
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.

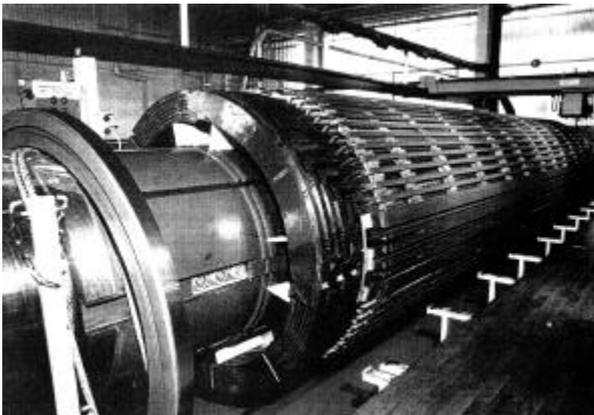
1 Introduction

1.1 Généralités

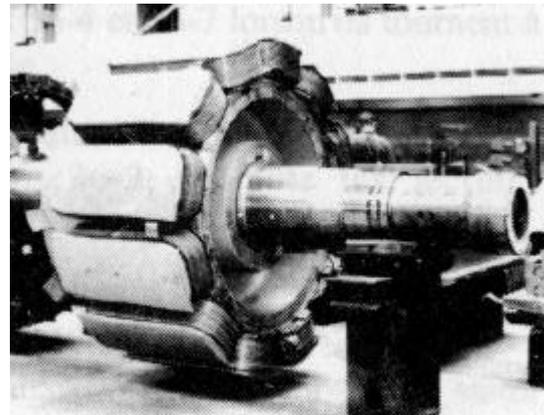
Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position 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



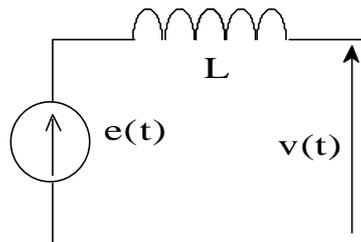
Rotor à pôles saillants



Rotor à aimants

1.2 Mise en équation / Diagramme de Behn-Eschenbourg.

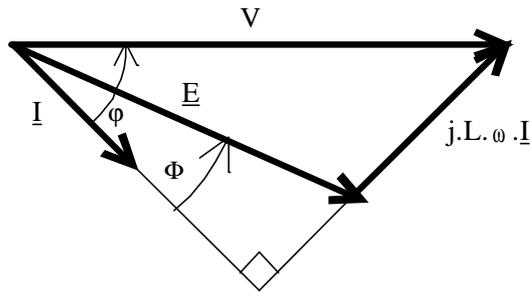
Afin d'étudier les différents fonctionnements possibles d'une machine synchrone en régime sinusoïdal, nous allons retenir le schéma équivalent par phase le plus simple possible, en négligeant toutes les pertes ainsi que les phénomènes de saturation :



Nous noterons :

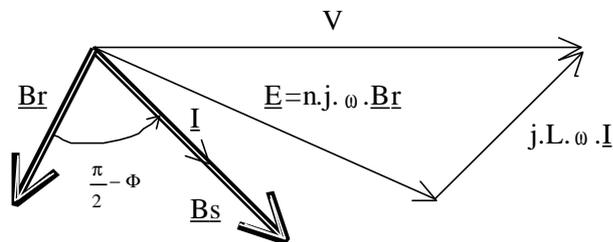
- Ω_s vitesse du champ tournant
- L inductance cyclique de la machine
- $e(t)$ la f.e.m. créée par le champ magnétique rotorique dans une phase de la machine :
$$e(t) = n_s \cdot \frac{d\phi_r}{dt}$$
- E la valeur efficace de $e(t)$
- I la valeur efficace du courant dans une phase de la machine
- φ le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

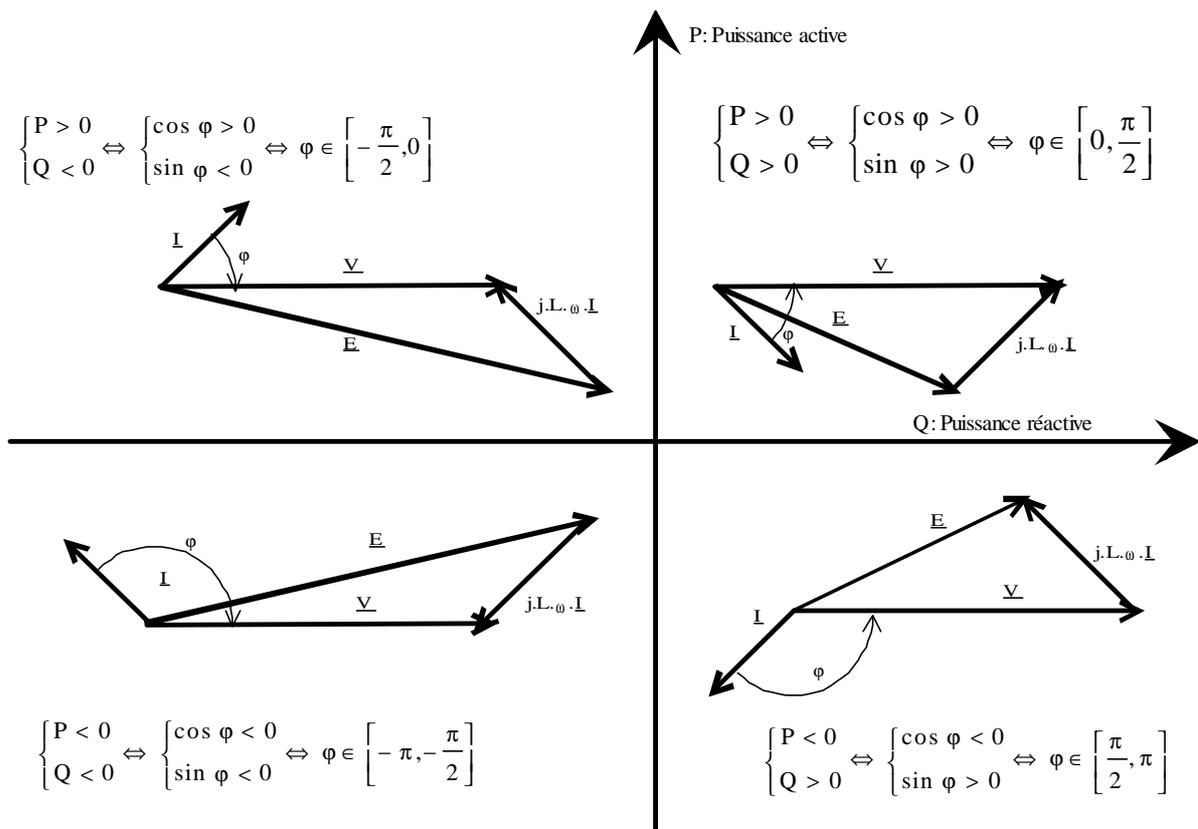
Il apparaît alors que le couple est directement proportionnel au courant dans les phases de la machine ainsi qu'au cosinus de l'angle ϕ :

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

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.

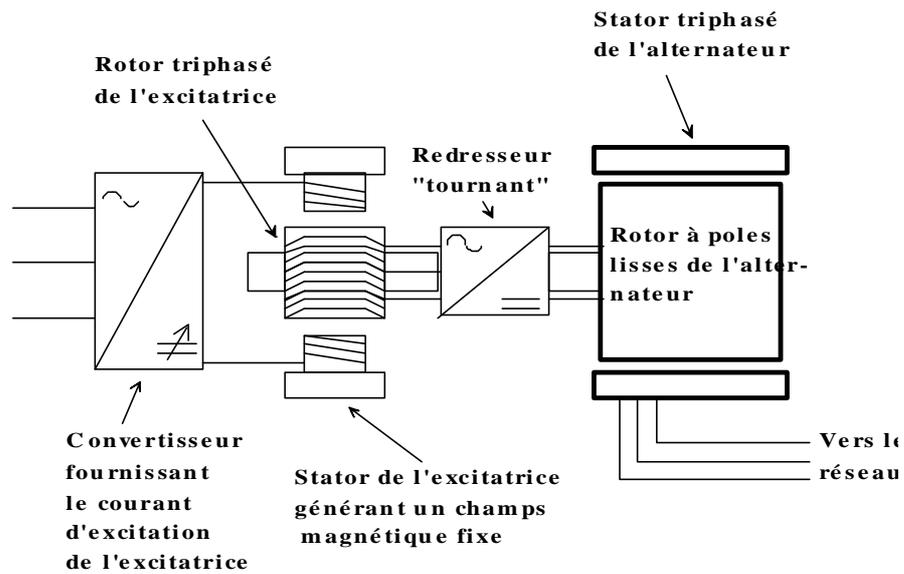
2 Utilisation d'une machine synchrone en alternateur

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 :

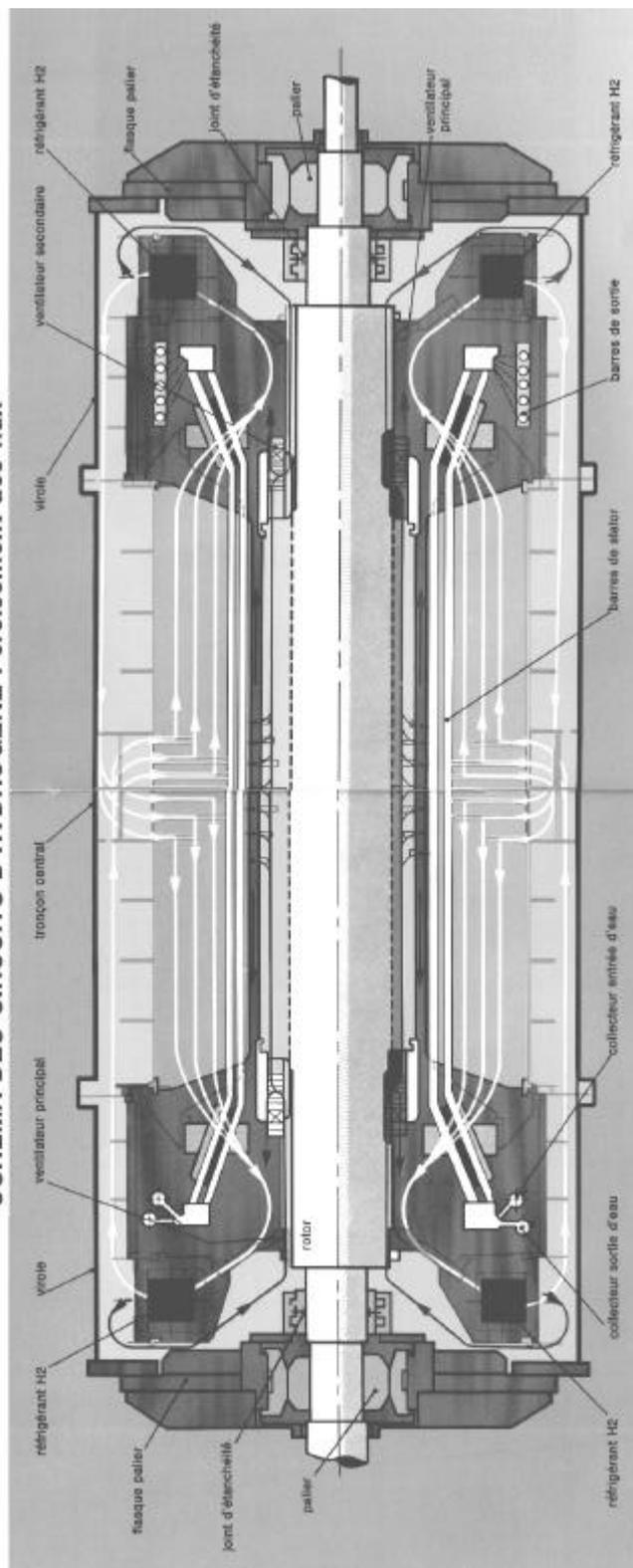


L'excitatrice est en fait un alternateur inversé où le circuit d'excitation est placé sur le stator. Le rotor comporte un système d'enroulement triphasé dont les courants sont redressés afin d'alimenter l'inducteur de l'alternateur.

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 :

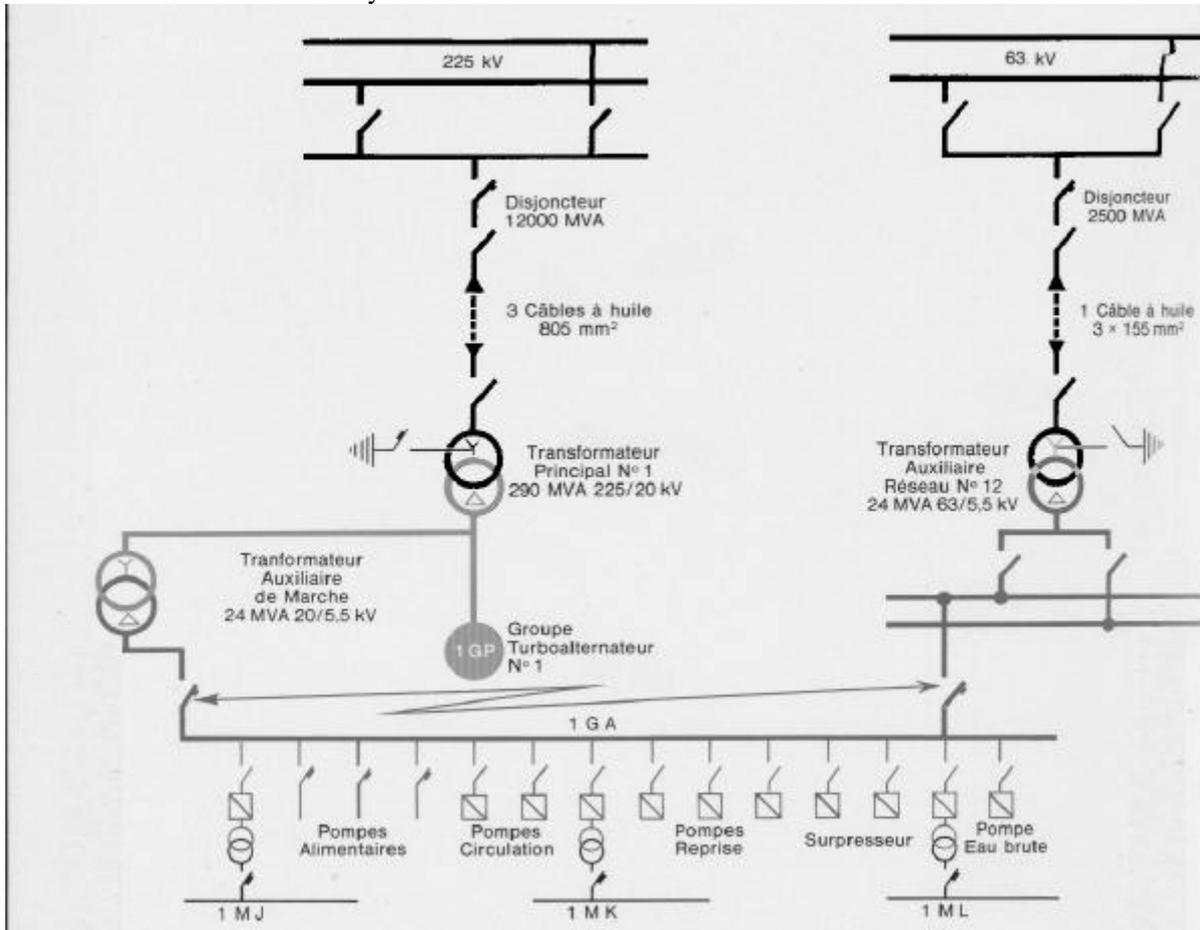
SCHEMA DES CIRCUITS D'HYDROGENE : croisement des flux



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

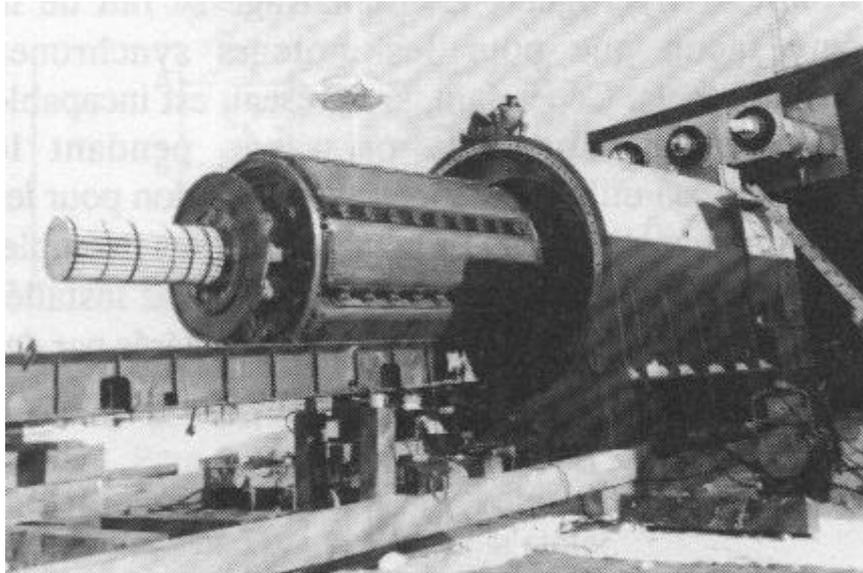
La tension de sortie des alternateurs est généralement de l'ordre de 25kV. La connexion au réseau haute tension se fait par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur. Une partie du schéma unifilaire de la centrale de Vitry est donné ci-dessous :



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 del'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 :

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

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