

## 2. Découverte de la machine synchrone :

*"We must learn to live together like brothers, otherwise we'll die together like fools"*

*Martin Luther King*

Cette séance de TP nous invite à continuer notre « chemin de faire » en tentant d'interpréter quelques expérimentations en simulation autour d'une machine synchrone.

Comme nous l'indique Martin Luther King, il ne va pas falloir hésiter à développer une intelligence collective pour venir à bout de cet objet élémentaire !

A vous tous !

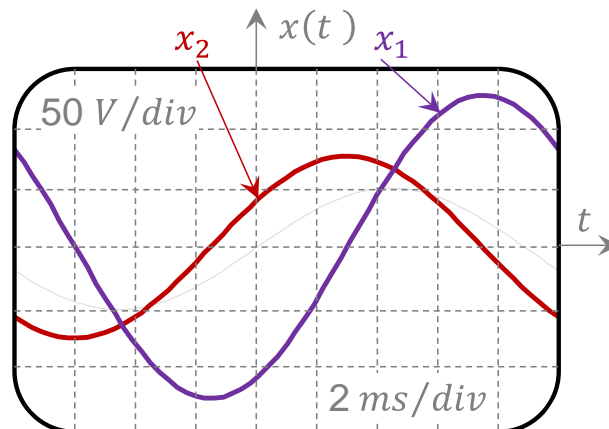
### 0. Préparation : avant la séance, préparer sa boîte à outils

#### 1.1. Contexte d'utilisation des machines synchrones :

- Où sont localisées les pertes dans une machine synchrone
  - à rotor bobiné ;
  - à aimants permanents.
- Dans quelles applications, la machine synchrone à aimants permanents est-elle réellement pertinente ?
- Si l'on considère les deux applications étudiées lors des deux premières séances de TD, laquelle ou lesquelles justifient l'utilisation d'une machine synchrone et pourquoi ?

#### 1.2. Signaux sinusoïdaux :

On s'intéresse aux deux signaux sinusoïdaux  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  relevés à l'oscilloscope.



- Donner l'expression temporelle de ces deux signaux  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$ .
- Quelles sont leurs 3 grandeurs caractéristiques ?
- Donnez en la représentation dans le diagramme de Fresnel.

#### 1.3. Matlab - Simulink :

Avant la séance,

- installer, si ce n'est déjà fait, la boîte à outils (toolbox) SIMSCAPE de MATLAB qui permet de réaliser des schémas proches des connexions physiques réalisées sur les systèmes réels.

La boîte à outils SIMSCAPE de MATLAB – Simulink de :

- modéliser des systèmes tels que des moteurs électriques, des convertisseurs électriques, mais aussi des actionneurs hydrauliques et des systèmes de réfrigération.
- assembler ces composants dans un schéma.
- analyser le fonctionnement de ces composants.
- se confronter au fichier « Get\_To\_Start\_TP3.mdl » avec quelques expérimentations préliminaires...



Fin de la préparation  
de la seconde séance de TP

On y va ?! En groupe...



On s'intéresse ici à une machine synchrone à aimants permanents avec  $I_{nom} = 157,2 \text{ A}$ . On demande.

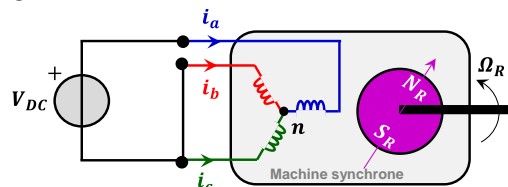
## 1. Identification des paramètres de la machine synchrone

- 1.1. Rappeler le schéma monophasé équivalent d'une machine synchrone (dans l'hypothèse de linéarité de son circuit magnétique).
- 1.2. Quels sont les paramètres de ce modèle qu'il faut identifier si l'on veut caractériser ce modèle et en prédire le fonctionnement ?
- 1.3. Faire tourner la machine sans qu'elle n'alimente de charge électrique ni qu'elle reçoive de courant d'un générateur triphasé.
  - a) Comment évolue la valeur efficace de la tension aux bornes de la machine quand vous en modifiez la fréquence de rotation  $N_R$  ?
  - b) Quelle caractéristique pouvez-vous déduire de cette expérience ?
  - c) Observer également l'allure temporelle de la tension  $v_a(t)$  de la phase  $a$  et plus précisément, indiquez sa valeur au passage par 0 de l'angle  $\theta_R$  fourni par le capteur de la position angulaire du rotor.

*Remarque : Dans les faits, le bloc MATLAB/simulink refuse cette expérience et je vous propose d'y parvenir en plaçant un système de 3 résistances de forte valeur (10 k $\Omega$ ) en charge. On a donc un alternateur fournissant un courant très faible qui pourra être négligé.*

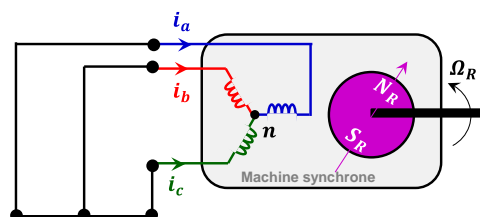
- 1.4. Alimenter la machine par une source continue de 1 V selon le schéma de la figure ci-dessous.
  - a) La machine tourne-t-elle ?
  - b) Quelle caractéristique pouvez-vous déduire de cette expérience ?

*Schéma de câblage :*



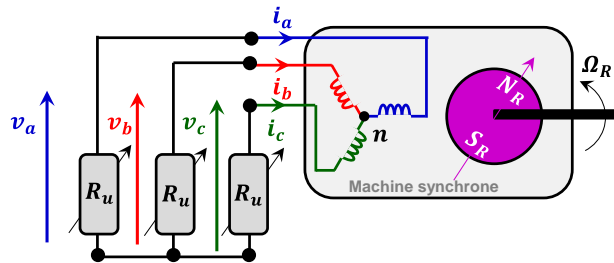
- 1.5. Faire tourner la machine synchrone à une des vitesses pour laquelle vous avez déjà mesuré les tensions à vide (càd sans charge électrique). Cette fois-ci, réaliser un court-circuit triphasé selon la figure ci-dessous. Mesurer ce courant.
  - a) Faire varier la fréquence de rotation  $N_R$ . Que peut-on observer sur le courant de court-circuit quand la vitesse de rotation évolue ?
  - b) Quelle caractéristique pouvez-vous déduire de cette expérience ?
  - c) Quels ordres de grandeurs peut-on constater entre les deux caractéristiques s'exprimant en Ohms ?

*Schéma de câblage :*



## 2. Fonctionnement en alternateur autonome débitant sur une charge triphasée équilibrée, purement résistive

On s'intéresse à la machine synchrone lorsque qu'elle est entraînée à vitesse constante pour alimenter une charge électrique linéaire et équilibrée. On se place dans le cas spécifique où la charge peut être vue comme une résistance pure  $R_u$  de valeur identique sur les 3 phases.



2.1. En adoptant arbitrairement une fréquence de rotation de  $N_R = 6\,000 \text{ tours.min}^{-1}$ , observer la tension  $v_S(t)$  et tracer l'évolution de la valeur efficace de la tension  $v_S$  en fonction de la valeur efficace du courant prélevé  $i_S$ . On pourra adopter les valeurs ci-dessous :

$R_u$	100 $\Omega$	10 $\Omega$	7,5 $\Omega$	5 $\Omega$	3,0 $\Omega$	2,0 $\Omega$	1,0 $\Omega$	0,5 $\Omega$
$I_S$								
$V_S$								
$C_{em}$								

2.2. Quel élément permet de maintenir la machine à sa fréquence de rotation de  $N_R = 6000 \text{ tours.min}^{-1}$  ?

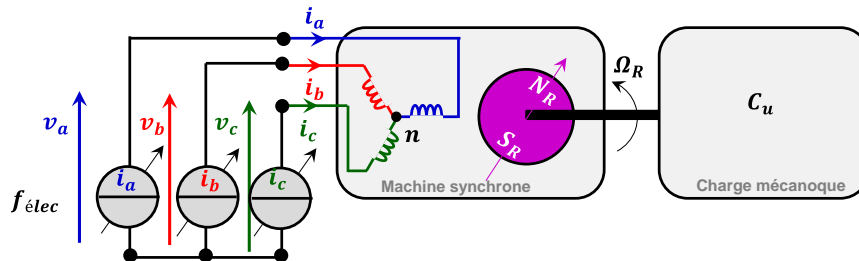
2.3. Avec cette machine synchrone, **par action exclusive sur les ports de la machine synchrone**, peut-on faire quelque chose pour réguler la tension d'alimentation de la charge ?

Dans le cas d'un rotor bobiné est-ce possible ? Faire l'ajustement pour la charge de 2,0  $\Omega$ . C'est-à-dire adapter le paramètre idoine pour que la valeur efficace  $V_S$  de la tension  $v_S(t)$  fournie à  $R_u$  soit la tension à vide de la machine.

### 3. Fonctionnement en moteur/frein avec alimentation en courant

On souhaite observer le comportement de la machine synchrone lorsqu'on :

- l'alimente à fréquence fixe  $f_{elec}$  avec un système de courants triphasés équilibrés,
- et applique, sur son arbre moteur, un couple résistant donné  $C_u$ .



On impose arbitrairement une fréquence électrique de  $f_{elec} = 100 \text{ Hz}$ , avec la possibilité de choisir deux phases à l'origine  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , qui, comme leur nom l'indique impose la condition initiale. Dans les cas proposés, tester la réponse de la machine synchrone avec ces deux possibilités. Le choix se fait en indiquant 1 ou 2 dans la constante « choix ».

**3.1.** Imposer un couple de charge de  $+50 \text{ Nm}$  ainsi qu'une valeur efficace  $I_S$  des courants triphasés. Observer pour plusieurs valeurs de  $I_S$  (cf tableau),

- le déphasage  $\beta$  entre la force électromotrice  $E$  et le courant  $I_S$  ;
- le déphasage  $\varphi$  entre la tension  $V_S$  et le courant  $I_S$  ;
- la valeur efficace de la tension  $V_S$  .

Qu'expriment  $\beta$  d'une part et  $\varphi$  d'autre part ?

Si l'on souhaite obtenir la minimisation des pertes Joule dans la machine, quelle est la meilleure option ? Est-elle réalisable dans cette configuration d'alimentation de la machine ?

$I_S$	200 A	150 A	125 A	100 A	75 A	50 A	25 A
$\beta$							
$\varphi$							
$V_S$							

**Remarque :** De manière assez logique, le bloc MATLAB/simulink a comme entrée le couple utile, nommé  $T_m$ . Pour imposer le couple électromagnétique  $C_{em}$ , on peut tenir compte des pertes du modèle (frottements visqueux et frottements secs). Notons également que MATLAB/simulink fournit, par ses « capteurs », la valeur du couple  $C_{em}$ .

**3.2.** Reprendre les mêmes mesures avec un couple de charge de  $+100 \text{ Nm}$ .

**3.3.** Reprendre les mêmes mesures avec un couple de charge de  $-50 \text{ Nm}$ .

#### 4. Fonctionnement en moteur/frein avec alimentation en courant autopilotée par la charge

Nous avons vu la nécessité pour l'alimentation en courant d'avoir un retour d'information sur la position du rotor afin de garantir la stabilité des points de fonctionnement, et particulièrement de ceux qui se révèlent les plus intéressants. C'est la proposition de l'autopilotage qui utilise, sur l'arbre moteur, un capteur de position précis lui permettant de construire la consigne du système de courants triphasés.

$N_R$ , la fréquence de rotation de la machine est désormais une réalité constatée, et, l'alimentation électrique s'y adapte en temps réel. La machine s'impose donc sa propre fréquence électrique  $f_{elec}$  d'alimentation ! C'est la raison de la dénomination « autopilotage ».

**4.1. Imposer un couple électromagnétique  $C_{em}$  de 119,4 N.m, et essayer l'autopilotage à différentes vitesses  $N_R$  de rotation. Mesurer également la tension d'alimentation, dont les deux paramètres sont la tension efficace et le déphasage entre la tension  $v_{sk}(t)$  et le courant  $i_{sk}(t)$ .**

$N_R$	1000 t.min <sup>-1</sup>	2000 t.min <sup>-1</sup>	4000 t.min <sup>-1</sup>	8000 t.min <sup>-1</sup>	12000 t.min <sup>-1</sup>
$V_{S,eff}$					
$\varphi_{v/i}$					
$P_{em}$					

**4.2.** Dans les faits, pour un système alimenté par une batterie de 400 V continu, la valeur efficace de la tension d'alimentation phase-neutre est limitée à 150 V efficace. Quelle est la plage de rotation permettant de produire le couple nominal ?

**4.3.** Pour un fonctionnement à vitesse plus élevée, on accepte de réduire le couple maximal produit ... tout en maintenant constante la puissance délivrée.

a) Faire les essais d'autopilotage proposés ci-dessous et indiquer la partie du cahier du charges qui est respectée et celle qui ne l'est pas.

$N_R$	4000 t.min <sup>-1</sup>	6000 t.min <sup>-1</sup>	8000 t.min <sup>-1</sup>	10000 t.min <sup>-1</sup>	12000 t.min <sup>-1</sup>
$I_{S,eff}$	157,2 A	104,8 A	78,6 A	62,9 A	52,5 A
$\beta$	0°	0°	0°	0°	0°
$V_{S,eff}$					
$\varphi_{v/i}$					
$P_{em}$					

b) Faire les essais d'autopilotage proposés ci-dessous et vérifier que le cahier des charges est totalement respecté.

$N_R$	$4000 \text{ t. min}^{-1}$	$6000 \text{ t. min}^{-1}$	$8000 \text{ t. min}^{-1}$	$10000 \text{ t. min}^{-1}$	$12000 \text{ t. min}^{-1}$
$I_{S,eff}$	157,2 A	117,2 A	111,2 A	113,4 A	117,3 A
$\beta$	0°	-26,6°	-45°	-56,3°	-63,4°
$V_{S,eff}$					
$\varphi_{v/i}$					
$P_{em}$					

c) Dessiner le diagramme de Fresnel en tension de la machine à la fréquence mécanique de  $N_R = 8000 \text{ t. min}^{-1}$  dans les deux cas a) et b). Comment parvient-on à satisfaire totalement le cahier des charges ?

## 5. Fonctionnement en moteur/frein avec alimentation en tension

L'alimentation en courant que nous venons de décrire est en général réalisée par l'asservissement des courants dans les phases de la machine, car technologiquement, on sait alimenter la machine par une source triphasée de tension pilotable.

### 5.1. Asservissement des courants alternatifs.

Compréhension facultative des difficultés soulevées.

### 5.2. Transformation de la machine triphasé en une machine diphasé à courants continus.

- a) Vérifier que les matrices  $P(\theta_R)$  et  $P^{-1}(\theta_R)$  sont bien orthogonales et inverses. Quelle propriété en résulte-t-il pour un système physique ?

👉 Rappel des matrices de transformation :  $P(\theta_R)$  et  $P^{-1}(\theta_R)$ .

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & -\sin(\theta_R) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}}_{P(\theta_R)} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & \cos\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_R) & -\sin\left(\theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}}_{P^{-1}(\theta_R)} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

- b) Utiliser le système autopiloté en courant et réaliser la transformation des 3 courants  $[i_a \ i_b \ i_c]^t$  en 3 courants  $[i_d \ i_q \ i_0]^t$ . En régime permanent, comment sont ces 3 courants « fictifs » ? Faire l'essai avec un autopilotage de  $\beta = 0^\circ$  puis de  $\beta = +90^\circ$ , et enfin de  $\beta = -90^\circ$ . Ajuster le seul paramètre de la transformation pour que l'axe  $d$  soit aligné avec le flux rotor et l'axe  $q$  en quadrature avance par rapport à ce premier axe.
- c) Utiliser le système autopiloté en courant mais construire les 3 courants de référence  $[i_{a,ref} \ i_{b,ref} \ i_{c,ref}]^t$  à partir des 3 courants de référence  $[i_{d,ref} \ i_{q,ref} \ i_{0,ref}]^t$ . On pourra par exemple chercher à suivre le dernier tableau.
- d) Vérifier que vous réalisez bien le couple  $C_{em}$  souhaité et que vous respectez bien la contrainte en tension de l'onduleur alimentant la machine synchrone.
- e) Appliquer la transformation de Park aux 3 tensions d'alimentation de la machine synchrone :  $[v_a \ v_b \ v_c]^t$ .



- f) Imposez une référence de courant totalement nulle  $[i_{d,ref} \ i_{q,ref} \ i_{0,ref}]^t = [0 \ 0 \ 0]^t$  alors que la machine tourne, d'abord à  $4000 \text{ t.min}^{-1}$  puis à  $8000 \text{ t.min}^{-1}$ . Observez les 3 tensions fictives. Laquelle n'est pas nulle ? Quelle est le rapport entre cette tension et la valeur efficace des tensions réelles  $[v_a \ v_b \ v_c]^t$  ?
- g) Faites tourner la machine à  $8000 \text{ t.min}^{-1}$  et observez l'évolution des tensions fictives selon qu'elle soit alimentée avec les trois consignes suivantes que vous aurez retranscrits suivant les axes fictifs. Y-a-t-il couplage entre les axes fictifs ?!

$I_{s,eff}$	0 A	157,2 A	78,6 A	111,2 A
$\beta$	x	0°	0°	-45°

### 5.3. Asservissement des courants continus de la machine équivalente.



👉 Portez-vous bien !...