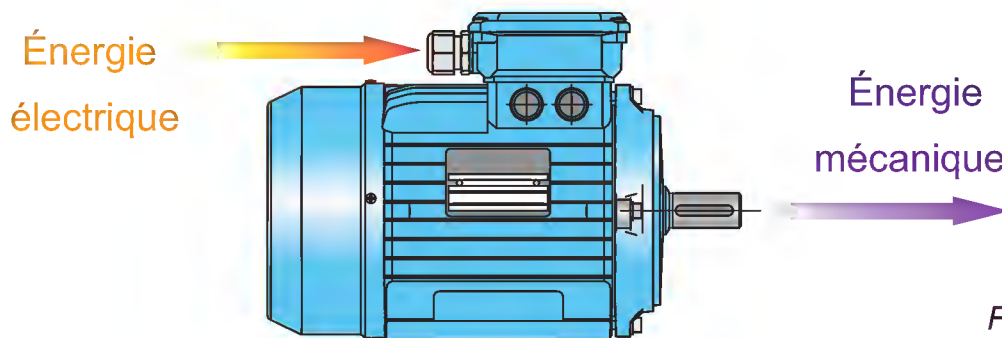


Fig. 10

4- Vitesse du champ tournant

La vitesse de rotation du champ tournant créée par les trois bobines est désignée par n et exprimée en tours par seconde. Si on branche ces trois bobines sur un réseau triphasé de fréquence 50Hz:

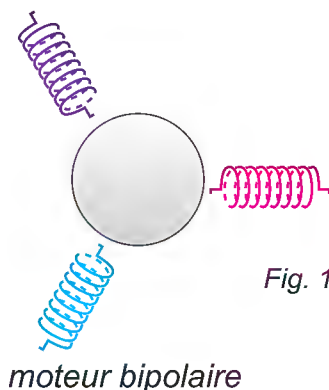


Fig. 11

moteur bipolaire

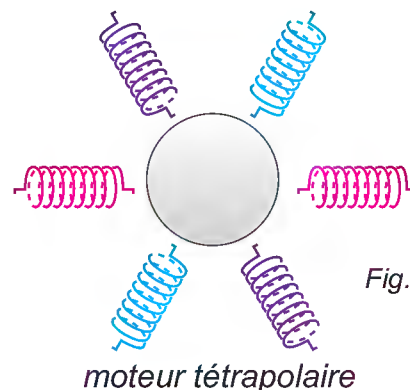


Fig. 12

moteur tétrapolaire

- ✎ La vitesse du champ tournant est de 50 tours par seconde dans le cas où le stator est composé de trois bobines décalées de 120° entre elles (fig.11);
- ✎ Alors que si les trois bobines sont divisées en deux demi-bobines et si elles sont placées l'une en face de l'autre (fig.12), le champ magnétique effectue alors 25 tours par seconde soit $(f/2)$;
- ✎ Si on divise encore chaque bobine en trois parties égales la vitesse devient $(50/3)$ tours par seconde soit $(f/3)$.

a. Constatations

- ✎ La figure 11 représente le schéma d'un moteur **bipolaire** :son stator produit deux pôles quand les trois bobines sont alimentées;
- ✎ La figure 12 représente le schéma d'un moteur **tétrapolaire** :son stator produit quatre pôles quand les trois bobines sont alimentées (chaque bobine est composée de deux demi-bobines).

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

b. Généralisation

- La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator.

$$n_s = \frac{f}{p} \left\{ \begin{array}{l} f : \text{fréquence en Hertz} \\ p : \text{nombre de paires de pôles du stator} \\ n : \text{vitesse de rotation du champ tournant ou vitesse de synchronisme en tours par seconde (tr/s)} \end{array} \right.$$

La vitesse angulaire du champ tournant est désignée par Ω_s (pulsation angulaire de synchronisme ou vitesse angulaire de synchronisme). Son expression est :

$$\Omega_s = 2\pi \cdot n_s \left\{ \begin{array}{l} n_s : \text{vitesse de synchronisme (tr/s)} \\ \Omega_s : \text{vitesse angulaire (rad/s)} \end{array} \right.$$

La vitesse de rotation du rotor est désignée par n . Elle est légèrement inférieure à n_s ($n < n_s$).

- La vitesse angulaire du rotor est: Ω avec ($\Omega < \Omega_s$).

Alimentés en 50 Hz, les moteurs asynchrones ne peuvent tourner qu'à des vitesses "légèrement inférieures" aux valeurs suivantes, déterminées par le nombre de pôles du bobinage du stator :

Nombre de pôles	P	Vitesse n_s en (tr/s)	Vitesse n_s en (tr/min)
2 pôles (bipolaire)	1	50	3000
4 pôles (tétrapolaire)	2	25	1500
6 pôles (hexapolaire)	3	16,67	1000
8 pôles (octopolaire)	4	12,5	750

5- Glissement

Le rotor du moteur asynchrone triphasé tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant créé par les bobines du stator. On dit que le rotor '**glisse**' par rapport au champ tournant.

Le glissement est défini par l'écart relatif entre la vitesse du rotor et la vitesse du champ tournant. Il dépend de la charge mécanique accouplée à l'arbre du moteur.

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \left\{ \begin{array}{l} g : \text{glissement exprimé en (\%)} \\ n_s : \text{vitesse de synchronisme (tr/sec)} \\ \Omega_s : \text{vitesse angulaire synchrone (rad/s)} \\ n : \text{vitesse de rotation, appelée aussi fréquence de rotation.} \end{array} \right.$$

6- Branchement d'un moteur asynchrone au réseau

a. Couplage des enroulements

Les trois enroulements du stator sont identiques et forment un récepteur triphasé équilibré. Ils sont couplés soit en étoile soit en triangle par liaisons électriques effectuées sur la plaque à bornes du moteur au moyen de barrettes en cuivre.

Les extrémités des enroulements du stator sont reliées successivement aux bornes (U_1, U_2), (V_1, V_2) et (W_1, W_2) de la plaque à bornes (figure 13).

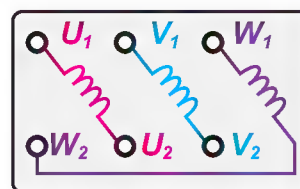
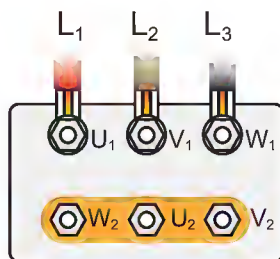


Fig. 13: Plaque à bornes des enroulements statoriques

NB: Certaines plaques à bornes utilisent l'ancienne nomination à savoir (U, X), (V, Y) et (W, Z).

🔍 Couplage étoile

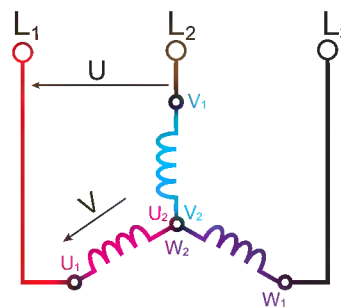
Ainsi couplés, chaque enroulement est soumis à la tension simple du réseau triphasé.



Plaque à bornes

Couplage en étoile des enroulements statoriques

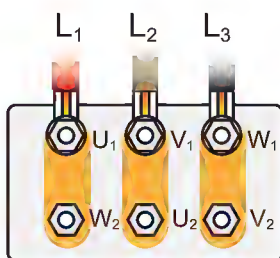
Fig. 14



Couplage en étoile (Y) des enroulements statoriques

🔍 Couplage triangle

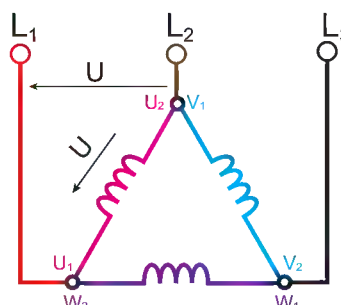
Ainsi couplés, chaque enroulement est soumis à la tension composée du réseau triphasé.



Plaque à bornes

Couplage en triangle des enroulements statoriques

Fig. 15



Couplage en triangle (Δ) des enroulements statoriques

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

b. Choix du couplage des enroulements statoriques

Le choix du couplage des enroulements statoriques dépend à la fois de la tension que peut supporter chaque enroulement et des tensions (V/U) du réseau triphasé :

- ✎ si la tension que peut supporter chaque enroulement du stator correspond à la tension simple du réseau, alors le couplage à adopter est le couplage étoile (Y);
- ✎ si la tension que peut supporter chaque enroulement du stator correspond à la tension composée du réseau, alors le couplage à adopter est le couplage triangle (D).

c. Exemple

Le tableau suivant indique le couplage à appliquer en fonction des caractéristiques du réseau et des indications de la plaque signalétique.

		PLAQUE SIGNALÉTIQUE DU MOTEUR		
		127/230 V	230/400 V	400/660 V
RESEAU	127/230 V ou 3 x 230 V	En étoile (Y)	En triangle (Δ)	impossible
	230/400 V ou 3 x 400 V	impossible	En étoile (Y)	En triangle (Δ)

REMARQUES

La tension que peut supporter chaque enroulement d'un moteur asynchrone triphasé est indiquée sur sa plaque signalétique :

- ✎ Dans le cas où une seule tension est indiquée sur la plaque signalétique, celle-ci représente la tension que peut supporter chaque enroulement.
- ✎ Dans le cas où deux tensions sont indiquées, chaque enroulement ne peut supporter que la plus petite des tensions indiquées.
- ✎ Certains réseaux triphasés sont identifiés par une seule tension, celle-ci représente la tension composée.

d. Plaque signalétique

Sur le stator d'un moteur asynchrone triphasé est poinçonnée une plaque signalétique dont voici un exemple :

Caractéristiques commerciales :

- le nom du constructeur
- la série du moteur
- le type du moteur

Caractéristiques mécaniques :

- la puissance utile
- la vitesse de rotation

LEROY – SOMER						
16 - ANGOULÊME - FRANCE						
MOTEUR ASYNCHRONE .Rotor c¹ c².C51100						
TYPE	LS 63 L ₂	N°	3 75 736	IP42		
kW	0,37	cos φ	0,71	ΔV	220 A	1,96
ch	0,5	rd %	70	ΔV	380 A	1,13
tr/mn	1375	isol ¹	classe E	omb ²	°C	40
Hz	50	ph.	3	service	S1	75
D 73						

Caractéristiques électriques :

- le courant nominal pour chaque couplage
- le facteur de puissance
- le rendement
- la fréquence en Hz

Fig. 16

7- Inversion du sens de rotation

Pour inverser le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé, il suffit d'inverser deux des trois fils de l'alimentation du moteur.

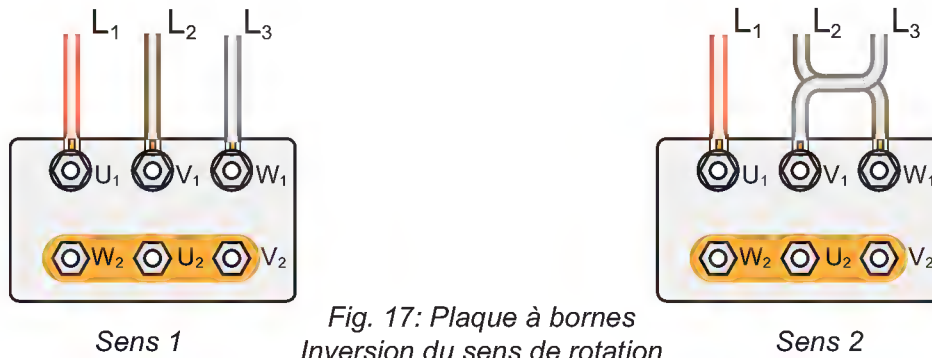
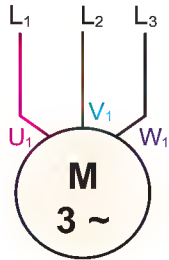


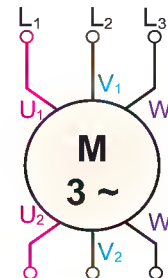
Fig. 17: Plaques à bornes
Inversion du sens de rotation

8- Symbole et modélisation

a. Symbole



Symbole d'un moteur asynchrone triphasé, à couplage interne Y ou Δ.



Symbole d'un moteur asynchrone triphasé, à choix de couplage : Y ou Δ.

b. Modélisation

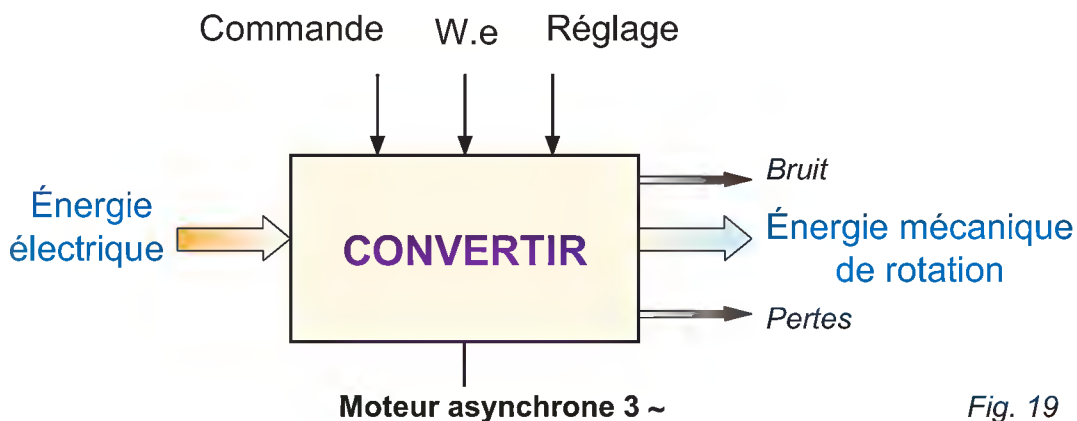


Fig. 19

III- Bilan énergétique et rendement

Le bilan énergétique énumère toutes les puissances mises en jeu depuis la puissance électrique absorbée jusqu'à la puissance mécanique utile. Il peut être représenté par le schéma ci-dessous.

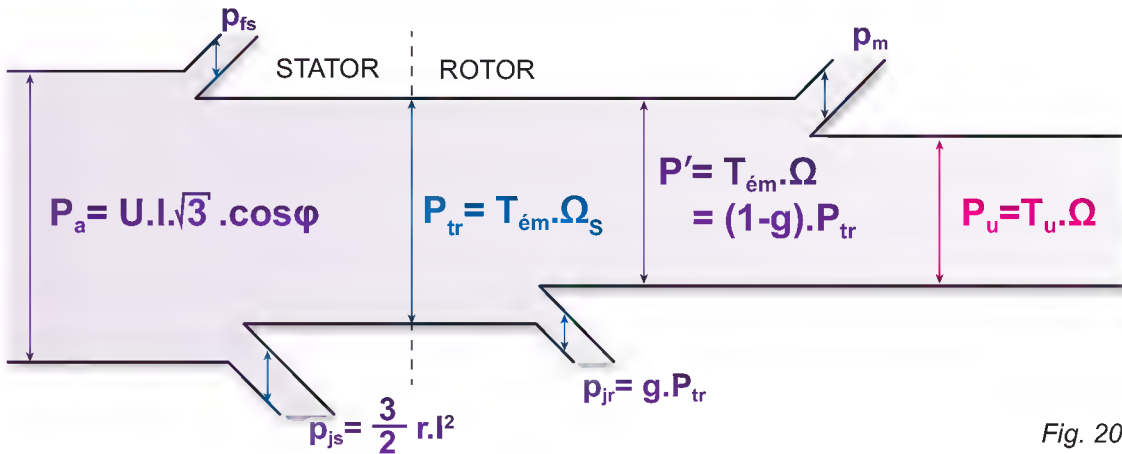


Fig. 20

1- Puissances mises en jeu

a. Puissance absorbée par le moteur: c'est la puissance électrique absorbée par les enroulements du stator qui représentent un système triphasé équilibré.

$$P_a = U.l.\sqrt{3} \cos\varphi$$

U: tension composée du réseau en Volts (V)
l: courant de ligne en Ampères (A)
φ: déphasage de \vec{T} par rapport à \vec{U}
Pa: en Watts

b. Puissance transmise : c'est la puissance électrique que transmet le stator au rotor par le couple électromagnétique $T_{ém}$:

$$P_{tr} = T_{ém} \cdot \Omega_s = P_a - p_{jr} - p_{fs}$$

c. Puissance mécanique: c'est la puissance mécanique totale fournie par le rotor.

$$P' = T_{ém} \cdot \Omega = P_{tr} - p_{jr}$$

d. Puissance utile : elle est développée au bout de l'arbre du moteur sous forme mécanique, son expression est :

$$P_a - (p_{jr} + p_{fs} + p_{jr} + p_m) = P_a - \sum \text{pertes}$$

e. Pertes par effet joule dans le stator p_{js}

Si on connaît "R" la résistance de chaque enroulement du stator:

$$p_{js} = 3.R.l^2, \text{ dans le cas du couplage étoile}$$

$$p_{js} = 3.R.J^2 = R.l^2, \text{ dans le cas du couplage triangle}$$

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

- ☞ Si on connaît "r" la résistance mesurée à chaud entre deux bornes du stator, quel que soit le couplage

$$p_{js} = \frac{3}{2} \cdot r \cdot I^2$$

indépendamment
du couplage du moteur

- f. Pertes dans le fer du stator p_{fs} : ce sont les pertes magnétiques (pertes dans le fer du stator). Elles sont constantes et indépendantes de la charge. Elles peuvent être déterminées par un essai à vide :

$$p_{fs} = P_a - P_{tr} - p_{jr}$$

- g. Pertes par effet joule au rotor : elles sont provoquées par les courants induits qui circulent dans les conducteurs du rotor à cage.

$$p_{jr} = P_{tr} - P' = T_{ém} \cdot \Omega_s - T_{ém} \cdot \Omega = T_{ém} (\Omega_s - \Omega) = \frac{T_{ém}}{\Omega_s} \cdot \frac{(\Omega_s - \Omega)}{\Omega_s} = g \cdot P_{tr}$$

$$p_{jr} = g \cdot P_{tr}$$

NB: les courants induits au rotor provoquent aussi des pertes magnétiques dans le fer du rotor désignées par P_{fr} . Ces pertes sont faibles et sont considérées négligeables devant les autres pertes.

- h. Pertes mécaniques p_m : elles sont provoquées par le frottement des paliers, des roulements assurant la rotation de l'arbre moteur et de la ventilation. Elles sont déterminées par un essai à vide. D'après le bilan :

$$p_m = P' - P_u = T_{ém} \cdot \Omega - T_u \cdot \Omega = \Omega \cdot (T_{ém} - T_u) = T_p \cdot \Omega$$

2- Couples

- a. Couple électromagnétique : il est créé par le stator afin d'entraîner le rotor en rotation.

$$T = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

T en Newton mètre (Nm)
 P_{tr} en Watts (W)
 Ω en radians par seconde (rad/s)

- b. Couple utile: il est disponible sur l'arbre du moteur et sert à entraîner la charge accouplée.

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

T_u en Newton mètre (Nm)
 P_u en Watts (W)
 Ω en radians par seconde (rd/s)

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

c. Couple des pertes : il représente le couple résistant produit par le frottement des paliers, des roulements et de la ventilation. Il est désigné par T_p :

$$T_p = \frac{p_m}{\Omega} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_p \text{ en Newton mètre (Nm)} \\ p_m \text{ en Watts (W)} \\ \Omega \text{ en radians par seconde (rd/s)} \end{array} \right.$$

3- Rendement

Le rendement d'un moteur électrique triphasé est le rapport de sa puissance utile à sa puissance absorbée. Il est désigné par η . Son expression est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en Watts (W)} \\ \eta \text{ exprimé en pour cent (\%)} \end{array} \right.$$

N.B :

- ✎ toutes les puissances absorbées, fournies ou perdues sont exprimées en Watts (W) ;
- ✎ tous les couples sont exprimés en Newton-mètre (Nm)
- ✎ la vitesse angulaire de synchronisme Ω_s et la vitesse angulaire du rotor Ω en (rad/s).

IV- Fonctionnement à vide du moteur

Lorsque le moteur fonctionne à vide (pas de charge entraînée par le moteur), sa vitesse de rotation n_0 est voisine de la vitesse de synchronisme n_s .

On considère que $g=0$ et $n_0 = n_s$

Le facteur de puissance à vide est faible ($\cos\phi_0 < 0,2$) . L'intensité absorbée à vide I_0 sert à créer le champ magnétique tournant.

On parle alors de courant magnétisant.

- ✎ La vitesse de rotation du rotor est considérée égale à la vitesse du champ tournant.

$$n_0 = n_s \Rightarrow \Omega_s = \Omega, \text{ le glissement } g = 0 \Rightarrow P_{jr0} = g \cdot P_{tr0} = 0$$

- ✎ Lors du fonctionnement à vide, le bilan de puissances est réduit au schéma suivant:

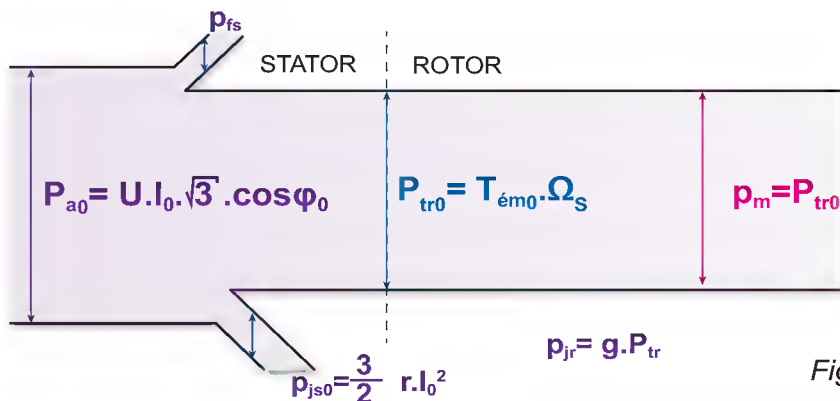


Fig. 21

➤ Détermination des pertes p_{fs} et p_m

p_{fs} et p_m sont constantes et indépendantes de la charge à entraîner par le moteur. Les pertes p_{fs} et p_m sont dans la plupart des cas égales :

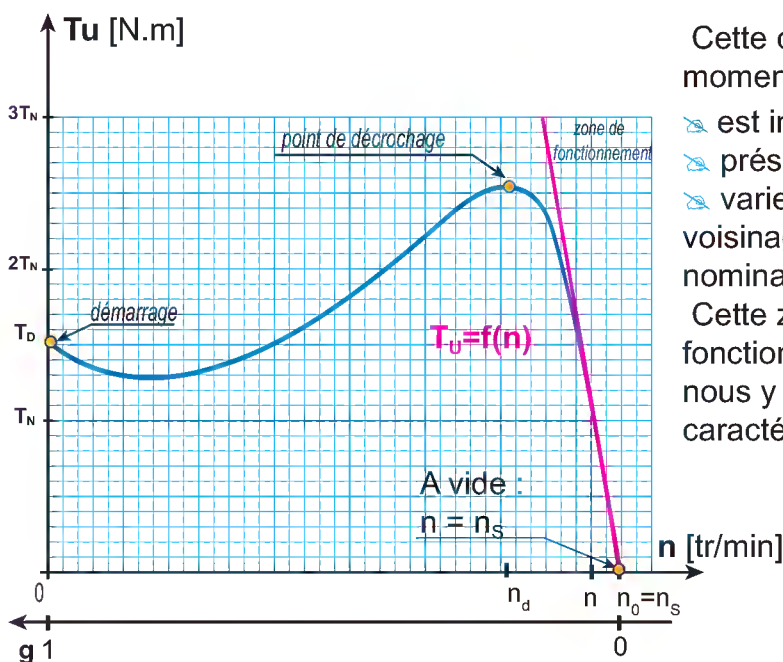
$$p_{fs} + p_m = P_{ao} - p_{jso} \quad \text{en Watts (W)}$$

$$p_{fs} = p_m = \frac{P_{ao} - p_{jso}}{2} \quad \text{en Watts (W)}$$

V- Caractéristiques électromécaniques

1- Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$

La variation de la charge mécanique entraîne une variation simultanée du couple utile et de la vitesse de rotation selon la caractéristique suivante :



Cette caractéristique montre que le moment du couple utile:

- est important au démarrage;
- présente un maximum;
- varie de façon presque linéaire au voisinage de la fréquence de rotation nominale.

Cette zone correspondant au fonctionnement normal du moteur, nous y établissons l'équation de la caractéristique:

$$T_u = a.n + b$$

Fig. 22

A vide: $T_u = 0, \quad n_s = n_v \Rightarrow 0 = a.n_s + b \Rightarrow b = -a.n_s$

au point nominal: $T_{uN} = 0, \quad n = n_N \Rightarrow T_{uN} = a.n_N + b = a.n_N + -a.n_s = a.(n_N - n_s)$

or $g = \frac{n_s - n_N}{n_s} \Rightarrow g.n_s = n_s - n_N \Rightarrow n_s - g.n_s = n_N$

$n_N = n_s (1 - g) \quad T_{uN} = a.(n_N - n_s) = a[n_s.(1 - g) - n_s] = -a.n_s.g = k.g$

avec $k = -a.n_s$

$a < 0$ (pente décroissante) $k > 0$

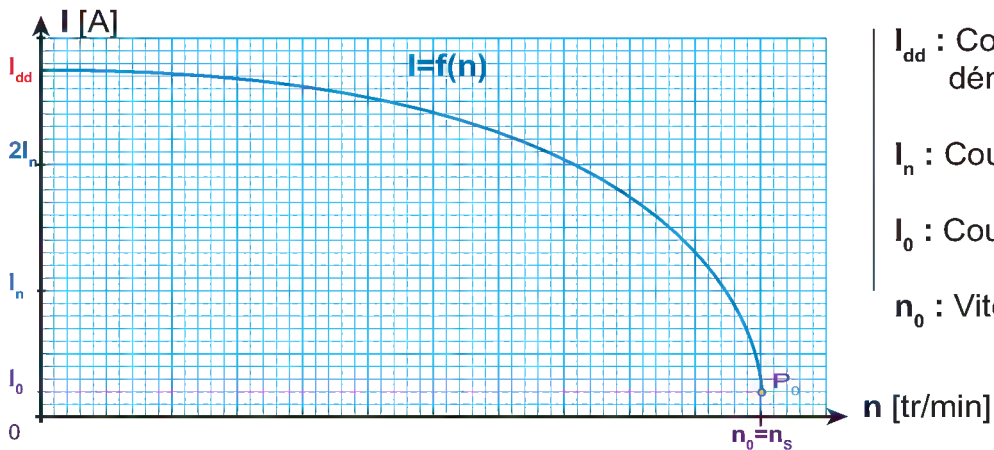
$T_u = k.g$

Au voisinage du point de fonctionnement nominal, le moment du couple est proportionnel au glissement.

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

2- Caractéristique électromécanique $I = f(n)$

Le courant est très élevé au démarrage. Puis, à partir de 80% de la vitesse de synchronisme ($g=20\%$), le courant décroît rapidement jusqu'au point de fonctionnement à vide " P_0 ".

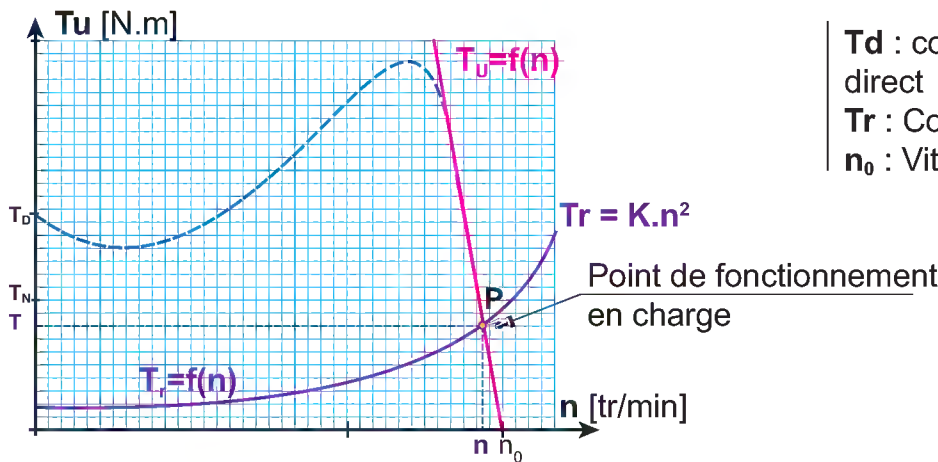


- I_{dd} : Courant lors d'un démarrage direct
- I_n : Courant nominal
- I_0 : Courant à vide
- n_0 : Vitesse à vide

Fig. 23

VI- Point de fonctionnement

La charge étant accouplée à l'arbre du moteur, elle présente un couple résistant " Tr " qui s'oppose au couple utile développé par le moteur.



- T_d : couple au démarrage direct
- T_r : Couple résistant
- n_0 : Vitesse à vide

Fig. 24

En fonctionnement normal et en régime établi, les deux couples sont égaux. $T_u = T_r$. Le point de fonctionnement est l'intersection de la caractéristique mécanique de la charge $T_r = f(n)$ avec la partie linéaire de la caractéristique mécanique du moteur $T_u = f(n)$.

Les coordonnées du point de fonctionnement peuvent être déterminées graphiquement ou algébriquement en posant l'égalité entre les équations des deux caractéristiques.

VII- Commande et protection

1- Appareils de commande et de protection

Le branchement d'un moteur asynchrone triphasé au réseau nécessite l'utilisation des appareils de commande et de protection adéquats.

Le tableau suivant, résume ces principaux appareils:

Désignation	Symbole	Fonction & rôle		Forme commerciale
Sectionneur porte-fusibles "Q"	<p> 1: contacts principaux 2: levier de commande manuelle 3: contact auxiliaire </p>	Fonction	Isolement du moteur pour des opérations de maintenance.	
Rôle	Le sectionneur permet d'établir ou interromptre des circuits électriques à vide. Il n'a pas de pouvoir de coupure. Ses contacts sont commandés manuellement.			
Contacteur "KM"	<p> 1: contacts principaux 2: contact auxiliaire 3: bobine de l'électro aimant. </p>	Fonction	Commande du moteur	
Rôle	Le contacteur est destiné à établir ou interromptre des circuits électriques en charge. Ses contacts sont commandés par un électro-aimant.			
Relais thermique "F"		Fonction	Protection du moteur	
Rôle	Le relais thermique permet, au moyen de ses trois bilâmes, d'interromptre le circuit lors des surintensités dues aux surcharges lentes du moteur.			
Fusible "F"		Fonction	Protection du moteur	
Rôle	Le fusible permet d'interromptre le circuit lors des surcharges rapides (courts-circuits).			

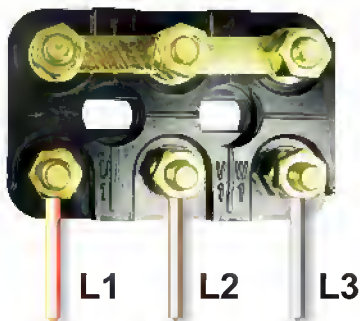
MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

2- Démarrage direct

Les moteurs asynchrones triphasés dont la puissance ne dépassant pas **5 KW** peuvent être branchés directement au réseau sans aucun dispositif de démarrage.

Le couplage des enroulements est pré-réalisé manuellement en utilisant des barettes en cuivre.

Couplage étoile (Y)



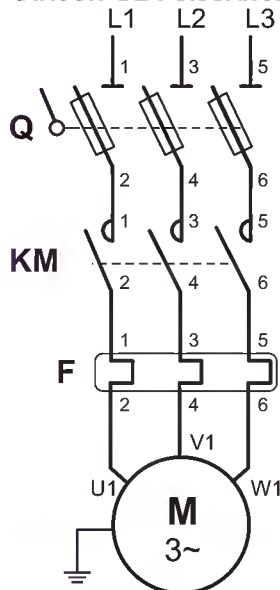
Couplage triangle (Δ)



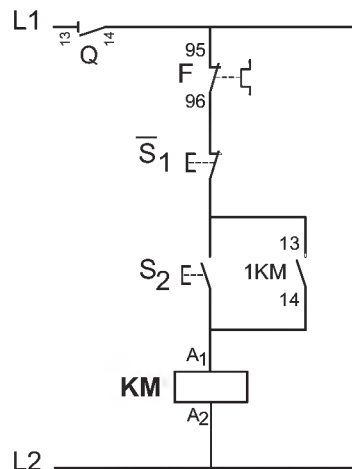
Fig. 25

a. Un seul sens de rotation

CIRCUIT DE PUISSANCE



CIRCUIT DE COMMANDE



LEGENDE

- Q:** contact auxiliaire du sectionneur;
- F:** contact de réarmement du relais thermique;
- S₁:** Bouton arrêt;
- S₂:** Bouton marche;
- KM:** bobine du contacteur;
- 1KM:** contact de maintien.



Fig. 26

FONCTIONNEMENT

Pour assurer l'alimentation en courant du circuit de commande, il faut fermer manuellement en premier le sectionneur.

- ✎ L'action sur le bouton marche **S₂**, entraîne simultanément :
 - La fermeture des contacts principaux du contacteur **KM**, assurant ainsi l'alimentation des enroulements statoriques du moteur.
 - La fermeture du contact auxiliaire **1KM**.
- ✎ Le relâchement du bouton **S₂**, maintient l'ensemble sous tension. Cet état est assuré par le contact **1KM** appelé contact d'auto-alimentation ou de maintien.

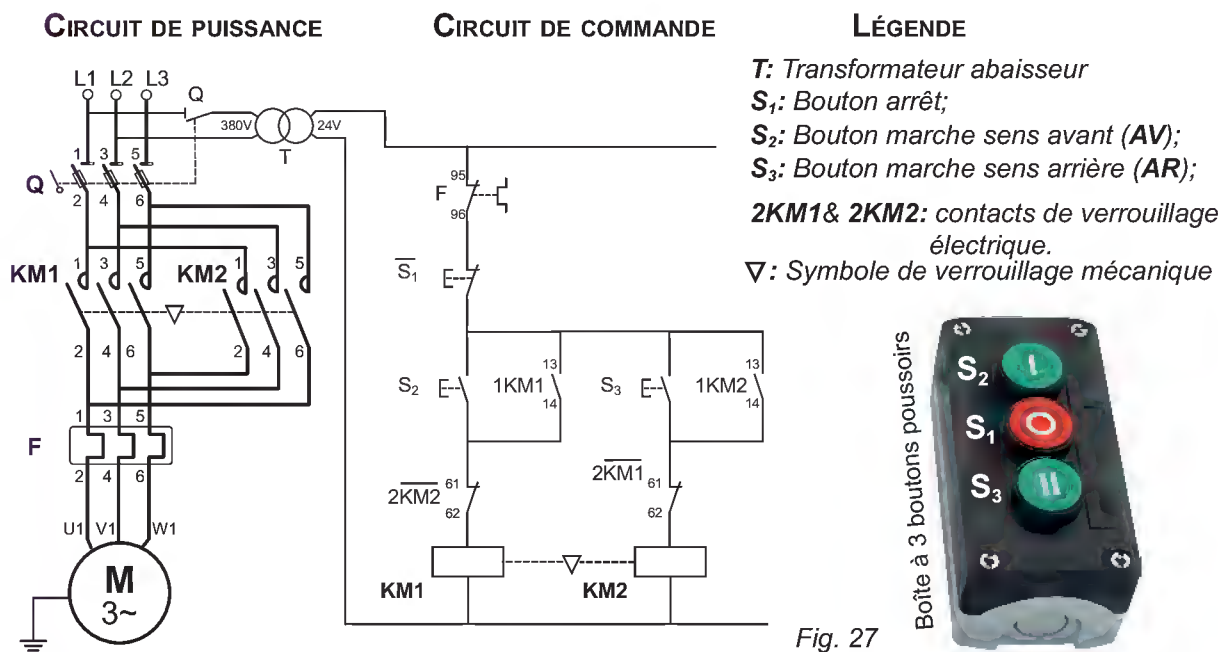
MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

✎ Pour couper l'alimentation, il suffit d'actionner fugitivement le bouton d'arrêt **S₁**.
NB : l'action simultanée sur **S₁** et **S₂** maintient l'ensemble à l'arrêt, c'est le principe même de la fonction mémoire à arrêt prioritaire.

3- Deux sens de rotation :

Le bon déroulement de certaines applications, nécessite de temps à autre l'inversion du sens de rotation de ou des moteurs asynchrones triphasés les équipant. Pour ce faire deux dispositifs sont à prévoir :

- ✎ Un second contacteur de ligne.
- ✎ Un auxiliaire permettant l'alimentation de la bobine de ce contacteur (exemple : un second bouton marche).



Remarque

Les contacts de verrouillage électrique sont fermés au repos et se trouvent dans un bloc de contacts auxiliaires pouvant être monté sur le contacteur.

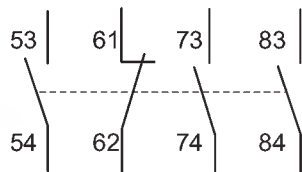


Fig. 28



FONCTIONNEMENT

L'appui fugitif, sur l'un ou l'autre des boutons marche (**S₂** ou **S₃**) entraîne simultanément :

- ✎ L'ouverture de son contact fermé branché avec la bobine opposée, empêchant

ainsi l'excitation simultanée des deux bobines KM1 et KM2.

- ✎ La fermeture des contacts de puissance pour alimenter le stator.
- ✎ La fermeture du contact d'auto-alimentation.
- ✎ L'action sur **S₁** entraîne l'arrêt de l'ensemble.

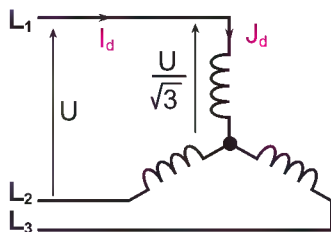
NB : pour passer d'un sens à l'autre, il faut passer en premier par l'arrêt. En plus du dispositif de verrouillage électrique assuré par les deux contacts fermés au repos 2KM1 et 2KM2, un système de verrouillage mécanique peut être employé. Le fait d'exciter KM1 et KM2 en même temps, entraîne un court-circuit franc au niveau des lignes de l'alimentation.

4- Démarrage étoile-triangle

a. Principe:

Ce procédé est basé sur le rapport des grandeurs entre la tension simple **V** et la tension composée **U** d'un réseau triphasé de distribution.

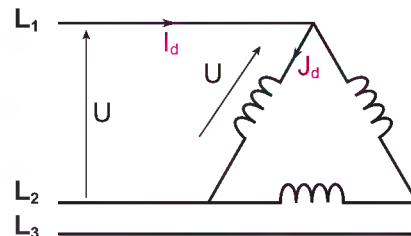
- ✎ dans un premier temps, la tension appliquée à chacun des enroulements du moteur couplé en **étoile** est une **tension simple**;
- ✎ à l'issue de ce premier temps, au couplage étoile est substitué le couplage **triangle** dans lequel est appliquée à chacun des enroulements la **tension composée**.



1^{er} temps: couplage en étoile et mise sous tension des enroulements. Le moteur démarre sous une tension réduite de rapport $\frac{1}{\sqrt{3}}$

I_d, J_d : courants absorbés lors d'un démarrage Y-D

I_{dd}, J_{dd} : courants absorbés lors d'un démarrage direct.



2^{ème} temps: suppression du couplage étoile et mise en couplage triangle des enroulements. Le moteur est alimenté sous pleine tension.

Fig. 29

NB : ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités des enroulements sont sorties sur la plaque à bornes, et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau.

b. Relation entre les courants " I_d " et " I_{dd} " :

$$I_d = J_d = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad ; Z : \text{impédance d'un enroulement du stator.}$$

$$I_{dd} = J_{dd} \cdot \sqrt{3} = \frac{U}{Z} \cdot \sqrt{3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} \cdot 3 = I_d \cdot 3 \Rightarrow I_{dd} = 3 \cdot I_d \Rightarrow$$

$$I_d = \frac{I_{dd}}{3}$$

Avec le démarrage étoile triangle, le courant appelé est réduit au tiers par rapport à celui appelé lors d'un démarrage direct.

c. Relation entre les couples " T_d " et " T_{dd} " :

Le couple est proportionnel au carré de la tension $T=K.U^2$. Il est aussi proportionnel au carré du courant dans chaque enroulement $T=K'.J^2$, puisque $J = \frac{U}{Z}$

Le rapport des couples est alors égal au rapport du carré des courants dans chaque enroulement.

$$\frac{T_d}{T_{dd}} = \left(\frac{J_d}{J_{dd}}\right)^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 = \frac{1}{3} \Rightarrow T_d = \frac{T_{dd}}{3}$$

Avec le démarrage étoile triangle, le couple produit au démarrage est réduit au tiers par rapport à celui produit lors d'un démarrage direct.

d. Utilisation :

A cause du couple de démarrage réduit, le procédé de démarrage étoile triangle est utilisé lorsque le couple résistant de la charge à entrainer augmente après l'accélération du moteur. Ce procédé est utilisé pour les presses, les centrifugeuses, les pompes, les ventilateurs, ...etc.

e. Caractéristiques électromécaniques

$$T_u = f(n)$$

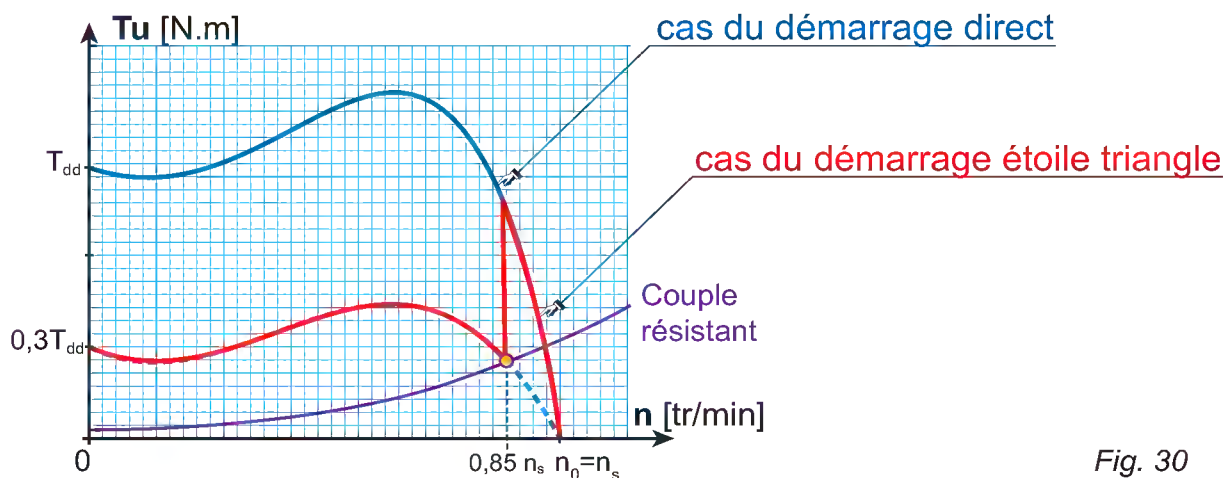
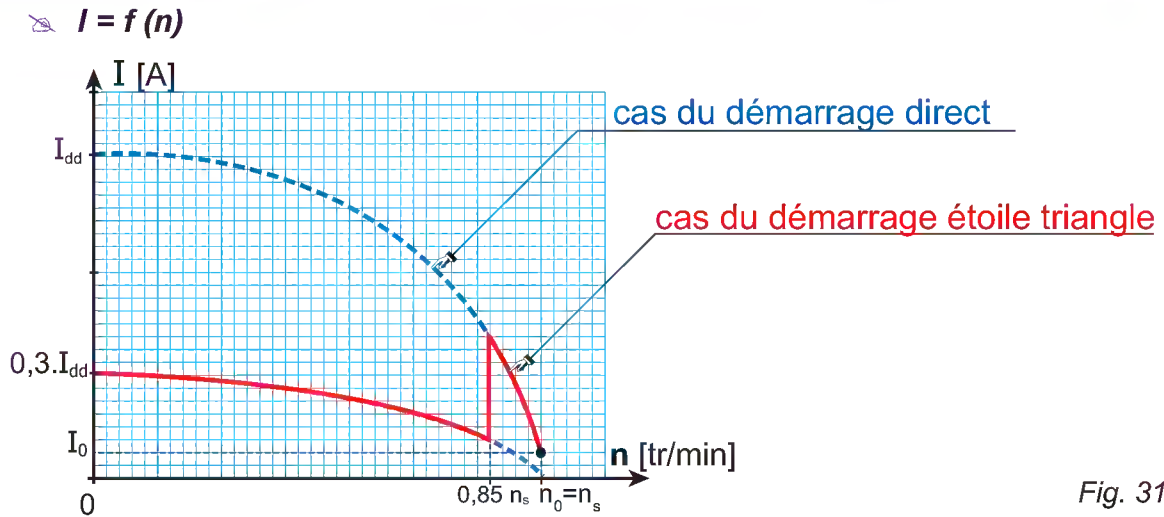
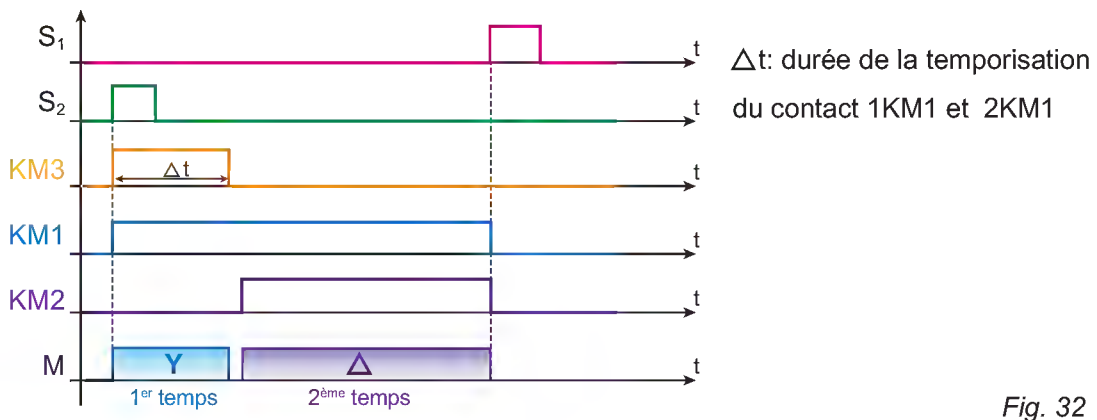


Fig. 30



f. Schémas des circuits dans le cas d'un démarrage à un seul sens de rotation
La figure 33 représente le schéma du circuit de puissance et celui de commande d'un démarreur étoile triangle pour moteur à un seul sens de rotation.

Le démarrage s'effectue en deux temps :



1^{ER} TEMPS

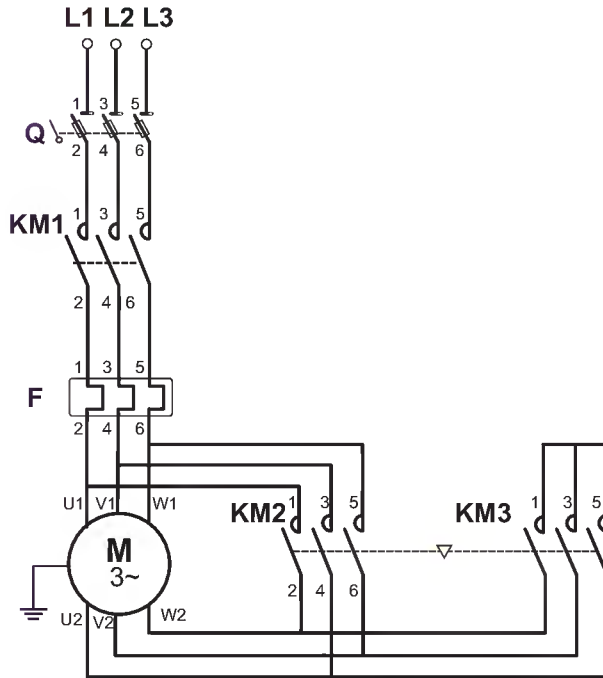
Une impulsion sur le bouton "**S₂**" provoque l'excitation de la bobine du contacteur de couplage étoile "**KM3**" qui ferme son contact de maintien "**1KM3**" pour alimenter la bobine du contacteur de ligne "**KM1**". Cette dernière, ferme son contact "**1KM1**" assurant ainsi le maintien de son alimentation et celle de la bobine "**KM3**" une fois le bouton "**S₂**" relâché.

2^{ÈME} TEMPS :

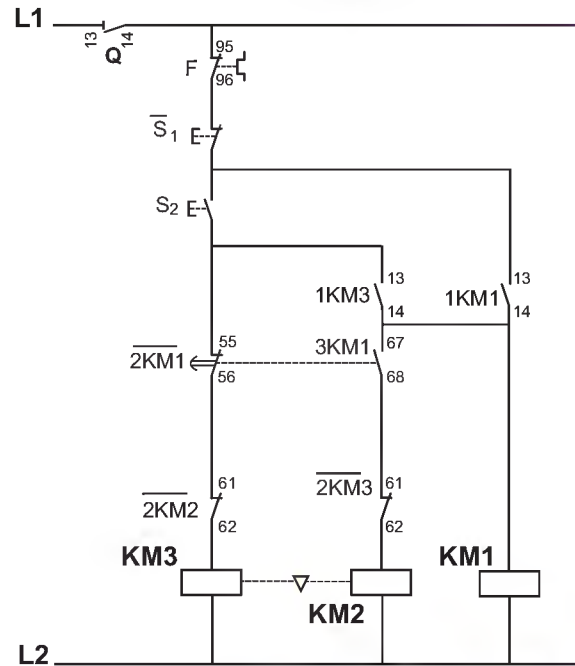
Au bout de **3 à 5** secondes, les contacts temporisés "**2KM1**" et "**3KM1**" actionnés par **KM1** entraînent la désexcitation de la bobine "**KM3**" et l'excitation de la bobine du contacteur de couplage triangle "**KM2**".

g. Schémas des circuits relatif au démarrage à un seul sens de rotation

CIRCUIT DE PUISSANCE



CIRCUIT DE COMMANDE



LÉGENDE:

- KM1*: contacteur de ligne;
- KM2*: contacteur de couplage triangle;
- KM3*: contacteur de couplage étoile;
- 2KM1* & *3KM1*: contacts temporisés commandés par *KM1*;
- 2KM2* & *2KM3*: contacts de verrouillage électrique.

Bloc de contacts temporisés



Fig. 33

ELECTROTECHNIQUE

VIII- Choix d'un moteur asynchrone triphasé

Le choix d'un moteur asynchrone triphasé dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels on cite essentiellement :

Le couple, la puissance utile, la vitesse, le mode de couplage, type du démarreur, dimensions, ...etc.

Le tableau suivant présente à titre d'exemple les caractéristiques de trois moteurs asynchrones triphasés:

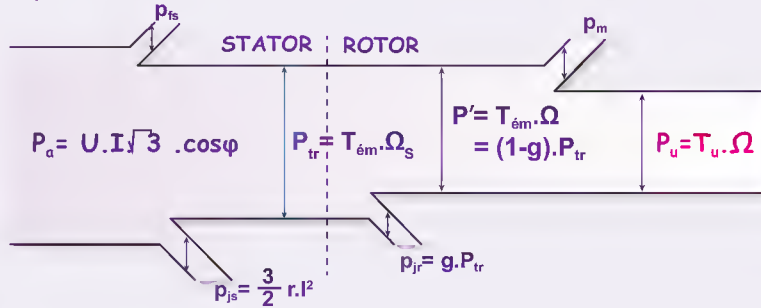
P_{uN} (KW)	I (A) sous		n = 3000tr/mn	
	220V	380V	I_d/I_n	T_d/T_n
1,1	4,4	2,6	5,5	2,3
7,5	27	15,5	6,9	2,4
300	1000	584	7,5	1,8

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

C. RÉSUMÉ

Le moteur asynchrone est une machine électrique destinée à convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Il est dit asynchrone car la vitesse de rotation du rotor est légèrement inférieure à celle du champ tournant créé par le stator ($n < n_s \rightarrow \Omega < \Omega_s$)

🔗 Bilan des puissance



🔗 Formules

- Nombre de pôles du stator $2p$, avec: $p = \frac{f}{n} \begin{cases} f \text{ (Hz)} \\ n \text{ (tr/s)} \end{cases}$

- Glissement $g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \begin{cases} n \text{ (tr/s); } \Omega \text{ (rd/s)} \\ g \text{ exprimé en \%} \end{cases}$

- Puissances et rendement

$$P_a = UI \sqrt{3} \cos \varphi \quad P_u = P_a - \sum \text{pertes} \quad \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

- Pertes

$p_{fs} + p_m = P_{a0} - p_{js0}$, généralement on admet que : $p_{js0} \ll P_{a0}$ et $p_{fs} \approx p_m$

- En étoile : $p_{js} = RI^2$ avec R résistance d'un enroulement ;

- En triangle: $p_{js} = 3RI^2$ avec R résistance d'un enroulement;

Si r est la résistance mesurée entre deux bornes, quel que soit le coulage.

$$p_{js} = \frac{3}{2} r I^2$$

🔗 Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement P est déterminé graphiquement : $T_u(n) \cap T_r(n)$ ou algébriquement en faisant l'égalité des deux équations $T_u(n) = T_r(n)$

🔗 Appareils de commande et de protection

- Sectionneur : isoler le moteur de l'installation ;
- Contacteur : commander le moteur ;
- Relais thermique : protéger contre les surintensités dues aux surcharges
- Fusible : protéger le moteur contre les surintensités dues aux courts-circuits

🔗 Démarrage

- Démarrage direct si la puissance utile du moteur $P_u \leq 5KW$;
- Démarrage étoile triangle si $P_u \geq 5KW$ et que le moteur doit être couplé en triangle.

D. ÉVALUATION

I- Contrôle de connaissances

EXERCICE N° 1

Répondre par Vrai ou Faux:

- Un moteur asynchrone triphasé est constitué de deux parties essentielles.
- La vitesse du rotor d'un moteur asynchrone triphasé n est inférieure à n_s .
- A vide, la puissance utile d'un moteur asynchrone triphasé est nulle.
- En charge ou à vide, $T_u = T_{ém} - T_p$,
- A vide, $g = 0\%$.

EXERCICE N° 2

Trois moteurs asynchrones triphasés de caractéristiques différentes doivent être branchés sur un même réseau triphasé (3 phases + N) de 380V, 50Hz. Déterminer le couplage à appliquer à chacun de ces trois moteurs. Justifier votre réponse.

- M1 : moteur asynchrone triphasé 220V, 50Hz.
- M2 : moteur asynchrone triphasé 380V, 50Hz.
- M3 : moteur asynchrone triphasé (220/380)V, 50Hz.

EXERCICE N° 3

Un moteur asynchrone triphasé caractérisé par 380V, 50Hz, $\cos\phi = 0,75$, triangle, 2,5 KW. Ce moteur est branché sur un réseau triphasé de fréquence 50Hz.

- Quelle est la tension composée de ce réseau. Justifier votre réponse.
- Exprimer puis calculer P_a dans les cas suivants $\eta = 91\%$; $\eta = 86\%$; $\eta = 76\%$.

EXERCICE N° 4

Exprimer puis calculer p_{js} des moteurs triphasés ayant les caractéristiques suivantes:

- $R = 1,2\Omega$, $I = 5,1 A$, couplage triangle.
- $R = 1,2\Omega$, $I = 5,2 A$, couplage étoile.
- $r = 1,2\Omega$, $I = 5,1 A$.

EXERCICE N° 5

Parmi les appareils suivants quels sont ceux qui sont destinés à la protection des moteurs asynchrones triphasés: **contacteur**, **sectionneur**, **sectionneur à fusibles**, **contacteur**, **relais thermique**.

Représenter le symbole et donner la fonction de chacun de ces appareils.

II- Exercices résolus

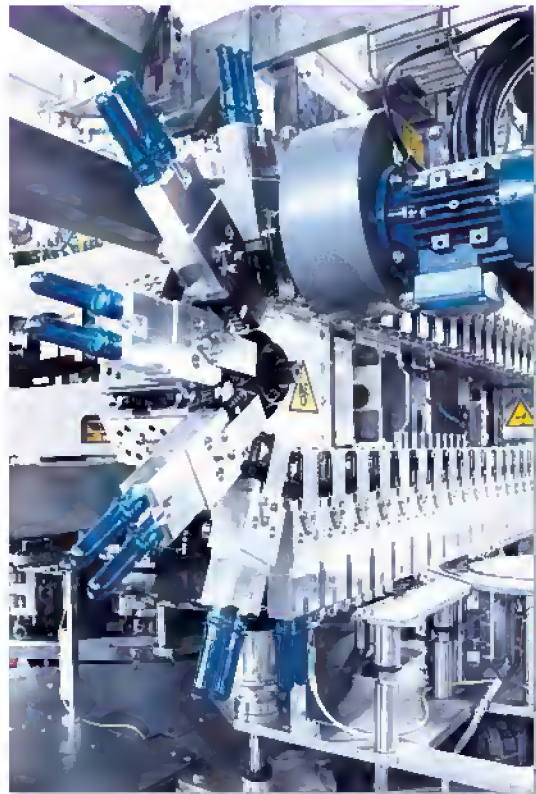
EXERCICE N° 1

La machine ci-contre est conçue pour la production de bouteilles et flacons de 0,25 à 2 litres de forme ronde, carrée ou ovale, emballage destiné au conditionnement de liquides alimentaires ou au produits gazeux.

Le moteur entraînant la chaîne de cette machine (Moteur en bleu) est du type asynchrone triphasé. Sa plaque signalétique porte les indications suivantes :

50 Hz ; Δ 220 V 11 A ; Y 380 V 6,4 A ; 1455 tr/min ; $\cos \varphi = 0,80$

Ce moteur est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz, 380 V entre phases.



- 1- Que doit être le couplage de ses enroulements pour qu'il fonctionne normalement?
- 2- Quel est le nombre de pôles du stator ?
- 3- Calculer le glissement nominal (en %).
- 4- Un essai à vide sous tension nominale a donné :
 - ✎ puissance absorbée : **$P_a = 260 \text{ W}$** ;
 - ✎ intensité du courant de ligne : **$I = 3,2 \text{ A}$**
 Les pertes mécaniques sont évaluées à **130 W**.

La mesure à chaud de la résistance d'un enroulement du stator donne **$r = 0,65 \Omega$** .
En déduire les pertes fer.

- 5- Pour le fonctionnement nominal, calculer :
 - ✎ les pertes par effet Joule au stator
 - ✎ les pertes par effet Joule au rotor
 - ✎ le rendement
 - ✎ le couple utile T_u

EXERCICE N° 2

La machine ci-contre représente un broyeur pour céréales. Elle est entraînée par un moteur asynchrone triphasé.

En fonctionnement normal le broyeur présente un couple résistant constant de **4 Nm**.

- 1- Sur la caractéristique **$T_u(n)$** du moteur on a relevé qu'à l'instant de démarrage ($n = 0$ tr/mn), **$T_d = 6$ Nm**.

Le démarrage en charge du moteur est-il possible? Justifier votre réponse.

- 2- Sur cette même caractéristique et dans la zone utile, on a : **$T_u = -0,1.n + 100$** avec **T** en Nm et **n** en tr/mn.

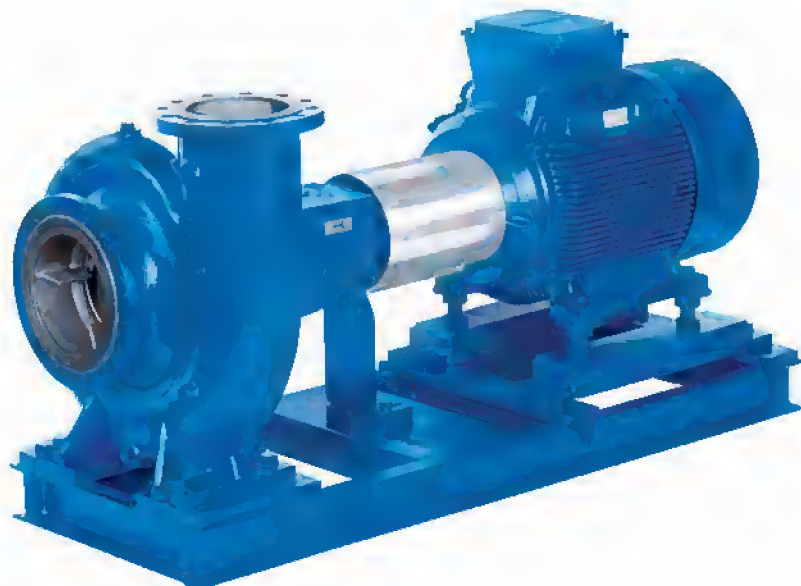
- 3- Déterminer la vitesse de rotation de l'ensemble en régime établi.

- 4- Calculer la puissance transmise au broyeur par le moteur.



EXERCICE N° 3

Une pompe à eau est entraînée par un moteur asynchrone triphasé dans un seul sens de rotation.



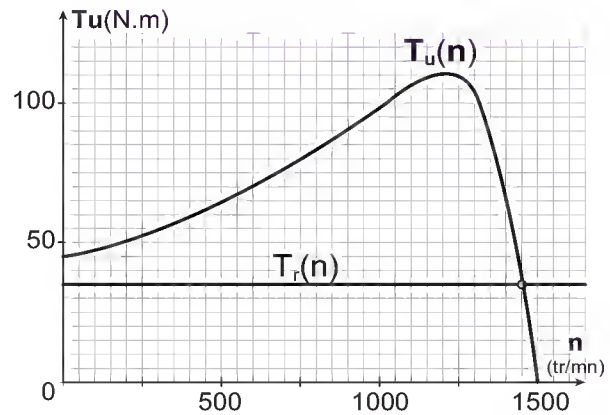
MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

Sur la plaque signalétique de ce moteur on lit:
220 V / 380 V , 21 A / 12 A , 5,5 kW , 50 Hz.

On donne la caractéristique mécanique $T_u(n)$ du moteur et celle du couple résistant imposé par la pompe:

T_u : moment du couple utile en (Nm);
 T_r : moment du couple résistant
 n : fréquence de rotation en (tr/min).

La mesure de la résistance d'un enroulement du stator a donné $R = 0,40 \Omega$.



I- Deux réseaux triphasés sont disponibles : 127 V / 220 V et 220 V / 380 V

1- Lequel des deux réseaux s'adapte le mieux au moteur si on veut coupler son stator en étoile ? Justifier votre réponse.

NB: Pour la suite on gardera ce couplage.

2- Quelle est l'intensité du courant en ligne au point nominal ?

3- Quelle est la vitesse de synchronisme n_s du moteur ? En déduire le nombre de pôles du stator.

II- On réalise l'essai à vide du moteur à une fréquence proche de sa fréquence de synchronisme. On obtient :

☞ $P_{a0} = 0,40 \text{ kW}$ (puissance absorbée à vide).

☞ $I_0 = 4,0 \text{ A}$ (intensité du courant en ligne à vide).

1- La puissance P_{a0} a été mesurée par la méthode des deux wattmètres : rappeler le schéma de principe de cette méthode.

2- Calculer les pertes dans le fer du stator P_{fs} , on suppose que les pertes mécaniques p_m sont égales à **0,20 kW**.

III- Ce moteur entraîne une pompe lui imposant un couple résistant indépendant de la vitesse de moment $T_r = 35 \text{ N.m}$.

1- Peut-on appliquer le démarrage direct pour ce moteur en charge ? Justifier votre réponse.

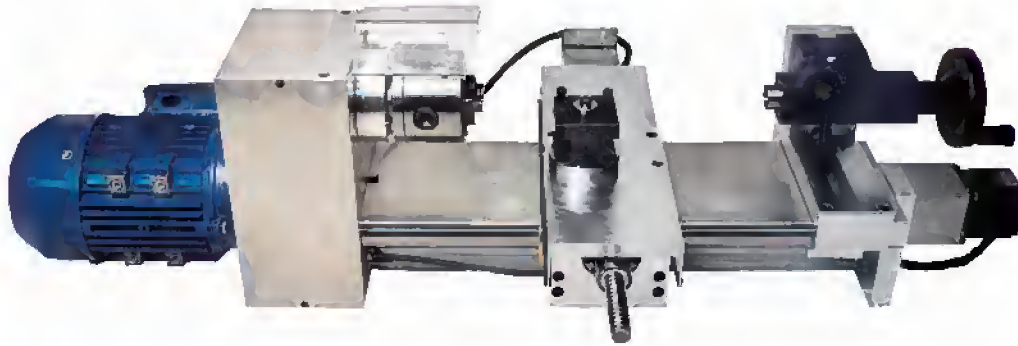
2- Déterminer la fréquence de rotation du moteur en charge et la valeur du glissement.

3- Calculer la puissance utile P_u du moteur.

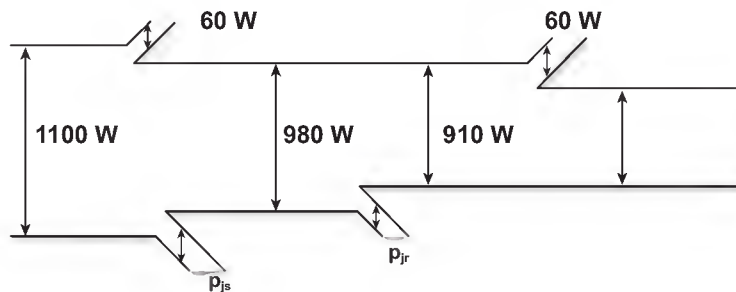
III- Exercices à résoudre

EXERCICE N° 1

La machine ci-dessous est destinée à l'usinage de pièces métalliques .



Le moteur assurant la rotation de la broche est du type asynchrone triphasé à rotor en court-circuit ayant le bilan énergétique suivant:



- 1- Calculer P_{js} et P_{jr} . Compléter les valeurs manquantes.
- 1- Calculer P_u de ce moteur.
- 2- Déterminer les couples $T_{ém}$ et T_u sachant que $n = 960 \text{tr/mn}$.

EXERCICE N° 2

Une pompe est entraînée par un moteur asynchrone triphasé tétra polaire, alimentée par un réseau triphasé **220 - 380V- 50Hz**.

Chaque enroulement doit être alimenté par une tension de **220V**.

Un essai en charge a donné les résultats suivants :

- ✎ Intensité de courant de ligne $I=6\text{A}$
- ✎ Puissance absorbée $P_a=6\text{KW}$
- ✎ Vitesse de rotation $n=1420 \text{tr/mn}$
- ✎ Rendement $=0,84$

- 1- Préciser le couplage des enroulements du stator
- 2- Calculer le glissement
- 3- Déterminer la valeur du couple utile
- 4- Entre le fonctionnement à vide et en charge , la caractéristique mécanique $T_u=f(n)$ est une droite, donner son équation


MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

- 5- On suppose que le couple résistant de la pompe est proportionnel à la vitesse de rotation au carrée, on donne $T_r = 10,687 \cdot 10^{-6} \cdot n^2$, calculer la vitesse de rotation du groupe (moteur +pompe).
- 6- Calculer la puissance utile dans ce cas
- 7- Déduire la valeur du rendement (on suppose que la puissance absorbée par le moteur est toujours égale à 6KW).

EXERCICE N° 3

Le système ci-contre est un batteur, mélangeur professionnel destiné à réaliser différents types de pâtes, (les pâtes molles comme le pain, la pizza).

La plaque signalétique du moteur asynchrone triphasé équipant ce système technique est donnée ci-dessous:

 LEROY® MOT. 3 ~ LS 80 L T SOMER N° 734570 BJ 002 Kg 9					
IP 55 I C.L.F			40°C S1		
V	Hz	tr.min ⁻¹	KW	cosφ	A
Δ220	50	2780	0,75	0,86	3,3
Y380					1,9
Δ230	50	2800	0,75	0,83	3,3
Y400					1,9
Δ240	50**	2825	0,75	0,80	3,3
Y410					1,9

Moteurs Leroy Somer

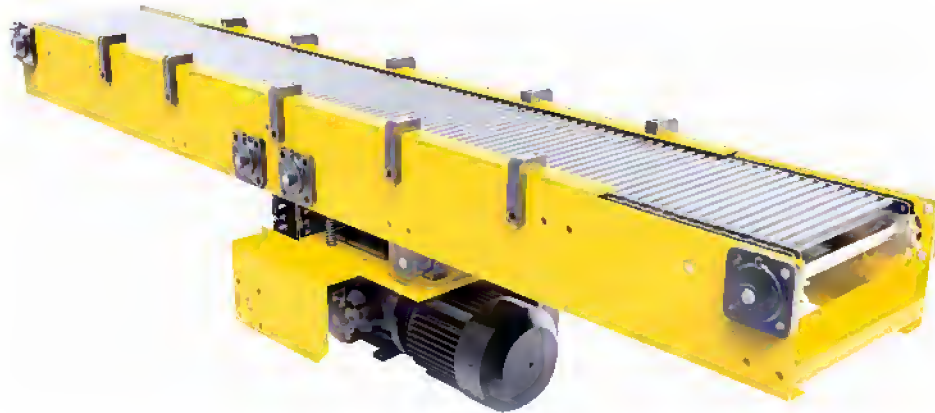


Ce moteur est alimenté par un réseau triphasé 230V / 50Hz avec un facteur de puissance $\cos \varphi = 0,83$.

- 1- Comment doit être couplé ce moteur ? Justifier votre réponse.
- 2- Sachant que $p_{fs} = p_m = 60W$, en régime nominal, exprimer puis calculer:
 - ✎ le glissement g ;
 - ✎ la puissance P_u ;
 - ✎ la puissance P_{tr} ;
 - ✎ les pertes au rotor p_{jr} ;
 - ✎ la puissance P_a ;
 - ✎ les pertes au stator p_{js} ;
 - ✎ r (entre deux bornes);
 - ✎ le rendement η ;
 - ✎ les différents couples:
 - $T_{ém}$;
 - T_p ;
 - T_u

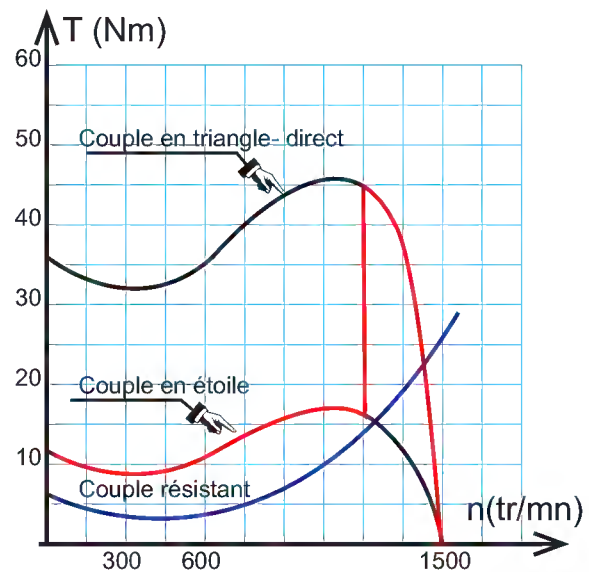
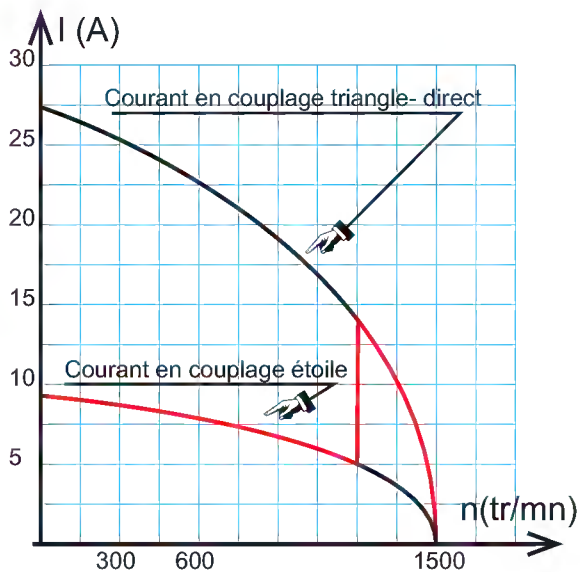
EXERCICE N° 4

Le convoyeur à bande ci-dessous est utilisé dans une usine de conditionnement de produits alimentaires .



Le moteur d'entraînement de ce convoyeur est à démarrage étoile triangle à un seul sens de rotation.

Les courbes de $I(n)$ et $Tu(n)$ sont données ci-dessous.



Ce moteur est branché sur un réseau triphasé équilibré de (220/380)V, 50Hz.

- 1- Indiquer sur la courbe le point de fonctionnement. Relever ses coordonnées.
- 2- Indiquer le couple au démarrage en étoile et en triangle. Relever les valeurs correspondant à ces deux couplages.

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

- 3- Déduire le courant correspondant au régime de fonctionnement établi (fonctionnement normal : le point de fonctionnement P).
- 4- Exprimer puis calculer P_u , le glissement g et p .
- 5- Exprimer puis calculer P_a , déduire $\cos\varphi$ et Σ pertes. Calculer η .
- 6- La chaîne de commande et de protection est composée d'appareils permettant la coupure à vide visible et la protection contre les courts-circuits; la commande en charge à distance; la protection contre les surcharges lentes; le démarrage en étoile triangle et la protection par mise à la terre des masses métalliques.
 - a. Déduire le nom de chacun des appareils de cette chaîne.
 - b. Tracer le schéma sur une feuille de dessin format A4.

EXERCICE N°5

Un moteur asynchrone triphasé hexapolaire est alimenté par un réseau triphasé **230 V / 400 V ; 50 Hz**.

La résistance r mesurée entre deux bornes du stator est **$r = 0,8\Omega$** .

En fonctionnement nominal:

- ✎ le glissement g est de **6%**;
- ✎ la puissance absorbée **P_a** mesurée par la méthode des 2 wattmètres est **$P_1 = 8700 \text{ W}$ et $P_2 = 3600 \text{ W}$** .
- ✎ Les pertes collectives **$p_c = p_m + p_{fs} = 1100 \text{ W}$ et $p_m = p_{fs}$** .

- 1- Déterminer la puissance active P_a .
- 2- Déterminer la puissance réactive Q_a .
- 3- Calculer la valeur de l'intensité I lors du fonctionnement nominal et le facteur de puissance $\cos\varphi$.
- 4- En déduire les pertes par effet Joule au stator.
- 5- Déterminer la vitesse de rotation du rotor.
- 6- Déterminer les pertes par effet Joule dans le rotor.
- 7- En déduire la puissance utile P_u de ce moteur ainsi que le couple utile T_u .

Ce moteur entraîne une charge mécanique dont la caractéristique **$T_r(n)$** peut-être assimilée à une droite passant par les points (960 tr/min ; 60 N.m) et (1000 tr/min ; 40 N.m).

- 8- Déterminer les coordonnées du point de fonctionnement.

IV- Correction des exercices

EXERCICE N° 1

- 1- Couplage étoile
- 2- 4 pôles
- 3- $g = 3\%$
- 4- $p_{fs} = 120W$
- 5-
 - ✎ $p_{jr} = 93,6W$
 - ✎ $\eta = 88,6 \%$
 - ✎ $T_u = 19,6 Nm$

EXERCICE N° 2

- 1- Oui, le démarrage en charge est possible car $T_r < 4 N.m$ (couple nécessaire à l'entraînement de l'aspirateur).
- 2- $T_u = -0,1n + 100 = 4 \Rightarrow n = 960 tr/mn$
- 3- $P_u = T_u \cdot \Omega = 401,92W$

EXERCICE N° 3

I- 1- En couplage étoile la tension aux bornes d'un enroulement est la tension simple V du réseau. D'après la plaque signalétique, elle doit être de $220 V$ (la plus petite des tensions indiquées) : $V = 220 V$.

Il faut utiliser le réseau $220 V / 380 V$.

2- En couplage étoile : $12 A$

3- $n_s = n_o$ (à vide) = $1500 tr/min$ (d'après la caractéristique) $\Rightarrow P=2$ (4 pôles).

II-

2- Bilan de puissances à vide : $P_{a0} = p_{JS0} + p_{FS} + p_m$

$$p_{JS0} = 3 R \cdot I_0^2 = 3 \times 0,4 \times 42 = 19 W$$

$$p_{FS} = P_{a0} - p_{JS0} - p_m = 0,40 - 0,02 - 0,20 = 0,18 kW$$

III. 1. Le démarrage direct du moteur est possible car le moment du couple au démarrage est de $45 N.m$. Il est donc supérieur au moment du couple résistant ($T_r = 35 N.m$). C'est la condition à respecter pour démarrer.

2- Coordonnées du point de fonctionnement ($35 N.m, 1450 tr/min$).

✎ $g = 3,3 \%$

✎ $\Omega = 151,8 rad/s$

✎ $P_u = T_u \cdot \Omega = 35 \times 151,8 = 5,3 kW$.