



# **Variation de Vitesse des Machines Alternatives**

**GEL471i**

# SOMMAIRE

<b><i>PREMIERE PARTIE : TD D'ETUDE DE LA COMMANDE VECTORIELLE DU TRAMWAY DE STRASBOURG</i></b>	<b><i>3</i></b>
Présentation générale-----	4
TD 1 : Eléments de dimensionnement de la chaîne électromécanique -----	6
TD 2 : Commande vectorielle de l'association convertisseur-moteur-----	8
TD 3 : MLI et interactions convertisseur - moteur -----	10
<b><i>DEUXIEME PARTIE : Contrôle vectoriel à flux rotorique orienté d'un moteur asynchrone</i></b>	<b><i>12</i></b>

# PREMIERE PARTIE : TD D'ETUDE DE LA COMMANDE VECTORIELLE DU TRAMWAY DE STRASBOURG



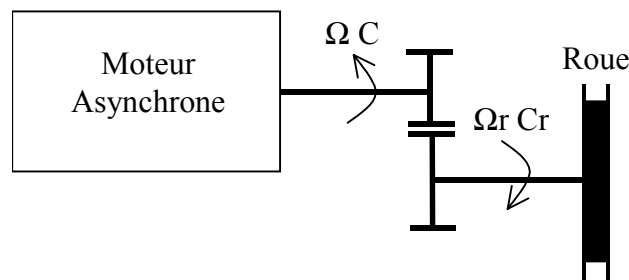
## Présentation générale

Le tramway de Strasbourg est en circulation depuis novembre 1994. Une rame est constituée de 3 caisses reliées entre elles par des modules A chaque extrémité se situe une cabine de conduite. Elle comporte quatre bogies disposés sous les modules et les cabines, dont trois sont moteurs. Un bogie moteur est composé de quatre roues entraînées chacune par un moteur asynchrone triphasé par l'intermédiaire d'un réducteur. Une rame de tramway est donc motorisée par douze moteurs asynchrones.

### I. Caractéristiques d'une rame

- Longueur hors tout : 33,10 m ;
- Largueur hors tout : 2,4 m ;
- Hauteur du véhicule : 3,1 m ;
- Poids à vide : 40 t ;
- Poids total correspondant à la charge nominale : 60 t ;
- Nombres de places assises : 66 ;
- Nombre total de places : 290 ;
- Vitesse maximale en service : 60 km/h ;
- Accélération moyenne pour une vitesse de 0 à 40 km/h :  $1 \text{ m/s}^2$
- Accélération moyenne pour une vitesse de 0 à 60 km/h :  $0,77 \text{ m/s}^2$  ;
- Décélération moyenne maximale :  $3 \text{ m/s}^2$  ;
- Coefficient de résistance à l'avancement :  $k=50 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ .

### II. Caractéristiques de la chaîne cinématique d'une roue motrice



- Diamètre de la roue :  $D=0,52 \text{ m}$  ;
- Moment d'inertie de la roue :  $J_{\text{roue}} = 4.3 \text{ kg.m}^2$  ;
- Rapport de réduction du réducteur :  $1/r = 1/10$  ;
- Rendement du réducteur :  $\eta = 0.8$  ;
- Coefficient de frottement roue-rail :  $\lambda = 0,01$ .

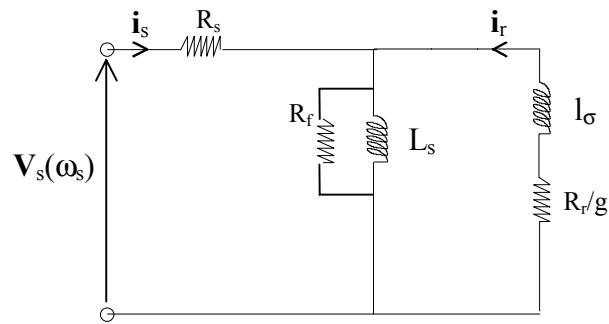
### III. Caractéristiques d'un moteur de traction

Chaque moteur de traction est un moteur asynchrone triphasé 4 pôles refroidis par un mélange eau (56%) et éthylène-glycol (44%) sous une pression d'environ 1.5 bars et un débit de 5 l/min. Le stator est constitué de trois enroulements à pas raccourci et couplés en étoile. Chaque enroulement est réalisé à l'aide de couronnes formées de fils de cuivre pré-insulés avec un émail de classe H. Le rotor est constitué d'un enroulement à cage d'écureuil en aluminium moulé sous pression.

Les caractéristiques du moteur sont les suivantes :

- Puissance utile nominale :  $P_n = 24.6 \text{ kW}$  ;
- Couple utile nominal :  $C_n = 90 \text{ Nm}$  ;
- Courant nominal :  $I_{sn} = 35.4 \text{ A}$  ;
- Tension nominale entre phases :  $U_n = 585 \text{ V}$  ;
- Fréquence nominale :  $F_n = 88 \text{ Hz}$  ;
- Nombre de paires de pôles :  $p = 2$  ;
- Vitesse nominale de rotation du rotor :  $N_n = 2610 \text{ tr/min}$  ;
- Facteur de puissance nominal  $\cos\phi_n = 0.7341$  ;
- Rendement nominal :  $\eta_n = 0.9309$  ;
- Moment d'inertie du rotor :  $J = 0.112 \text{ kg.m}^2$ .

Le schéma équivalent par phase du moteur fonctionnant en régime sinusoïdal établi est le suivant :



Toutes les grandeurs sont ramenées côté stator.

Les valeurs des paramètres du schéma équivalent sont :

- $R_s = 0,1866 \Omega$
- $R_f = 629,1 \Omega$
- $L_s = 27,72 \text{ mH}$
- $R_r = 0,1503 \Omega$
- $l_\sigma = 2,53 \text{ mH}$

Le glissement est noté  $g$ .

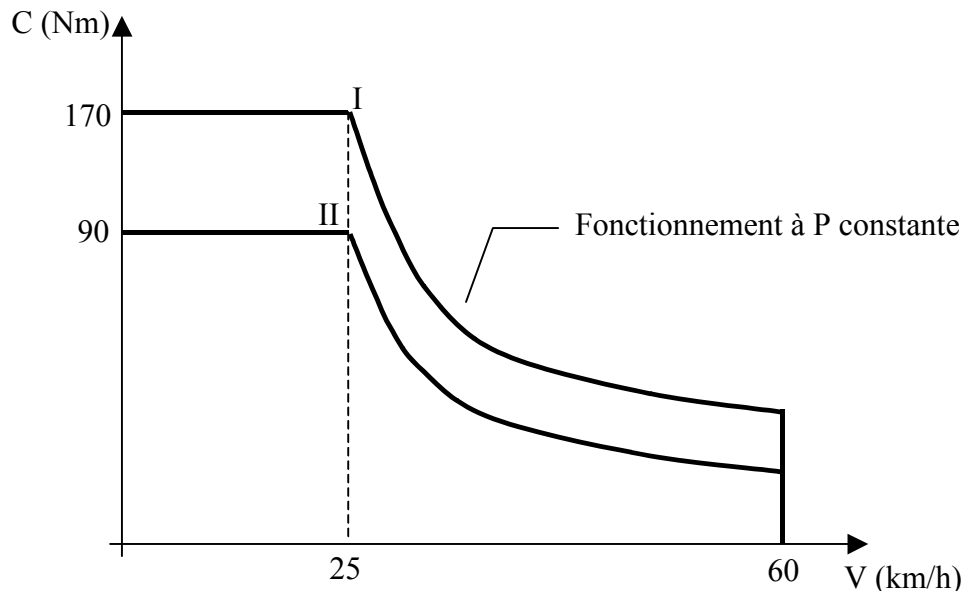
#### IV. Caractéristiques de la chaîne de traction

Au total, il y a 6 onduleurs de traction, deux par bogie. Chaque onduleur alimente les deux machines asynchrones situées du même côté d'un bogie. Cette alimentation indépendante des roues situées à droite et à gauche du bogie permet d'améliorer les passages en courbe.

Le conducteur module l'effort de traction par l'intermédiaire d'une manette. En fait, ceci revient à moduler le couple électromagnétique des moteurs. Le constructeur a choisi d'implanter une commande permettant d'imposer le couple électromagnétique instantané sur l'arbre des moteurs. Il s'agit d'une commande dite vectorielle à flux rotorique orienté.

## TD 1 : Eléments de dimensionnement de la chaîne électromécanique

On néglige les pertes du moteur asynchrone. La caractéristique du couple sur l'arbre d'un moteur en fonction de la vitesse linéaire du tramway est donnée sur la figure ci-dessous pour deux positions différentes de la manette.



Les forces s'opposant à l'avancement de la rame du tramway sont :

- $F_1 = M \cdot g_p \cdot \lambda$  pour la force de frottement roue-rail où  $M$  est la masse de la rame de tramway et  $g_p$  l'accélération de la pesanteur terrestre ;
- $F_2 = k \cdot v$  pour la force de résistance à l'avancement supposée proportionnelle à la vitesse  $v$  (en m/s) (on a supposé négligeable les forces de résistance aérodynamique proportionnelles au carré de la vitesse pour des raisons de simplicité de calcul).

### I. Détermination des caractéristiques de charge

#### I.1. Sur le plat

La rame roule sur le plat sous une charge nominale. Déterminer les expressions des couples résistants  $C_1$  et  $C_2$  ramenés sur l'arbre d'un moteur, dus respectivement aux forces  $F_1$  et  $F_2$ . Pour cela, on supposera pouvoir ramener ces deux forces à des efforts tangentiels sur les jantes. On prendra toutefois garde à ce qu'une jante ne supporte pas l'ensemble des efforts !

Donner l'expression du couple résistant total  $C_t$  s'exerçant sur l'arbre d'un moteur en fonction de la vitesse  $V$ (km/h). Reporter la caractéristique correspondante dans le plan  $C(V)$ .

En déduire la vitesse de la rame de tramway en régime établi. Estimer la fréquence d'alimentation du moteur dans ces conditions si on suppose que le glissement du moteur asynchrone est faible.

#### I.2. En pente

Le trajet présente par endroit une pente de 8%. Calculer, dans le cas de la charge nominale, la force  $F_3$  qui s'oppose à l'avancement de la rame. En déduire la valeur du couple  $C_3$  correspondant ramené sur l'arbre d'un moteur. Que devient l'expression de  $C_t$ . Reporter la nouvelle caractéristique  $C_t(V)$  dans le plan  $C(V)$ .

Quelle est la position de la manette et la vitesse atteinte ?

### II. Etude du démarrage

L'objectif de cette partie est le calcul de la durée de démarrage sur le plat.

On note :

- $J_{rc}$  le moment d'inertie des masses en translation ramené côté roue ;
- $J_c$  le moment d'inertie des masses en translation ramené côté moteur ;

- $J_t$  le moment d'inertie total des masses en mouvement (en rotation et en translation) ramené côté moteur.

### **II.1. Calcul de l'inertie totale**

La charge de la rame est nominale.

Déterminer l'expression de  $J_{rc}$  en fonction de  $M$  et  $D$ . En déduire l'expression de  $J_c$  en fonction de  $M$ ,  $D$ ,  $r$  et  $\eta$ .

Exprimer l'inertie totale  $J_t$  en fonction de  $M$ ,  $D$ ,  $r$  et  $\eta$   $J_{roue}$  et  $J$ .

### **II.2. Calcul de la durée de démarrage sur le plat**

La rame est à l'arrêt sur le plat. A  $t = 0$ , le conducteur démarre le tram en enclenchant la manette sur la position II.

Quelle est la durée du démarrage avant que la rame n'atteigne sa vitesse en régime établi ?

## **III. Dimensionnement des moteurs de traction**

On suppose que le moteur est alimenté par des tensions triphasées équilibrées sinusoïdales.

### **III.1. Bilan de puissance**

Expliquer à partir du bilan de puissance comment s'opère la conversion électromécanique.

Donner en fonction du glissement et de la valeur efficace du courant ir les expressions de :

- $P_t$  la puissance électrique totale transmise au secondaire ;
- $P_{jr}$  les pertes joules rotor ;
- $P_m$  la puissance mécanique totale.

Quelle est la relation entre  $P_t$  et le couple moteur  $C$  ? On supposera les pertes mécaniques du moteur négligeables.

### **III.2. Caractéristique couple-vitesse**

On néglige la résistance statorique et les pertes fer.

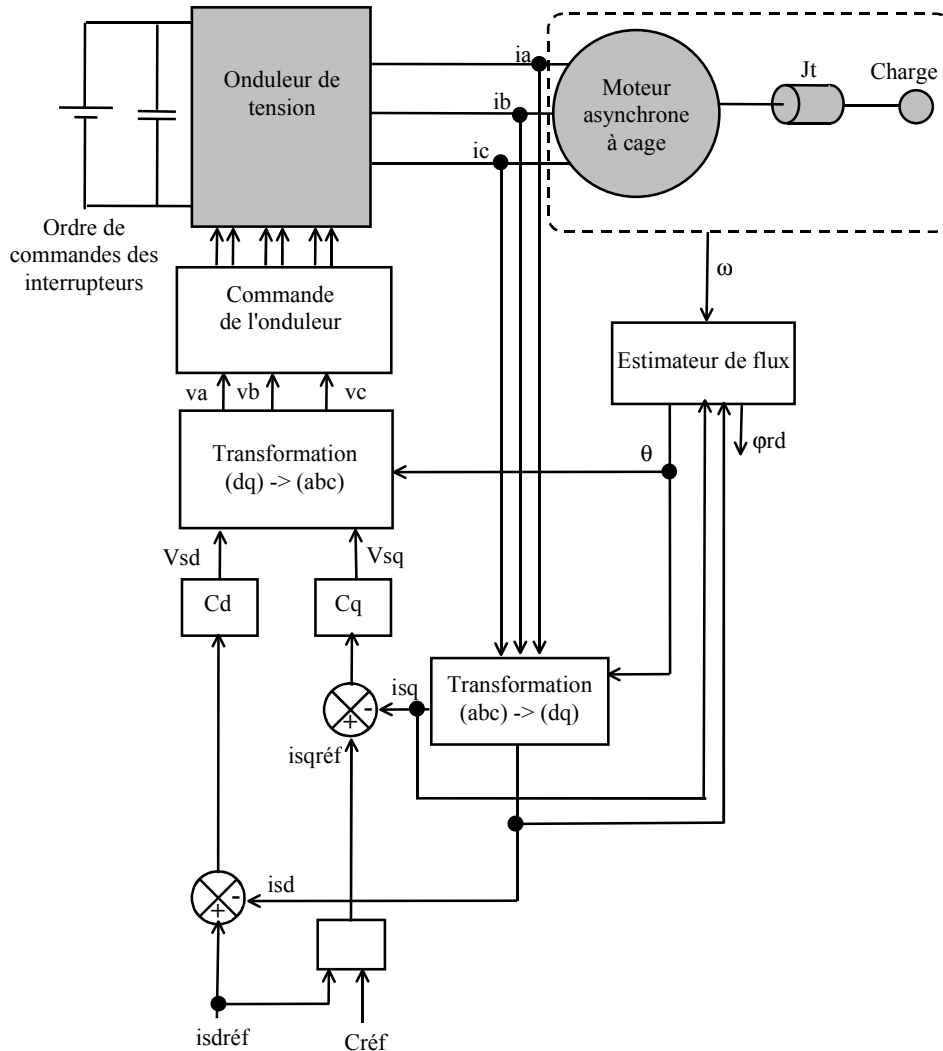
Donner l'expression du couple en fonction des paramètres du schéma équivalent vu du primaire.

Tracer l'allure de la caractéristique  $C(V)$  où  $V$  est en km/h. Donner les valeurs des points caractéristiques lorsque le moteur est alimenté sous tension et fréquence nominales. Comparer par rapport aux caractéristiques nominales du moteur.

Conclure sur le choix du moteur de traction vis à vis des contraintes de fonctionnement de la rame.

## TD 2 : Commande vectorielle de l'association convertisseur-moteur

La commande de l'association doit permettre le contrôle du couple des moteurs asynchrones. Pour cela, une stratégie de contrôle vectoriel à flux rotorique orienté est utilisée. Le schéma de principe de la commande est donné ci-dessous (les termes de découplage n'apparaissent pas par souci de simplicité).



On suppose le contrôle des courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  parfait.

### I. Détermination des équations de la commande

Les pertes fer sont négligées. Partant des équations du schéma équivalent, donner les équations vectorielles qui lient  $\mathbf{V}_s$ ,  $\mathbf{i}_s$ , et  $\boldsymbol{\varphi}_r$  en régime établi. Projeter ces équations sur les axes d et q d'un référentiel tournant à la vitesse des champs, l'axe d étant confondu avec le vecteur  $\boldsymbol{\varphi}_r$ .

Donner les relations entre le couple électromagnétique  $C$ , la pulsation rotorique  $\omega_r$  ( $\omega_r = g \omega_s$ ) et le flux rotorique. Relier de même les composantes d et q du courant statorique  $\mathbf{i}_s$  à  $\omega_r$  et aux composantes du flux rotorique.

### II. Etude du démarrage

#### II.1. Etude de la magnétisation du moteur asynchrone

Le moteur étant à l'arrêt et non magnétisé, on applique les consignes  $I_{sd0} = 22 \text{ A}$  et  $I_{sq0} = 0$ .

En déduire les valeurs du flux rotorique qui s'établit dans le moteur, de la fréquence d'alimentation, du couple et de la tension statorique.

### **II.2. Application de la consigne de couple**

On applique ensuite une consigne de couple égale à 90 Nm. Que devient la fréquence d'alimentation ? Quelle la valeur du courant statorique de démarrage ? Quelle est la valeur de la tension statorique au début du démarrage ?

Que se passerait-il si le démarrage n'était pas précédé d'une phase de magnétisation du moteur ?

## **III. Etude de la variation de la vitesse**

### **III.1. De 0 à 25 km/h**

Une fois démarré, la vitesse du moteur augmente. La commande assure un couple constant jusqu'à une vitesse de la rame de 25 km/h. Déterminer la valeur de la tension statorique et de la pulsation statorique lorsque la rame a atteint une vitesse de 25 km/h.

Si on néglige les termes résistifs, comment varie la tension statorique avec  $\omega_s$  ?

### **III.2. De 25 à 60 km/h**

A partir de 25 km/h, la commande passe en mode de défluxage : la consigne de flux est diminuée selon une loi en  $1/\omega_s$ . D'autre part, la consigne  $I_{sq}$  est maintenue constante.

Comment s'expriment en conséquence les lois de variation de  $\omega_r$  et C en fonction de  $\omega_s$  ? En quoi peut-on dire que le fonctionnement est à puissance constante ?

Si on néglige les termes résistifs, comment varie la tension statorique avec  $\omega_s$  ?

Quelles sont les valeurs de  $\omega_r$ ,  $\varphi_r$ , C,  $i_s$  et  $V_s$  quand la vitesse de 60 km/h est atteinte ?

### **III.3. Résumé**

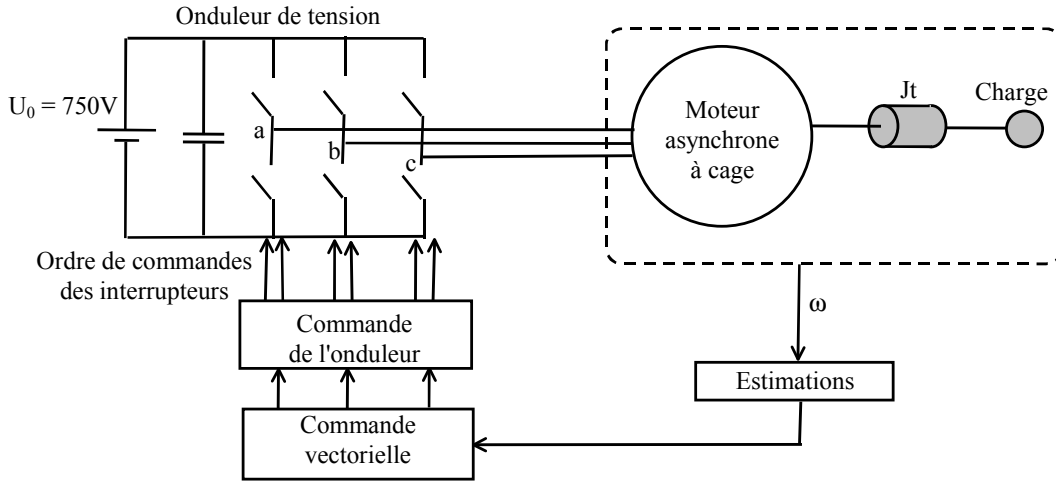
Tracer les allures des caractéristiques de  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $\omega_r$ ,  $\omega_s$ ,  $v_{sd}$ ,  $v_{sq}$ ,  $v_s$  et C en fonction de la vitesse.

## **IV. Etude du freinage**

La rame roule sur le plat en régime établi à 60 km/h. Brutalement, une consigne de freinage inverse la valeur du couple. Que devient la fréquence d'alimentation ?

## TD 3 : MLI et interactions convertisseur - moteur

Les douze moteurs asynchrones sont chacun alimentés par un onduleur de tension triphasé selon le schéma suivant :



Selon la fréquence d'alimentation de la machine, deux modes de commande de l'onduleur sont utilisés :

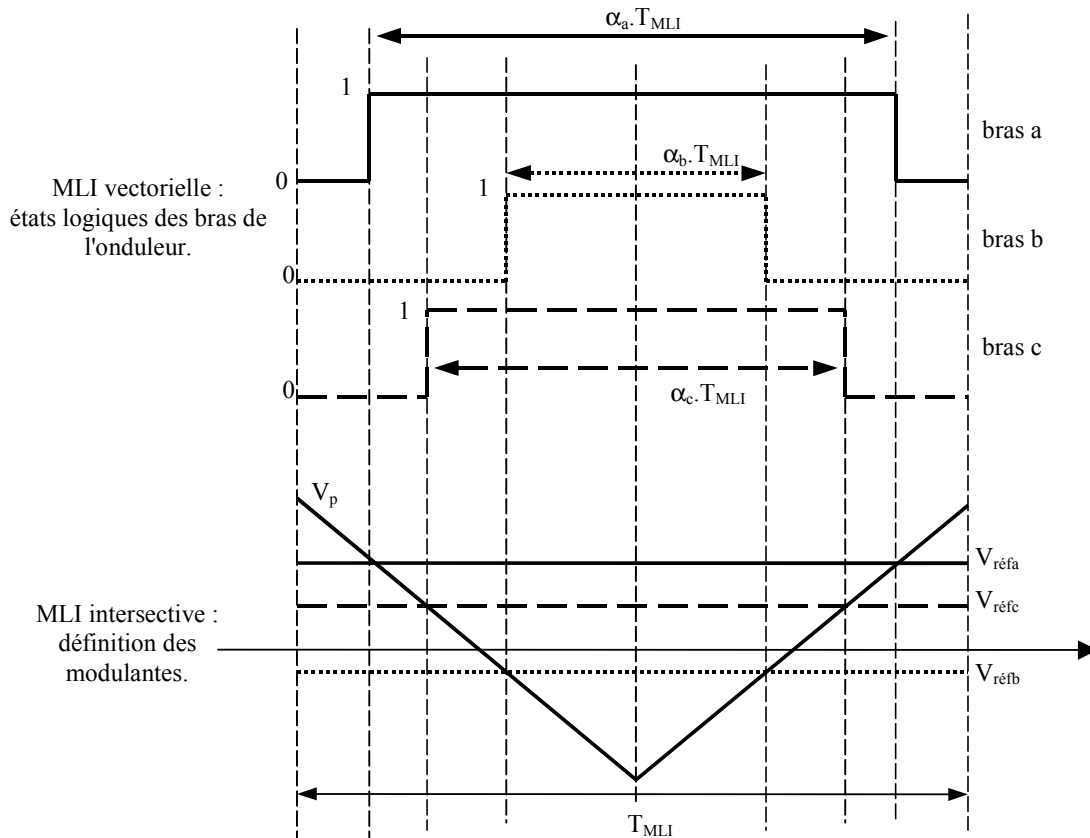
- la MLI vectorielle pour une fréquence inférieure à 20 Hz ;
- la modulation à angles calculés au-delà.

Dans tous les cas, l'objectif est d'obtenir aux bornes du moteur une tension triphasée, d'amplitude et de fréquence variables tout en minimisant les harmoniques.

On distingue deux neutres : n le neutre du moteur et  $n_0$  définissant le point milieu du bus continu.

### I. La MLI vectorielle

On considère le motif de MLI vectorielle suivant :



L'état logique d'un bras de l'onduleur est défini comme suit :

- il vaut 1 quand l'interrupteur du haut est fermé ;
- il vaut 0 quand l'interrupteur du bas est fermé.

On néglige les temps de garde.

On figure sous ce motif les valeurs des modulantes de chaque phase pour obtenir la même séquence de commande des interrupteurs dans le cas d'une MLI intersective à porteuse triangulaire  $V_p$ . La fréquence de MLI est supposée suffisamment grande devant la fréquence d'alimentation pour assimiler les modulantes à une constante sur la période de MLI.

### ***I.1. Détermination du vecteur tension généré par l'onduleur***

Quelle est la séquence de vecteurs tension générés par l'onduleur correspondant au motif présenté ? Positionner le vecteur tension résultant dans le plan des vecteurs tension générés par l'onduleur pour  $\alpha_a = 3/4$ ,  $\alpha_b = 1/4$  et  $\alpha_c = 1/2$ . Quelle est son amplitude ?

### ***I.2. Comparaison avec la MLI intersective***

Exprimer les valeurs moyennes des tensions  $v_{in0}$  sur une période de MLI intersective en fonction de  $\alpha_i$  et de  $U_0$  (i étant un indice définissant la phase considérée). Exprimer les rapports cycliques  $\alpha_i$  en fonction des durées d'application des vecteurs de l'onduleur. En déduire les durées d'application en fonction des valeurs moyennes des tensions  $v_{in}$  sur une période de MLI. On supposera que les  $\langle v_{in} \rangle_{T_{MLI}}$  forment un système triphasé sinusoïdal et équilibré.

D'autre part, déterminer l'expression de la valeur moyenne de  $v_{nn0}$  sur  $T_{MLI}$  en fonction de la somme des  $\alpha_i$ . Déduire de ces différentes relations, l'expression de la valeur moyenne de  $v_{nn0}$  sur  $T_{MLI}$  en fonction des  $\langle v_{in} \rangle_{T_{MLI}}$ . Tracer l'allure temporelle de  $v_{an0}$  dans ce cas.

Généraliser le tracé de  $v_{an0}$  à une période d'alimentation de la machine.

Conclure.

## **II. Les interactions onduleur - moteur**

Par principe, l'onduleur de tension génère des tensions de phase "découpées", c'est à dire se présentant comme une succession de créneaux. La commande par MLI permet d'assurer que la valeur moyenne de ces tensions sur une période de MLI varie sinusoïdalement tandis que les harmoniques associés au découpage sont rejetés en haute fréquence.

L'objet de cette partie est d'étudier les conséquences des harmoniques sur le moteur asynchrone. Pour cela, on considère que la tension d'alimentation du moteur peut être décomposée en une série de systèmes de tension triphasés de rang h, c'est-à-dire d'amplitude  $V_{sh}$  et de pulsation  $\omega_{sh} = h\omega_s$ .

### ***II.1. Le schéma équivalent harmonique***

Proposer un schéma équivalent du moteur pour l'harmonique de rang h. On supposera les pertes fer négligeables.

Calculer les réactances du schéma pour les harmoniques de rang 11 et 13 et une fréquence d'alimentation de 88 Hz. Que vaut le glissement dans ces deux cas si le moteur tourne à 2610 t/min. Comment peut-on simplifier ce schéma équivalent si h est très supérieur à 1 ?

### ***II.2. Les courants harmoniques***

Quelle est l'expression du courant harmonique de rang h ? Calculer sa valeur efficace pour h = 13 si l'amplitude de la tension harmonique correspondante vaut 172 V. Que valent les pertes Joule supplémentaires ?

# **DEUXIEME PARTIE :**

## **Contrôle vectoriel à flux rotorique orienté d'un moteur asynchrone**

L'objectif des deux séances de travaux pratiques est l'étude du pilotage vectoriel d'un moteur-roue asynchrone à cage utilisé pour un bus électrique. La puissance du moteur est de 80 kW. Son couple maximal vaut 400 Nm et il peut fonctionner jusqu'à une vitesse maximale de 8900 t/min. Son nombre de paires de pôles est égal à 3. Il est alimenté par un onduleur de tension dont la tension du bus continu peut varier de 240 à 420 V. La fréquence de sortie est réglable de 0 à 600 Hz et la fréquence de découpage est de 7 kHz. L'onduleur est piloté en MLI vectorielle.

## I. Etude de la commande vectorielle avec estimation indirecte

Pour toute cette étude, l'alimentation de la machine sera supposée parfaitement sinusoïdale.

L'objectif est de comprendre comment la commande vectorielle permet le contrôle dynamique de l'état magnétique et du couple de la machine asynchrone.

Pour cela, on utilisera dans un premier temps les fichiers :

*mas\_3\_cvfro\_est\_indirect.mdl* qui est le modèle Simulink de la commande et du moteur ;  
*donnees.m* qui contient les données d'initialisation du modèle.

### I.1. Structure de la commande

Retrouver les différentes fonctions de la commande vectorielle à partir du modèle Simulink : vous chercherez à reconstituer si possible les équations associées (correcteurs, estimateurs, capteurs ...).

### I.2. Analyse des formes d'onde dans le référentiel de Park (d,q) :

Observer les composantes du flux rotorique et en déduire la position des axes du référentiel de Park (d,q) par rapport aux composantes du flux rotorique.

Analyser le fonctionnement de la machine en distinguant la phase de fluxage de la phase à couple constant.

Pour cela, vous pourrez analyser les formes d'onde :

des tensions statoriques  
 des courants statoriques  
 du flux rotorique  
 du couple  
 de la vitesse  
 de la pulsation statorique.

Vous pourrez tracer ces formes d'onde en fonction du temps ou dans les axes (d,q).

### I.3. Analyse des formes d'onde dans les référentiels de Concordia (alpha,beta) et (a,b,c) :

Analyser les courbes en simulation (flux rotorique, flux statorique, courant statorique, ...) dans le référentiel fixe par rapport au stator (alpha,beta) puis dans le référentiel triphasé (a,b,c). Comparer les résultats obtenus dans les différents référentiels et discuter leur cohérence.

### I.4. Fonctionnement à haute vitesse

Afin de pouvoir fonctionner à haute vitesse tout en respectant les limites maximales de tension, le moteur est défluxé selon une loi en inverse de la pulsation statorique. Ce fonctionnement est modélisé dans le fichier Simulink *mas\_3\_cvfro\_est\_indirect\_deflux.mdl*.

Reprendre l'analyse de la question 2 et interpréter.

## II. Etude de la MLI vectorielle

L'alimentation de la machine est maintenant assurée par l'onduleur de tension piloté en MLI vectorielle.

L'objectif est de d'illustrer les conséquences de cette alimentation sur les grandeurs électromagnétiques de la machine.

Afin de dissocier les effets de la commande vectorielle et de l'onduleur, la machine est cette fois-ci commandée en boucle ouverte par une simple loi en  $V/f$ .

Pour les simulations, on utilisera les fichiers :

- ✓ *mas\_3\_VsF\_MLIvec.mdl* qui est le modèle Simulink de l'onduleur et du moteur ;
- ✓ *donnees\_MLI.m* qui contient les données d'initialisation du modèle.

**II.1. Analyse d'une mise sous tension progressive**

La mise sous tension s'effectue en 1 seconde environ jusqu'à un régime permanent correspondant à une fréquence de 145 Hz.

Observer les variations temporelles du couple, de la vitesse, des flux rotorique et statorique, des courants statoriques et des différentes tensions lors d'une simulation sur 1.5 s.

**II.2. Analyse d'une période électrique en régime établi**

Observer et analyser les formes d'onde temporelles des grandeurs électromagnétiques de la machine sur une période électrique en régime établi.

Observer et analyser les trajectoires des extrémités des vecteurs tournants dans le référentiel de Concordia (alpha,beta). Effectuer les analyses spectrales du couple, des courants statoriques et des différentes tensions.