
LES MACHINES SYNCHRONES

Technologies et différents modes d'alimentations des machines synchrones

Objectifs

Connaître les différentes technologies
Connaître les différentes utilisations possibles des machines synchrones
Savoir analyser le fonctionnement et mettre en œuvre un circuit spécialisé de commande de machine brushless.

Pré-requis

- *Lecture de schéma*
- *Lois de base de l'électromagnétisme*
- *Structure d'une boucle d'asservissement*

Sommaire

1 Introduction

1.1 Généralités

1.2 Mise en équation / Diagramme de Behn-Eschenbourg.

1.3 Expression du couple

1.4 Fonctionnement dans les quatre quadrants

2 Utilisation d'une machine synchrone en alternateur

2.1 Excitation des alternateurs de forte puissance

2.2 Refroidissement des alternateurs

2.3 Etude de la partie électrique d'une centrale thermique

3 Utilisation d'une machine synchrone en compensateur synchrone.

4 Etude des machines brushless.

4.1 Remarque générale sur l'expression du couple.

4.2 Les machines brushless à forces électromotrices sinusoïdales

4.2.1 Alimentation par commutateur de courant

4.2.2 Commande scalaire en courant

4.2.3 Commande vectorielle

4.3 Les machines brushless à répartition non sinusoïdale de flux : étude d'une commande d'axe

4.3.1 Structure du moteur

4.3.2 Choix d'une stratégie de commande.

4.3.3 Structure du convertisseur d'alimentation.

4.3.4 Utilisation d'un shunt en capteur de courant.

5 Exercice autocorrectif. Etude d'une motorisation d'axe.

5.1 Etude de la Motorisation d'un moulin.

5.2 Etude du système de ventilation principal d'un photocopieur.

6 Correction exercices autocorrectifs.

6.1 Etude de la Motorisation d'un moulin.

6.2 Etude du système de ventilation principal d'un photocopieur.

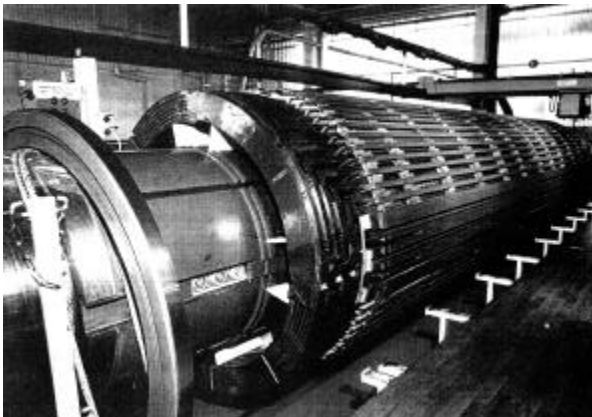
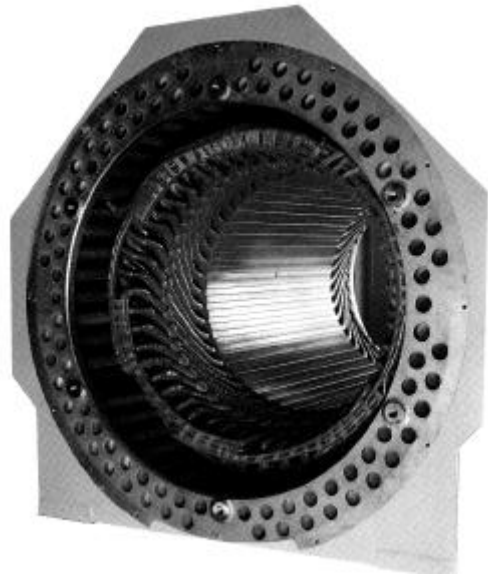
1 Introduction

1.1 Généralités

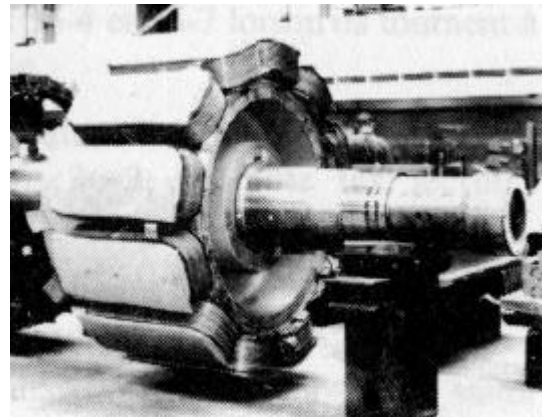
Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone (voir ci-contre).

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants :



Rotor à pôles lisses



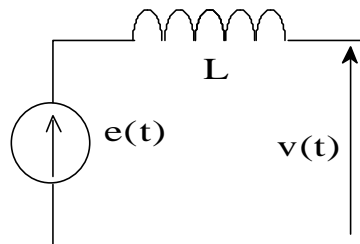
Rotor à pôles saillants



Rotor à aimants

1.2 Mise en équation / Diagramme de Behn-Eschenbourg.

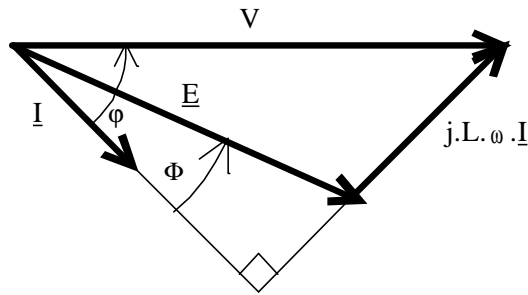
Afin d'étudier les différents fonctionnements possibles d'une machine synchrone en régime sinusoïdal, nous allons retenir le schéma équivalent par phase le plus simple possible, en négligeant toutes les pertes ainsi que les phénomènes de saturation :



Nous noterons :

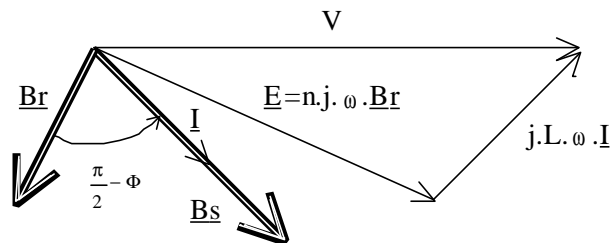
- Ω_s vitesse du champ tournant
- L inductance cyclique de la machine
- $e(t)$ la f.e.m. créée par le champ magnétique rotorique dans une phase de la machine :
$$e(t) = n_s \cdot \frac{d\phi_r}{dt}$$
- E la valeur efficace de $e(t)$
- I la valeur efficace du courant dans une phase de la machine
- φ le déphase entre V et I
- ϕ le déphase entre E et I

Il est alors possible de tracer le diagramme de Fresnel correspondant à l'équation des tensions d'une phase de la machine : $\underline{V} = \underline{E} + jL\omega\underline{I}$



Un tel diagramme porte le nom de diagramme de Behn-Eschenbourg.

Il est possible de faire apparaître sur ce diagramme les images des champs statorique et rotorique. L'image du champ statorique est en phase avec le courant, alors que l'image du champ rotorique est en quadrature avec la f.e.m $e(t)$:



1.3 Expression du couple

Il est possible d'établir une première expression du couple en réalisant un bilan des puissances au niveau de la machine. Si l'on néglige toutes les pertes, on peut écrire :

$$P_{\text{électrique}} = P_{\text{mécanique}} = C.\Omega_s = 3.V.I.\cos(\varphi) = 3.E.I.\cos(\Phi)$$

Nous avons vu précédemment que $e(t) = n_s \cdot \frac{d\varphi_r}{dt}$, d'où $e(t) = n_s \cdot \frac{d\varphi_r}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$. Il est possible d'en déduire que la f.e.m. E est de la forme : $E = K_e \cdot \varphi_r \cdot \Omega_s$

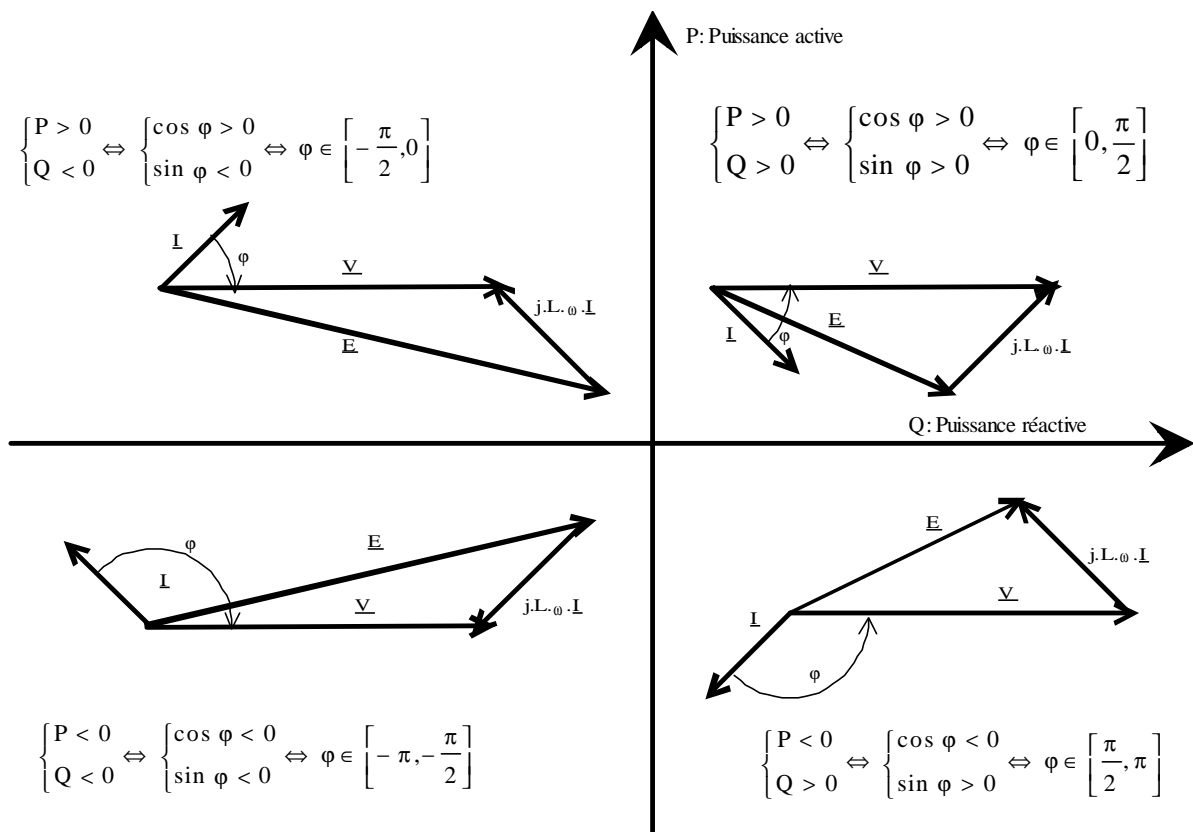
Il apparaît alors que le couple est directement proportionnel au courant dans les phases de la machine ainsi qu'au cosinus de l'angle ϕ :

$$C.\Omega_s = 3.E.I.\cos(\phi) = 3.K_e \cdot \varphi_r \cdot \Omega_s \cdot I.\cos(\phi)$$

Un bon contrôle du couple lors de la commande d'une machine synchrone passera donc par un contrôle de l'angle ϕ .

1.4 Fonctionnement dans les quatre quadrants

Une des particularités de la machine synchrone est sa capacité à fonctionner dans les quatre quadrants électriques. Il est en effet possible de rendre à volonté la machine inductive ou capacitive, que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur. Il suffit pour cela de jouer sur l'amplitude de E , c'est à dire sur le courant d'excitation rotorique. On obtient alors les diagrammes de Behn-Eschenbourg suivants :



Il est possible de constater que lors d'un fonctionnement capacitif, la f.e.m. E est supérieure à la tension d'alimentation, on dit que la machine est surexcitée. Lors d'un fonctionnement inductif, la f.e.m. E est inférieure à la tension d'alimentation, on dit que la machine est sousexcitée.

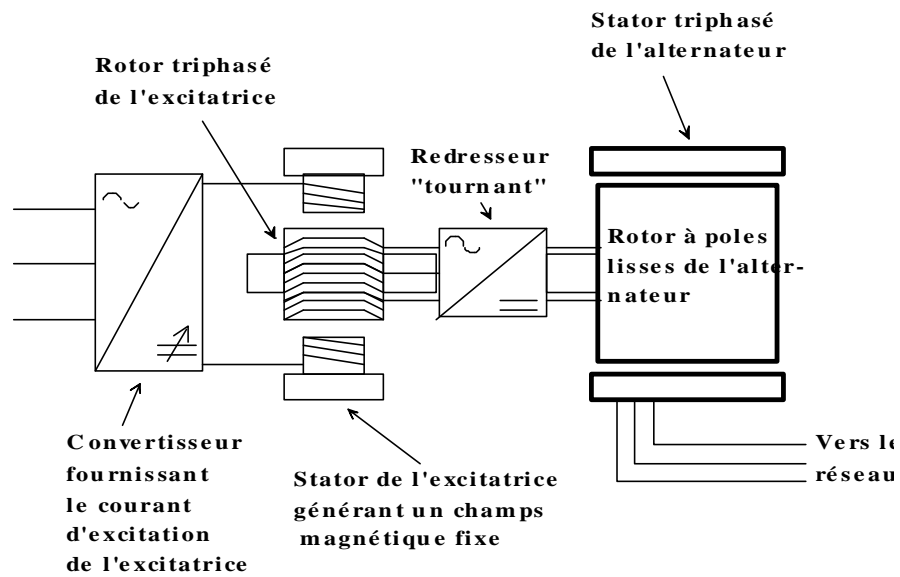
2 Utilisation d'une machine synchrone en alternateur

La quasi-totalité de l'électricité produite en France est issue d'alternateur de type synchrone. Ces alternateurs de très forte puissance (jusqu'à 1500 MVA) diffèrent des machines synchrones classiques essentiellement :

- par leur géométrie : l'augmentation de la puissance des alternateurs entraîne nécessairement une augmentation de leur taille. Afin de réduire les problèmes liés à l'accélération normale à la périphérie du rotor, les fabricants limitent le rayon des machines, ce qui entraîne une augmentation de la longueur.
- par leur système d'excitation
- par leur refroidissement

2.1 Excitation des alternateurs de forte puissance

Les puissances d'excitation des alternateurs de forte puissance sont telles (plusieurs mégawatts) qu'il est intéressant d'utiliser la puissance mécanique disponible sur l'arbre pour fournir le courant d'excitation. On utilise alors un système d'excitation monté sur le même arbre que le rotor de l'alternateur. De plus, il est alors possible de supprimer les contacts glissants nécessaires à l'alimentation de l'excitation :

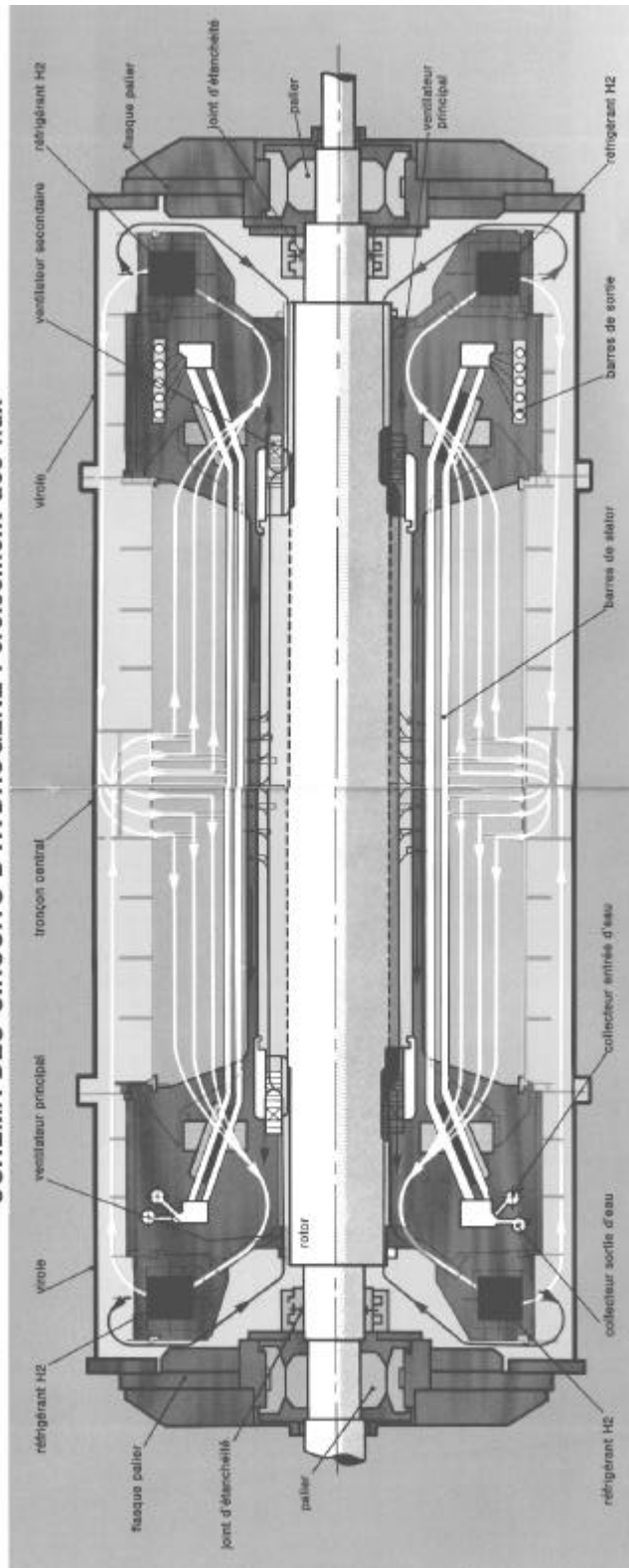


L'excitatrice est en fait un alternateur inversé où le circuit d'excitation est placé sur le stator. Le rotor comporte un système d'enroulement triphasé dont les courants sont redressés afin d'alimenter l'inducteur de l'alternateur.

2.2 Refroidissement des alternateurs

Même si le rendement des alternateurs est excellent (proche de 99% pour un alternateur 1000MW) les puissances dissipées sous forme pertes joules sont énormes (proche de 1MW pour un alternateur 1000MW) et ceci dans un volume restreint. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes d'évacuation des calories basés sur l'utilisation de fluides caloporteurs circulants dans le stator, dans le rotor ainsi que dans les conducteurs statoriques. Le schéma de refroidissement d'un alternateur 300MW est donné ci-dessous :

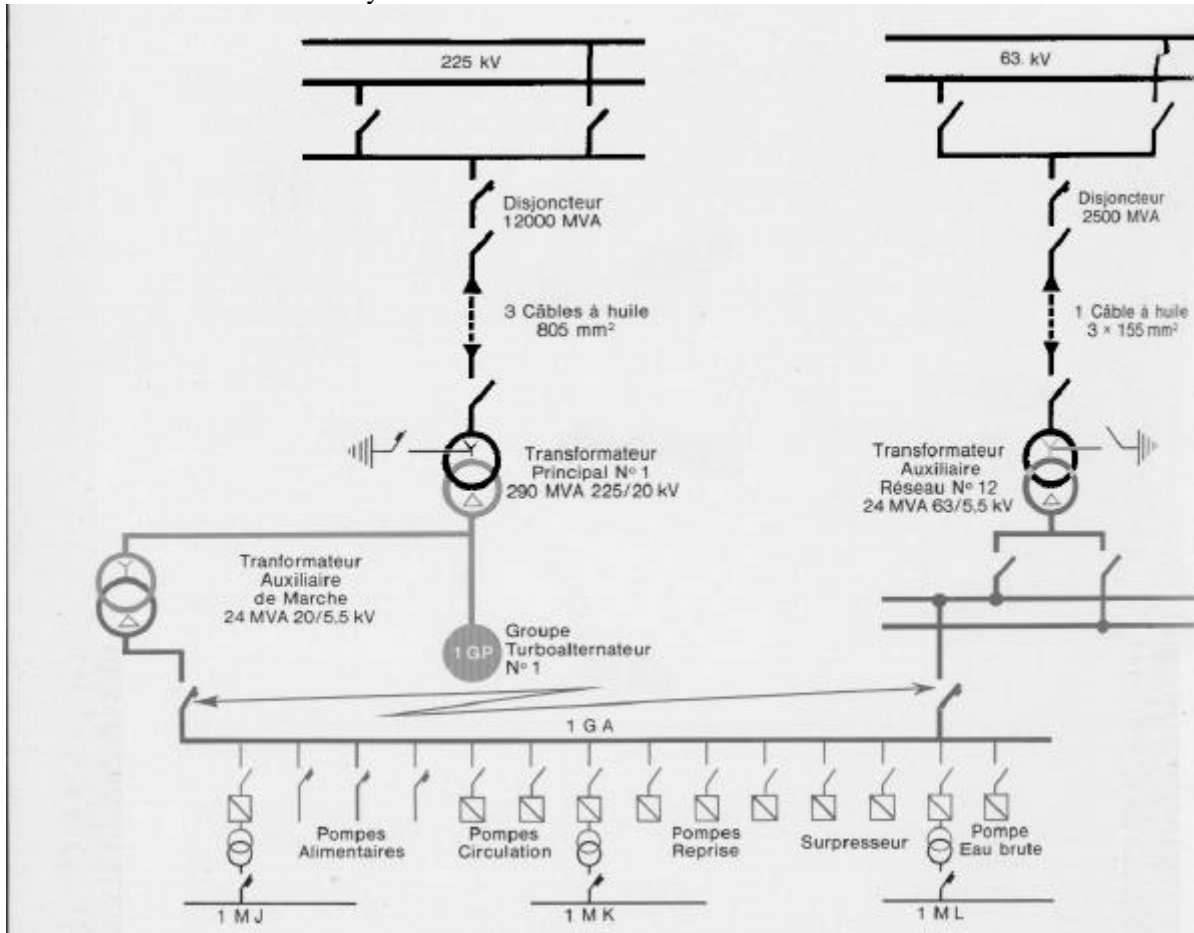
SCHEMA DES CIRCUITS D'HYDROGENE : croisement des flux



Le refroidissement du stator et du rotor est assuré par une circulation d'hydrogène, alors que l'on fait circuler de l'eau à l'intérieur des conducteurs statoriques.

2.3 Etude de la partie électrique d'une centrale thermique

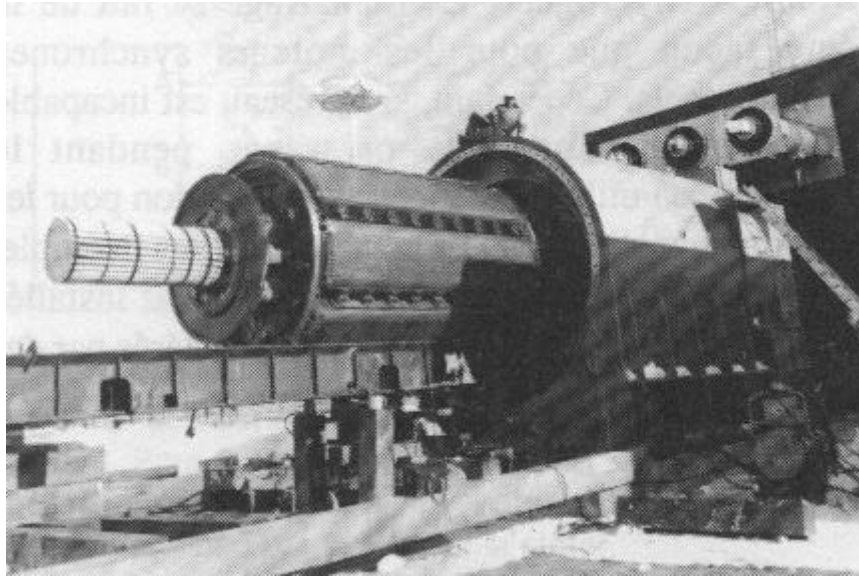
La tension de sortie des alternateurs est généralement de l'ordre de 25kV. La connexion au réseau haute tension se fait par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur. Une partie du schéma unifilaire de la centrale de Vitry est donné ci-dessous :



On peut remarquer en plus du transformateur principal qui permet de relier l'alternateur au réseau 225kV, le transformateur auxiliaire de marche normale (Tam) qui soutire la puissance sur la liaison alternateur-transformateur principal et assure l'alimentation des auxiliaires de tranche, ainsi que le transformateur auxiliaire de réseau qui est destiné à alimenter les auxiliaires de tranche lors des démarrages.

3 Utilisation d'une machine synchrone en compensateur synchrone.

On appelle compensateur synchrone une machine synchrone tournant à vide dont la seule fonction est de consommer ou de fournir de la puissance réactive au réseau. C'est en ajustant le courant d'excitation qu'il est possible de fournir de l'énergie réactive (la machine est surexcitée) ou de consommer de l'énergie (si la machine est sousexcitée). De telles machines sont utilisées notamment pour fournir de l'énergie réactive lorsque le réseau est chargé, et pour absorber l'énergie réactive générée par les lignes lorsque la consommation est faible.



Compensateur synchrone triphasé de -200 à +300MVARs, 16 kV, 900 r/min, 60 Hz installé au poste de Lévis, Québec, pour régulariser la tension du réseau à 735 kV entre Churchill Falls et Montréal. Caractéristiques mécaniques: masse du rotor: 143 t; diamètre du rotor: 2670 mm; longueur axiale du fer: 3200 mm; longueur de l'entrefer: 39,7 mm.

4 Etude des machines brushless.

Le terme machine brushless regroupe l'ensemble des machines synchrones autopilotées associées à leur commande. Le terme «brushless» (sans balais) vient du fait qu'une partie de ces machines ont un comportement identique à une machine à courant continu, le convertisseur de puissance jouant le rôle de collecteur électronique.

Ces machines sont regroupées en deux grandes familles : les machines dont la f.e.m. est sinusoïdale et les machines dont la f.e.m. est non sinusoïdale. La structure de ces machines est identique, la forme de la f.e.m. étant directement liée à la répartition des spires sur le stator. Nous étudierons plus particulièrement la façon dont est obtenue la forme de la f.e.m. lors de l'étude d'une machine trapèze BG 63 55.

4.1 Remarque générale sur l'expression du couple.

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer le couple fourni par un convertisseur électromécanique. Nous avons vu en introduction qu'il était possible d'évaluer la valeur du couple fourni par une machine synchrone à partir de son diagramme de Behn Eschenbourg, en réalisant un bilan des puissances. Une telle méthode n'est malheureusement utilisable que pour une machine dont toutes les grandeurs sont sinusoïdales, et fonctionnant à vitesse fixe.

Il est également possible de raisonner non pas au niveau des puissances moyennes, mais au niveau des énergies mises en jeu dans une phase de la machine. Si nous raisonnons sur la phase 1, nous pouvons écrire :

$$u_1(t) = R \cdot i_1(t) + n \cdot \frac{d\phi_1}{dt} = R \cdot i_1(t) + n \cdot \frac{d(\phi_R + \phi_S)}{dt}$$

où

- n représente le nombre de spires de la phase 1
- $u_1(t)$ représente la tension aux bornes de la phase 1
- $i_1(t)$ représente le courant dans la phase 1

- Φ_1 représente le flux à travers la phase 1
- Φ_S représente le flux à travers la phase 1 du aux courants statoriques
- Φ_R représente le flux à travers la phase 1 du au champ d'induction rotorique

avec $\Phi_S = L_0 \cdot i_1(t) + M_{12} \cdot i_2(t) + M_{13} \cdot i_3(t)$ où L_0 représente l'inductance propre de la phase, M_{12} et M_{13} les mutuelles inductances entre la phase 1 et les phases 2 et 3.

On en déduit alors l'expression de $u(t)$:

$$u_1(t) = R \cdot i_1(t) + L_0 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{13} \cdot \frac{di_3}{dt} + n \cdot \frac{d(\Phi_R)}{dt}$$

$$u_1(t) = R \cdot i_1(t) + L_0 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{13} \cdot \frac{di_3}{dt} + e_1(t)$$

Où $e_1(t)$ est la f.e.m. induite par le champs rotorique dans la phase.

Si nous raisonnons maintenant en énergie, nous pouvons écrire :

$$u_1(t) \cdot i_1(t) \cdot dt = R \cdot i_1(t) \cdot i_1(t) \cdot dt + \left(L_0 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{13} \cdot \frac{di_3}{dt} \right) i_1(t) \cdot dt + e_1(t) \cdot i_1(t) \cdot dt$$

où

- $u_1(t) \cdot i_1(t) \cdot dt$ représente l'énergie électrique fournie à la phase pendant un temps dt
- $R \cdot i_1(t) \cdot i_1(t) \cdot dt$ représente l'énergie dissipée sous forme de pertes joules dans la phase pendant un temps dt
- $\left(L_0 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{13} \cdot \frac{di_3}{dt} \right) i_1(t) \cdot dt$ représente l'énergie électromagnétique stockée dans la phase pendant un temps dt
- $e_1(t) \cdot i_1(t) \cdot dt$ représente l'énergie restituée sous forme d'énergie mécanique pendant un temps dt

Il est alors possible d'obtenir l'expression du couple fournie par la phase 1 noté $c_1(t)$:

$$c_1(t) \cdot d\theta = e_1(t) \cdot i_1(t) \cdot dt \Rightarrow c_1(t) \cdot \frac{d\theta}{dt} = c_1(t) \cdot \Omega = e_1(t) \cdot i_1(t)$$

Si $\Omega \neq 0$, on peut écrire $c_1(t) = \frac{e(t) \cdot i_1(t)}{\Omega}$

Cette expression servira de base à notre réflexion lorsque nous souhaiterons élaborer des stratégies de commandes pour les machines brushless dont nous connaissons l'évolution des f.e.m. en fonction de la position pour une vitesse donnée.

4.2 Les machines brushless à forces électromotrices sinusoïdales

Les machines brushless à forces électromotrices sinusoïdales sont généralement triphasées, et présentent lors de leur rotation des f.e.m. sinusoïdales, dont les expressions sont de la forme :

$$\begin{cases} e_1(t) = K_\varphi \cdot \Omega \cdot \sin(\omega t) \\ e_2(t) = K_\varphi \cdot \Omega \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3(t) = K_\varphi \cdot \Omega \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

où

- K_φ est le coefficient de f.e.m. incluant notamment le nombre de spires par phase ainsi que l'amplitude du champ rotorique
- Ω est la vitesse de rotation

Si nous alimentons la machine par un système de trois courants triphasés de même pulsation ω que les f.e.m. (afin d'assurer le synchronisme entre le champ tournant statorique et le champ rotorique), ayant pour expression :

$$\begin{cases} i_1(t) = I \cdot \sin(\omega t - \beta) \\ i_2(t) = I \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \beta\right) \\ i_3(t) = I \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \beta\right) \end{cases}$$

il est alors possible de calculer le couple fourni par la machine :

$$c(t) = \frac{e_1(t) \cdot i_1(t) + e_2(t) \cdot i_2(t) + e_3(t) \cdot i_3(t)}{\Omega}$$

$$c(t) = \frac{1}{\Omega} \left(\begin{array}{l} K_\varphi \cdot \Omega \cdot \sin(\omega t) \cdot I \cdot \sin(\omega t - \beta) + \\ K_\varphi \cdot \Omega \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot I \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \beta\right) + \\ K_\varphi \cdot \Omega \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot I \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \beta\right) \end{array} \right)$$

$$c(t) = \frac{K_\varphi \cdot I}{2} \left(\begin{array}{l} \cos(\beta) \cdot \cos(2\omega t - \beta) + \\ \cos(\beta) \cdot \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} - \beta\right) + \\ \cos(\beta) \cdot \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} - \beta\right) \end{array} \right)$$

$$\text{or } \cos(2\omega t - \beta) + \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} - \beta\right) + \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} - \beta\right) = 0$$

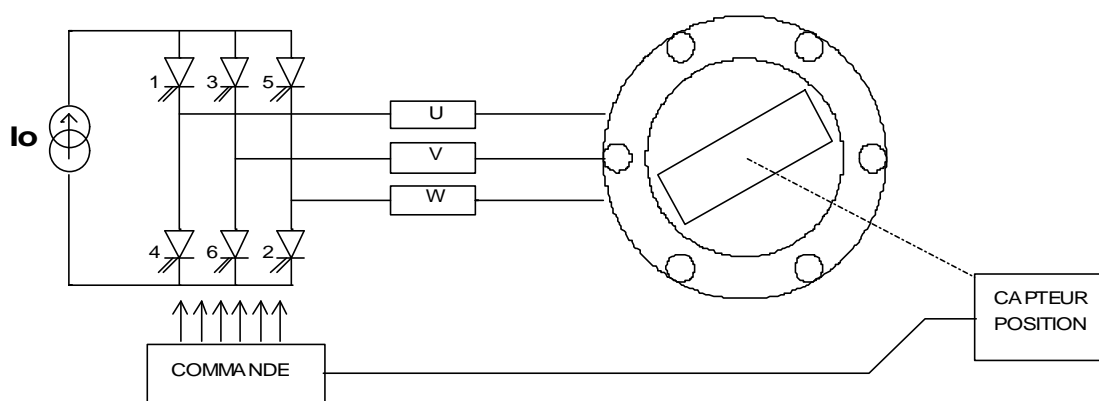
$$\text{d'où } c(t) = \frac{3 \cdot K_\varphi \cdot I}{2} \cdot \cos(\beta)$$

Si l'on souhaite maximiser le rapport couple / pertes joules, il faut travailler à $\cos(\beta)$, c'est à dire qu'il faut injecter dans les phases de la machine des courants en phase avec les f.e.m. L'expression

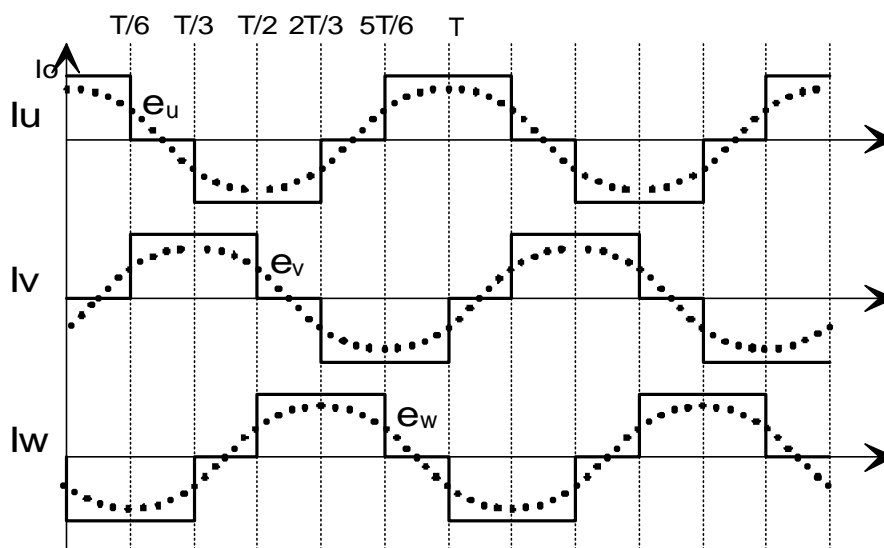
des forces électromotrices étant directement lié à la position du rotor $e(t) = n \cdot \frac{d\phi_R}{dt} = n \cdot \frac{d\phi_R}{d\theta} \cdot \Omega$, il est nécessaire de synchroniser les formes d'ondes de courant sur la position du rotor : la machine doit être autopilotée.

4.2.1 Alimentation par commutateur de courant

Surtout utilisée en forte puissance (jusqu'à plusieurs centaines de MW), la machine est alimentée par une source de courant, les interrupteurs statiques ayant pour rôle 'd'aiguiller' le courant vers les bonnes phases, et ceci en fonction de la position du rotor. La structure du montage est donnée ci-dessous :



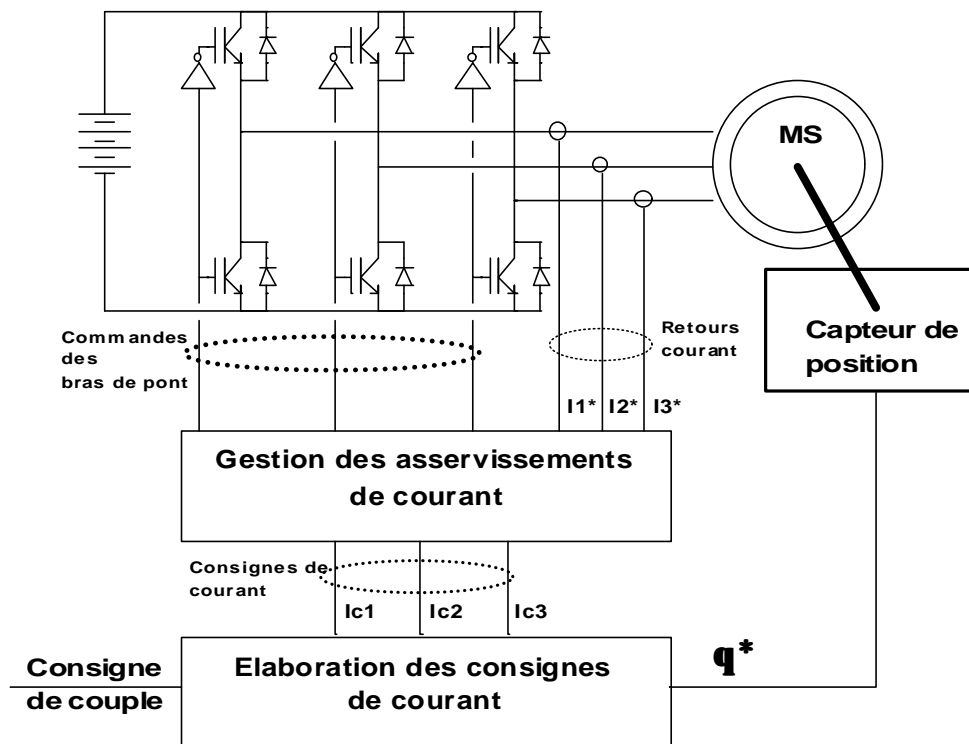
La commutation des interrupteurs est telle que les formes d'ondes des courants sont les suivantes :



Le couple étant proportionnel à la somme des produits $e_i(t) \cdot i_i(t)$, il apparaît au niveau de la machine une ondulation de couple due à la présence d'harmonique de courant. Il est donc nécessaire lors de la mise en œuvre d'un tel système de s'assurer que la fréquence de l'ondulation de couple ainsi générée ne correspond pas à une fréquence de résonance mécanique du système.

4.2.2 Commande scalaire en courant

Le principe de la commande scalaire en courant est assez proche de celui de l'alimentation par commutateur de courant. Au lieu d'utiliser une source de courant continu qui ne peut injecter dans les phases de la machine que des créneaux de courant, on utilise une source de tension alimentant un onduleur triphasé, le courant de sortie de chaque bras étant asservi à une consigne fournie par la commande. L'ensemble de la motorisation peut être représenté sous la forme suivante :



Le bloc élaboration des consignes génère trois consignes de courant sinusoïdales, synchronisées sur la position. L'amplitude de ces consignes est proportionnelle au niveau de couple souhaité. Il est nécessaire de connaître de façon beaucoup plus fine la position du rotor que pour une commande utilisant un commutateur de courant, où il n'est nécessaire que de repérer les positions correspondants au changement d'état des interrupteurs.

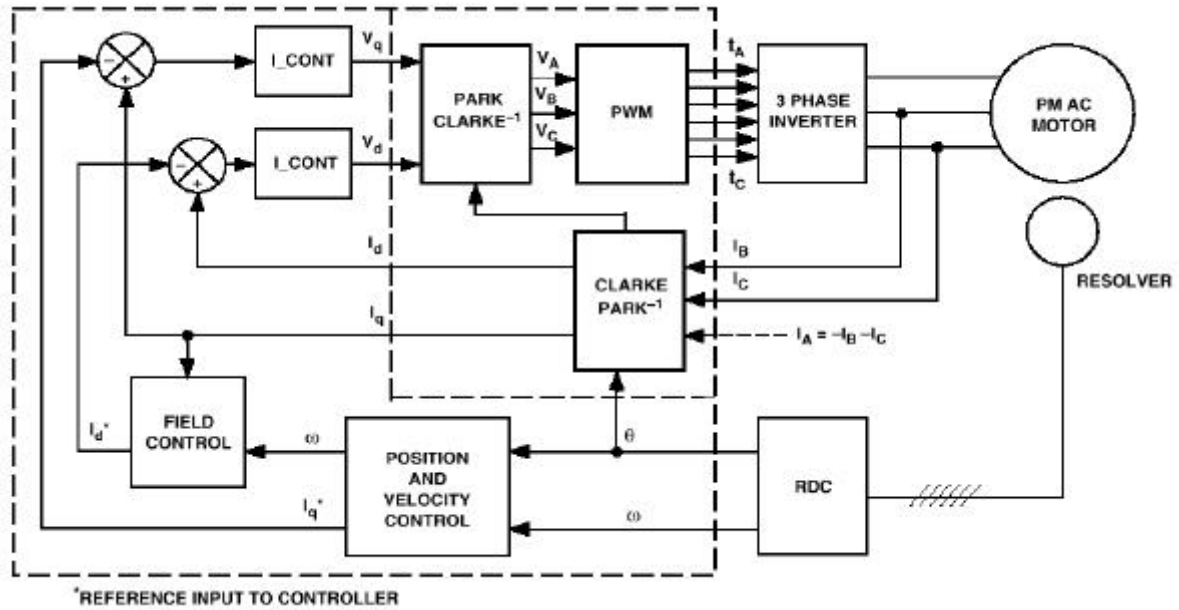
Le bloc gestion des asservissements assure le contrôle de chaque bras de l'onduleur afin de minimiser l'erreur entre les consignes de courant et les courants observés au niveau du moteur. Les correcteurs utilisés peuvent être de type hystérésis, proportionnel ou encore proportionnel et intégral, moyennant certaines précautions.

Un tel mode contrôle du moteur donne des résultats satisfaisants, notamment en régime permanent si la pulsation d'alimentation du moteur est inférieure à la bande passante des boucles de courant.

4.2.3 Commande vectorielle

Les commandes vectorielles pour machine synchrone ont été développées afin d'améliorer les performances en régime dynamique. Les courants injectés dans la machine ne sont pas directement contrôlés comme dans la commande scalaire, mais la commande calcul des grandeurs intermédiaires images de la projection du champ statorique sur l'axe du champ rotorique et sur un axe perpendiculaire au champ rotorique. Le contrôle de ces grandeurs permet un contrôle fin de la

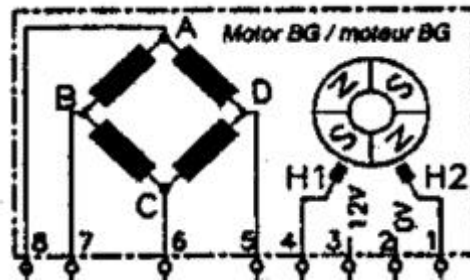
position du champ magnétique statorique, notamment en régime transitoire. La structure d'une telle commande est particulièrement complexe, comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous :



Néanmoins, les industriels nous proposent des variateurs et des composants facilitant grandement sa mise en œuvre.

4.3 Les machines brushless à répartition non sinusoïdale de flux : étude d'une commande d'axe

Afin d'appréhender le fonctionnement des machines brushless à répartition trapézoïdale de flux, nous allons étudier une commande d'axe basée sur l'utilisation d'une machine brushless de type BG 63 55 de chez MDP. Il s'agit d'une machine à tétraphasée dont les principales caractéristiques sont données ci-dessous :

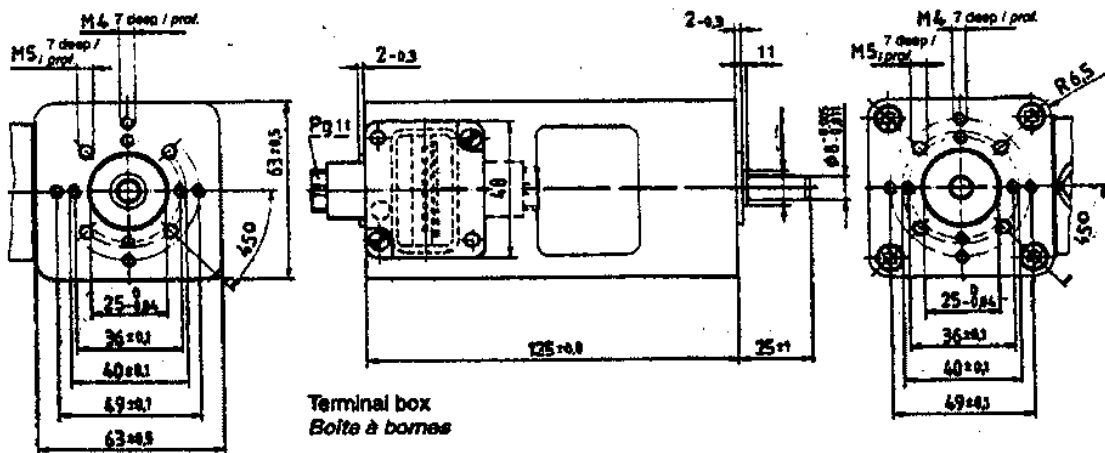


Performance Data
Caractéristiques techniques

All values relate to 1) $\vartheta_w = \vartheta_R = 20^\circ\text{C}$ or 2) $\Delta\vartheta_w = 110\text{ K}$ and operation with the BGE 2406 A standard electronics (power consumption 100 mA) plus a 1-m-long connecting cable ($\vartheta_w =$ winding temperature, $\vartheta_R =$ room temperature).

Toutes les valeurs se réfèrent à 1) $\vartheta_w = \vartheta_R = 20^\circ\text{C}$ ou 2) $\Delta\vartheta_w = 110\text{ K}$ et en service avec électronique standard BGE 2406 A (consommation propre 100 mA) et câble de raccordement d'1 m ($\vartheta_w =$ température de bobinage, $\vartheta_R =$ température ambiante).

Motor series · Moteurs série	BG 63 x 50			
Nominal voltage · Tension nominale	V	24	40	60
Nominal speed · Vitesse nominale	min^{-1}	2) 3300	3650	3250
Nominal torque · Couple nominal	Ncm	2) 18	18	18
Nominal current · Courant nominal	A	2) $\leq 4,5$	$\leq 2,9$	$\leq 1,8$
Demagnetization current · Courant de démagnétisation	A	1) 32	19,8	12,4
No load speed · Vitesse à vide	min^{-1}	1) 3950	4100	3850
No load current · Courant à vide	A	1) $\leq 0,66$	$\leq 0,44$	$\leq 0,31$
Starting torque · Couple de démarrage	Ncm	1) ≥ 110	≥ 140	≥ 125
Nominal power · Puissance nominale	W	2) 62,2	68,8	61,3
Efficiency · Rendement	%	2) 65	67,5	68
Moment of inertia · Inertie du rotor	gcm^2	600	600	600
Weight · Poids	kg	1,95	1,95	1,95



Nous remarquons sur le schéma du bornier la présence de deux sondes à effet hall, ces sondes jouent le rôle de capteur de position. Les informations fournies par ces sondes permettront le séquençage de la commande, et donc l'autopilote.

4.3.1 Structure du moteur

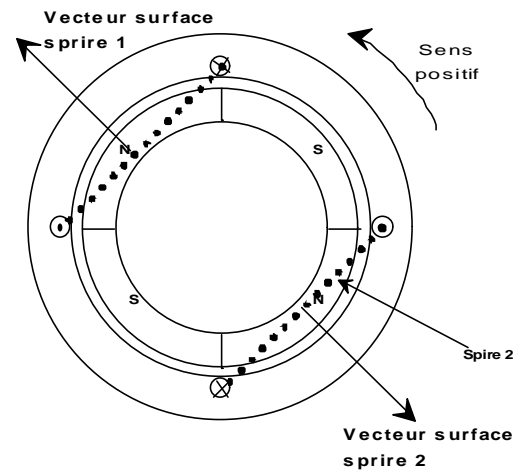
Le figure ci-contre représente une coupe de la machine où il a été représenté deux spires appartenant à la même phase, ainsi que leurs vecteurs surface associés.

Par convention, nous poserons :

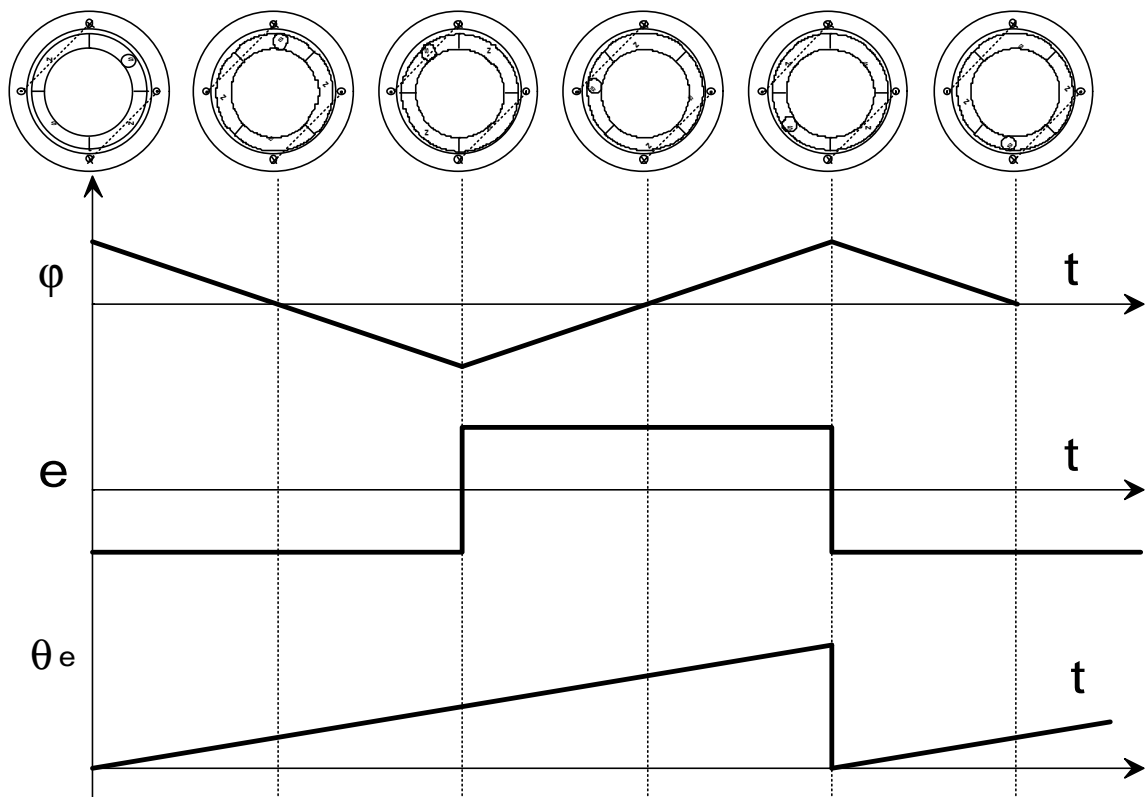
- que les aimants repérés N génèrent un champ B 'sortant'.
- que les aimants repérés S génèrent un champ B 'entrant'.

On en déduit :

- Les aimants repérés N génèrent un flux positif dans la phase 1
- Les aimants repérés S génèrent un flux négatif dans la phase 1

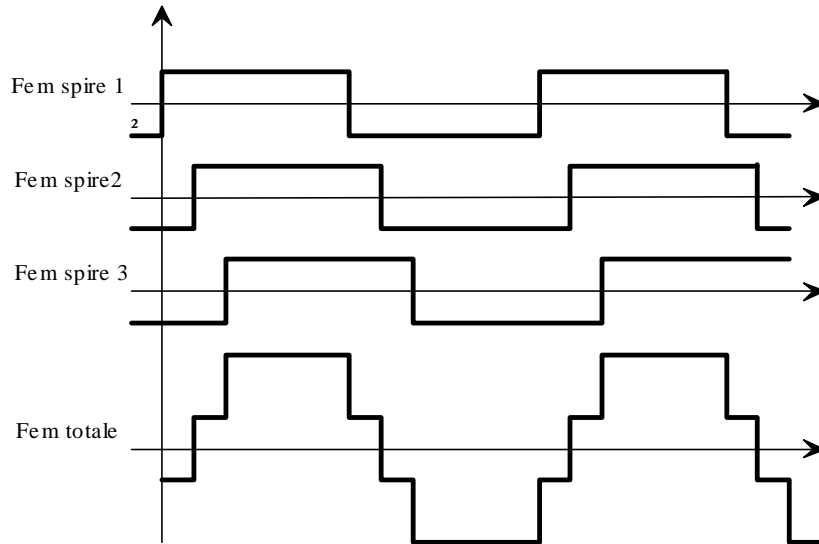
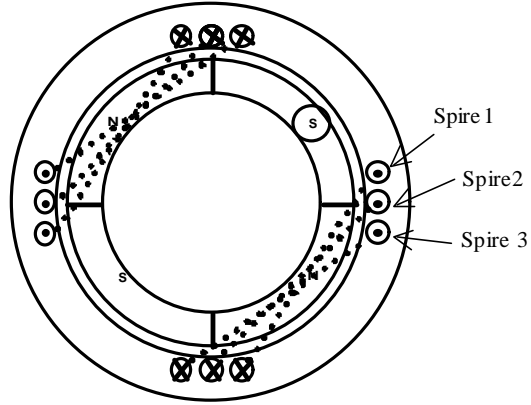


Il est alors possible de trouver l'expression de la f.e.m. induite dans une spire au cours de la rotation du rotor : $e = n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = n_1 \cdot \frac{d\phi_R}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = n_1 \cdot \frac{d\phi_R}{d\theta} \cdot \Omega$. Au cours de la rotation, le flux dû au champ rotorique à travers une spire évolue linéairement en fonction de la position du rotor. Il est alors possible de tracer les chronogrammes d'évolution du flux, de la f.e.m. et de la position en fonction du temps, pour un sens de rotation positif :

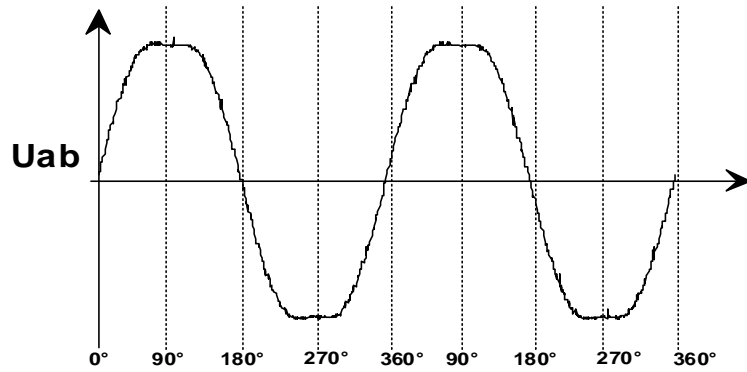


La tension aux bornes d'une phase de la machine résulte de la mise en série de spires placées dans différentes encoches au niveau du stator. La f.e.m. induite au niveau d'une phase est donc la somme

de f.e.m. élémentaires de forme rectangulaire. Si les spires d'une même phase sont réparties régulièrement, la f.e.m. résultante est alors trapézoïdale :



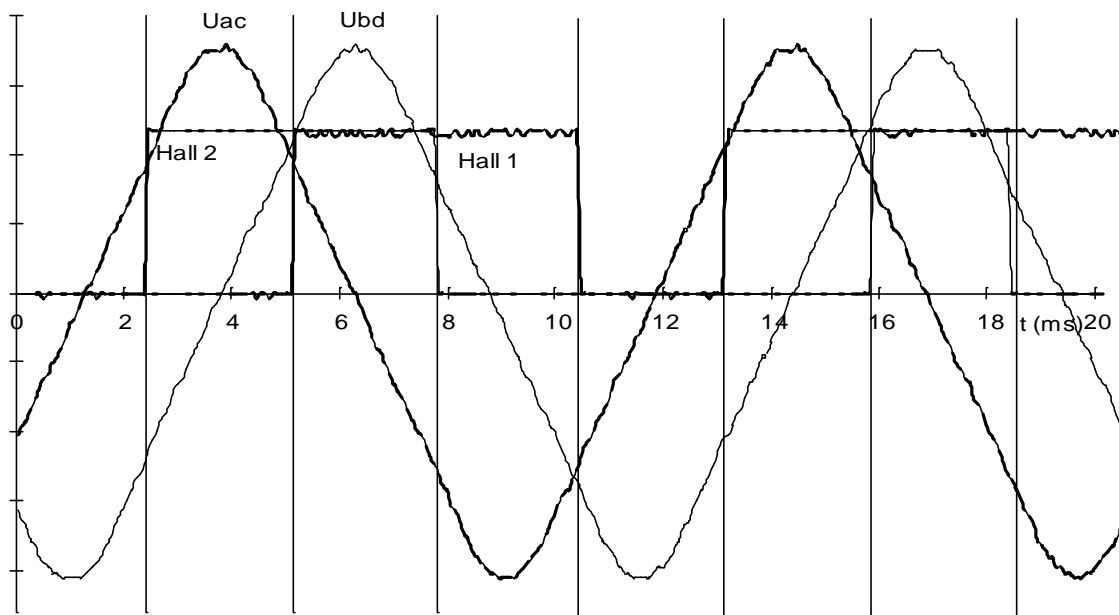
Sur notre machine, les f.e.m. simples (U_{ab} , U_{bc} , U_{bd} et U_{da}) présentent des formes d'ondes très proches de trapèzes :



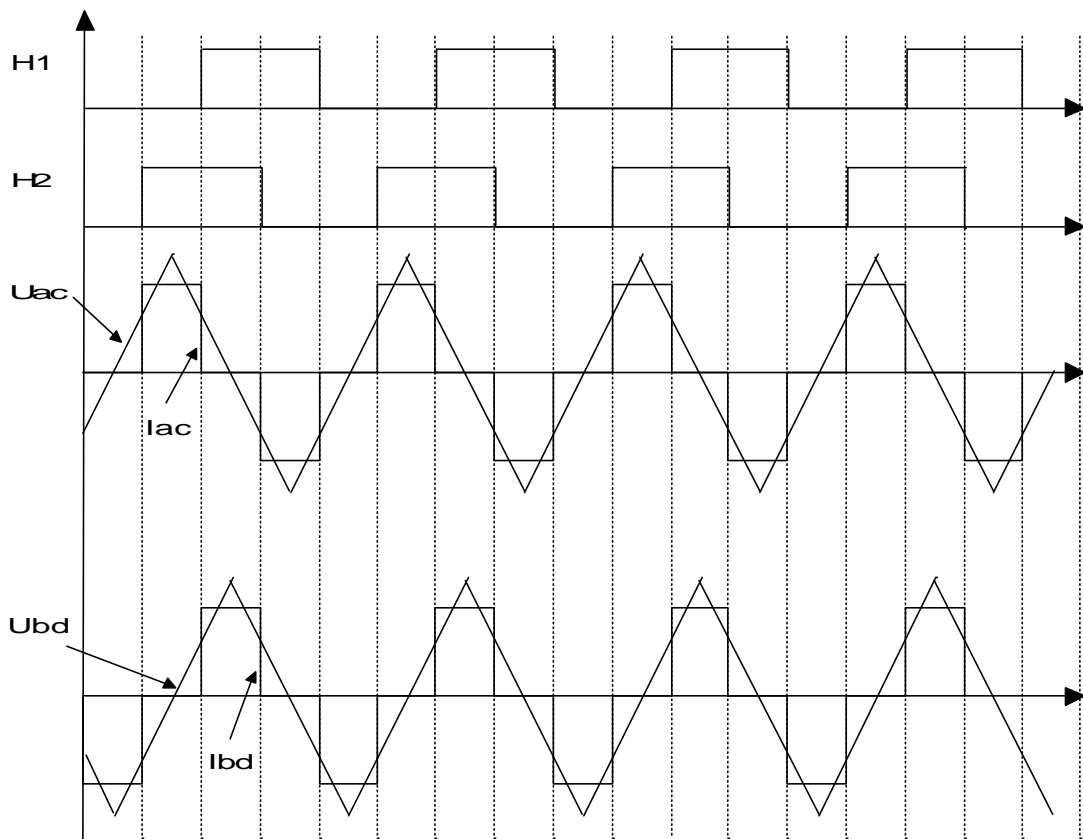
4.3.2 Choix d'une stratégie de commande.

Nous devons définir une stratégie de commande permettant d'obtenir un couple aussi constant que possible, et ceci en minimisant autant que possible les pertes joules. Nous avons vu précédemment que le couple fourni par une phase de la machine peut s'exprimer, si la vitesse de rotation n'est pas nulle, par l'expression suivante : $c(t) = \frac{e(t).i(t)}{\Omega}$. Il est donc souhaitable d'injecter du courant dans les phases de la machine lorsque le f.e.m. est maximale, ceci afin de maximiser le couple à pertes joules données.

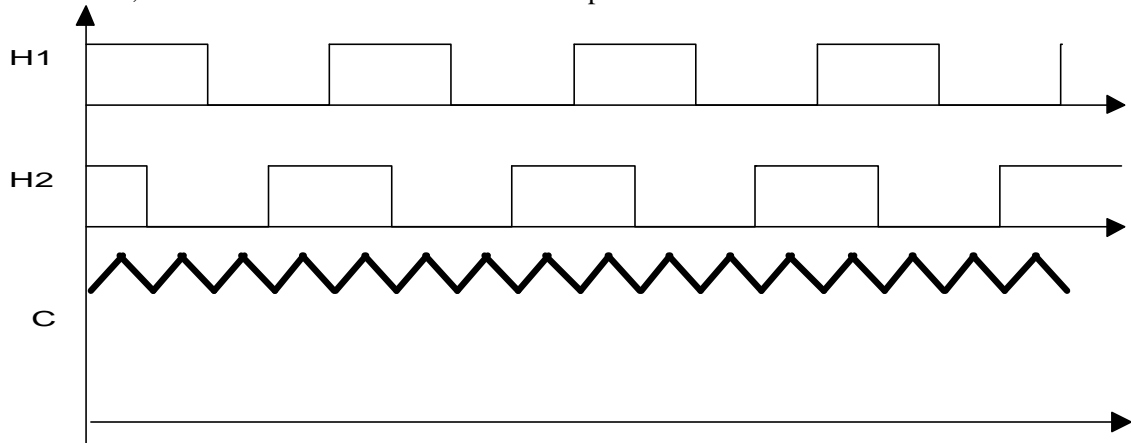
De par sa constitution et le placement des sondes à effet hall, seule une stratégie de commande basée sur l'étude des f.e.m. composées est possible. Le chronogramme ci-dessous donne les f.e.m. composées ainsi que les signaux issus des sondes à effet hall pour un sens de rotation positif :



Il est alors facile de déterminer les courants à injecter dans la machine afin d'obtenir un fonctionnement satisfaisant, en synchronisant les formes d'ondes d'alimentation sur les changements d'états des sondes à effet hall :

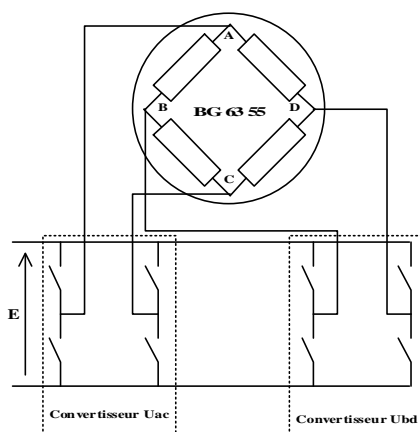


On constate malheureusement que durant les phases d'alimentations, les produits $e(t).i(t)$ ne sont pas constants, il en résulte une ondulation sur le couple instantané :

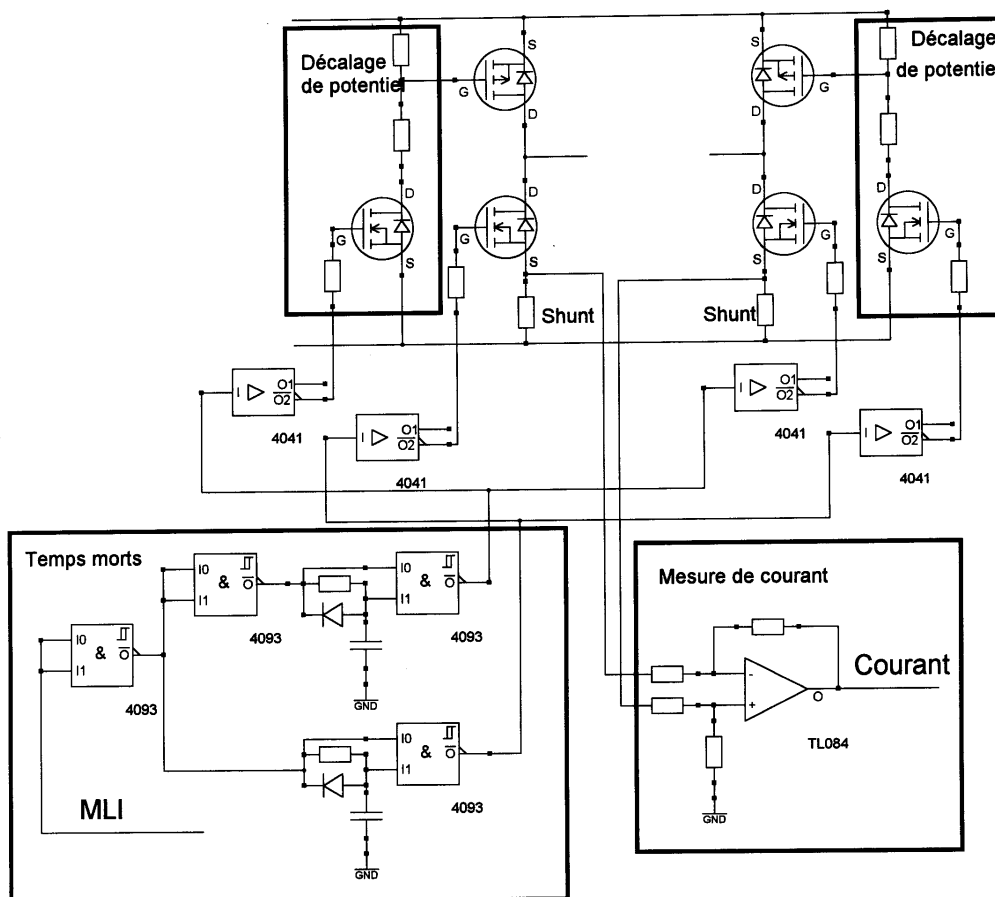


4.3.3 Structure du convertisseur d'alimentation.

On remarque lors de l'analyse des formes d'ondes de courant que les deux courants I_{ac} et I_{bd} ne sont jamais présents simultanément. Il est donc possible de dissocier totalement les alimentations sur AC et sur BD. La structure retenue est la suivante :



Les puissances mises en jeu étant relativement faibles, le fabricant a choisi d'utiliser des transistors MOS complémentaires afin d'éviter la mise en place d'isolation galvanique dans la commande des transistors du haut, et de réaliser la mesure du courant dans chaque phase à l'aide de shunts :



Les quatre portes 4093 ont pour objet de générer les temps morts. Les temps morts sont obtenus grâce aux circuits R C D qui ralentissent la montée de la tension sur les entrées I1 des portes 4093, et retardent donc leur commutation.

Les transistors du haut de chaque bras de pont sont commandés à la fermeture à l'aide d'un montage de décalage de potentiel. Lorsque le transistor driver de ce montage est passant, il apparaît

entre la grille et source des transistors de puissance une tension fixée par le diviseur potentiométrique constituant le montage.

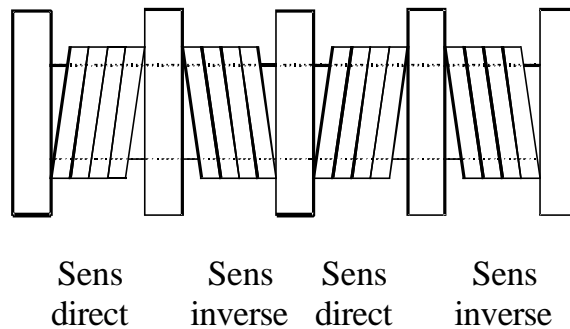
Le courant dans la charge est reconstitué par le montage différentiateur réalisé à l'aide d'un TL084.

4.3.4 Utilisation d'un shunt en capteur de courant.

Les shunts sont généralement utilisés dans des applications de faible puissance, où le critère de coût est prépondérant. Il s'agit alors soit de résistances de puissance bobinées ou à couche, soit de véritable shunt réalisé en manganite (Cuivre Nickel Magnésium).

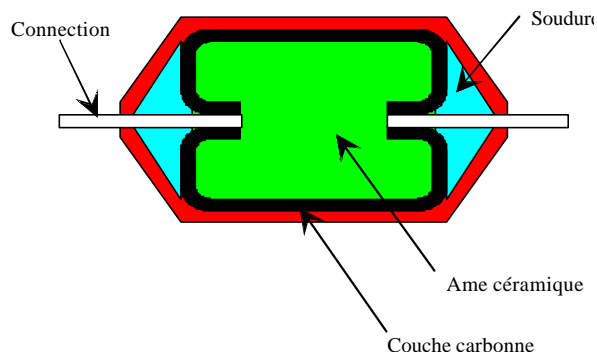
Les shunts en manganite présente l'avantage de posséder un coefficient de température relativement faible (sa résistance varie peu en fonction de sa température), mais sont généralement réservés pour les mesures de très fortes intensités (plusieurs milliers d'ampères).

Les résistances bobinées sont constituées d'un fil de cuivre disposé sur un support. Elles peuvent être utilisées lorsque la puissance dissipée par le shunt est relativement importante (forte intensité). En effet, si l'on souhaite une tension de 100 mV aux bornes du shunt pour un courant de 100A, la puissance dissipée dans le shunt vaut alors $P=U.I=0.1*100=10W$. Dans ce cas (10W à dissiper), il est difficile de trouver une autre technologie de résistance. Malheureusement, de part leur constitution ces résistances sont généralement inductives (spires bobinées) ce qui limite leur fréquence maximale d'utilisation (quelques centaines de hertz). Si l'on souhaite mesurer des courants présentant une composante alternative à relativement haute fréquence, il est nécessaire alors d'utiliser des résistances bobinées dites non inductive ou à bobinage alterné :



La fréquence maximale d'utilisation est alors à considérer au cas par cas, à partir de la documentation constructeur de la résistance.

Les résistances à couche sont obtenues en déposant sur un support une couche homogène d'un matériau résistif :

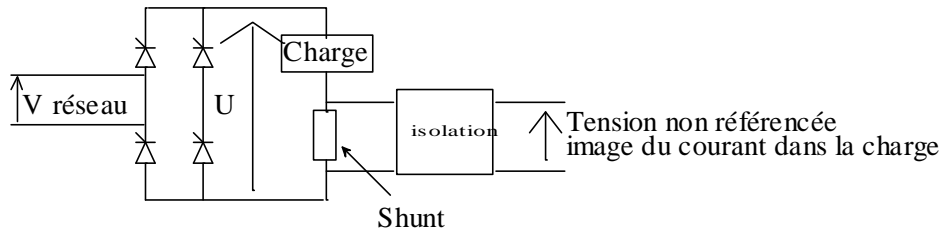


L'absence de spire réduit de façon très importante l'inductance parasite présentée par la résistance. Ceci permet de les utiliser à des fréquences beaucoup plus élevées que des résistances bobinées (plusieurs mégahertz), et réduit les risques de surtension si le convertisseur statique utilisé impose de fortes discontinuités de courant dans le shunt.

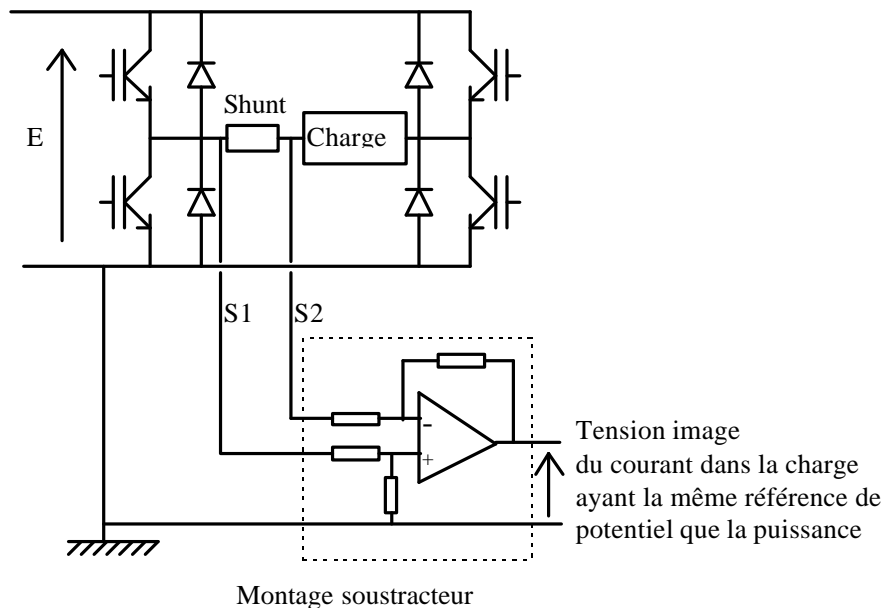
4.3.4.1 Utilisation d'un shunt.

La mise en place d'un shunt est rendue difficile par l'absence d'isolation galvanique entre le circuit de puissance et l'information issue du capteur (la tension est prélevée directement aux bornes du shunt, et à donc des potentiels communs avec le circuit de puissance). Selon les puissances mises en jeu et la structure du convertisseur de puissance, il peut être utile de prévoir une isolation galvanique de la mesure.

☞ Exemple de montage avec isolation galvanique de la mesure



☞ Exemple de montage sans isolation galvanique de la mesure (alternative au montage proposé dans l'étude de la commande d'axe).

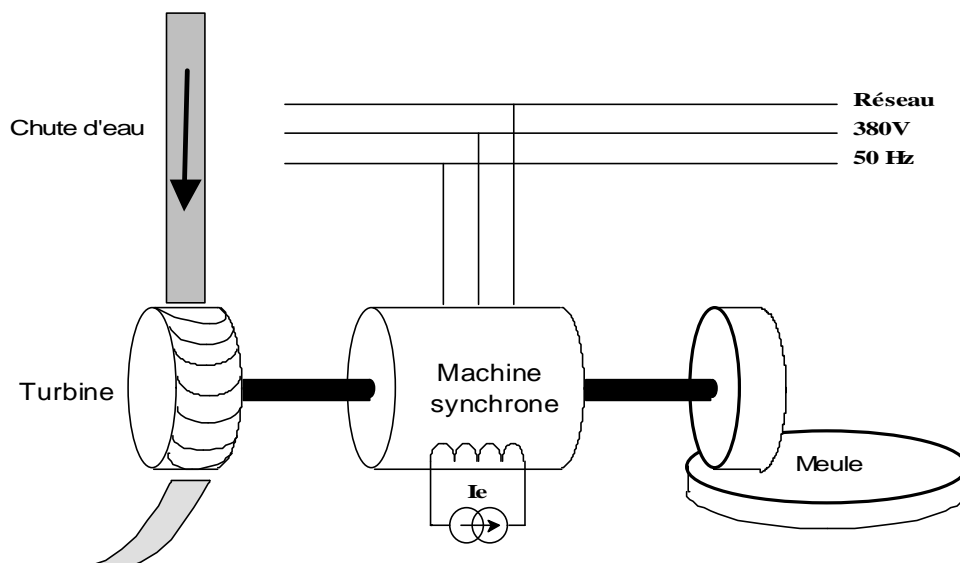


La présence du montage soustracteur est nécessaire, le shunt n'ayant aucune de ces bornes à un potentiel fixe. En effet, de 0 à αT , le potentiel du point S1 est égal à E et du point S2 à E+R.I, alors que de αT à T, le potentiel du point S1 est égal à 0 et du point S2 à R.I. Dans tous les cas, la sortie du montage soustracteur est proportionnelle à RI, et donc au courant dans la charge.

5 Exercice autocorrectif. Etude d'une motorisation d'axe.

5.1 Etude de la Motorisation d'un moulin.

Un moulin destiné à produire de la farine est entraîné par une turbine hydraulique et une machine synchrone reliée au réseau. L'ensemble turbine + machine synchrone + meule est sur un même axe. La puissance nécessaire au bon fonctionnement du moulin est de 80 kW. La puissance mécanique fournie par la turbine varie entre 0 et 170 kW selon le débit d'eau dans la conduite d'alimentation. La figure ci-dessous donne une vue d'ensemble du système :



☞ On négligera toutes les pertes et frottements.

I/ Sachant que la machine est directement reliée au réseau, justifier l'utilisation d'une machine synchrone pour une telle application.

II/ Afin de compenser la consommation d'énergie réactive de l'ensemble de l'installation, la machine synchrone doit fournir au réseau une puissance réactive Q de 36kVAR

1. Calculer l'énergie active que doit renvoyer au réseau la machine lorsque la turbine nous fournit 100% de sa puissance.
2. Calculer l'énergie active que doit absorber au réseau la machine lorsque la turbine ne nous fournit pas de puissance.
3. En déduire la puissance apparente minimale de la machine synchrone.

III/ La machine installée à une puissance apparente de 120 kVA, est montée en étoile sur un réseau 380V 50Hz. Sa réactance cyclique à 50 Hz (réactance de Behn Eschenbourg) est $L_c\omega=1.95\Omega$. Ses résistances sont négligées. Elle est hexapolaire ($p=3$).

Lorsque la turbine nous fournit 170 kW,

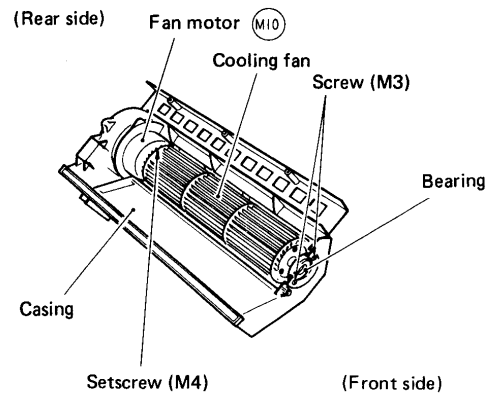
1. Calculer le courant absorbé par une phase de la machine
2. Calculer le déphasage φ entre la tension aux bornes d'un enroulement de la machine et le courant de phase.
3. Tracer avec autant d'exactitude que possible le diagramme de Behn Eschenbourg

4. Evaluer graphiquement la f.e.m à vide nécessaire pour ce point de fonctionnement
5. Vérifier par le calcul la valeur de la fem.

5.2 Etude du système de ventilation principal d'un photocopieur.

Nous allons étudier la motorisation du ventilateur principal d'un photocopieur. Il s'agit d'un ventilateur de type cylindrique. L'étude des pertes de charges en régime qui permettrait de définir la puissance nécessaire ne sera pas réalisée, la structure du système de ventilation étant particulièrement difficile à définir.

Les données relatives à cette motorisation sont données en annexe. La principale particularité de ce moteur est d'avoir le stator à l'intérieur du rotor. On parle alors de rotor 'cloche'. Lors de tous raisonnements sur les phénomènes liés à la rotation du rotor, il faudra tenir compte de cette particularité.



☞ Dans toute l'étude, nous prendrons comme condition initiale la position définie sur la figure 10-3-13 et nous considérerons comme sens de rotation positif celui défini sur cette figure.

I/ Etude des forces électromotrices induites dans les phases de la machine lors de la rotation du rotor.

Nous savons que la forme des f.e.m. induites dans le stator par la rotation du champ magnétique rotorique est directement liée à la position du rotor. Le capteur de position utilisé est constitué de trois sondes à effet hall, judicieusement placées. (Voir Fig 10-3-13)

I.1/ Sachant que le signe de la tension délivré par une sonde à effet hall dépend du sens du champ magnétique qui la traverse, compléter les chronogrammes de Hall A, Hall B et Hall C sur le document réponse.

☞ Le sens du champ magnétique rotorique dépend de la polarité de l'aimant (N ou S) considéré.

I.2/ Le chronogramme de l'évolution du flux magnétique du aux aimants rotoriques dans la phase U en fonction de la position est donné sur le document réponse. On constate que plus la proportion d'aimant de polarité N se trouve en face de la phase, plus le flux augmente ; et plus la proportion d'aimant de polarité S se trouve en face de la phase plus le flux diminue. En appliquant ce raisonnement, compléter les chronogrammes d'évolution du flux pour les phases V et W.

I3/ En déduire la forme des forces électromotrices induites dans les phases (compléter le document réponse).

I4/ Définir alors les formes de courant à injecter dans les différentes phases.

II Etude de la carte de commande.

Le moteur à été conçu de façon à être alimenté en tension. La résistance des phases est telle que la constante de temps électrique est très faible, et on peut considérer que le courant est contrôlé par la tension d'alimentation.

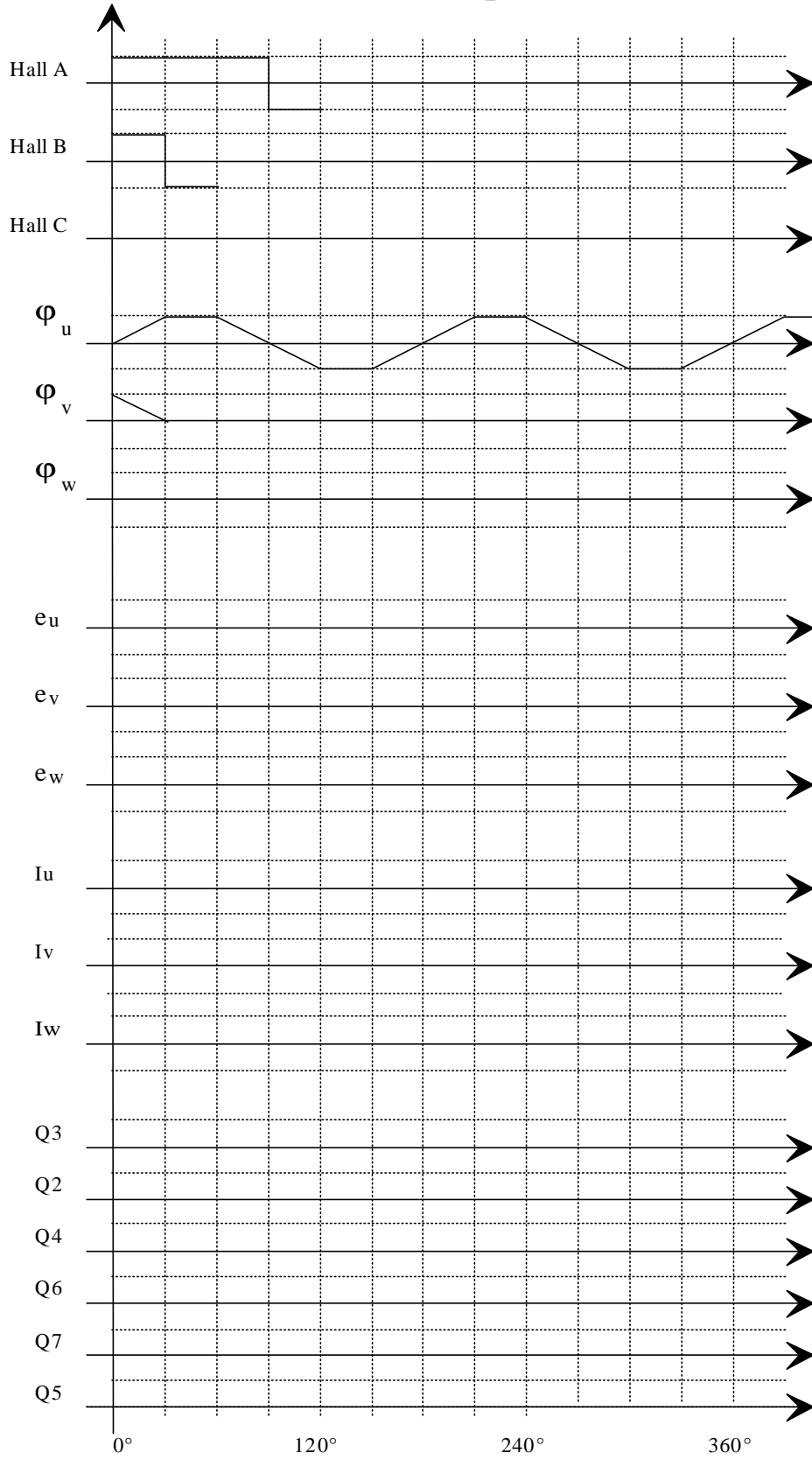
II.1/ Définir le rôle du bloc B0.

II.2/ Les trois phases sont alimentées par trois bras ponts constitués par les couples de transistors (Q3,Q6), (Q2,Q7), (Q4,Q5). Les transistors Q11, Q12 et Q13 assurent le décalage des potentiels de commande des transistors du haut, ceci afin d'éviter la présence d'une isolation galvanique dans la commande rapprochée de ces transistors. En conservant le repérage des phases de la figure10-3-14, compléter les chronogrammes de conduction des différents transistors de puissance (compléter le document réponse).

II.3/ En déduire les équations logiques de conduction des transistors de puissance en fonction des signaux issus des sondes à effet Hall.

(Nous noterons H le signal issu d'une sonde s'il est positif, \overline{H} le signal issu d'une sonde s'il est négatif)

Document réponse



Annexes

An IC Motor is also known as a brushless motor because the functions of the brush and commutator are performed by Hall elements and a drive circuit.

Features

1. Because there are no brushes used, the life of the motor is extended.
2. There is no noise (which would otherwise be generated by brushes).

Principle of operation

Here, a description of an outer-rotor type 4-pole motor is given. The principal operation is identical to that of an inner-rotor type motor or a motor having other than 4-poles. The rotor is fitted with a permanent magnet arranged as 4-poles around the periphery. As shown in Fig. 10-3-13, the windings are arranged as 2-pole, 3-phase in the 6 slots of the stator. One end of each phase winding is connected to a common point internally, forming a star connection. See Fig. 10-3-14.

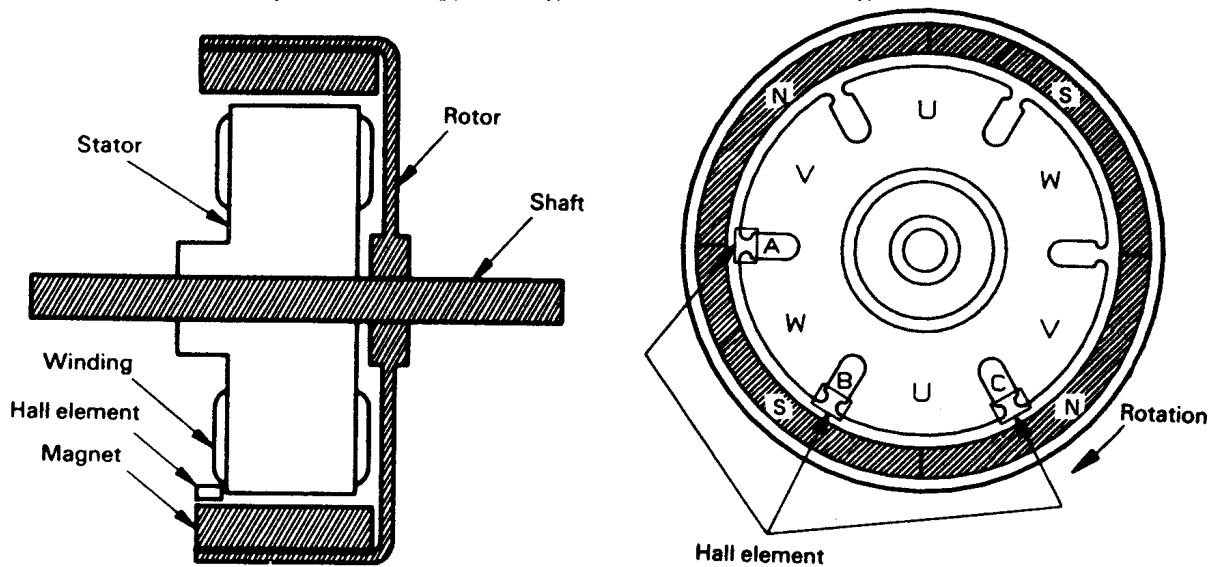


Fig. 10-3-13 Structure of IC Motor

Because the windings are connected in a star configuration, they are excited in combinations of two at a time. There are a total of six combinations, and the condition of the poles in each case is as shown in Fig. 10-3-15.

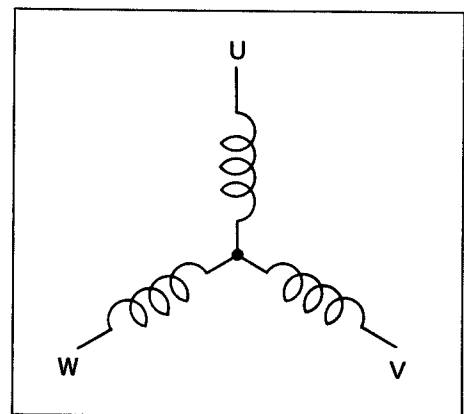


Fig. 10-3-14 Windings (Star Connection)

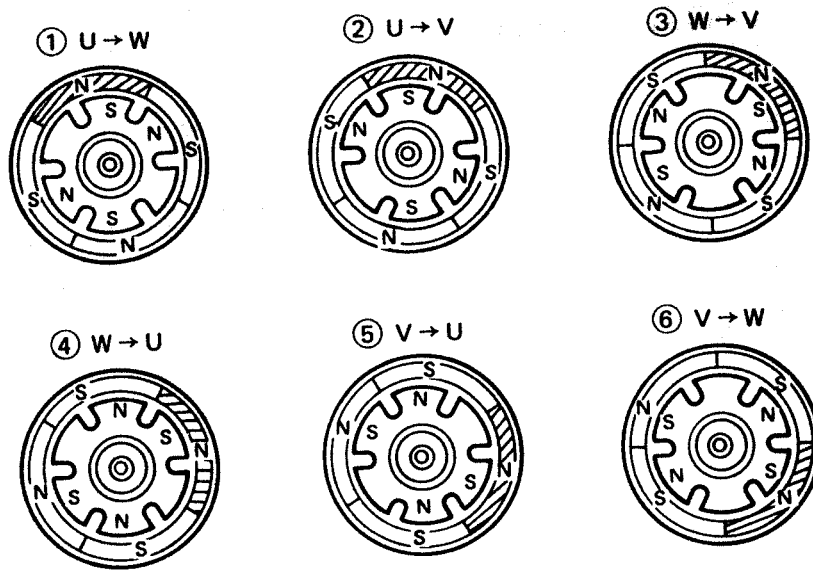


Fig. 10-3-15 Condition of Poles When Each Phase is Excited

When the windings are excited in the sequence 1,2...6 as shown in Fig, 10-3-15, the interaction of the magnetic field produced by the windings and the magnetic field of the magnet causes the rotor to rotate 180° in 30° steps. If the windings are excited in the sequence 6..5...1, the rotor will rotate in the reverse direction.

As shown in Fig, 10-3-13, three Hall elements are located in the vicinity of the magnet at 60° intervals on the periphery of the stator. When a Hall element is placed in a magnetic field and a current passed through it, a voltage (Hall voltage) proportional to the flux density and the current will be generated. If the direction of either the magnetic flux or the current is reversed, the polarity for the Hall voltage is changed.

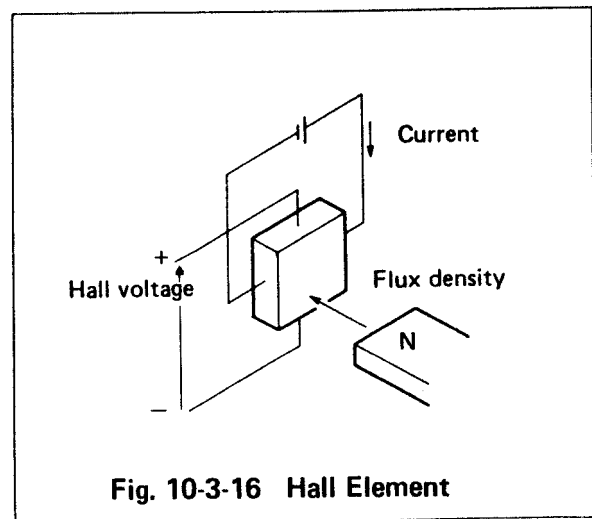
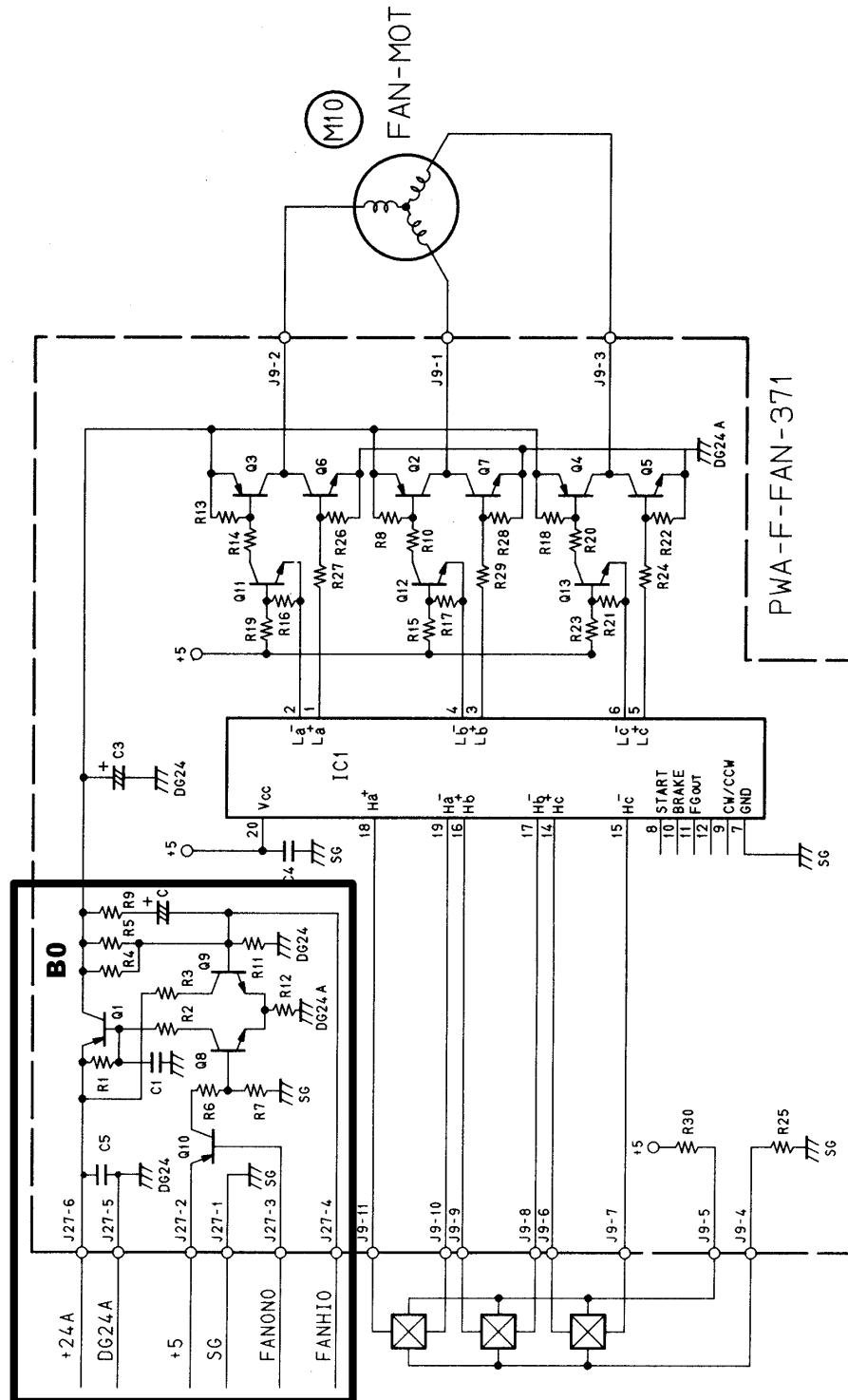


Fig. 10-3-16 Hall Element

« The fan motor changes its revolution speed when the machine is ready to copy and when it is actually copying. If the load is constant, the revolutionary speed of the IC motor is almost proportional to the applied voltage. Therefore the revolution speed is changed here by altering the applied voltage. When the machine is ready to copy, FANONO signal drops to "L" level, Q1 0, Q8 and Q1 in the fan-drive PC board come on, voltage is applied to the emitters of Q3, Q2 and Q4, and the motor starts to turn. At that time, Q9 also comes on because FANH IO signal is "H". As the total of the emitter current of Q8 and Q9 is kept almost constant, the Q8 collector current, i-e, Q1 base current is restricted by Q9 coming on, the Q1 collector voltage is kept at about 15V and the motor turns at a low speed. Further, at the start-up time, C2 is charged by the route of R9 ~ C2 ~ Q9 ~ R12 and rising of the Q1 collector voltage is slowed to prevent overcurrent. When the machine is copying, FANHIO signal drops to the "L" level and Q9 goes off. Therefore the Q8 collector current increases, Q1 is

saturated, nearly 24V is applied to the emitters of Q3, Q2 and Q4, and the motor turns at a high speed. »

4-4 Fan Drive Circuit (FAN)



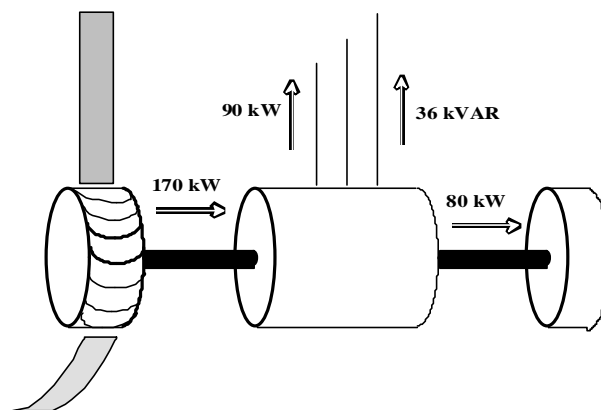
6 Correction exercices autocorrectifs.

6.1 Etude de la Motorisation d'un moulin.

1/ La machine étant connectée au réseau, sa vitesse de rotation en fonctionnement normal est donc fixée par la pulsation du réseau. La meule étant solidaire de l'axe de la machine, la présence de la machine synchrone fixe la vitesse de rotation de la meule.

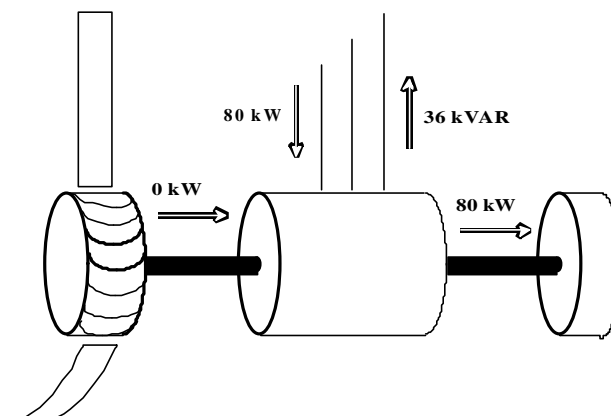
De plus, nous avons vu dans le cours qu'une machine synchrone est susceptible de fonctionner dans les quatre électriques. Il va donc être possible à l'aide de la machine synchrone **d'adapter la puissance active** fournie par la turbine à la meule. Si la puissance en sortie de la turbine est supérieure à la puissance nécessaire au bon fonctionnement du moulin, la machine va renvoyer au réseau le surplus de puissance active. Si la puissance en sortie de la turbine est inférieure à la puissance nécessaire au bon fonctionnement du moulin, la machine synchrone va fournir à la meule le complément de puissance active nécessaire. De même, il va être possible d'utiliser la machine synchrone pour fournir de la puissance réactive au réseau, ce qui évitera d'avoir à placer des condensateurs afin de compenser l'énergie réactive consommée par le reste de l'installation.

II/ 1/ Lorsque la turbine nous fournit 100% de sa puissance, les échanges de puissances sont les suivants



La puissance fournit au réseau est donc de $170-80=90\text{kW}$

2/ Lorsque la turbine ne nous fournisse pas de puissance, les échanges de puissance sont les suivants



La puissance absorbée au réseau est donc de 80 kW

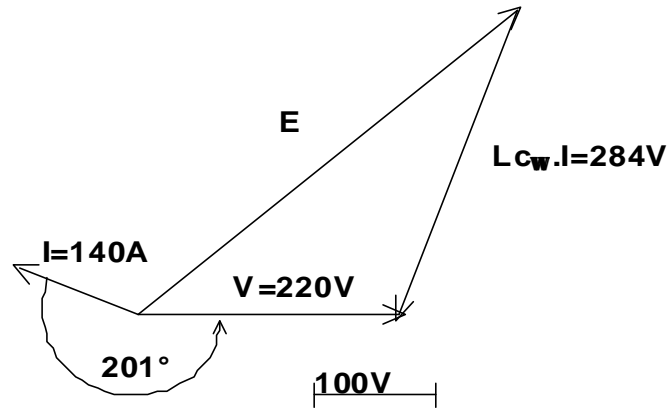
3/ Nous allons évaluer la puissance apparente dans le cas le plus défavorable, c'est à dire lorsque la machine fonctionne en générateur. La puissance apparente est alors de $S = \sqrt{90^2 + 36^2} = 97\text{kVA}$.

III/

1/ Lorsque la turbine nous fournit 170 kW, la puissance apparente fournie au réseau est de 97 kVA. Or $S = 3.V.I \Rightarrow I = \frac{S}{3.V} = \frac{97000}{3 * 220} = 146\text{A}$

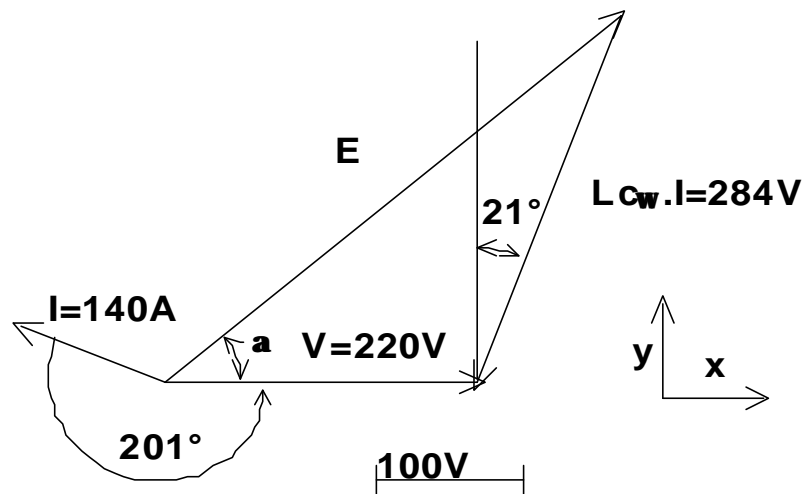
2/ Il est possible de définir φ à partir des puissances actives et réactives (exprimées en convention récepteur) : $\begin{cases} P = 3.V.I.\cos\varphi = -90\text{ kW} \\ Q = 3.V.I.\sin\varphi = -36\text{ kW} \end{cases}$. On en déduit $\text{tg}\varphi = \frac{Q}{P} = 0.4 \Rightarrow \varphi = 21^\circ + k.180^\circ$. Le sinus et le cosinus de φ étant négatifs, on en déduit $\varphi = 201^\circ$.

3/ Il est à présent possible de construire avec précision le diagramme de Behn Eschenbourg, sachant $Lc\omega.I = 1.95 * 146 = 284\text{V}$.



5/ Il est possible de mesurer la valeur de E qui est de l'ordre de 405 V.

6/ Il est possible d'évaluer E par le calcul, en projetant les vecteurs sur deux axes :



On obtient le système d'équation :

$$\begin{cases} E \cdot \sin \alpha = L_c \cdot \omega \cdot I \cdot \cos(21^\circ) \\ E \cdot \cos \alpha = V + L_c \cdot \omega \cdot I \cdot \sin(21^\circ) \end{cases}$$

En élevant au carré et en sommant les deux équations, on obtient :

$$E^2 = V^2 + (L_c \cdot \omega \cdot I)^2 + 2 * V \cdot L_c \cdot \omega \cdot I \cdot \sin(21^\circ)$$

$$E = \sqrt{220^2 + 284^2 + 2 * 220 * 284 * \sin(21)} = 416V$$

6.2 Etude du système de ventilation principal d'un photocopieur.

I/ Etude des forces électromotrices induites dans les phases de la machine lors de la rotation du rotor.

1/ Nous remarquons sur la figure 10-3-13 que la sonde A voit un pôle rotorique sud durant les 90 premiers degrés de rotation. Le chronogramme de la sonde A débute sur le document réponse par une polarité positive, nous en déduisons donc que lorsque les sondes sont en face d'un aimant S, la tension induite est positive, et négative si les sondes sont en face d'un aimant nord. En gardant à l'esprit que ce sont les aimants fixés sur le rotor qui tournent à l'extérieur du stator selon le sens spécifié sur la figure 10-3-13, il est facile de compléter les chronogrammes (voir en fin de corrigé).

2/Le début du chronogramme de la phase V est donné. On constate que pour les 30 premiers degrés de rotation, le flux diminue. En regardant la figure 10-3-13, on constate que cela est dû à une diminution de surface d'aimant N en face de la phase V. On constate également que cette diminution sera effective pendant 60°, puis le flux sera constant pendant 30°. En continuant ce raisonnement, il est facile de compléter les chronogrammes des flux.

3/ La tension induite dans une phase est donnée par $e = n \frac{d\phi}{dt}$. La f.e.m. induite est donc positive lorsque le flux croît dans une phase, et négative lorsqu'il décroît.

4/ Les formes de courant à injecter dans les phases de la machine se déduisent directement des chronogrammes des tensions induites. Afin d'obtenir un couple positif, nous injecterons un courant positif si la f.e.m. est positive, négative si la f.e.m. est négative.

II Etude de la carte de commande

1/ Le fonctionnement du bloc B0 est expliqué en annexe. Selon l'état des signaux FANONO et FANHIO, le transistor Q1 sera soit bloqué, soit saturé, soit il fonctionnera en régime linéaire. La tension appliquée au moteur pourra donc prendre trois valeurs :

- 0 V : Moteur arrêté
- 15 V : Vitesse lente
- 30 V : Grande vitesse

Le bloc BO permet de faire varier la vitesse du moteur.

2/ Les chronogrammes de conduction des transistors se déduisent de l'analyse du schéma de puissance :

$$\begin{aligned} I_u > 0 &\Rightarrow Q3 \text{ ON}, & I_u < 0 &\Rightarrow Q6 \text{ ON}, \\ I_v > 0 &\Rightarrow Q2 \text{ ON}, & I_v < 0 &\Rightarrow Q7 \text{ ON}, \end{aligned}$$

$I_w > 0 \Rightarrow Q4 \text{ ON}, \quad I_u < 0 \Rightarrow Q5 \text{ ON},$

3/ Il suffit de regarder l'état des sondes pour définir les équations de conduction des transistors :
 $Q2 = \overline{H_a.H_c}, \quad Q3 = \overline{H_b.H_c}, \quad Q4 = \overline{H_a.H_b}, \quad Q5 = \overline{H_a.H_b}, \quad Q6 = \overline{H_b.H_c}, \quad Q7 = \overline{H_a.H_c}.$

