

## 11. Clefs de compréhension de la MS à pôles lisses : Utilisation de la machine synchrone en moteur piloté

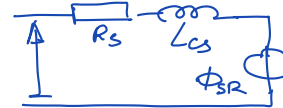
« Le soleil n'est jamais si beau qu'un jour où l'on se met en route. »

Jean Giono, in *Les grands chemins*.

A l'instar de Jean Giono, sachons nous mettre en route, dans l'espérance, non pas de comprendre parfaitement, linéairement, définitivement un sujet, mais d'en faire le tour ... pour détourner un ensemble de représentations utiles et fertiles. C'est sur celles-ci que nous pourrons construire, ensemble ou séparément, nos imaginaires et nos symboliques.

Pour se convaincre de la richesse de notre errance électromagnétique, nous allons nous saisir à nouveau du cas d'usage du véhicule électrique. Cette dixième et dernière séance nous ramène donc à la première ! Et nous découvrons, ensemble, que notre identité est dynamique et relationnelle.

Après ce « marronnage », nous abordons à nouveau le rivage de l'électromobilité. Cette fois-ci, nous y parvenons chargés de notre fréquentation assidue de James Clarke Maxwell, Pierre-Marie Ampère, Michael Faraday, Galileo Ferraris, Hans Behn-Eschenburg, Robert H. Park, Edith Clarke et tant autres éminents prédécesseurs. Sachons faire honneur à cette richesse relationnelle. Tissons une nouvelle trame plus riche ... et plus opaque !



### 0. Avant la séance : préparer sa boîte à outils...

- 0.1. Donner, en convention récepteur, le modèle de Behn-Eschenburg d'une machine synchrone
  - en indiquant le nom des paramètres le caractérisant ;
  - et en rappelant les hypothèses sous-jacentes.
- 0.2. En se fondant sur ce modèle, donner l'expression du couple électromagnétique  $C_{em}(t)$  produit par la machine synchrone sur son arbre mécanique.
- 0.3. En régime permanent sinusoïdal, que devient l'expression du couple électromagnétique  $C_{em}(t)$  ?
  - Exprimer le en fonction des paramètres pertinents.
  - Pour réaliser un couple donné, combien y a-t-il d'alimentations électriques possibles ?
  - En adoptant le critère de la minimisation des pertes Joule, exclusivement au sein de la machine synchrone, quel est le choix optimal ?
  - Selon vos connaissances, ce point de fonctionnement, est-il stable ou instable ?
- 0.4. Représenter graphiquement le principe de l'autopilotage de la machine synchrone.  
Quel en est l'élément critique ?



**Fin de la préparation**



✓ Véhicule :

On s'intéresse au véhicule caractérisé par :

- une masse :  $M = 1500 \text{ kg}$
- une résistance à l'avancement, sur trajet horizontal, de la forme :

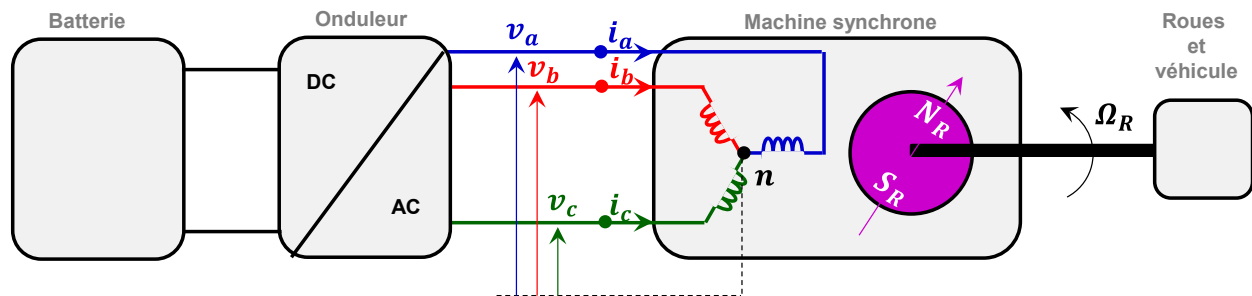
$$F_{res} = F_{res}(vit) = F_0 + F_2 \times vit^2$$

avec :

- $vit$  : la vitesse en  $m.s^{-1}$
- $F_0 = 200 \text{ N}$  : le coefficient des frottements secs
- $F_2 = 0,45 \text{ N.s}^2.m^{-2}$  : le coefficient des frottements aérodynamiques
- $vit_{MAX} = 140 \text{ km.h}^{-1}$

✓ Chaîne de traction électrique :

Le groupe motopropulseur est fondé sur une chaîne de traction électrique permettant d'obtenir la vitesse variable attendue par l'application automobile.



✓ Machine :

Dans ce groupe motopropulseur, le moteur est une machine synchrone triphasée et à aimants permanents, qui présente les caractéristiques suivantes :

- **Port mécanique :**
  - Puissance nominale :  $P_{meca,nom} = 50 \text{ kW}$
  - Nombre de paires de pôles :  $n_p = 1$
  - Fréquence maximale de rotation :  $N_{R,MAX} = 12\,000 \text{ tours.min}^{-1}$   
(correspond à une vitesse du véhicule de  $vit_{MAX} = 140 \text{ km.h}^{-1}$ .)

• **Port électrique :**

- Neutre non distribué
- Courant statorique nominal :  $I_{S,eff,nom} = 150 \text{ A}$
- résistance d'une phase statorique :  $R_S = 10 \text{ m}\Omega$
- inductance cyclique statorique :  $L_{CS} = 2,0 \text{ mH}$
- Flux sinusoïdal créé par le rotor « aimanté » dans les 3 bobinages statoriques avec une valeur efficace :  $\Phi_{SR} = 222,2 \text{ mWb}$

✓ Alimentation :

L'alimentation de la machine est réalisée par un ensemble batterie – onduleur permettant de générer une tension triphasée  $[v_a(t), v_b(t), v_c(t)]$  avec :  $|v_k(t)| < V_{MAX} = 200 \text{ V}$ .



**1. La machine synchrone autopilotée avec minimisation de ses pertes Joule.**

**1.1. Force (contre) électromotrice de la machine synchrone**

- a) Pour une vitesse de rotation constante de  $\Omega_R$ , quelle est la valeur efficace  $E_{eff}$  de la force électromotrice dans une des phases statoriques ?
- b) Faire l'application numérique pour les différentes fréquences de rotation suivantes. Dans le tableau ci-dessous, précisez également la vitesse du véhicule en  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

$V_{véhicule}$					
$N_R$	100	1000	4 000	8 000	12 000
$E_{eff}$					

**1.2. Réactance cyclique synchrone**

Pour une vitesse de rotation constante de  $\Omega_R$ , quelle est la valeur de la réactance synchrone ?

- a) Dans quelle gamme de vitesse est-elle dominante vis-à-vis de la résistance statorique ?
- b) Faire l'application numérique pour les différentes fréquences de rotation suivantes.

$N_R$	100	1000	4 000	8 000	12 000
$X_{CS}$					

### 1.3. Autopilotage optimal : expression du couple

Dans les conditions d'optimalité de l'autopilotage vis-à-vis des pertes Joule de la machine, donner l'expression du couple en fonction des grandeurs pertinentes. Réaliser l'application numérique pour :

- a)  $C_{EM} = 100 \text{ N.m}$
- b)  $C_{EM} = -100 \text{ N.m}$

### 1.4. Fonctionnement en moteur à $N_R$ faible

Le véhicule étant à l'arrêt, le conducteur le met en mouvement à  $t_0 = 0 \text{ s}$  en exigeant un couple constant :

$$C_{EM} = 100 \text{ N.m}$$

- a) En supposant la transmission du groupe motopropulseur aux roues sans pertes, calculez l'accélération du véhicule souhaitée par le conducteur.
- b) Déterminer la valeur efficace du courant exigé par le conducteur.
- c) Quelle est, approximativement, la fréquence  $f_{S1}$  du courant **cinq secondes** après le départ ( $t_1 = 5 \text{ s}$ ) ?
- d) Donner à ( $t_0 = 0 \text{ s}$ ) puis à ( $t_1 = 5 \text{ s}$ ),  $P_{alim}$ , la puissance fournie par l'alimentation électrique ainsi que le rendement  $\eta_{conv\_em}$  de la conversion électromécanique.
- e) Construire les diagrammes de Fresnel des tensions, aux instants  $t_0$  et  $t_1$ , en adoptant comme référence le courant dans le stator de la machine.

On peut, par exemple, adopter une échelle de :  $20 \text{ V} \Leftrightarrow 1 \text{ cm}$

- f) En déduire les trois caractéristiques des tensions triphasées statoriques aux instants  $t_0$  et  $t_1$  :
  - valeur efficace  $V_S$ ,
  - fréquence  $f_S$ ,
  - déphasage par rapport à la fem  $E_S$  :  $\varphi_{V_S/E_S}$ .

### 1.5. Fonctionnement à vitesse constante modérée

Le véhicule roule désormais sur un boulevard urbain parfaitement horizontal et le conducteur a enclenché le régulateur de vitesse en imposant  $vit_{ref} = 54 \text{ km.h}^{-1}$ .

- a) Déterminer la valeur efficace de la force électromotrice caractérisant la machine synchrone.
- b) Déterminer le couple de référence demandé par le régulateur de vitesse.
- c) En déduire la valeur efficace du courant exigée par le régulateur de vitesse au système d'autopilotage afin que la machine assure le couple de référence.
- d) En déduire les trois caractéristiques des tensions triphasées statoriques : valeur efficace, fréquence et déphasage par rapport à la fem.

On peut adopter une échelle de  $10 \text{ V} \Leftrightarrow 1 \text{ cm}$

- e) Réaliser, pour ce point de fonctionnement, un bilan de puissance :  $P_{alim}$ ,  $P_{em}$ ,  $P_{em}$  et  $\eta_{conv\_em}$ .

### 1.6. Freinage

Le conducteur freine et arrête son véhicule à un carrefour en sollicitant la pédale de frein. La pression imposée à la pédale de frein est traduite par un couple négatif en consigne de groupe motopropulseur, engendrant une force de freinage de  $-3\,231 \text{ N}$  jusqu'à l'arrêt du véhicule.

- a) Quelle est la consigne de courant exigée de l'autopilotage ? Préciser :
  - sa valeur efficace  $I_S$  ,
  - et son déphasage angulaire  $\beta = \varphi_{E_S/I_S}$ .
- b) Construire le diagramme de Fresnel des tensions, à l'instant où débute le ralentissement.
- c) Quelle est la consigne de tension résultante imposée par l'autopilotage à l'onduleur ? Préciser :
  - sa valeur efficace  $V_S$  ,
  - et son déphasage angulaire  $\varphi_{V_S/E_S}$ .

## 2. La machine synchrone autopilotée sous contrainte de satisfaire la contrainte en tension de son alimentation électrique.

### 2.1. Fonctionnement à vitesse constante élevée impossible

Le conducteur roule sur une deux voies au régulateur de vitesse. La consigne de ce dernier est fixée à la valeur de :  $vit_{ref} = 111,6 \text{ km.h}^{-1}$ .

- a) Quelle devrait être la consigne de courant exigée du dispositif d'autopilotage ? Préciser :
  - sa valeur efficace  $I_S$  ,
  - et son déphasage angulaire  $\beta = \varphi_{E_S/I_S}$  .
- b) Quelle serait alors la valeur efficace de la tension fournie par l'alimentation triphasée ?
- c) Quelle serait sa puissance apparente  $S_{alim} = 3 \times V_S \times I_S$  ?
- d) Quelles seraient les pertes joule  $P_J$  dans la machine ?
- e) Quel élément empêche de réaliser ce point de fonctionnement ? Que faut-il modifier dans la loi d'autopilotage ?

### 2.2. Quoique !

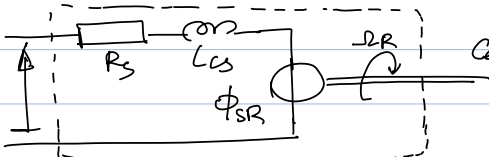
Dans les faits, la consigne de courant demandée à l'autopilotage en courant vaut

$$\begin{cases} I_S = 33,4 \text{ A} \\ \beta = -28,3^\circ \end{cases}$$

- a) Construire le diagramme de Fresnel des tensions.
- b) Quelle est la tension fournie par l'alimentation ainsi sollicitée par l'autopilotage ? Préciser :
  - sa valeur efficace  $V_S$  ,
  - et son déphasage angulaire  $\varphi_{V_S/E_S}$  .
- c) Quelle est sa puissance apparente  $S_{alim} = 3 \times V_S \times I_S$  ?
- d) Déterminer les pertes joule  $P_J$  dans la machine.
- e) Comparer avec la solution irréalisable et conclure.



👉 Portez vous bien !



$$C_{em} = 3 \Phi_{SR} (I_s \cos \beta) = I_{sq} \quad \beta = 0^\circ \text{ autopilotage}$$

1.3)

$$\Rightarrow I_s = \frac{|C_{em}|}{3 \Phi_{SR}} = \frac{100}{0,6666} = 150 \text{ A}$$

1.1) a)  $f_{em} \rightarrow E_{eff} = \Omega_R \Phi_{SR}$

b)  $N_R$  100 1000 ...  
 $E_{eff}$  2,33 23,37 ...

$$C_{em} > 0 \rightarrow \beta = 0^\circ$$

$$C_{em} < 0 \rightarrow \beta = 180^\circ$$

1.2) Réactance  $X_{cs} = L_{cs} \cdot \Omega_R$  (1 paire de pôles)

$N_R$  100 1000 4000 ...

$X_{cs}$  209 mΩ 209 mΩ 0,838 Ω ...

$$X_{cs} = L_{cs} \cdot \Omega_R > 10 R_s ? \Rightarrow \Omega_R > 10 \left( \frac{R_s}{L_{cs}} \right)$$

50 rad/s

1.4) couple maximal demandé.

a)  $a = \frac{d\dot{\nu}_{it}}{dt} = \frac{F_{traction} - F_{res}}{M}$   $F_{res} = 200 + 945 \dot{\nu}_{it}^2$

$$C_{em} \longleftrightarrow F_{trac}$$

$$C_{em} \Omega_R = F_{trac} \cdot \dot{\nu}_{it}$$

$$k = \frac{\dot{\nu}_{it}}{\Omega_R} = \frac{140/3,6}{12000 \left( \frac{\pi}{30} \right)} = 0,031 \Rightarrow \boxed{F_{trac} = \frac{C_{em}}{k}} = \frac{100}{0,031} = 3231,4 \text{ N}$$

à  $t = 0 \Rightarrow F_{trac} - F_{res} = 3231,4 - 200$  ( $\dot{\nu}_{it} = 0$ )  
 $a = 2,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

b)  $C_{em} = 100 \text{ Nm} \rightarrow \begin{cases} I_s = 150 \text{ A} \\ \beta = 0^\circ \end{cases}$

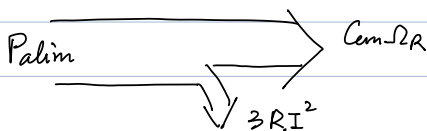
c)  $t = 0 \text{ s et } 5 \text{ s} \rightarrow a = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  diminue un peu mais  $F_{trac}$  très grande au début.

$$\Rightarrow \dot{\nu}_{it} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 36 \text{ km/h}$$

$$\Rightarrow \Omega_R = \frac{\dot{\nu}_{it}}{r} = 323 \text{ rad/s}$$

$$\Rightarrow f_r = \frac{\Omega_R}{2\pi} = 51 \text{ Hz}$$

d)  $P_{alim} = P_{Joule} + P_{meca}$



$\bar{A} \ t=0$

$P_{\text{alim}} \rightarrow \phi$

$P_{\text{alim}} = 3R_s I_s^2 = 0.635 \text{ kW}$

$3R_s I_s^2$

$\eta = 0$

$\bar{A} \ t=5s$

$P_{\text{alim}} = 33.35 \text{ kW}$

$P_{\text{méca}} = 32.651 \text{ kW}$

$0.635 \text{ kW}$

$\eta = 98\%$

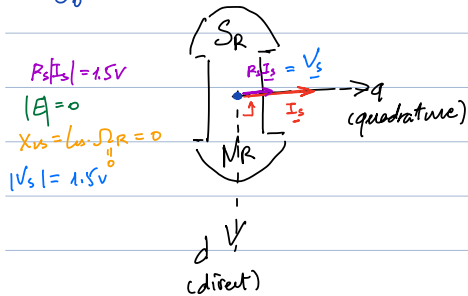
e)  $\rightarrow$  chargement convention

f)  $V_s = \underline{E} + jX_{cs} I_s + R_s I_s$

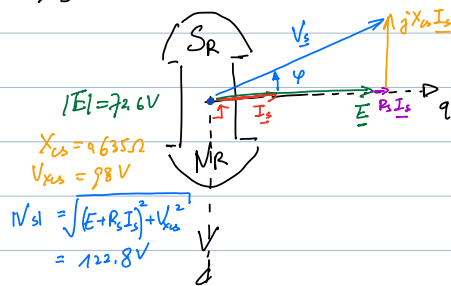
$e = \frac{d\phi_{SR}}{dt}$

$\underline{E} = +j\Omega_R \phi_{SR}$

$t_0$



$t_1$



$V_s^2 = V_{sq}^2 + V_{sd}^2$

$V_{sd} = -X_{cs} I_s = -98 \text{ V}$

$V_{sq} = E + R_s I_s = 74.1 \text{ V}$

$|V_s| = 122.8 \text{ V}$

$\varphi = \arctan\left(\frac{X_{cs} I_s}{E + R_s I_s}\right) = 53^\circ$

$f_s = 52 \text{ Hz}$

1.5)  $F_{ct}$  à vit de  $v_{\text{ref}} = 54 \text{ km/h}$

a)  $|E| = \Omega_R |\phi_{SR}| = \frac{N\Phi}{p} |\phi_{SR}| = 107.7 \text{ V}$

b)  $C_{em} = 3\phi_{SR} I_s$

c)  $\beta = 0^\circ$

$\frac{dW_{it}}{dt} = 0 = \frac{F_{\text{trac}} - F_{\text{res}}}{M}$

$F_{\text{trac}} = F_{\text{res}} = F_0 + F_2 \cdot v_{\text{ref}}^2 = 301.25 \text{ N}$

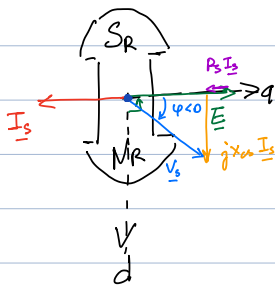
$L > C_{em} = k F_{\text{trac}} \rightarrow I_s = 14 \text{ A}$

$C_{em} = 3\phi_{SR} I_s$

...

1.6) Freinage  $C_{em} = -100 \text{ Nm}$

a) chgt sens de courant  $\beta = 180^\circ$



2,1)

a)  $F_{mot} = F_0 + F_2 \sqrt{i}^2 = 632.5 V$

$\hookrightarrow C_{em} = k F_{mot} = 19.6 Nm$

$\hookrightarrow I_s = \frac{C_{em}}{3\phi_{SR}} = 29.4 A \quad (\beta = 0^\circ)$

b) *charge!*  $X_{cs} = L_{cs} \Omega_R = 2 \Omega$

$V_{sd} = -X_{cs} I_s = -58.8 V$

$V_{sq} = \underset{222.6V}{E} + R_s I_s = 222.9 V$

$\Rightarrow |V_s| = 230.2 V$

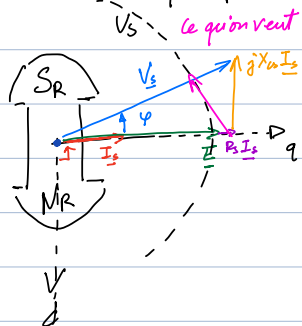
$\varphi = \arctan\left(\frac{X_{cs} I_s}{E + R_s I_s}\right) = 14.8^\circ$

$f_s = \dots$

e)  $V_s$  au delà de ce qu'on peut faire

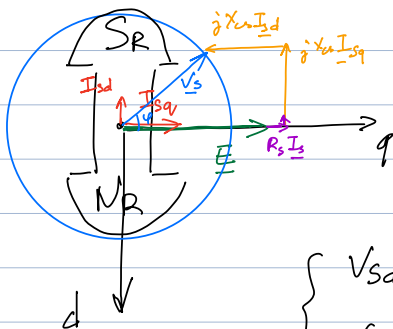
compenser fem trop grande

(rotor bobiné:  $I_d \downarrow \Rightarrow E \downarrow$ )



$E$  au delà de ce que peut fournir la batterie

2,2) "Défluxage par  $I_s$ "



$I_{sq} = I_s \cos \beta = 29.4 A^{>0} \Rightarrow \hat{M} \text{ couple garanti!}$   
 $I_{sd} = -15.8 A < 0 \rightarrow \text{déflux}$   
*Contre aimant*  
*autopilotage*

$V_{sd} = 0 + (R_s I_{sd}) + (-X_{cs} I_{sq}) = -59.1 V$   
 $V_{sq} = E + (R_s I_{sq}) + (X_{cs} I_{sd}) = 191.2 V$

$\Rightarrow |V_s| = 200 V$   
 $\varphi = -\arctan\left(\frac{-V_{sd}}{V_{sq}}\right) = 17.2^\circ$