

*Afin de simplifier l'étude, les pertes mécaniques ainsi que les pertes fer du moteur synchrone seront négligées.*

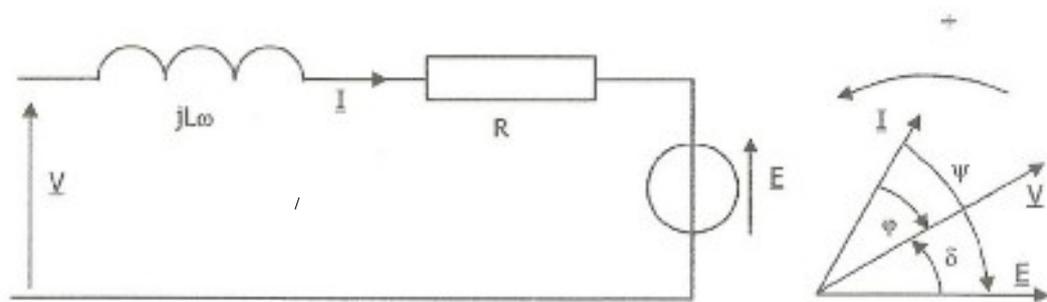
**Plaque signalétique** : 230V/400V ; 268A/155A ; 50Hz.

Aimants permanents ; 8 pôles ;  $n_{max} = 8000 \text{ tr/mn}$ .

Pendant un temps transitoire de durée limitée, elle peut atteindre la valeur  $I_{Max} = 185 \text{ A}$ .

### Identification des paramètres du modèle

Le schéma électrique de la machine est étudié en convention récepteur. Le modèle équivalent à une phase de l'induit est représenté **Figure 1**. Les tensions et courants sont supposés sinusoïdaux de pulsation  $\omega = 2\pi f$ .



**Figure 1**

Afin de mieux régler les performances du moteur, les paramètres du modèle sont obtenus par différents essais :

Essai n°1 : on a mesuré la résistance entre deux phases :  $r = 0,06 \Omega$ .

Essai n°2 : sur un banc d'essais, on a entraîné la machine synchrone à vide par l'intermédiaire d'un moteur auxiliaire à la vitesse  $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$ . On a mesuré la tension simple aux bornes d'une phase : 200V.

Essai n°3 : avec une alimentation électrique appropriée, on a effectué un essai de la machine en moteur à  $1500 \text{ tr.min}^{-1}$  pour lequel  $\psi = 0$ ,  $I = I_M = 185 \text{ A}$  et  $V = 230 \text{ V}$ .

## 1 - GRANDEURS DE LA MACHINE

1. Donner le couplage du moteur alimenté par le réseau 400V.
2. Déterminer la fréquence des tensions statoriques pour obtenir  $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$ .
3. Déterminer la valeur de la résistance R d'un enroulement statorique.

La fem E est liée à la vitesse par :  $E = A \cdot \Omega$  (avec  $\Omega$  en  $\text{rad.s}^{-1}$ ) où A est une constante.

4. Déterminer la valeur de A.



Détermination de la réactance synchrone ; dans le cas où la résistance  $R$  n'est pas négligée.

5. Écrire la relation entre  $\underline{V}$ ,  $\underline{E}$  et  $\underline{I}$ .
6. Tracer sur la copie un diagramme vectoriel relatif à l'essai n°3 (il n'est pas utile de le faire à l'échelle). On prendra  $\underline{E}$  comme origine des phases.
7. En déduire, par un calcul simple s'appuyant sur le diagramme vectoriel, la valeur de  $L$ .

Dorénavant on négligera  $R$  dans le modèle de la machine synchrone. On prendra  $L = 0,889 \text{ mH}$  et  $A = 1,27 \text{ Wb}$ .

## 2 - DÉTERMINATION DE L'EXPRESSION DU COUPLE

8. En s'appuyant sur le diagramme vectoriel de la **figure 1**, tracer le diagramme vectoriel représentatif d'un point de fonctionnement :  $I = 155 \text{ A}$ ,  $E = 200 \text{ V}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ .

On prendra  $E$  comme origine des phases, on placera les vecteurs représentatifs des complexes  $\underline{E}$ ,  $\underline{V}$ , et  $jL \cdot \underline{I}$  ainsi que les angles  $\psi$ ,  $\alpha$  et  $\theta$ .

9. Vérifier sur le diagramme que  $V \cos \varphi = E \cos \psi$  et que  $XI \cos \varphi = E \sin \theta$ .
10. Vérifier les écritures suivantes de l'expression du couple  $C$  fournit par la machine :

10.1. en fonction de  $E$ ,  $I$  et  $\psi$ .  $C$  s'écrit sous la forme :  $C = 3AI \cos \psi$ .

10.2. en fonction de  $E$ ,  $V$  et  $\theta$ .  $C$  s'écrit sous la forme :  $C = 3A \frac{V}{X} \sin \theta$ .

## 3 - FONCTIONNEMENT À $U$ SUR $f$ CONSTANT.

Le moteur entraîne une charge qui impose que le courant est constant et égal à sa valeur nominale.

L'alimentation du moteur se fait par un variateur de fréquence avec la loi de commande  $U/f = \text{cte}$ .

11. À l'aide de la question 10.2, montrer que cette loi de commande diminue les paramètres de réglage du couple. Faire le lien entre l'angle  $\theta$  et les champs magnétiques du stator et du rotor.
12. Construire les diagrammes vectoriel lorsque  $f = 50 \text{ Hz}$  et  $f = 25 \text{ Hz}$  (On prendra  $\alpha = 30^\circ$ ). Mesurer, sur ces diagrammes, les angles définis à la question 9. Comparer les valeurs et conclure.
13. Donner les vitesses dans les 2 cas.
14. Si le couple augmente, discuter l'évolution des angles.
  - 14.1. Quelle est la valeur de l'angle  $\theta$  permettant d'obtenir le couple maxi ?
  - 14.2. Quelle est la valeur limite d'angle  $\theta$  qui évitera le décrochage de la machine ? (faire apparaître les champs magnétiques)
15. Justifier : Avec cette loi de commande ( $U/f$  constant), a-t-on le contrôle total :
  - 15.1. du couple ?
  - 15.2. de la vitesse ?

## 4 -AUTOPILOTAGE DE LA MACHINE SYNCHROME

L'étude menée dans la partie 2 permet d'établir que le moment du couple  $C$  développé par le moteur dépend uniquement des variables  $I$  et  $\psi$ , par la relation  $C = 3 \cdot A \cdot I \cdot \cos \psi$ .

La commande en couple de la machine consiste à mesurer et maîtriser  $I$  et  $\psi$ .

**L'auto-pilotage consiste à maintenir l'angle  $\psi$  constant quelle que soit la position du rotor.**

A cet effet on réalise un asservissement des courants des trois phases de la machine de la façon décrite par la Figure 2 :

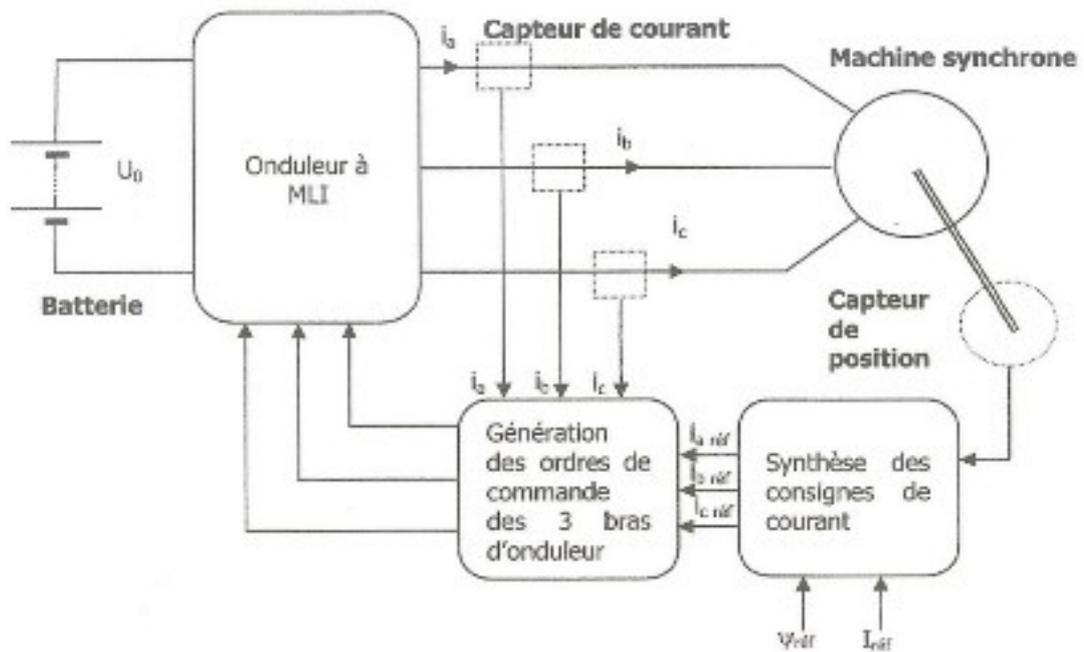


figure 2

Les mesures de la position et de la vitesse du rotor sont comparées à la consigne.

L'application du PFD permet de calculer la valeur du couple qui permet d'élaborer la consigne. La valeur du couple désiré impose des valeur de  $\psi$  et  $I$  (notés respectivement  $\psi_{réf}$  et  $I_{réf}$ ).

Cela génère les trois consignes de courant  $i_{a-réf}$ ,  $i_{b-réf}$  et  $i_{c-réf}$ .

Chaque consigne de courant ( $i_{a-réf}$ ,  $i_{b-réf}$  et  $i_{c-réf}$ ) est comparée à sa mesure (respectivement  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$ ). Un correcteur par phase traite l'erreur d'asservissement et génère la commande de chaque bras d'onduleur.

Commande à  $\psi = 0$ 

16. Pour une intensité efficace  $I$  donnée, pourquoi choisir cette valeur particulière de  $\psi$  ?  
De quelle unique variable le couple  $C$  de la machine dépend-il alors ?

*On traitera les questions en supposant que les tensions alimentant le moteur synchrone et les courants absorbés sont sinusoïdaux.*

17. Étude du point de fonctionnement limite :  $V = V_{max}$  ;  $\psi = 0$ ,  $I = I_N = 155$  A et  $n = 2000$  tr.min<sup>-1</sup>.
- Que vaut le moment du couple  $C$  développé par la machine ?
  - Tracer le diagramme vectoriel de ce fonctionnement (il ne sera pas utile de le faire à l'échelle). Placer les vecteurs représentatifs des complexes  $\underline{E}$ ,  $\underline{V}$ ,  $\underline{I}$  et  $jL\omega\underline{I}$  ainsi que l'angle  $\varphi$ .
  - Déterminer  $V$  par le calcul.
  - Déterminer  $\varphi$  par le calcul.

Commande à  $\psi$  variable

Au-delà de 2000 tr.min<sup>-1</sup>, afin de ne pas dépasser la tension maximale  $V_{max}$  aux bornes des enroulements, on choisit de travailler à  $\psi$  variable.

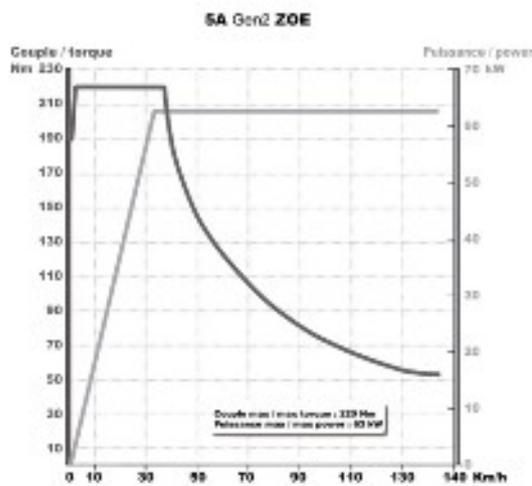
18. Étude d'un point de fonctionnement à  $\psi \neq 0$ . Pour  $n = 5000$  tr.min<sup>-1</sup>,  $I = I_N = 155$  A :
- Déterminer  $f$  pour  $n = 5000$  tr.min<sup>-1</sup>.
  - En déduire  $E$  et  $L\omega I$ .
  - Tracer le diagramme vectoriel représentant ce point de fonctionnement.
  - Déterminer graphiquement les valeurs de  $\psi$  et de  $\varphi$ .
  - Déterminer la valeur du moment du couple  $C$ .
19. Si la vitesse augmente encore et passe à 8000tr/mn sous tension d'alimentation  $V = V_{max}$ , à l'aide d'une figure, expliquer comment maintenir le couple si :
- $\psi = \text{Cte}$ . Quelle est la conséquence sur  $I$  ?
  - $I = \text{Cte}$ . Quelle est la conséquence sur  $\psi$  et  $\theta$  ?
20. Justifier : Avec cette loi de commande, a-t-on le contrôle total :
- du couple ?
  - de la vitesse ?

## Moteur électrique contre moteur thermique

Dans le domaine de la traction automobile, que la motorisation soit thermique, électrique ou hybride, on souhaite disposer à basse vitesse d'un couple maximal, puis au-delà du point de fonctionnement nominal, on doit pouvoir augmenter le régime, tout en gardant la puissance constante.

### Les caractéristiques d'un moteur électrique

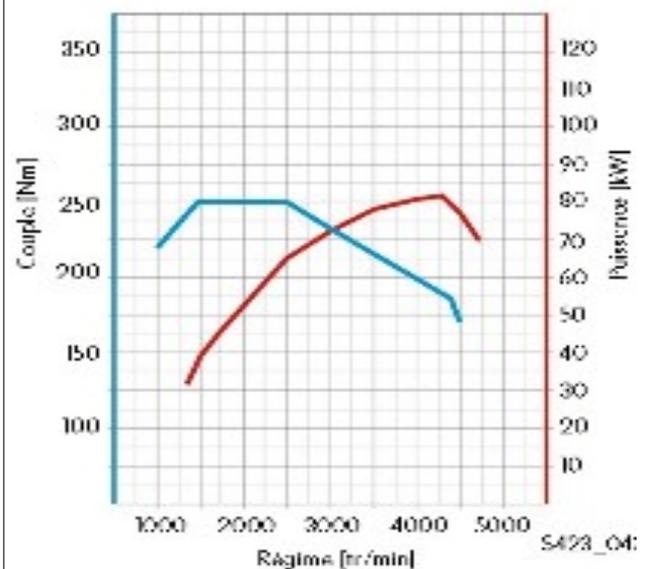
#### Renault Zoe 64kW



### Les caractéristiques d'un moteur thermique

#### Volkswagen TDI 2,0L 110cv

#### Diagramme de couple et de puissance



21. Pourquoi, sur la Zoe, il n'est pas mentionné la vitesse du moteur ?
22. Caractéristiques de couple : Donner les différences entre les deux véhicules :
  - 22.1. sur le couple au démarrage.
  - 22.2. Sur le couple au-delà du point nominal.
23. Caractéristiques de puissance : Donner les différences entre les deux véhicules :
  - 23.1. sur l'allure de la caractéristique de puissance.
  - 23.2. Sur le domaine de fonctionnement permettant de fonctionner à puissance maximale.



## Application : Moteur brushless.

Un moteur brushless est un moteur à aimant permanent.

Il est obligatoirement alimenté par un variateur de fréquence à U sur f constant.

Le moteur est autopiloté : la commande du variateur maintient en permanence  $\psi=0$  .

Un moteur brushless est caractérisé par son couple  $C_{stall}$  et son courant  $I_{stall}$  de câlage.

24. Lorsque le moteur brushless est alimenté à U sur f constant ET autopiloté :

24.1. montrer que le couple ne dépend que de l'angle  $\theta$  ,

24.2. montrer que lorsque le moteur cèle  $\theta_{stall}=90^\circ$

25. Un des moteurs brushless de la salle de TP comporte les indications suivantes :

$$C_{stall}=2,53 N.m - C_{cont}=2,03 N.m.$$

Calculer l'angle  $\theta_{cont}$  correspondant au couple nominal.