

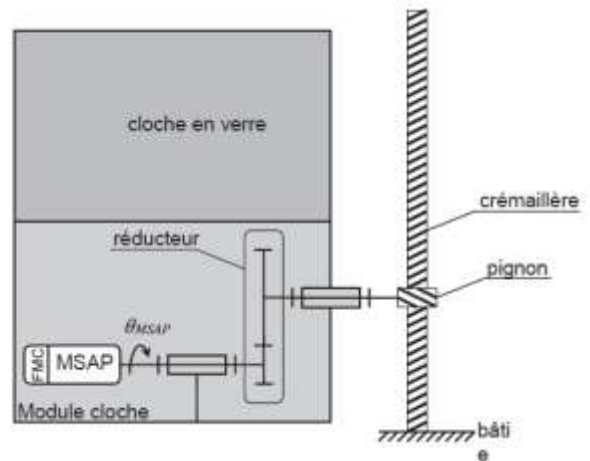


SiA 2018



Epreuve de Sciences Industrielles A

Vitrine sécurisée



**PARTIE 2**

**STRATÉGIE D'ALIMENTATION DE LA MOTORISATION D'ESCAMOTAGE/RELEVAGE DE LA CLOCHE**

**Objectif**

Cette partie a pour objectif l'analyse du fonctionnement et la validation de l'architecture de puissance intégrée dans le variateur associée à la stratégie de sa commande rapprochée.

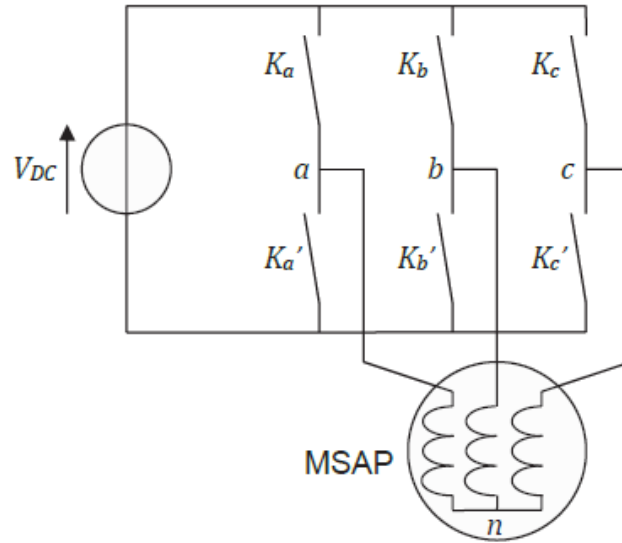
**Cahier des charges**

Afin d'assurer un fonctionnement correct de la MSAP, un extrait du cahier des charges du déplacement du module cloche est caractérisé par les données suivantes :

| Exigence                                      | Critères   | Niveaux                  | Flexibilité   |
|---|--|--------------------------|---------------|
| Id 0321<br>Alimentation en tension de la MSAP | 1. valeur efficace du fondamental des tensions simples des enroulements de la MSAP atteignable minimale  | >100 V                   | <i>aucune</i> |
|   | 2. réglage de l'amplitude du fondamental des tensions simples des enroulements de la MSAP  | 0% à 100% $V_{rms\_max}$ | <i>aucune</i> |
|   | 3. ratio amplitude du 1 <sup>er</sup> harmonique non nul de rang supérieur à 1 par rapport au fondamental sur une bande passante $\leq 20 \times$ fréquence du fondamental | 0,1                      | $\pm 10\%$    |

## Architecture de puissance intégrée dans le variateur

L'architecture de puissance du variateur d'alimentation de la MSAP comporte, entre autres, une structure de conversion continu→alternatif de type onduleur de tension triphasé comme suit :



La modélisation de l'onduleur utilise 2 types de fonctions.

Pour  $i \in \{a; b; c\}$  :

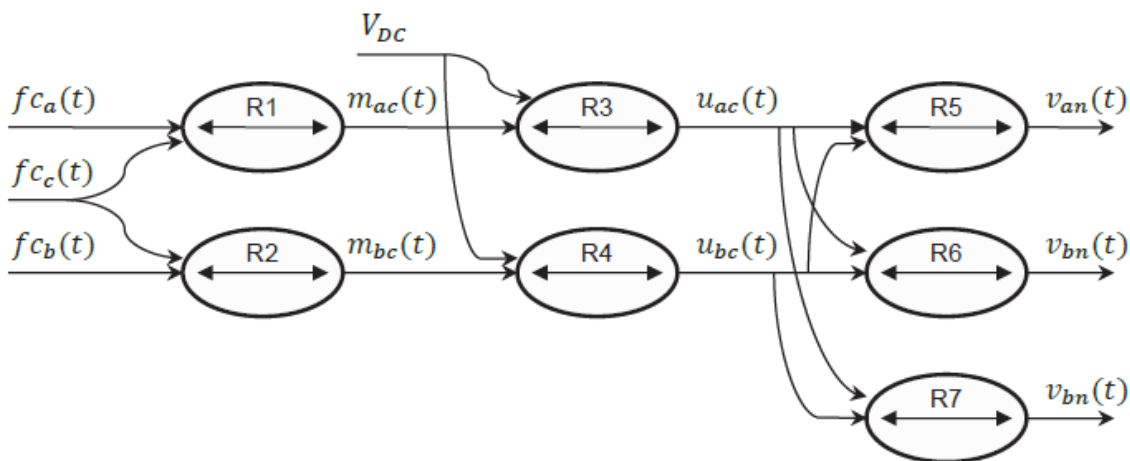
- les fonctions de connexion des interrupteurs  $K_i$  (respectivement  $K_i'$ ) à valeurs discrètes  $f_{c_i}$  (respectivement  $f_{c_i}'$ ) :
  - $f_{c_i} = 0$  si  $K_i$  est ouvert et  $f_{c_i} = 1$  si  $K_i$  est fermé ;
  - $f_{c_i}' = 0$  si  $K_i'$  est ouvert et  $f_{c_i}' = 1$  si  $K_i'$  est fermé.

Afin de respecter les règles d'interconnexion des sources dans le cas de l'onduleur, les fonctions de connexion vérifient la relation  $f_{c_i} + f_{c_i}' = 1$ .

- les fonctions de conversion  $m_{ij}$  de l'onduleur permettant d'exprimer les tensions de sortie  $u_{in}$  en fonction de la tension d'entrée  $V_{DC}$ .

### 2.1 Fonctions de commande

Soit le Graphe Informationnel Causal (GIC) décrivant les tensions fournies par l'onduleur piloté par les fonctions de connexion  $f_{c_a}$ ,  $f_{c_b}$  et  $f_{c_c}$  suivant :



**Question 25 :** donner les relations des processeurs R1 et R2 donnant  $m_{ac}(t)$  et  $m_{bc}(t)$  à partir des 3 fonctions de connexion  $f_{c_a}(t)$ ,  $f_{c_b}(t)$  et  $f_{c_c}(t)$  si les relations des processeurs R3 et R4 sont  $u_{ac}(t) = V_{DC}m_{ac}(t)$  et  $u_{bc}(t) = V_{DC}m_{bc}(t)$ .

La MSAP est équilibrée. La somme des 3 tensions simples de sortie  $v_{an}$ ,  $v_{bn}$  et  $v_{cn}$  est nulle (pas de composante homopolaire) :  $v_{an}(t) + v_{bn}(t) + v_{cn}(t) = 0$ .

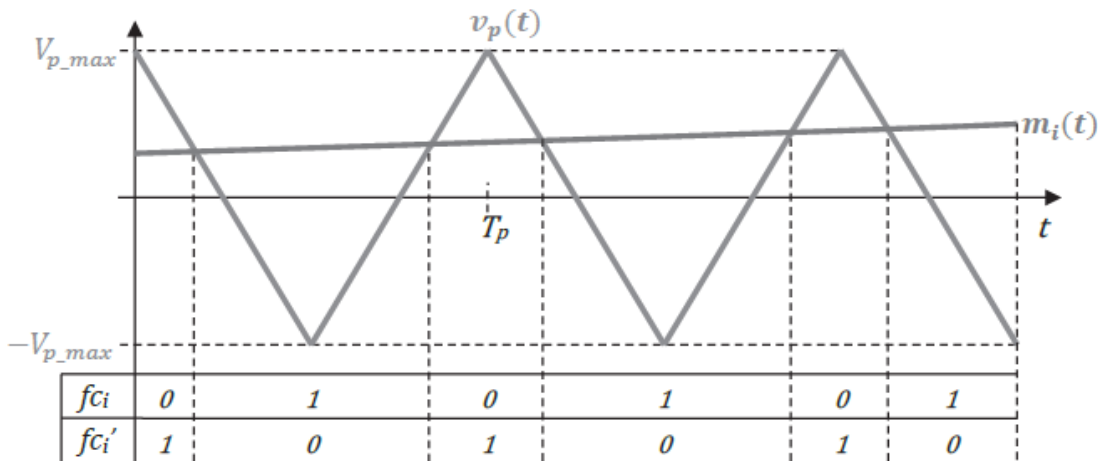
**Question 26 :** donner les relations des processeurs R5, R6 et R7 donnant  $v_{an}(t)$ ,  $v_{bn}(t)$  et  $v_{cn}(t)$  à partir des tensions  $u_{ac}(t)$  et  $u_{bc}(t)$ .

**Question 27 :** déterminer le contenu de la matrice permettant de générer les 3 tensions  $v_{an}(t)$ ,  $v_{bn}(t)$  et  $v_{cn}(t)$  à partir des 3 fonctions de connexion  $f_{c_a}(t)$ ,  $f_{c_b}(t)$  et  $f_{c_c}(t)$ .

## 2.2 Commande en modulation de largeur d'impulsion –MLI–

Le concepteur du variateur a opté pour une stratégie de commande en modulation de largeur d'impulsion –MLI– de chacun des bras qui compose l'onduleur de tension.

La stratégie de commande des interrupteurs  $K_i$  et  $K_i'$  utilise les fonctions de connexion  $f_{c_i}$  et  $f_{c_i}'$  associées aux fonctions de conversion  $m_i(t)$  et de la porteuse  $v_p(t)$  pour  $i \in \{a; b; c\}$  suivante :



Le système compare une modulateur  $m_i(t)$  à une porteuse  $v_p(t)$ .

Chaque modulateur est telle que  $m_i(t) \in [-V_{p,max}; V_{p,max}]$ .

La porteuse  $v_p(t)$  est une fonction triangulaire à la fréquence  $f_p = \frac{1}{T_p}$  très supérieure à la largeur du spectre fréquentiel de la modulateur. La variation de la modulateur  $m_i(t)$  sur une période porteuse  $T_p$  est donc négligeable.

**Question 28 :** déterminer la valeur moyenne  $f_{c_{i,avg}}$  de  $f_{c_i}(t)$  en fonction de  $V_{p,max}$  et de la modulateur  $m_i(t)$  sur une période  $T_p$ .

Les 3 modulantés sont générées de telle sorte que  $m_a(t) + m_b(t) + m_c(t) = 0$ .

Les 3 valeurs moyennes des tensions de la MSAP en fonction des valeurs moyennes des

fonctions de connexion sont 
$$\begin{bmatrix} v_{an\_avg}(t) \\ v_{bn\_avg}(t) \\ v_{cn\_avg}(t) \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f c_{a\_avg}(t) \\ f c_{b\_avg}(t) \\ f c_{c\_avg}(t) \end{bmatrix}$$

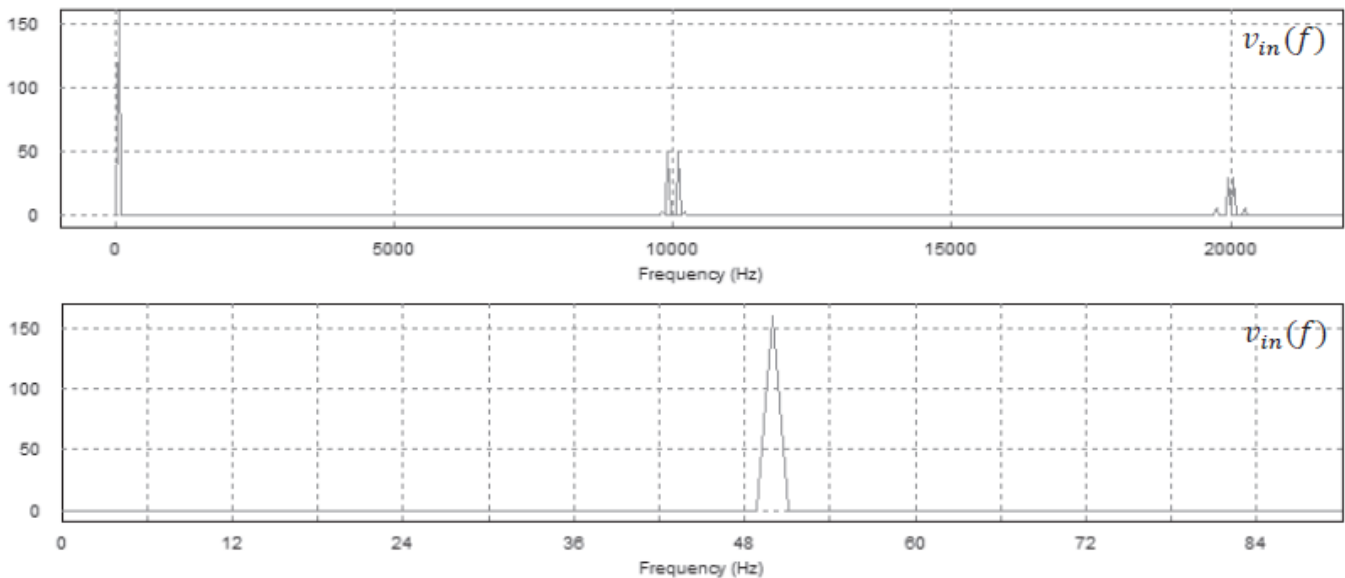
**Question 29 :** déterminer le scalaire qui, multiplié par le vecteur des modulantés  $\begin{bmatrix} m_a(t) \\ m_b(t) \\ m_c(t) \end{bmatrix}$ ,

génère le vecteur des tensions de sortie  $\begin{bmatrix} v_{an\_avg}(t) \\ v_{bn\_avg}(t) \\ v_{cn\_avg}(t) \end{bmatrix}$ .

Les 3 modulantés générées sont 
$$\begin{bmatrix} m_a(t) \\ m_b(t) \\ m_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{p\_max} \sin(\omega t) \\ V_{p\_max} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{p\_max} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Une analyse à l'aide d'un outil de simulation numérique de la forme d'onde des tensions simples  $v_{an}(t)$ ,  $v_{bn}(t)$  et  $v_{cn}(t)$  appliquées à la MSAP par l'onduleur de tension a été réalisée avec des modulantés de fréquence 50 Hz et d'amplitude  $V_{p\_max}$  et une porteuse à la fréquence  $f_p = 10$  kHz.

Le spectre fréquentiel des amplitudes de ces 3 tensions  $v_{in}(t)$  pour  $i \in \{a; b; c\}$  avec un zoom pour les fréquences basses est le suivant :



**Question 30 :** vérifier si les exigences sur l'amplitude du fondamental et l'exigence sur l'amplitude des harmoniques sont vérifiées avec  $V_{DC} = 320$  V. Conclure quant à l'opportunité d'utiliser une commande MLI.

## PARTIE 3

# MODÈLE DE GÉNÉRATION DE COUPLE DE LA MOTORISATION D'ESCAMOTAGE/RELEVAGE

### Objectif

Cette partie a pour objectif de définir une architecture asservie de commande en courant de la MSAP afin d'assurer le déplacement contrôlé en couple du module cloche.

Dans une première partie on s'attachera à la stabilité statique et la détermination du couple électromagnétique généré par la MSAP (machine synchrone autopilotée).

Dans une seconde partie on vérifiera la capacité en régime permanent de l'ensemble MSAP/variateur.

Dans une troisième partie on s'attachera à l'autopilotage de la MSAP avec génération des courants asservis.

### Cahier des charges

Afin d'assurer un déplacement souple du module cloche (génération asservie du couple de la MSAP), un extrait du cahier des charges du déplacement du module cloche est caractérisé par les données suivantes :

| Exigence                        | Critères   | Niveaux                                   | Flexibilité   |
|---------------------------------|--|---|---------------|
| Id 0321                         | 1. point couple/vitesse $\{ C_{MSAP} ,  \Omega_{MSAP} \}$                                | $\{2 \text{ Nm}, 300 \text{ rads}^{-1}\}$ | <i>aucune</i> |
| Génération de couple de la MSAP | 2. réponse de l'enveloppe apériodique<br>3. erreur statique en l'absence de perturbation | $D\% = 0$<br>0                            | <i>aucune</i> |
|                                 | 4. bande passante en couple $f_{BF\_Cem}$  | $\geq 1000 \text{ Hz}$                    | <i>aucune</i> |
|                                 | 5. ondulation de couple  | $\leq \pm 5\%$                            | <i>aucune</i> |

La MSAP a été dimensionnée et sélectionnée pour répondre aux exigences mécaniques dans le respect d'un état thermique acceptable.

Cette MSAP est de technologie machine synchrone triphasée, couplée en étoile, à aimant permanent, entrefer constant et forces électromotrices (fem) sinusoïdales.

On rappelle que la MSAP choisie a les caractéristiques principales suivantes :

| Nbre de paires de pôles | Couple nominal | Couple maximal    | Courant efficace nominal | Inertie du rotor            | Masse de la MSAP | Résistance d'un enroulement statorique | Inductance cyclique | Coefficient de couplage électromécanique $\left(\frac{f_{em\_max}}{N}\right)$ | Coefficient de couplage électromécanique $\left(\frac{C_{em\_max}}{I_{s\_max}}\right)$ | Vitesse de rotation maximale        | Constante de temps thermique |
|-------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|--|---------------------|---|--|-------------------------------------|------------------------------|
| $p$                     | $C_N$<br>[Nm]  | $C_{max}$<br>[Nm] | $I_n$<br>[A]             | $J$<br>[kgcm <sup>2</sup> ] | $m$<br>[kg]      | $R_s$<br>[Ω]                           | $L_{sC}$<br>[mH]    | $k_e$<br>[Vmintr <sup>-1</sup> ]  | $k_t$<br>[NmA <sup>-1</sup> ]  | $N_{max}$<br>[trmin <sup>-1</sup> ] | $\tau_{th}$<br>[min]         |
| 3                       | 0,7            | 4                 | 1,6                      | 0,3                         | 2,8              | 6,3                                    | 14,3                | 0,026   | 0,37   | 6500                                | 15                           |

### 3.1 Génération de couple, stabilité

On se place dans le cas d'utilisation d'une machine synchrone triphasé à entrefer constant sans saturation du circuit magnétique et forces électromotrices (fem) sinusoïdales en régime permanent équilibré.

Les notations des paramètres et des variables et les équations de comportements sont fournies à la page suivante.

On note :

- $p$  le nombre de paires de pôles ;
- $\Omega_{MSAP}$  la vitesse de rotation de la MSAP ;
- $\omega_S$  la pulsation des tensions et des courants alimentant le stator ;
- $\Phi_{fi}(t)$  avec  $i \in \{a; b; c\}$ , le flux traversant chaque enroulement statorique généré par l'inducteur de valeur efficace constante  $\Phi_{f\_rms}$  ;
- $e_i(t)$  avec  $i \in \{a; b; c\}$ , la force électromotrice (fem) de valeur efficace constante  $E_{rms}$  générée dans chaque enroulement statorique par chaque flux  $\Phi_{fi}(t)$  ;
- $i_i(t)$  avec  $i \in \{a; b; c\}$ , le courant circulant dans chaque enroulement statorique de valeur efficace  $I_{rms}$ .

Les flux induits par l'inducteur (le rotor) en rotation à vitesse constante  $\Omega_{MSAP}$  dans les 3 phases statoriques génèrent 3 fem dans les 3 enroulements statoriques de la MSAP :

$$\begin{cases} \Phi_{fa}(t) = \Phi_{f\_rms} \sqrt{2} \cos(p\Omega_{MSAP}t) \\ \Phi_{fb}(t) = \Phi_{f\_rms} \sqrt{2} \cos\left(p\Omega_{MSAP}t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Phi_{fc}(t) = \Phi_{f\_rms} \sqrt{2} \cos\left(p\Omega_{MSAP}t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} e_a(t) = p\Omega_{MSAP} \Phi_{f\_rms} \sqrt{2} \cos\left(p\Omega_{MSAP}t + \frac{\pi}{2}\right) \\ e_b(t) = p\Omega_{MSAP} \Phi_{f\_rms} \sqrt{2} \cos\left(p\Omega_{MSAP}t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c(t) = p\Omega_{MSAP} \Phi_{f\_rms} \sqrt{2} \cos\left(p\Omega_{MSAP}t + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

On injecte dans les enroulements statoriques 3 courants :

$$\begin{cases} i_a(t) = I_{rms} \sqrt{2} \cos\left(\omega_S t + \frac{\pi}{2} - \Psi\right) \\ i_b(t) = I_{rms} \sqrt{2} \cos\left(\omega_S t + \frac{\pi}{2} - \Psi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c(t) = I_{rms} \sqrt{2} \cos\left(\omega_S t + \frac{\pi}{2} - \Psi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

La puissance électromagnétique résultante est  $P_{em}(t) = e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t)$

**Question 31 :** déterminer la relation donnant le couple électromagnétique  $C_{em}(t)$  de la MSAP en fonction de  $p, \Omega_{MSAP}, \Phi_{f\_rms}, I_{rms}, \omega_S$  et  $\Psi$ .  
(rappel :  $2 \cos(a) \cos(b) = \cos(a + b) + \cos(a - b)$ )

**Question 32 :** en analysant le résultat de la question précédente définir 2 relations permettant à la MSAP de générer un couple constant non nul.

La stabilité statique est décrite par la caractéristique qui représente l'évolution du couple électromagnétique en fonction de l'écart angulaire entre les champs de l'inducteur (rotor) et de l'induit (stator) pour des amplitudes et des fréquences des tensions et des courants statoriques données et pour un fonctionnement au synchronisme. La stabilité statique de la MSAP est obtenue si  $\frac{\partial C_{em}}{\partial \alpha} > 0$  avec  $\alpha$  l'angle entre le champ inducteur (rotor) et le champ induit (stator) tel que  $\alpha = \frac{\pi}{2} - \Psi$ .

**Question 33 :** sur l'intervalle  $\Psi \in [-\pi, \pi]$  déterminer la zone de fonctionnement stable de la MSAP.

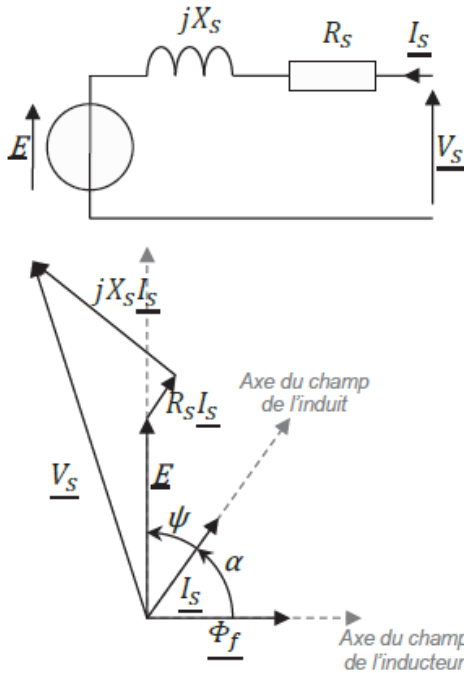
**Question 34 :** en synthèse des questions précédentes, énoncer les variables à contrôler sur la MSAP pour assurer la gestion du couple électromagnétique avec un comportement stable de la MSAP.

### 3.2 Validation en régime permanent du point de fonctionnement maximal à atteindre

Les questions précédentes ont permis de sélectionner la MSAP en définissant les points de fonctionnement dans le plan couple/vitesse sur un cycle escamotage/relevage du module cloche. Le point le plus contraignant pour la MSAP est  $\{\Omega_{MSAP}; C_{MSAP}\} = \{300 \text{ rads}^{-1}; -2 \text{ Nm}\}$ .

Les questions précédentes ont ensuite permis de déterminer la plage de valeurs de la tension simple efficace de sortie du variateur, considérée comme sinusoïdale, atteignable par l'onduleur pour alimenter la MSAP :  $V_{\text{variateur\_rms\_max}} = 110 \text{ V}$ .

On se place dans le cas d'un fonctionnement en régime permanent au synchronisme permettant d'utiliser le modèle monophasé équivalent de Behn-Eschenbourg de la MSAP.



$\underline{V}_S$  tension simple d'alimentation d'une phase statorique ;  
 $\underline{E}$  fem induite et proportionnelle à la vitesse de rotation de la MSAP ;  
 $\underline{I}_S$  courant d'alimentation d'une phase statorique ;  
 $X_S = L_{Sc} \omega_S$  réactance synchrone d'un enroulement statorique avec  $\omega_S$  la pulsation des tensions et courants statoriques et  $L_{Sc}$  l'inductance cyclique ;  
 $\underline{\Phi}_f$  flux induit par l'inducteur (le rotor).

On rappelle que la MSAP sélectionnée, couplée en étoile, possède  $p = 3$  paires de pôles.

L'autopilotage de la MSAP régule l'angle  $\Psi = 0 \text{ rad}$ .

On note le nombre imaginaire  $j$  tel que  $j^2 = -1$ .

**Question 35 :** déterminer littéralement la valeur de la réactance synchrone  $X_S = L_{Sc} \omega_S$  en fonction de  $L_{Sc}$ ,  $p$  et  $\Omega_{MSAP}$ . Réaliser l'application numérique pour la vitesse de rotation  $\Omega_{MSAP} = 300 \text{ rads}^{-1}$ .

**Question 36 :** déterminer numériquement les valeurs efficaces de la fem  $E_{rms}$  et du courant  $I_{S,rms}$  correspondant respectivement à la vitesse de la MSAP  $\Omega_{MSAP} = 300 \text{ rads}^{-1}$  et du couple de la MSAP  $|C_{MSAP}| = 2 \text{ Nm}$ .

**Question 37 :** tracer l'allure du diagramme de Fresnel de la loi des mailles associée à la maille  $\{\underline{E}; jX_S; R_S; \underline{V}_S\}$  du modèle de Behn-Eschenbourg correspondant au point de fonctionnement.

**Question 38 :** écrire une relation donnant  $V_{S,rms}$  en fonction de  $E_{rms}$ ,  $X_S$ ,  $R_S$  et  $I_{S,rms}$ . Réaliser l'application numérique. Comparer avec la valeur efficace maximale atteignable par le variateur  $V_{\text{variateur\_rms\_max}} = 110 \text{ V}$ .

### 3.3 Autopilotage de la MSAP

#### 3.3.1 Architecture globale

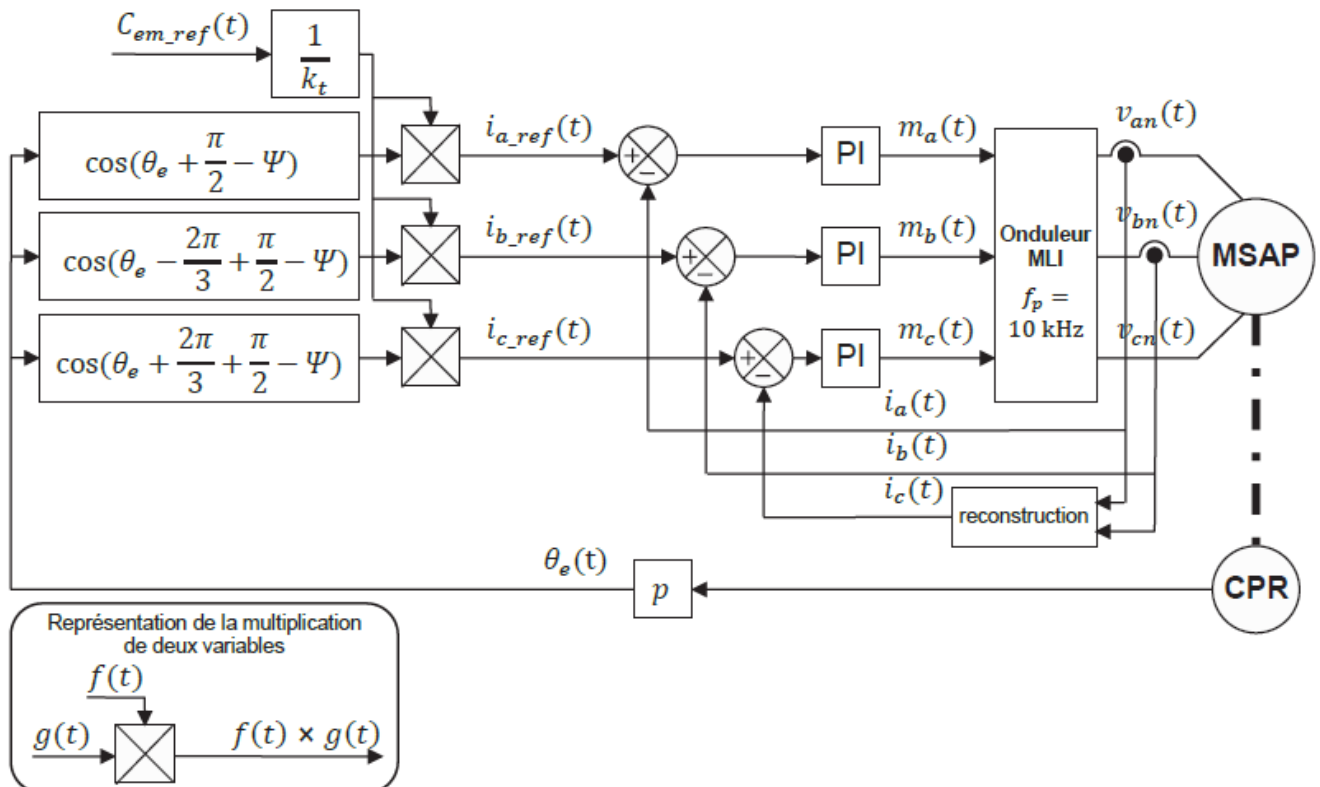
La partie précédente définit les variables à piloter pour assurer la génération du couple électromagnétique de la MSAP avec un comportement stable.

L'architecture de commande embarquée dans le variateur qui alimente la MSAP est une commande scalaire.

Cette commande asservit séparément chaque courant de chaque enroulement statorique  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  à trois références de courant statorique  $i_{a\_ref}$ ,  $i_{b\_ref}$  et  $i_{c\_ref}$ .

Ces 3 références sont générées en fonction du couple électromagnétique désiré et de la position du rotor par rapport au stator (autopilotage) à l'aide d'un CPR (capteur de position rotor).

L'architecture globale de commande est la suivante :



**Question 39 :** le concepteur de l'architecture de commande n'a implanté que 2 capteurs de courant pour mesurer  $i_a$  et  $i_b$ . Préciser comment on reconstruit le troisième courant  $i_c$ .

La vitesse de rotation maximale de la MSAP sur le cycle est  $\Omega_{MSAP\_max} = 300 \text{ rads}^{-1}$ .

**Question 40 :** déterminer la pulsation maximale des trois courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  alimentant la MSAP. À partir de l'analyse de l'architecture de commande ci-avant, définir, en l'argumentant, un choix de la bande passante des trois boucles de courant.