

Machines Électriques Tournantes

M. NASSER



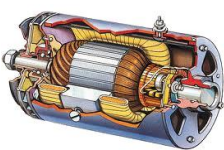
ECOLE DES HAUTES ETUDES D'INGENIEUR

Cycle général et de consolidation du projet professionnel

Cycle Ingénieur – HEI 3

Cours d'Electrotechnique 2ème partie

Les entrainements électriques



Machine à cc.



Machine asynchrone



Machine synchrone

RÉFÉRENCE : 3A41-1

HEI
13, rue de Toul
59 046 Lille Cedex

Année 2013/2014

M. Nasser

Tél. : 03 28 38 48 58
Télécopieur : 03 28 38 48 04
Site Internet : www.hei.fr
e-mail : ecole@hei.fr

Table des matières

CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES	3
STRUCTURE DE LA MACHINE.....	3
LOIS GENERALES DE LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE	3
CONSTITUTION DE LA MACHINE ELECTRIQUE	4
TYPE DE SERVICE S.....	5
INDICE DE PROTECTION IPxx ET IKxx	6
PLAQUE SIGNALETIQUE	6
COUPLES RESISTANTS.....	8
MODES DE FONCTIONNEMENT	10
QUESTIONS DE COURS	11
FICHE MEMOIRE A COMPLETER	11
CHAPITRE 2 MACHINES A COURANT CONTINU.....	12
CONSTITUTION D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU	12
SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT D'UNE MACHINE A CC	13
LOIS GENERALES DE LA MACHINE A COURANT CONTINU	13
QUESTIONS DE COURS	15
FICHE MEMOIRE A COMPLETER	16
CHAPITRE 3 MACHINES SYNCHRONES.....	17
STRUCTURE.....	17
PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT EN GENERATEUR.....	18
SCHEMA EQUIVALENT MONOPHASE D'UN ALTERNATEUR TRIPHASÉ SYNCHRONÉ.....	18
QUESTIONS DE COURS	22
FICHE MEMOIRE A COMPLETER	22
CHAPITRE 4 MACHINES ASYNCHRONES	23
STRUCTURE.....	23
NOTION DE CHAMP TOURNANT	24
PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	25
SCHEMA EQUIVALENT MONOPHASE D'UNE MACHINE ASYNCHRONÉ TRIPHASÉ.....	27
MOTEUR ASYNCHRONÉ MONOPHASE	31
QUESTIONS DE COURS	32
FICHE MEMOIRE A COMPLETER	32
CHAPITRE 5. LES CRITERES DE CHOIX D'UN MOTEUR	34
QUELLE TECHNOLOGIE DE MOTEUR : ÉLECTRIQUE OU THERMIQUE ?	34

I. CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE ENTRAINEE	35
II. Alimentation électrique :	36
III. Eléments de choix du moteur :	37
FICHE MEMOIRE A COMPLETER	40
CHAPITRE 6. INTRODUCTION A L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE	41
LA DIODE	41
LE THYRISTOR	42
LE TRANSISTOR	43
REDRESSEUR P1	46
REDRESSEUR PD2 (PONT DE GRAËTZ)	46
REDRESSEUR P3	47
REDRESSEUR PD3	48
FICHE MEMOIRE A COMPLETER	53
CHAPITRE 7 CRITERE DE CHOIX D'UN VARIATEURS DE VITESSE POUR MACHINES ELECTRIQUES	54
LE REDRESSEUR	54
L'ONDULEUR	55
LE HACHEUR	56
LE GRADATEUR	57
QUESTIONS DE COURS	60
COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE	60
COMMANDE SCALAIRE	61
FICHE MEMOIRE A COMPLETER	61

CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES

Un moteur électrique est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique, destiné à entraîner une machine. En entrée, il reçoit de l'énergie électrique et il fournit en sortie une énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité.

STRUCTURE DE LA MACHINE

Du point de vu construction, un moteur ou une génératrice est constitué par une partie fixe appelée STATOR et une partie mobile appelée ROTOR qui tourne généralement à l'intérieur du stator. Entre ces deux parties se trouve un intervalle d'air appelé ENTREFER permettant la rotation du rotor. (FIGURE 1)

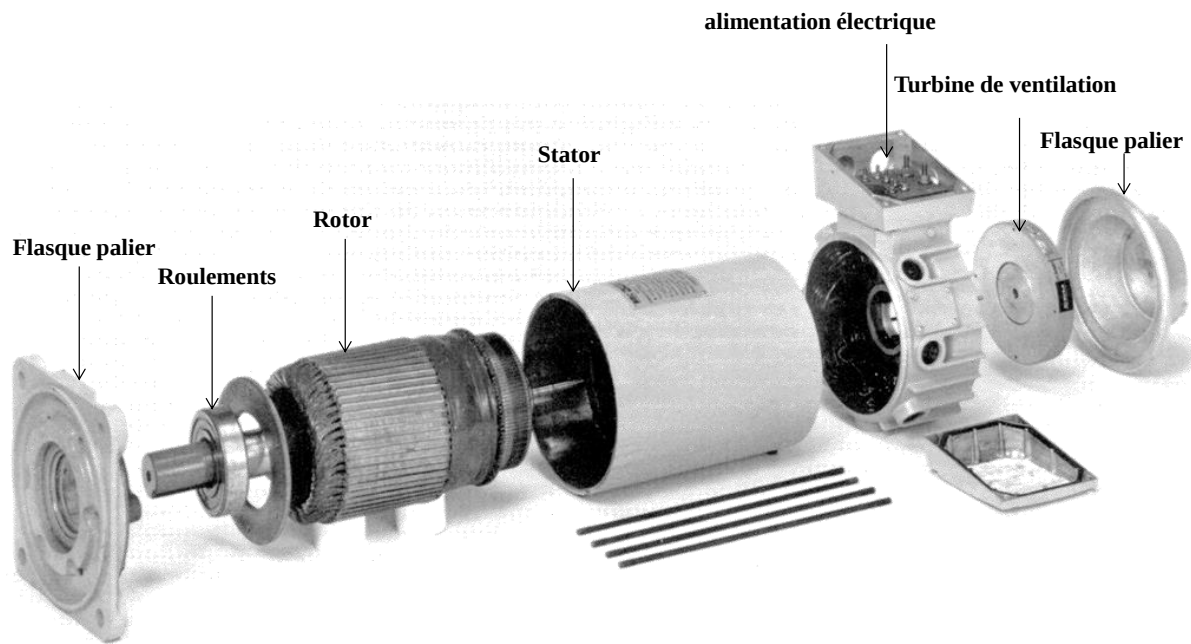


Figure 1 – Vue éclatée d'une machine électrique.

LOIS GENERALES DE LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

L'exemple théorique suivant permet de matérialiser les diverses lois qui règlent cette conversion. Un conducteur de longueur l , mobile, se déplace à la vitesse v sur deux rails indéfinis placés dans une induction uniforme et invariable B , normale aux conducteurs. On exerce la force mécanique F_{mec} sur le conducteur et le circuit est alimenté par un générateur de tension. U et de résistance interne R . On note I le courant, avec les conventions de signes indiqués sur la figure 2:

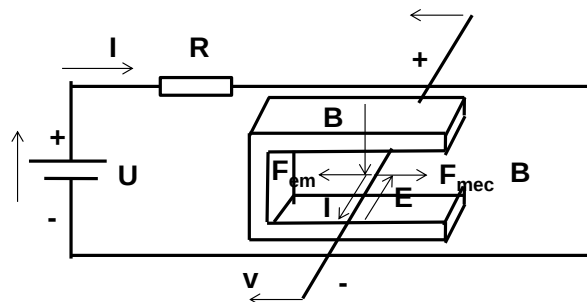


Figure 2 – Principe du générateur d'énergie électrique.

Quatre lois déterminent le système électromécanique :

1. La loi de Faraday : si la vitesse du conducteur est v

Il apparaît une f.é.m. E : $E = Blv$

2. La loi de Laplace : si le courant dans le conducteur est I

Il existe une force électromagnétique F_{em} : $F_{em} = BIl$

3. La loi d'Ohm : $U = E + RI$

4. La loi de la dynamique : si la vitesse v est constante, elle implique : $F_{em} = F_{mec}$

Si la résistance est nulle (aucune perte dans le circuit) on a alors :

– une vitesse v telle que $U = E$

– un courant I tel que $F_{em} = F_{mec}$

Les vitesses sont liées aux f.é.m. et les courants aux forces.

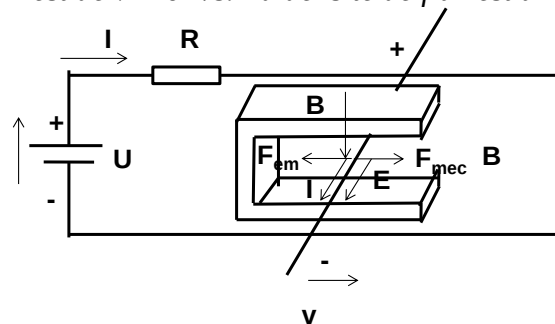
Le fonctionnement sera moteur si F_{em} et v sont de même sens. La f.é.m. E s'oppose alors au courant. $U = E + RI$

Le fonctionnement sera générateur électrique si F_{em} et v sont de sens opposé. La f.é.m. E va dans le sens du courant. $U = E - RI$

On peut exprimer la puissance au niveau du conducteur sous la forme mécanique ou sous la forme électrique :

$$P_{em} = F_{em} \times v = B \times l \times I \times \frac{E}{B \times l} = EI$$

Exercice 1. On donne une barre mobile sur deux rails le long desquels elle peut glisser sans frottement. La résistance de la barre et des rails est représentée par la résistance $R=1,4 \Omega$. La vitesse en régime établi est de $v=10\text{m/s}$. La densité de flux est uniforme et vaut $0,5\text{T}$.



Si la position initiale de la barre est x_0 et que la longueur de la barre est $L= 2\text{m}$ et que la tension de la source est de 24V ,

On vous demande de :

1. Donner l'expression du flux coupé par le circuit composé de la source de tension, la résistance et la barre.
2. Dériver l'expression du flux pour déterminer la tension induite dans la barre.

CONSTITUTION DE LA MACHINE ELECTRIQUE

Les machines électriques comportent :

1. des matériaux magnétiques chargés de conduire et canaliser le flux magnétique;

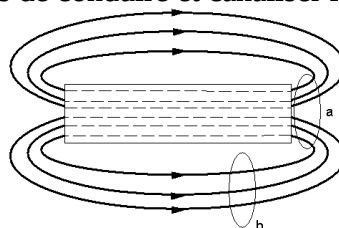


Figure 3 – matériaux magnétiques.

2. des matériaux conducteurs chargés de conduire et canaliser les courants électriques : Le cuivre est généralement utilisé pour réaliser les bobinages des machines électriques. Cependant, pour les lignes de transport de l'énergie électrique où l'on souhaite disposer de câble assez léger, on utilise l'aluminium (Figure 4)

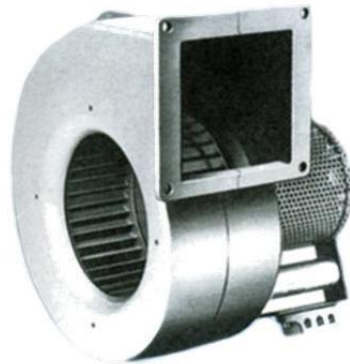


Figure 4 – Câble de distribution.

3. des isolants : Les conducteurs sont isolés avec du papier, du coton, du bois, du PVC, du caoutchouc, des thermoplastiques ;

4. un système de refroidissement : ventilation naturelle ou ventilation forcée

La capacité d'une machine à supporter un fonctionnement en régime permanent sous l'effet de la température est donc primordial. Cette grandeur est définie comme étant sa classe thermique ou classe d'isolation. La classe la plus courante est la classe F.



Turbine ventilation forcée

Figure 5 – Turbine ventilateur

TYPE DE SERVICE S

Il est en rapport avec l'échauffement des enroulements lors des périodes de marche et d'arrêt du moteur. La plupart des moteurs fonctionnent souvent en service non continu. Certains moteurs ne fonctionnent que pendant une brève période, d'autres tournent toute la journée mais avec une faible charge, et de nombreux moteurs doivent accélérer de fortes inerties ou sont commandés en mode commuté et freinés électriquement.

Il existe neuf types de services différents, de S1 à S9, les plus courants sont les services S1, S2 et S3.

S1	SERVICE CONTINU	Fonctionnement à charge constante pour atteindre l'équilibre thermique.
S2	SERVICE TEMPORAIRE	Fonctionnement à charge constante pendant un temps déterminé inférieur au temps de l'équilibre thermique suivi d'un repos suffisant pour rétablir l'égalité de température entre le moteur et l'air de refroidissement. OBSERVATION: ce service peut permettre une puissance utile supérieure à la puissance nominale.
S3	SERVICE INTERMITTENT	Répétition de cycles identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à la charge constante et une période de repos: on considère que l'intensité de démarrage n'affecte pas l'échauffement du moteur de façon significative. OBSERVATION: ce service peut permettre une puissance utile supérieure à la puissance nominale.

Tableau n°1. Type de service

INDICE DE PROTECTION IPXX ET IKXX

L'indice IP est donné pour tous les équipements électriques et est indiqué par deux chiffres :

- le premier correspond à la protection contre la pénétration des corps solides ;
- le deuxième correspond à la protection contre la pénétration des liquides.

Par exemple, IP55 signifie « protégé contre la pénétration de toutes particules solides et contre les jets d'eau de toutes direction ».

Degré de protection	Description sommaire	Objets qui ne doivent pas pouvoir pénétrer à l'intérieur de l'enveloppe
IP 0 X		La partie électrique du luminaire n'a pas de protection particulière.
IP 1X		La partie électrique du luminaire est protégée contre les corps solides supérieurs à 50 mm (exemple : contact involontaire de la main)

Tableau n°2 IP Degré indice de protection

L'indice IK détermine le degré de protection du matériel contre les chocs d'origine mécanique. Par exemple : IK08 indique que le matériel est protégé contre un choc équivalent à la chute d'une masse de 1,25kg depuis une hauteur de 40cm

PLAQUE SIGNALÉTIQUE

Toute machine électrique est munie d'une plaque signalétique qui indique les caractéristiques nominales électriques de la machine, tous les renseignements utiles y sont répertoriés. Une plaque signalétique porte généralement les indications suivantes, voir la figure 6:



Figure 6 – Plaque signalétique d'une machine asynchrone.

– Marque du moteur : LEROY-SOMER

– Le type : LS 90 L3

- LS = LETTRES DE LA SERIE
- 90 = HAUTEUR D'AXE (STANDARD 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200)
- L3 = TYPE LONGUEUR TOLE ROTOR (L1, L2, L3)

– Le numéro de série : 834039;

– les indices de protection IP44 ;

- « 4 » = Protégé contre les corps solides supérieurs à 1mm,
- « 4 » = Protégé contre les projections d'eau de toutes directions.

– la puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur 1,8 kW;

– le facteur de puissance (0,82) qui permet de calculer la puissance réactive consommée par le moteur dans le cas du moteur asynchrone ;

– les tensions d'alimentation, 220 V voltage du moteur en triangle. 380 V voltage du moteur en étoile.

– les intensités en ligne 7,5 A courant du moteur en triangle. 4,3 A courant du moteur en étoile ;

– le rendement (79 %) qui permet de connaître la puissance électrique absorbée par la machine ;

– la vitesse de rotation nominale (1410 tr/min) de l'arbre moteur qui permet de déterminer la vitesse de synchronisme (1500 tr/min) dans le cas d'une machine asynchrone ;

– la fréquence (50 Hz) des tensions devant alimenter la machine ;

– le nombre de phases 3;

– la température ambiante maximum (40°C);

– le service de marche S1 (S1=100%, S2=80%, S3=60%, S4=40%)

– la classe d'isolation F CLASSE D'ISOLEMENT (A105°, E120°, B130°, F155°, H180°), définissant la température maximum en exploitation;

– la masse de la machine 24 kg;

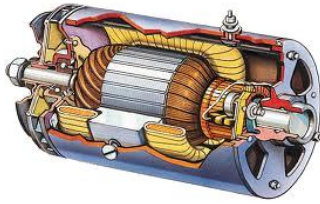
Classification (Figure 7)

Nous pouvons classer les machines électriques tournantes en trois grandes catégories:

Machines en courant continu: ces machines fonctionnent en courant continu.

Machine asynchrone (ou d'induction): c'est une machine à courant alternatif. Il existe des moteurs asynchrones et des génératrices asynchrones. On l'utilise beaucoup dans l'industrie.

Machine synchrone: ce sont des machines à courant alternatif qui fonctionnent à vitesse constante. Dans cette catégorie, on retrouve les moteurs synchrones et des génératrices synchrones (ou alternateurs).



Machine à cc.



Machine asynchrone



Machine synchrone

Figure 7. Trois grandes catégories des machines électriques

Dimensionnement d'un moteur d'entraînement

Les données d'entrée : tension, fréquence, courant, nature du réseau d'alimentation (Figure 5)

Les données de sortie : puissance utile, vitesse, couple moteur.

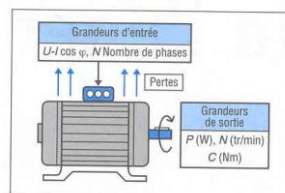


Figure 5. Moteur électrique

Selon le type de système à entraîner, les grandeurs mécaniques de la machine à entraîner doivent être connues.

COUPLES RESISTANTS.

Les différentes formes de couples résistants sont les suivantes.

1) Machines à couple constant. Exemple: levage (Figure 6)

Le couple utile reste constant. La puissance utile P est proportionnelle à la vitesse.

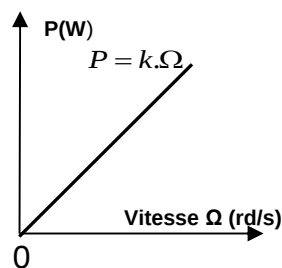
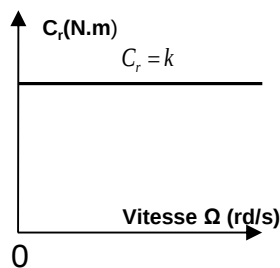


Figure 6. Machines à couple constant

2) Machines à puissance constante. Exemple : essoreuse (Figure 7)

Le couple diminue lorsque la vitesse augmente. La puissance utile P reste constante

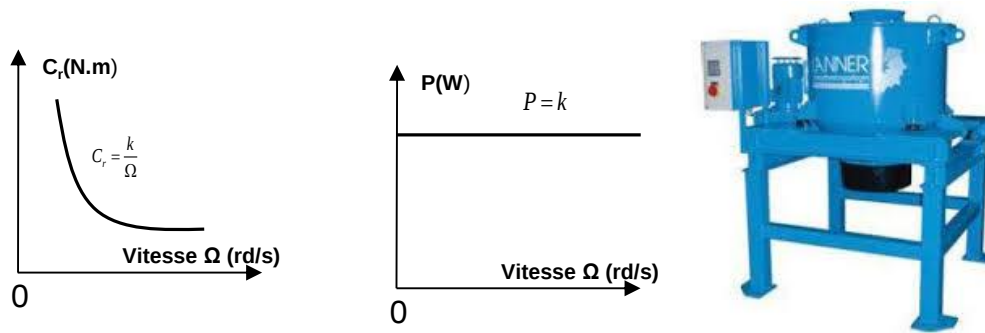


Figure 7. Machines à puissance constante

3) Machines à couple proportionnel à la vitesse. Exemple : Mélangeurs (Figure 8)

Le couple résistant augmente proportionnellement à la vitesse. La puissance utile augmente proportionnellement au carré de la vitesse.

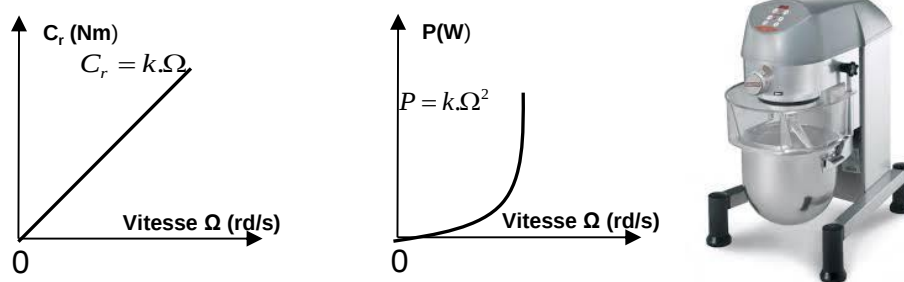


Figure 8. Machines à couple proportionnel à la vitesse

4) Machines à couple proportionnel au carré de la vitesse. Exemple : Ventilateur (Figure 9).

Le couple résistant augmente proportionnellement au carré de la vitesse. La puissance utile augmente proportionnellement au cube de la vitesse.

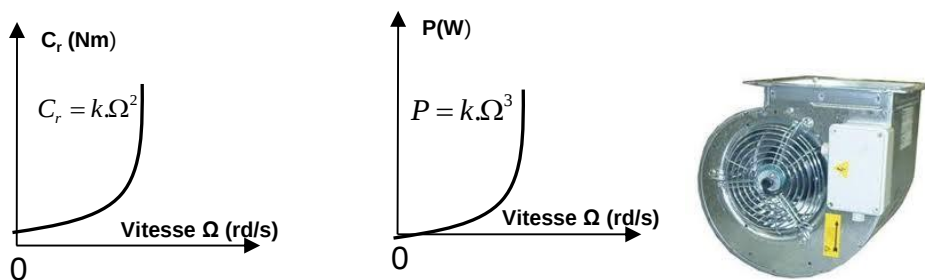


Figure 9. Machines à couple proportionnel au carré de la vitesse

Exercice 2. On se propose d'étudier une pompe centrifuge à axe horizontale dont les caractéristiques sont les suivantes : Débit = 110 l/sec. Hauteur manométrique totale : 4 m. MD^2 sur l'arbre à 1500 tr/min : 4,31 kg.m²

1. Calculer le moment d'inertie de la pompe centrifuge J_{pompe} à 1500 tr/min

Moment d'inertie J_{pompe} à 1500 tr/min

2. Donner le type de couple résistant de la machine entraînée. Machine centrifuge,
3. Calculer la puissance d'entraînement P_e

MODES DE FONCTIONNEMENT

Les variables mécaniques sont le couple utile C_u et la vitesse de rotation N . On distingue quatre quadrants de fonctionnements comme le montre la figure 10.

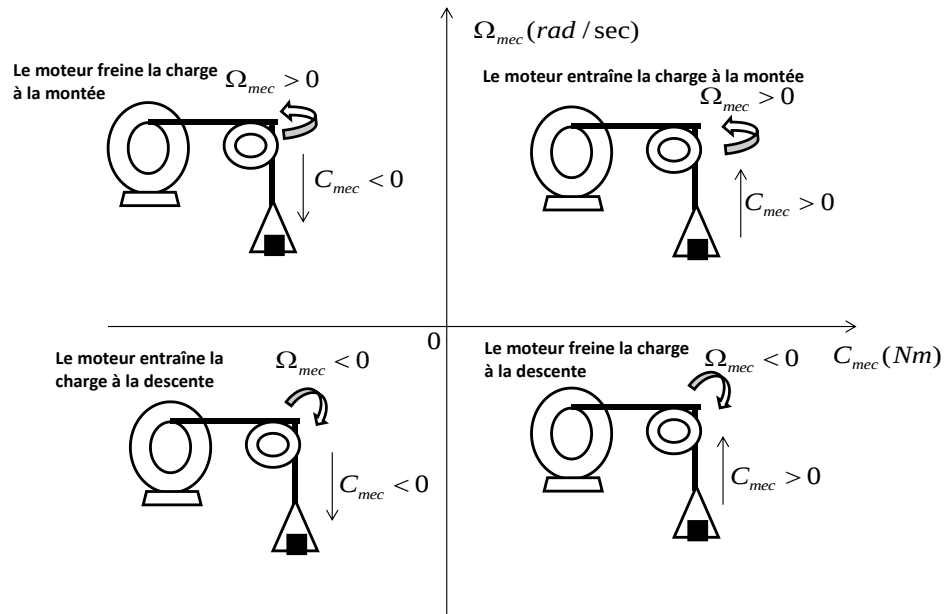
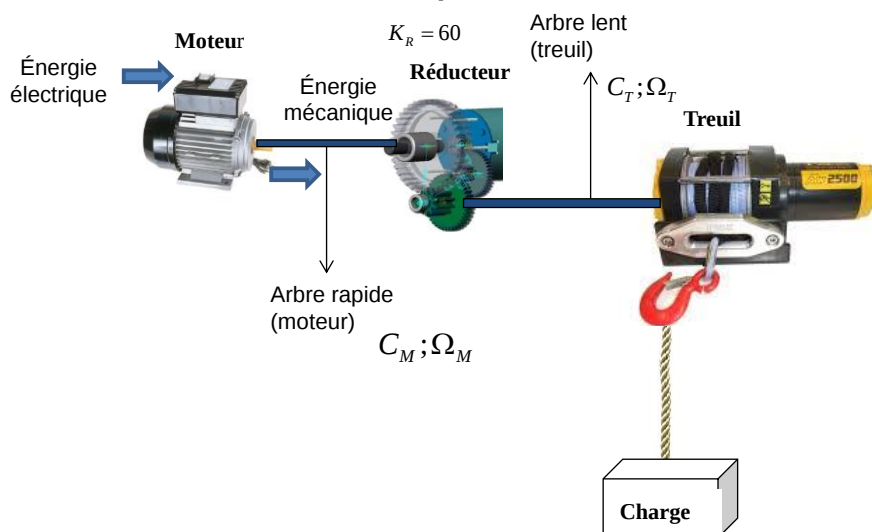


Figure 10. Les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine électrique tournante. Dans les quadrants 1 et 3, le couple et la vitesse sont de même sens : la puissance électrique est transformée en puissance mécanique fournie à la charge. Le quadrant 1 correspond au fonctionnement moteur en marche avant, tandis que le 3 correspond à un fonctionnement moteur en marche arrière.

Dans les quadrants 2 et 4, le couple est opposé à la vitesse. La puissance mécanique est fournie par la charge qui est alors entraînée, le moteur se comporte en frein convertissant la puissance mécanique en puissance électrique qui sera soit renvoyée vers l'alimentation (récupération) soit dissipée dans des résistances (freinage rhéostatique).

Exercice 3. Pour élever une charge de 100 kg à 10 m de hauteur, on utilise un treuil accouplé à un moteur par l'intermédiaire d'un réducteur mécanique.



Caractéristiques des appareils :

- treuil diamètre du tambour $d = 20 \text{ cm}$, $\eta_T = 0,9$

- réducteur : rapport de réduction $K_R = 60$, $\eta_R = 0,85$
- moteur : vitesse de rotation en charge $= 1450 \text{ min}^{-1}$, $\eta_M = 0,85$
- diamètre de l'axe $d = 20 \text{ mm}$

- 1 - Calculer le travail utile W_{uT} effectué par le treuil ($g = 9,81 \text{ m/sec}^2$)
- 2 - Calculer la puissance utile P_{uT} fournie par le treuil.
- 3 - Calculer le travail fourni par l'axe du moteur W_{uM} .

QUESTIONS DE COURS

- Q1. Quels sont les éléments principaux concernés par le mode de démarrage?
- Q2. Donner la définition de l'inertie
- Q3. Donner la définition du couple d'une machine :
- Q4. Quelles sont les machines qui représentent la large majorité des utilisations :

FICHE MEMOIRE A COMPLETER

$$J_{pompe} = \frac{MD^2}{4} \rightarrow \text{kg.m}^2 \quad P_e = \frac{Q.g.h}{1000.\eta} \rightarrow W \quad W = F \times L \quad F = M \times g$$

$$W_{uT} = M \times g \times h \rightarrow W \text{ sec} \quad P_{uT} = \frac{W_{uT}}{t} \rightarrow W \quad P_{mec} = C_{mec} \times \Omega_{mec} \rightarrow W$$

$$C_{acc} = J \frac{d}{dt} \Omega \rightarrow Nm$$

$$E = Blv \quad F_{em} = BIl \quad U = E + RI \quad P_{em} = F_{em} \times v = EI$$

CHAPITRE 2 MACHINES A COURANT CONTINU

Les moteurs à courant continu restent très utilisés dans le domaine de l'automobile (ventilateurs, lève-vitre, etc.) ainsi qu'en tant que « moteur universel » dans l'électroménager et l'outillage (Figure 1)



Figure 1. Petits moteurs à courant continu.

CONSTITUTION D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU

Une machine à courant continu comprend quatre parties principales (Figure 2):

- l'inducteur ;
- l'induit ;
- le collecteur ;
- les balais également appelés charbons.

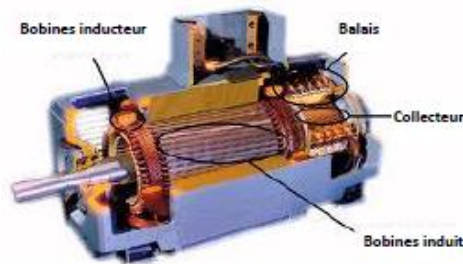


Figure 2 Constitution d'une machine à courant continu.

L'inducteur (Figure 3)

Le bobinage inducteur, traversé par le courant inducteur I_e , produit le flux magnétique dans la machine. Ces bobines sont composées de plusieurs centaines de spires et sont traversées par un courant relativement faible (I_e). Le champ magnétique créé par ces bobines traverse les pièces polaires, l'induit et l'entrefer. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles.

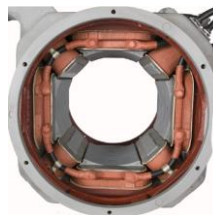


Figure 3 Inducteur d'une machine à courant continu.

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine à courant continu, selon le type d'excitation employée (Figure 4).

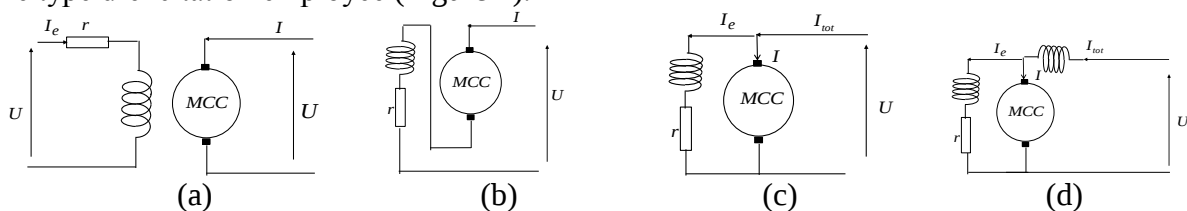


Figure 4 Symboles de la machine à courant continu.

(a) Moteur à courant continu à excitation indépendante, (b) Moteur à courant continu à excitation série, (c) Moteur à courant continu à excitation shunt, (d) Moteur à courant continu à excitation composée

L'induit (Figure 5)

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur.

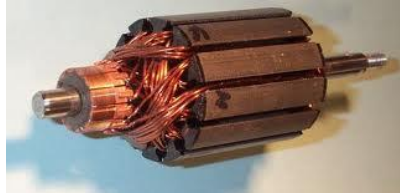


Figure 5 Induit d'une machine à courant continu.

Collecteurs et balais (Figure 6)

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci.



Collecteur



Balais ou charbons

Figure 6 Collecteur et balais d'une machine à courant continu.

SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT D'UNE MACHINE A CC

(FIGURE 7)

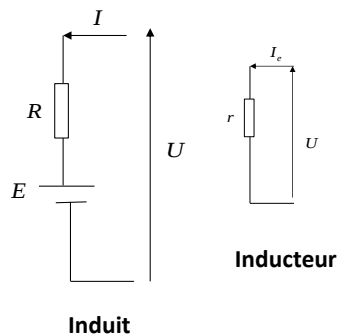


Figure 7 Schéma équivalent d'une machine à courant continu.

LOIS GENERALES DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

Force électromotrice

Nous pouvons obtenir une f.é.m. continue en mettant en série les conducteurs de l'induit et en recueillant cette f.é.m. par deux balais fixes par rapport à l'inducteur et placés sur la ligne neutre. La « ligne neutre » est l'axe de symétrie d'une machine bipolaire, perpendiculaire à une ligne joignant les pôles (Figure 8).

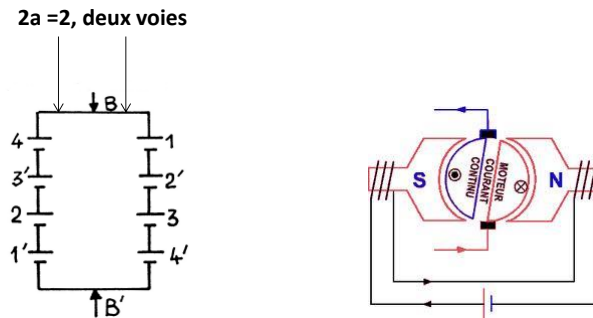


Figure 8 Machine bipolaire avec 2 voies d'enroulement

Entre les balais, 2 trajets ou « voies d'enroulement » existent pour le courant. D'où la formule

$$\text{générale : } E = \frac{p}{a} n \times \phi \times \Omega$$

Où p , a , n , sont respectivement le nombre de pair de pôles, le nombre de pair de voies et le nombre de spires. Ces paramètres sont fixés par construction, et on écrira plus simplement :

$E = k_1 \Omega \phi$ Pour les faibles valeurs de I_e , la relation entre le flux et le courant d'excitation I_e est à peu près linéaire et on peut poser : $E = k_1 k_2 I_e \Omega$ (Figure 9)

Lorsque I_e augmente, le circuit magnétique se sature et la f.é.m. augmente moins fortement.

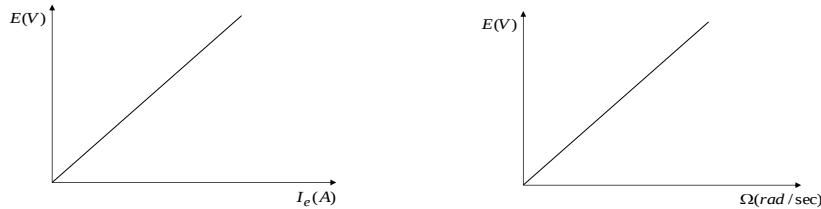


Figure 9 caractéristiques à vide d'une machine à courant continu.

Dans le cas d'un moteur à excitation indépendante I_e fixe, on peut écrire $E = k_\phi \times \Omega$

Bilan des puissances et rendement

Fonctionnement moteur à excitation indépendante

Le moteur reçoit une puissance électrique au niveau de l'induit et l'inducteur. La figure 10 montre le diagramme des puissances.

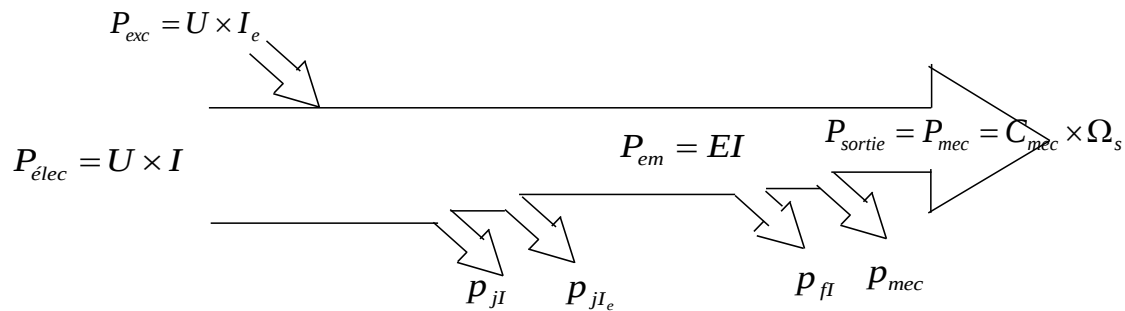


Figure 10 Diagramme des puissances d'une machine à courant continu à excitation séparée.

En entrée :

Circuit induit : $P_{ent} = P_{elec} = U \times I$ Circuit d'inducteur: $P_{exc} = U \times I_e$

En sortie : $P_{sortie} = P_{mec} = C_{mec} \times \Omega$

$$P_{abs} = U \times I + U \times I_e$$

$$P_u = C_u \times \Omega = P_{em} - p_{fI} - p_{mec}$$

Le rendement s'écrira :

$$\eta = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} = \frac{(UI + UI_e) - \sum p}{UI + UI_e} = \frac{(UI + UI_e) - (p_{jl} + p_{jle} + p_{fl} + p_{mec})}{UI + UI_e}$$

Notations :

Pertes joules de l'induit : $p_{jl} = RI^2$ Pertes joules de l'inducteur : $p_{jle} = rI_e^2$

Pertes fer de l'induit : p_{fl} Pertes mécaniques : p_{mec}

Couple électromagnétique

Lorsqu'un courant I circule dans l'induit, il apparaît un couple électromagnétique $C_{em} = k_1 \phi I = k_\phi I$ créé par les forces de Laplace $F_{em} = BLI$ qui s'exercent sur les conducteurs de l'induit.

Avec r rayon de l'induit $C_{em} = F_{em} \times r$ (Figure 11)

Ce couple ne dépend que de I et de l'induction B ou du flux Φ .

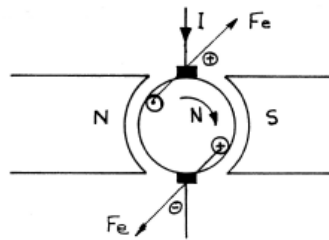


Figure 11 Forces de Laplace s'exerçant sur l'induit d'une machine à courant continu.

$$C_u = C_{em} - c_p \rightarrow c_p = \frac{p_{fl} + p_{mec}}{\Omega}$$

Remarque : pour un moteur à excitation série, on trouve : $C_{em} = k_1 k_2 I^2$

QUESTIONS DE COURS

Q1. Dans une machine à courant continu, pourquoi l'inducteur est-il au stator et non au rotor ?

Q2. A quel niveau la conversion électromécanique se fait dans une machine électrique ?

Q3. Pourquoi chaque fil actif est-il le siège d'une f.é.m. alternative au cours de la rotation ?

Q4. Quelle est la fonction de l'inducteur de la machine ?

Q5. Pour inverser le sens de rotation d'un moteur, que faut-il inverser ?

Exercice 1. Treuil entraîné par machine à courant continu : montée et descente

Un moteur à courant continu à excitation indépendante entraîne un treuil soulevant verticalement une charge de masse M kg suspendue à l'extrémité d'un fil enroulé sur le tambour du treuil, de rayon supposé constant égal à $0,1$ m. La vitesse de rotation du tambour est égale au vingtième de la vitesse de rotation du moteur. L'induit du moteur de résistance intérieure $0,5$ Ohm est connecté aux bornes d'une source d'énergie fournissant une tension réglable de $U = 0$ V à $U_n = 240$ V = tension nominale du moteur.

On donne : $g = 10 \text{ m/s}^2$. On adoptera les hypothèses simplificatrices suivantes :

– rendement du treuil = 1 ;

– négliger toutes les pertes du moteur sauf celle par effet Joule dans l'induit ou dans la résistance de démarrage ;

– négliger la réaction d'induit et la saturation des circuits magnétiques.

1. Le courant inducteur est réglé à sa valeur maximum admissible $I_e = 5$ A. On constate alors que le treuil hisse la charge $M = \frac{4800}{\pi}$ à la vitesse $v = \frac{11\pi}{60}$ m/s alors que la puissance absorbée par l'induit est de $9,6$ kW et que la tension appliquée à l'induit est égale à la tension nominale.

1.1. Calculer l'intensité du courant absorbé par l'induit du moteur.

1.2. Calculer la force contre-électromotrice du moteur.

- 1.3. Calculer la puissance utile du treuil.
- 1.4. Calculer le couple utile du moteur.
- 1.5. Calculer la vitesse de rotation du moteur.

FICHE MEMOIRE A COMPLETER

$$E = k_1 \Omega \phi \quad E = k_1 k_2 I_e \Omega \quad E = k_\phi \times \Omega \quad C_{em} = k_1 \phi I = k_\phi I$$

$$F_{em} = B L I \quad C_{em} = F_{em} \times r \quad C_u = C_{em} - c_p \rightarrow c_p = \frac{p_{fer} + p_{mec}}{\Omega}$$

$$P_{abs} = U \times I + U \times I_e \quad P_u = C_u \times \Omega = P_{em} - p_F - p_{mec}$$

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} = \frac{P_u}{P_u + p_{jl} + p_{jle} + p_{fl} + p_{mec}}$$

CHAPITRE 3 MACHINES SYNCHRONES

La machine synchrone est le plus souvent utilisée en générateur, on l'appelle alors alternateur. Les centrales de production d'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés. Comme toutes les machines électriques tournantes, la machine synchrone est réversible et peut également fonctionner en moteur synchrone (Figure 1).

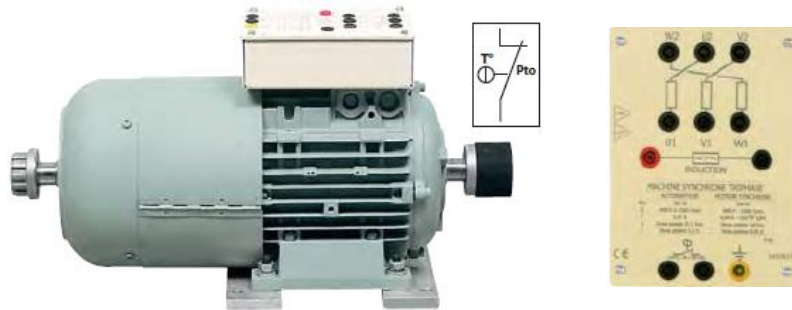


Figure 1 Machine synchrone triphasée

STRUCTURE

Quel que soit sa constitution et son nombre de pôles, une machine synchrone est constituée de deux circuits indépendants :

– Le circuit d'induit ou stator: il est constitué des trois bobinages triphasés, de constitution symétrique, pratiqué sur le stator de façon répartie, et par lesquels transite la puissance électrique de la machine. Deux couplages sont possibles :

Etoile (Y) qui impose une tension simple à chaque enroulement ou triangle (D) qui impose une tension composée à chaque enroulement.

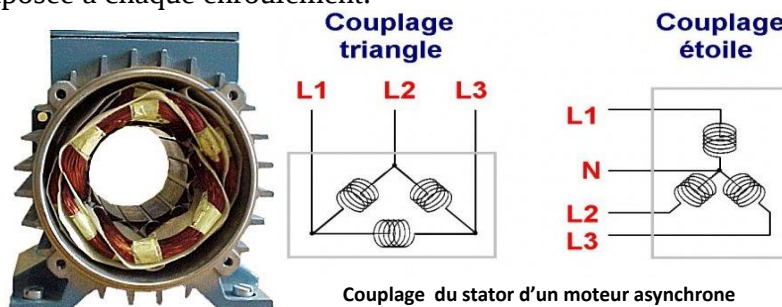


Figure 2 Stator d'une machine synchrone

– Le bobinage d'excitation ou roue polaire: il est constitué d'un bobinage enroulé sur le rotor et traversé par le courant continu I_e « d'excitation ». C'est lui qui permet la création des pôles magnétiques dits « rotoriques » et l'instauration d'un flux donné dans le circuit magnétique. On rencontre trois types de rotor.

Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants :

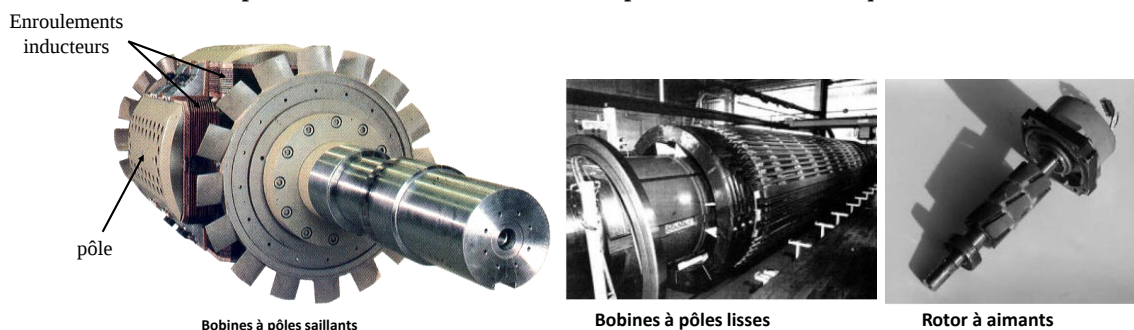


Figure 2 Inducteur tournant d'une machine synchrone

Voici les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice (alternateur) :

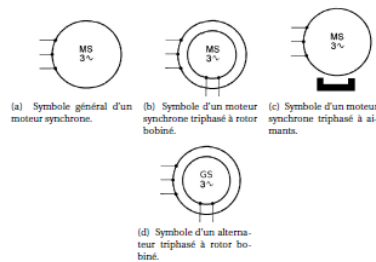


Figure 3 Symboles de la machine synchrone.

PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT EN GENERATEUR

Pour produire l'énergie électrique, une force extérieure fait tourner le rotor. Les enroulements du rotor alimentés en courant continu créent une succession de pôles alternativement nord et sud. Son champ magnétique en tournant, induit une f.é.m. alternative dans les bobines du stator (induit). La vitesse de ce champ tournant donc du rotor est appelée « vitesse de synchronisme » d'où le nom de machine synchrone. (Figure 3).

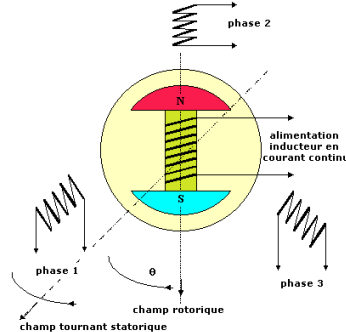


Figure 3 Machines synchrones.

Remarque : Il n'est pas possible de faire démarrer correctement une machine synchrone en connectant ses enroulements du stator directement sur un réseau alternatif comme la machine asynchrone. Elle nécessite moteur auxiliaire de démarrage. Sa vitesse de synchronisme est directement liée à la fréquence de l'alimentation électrique.

Force électromotrice

On peut obtenir une force électromotrice en prenant un induit fixe et un inducteur mobile. Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. E . Cette tension a pour valeur : $E = k_1 \times \phi \times \Omega$

En triphasé le stator comporte trois enroulements ou phases. On obtient trois f.é.m. $e_1(t)$

$e_2(t)$ et $e_3(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $\frac{2\pi}{3}$

SCHEMA EQUIVALENT MONOPHASE D'UN ALTERNATEUR TRIPHASE SYNCHRONE

Le fonctionnement est en régime triphasé équilibré, on étudie uniquement les grandeurs relatives à une phase.

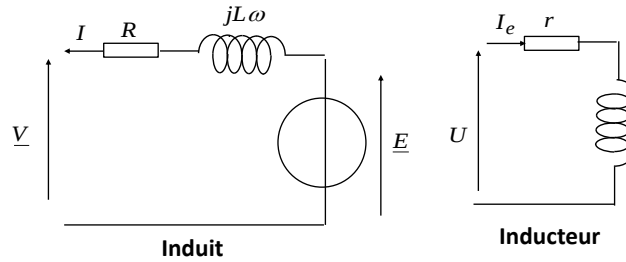


Figure 4 Schéma monophasé équivalent d'un alternateur synchrone

La loi des mailles de l'induit donne : $\underline{E} = \underline{V} + (R + jL\omega) \times \underline{I}$

La figure 5 représente le diagramme de la machine synchrone en négligeant R.

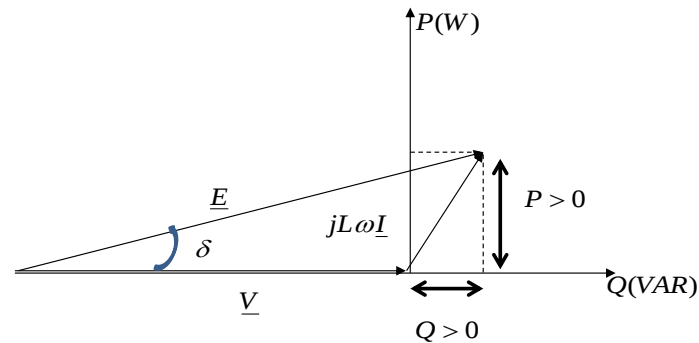


Figure 5 Diagramme de la machine synchrone fonctionnant en alternateur surexcité fournissant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive au réseau.

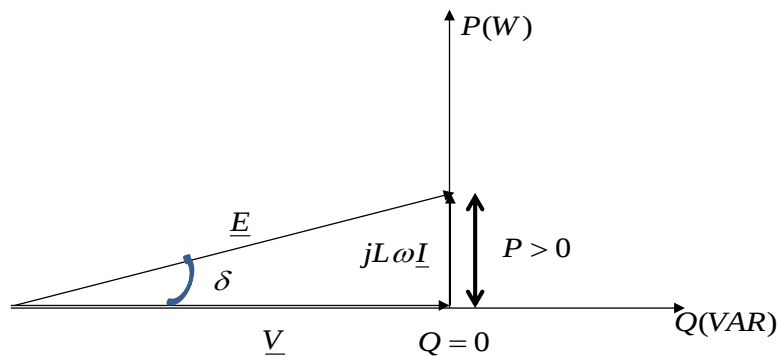


Figure 6 Diagramme de la machine synchrone à l'excitation « normale » fonctionnant en alternateur fournissant que de la puissance active au réseau.

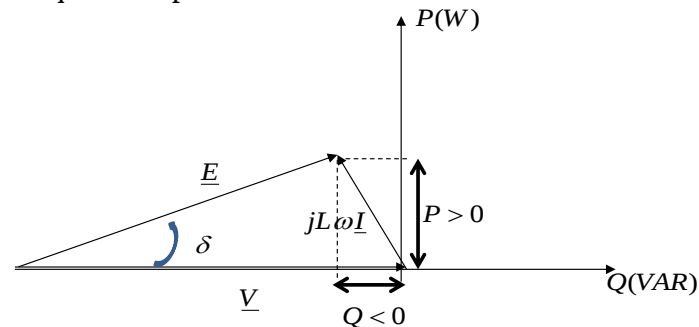


Figure 6 Diagramme de la machine synchrone fonctionnant en alternateur sous-excité fournissant la puissance active au réseau et absorbant de la puissance réactive sur ce même réseau.

Schéma équivalent monophasé d'un moteur triphasé synchrone

Pour étudier le moteur synchrone triphasé, on ne modélise que les grandeurs relatives à une phase.

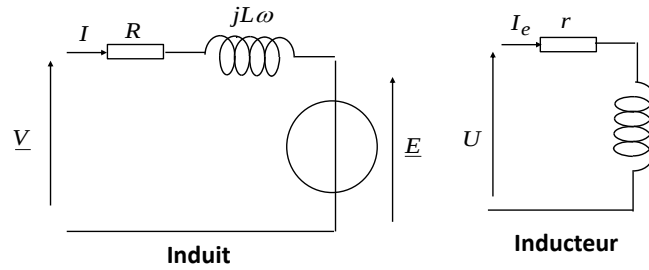


Figure 7 Schéma monophasé équivalent d'un moteur synchrone

La loi des mailles de l'induit donne : $\underline{V} = \underline{E} + (R + jL\omega) \times \underline{I}$

La figure 8 représente le diagramme de la machine synchrone en négligeant R.

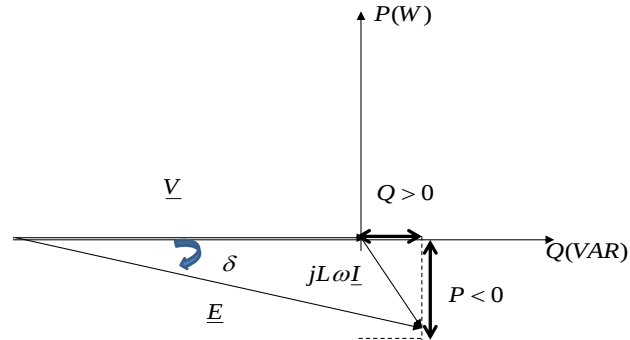


Figure 9 Diagramme de la machine synchrone fonctionnant en moteur surexcité absorbant de la puissance active sur le réseau tout en lui fournissant de la puissance réactive.

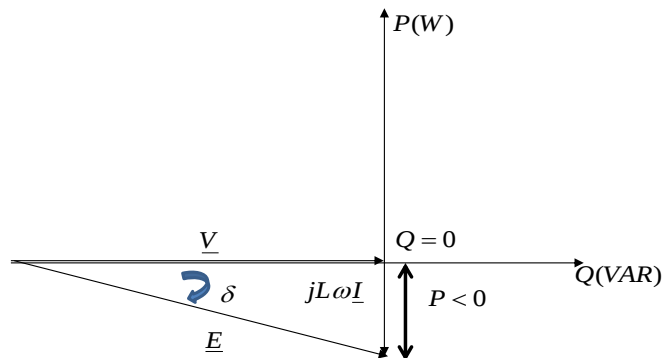


Figure 10 Diagramme de la machine synchrone à l'excitation « normale » fonctionnant en moteur n'absorbant que de la puissance active sur le réseau.

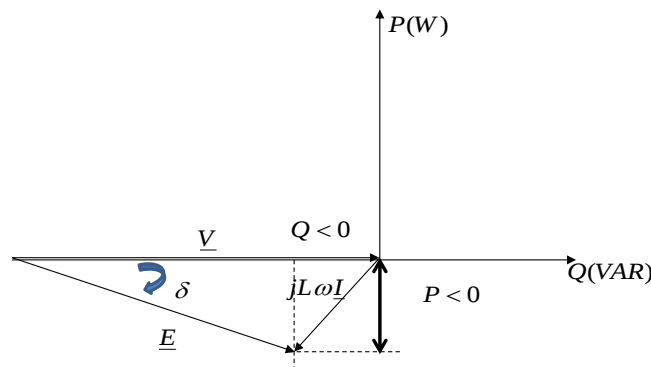


Figure 11 Diagramme de la machine synchrone fonctionnant en moteur sous-excité absorbant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive sur le réseau.

Bilan des puissances et rendement

Fonctionnement alternateur

L'alternateur reçoit une puissance mécanique de la turbine ou du moteur qui l'entraîne. Si elle est à excitation indépendante, le circuit inducteur reçoit une puissance de son alimentation continue. La figure 11a montre le diagramme des puissances

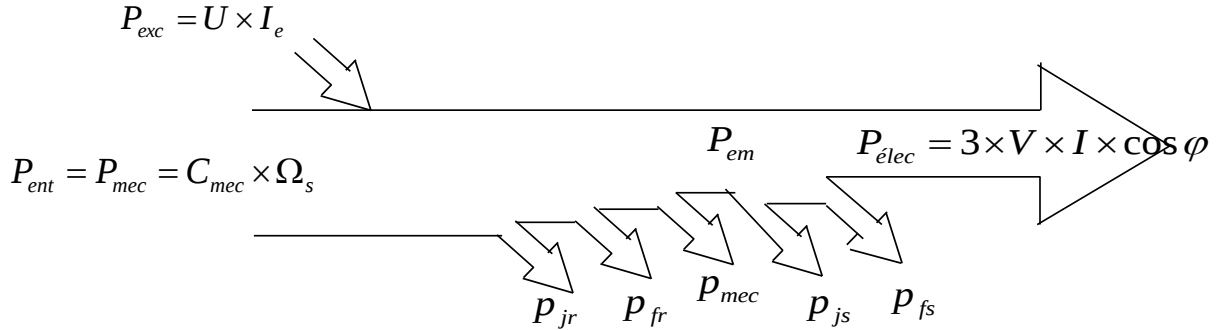


Figure 11a Diagramme de puissances d'un alternateur à excitation indépendante

Fonctionnement moteur

Le moteur reçoit une puissance électrique du réseau. S'il est à excitation indépendante, le circuit inducteur reçoit une puissance de son alimentation continue. La figure 11b montre le diagramme des puissances

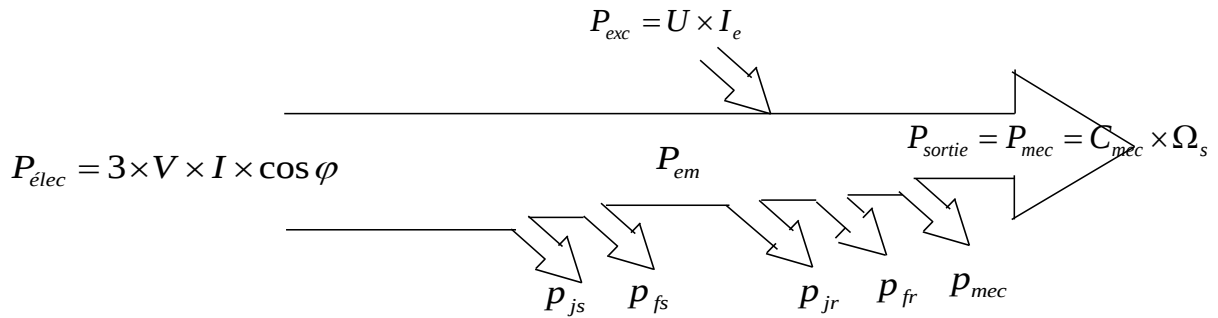


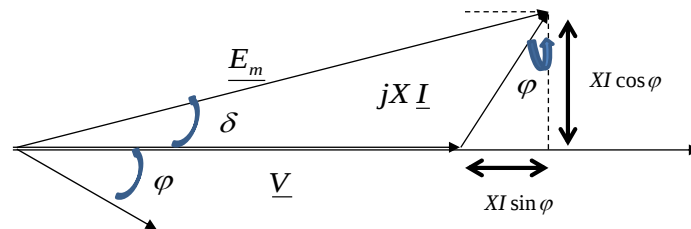
Figure 11b Diagramme de puissances d'un moteur à excitation indépendante

Notations :

Pertes joules au stator : $p_{js} = 3RI^2$; Pertes joules au rotor : $p_{jr} = rI_e^2$

Pertes fer au stator : p_{fs} ; Pertes fer au rotor : p_{fr} ; Pertes mécaniques : p_{mec}

Expression de couple électromagnétique à partir du schéma monophasé équivalent:



$$\begin{cases} E \cos \delta = V + XI \sin \phi \\ E \sin \delta = XI \cos \phi \end{cases} \quad \frac{E \sin \delta}{X} = I \cos \phi$$

La puissance active appelée par la machine : $P = \frac{3VE \sin \delta}{X} = 3VI \cos \phi$

Le couple électromagnétique s'obtient en divisant la puissance active par la vitesse de rotation.

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{3VE \sin \delta}{X \times \Omega_s} \quad \text{Avec} \quad XI \cos \phi = E \sin \delta$$

Rendements

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} = \frac{P_{\text{mec}}}{P_{\text{elec}}} = \frac{C_{\text{mec}} \times \Omega_s}{3VI \cos \varphi}$$

$$\eta_{\text{alternateur}} = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{mec}}} = \frac{3VI \cos \varphi}{C_{\text{mec}} \times \Omega_s}$$

QUESTIONS DE COURS

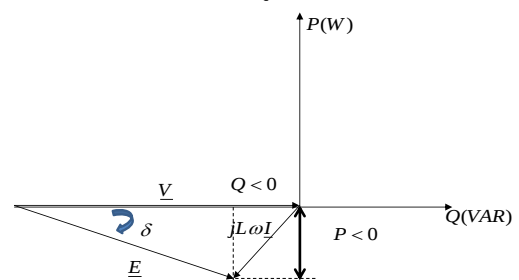
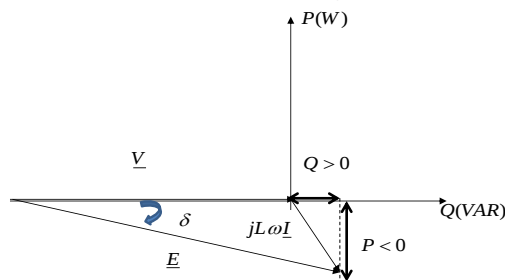
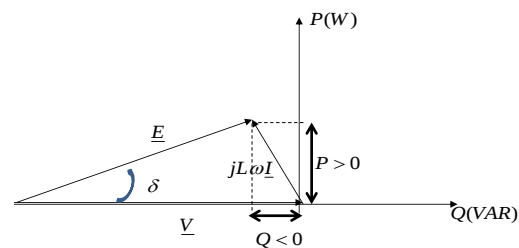
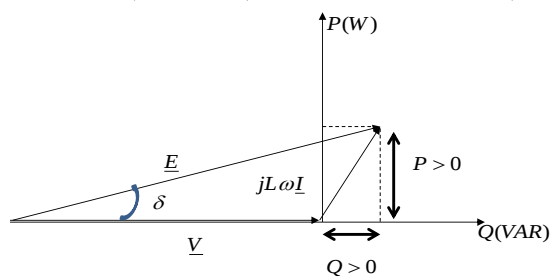
- Q1. Pourquoi un alternateur triphasé a-t-il une puissance massique supérieure à un alternateur monophasé ?
- Q2. Peut-on envisager une machine synchrone tripolaire hexaphasé ?
- Q3. En fonctionnement alternateur autonome, quel réglage doit-on faire pour maintenir une fréquence constante

Exercice n°1. Un alternateur triphasé non saturé a une réactance synchrone constante de $18,5\Omega$ et une résistance négligeable. Il délivre une puissance active de $600kW$ et $U = 3300V$ à vide, avec la même vitesse d'entraînement et le même courant d'excitation la tension est de $E = 5500V$

Calculer le courant par fil de ligne et le facteur de puissance

FICHE MEMOIRE A COMPLETER

$$\underline{E} = \underline{V} + (R + jL\omega) \times \underline{I} \quad \underline{V} = \underline{E} + (R + jL\omega) \times \underline{I}$$



$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P}{\omega} = \frac{3VE \sin \delta}{\frac{\omega}{p} L \omega}$$

CHAPITRE 4 MACHINES ASYNCHRONES

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes. Comme les autres machines, la machine asynchrone est réversible (Figure 1)

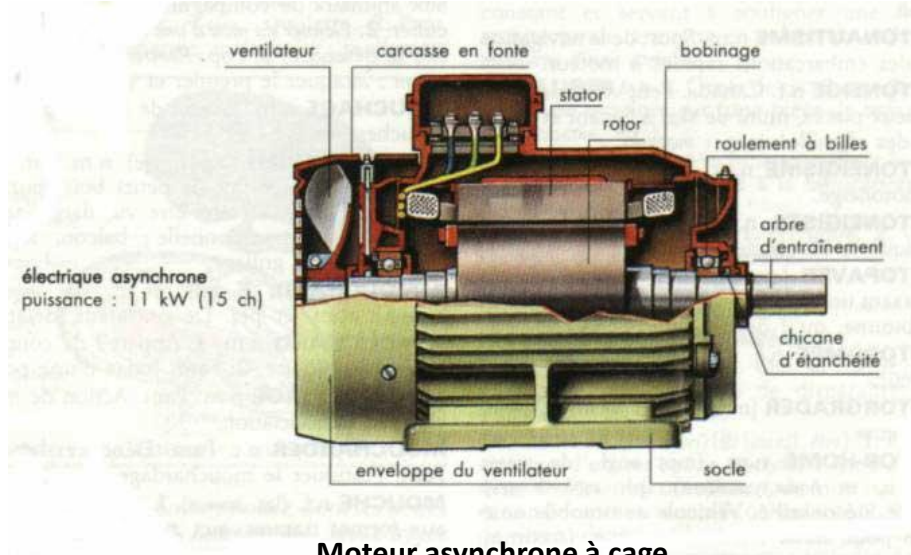


Figure 1 Moteur asynchrone à cage

STRUCTURE

Une machine asynchrone comprend généralement :

– un stator triphasé comportant p paires de pôles par phase, identique à celui d'une machine synchrone. Deux couplages sont possibles :

Etoile (Y) qui impose une tension simple à chaque enroulement ou triangle (D) qui impose une tension composée à chaque enroulement.

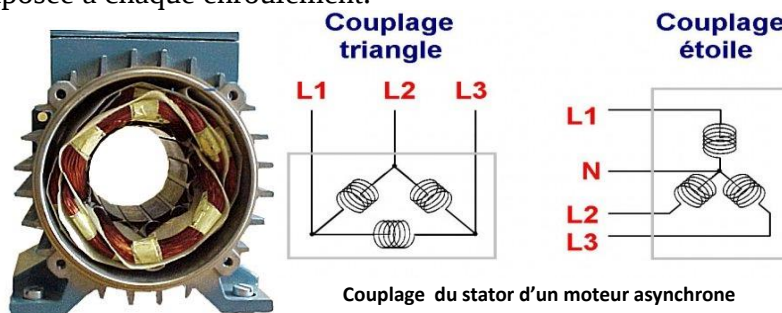


Figure 2 Stator d'un moteur asynchrone

C'est au niveau de la plaque à bornes que l'on peut modifier le couplage de la machine. La figure 3 montre comment effectuer un couplage en étoile ou en triangle grâce aux barrettes de cuivre effectuant la liaison entre les six bornes.

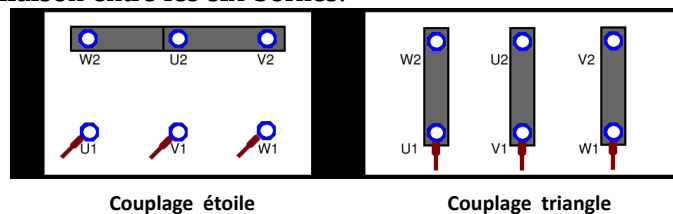


Figure 3 Couplage du stator en étoile ou en triangle d'une machine asynchrone triphasée.

– Un rotor est constitué de conducteurs mis en circuit fermé. On rencontre deux types de rotor :

Rotor bobiné : l'enroulement, semblable à celui du stator, comporte p paires de pôles par phase ; les trois paires sont reliées à trois bagues qui permettent d'insérer un rhéostat dans le circuit du rotor. Ce moteur est aussi nommé moteur à bagues.

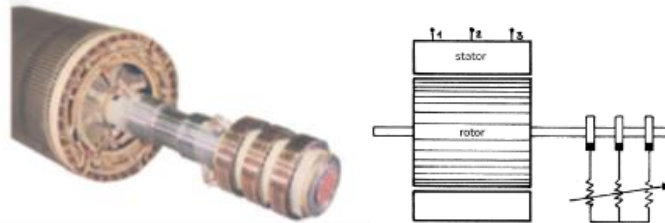


Figure 3 Machine asynchrone à rotor bobiné.

Rotor à cage : le rotor est constitué de barreaux de cuivre ou d'aluminium reliés aux deux extrémités par deux couronnes conductrices. Ce modèle (en forme de cage d'écureuil) peu coûteux et très robuste est le plus répandu.

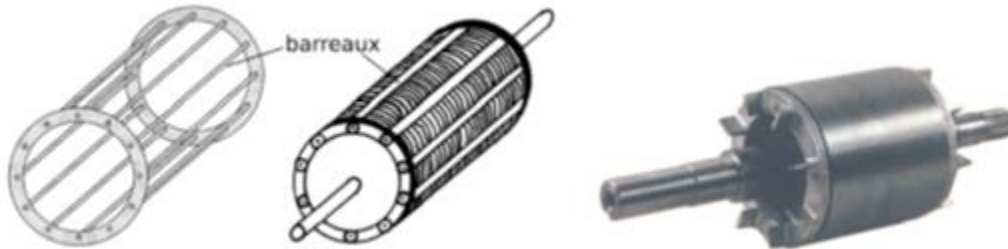


Figure 4 Machine asynchrone à rotor à cage

Voici les deux symboles employés pour représenter la machine asynchrone (Figure 5) :

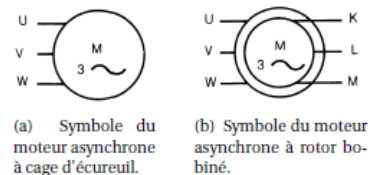


Figure 5 Symboles du moteur asynchrone.

NOTION DE CHAMP TOURNANT

Le champ tournant dans l'espace est le phénomène de base des machines électriques à courant alternatifs. Un ensemble de trois bobines identiques, disposées de manière que leurs axes se trouvent dans le même plan et fassent entre eux un angle de 120° , et parcourues par des courants triphasés décalés entre eux un angle de 120° , produisent un champ tournant à une vitesse égale à la pulsation des courants (Figure 6).

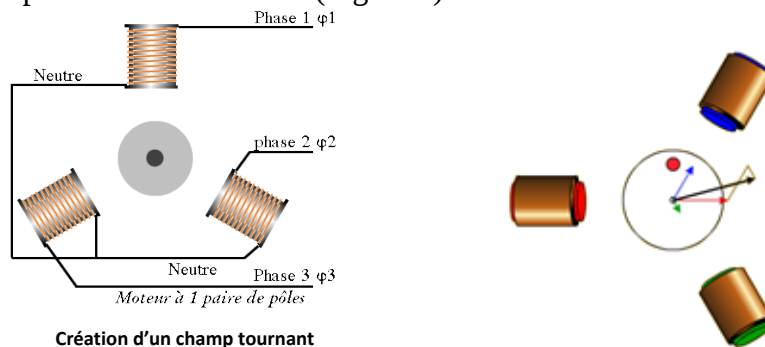


Figure 6 Création d'un champ tournant.

PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Le stator, alimenté par un réseau de fréquence f_s , crée une induction tournante dans l'espace

B_s de vitesse N_s , telle que $N_s = \frac{60 \times f_s}{p}$. Avec N_s vitesse de synchronisme en tr/min, f_s

fréquence du réseau d'alimentation en Hz (50 Hz), et p nombre de pair de pôles.

Supposons le rotor immobile : il est balayé par cette induction $\phi = B_s \times S$ et des forces d'électromotrices sont engendrées dans les conducteurs (loi de Faraday $e = \frac{d}{dt} \phi$).

Comme les circuits rotoriques sont fermés, des courants du rotor prennent naissance. Il apparaît des forces électromotrices dues à l'action de l'induction statorique sur les courants rotoriques. En vertu de la loi de Lenz, ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens des inductions tournantes. Il existe un couple de démarrage, le rotor se met à tourner.

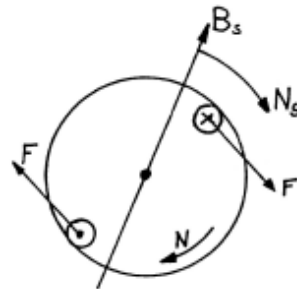


Figure 7 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.

Le rotor va suivre le champ tournant B_s mais il va tourner à une fréquence légèrement inférieure N à la fréquence de synchronisme N_s d'où le nom de moteur asynchrone.

Cette différence de vitesse s'appelle le glissement.

Glissement

L'origine des courants rotoriques réside dans la différence des vitesses N_s et N . On introduit

une grandeur fondamentale, sans dimension, le glissement g définit : $g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$

Notons que :

$N = 0$	$g = 1$ démarrage
$N = N_s$	$g = 0$ synchronisme
$0 < N < N_s$	$0 < g < 1$ (fonctionnement en moteur)
$N > N_s$	$g < 0$ (fonctionnement en génératrice)

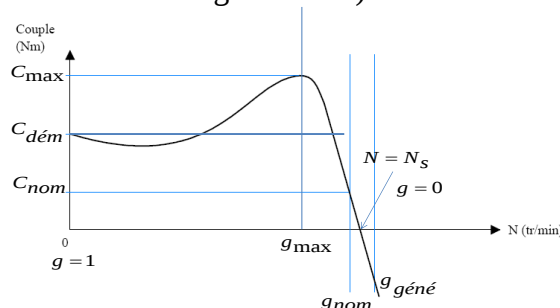


Figure 7 Caractéristique mécanique de la machine asynchrone

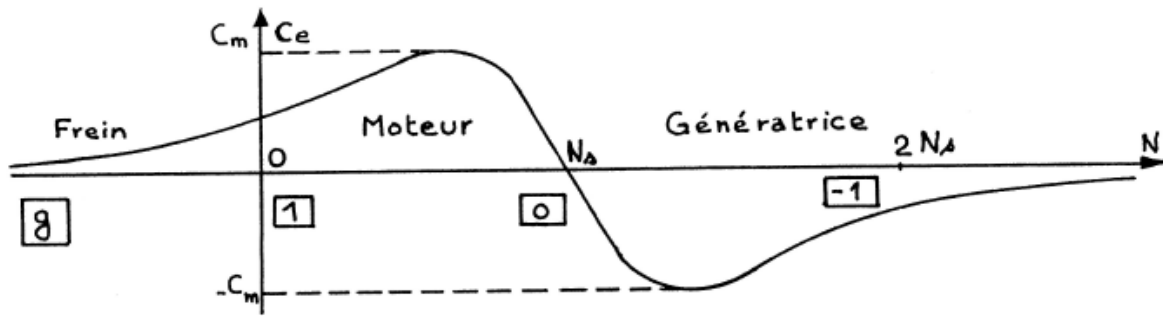


Figure 8 Différents modes de fonctionnement de la machine asynchrone sur la caractéristique mécanique.

Fréquences du rotor

La fréquence des grandeurs rotoriques est proportionnelle au glissement $f_r = g \times N_s$. En général, le glissement sera faible et la fréquence du rotor sera faible elle aussi (quelques hertz). Quelle que soit la vitesse du rotor, les inductions du stator et rotoriques ont toujours la vitesse N_s .

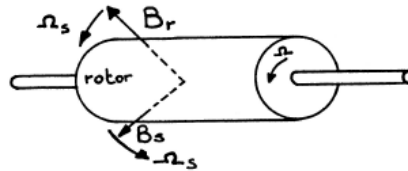


Figure 8 Les champs du rotor et du stator d'une machine asynchrone tournent à la même vitesse.

La formule de Ferraris ($N_s = \frac{60 \times f_s}{p}$) nous permet de calculer les diverses valeurs de vitesse de synchronisme possible. $f_s = 50\text{Hz}$

p (pair de pôle)	1	2	3	4	5
N_s (tr / min)	3000	1500	1000	750	600

Bilan de puissance (Figure 9)

On peut regrouper sur un diagramme les diverses pertes de puissance active du moteur :

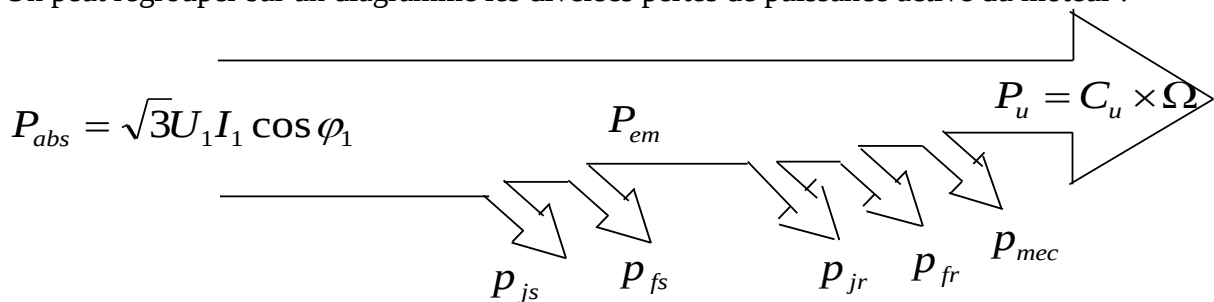


Figure 9 Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.

P_{abs} : Puissance absorbée

P_{js} : Pertes joules au stator

P_{fs} : Pertes fer au stator

P_{em} : Puissance électromagnétique ou puissance transmise au rotor

p_{jr} : Pertes joules au rotor

P_{fr} : Pertes fer au rotor
 p_{mec} : Pertes mécaniques
 P_u : Puissance utile

– Puissance électrique absorbée par le stator (Figure 10): $P_{abs} = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1$

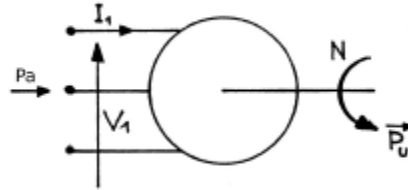


Figure 10 Alimentation du stator d'une machine asynchrone

- Pertes Joule du stator : si r_1 est la résistance d'une phase statorique, alors $p_{js} = 3 \times r_1 \times I_1^2$
- Pertes fer stator: comme pour le transformateur, elles seront liées au carré de la tension p_{FS}
- Puissance électromagnétique P_{em} , c'est la puissance transmise du stator au rotor par les inductions tournantes à la vitesse Ω_s : $P_{em} = C_{em} \times \Omega_s$
- Pertes Joule rotor : si r_2 est la résistance d'une phase du rotor et I_2 le courant du rotor, on aura : $p_{jr} = 3 \times r_2 \times I_2^2$
- Pertes fer rotoriques : elles sont faibles en fonctionnement normal car la fréquence du rotor est petite. On les négligera en pratique devant les pertes joule dans les conducteurs du rotor.
- La puissance mécanique est fournie par le rotor à la vitesse Ω

$$P_{mec} = P_u + p_{mec} = C_{mec} \times \Omega = C_{mec} \times \frac{2\pi \times N}{60}$$

– Les pertes mécaniques p_{mec} correspondent à un couple de frottement $c_f = \frac{p_{mec}}{\Omega}$

– La puissance utile, délivrée sur l'arbre de sortie du moteur, s'écrit en introduisant le couple utile : $P_u = C_u \times \Omega = C_u \times \frac{2\pi \times N}{60}$

On a évidemment: $C_u = C_{mec} - c_f$. L'équilibre dynamique du rotor implique l'égalité des couples C_{em} et C_{mec} . Il en résulte une propriété remarquable du moteur :

$$P_{em} = C_{em} \times \Omega_s = P_{mec} + p_{jr}$$

$$p_{jr} = g \times P_{em} = \frac{g}{1-g} P_{mec}$$

$$P_{abs} = P_u + p_{js} + p_{FS} + p_{jr} + p_{fr} + p_{mec}$$

$$P_{em} = P_{abs} - p_{js} - p_{FS}$$

En pratique, on peut admettre :

- si $N = N_s / 2$, le rendement sera inférieur à 0,5 ;
- si $N = 0,9 \cdot N_s$, le rendement sera inférieur à 0,9.

Il faudra donc, en pratique, limiter le fonctionnement du moteur aux faibles glissements, sinon le rendement devient faible et l'échauffement du rotor important.

SCHEMA EQUIVALENT MONOPHASE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE

Le fonctionnement est en régime triphasé équilibré, on étudie uniquement les grandeurs relatives à une phase. Soit I_1 le courant d'une phase statorique et I_2 celui d'une phase du rotor. Comme pour le transformateur, on peut introduire le courant magnétisant I_{10} correspondant au flux ϕ et ajouter le courant I_{1F} représentant les pertes fer du circuit magnétique : A l'arrêt, la machine se comporte comme un transformateur à champ tournant ($g=1$) (Figure 11)

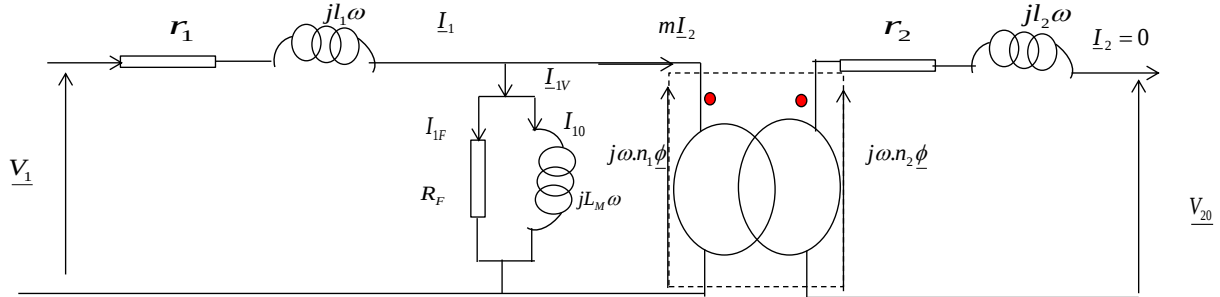


Figure 11 Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à la même pulsation

$$\text{On pose : } E_1 = n_1 \omega \phi \rightarrow E_2 = n_2 \omega \phi \rightarrow \frac{E_1}{n_1} = \frac{E_2}{n_2} = \omega \phi \rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Ces équations conduisent à un schéma équivalent de transformateur dont le primaire est le stator et le secondaire le rotor. En rotation, le rotor est en court-circuit et tourne à une vitesse inférieure à celle du synchronisme. On aura donc le schéma suivant (Figure 12).

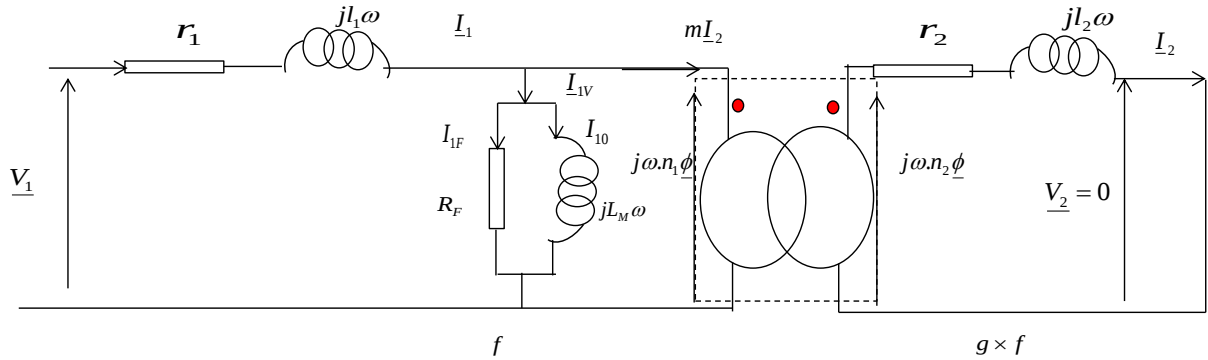


Figure 12 Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à des pulsations différentes

A partir du schéma ci-dessus on peut écrire :

$$\begin{cases} \frac{E_1}{n_1} = \omega \phi \\ \frac{E_2}{n_2} = \omega_r \phi = g \omega \phi \end{cases} \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{g} \frac{n_1}{n_2}$$

Ces équations conduisent à un schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone vu du stator : (Figure 13)

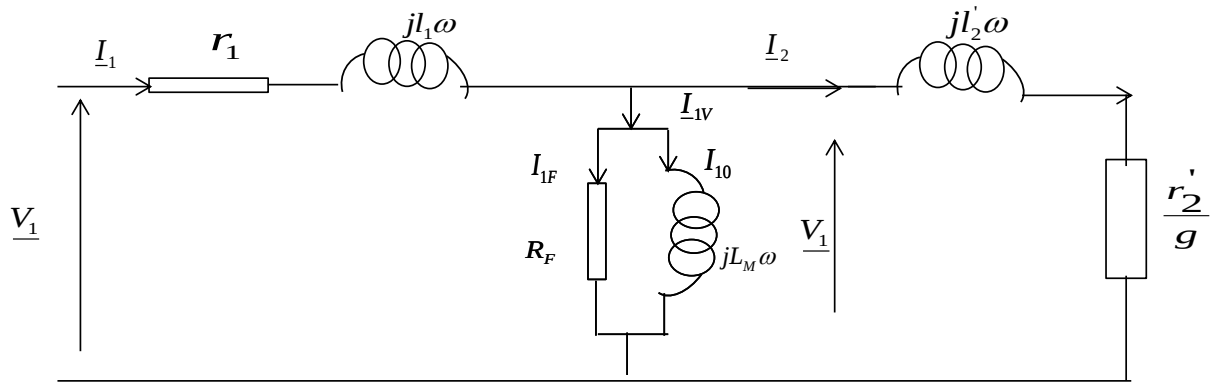


Figure 13 Schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone vu du stator

r_2' : Résistance du rotor vue du stator et $l_2'\omega$ réactance de fuite du rotor vu du stator

Séparation des pertes joules au rotor et la puissance électromagnétique

En faisant apparaître les pertes joules au rotor, on peut écrire : $\frac{r_2'}{g} = r_2' + \frac{1-g}{g} r_2'$

Si r_1 et $l_1\omega$ sont négligés alors on trouve : $\underline{V}_1 = \left(\frac{r_2'}{g} + j l_2'\omega \right) \times \underline{I}_2$ (Figure 14)

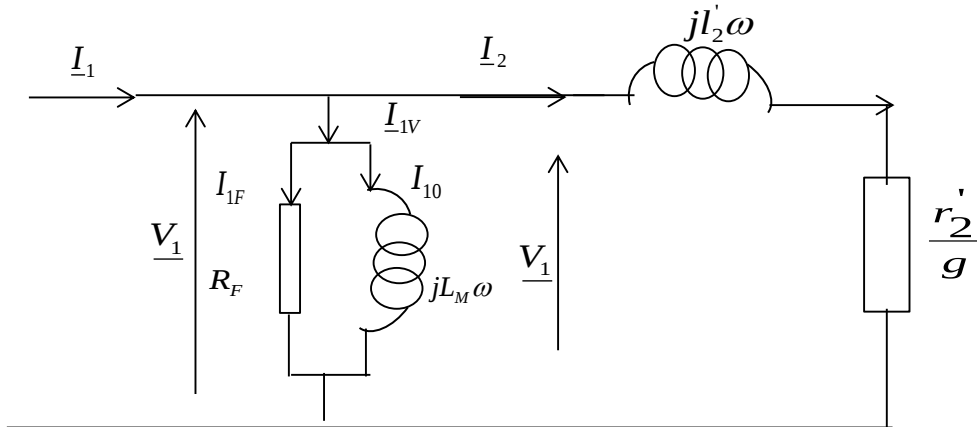


Figure 14 Schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone en négligeant r_1 et $l_1\omega$

Expression de couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} \rightarrow P_{em} = 3 \times \frac{r_2'}{g} \times (I_2)^2 \rightarrow \Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{r_2'}{g} \times (I_2)^2$$

Dans l'expression de couple on remplace le terme $(I_2)^2$: $\underline{I_2} = \frac{V_1}{\left(\frac{r_2'}{g} + j l_2' \omega\right)}$;

$$|\underline{I_2}| = \frac{\frac{|V_1|}{g}}{\sqrt{\left(\left(\frac{r_2'}{g}\right)^2 + (l_2' \omega)^2\right)}} \text{ On trouve : } I_2^2 = \frac{V_1^2}{\left(\left(\frac{r_2'}{g}\right)^2 + (l_2' \omega)^2\right)} = \frac{\frac{V_1^2}{l_2' \omega}}{\left(\frac{r_2'}{g}\right) \left(\left(\frac{1}{g} \frac{r_2'}{l_2' \omega}\right) + g \left(\frac{l_2' \omega}{r_2'}\right)\right)}$$

Il en résulte l'expression de **couple électromagnétique** du moteur :

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{V_1^2}{(l_2' \omega) \left(\left(\frac{1}{g} \frac{r_2'}{l_2' \omega}\right) + g \left(\frac{l_2' \omega}{r_2'}\right)\right)} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{V_1^2}{\left(\frac{r_2'}{g}\right) + \left(\frac{g(l_2' \omega)^2}{r_2'}\right)}$$

Expression de couple au voisinage du fonctionnement nominal

L'utilisation normale du moteur asynchrone correspond aux faibles glissements g ($g < 0, 1$).

$\frac{r_2'}{g} \gg l_2' \omega$ car g est faible. L'expression du courant du rotor devient :

$$|\underline{I_2}| = \frac{\frac{|V_1|}{g}}{\sqrt{\left(\left(\frac{r_2'}{g}\right)^2 + (l_2' \omega)^2\right)}} = \frac{V_1 \times g}{r_2'}$$
 et les calculs étant alors particulièrement simples. Si le

glissement est faible alors on peut écrire : $C_{em} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{r_2'}{g} \times \left(\frac{V_1 \times g}{r_2'}\right)^2$

$$C_{em} = \frac{3p}{p\Omega_s} \times \frac{r_2'}{g} \times \left(\frac{V_1 \times g}{r_2'}\right)^2 = \frac{3 \times g}{r_2' \times \Omega_s} V_1^2 = \frac{3 \times (\Omega_s - \Omega)}{r_2' \times \Omega_s^2} V_1^2 = \frac{3 \times 2\pi(n_s - n)}{(2\pi)^2 \times r_2' \times n_s^2} V_1^2, \text{ avec } n_s \text{ et } n$$

en tr/sec, ou bien

$$C_{em} = \frac{3 \times 2\pi(n_s - n)}{(2\pi)^2 \times r_2' \times n_s^2} V_1^2 = \frac{3 \times 60 \times (N_s - N)}{2\pi \times r_2' \times N_s^2} V_1^2 = \frac{3 \times 60}{2\pi \times r_2' \times N_s^2} V_1^2 \times (N_s - N), \text{ avec } N_s \text{ et } N.$$

N. en tr/min, sachant que $\frac{3 \times 60}{2\pi \times r_2' \times N_s^2} V_1^2 = \frac{90}{\pi \times r_2' \times N_s^2} V_1^2$ est constant en régime établi, il en

résulte $C_{em} = K \times (N_s - N)$. Avec $K = \frac{90}{\pi \times r_2' \times N_s^2} \times V_1^2$

Remarque :

Le couple maximum correspond à un glissement $g_0 = \frac{r_2'}{l_2' \omega}$ $C_{max} = \frac{3p}{\omega} \frac{V_1^2}{2 \times l_2' \omega}$

$$\frac{C_{nom}}{C_{max}} = \frac{g_0}{g_{nom}} \frac{2}{1 + \left(\frac{g_0}{g_{nom}}\right)^2} \rightarrow g_0 = \frac{r_2'}{x_2'}$$

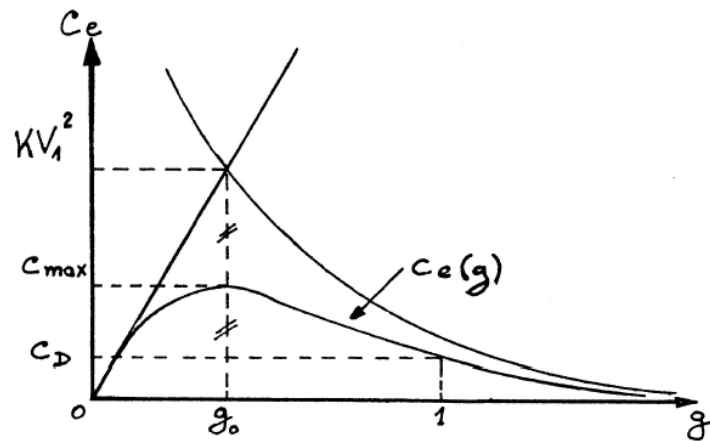


Figure 15 Caractéristique mécanique de la machine asynchrone en fonction du glissement.

Démarrage.

Couple de démarrage : $g = 1$

$$C_{dem} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{V_1^2}{r_2' + \left(\frac{(l_2' \omega)^2}{r_2'} \right)}$$

Les différents procédés de démarrage ont pour objectif fondamental de limiter l'intensité absorbée tout en maintenant les performances mécaniques de l'ensemble « moteur-machine entraînée » conformes au cahier des charges.

Dans le cas du moteur asynchrone cette limitation de courant est obtenue par :

Couplage étoile-triangle.

Autotransformateurs

Insertion dans chacune des phases du rotor bobiné d'une ou plusieurs résistances

Inconvénient : le couple moteur qui est proportionnel au carré de la tension est réduit dans le même rapport.

Action sur la fréquence

On peut faire varier la vitesse en alimentant le moteur sous une fréquence f variable au moyen d'un cyclo convertisseur ou d'un onduleur autonome. C'est le meilleur moyen d'obtenir une vitesse variable

Freinage

– Si on inverse deux phases au stator pour obtenir un champ tournant en sens inverse de la rotation du rotor, on obtient un couple de freinage.

– On peut aussi injecter du courant continu dans les enroulements du stator. On crée un champ de direction fixe dans la machine, le rotor est freiné par un couple d'autant plus élevé que N est importante

MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

D'après le théorème de Leblanc, un enroulement monophasé produit deux inductions tournantes de vitesse $\pm p\Omega_s$

Le moteur ne démarre pas seul, il faut le lancer dans un sens ou dans l'autre. Pour lancer le moteur, on utilise une seconde phase, comportant le même nombre de pôles, placée en quadrature dans l'espace par rapport à l'autre et alimentée par un courant déphasé par un

condensateur qui fait démarrer le rotor. Un interrupteur centrifuge peut couper cette phase auxiliaire lorsque le rotor a atteint une certaine vitesse.

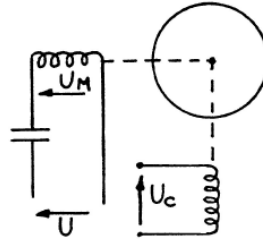


Figure 16 Schéma de principe d'une machine asynchrone monophasée

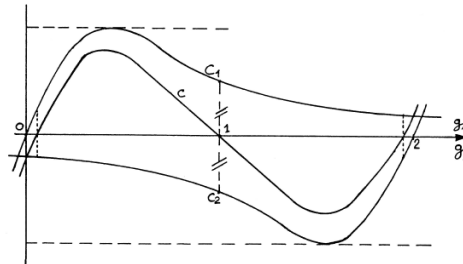


Figure 17 Les deux couples créés par une machine asynchrone monophasée en fonction du glissement.

QUESTIONS DE COURS

Q1. Donner la définition des grandeurs nominales d'une machine électrique

Q2. Citer les deux conditions pour la création de couple électromagnétique

Q3. Que se passe-t-il si $N_s = N$?

Q4. A partir des plaques signalétiques suivantes, déterminer le nombre de paires de pôles des moteurs correspondants:

$f = 50\text{Hz}$, $N = 1440\text{tr/min}$

$f = 50\text{Hz}$, $N = 920\text{tr/min}$

$f = 50\text{Hz}$, $N = 2800\text{tr/min}$

Q5. L'ordre de grandeur du glissement nominal d'une machine synchrone est:

Inférieur à 10%

Supérieur à 10%

Q6. Comment peut-on inverser le sens de rotation d'un moteur asynchrone?

Exercice 1. Un moteur asynchrone triphasé, à rotor en court-circuit, possède des enroulements du stator hexa polaires branchés en étoile. Sa plaque signalétique porte les indications suivantes : tension d'alimentation : 440 V, 60 Hz ; puissance utile : 3,7 kW ; vitesse : 1140 tr/min ; $\cos \varphi = 0,8$

À la charge nominale le moteur absorbe un courant en ligne d'intensité 6,9 A. La résistance, mesurée à chaud, entre deux bornes du stator est de $0,9\Omega$. Au démarrage, le moteur développe un couple utile de 85 Nm.

On considérera la caractéristique mécanique $C = f(N)$ comme une droite dans sa partie utile et on négligera les pertes fer rotor ainsi que les pertes mécaniques et par ventilation (le couple utile sera donc égal au couple électromagnétique).

1. Calculer la vitesse de synchronisme, le glissement, la puissance absorbée au régime nominal et le couple utile nominal développé.

2. Calculer les pertes fer au stator et les pertes Joule au rotor.

FICHE MEMOIRE A COMPLETER

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{V_1^2}{\left(\frac{r_2'}{g}\right) + \left(\frac{g(l_2'\omega)^2}{r_2'}\right)}$$

$$P_{em} = 3 \times \frac{r_2'}{g} \times (I_2)^2 = 3 \times \frac{V_1^2}{\left(\frac{r_2'}{g}\right) + \left(\frac{g(l_2'\omega)^2}{r_2'}\right)}$$

CHAPITRE 5. LES CRITERES DE CHOIX D'UN MOTEUR

QUELLE TECHNOLOGIE DE MOTEUR : ÉLECTRIQUE OU THERMIQUE ?

Le choix de la technologie utilisée dépend de l'utilisation :

- Utilisation sédentaire : Accès facile à une alimentation électrique : le moteur électrique sera choisi;
- Utilisation embarquée : Stockage de l'électricité difficile, recharge longue, autonomie recherchée : le moteur thermique sera choisi (transports);
- . Concernant le transport, il y a des exceptions : le ferroviaire : généralisation des moteurs électriques grâce à l'alimentation des caténaires et aux directions définies (ce qui n'est pas vrai pour l'automobile);
- . Émergence des véhicules automobiles hybrides : association d'un moteur thermique et d'un moteur électrique. Permet de concilier les avantages des deux moteurs. Apport du moteur électrique lors des démarrages et des reprises (demande de fort couple).

Comparaison Moteur électrique / Moteur thermique (tableau 1)

	Moteur électrique	Moteur thermique
Rendement	Plus Les rendements des moteurs électriques dépassent les 80%	Moins Les rendements des moteurs thermiques atteignent au maximum 50%
La densité d'énergie	Moins Les meilleures batteries : 1 kWh/l Les plus utilisées : 0.1 kWh/l	Plus La densité d'énergie du gasoil 36000kJ/l soit 10 kWh/l
Le couple moteur	Plus Pour une puissance utile de 70kW Moteur électrique peut fournir 400 Nm, c.à.d. un couple max dès les vitesses faibles ou nulles	Moins Pour une puissance utile de 70kW Moteur thermique peut fournir un couple de 100 Nm, c.à.d. couple max à proximité de sa vitesse maximale
La réversibilité	Plus Fonctionnement en mode moteur ou génératrice	Moins Le moteur thermique en fonctionnement génératrice qui produirait du carburant n'existe pas
Le prix d'énergie	Egale Prix du kWh faible environ 0,11€/kWh, stable	Egale Prix du gasoil : 1 – 1,5 €/l (0,1-0,15 €/kWh), instable
Robustesse	Plus Mouvement de rotation créé directement dans la machine couple constant) Peu de frottement-	Plus Mouvement de rotation créé à partir d'un mouvement de translation (couple non constant) Frottements importants

Tableau 1. Comparaison Moteur électrique / Moteur thermique

LES CRITERES DE CHOIX D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

Le choix d'un moteur asynchrone et de son mode de démarrage dépendent de la puissance installée du réseau d'alimentation (qui définit l'appel du courant admissible).

La chute de tension au démarrage doit être $\leq \pm 5\%$ de la tension réseau.
La tension d'alimentation du moteur doit être compatible avec celle du réseau.

Le moteur asynchrone doit être choisi pour fonctionner à puissance nominale, c'est à cette puissance que le rendement du moteur et le $\cos\phi$ sont les meilleurs

Le démarrage d'un moteur asynchrone ne peut avoir lieu que si le couple moteur est à chaque instant supérieur au couple résistant de la machine à entraîner. (Le couple résistant d'une machine définit l'effort que la charge mécanique oppose au maintien de sa mise en mouvement. Il s'exprime en Newton mètre (Nm)).

Couple résistant, puissance et réseau constituent les facteurs principaux pour le choix d'un moteur asynchrone triphasé et son mode de démarrage.

Remarque : En critère de choix on ajoute en plus l'inertie ?

L'inertie est une résistance des objets pesants au mouvement qui leur est imposé. Elle est d'autant plus importante que la masse de la charge est grande et s'oppose à la mise en mouvement.

Elle est caractérisée par le moment d'inertie J , qui s'exprime en kg/m^2 .

L'inertie définit donc le couple nécessaire pour mettre en mouvement d'une masse m .

I. CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE ENTRAINÉE

-Moment de giration MD^2 : il est équivalent au moment d'inertie et correspond à l'inertie du rotor. Il intervient dans les phases de démarrage et d'arrêt du moteur.

Exercice 1.5. On se propose d'étudier une pompe centrifuge à axe horizontale dont les caractéristiques sont les suivantes : Débit = 110 l/sec. Hauteur manométrique totale : 4 m. MD^2 sur l'arbre à 1500 tr/min : 4,31 kg.m^2 . Fonctionnement prévisionnel : 4500 h/an. 40.000 cycles en service S4

Calculer le moment d'inertie de la pompe centrifuge J_{pompe} à 1500 tr/min

Moment d'inertie J_{pompe} à 1500 tr/min

-Courbe du couple résistant C_r : il est dû au frottement mécanique, par exemple les paliers, mais aussi lorsque le moteur est en charge et qu'il doit vaincre le couple résistant au démarrage.

Donner le type de couple résistant de la machine entraînée. Machine centrifuge,

-Puissance nominale d'entraînement P_e : elle est en rapport avec l'ensemble des composants du moteur en particulier l'axe (clavette, diamètre de l'axe).

Calculer la puissance d'entraînement P_e

-Fréquence de rotation : elle est régie par le nombre de paires de pôles et la fréquence du réseau (50 Hz en France). $N_s = 1500 \text{ tr/min} \rightarrow 2p = 4$

-Position de l'axe B ou V : la mécanique intérieure est conçue soit pour un axe vertical ou un axe horizontal. « Par exemple, pour un moteur conçu pour être posé horizontalement, en cas de pose verticale les roulements cassent à cause du poids. »

Forme de fixation : B3 Axe horizontale

-Type de service S : il est en rapport avec l'échauffement des enroulements lors des périodes de marche et d'arrêt du moteur. . Service intermittent à démarrage.

-Facteur de marche k_m : Il est lié au type de service, et donc de l'échauffement des enroulements du moteur qui risquent de surchauffer. $k_m = \frac{t_s(h/j)}{24h / \text{jour}}$

$t_s(h/j)$: Nombre d'heures par jour. $t_s(h/j) = \frac{4500 \times h}{250 \times j} = 18h/j$. 250 jours de fonctionnement

par an $k_m = \frac{t_s(h/j)}{24h / \text{jour}} = \frac{18}{24} = 75\%$.

-Conditions d'utilisation : elles intègrent l'altitude, la température ambiante. « Par exemple, si la température ambiante est élevée, les enroulements moteur montent plus haut et plus vite en température pouvant causer la casse du moteur. Pour l'altitude, si l'on imagine une très forte altitude (montagne), la ventilation du moteur sera mauvaise car l'air se fait rare en hauteur, il s'en suit donc une surchauffe si l'on pousse le moteur au maximum »

Pour $t_a = 50^\circ C \rightarrow \frac{k_t}{k_a} = 0,9$ et pour une altitude < 1000 m ; $k_a = 1$

Correction de la puissance P_e en tenant compte de k_t , k_a et k_n

$k_n = \frac{n_s}{n} \cong 1 \rightarrow P_m = P_e \times \frac{k_n}{k_t \cdot k_a} = 7,2 \times \frac{1}{0,9 \cdot 1} = 8kW$, Après correction $P_m = 8kW$: Puissance

minimale. Durée de vie : $P_m = 8kW \rightarrow d = \frac{10^5 h}{4500h/an} = 22.ans$ Classe B. Sur catalogue on trouve $P_m = 9kW$. Niveau sonore environ 70 dB (bruit d'une conversation courante)

II. Alimentation électrique :

-Tension disponible U_{nom} : elle correspond à la tension entre phase.

Elle est directement liée à la création du champ magnétique permettant la rotation du rotor.

$U = 400V$; Variations de tension négligeable

-Pointe de courant admissible I_p : les enroulements doivent pouvoir supporter une certaine pointe d'intensité, par exemple au démarrage, ou à un problème quelconque.

Pointe de courant : $I_p = 100A$ (cahier de charge) ; $I_{pmax} = 60A$ (Fournit par le constructeur du moteur). $I_{pmax} < I_p \rightarrow I_{pmax} < 100A$ Condition de démarrage remplie

-Variation de tension U'/U_n : on peut imaginer une baisse de tension sur le réseau qui induirait une perte de couple du moteur ($C_e = (3pV^2/w) \cdot (g/r^2)$) suivi d'un arrêt du moteur qui n'arrive plus à entraîner la charge. Cela peut avoir de grave conséquence sur une chaîne de production, par exemple.

Variations de la tension négligeable (Cahier des charges), $0,95 \times 400 \leq U \leq 1,05 \times 400$

-Fréquence d'alimentation f : elle est liée à la fréquence de rotation qui elle-même est liée au nombre de paires de pôles. « Une mauvaise fréquence d'alimentation ne pourrait pas faire tourner le moteur ou bien l'endommagerait. »

-Chute de tension admissible ΔU : idem que pour la variation de tension, le moteur doit pouvoir maintenir un certain couple afin de ne pas décrocher.

$U = 400V \rightarrow \Delta U = 32V$ Type de raccordement B, $\cos \varphi = 0,8$

-Caractéristique de la ligne alimentant le moteur : elle doit correspondre aux caractéristiques du moteur indiquées sur la plaque signalétique afin d'alimenter correctement les enroulements du stator pour faire fonctionner le moteur. Étoile ou triangle

III. Eléments de choix du moteur :

-déterminer l'indice de protection IP : il sert par exemple à définir le niveau d'étanchéité de la carcasse si le moteur est implanté en milieu humide ou bien encore contre la poussière si le moteur se situe dans un milieu sale.

IP23, IK07 local de pompes

-Déterminer la classe des isolants : elle permet au moteur d'entraîner une charge plus importante malgré une température des enroulements élevée. Classe B

Le moteur choisi indique :

-Les côtes d'encombrement : elles servent à avoir les dimensions du moteur (la carcasse), cela permet d'effectuer un choix de l'emplacement du moteur, il faut que le local qui l'accueille ne soit pas trop petit pour des problèmes de refroidissement, par exemple.

-Les côtes de fixation : elles permettent de connaître les dimensions des pattes de fixation du moteur

-Les grandeurs mécanique et électrique : elles régissent les différents choix de couplages, de tension/courant, de la fréquence réseau etc... pour faire fonctionner le moteur dans de bonnes conditions.

Surclassement $P_{mot} = \frac{P_m}{0,9} = \frac{9}{0,9} = 10kW$

Pas de moteur de 10 kW sur le catalogue, on choisit un moteur de 11kW Hauteur d'axe : 160 mm

Le moteur LS 160M de 11kW convient

Moteur fermé standard, carcasse en aluminium, rotor à cage type LS160M IP55 B3

11kW;230 / 400;50Hz;

$$I_n = 22A; \frac{C_d}{C_n} = 2,1; \frac{I_d}{I_n} = 5, N_n = 1440tr / min; \cos \varphi = 0,87$$

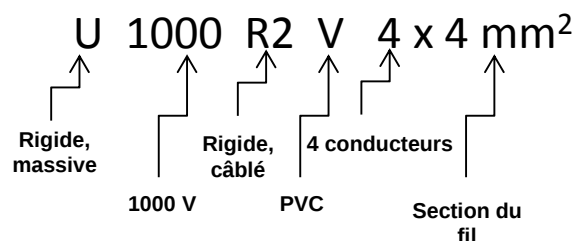
$$C_n = 37Nm; C_r = 44Nm; J_{moteur} = 0,05375Kgm^2; \eta = 0,89; m = 80kg$$

Démarrage retenu

Démarrage étoile-triangle

$$I_{dy\Delta} = 37A; C_{dy\Delta} = 51Nm; C_{rd} = 9Nm; N_c = 1275tr / min; t_d = 4,9sec$$

Câble retenu



Volume du local Q

$$P_{nom} = 11kW; \eta = 0,87$$

$$Q = 0,2 \times P_{nom} \times \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = 0,2 \times 11 \times \left(\frac{1}{0,87} - 1 \right) = 0,33m^3 / h$$

Le volume du local doit être tel que le renouvellement d'air $Q = 0,33m^3 / h$ soit suffisant pour assurer le fonctionnement normal du moteur

Exploitation Courbe de couples (Couple moteur et couple résistant)

Pour que le moteur entraîne une machine, il lui faut un couple de démarrage.

Celui-ci doit d'une part décoller la masse (de moment d'inertie J) de la machine et d'autre part vaincre le couple résistant relatif à la machine.

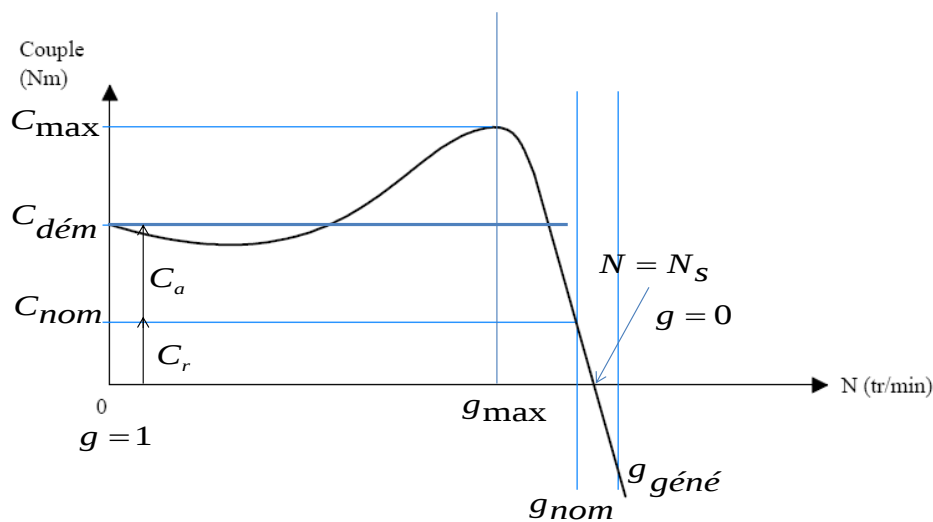
On désigne par C_a le couple d'accélération (qui n'existe que pendant la mise en vitesse de la masse d'inertie J) et C_r le couple résistant de la machine (qui se maintient durant tout le fonctionnement du moteur)

Ainsi le Couple de démarrage C_d peut se calculer : $C_d = C_a + C_r$

Courbe de Couple d'un moteur asynchrone

Couple moteur (Démarrage direct)

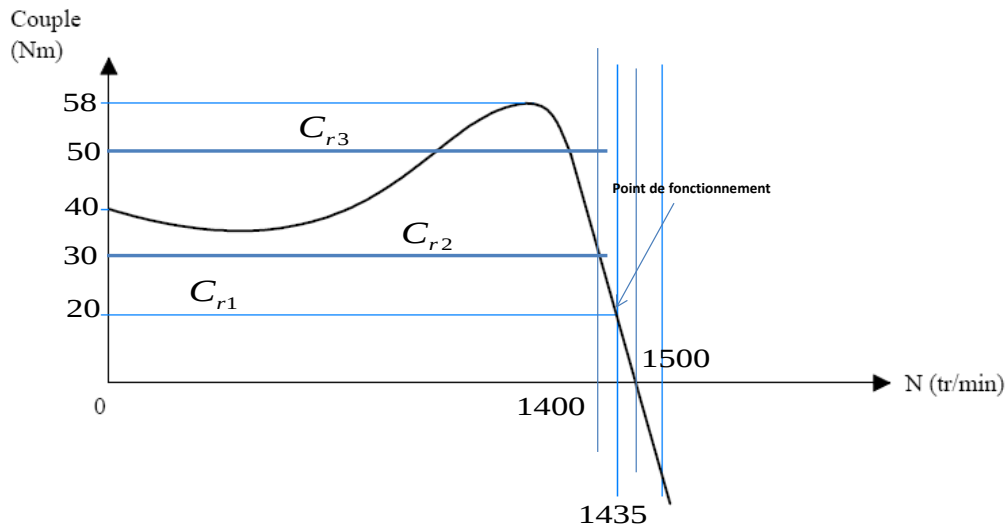
Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominal.



Couples moteur et résistant en fonction de la vitesse

Exercice n°1

Sur la figure ci-dessous indiquer les points :



C_d : couple de démarrage (à $N=0$) et C_{max} : Couple moteur max

$C_d = 40 Nm$; $C_{max} = 58 Nm$

En observant l'allure du couple résistant, quelle application réalise-t-on ? Levage

Donner la valeur de C_{r1} : $C_{r1} = 20 Nm$

Le moteur démarre-t-il ? OUI, $C_d > C_{r1}$; $C_d(40) > C_{r1}(20)$

Quel point de la figure permet de dire que le démarrage est fini ? $C_d = C_{mec}$, point de fonctionnement.

En ce point (régime établi), à quoi est égal C_a et N ? $C_a = 0 Nm$, $N = 1435 tr/min$

Que vaut le couple moteur ? $C_{mec} = 20 Nm$

C_{r1} représente une charge équivalente à 500Kg

Représenter sur la figure C_{r2} pour une charge de 750Kg

Le moteur démarre-t-il ? OUI, $C_d > C_{r2}$; $C_d(40) > C_{r2}(30)$

A quelle vitesse tourne le moteur dans ces conditions en régime établi ? 1400 tr/min

C_{r3} représente une charge de 1,25 tonne, représenter C_{r3}

Le moteur démarre-t-il ? NON, $C_d < C_{r3}$; $C_d(40) < C_{r3}(50)$

Exercice 2.5 Le PDG de la société où vous œuvrez décide d'acheter une nouvelle machine qui requiert 50 chevaux (HP) de puissance continue. Bien sûr, l'alimentation de l'usine [575V, 50Hz, 3ph] peut facilement supporter cette addition grâce à la capacité excédentaire que vous aviez incluse lors de la construction. Vos notes de travail révèlent que votre charge actuelle est de 365kW avec un facteur de puissance de 0.7 en retard et que vous êtes sous pression depuis un bon moment pour monter le facteur de puissance à 90%.

Les données et propositions suivantes vous sont fournies par un entrepreneur électricien :

Option n°1 : moteur asynchrone plus condensateurs.

Option n°2 : moteur synchrone (facteur de puissance=100%) plus condensateurs.

Option n°3 : moteur synchrone (facteur de puissance=80% en avance) plus condensateurs.

Un moteur asynchrone coûterait 1250€; un moteur synchrone avec un facteur de puissance de 100% (incluant le redresseur) coûterait 1885€; un moteur synchrone avec un facteur de puissance de 0,8 (redresseur inclus) coûterait 2006€; le rendement de tous ces moteurs est de 88%; le moteur asynchrone a un facteur de puissance de 0,89 à charge nominale; le coût des condensateurs à 575V est de 22€ le k VA. Le coût d'installation sera de : 9% du prix d'achat pour le moteur asynchrone; 12% du prix d'achat pour les moteurs synchrones; 1,10€/k VA pour les condensateurs.

Considérant que les trois options ont une durée de vie identique et que les condensateurs sont disponibles en groupe de 5kVA, quelle solution est la plus économique?

FICHE MEMOIRE A COMPLETER

CHAPITRE 6. INTRODUCTION A L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Qu'est-ce que c'est « l'Electronique de Puissance »

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet l'étude de la **conversion statique** d'énergie électrique.

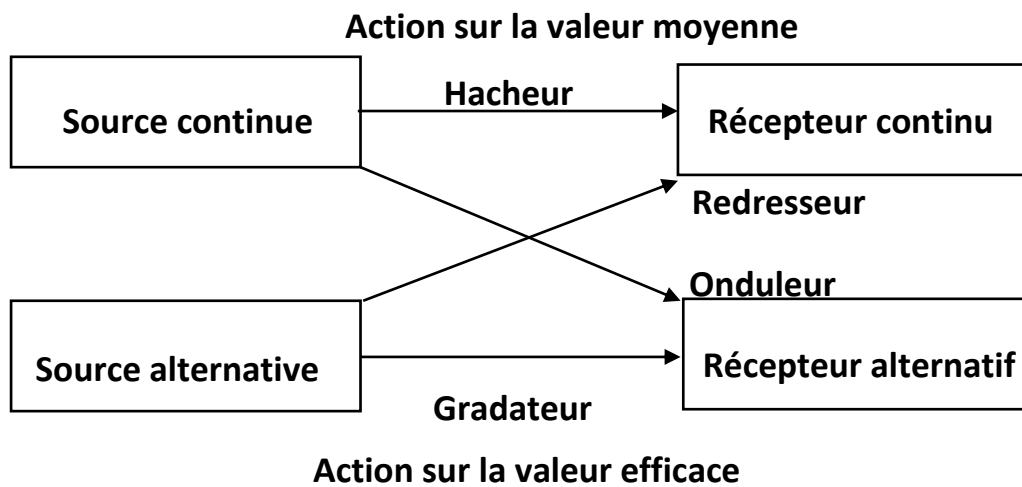
Quel dispositif permet de réaliser la **conversion statique** ?

La conversion statique est réalisée par des **convertisseurs statiques**

Nécessité de conversion de l'énergie

Les différents réseaux électriques industriels alimentent de nombreux actionneurs. Cette énergie apparaît sous deux formes : alternative ou continue.

Suivant le type d'actionneur, il est nécessaire d'adapter la forme de l'énergie fournie par le réseau. Les différentes possibilités apparaissent à la figure ci-dessous.



L'électronique de puissance est l'utilisation en électrotechnique des semi-conducteurs de puissance dont les trois principaux sont : la diode, le thyristor et le transistor

L'électronique de puissance permet de remplacer les transformations d'énergie effectuées autrefois par des groupes de machines tournantes ;

- Le redresseur à diodes est équivalent à la dynamo
- Les redresseurs contrôlés sont analogues à un groupe moteur asynchrone /courant continu
- Les gradateurs remplacent les autotransformateurs à prise variable ou à curseur ;
- L'onduleur autonome est analogue à un groupe moteur à courant continu / alternateur ;
- Le hacheur, est analogue à un rhéostat variable ou un relais vibreur

Nous distinguerons trois composants qui sont :

La diode

• Le thyristor

• Le transistor

LA DIODE

En électronique de puissance, on ne prendra en compte que la diode à jonction utilisée comme diode de redressement

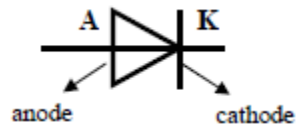


Figure 1. Symbole d'une diode



Figure 2. Sens direct la diode est passante Sens inverse : la diode est bloquée
Les trois critères principaux de choix d'une diode sont :

- I_0 le courant direct moyen
- V_{RRM} la tension inverse de crête répétitive
- Le type de boîtier

Quelques types de boîtiers :

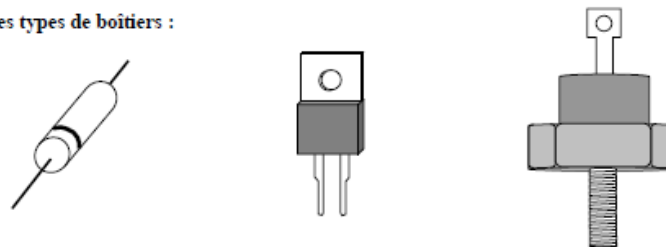


Figure 3. Quelques types de boîtiers d'une diode

Exercice1.6: Quelle est la caractéristique $I_{AK} = f(V_{AK})$ d'une diode idéale en convention récepteur ? Figure ci-dessous

LE THYRISTOR

Le thyristor est une diode à jonction à amorçage commandée par une gâchette.

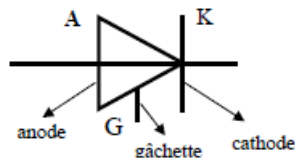


Figure 4. Symbole d'un thyristor

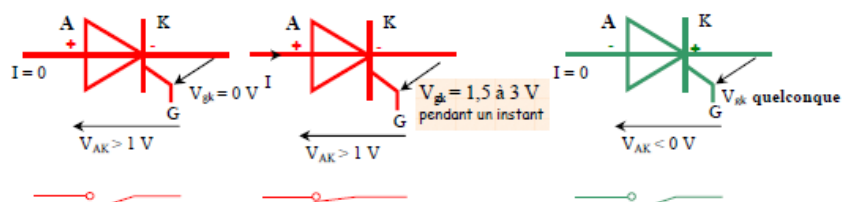


Figure 5. Les trois états d'un thyristor

Les critères principaux de choix d'un thyristor sont :

- I_0 le courant direct moyen à l'état passant
- I_T (RMS) le courant efficace à l'état passant
- V_{RRM} la tension inverse de crête répétitive
- V_{DRM} la tension directe de crête répétitive à l'état bloqué
- Les temps d'amorçage et de désamorçage

Le type de boîtier

Quelques types de boîtiers :

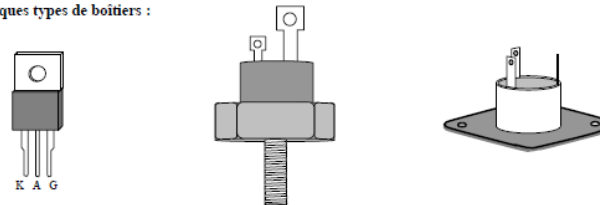


Figure 6. Quelques types de boîtiers d'un thyristor

contre les Surintensités	contre les Surtensions	contre les amorçages trop rapides di/dt	contre les blocages trop rapides dv/dt
 Fusible rapide	 Demi conducteur GEMOV	 Inductance en série	 Condensateur
 Inductance en série	 Thyrector		 Condensateur + résistor

Tableau 1. Protection d'un thyristor

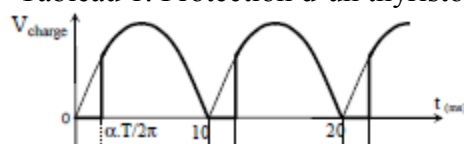


Figure 7. Forme d'une de la tension de sortie

Exercice2.6: Donner les conditions pour amorcer un thyristor:

Il faut :

-
-

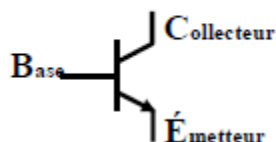
LE TRANSISTOR

Le transistor est un semi-conducteur commandé. Il existe deux types de transistor.

1. Transistor bipolaire commandé par courant électrique I_B sur la base.
2. Transistor unipolaire commandé par une tension V_{GS} entre grille et source

1. Transistor bipolaire

Type NPN



Type PNP

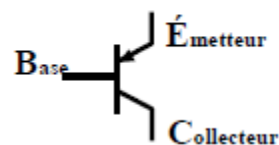


Figure 8. Symbole d'un transistor bipolaire

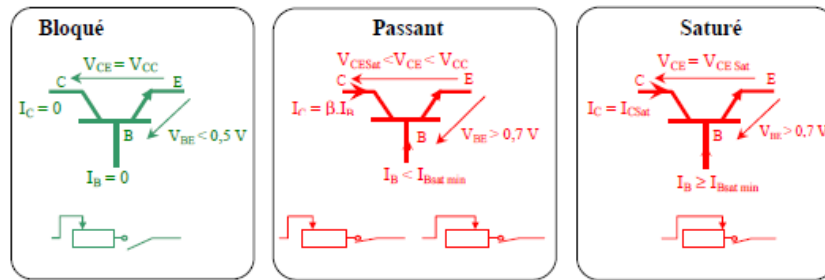


Figure 9. Les trois états d'un transistor bipolaire

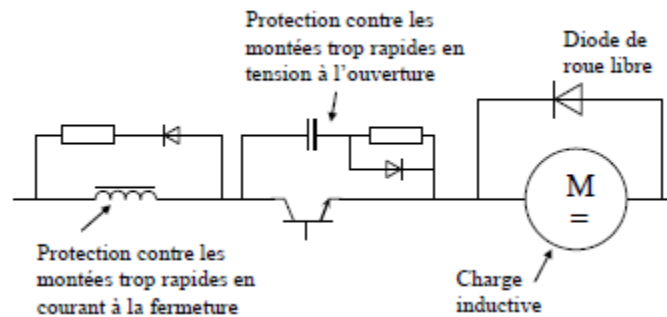


Figure 10. Protection d'un transistor

Quelques types de boîtiers :

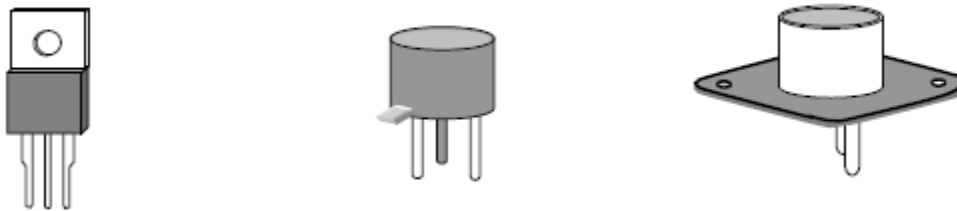
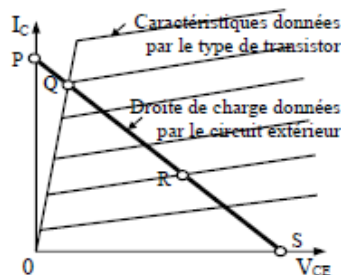


Figure 11. Quelques types de boîtiers d'un transistor

Exercice 3.6 Compléter pour chacun des 4 points l'état du transistor ci-dessous : passant, saturé, court-circuité ou bloqué



- P, il faut que le transistor soit :
- Q, il faut que le transistor soit :
- R, il faut que le transistor soit :
- S, il faut que le transistor soit :

Le transistor unipolaire

Principaux types :

Transistor à jonction à effet de champ : transistor FET (Field Effect Transistor)

Transistor MOS (Metal Oxyde Semiconducteur)

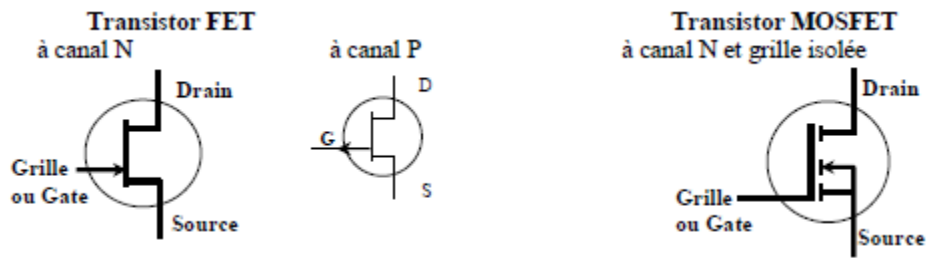


Figure 12. Symbole d'un transistor unipolaire

Conversion AC - DC : les redresseurs

Les redresseurs permettent d'obtenir une tension de valeur moyenne non nulle à partir d'une tension alternative (monophasée ou triphasée) de valeur moyenne nulle

Les redresseurs commandés permettent de régler la valeur moyenne de la tension redressée.

On peut citer (en étant loin de se montrer exhaustif) :

Les alimentations pour téléviseurs, ordinateurs

La charge d'accumulateurs

L'interconnexion de réseau et le transport d'énergie en courant continu à haute tension (France /Angleterre)

Sous stations à redresseurs pour la traction à courant continu.

Bains électrolytiques ou galvaniques, etc....

Les ponts redresseurs peuvent être directement fournis par les constructeurs sous forme de boîtiers moulés pour les faibles et moyennes puissances ou bien en éléments unitaires réunis sur un dissipateur pour les puissances importantes

Choix d'un pont redresseur : il dépend en premier lieu de l'utilisation recherchée

Alimentation monophasée

Alimentation triphasée

Pont uniquement de diodes

Pont mixte symétrique ou asymétrique

Pont uniquement de diodes

Bras de pont à diodes, à thyristors, mixte

En résumé Un redresseur est un convertisseur statique de puissance qui transforme le courant alternatif d'un réseau en courant continu. On appelle onduleur non autonome le même appareil réalisant la transformation inverse ; l'énergie nécessaire à l'extinction des thyristors est fournie par le réseau alternatif, qui est donc actif.

Le redresseur non commandé

Le but du redressement est d'obtenir, à partir d'un courant alternatif, un courant unidirectionnel le plus proche possible du courant continu et adapté en tension.

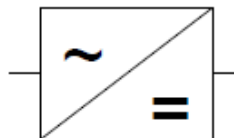


Figure 13. Symbole d'un pont redresseur

On le dit « non commandé » car, une fois le type de montage choisi, on ne peut pas agir sur la tension de sortie. Elle ne dépend que de la tension d'entrée (et dans une moindre mesure de la charge).

REDRESSEUR P1

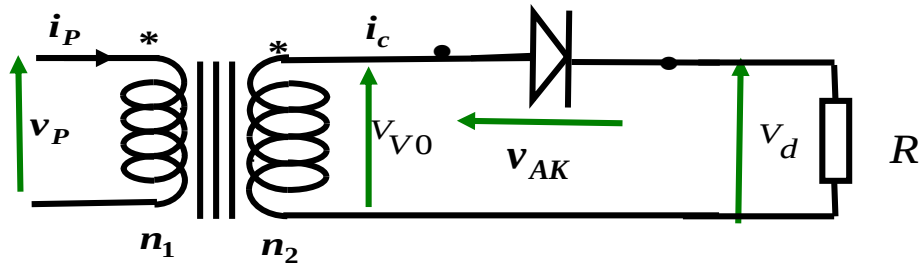
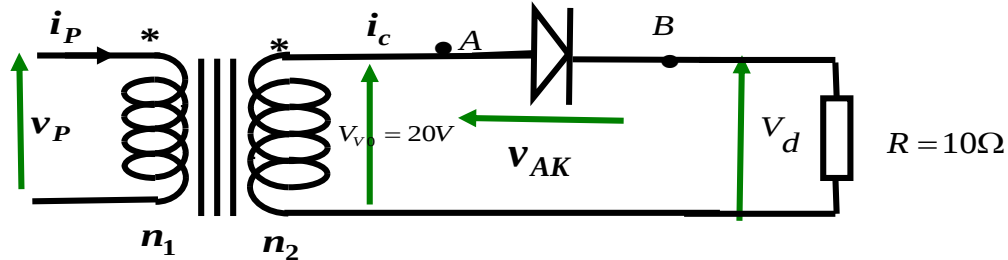


Figure 14. Redresseur simple alternance P1

Exercice 4.6 Le primaire du transformateur étant alimenté par une tension sinusoïdale (figure ci-dessous) telle que la valeur efficace de la tension secondaire soit 20 V, on réalise le montage ci-dessous, dans lequel la diode est supposée idéale.



- Calculer la valeur maximale de la tension secondaire.
 - Représenter, l'oscillogramme de la voie A.
 - Représenter l'oscillogramme de la voie B.
 - Représenter l'oscillogramme de la voie (A-B).
- Calculer la valeur moyenne de la tension V_d (t) aux bornes de la résistance R.

On rappelle que : $V_d = \frac{V_{V0\max}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \times V_{V0}}{\pi}$ $V_{V0\max} = \sqrt{2} \times V_{V0}$

REDRESSEUR PD2 (PONT DE GRAËTZ)

Le montage utilise 4 diodes pour redresser une tension alternative

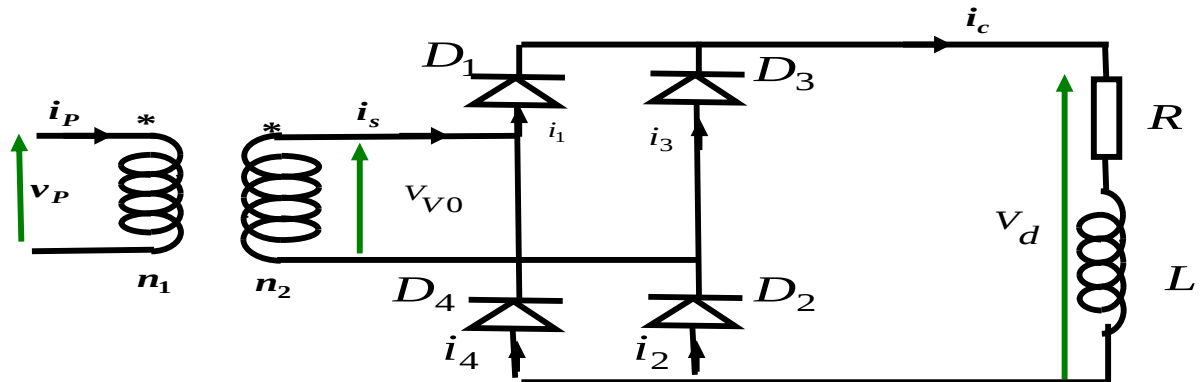


Figure 15. Redresseur double alternance PD2

Exercice 5.6 Le redresseur est un pont de Graëtz monophasé à quatre diodes (Figure 15) supposées parfaites.

- Donner un schéma de principe de ce pont redresseur en faisant figurer les quatre diodes.
- Représenter l'allure de la tension redressée à la sortie du pont, lorsque la valeur efficace de la tension d'alimentation est de 55 V et sa fréquence de 50 Hz.

On précisera la valeur maximale de la tension $V_{V0\max} = \sqrt{2} \times V_{V0}$ $V_{V0\max} = V_{RRM}$

3) Calculer la valeur moyenne V_d de la tension redressée. On rappelle que : $V_d = \frac{2 \cdot V_{V0\max}}{\pi}$

REDRESSEUR P3

Grâce à 3 diodes formant par exemple un commutateur "plus positif", à chaque instant, la borne M est reliée à la plus positive des bornes 1, 2, 3. La tension redressée VC est recueillie entre M et le point neutre N.

La figure 16 représente le montage P3, avec le commutateur à trois diodes

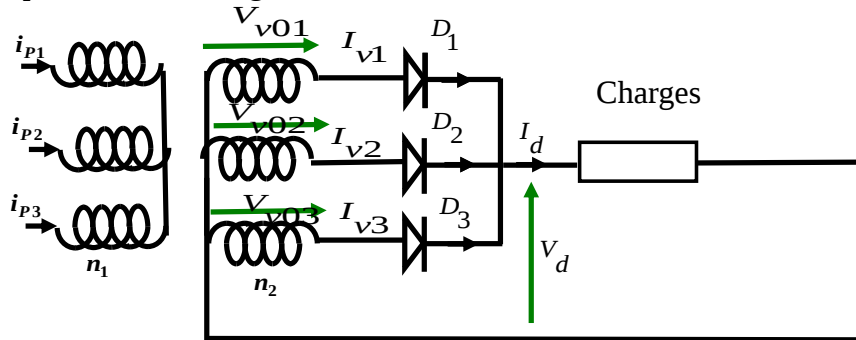


Figure 16. Redresseur simple alternance. Montage parallèle P3.

Seule la diode dont l'anode est au plus haut potentiel peut conduire.

Supposons qu'à un instant donné, v_1 est la tension la plus élevée. Si la diode D_2 conduit ($v_{AK2} = 0, < v_c = v_2$) ; D_1 se trouve sous la tension : $v_{AK1} = v_1 - < v_c = v_1 - v_2 > 0$

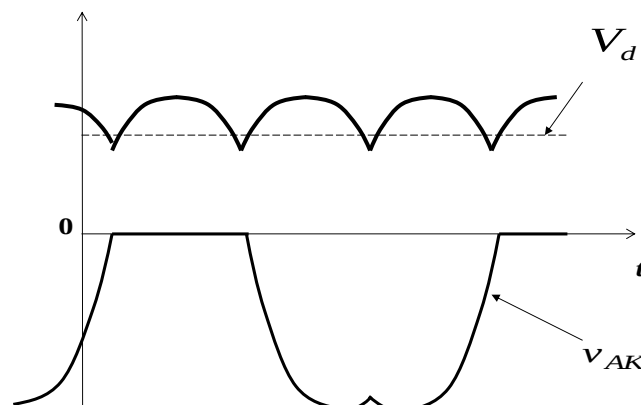


Figure 17. Montage P3 : tension redressée.

La tension moyenne : $V_d = 1,17V_{V0}$

Tension inverse maximale aux bornes d'une diode : $V_{V0\max} = \sqrt{3} \times \sqrt{2} \times V_{V0}$

$$V_{V0\max} = V_{RRM}$$

Etude des courants

Courant dans la charge.

Ce courant est constant par hypothèse (charge fortement inductive).

Le montage P3 présente à chaque instant une diode susceptible d'être passante. L'hypothèse d'avoir I_d constant est donc réaliste.

Courant dans une diode.

Le courant dans les diodes est égal à i_d lorsque la diode considérée est passante. Il est égal à 0 si la diode est bloquée. Chaque diode est donc parcourue par un courant d'intensité i_d pendant une fraction $1/q$ de la période T des tensions d'alimentation. L'intensité i_{v1} du courant traversant D_1 évolue donc comme l'indique la figure 18.

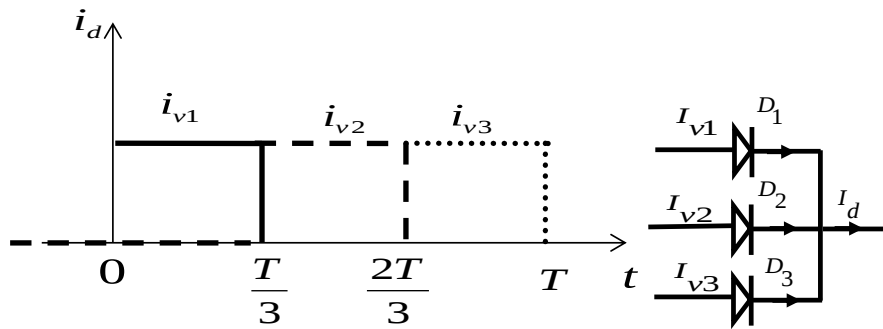


Figure 18. Montage P3. Courant dans une diode.

REDRESSEUR PD3

La figure 19 représente le redresseur PD3. Ce montage est à comparer au pont de Graëtz en monophasé et à ce titre il peut également être appelé triphasé double alternance.

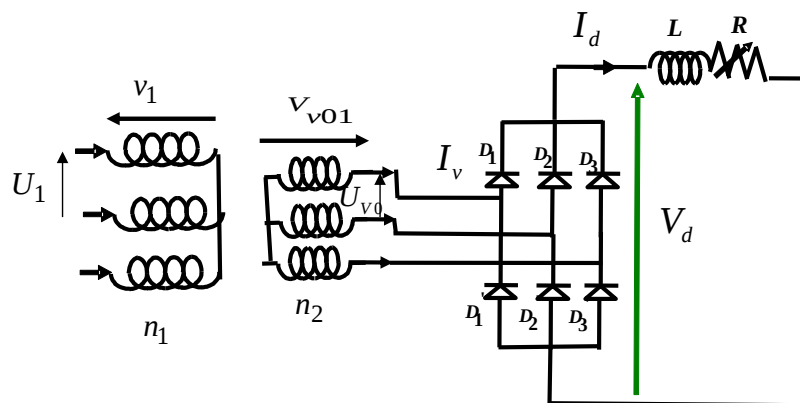


Figure 19. Redresseur double alternance. Montage PD3.

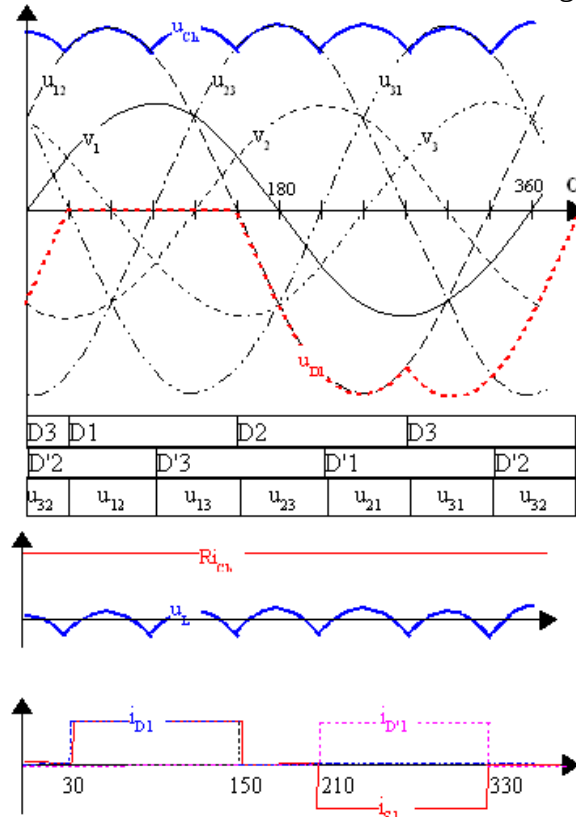


Figure 20. Montage PD3 - tension redressée.

La tension moyenne : $V_d = 2,34V_{V0}$ $V_{V0\max} = V_{RRM}$

Tension inverse maximale aux bornes d'une diode : $V_{V0\max} = \sqrt{3} \times \sqrt{2} \times V_{V0}$

Conclusion

Le facteur de puissance est maximum en triphasé.

A puissance active disponible pour l'utilisateur P_{abs} et amplitude de la tension redressée U_{cmax} données, la masse de cuivre concernant le transformateur est la plus faible en triphasé.

Le facteur de puissance des montages parallèle double est meilleur que celui des montages parallèles simple.

On peut donc conclure que le montage PD3 est le plus efficace (idem S3) des montages parallèles pour ce qui concerne la rentabilité du transformateur. Il est clair cependant que ce montage nécessite 6 diodes au lieu de 3 pour le montage P3.

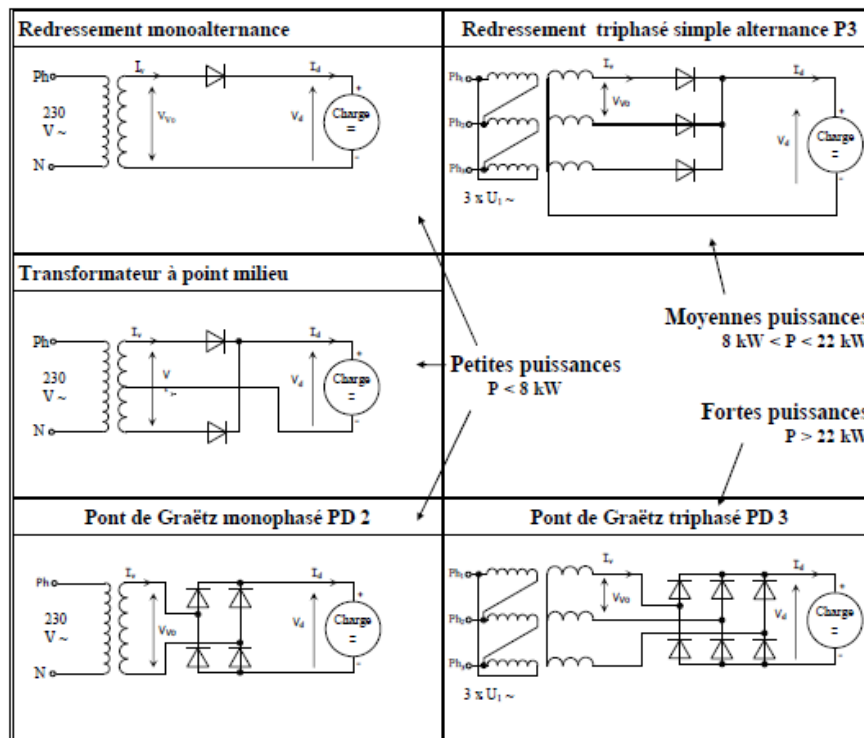


Figure 21. Les cinq montages de base

Monophasé		Triphasé	
Monoalternance		Simple alternance P3	
$V_d = V_{V0\max} / \pi$ $= \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$		$V_d = 3 \cdot V_{V0\max} / 2 \pi$ $= 3 \sqrt{2} \cdot V_{V0} / 2 \pi$	
À point milieu			
$V_d = V_{V0\max} / \pi$ $= \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$			
Pont de Graëtz PD2		Pont de Graëtz PD3	
$V_d = 2 \cdot V_{V0\max} / \pi$ $= 2 \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$		$V_d = 3 \cdot V_{V0\max} / \pi$ $= 3 \sqrt{2} \cdot V_{V0} / \pi$	

Figure 22. Formes et valeurs des cinq montages de base

Tension d'entrée : tension efficace au secondaire du transfo, notée V_{V0} sur les schémas

Tension de sortie : tension moyenne aux bornes de la charge, notée V_d

Filtrage et lissage

Pour améliorer le taux d'ondulation, on peut "filtrer" la tension de sortie en plaçant un condensateur en parallèle et/ou la "lisser" à l'aide d'une self (bobine) de lissage placée en série avec le récepteur.

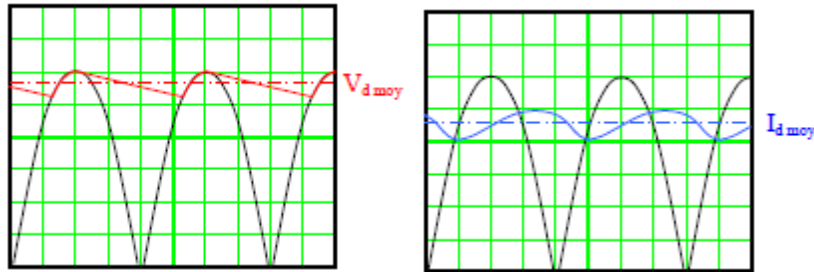


Figure 23. Effets du condensateur seul Effets de la bobine seule

Le redresseur commandé

Le redressement simple ne permet pas de régler la tension de sortie. Un pont redresseur commandé va permettre de faire varier la valeur de cette tension en fonction du pont choisi et de son « retard » à la commande des thyristors.

Questions de cours

Redresseurs

Q1. Quel est le but du redressement ?

Q2. Quelle grandeur permet de mesurer la qualité d'un courant redressé ?

Q3. Quels éléments sont utilisés pour améliorer la qualité du courant redressé ? Quels sont leurs rôles respectifs ?

Q4. Quel interrupteur électronique permet de faire varier la tension de sortie d'un redresseur commandé ?

Exercice 6.6 : Quelle tension alternative doit-on avoir au secondaire d'un transfo pour obtenir une tension moyenne de 24 V à la sortie d'un pont PD2 ? On connaît $V_d = 24$ V et on cherche V_{V0} .

Réponse.

	Mono alt	Point milieu	PD2	P3	PD3
V_{RRM} / V_d	3,14	3,14	1,57	2,10	1,05
V_{V0} / V_d	2,22	2,22	1,11	1,48	0,74
I_{RRM} / I_d	3,14	1,57	1,57	1,21	1,05
I_0 / I_d	1	0,5	0,5	0,333	0,333

$$V_{V0\max} = V_{RRM}$$

Sur le tableau, on lit $\frac{V_{V0}}{V_d} = 1,1$, donc

Exercice 7.6 : Quels sont les courant I_v et tension V_{RRM} pour une diode d'un pont redresseur P3 qui alimente une charge $I_d = 10$ A sous $V_d = 200$ V.

	Mono alternance	Point milieu	PD2	P3 ↓	PD3
V_{RRM} / V_d	3,14	3,14	1,57	2,10	1,05
V_{V0} / V_d	2,22	2,22	1,11	1,48	0,74
I_{IRM} / I_d	3,14	1,57	1,57	1,21	1,05
I_o / I_d	1	0,5	0,5	0,333	0,333

Corrigé

$$V_{V0\max} = V_{RRM}$$

Exercice 8.6 On souhaite charger une batterie (48V et 10Ah) à partir du réseau monophasé 230V.

1. Quel convertisseur allez-vous utiliser ? Justifier.

Un redresseur car alternatif vers continu.

2. Quels sont les types possibles?

On choisira par la suite un pont P2. Indiquer la tension nécessaire au secondaire du transformateur.

Calculer la puissance nécessaire au secondaire du transformateur.

Donner les caractéristiques des diodes (courant, tension)

Exercice 9.6 : Redresseur non commandé

Un pont redresseur PD2 dont les 4 diodes sont supposées parfaites, alimentant une résistance de 10 Ohm.

Calculer :

1° la valeur efficace de V_{V0} pour obtenir $V_d = 15$ V

2° L'intensité moyenne I_d du courant débitée dans la résistance R

3° L'intensité maximale dans une diode $I_{V\max}$

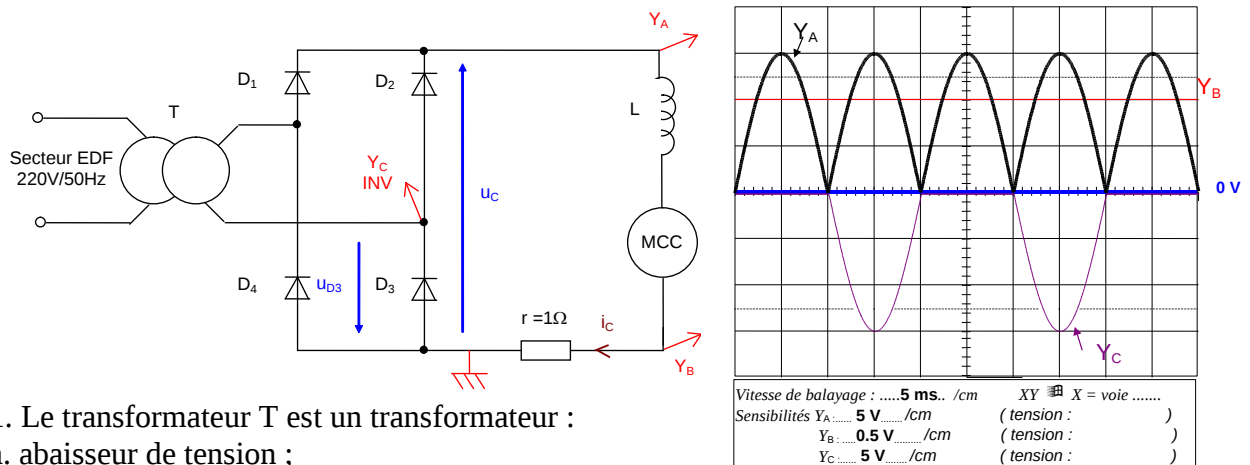
4° L'intensité moyenne dans une diode I_v

5° L'intensité efficace dans la charge I_{deff}

6° L'intensité efficace dans une diode I_{veff}

Corrigé

Exercice 10.6: On a réalisé une alimentation à partir du secteur (figure ci-dessous) destinée à faire fonctionner un moteur à courant continu. Un oscilloscope a permis d'obtenir les oscillogrammes suivants :



- Le transformateur T est un transformateur :
 - abaisseur de tension ;
 - élévateur de tension.
- Le rapport de transformation m du transformateur T est égal à :
 - 20 ;
 - 10 ;
 - 1 ;
 - 0,1 ;
 - 0,05 ;
 - 0,01.
- La tension u_c aux bornes de la charge est :
 - continue ;
 - unidirectionnelle ;
 - bidirectionnelle ;
 - sinusoïdale.
- La fréquence de la tension u_c est égale à :
 - 200 Hz ;
 - 100 Hz ;
 - 50 Hz ;
 - 25 Hz
- Le courant i_c est :
 - continu ;
 - alternatif ;
 - bidirectionnel ;
 - sinusoïdale.
- L'intensité du courant i_c est égale à :
 - 0,25 A ;
 - 0,5 A ;
 - 4 A ;
 - 1 A ;
 - 2 A.
- La fréquence de la tension u_{D3} , tension aux bornes de la diode D_3 est :
 - 200 Hz ;
 - 100 Hz ;
 - 50 Hz ;
 - 25 Hz.

8. La tension aux bornes d'une des trois autres diodes est identique à la tension aux bornes de la diode D3, c'est :
- a. la tension aux bornes de la diode D1 ;
 - b. la tension aux bornes de la diode D2 ;
 - c. la tension aux bornes de la diode D4.
9. Parmi les diodes dont les caractéristiques vous sont données ci-dessous, laquelle faut-il choisir ?
- a. 1N 4148 (I_F (courant direct continu) = 150 mA ; V_{RRM} (tension de pointe inverse répétitive) = 75 V) ;
 - b. BAV 19 (I_F = 200 mA ; V_{RRM} = 100 V) ;
 - c. 1N 4001 (I_F = 1 A ; V_{RRM} = 50 V).
10. La bobine L, montée en série avec le moteur à courant continu, permet de :
- a. filtrer la tension u_c et la rendre proche d'une tension continue ;
 - b. limiter l'intensité du courant i_c ;
 - c. lisser le courant i_c et le rendre proche d'un courant continu ;
 - d. limiter la tension inverse supportée par les diodes.

FICHE MEMOIRE A COMPLETER

CHAPITRE 7 CRITERE DE CHOIX D'UN VARIATEURS DE VITESSE POUR MACHINES ELECTRIQUES

Un variateur de vitesse est un appareil électronique permettant la régulation ou la commande de la vitesse des moteurs électrique.

La structure, le principe physique, la technologie mise en jeu dans le variateur dépendent essentiellement du moteur utilisé.

Il existe 3 types de moteur électrique selon des choix physiques différents :

- Le moteur à courant continu
- Le moteur synchrone
- Le moteur asynchrone

Les applications de la variation de vitesse sont très vastes (de la robotique au TGV), d'où l'existence d'une multitude de variateurs de vitesse. On peut citer quelques fabricants : Télémécanique, Siemens, Danfoss, Cégélec, CGE, Mitsubishi....

Choix d'un variateur de vitesse électronique

Un variateur de vitesse est défini en 2 temps

1. Le choix porte d'abord sur une technologie. Il existe plusieurs gammes de variateur de vitesse dont la technologie est liée à la nature du réseau d'alimentation et au type de moteur.
2. Ensuite, à la gamme adaptée, le variateur est choisi selon la puissance, la nature de l'application à traiter les quadrants de fonctionnement. On peut alors gérer toutes les phases d'alimentation d'un moteur (démarrage, fonctionnement nominal et freinage)

Il existe plusieurs types de variateur de vitesse électronique:

LE REDRESSEUR

Le but du redressement est d'obtenir, à partir d'un courant alternatif, un courant unidirectionnel le plus proche possible du courant continu et adapté en tension.

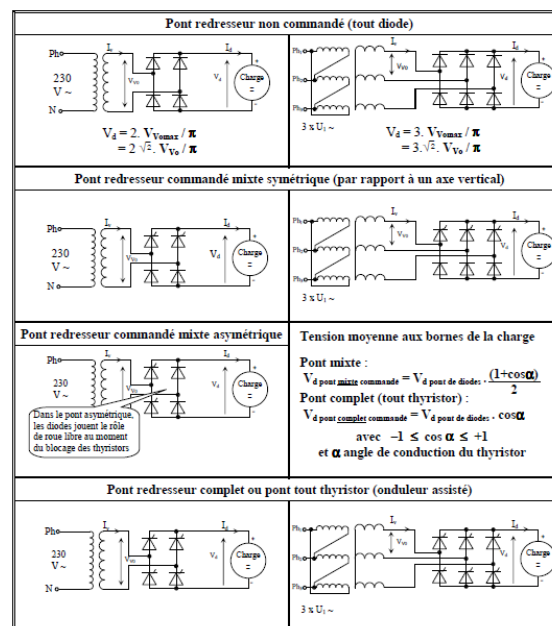


Figure 1. Les sept montages de base

L'ONDULEUR

L'ONDULEUR ASSISTÉ

On différencie un récepteur d'un générateur par l'orientation des flèches tensions et intensités. Dans un pont redresseur, le courant dans la charge est toujours de même sens en raison de la polarisation des composants (thyristors ou diodes).

Mais l'évolution de la tension dépend de l'angle de retard des thyristors, dans le pont tout thyristor, la tension moyenne V_d peut devenir négative : le récepteur devient donc générateur.

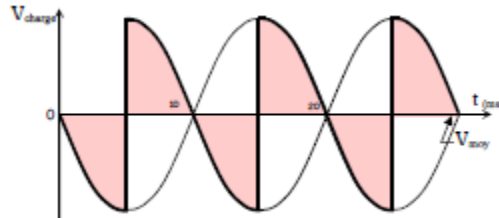


Figure 2. Tension de sortie pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$

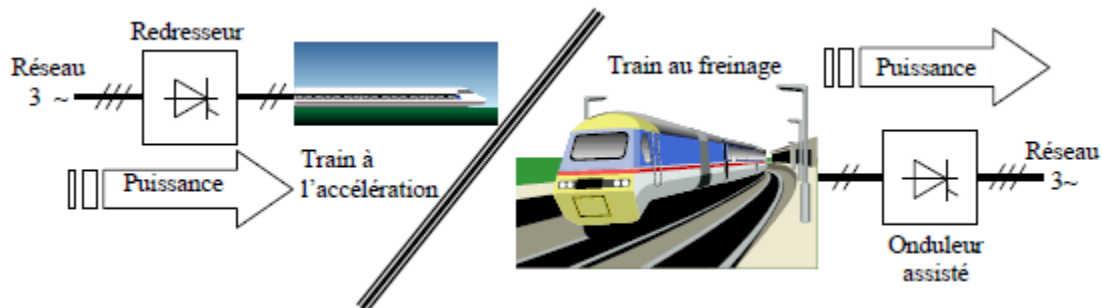


Figure 3. Exemple d'utilisation d'onduleur assisté

L'ONDULEUR AUTONOME

L'onduleur autonome crée une tension alternative variable (ou fixe), de fréquence variable (ou fixe) à partir d'une tension continue. Ils sont principalement utilisés dans deux cas : pour alimenter les moteurs à courant alternatif dont on veut faire varier la vitesse et pour obtenir de l'alternatif en site isolé avec des panneaux solaires ou des batteries.

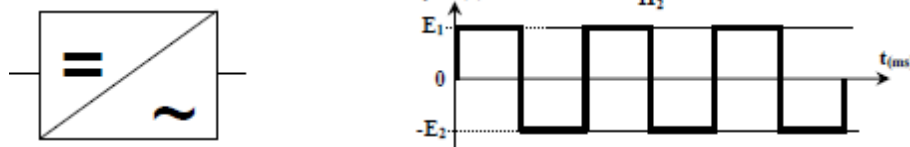


Figure 4. Symbole d'un onduleur autonome et forme d'onde de tension de sortie

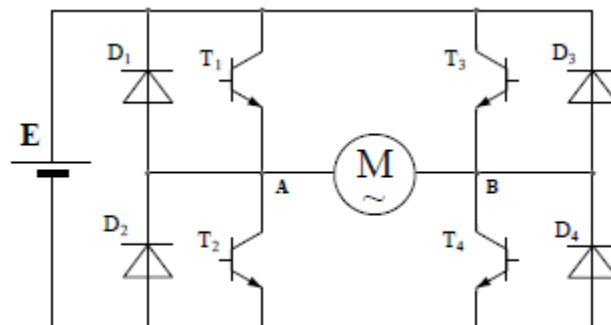


Figure 5. Onduleur monophasé en pont

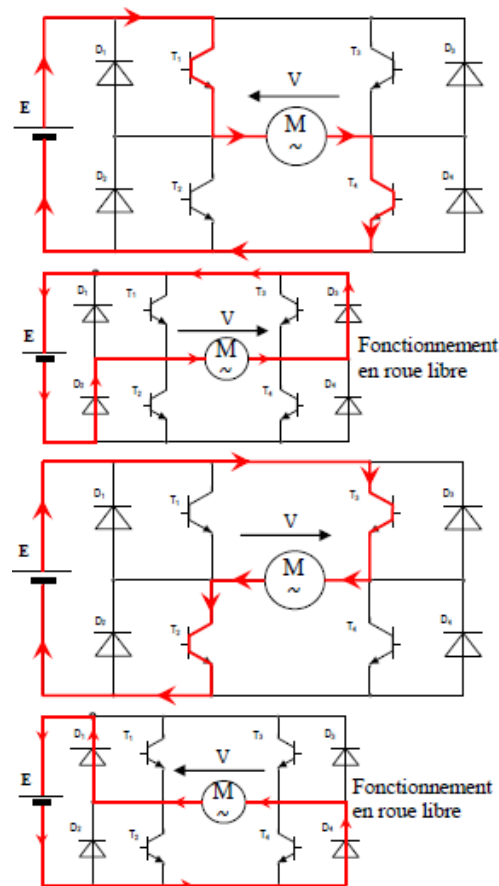


Figure 5.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé en pont

LE HACHEUR

Un hacheur a pour rôle de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ils sont principalement utilisés pour alimenter les moteurs à courant continu dont on veut faire varier la vitesse.

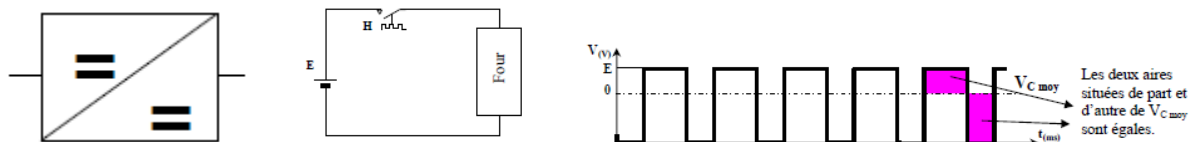


Figure 6. Symbole d'un hacheur et forme d'onde de tension de sortie

Principe du hacheur

Dans un circuit en courant continu, la gâchette d'un thyristor reçoit un courant I_G ou la base d'un transistor un courant I_B , il devient passant pendant un temps t_1 . Et puis, la base n'est plus alimentée ou, grâce à un circuit de blocage, le thyristor se bloque pendant un temps t_2 .

Ensuite, le composant H redevient passant pour un temps t_1 , etc.

Tension de sortie : $\langle V_{ch} \rangle = \frac{t_1}{T} \times V_{rés} = \alpha \times E$

Il existe deux sortes de hacheur :

Le hacheur série (ou dévolteur)

La tension moyenne $\langle V_{ch} \rangle$ aux bornes de la charge ne peut être que plus petite ou au maximum égale à la tension d'alimentation E. $\langle V_{ch} \rangle = \alpha \times E$

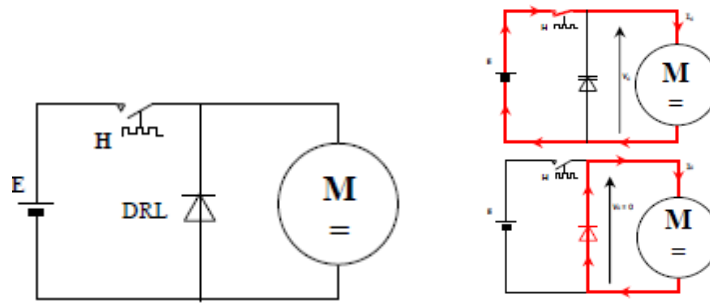


Figure 7. Le hacheur série

Le hacheur parallèle (ou survolteur)

En phase de freinage, il permet au moteur devenu génératrice de réinjecter de l'énergie dans la batterie. Contrairement au principe de l'onduleur assisté où le sens du courant était fixé une fois pour toutes, ici, c'est le courant qui s'inverse et rentre par le + de la batterie.

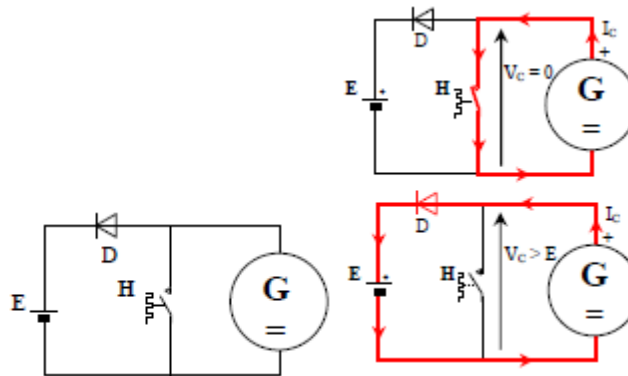


Figure 8. Le hacheur parallèle

LE GRADATEUR

Un gradateur permet de fournir, à partir d'un courant alternatif de tension fixe, une tension alternative de valeur réglable.

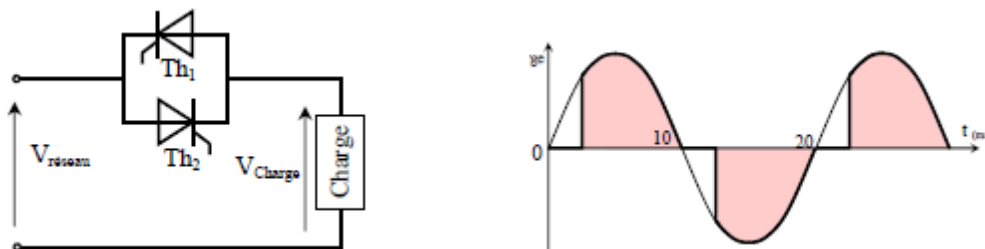


Figure 9. Symbole d'un gradateur et tension de sortie

Il existe deux sortes de gradateur :

GRADATEUR A ANGLE DE PHASE

Principe

Les gâchettes des thyristors sont commandées avec un retard $\frac{\alpha \times T}{2\pi}$ compris entre 0 et $T / 2$ correspondant à un angle de phase ou angle d'amorçage compris entre 0 et π radians.

Si $\alpha = 0$, la sinusoïde est complète. $V_{ch} = V_{réseau}$

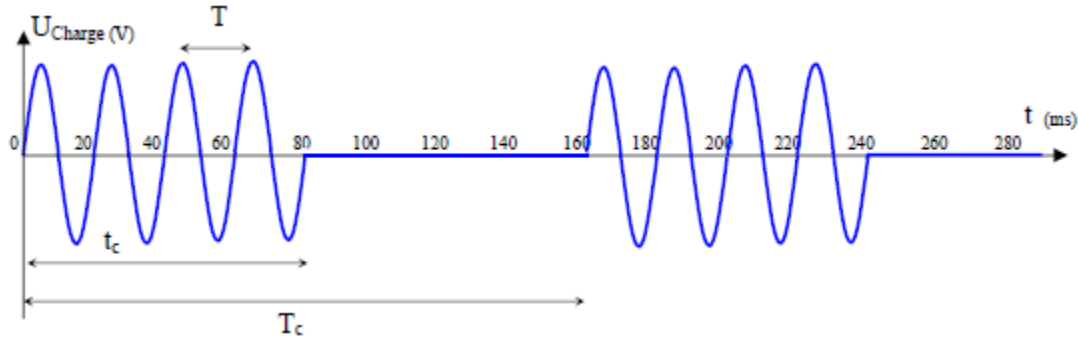
Si $\alpha = \pi$, les thyristors sont amorcés au moment du changement d'alternance. $V_{ch} = 0$

Pour a quelconque, $V_{ch} = V_{rés} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$

GRADATEUR A TRAIN D'ONDES

Principe

C'est un appareil qui, alimenté sous une tension sinusoïdale de valeur efficace constante, fournit à la charge des salves de tension de manière à faire varier la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge.



T : période de la tension source (secteur)

T_{on} : durée du train d'onde (salve)

T_c : période de modulation

Plus t_c se rapproche de T_c et plus V_{ch} est proche de $V_{réseau}$. Pour exprimer cela on a défini τ

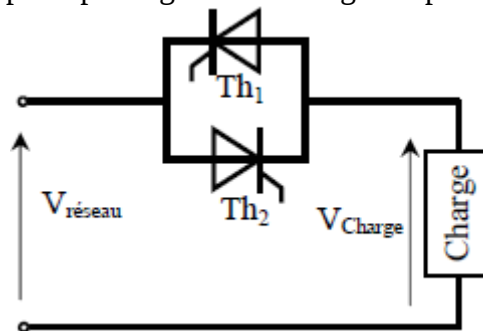
Pour obtenir la puissance moyenne fournie au récepteur, il suffit d'écrire : $\langle P \rangle = \tau \times P_{nom}$

Questions de cours

Gradateurs

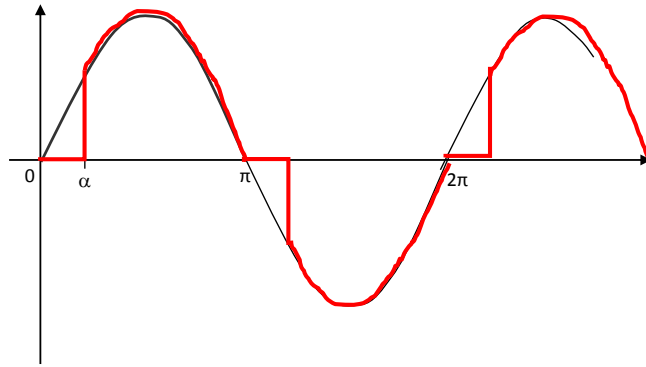
Q1. Quels sont les deux types de gradateurs ?

Q2. Dessiner le schéma de principe du gradateur à angle de phase



Q3. Dessiner la tension aux bornes de la charge en fonction de α .

R3.



Q4. Donner la formule de la tension aux bornes de la charge

Q5. Expliquer le principe du gradateur à train d'ondes

Q6. Donner la définition du rapport cyclique en expliquant chacun des paramètres

Q7. Quels sont les deux critères de choix d'un gradateur ?

Exercice 1.7 Un gradateur à angle de phase alimenté en 230V/50 Hz commande une charge résistive de 46Ω . Donnez I_c et P_c pour: $\alpha=0$ et $\alpha=120^\circ$ où α désigne l'angle de commande des thyristors

Exercice 2.7 Un gradateur train d'ondes, est alimenté par le secteur (230V/50 Hz). La commande a une base de temps de 1.5s.

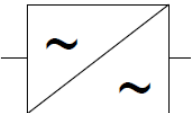
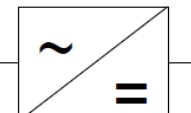
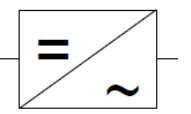
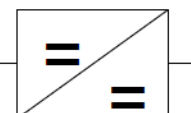
Ce gradateur commande une charge résistive de puissance nominale $P=1$ kW.

On veut régler la puissance de charge à 650 W.

Calculer le rapport cyclique τ de la commande. Calculer t_c

QUESTIONS DE COURS

Compléter le tableau suivant permettant de classer les convertisseurs :

Tension d'entrée	Symbole	Tension de sortie	Fonction	Applications
Alternative				
				
Continue				
				

COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Concernant la machine asynchrone, on distingue deux types de commandes :

- les commandes scalaires ;
- les commandes vectorielles.

commande scalaire	commande vectorielle
modèle régime permanent + simple à implanter -dynamique lente	modèle régime transitoire + précise et rapide + contrôle du couple à l'arrêt + chère (capteur de position du rotor/stator ou estimateur de vitesse, DSP, ...)
contrôle des grandeurs en amplitude	contrôle des grandeurs en amplitude et en phase

COMMANDE SCALAIRE

Contrôle scalaire de tension

Son principe est de maintenir $V/f=\text{constant}$ ce qui revient à garder le flux constant.

En prenant les modules des expressions complexes : $V = \omega_s \phi \rightarrow \phi = \frac{V}{\omega_s}$

En maintenant $V/f=\text{constant}$ et en faisant varier la fréquence statorique, on déplace la courbe du couple électromagnétique (en régime quasi-statique) de la machine asynchrone comme le montre la figure ci-dessous.

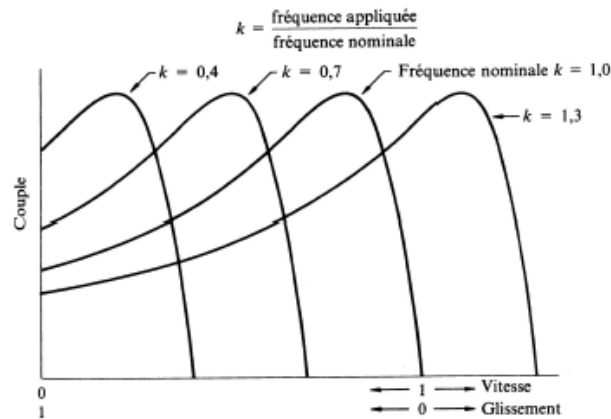
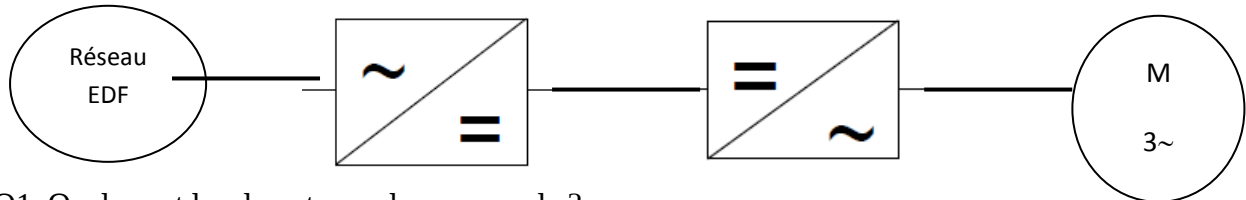


Figure 10. Couple moteur en fonction de la vitesse

Questions de cours

Compléter le synoptique de constitution d'un variateur de vitesse alternatif



Q1. Quels sont les deux types de commande ?

R1. Commande scalaire à U/f ou commande vectorielle.

Q2. Quel est l'avantage de la commande vectorielle ?

R2. Elle permet de maîtriser les oscillations du couple instantané et donc traiter les régimes transitoires

Exercice 3.7

Un moteur asynchrone à cage 7kW - 400V - 1480tr/min – 50 Hz

Calculer la fréquence et l'amplitude de la tension à laquelle il faut alimenter le moteur pour qu'il tourne à 1000 tr/min au couple nominal ;

FICHE MEMOIRE A COMPLETER

Bibliographie :

« Electrotechnique Industrielle », 2ème édition, G. Séguier, F. Notelet, Edition Lavoisier.

« Machines électriques, Cours et Problèmes » ; Claude CHEVASSU ; 20 octobre 2011.