

AVERTISSEMENT

L'épreuve se compose de trois parties A, B, C, indépendantes. À l'intérieur de chaque partie, certaines sous-parties sont elles-mêmes indépendantes. Les candidats sont donc invités à lire entièrement l'énoncé avant de commencer à composer et d'autre part à bien répartir leur temps de composition entre les différentes parties.

Il est rappelé aux candidats qu'ils doivent impérativement utiliser les notations indiquées dans le texte ou sur les figures. Les candidats sont priés de rédiger sur des feuilles séparées les réponses aux questions relatives aux différentes parties de la composition.

Il est rappelé aux candidats qu'ils doivent présenter les calculs clairement, dégager et encadrer les résultats relatifs à chaque question référencée dans le sujet. Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs recommandent d'écrire lisiblement, de numéroter chaque copie en y faisant apparaître clairement la partie traitée.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ÉPREUVE



Image obtenue sur le site Web : www.multimania.com/dmasson/tramway-strasbourg

Nous nous intéressons dans ce problème au fonctionnement du Tramway de Strasbourg. Les caractéristiques de la chaîne de traction ainsi que les principaux éléments du cahier des charges sont donnés dans les pages qui suivent.

Documents remis au candidat

Le texte du sujet

Les documents réponses

Sommaire

A	Analyse des contraintes	5
A.I	Partie mécanique	5
A.II	Association convertisseur-machine asynchrone	7
B	Étude des convertisseurs statiques	8
B.I	Problème posé	8
B.II	Solution retenue et étude du fonctionnement	18
C	Motorisation du tramway	23
C.I	Enroulements statoriques du moteur asynchrone.	23
C.II	Vecteur complexe.	26
C.III	Modélisation de la machine asynchrone.	29
C.IV	Commande de la machine asynchrone.	32

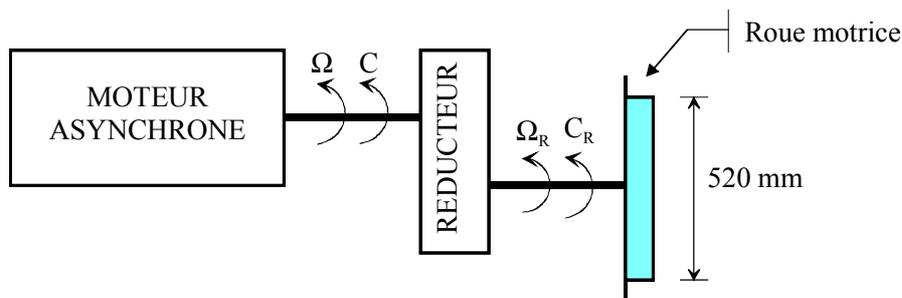
PRÉSENTATION DU TRAMWAY DE STRASBOURG

Une rame de tramway se compose de quatre bogies 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.

Caractéristiques principales d'une rame de tramway

- Longueur hors tout : 33,10 m ;
- Largeur 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 m/s^2 ;
- Accélération moyenne pour une vitesse de 0 à 60 km/h : $0,77 \text{ m/s}^2$;
- Décélération moyenne maximale : 3 m/s^2 ;
- Coefficient de pénétration dans l'air : $k = 50 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$.

Chaîne cinématique de la motorisation d'une roue



- Diamètre de la roue : $D = 0,52 \text{ m}$;
- Moment d'inertie de la roue : $J_{\text{ROUE}} = 4,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;
- Rapport de réduction du réducteur : $r = 10$;
- Rendement du réducteur : $\eta = 0,8$;
- Coefficient de frottement roue-rail : $\lambda = 0,01$.

Caractéristiques principales d'un moteur de traction

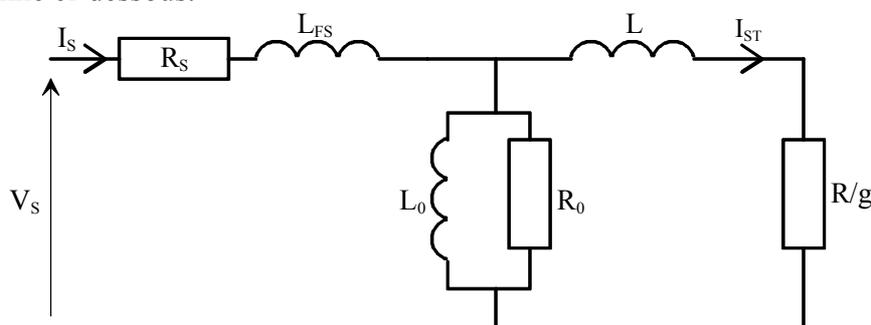
Il s'agit d'un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles refroidis par un mélange eau (56%) et éthylène-glycol (44%) sous une pression d'environ 1.5 bars et un débit de 5 l/min.

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-isolés avec un émail de classe H.

Le rotor est constitué d'un enroulement à cage d'écureuil en aluminium moulé sous pression.

- Puissance utile nominale : $P_{UN} = 24,6 \text{ kW}$;
- Couple utile nominal : $C_{UN} = 90 \text{ Nm}$;
- Courant absorbé nominal : $I_{SN} = 35,4 \text{ A}$;
- Tension nominale entre phases : $U_{SN} = 585 \text{ V}$;
- Fréquence statorique nominale : $f_{SN} = 88 \text{ Hz}$;
- Nombre de paires de pôles : $p = 2$;
- Vitesse nominale de rotation du rotor : $N_N = 2610 \text{ tr/mn}$;
- Facteur de puissance nominal : $(\cos(\varphi))_N = 0,7341$;
- Rendement pour le point nominal : $\eta_N = 0,9309$;
- Moment d'inertie du rotor : $J = 0,112 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Le schéma équivalent du moteur, ramené au primaire, pour le régime sinusoïdal permanent et pour une phase est donné ci-dessous.



- $R_S = 0,1866 \Omega$;
- $L_{FS} = 1,17 \text{ mH}$;
- $R_0 = 629,1 \Omega$;
- $L_0 = 26,55 \text{ mH}$;
- $R = 0,1379 \Omega$;
- $L = 1,2 \text{ mH}$;
- $u = 0,09009$: Rapport de transformation rotor-stator ;
- $I_{ST} = u \cdot I_R$.

La valeur efficace du courant dans un enroulement rotorique est notée I_R ; le glissement est noté g .

Principe de traction

Le schéma de traction retenu pour le Tramway de Strasbourg est donné à la Figure 1. Chaque onduleur de traction alimente deux des quatre machines asynchrones placées sur chaque bogie. Cette commande indépendante des roues situées à droite et à gauche du bogie permet d'améliorer les passages en courbe.

Le conducteur, par l'intermédiaire d'une manette, peut moduler l'effort de traction à appliquer à la rame de tramway. 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.

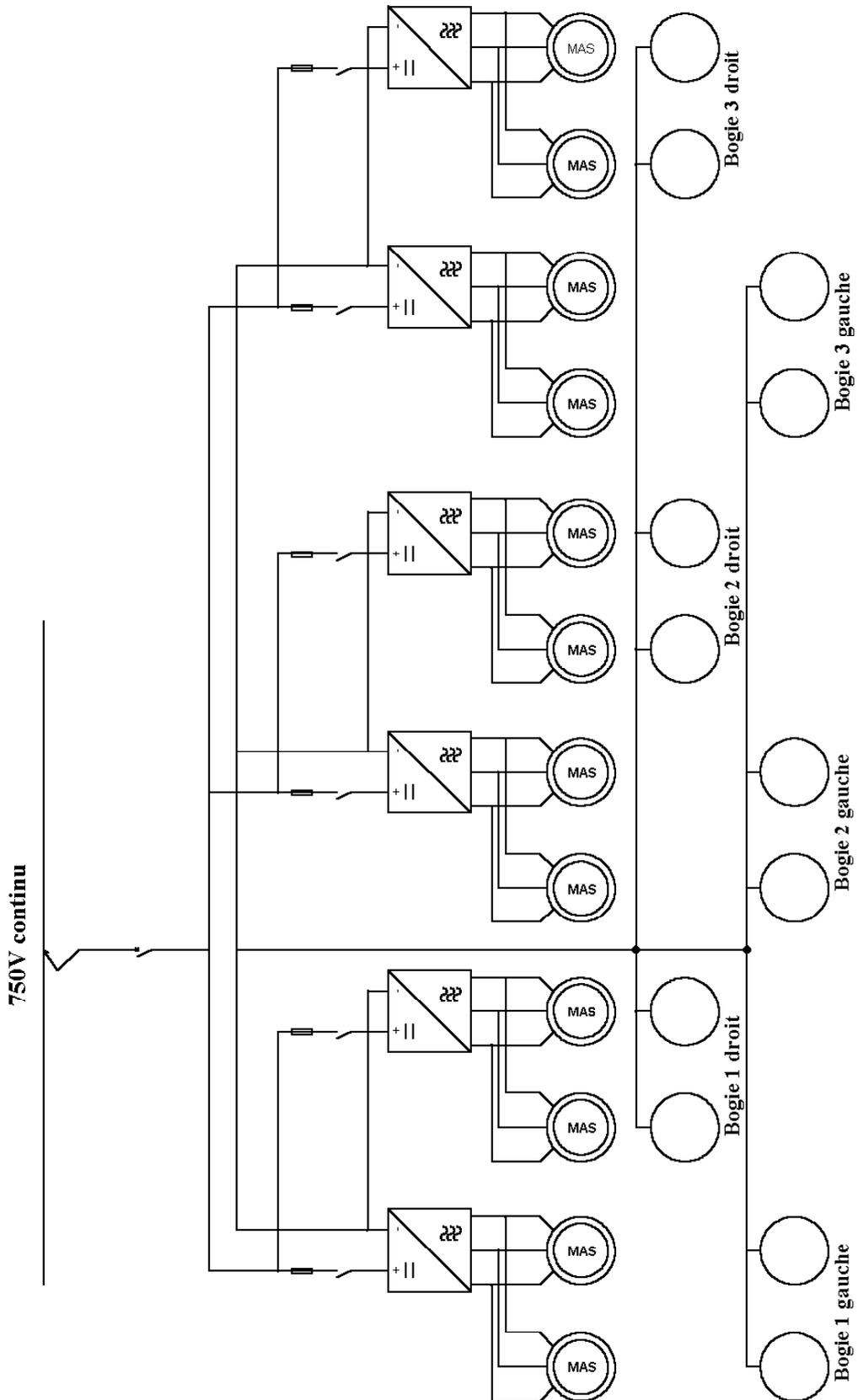


Figure 1

A ANALYSE DES CONTRAINTES

Nous allons nous intéresser dans cette partie à l'analyse des contraintes mécaniques et à leurs conséquences sur les machines de traction et leurs alimentations.

A.I Partie mécanique

La caractéristique du couple sur l'arbre d'un moteur asynchrone, dont on néglige les pertes, en fonction de la vitesse linéaire de la rame de tramway, est donnée, pour une position de la manette de traction, à la Figure A.1.

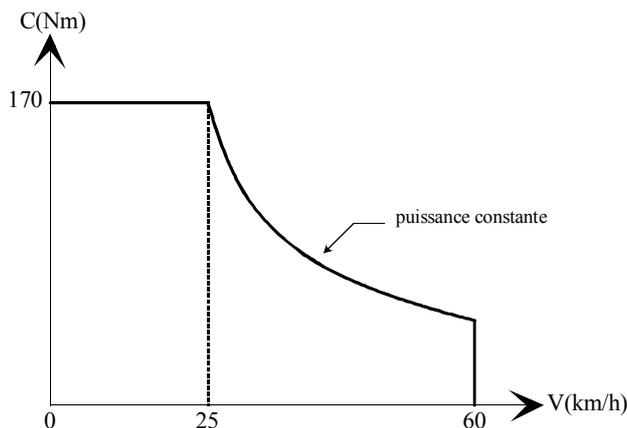


Figure A.1

Les forces de frottements appliquées à la rame du tramway sont dues, d'une part aux frottements roues-rails et, d'autre part, à la pénétration dans l'air. Leurs expressions s'écrivent :

- $F_1 = -M \cdot g \cdot \lambda$ pour la force de frottement roue-rail où M est la masse de la rame de tramway et g l'accélération de la pesanteur terrestre ;
- $F_2 = -k \cdot v$ pour la force de pénétration dans l'air, que l'on suppose proportionnelle à la vitesse. La vitesse v est en m/s.

Q.A.1. 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 en fonction de λ , η , k , M , r , D et V (en km/h).

Q.A.2. Donner dans le cas de la charge nominale, l'expression numérique du couple résistant total C_T sur l'arbre du moteur en fonction de la vitesse V (en km/h). Reporter cette caractéristique sur le document réponse REP.A.1.

Q.A.3. En déduire la vitesse de la rame de tramway en régime établi ainsi que la fréquence des courants statoriques appliqués au moteur (vous ferez l'approximation qui s'impose).

Q.A.4. Dans le trajet il y a une pente à 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.

Q.A.5. Donner l'expression numérique du couple résistant total C_T sur l'arbre du moteur en fonction de la vitesse V (en km/h). Reporter cette caractéristique sur le document réponse REP.A.1.

Q.A.6. Donner dans ce cas le couple résistant total ainsi que la vitesse de la rame de tramway en régime établi.

Nous allons nous intéresser maintenant au démarrage du Tramway.

Notations utilisées :

- J_{RC} est le moment d'inertie (ramené sur l'arbre d'une roue motrice) de l'ensemble constitué de la rame à charge nominale ;
- J_C est le moment d'inertie (ramenée sur l'arbre d'un moteur) de l'ensemble constitué de la rame à charge nominale ;
- J_T est le moment d'inertie total (ramené sur l'arbre moteur) des masses en mouvement (en rotation et en translation).

Q.A.7. Déterminer les expressions de $J_{RC} = f(M, D)$ et $J_C = f(M, D, r, \eta)$.

Q.A.8. Calculer la valeur du moment d'inertie total J_T .

On souhaite calculer le temps t_D correspondant à un démarrage d'une rame de tramway en charge nominale sur terrain horizontal. La rame étant à l'arrêt, on applique à l'instant $t = 0$ la caractéristique couple-vitesse de la Figure A.1 à chaque moteur.

Q.A.9. Écrire l'équation fondamentale de la dynamique sur l'arbre d'un moteur. En déduire l'expression liant C (couple moteur), C_1 , C_2 , J_T , r , D et $\frac{dV}{dt}$ (V en km/h).

Q.A.10. Mettre l'expression précédente sous la forme $dt = \dots \times dV$. Calculer alors le temps de démarrage t_D pour atteindre le régime établi. Vous préciserez la durée des phases correspondant aux différentes parties de la caractéristique $C = f(V)$ donnée à la Figure A.1.

Q.A.11. Donner la valeur de l'accélération moyenne de la phase de démarrage $\bar{\gamma}$ en m/s^2 .

Q.A.12. Calculer pour la phase de démarrage et pour un moteur la puissance mécanique maximum \hat{P}_M .

A.II Association convertisseur-machine asynchrone

L'association du convertisseur et de la motorisation doit permettre le fonctionnement de la machine asynchrone dans les 4 quadrants mécaniques c'est-à-dire pour le Tramway de Strasbourg, la circulation dans les deux sens de marche et le freinage électrique.

Nous supposons dans cette partie que les tensions alimentant les machines asynchrones sont sinusoïdales triphasées et que le modèle équivalent par phase de ces machines peut être assimilé au schéma simplifié de la Figure A.2.

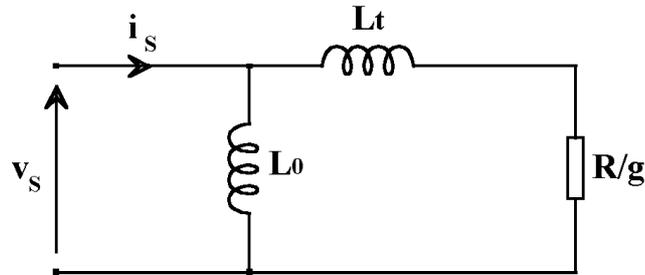


Figure A.2

Q.A.13. Déterminer l'expression du couple électromagnétique C_{em} en fonction de $V_{s_{eff}}$, L_t , R , g , p (nombre de paires de pôles de la machine asynchrone) et ω_s (pulsation des tensions statoriques). Vous mettrez le résultat sous la forme ci-dessous en précisant les expressions de A et de g_0 :

$$C_{em} = \frac{A}{\frac{g}{g_0} + \frac{g_0}{g}}$$

Q.A.14. Déterminer l'expression du déphasage φ_s de v_s par rapport à i_s en fonction de L_0 , L_t , R , g et ω_s .

Q.A.15. Donner les valeurs numériques de φ_s pour $V_{s_{eff}} = 338V$, $f_s = 88Hz$, $p = 2$, $R = 0,138\Omega$, $L_t = 2,38mH$, $L_0 = 26,55mH$ et pour $C_{em} = 90Nm$ puis $C_{em} = -90Nm$.

Q.A.16. Préciser la vitesse de rotation du moteur N_r (en tr/mn) pour $f_s = 88Hz$, $C_{em} = 90Nm$ puis $C_{em} = -90Nm$.

Q.A.17. Compléter le document réponse REP.A.2 en représentant les tensions v_{BN} , v_{CN} et les courants i_A , i_B , i_C dans chacun des 4 quadrants mécaniques. Vous choisirez comme déphasages des tensions simples par rapport aux courants, ceux calculés à la question précédente (même couple électromagnétique en valeur absolue pour chacun des quatre quadrants $|C_{em}| = 90Nm$).

B ÉTUDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Nous allons nous intéresser dans cette partie à la structure et aux principes de commande des convertisseurs statiques alimentant les 12 machines asynchrones du Tramway de Strasbourg.

B.I Problème posé

Le constructeur a choisi d'implanter une commande permettant de contrôler le couple électromagnétique des 12 machines asynchrones du tramway (contrôle effectué par demi-bogie). Ce contrôle est obtenu par le réglage simultané de la phase instantanée et de l'amplitude des tensions simples appliquées aux machines. Il s'agit d'une commande vectorielle à flux rotorique orienté.

Les formes d'onde calculées grâce aux algorithmes définis dans la partie C de ce sujet peuvent être délivrées aux machines asynchrones par l'intermédiaire d'onduleurs de tension.

Nous allons étudier dans un premier temps l'association d'un onduleur de tension avec une machine asynchrone.

La structure de l'onduleur choisie dans cette première partie est donnée à la Figure B.1.

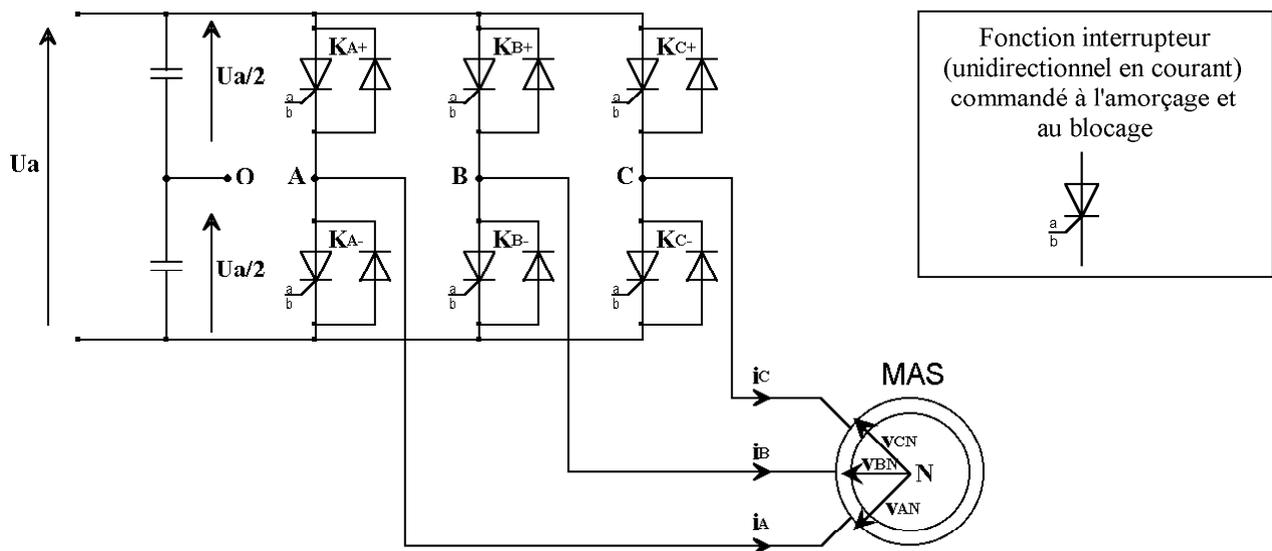


Figure B.1

Pour simplifier l'étude de ce type de structure les différentes tensions sont référencées par rapport au milieu 0 (fictif ou réalisé à l'aide de condensateurs de même valeur) de la source continue de l'onduleur. Les tensions de référence pour les trois phases (grandeurs que l'on souhaite imposer à la machine) sont les tensions simples référencées par rapport au point neutre N . Or nous pouvons remarquer que cette structure permet d'imposer les tensions composées aux bornes de la charge mais pas les tensions simples.

B.I.1 Calculs préliminaires

Q.B.1. Déterminer l'expression des potentiels v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} en fonction de v_{AB} , v_{BC} et v_{CA} . Vous supposerez pour cela que la machine asynchrone se comporte comme une charge triphasée linéaire et équilibrée.

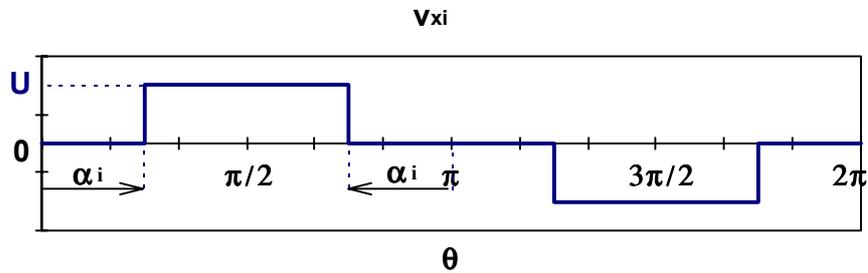
Q.B.2. En déduire que l'expression des potentiels v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} en fonction de v_{AO} , v_{BO} et v_{CO} peut se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{cases} v_{AN} = 2/3 \cdot v_{AO} - 1/3 \cdot v_{BO} - 1/3 \cdot v_{CO} \\ v_{BN} = 2/3 \cdot v_{BO} - 1/3 \cdot v_{AO} - 1/3 \cdot v_{CO} \\ v_{CN} = 2/3 \cdot v_{CO} - 1/3 \cdot v_{AO} - 1/3 \cdot v_{BO} \end{cases}$$

Q.B.3. Déterminer l'expression du potentiel v_{NO} en fonction de v_{AO} , v_{BO} et v_{CO} .

Q.B.4. Déterminer la décomposition en série de Fourier du signal v_{xi} . Vous pourrez mettre le

résultat sous la forme suivante : $v_{xi}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{xi_n} \cdot \sin(n \cdot (\theta - \varphi_{xi_n}))$. Vous donnerez les valeurs de v_{xi_n} et φ_{xi_n} en fonction de α_i et U .



Il existe de nombreuses façons de commander un onduleur triphasé de ce type pour obtenir une tension alternative aux bornes de la charge. Les plus communes sont les suivantes :

- La commande pleine onde
- La commande par modulation de largeur d'impulsion :
 - par modulation naturelle ou modulation sinus-triangle ;
 - par instants de commutation prédéfinis ou modulation précalculée ;
 - par modulation vectorielle ou modulation postcalculée.

Nous allons étudier trois d'entre elles.

Notations utilisées

Les notations utilisées dans les questions qui suivent sont les suivantes : les six commandes relatives aux trois bras d'onduleurs sont notées C_{A+} et C_{A-} pour le bras associé à la phase A, C_{B+} et C_{B-} pour le bras associé à la phase B et C_{C+} et C_{C-} pour le bras associé à la phase C.

$C_{x+} = 1$ ou $C_{x-} = 1$ implique que l'interrupteur correspondant est fermé et $C_{x+} = 0$ ou $C_{x-} = 0$ implique que l'interrupteur correspondant est ouvert.

De façon générale $C_x = 1$ implique que $C_{x+} = 1$, $C_{x-} = 0$ et $C_x = 0$ implique que $C_{x+} = 0$, $C_{x-} = 1$.

B.I.2 La commande pleine onde

Q.B.5. Compléter les documents réponse REP.B.1, REP.B.2 et REP.B.3 correspondant à la commande pleine onde.

Q.B.6. En utilisant les réponses obtenues aux questions Q.B.2 et Q.B.4, déterminer l'expression de la décomposition en série de Fourier des signaux v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} . Vous mettrez le résultat sous la forme suivante : $v_{xN}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{xN_n} \cdot \sin(n \cdot (\theta - \varphi_{xN_n}))$ où x vaut A, B ou C.

Q.B.7. Donner l'expression du rapport $\frac{|V_{xN_n}|}{|V_{xN_1}|}$ où V_{xN_n} représente l'amplitude de l'harmonique de rang n.

Q.B.8. Représenter sur le document réponse REP.B.4 l'amplitude des 27 premiers harmoniques des tensions v_{xN} . **Vous préciserez sur le graphique l'amplitude correspondant à chacun des harmoniques non nuls.**

Q.B.9. Justifier l'absence d'harmonique de rang 3 et de rangs multiples de 3 dans ces décompositions en série de Fourier.

B.I.3 La commande par instants de commutation prédéfinis

Q.B.10. Représenter la tension v_{AO} sur le document réponse REP.B.5 correspondant à la commande par instants de commutation prédéfinis.

Q.B.11. Montrer que ce signal peut se mettre sous la forme d'une combinaison linéaire de signaux v_{xi} . Vous représenterez pour cela sur le document réponse REP.B.5 les signaux v_{x0} , v_{x1} , v_{x2} , v_{x3} et v_{x4} définis de telle sorte que $v_{AO} = v_{x0} + v_{x1} + v_{x2} + v_{x3} + v_{x4}$.

Q.B.12. En utilisant le résultat obtenu à la question Q.B.4, déterminer l'expression de la décomposition en série de Fourier des signaux v_{AO} , v_{BO} et v_{CO} en fonction de α_1 , α_2 , α_3 et α_4 (les commandes des trois bras de l'onduleur sont décalées de $\theta_0 = 2\pi / 3$). Vous mettrez le résultat sous la forme suivante : $v_{xO}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{xO_n} \cdot \sin(n \cdot (\theta - \varphi_{xO_n}))$ où x vaut A, B ou C.

Q.B.13. En déduire l'expression de la décomposition en série de Fourier des signaux v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} . Vous mettrez le résultat sous la forme suivante :

$$v_{xN}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{xN_n} \cdot \sin(n \cdot (\theta - \varphi_{xN_n}))$$

Q.B.14. En déduire les quatre équations permettant de fixer l'amplitude du fondamental des tensions v_{xN} et d'annuler les harmoniques 5, 7 et 11. Vous mettrez les résultats sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{xN_1} = f_1(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, U_a) \\ 0 = f_2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\ 0 = f_3(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\ 0 = f_4(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \end{cases}$$

Ce système d'équations non linéaires n'a pas de solution analytique. Les solutions de ce système d'équations doivent être déterminées numériquement.

Q.B.15. Donner pour les valeurs suivantes (données en radians) l'amplitude du fondamental et des harmoniques 5, 7 et 11 en fonction de U_a . Conclure.

$$\alpha_1 = 0,1894; \alpha_2 = 0,9476; \alpha_3 = 0,9872; \alpha_4 = 1,5140$$

Q.B.16. Reprendre la question Q.B.15 pour les valeurs suivantes :

$$\alpha_1 = 0,2759; \alpha_2 = 0,7903; \alpha_3 = 0,9796; \alpha_4 = 1,4509$$

Q.B.17. Donner l'expression du rapport $\frac{|V_{xN_n}|}{|V_{xN_1}|}$ où V_{xN_n} représente l'amplitude de l'harmonique de rang n .

Q.B.18. Représenter sur le document réponse REP.B.6 l'amplitude des 27 premiers harmoniques des tensions v_{xN} pour les valeurs de α_i de la question Q.B.15. **Vous préciserez sur le graphique l'amplitude correspondant à chacun des harmoniques non nuls.**

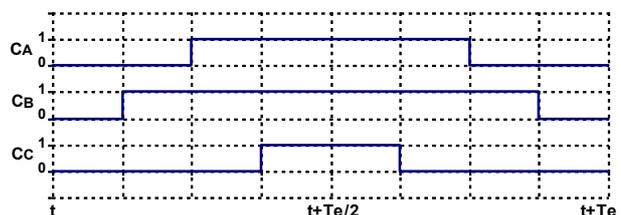
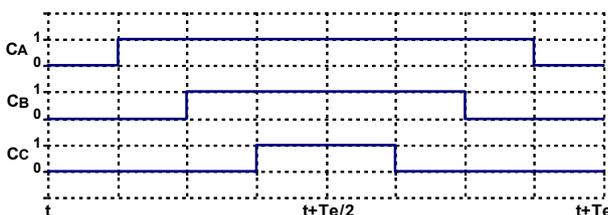
B.I.4 La commande par modulation vectorielle

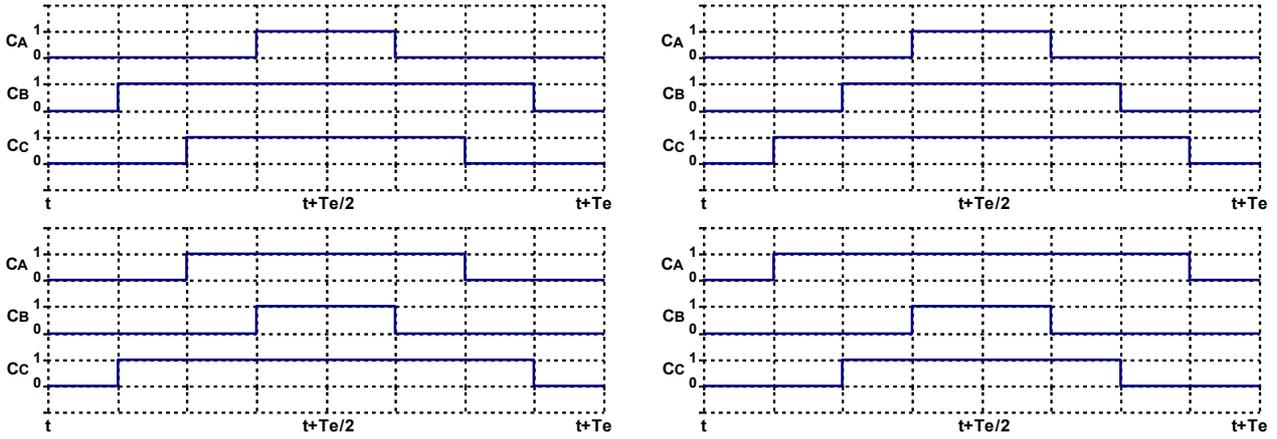
Cette commande est utilisée dans les commandes modernes des machines asynchrones ou synchrones pour obtenir des formes d'onde arbitraires non nécessairement sinusoïdales.

En voici les principes fondamentaux :

- Les tensions de référence sont les tensions simples désirées v_{xN} ;
- Les tensions de référence sont échantillonnées à intervalle régulier d'une durée que nous noterons T_e . À cette période d'échantillonnage correspond une fréquence d'échantillonnage F_e . Cette fréquence arbitraire est totalement indépendante de la fréquence du signal de référence ;
- Chacun des bras de l'onduleur va réaliser une impulsion de tension centrée sur la période MLI et dont la largeur est calculée de telle sorte que les valeurs moyennes des tensions simples aux bornes des enroulements de la machine soient égales aux valeurs des tensions de référence à l'instant d'échantillonnage ;
- Tous les interrupteurs d'un même demi-pont (partie supérieure ou inférieure de l'onduleur) ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période MLI ;
- La modulation est synchronisée sur les trois phases de l'onduleur.

Les séquences de conduction des interrupteurs respectant les principes précédents peuvent prendre les 6 aspects suivants :





Les tensions de référence sont les tensions simples v_{AN} , v_{BN} , v_{CN} référencées par rapport au point neutre. Or les tensions générées par l'onduleur sont référencées par rapport au point milieu 0 de la source de l'onduleur v_{A0} , v_{B0} , v_{C0} .

Q.B.19. En utilisant les résultats de la question Q.B.2, compléter le tableau du document réponse REP.B.7 en donnant les expressions en fonction de U_a des potentiels v_{A0} , v_{B0} , v_{C0} et v_{AN} , v_{BN} , v_{CN} pour tous les états possibles des trois bras de l'onduleur.

Pour simplifier les calculs et les représentations qui vont suivre, nous allons appliquer la transformation triphasée diphasée dont l'expression est donnée ci-dessous:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix}$$

Q.B.20. Calculer les expressions de $v_\alpha(t)$ et $v_\beta(t)$ en fonction de $\cos(\omega \cdot t)$ et $\sin(\omega \cdot t)$ lorsque :

$$v_{AN} = V_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad v_{BN} = V_{\max} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{et} \quad v_{CN} = V_{\max} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Q.B.21. Représenter sur le document réponse REP.B.8, la trajectoire correspondante des points $v_\alpha(t)$ et $v_\beta(t)$.

Q.B.22. Compléter le tableau du document réponse REP.B.9 en donnant les expressions en fonction de U_a des potentiels v_α , v_β pour tous les états possibles des trois bras de l'onduleur.

Les valeurs que vous venez de déterminer définissent huit vecteurs dont les noms vous sont donnés dans le tableau du document réponse REP.B.9. Ces vecteurs peuvent être représentés dans le repère (α, β) en prenant comme origine pour chacun d'entre eux l'intersection des deux axes.

Q.B.23. Donner l'expression en fonction de U_a du module de chacun de ces vecteurs.

Q.B.24. Reporter le nom de ces vecteurs sur le document réponse REP.B.10. Vous indiquerez pour chacun d'entre eux la séquence de fermeture des interrupteurs correspondante.

Nous pouvons remarquer que les huit couples de valeurs précédents (v_α, v_β) ne permettent pas de réaliser de façon continue la trajectoire obtenue à la question Q.B.21. Celle-ci ne pourra être réalisée que par l'intermédiaire d'une modulation des différents états possibles de l'onduleur afin d'obtenir, en valeur moyenne sur une période d'échantillonnage, les valeurs de tension souhaitées.

v_α et v_β prennent un nombre fini de valeurs définissant les limites de 6 secteurs (I, II, III, IV, V et VI). Les valeurs des tensions de référence situées dans le polygone de commutation (**et uniquement à l'intérieur de ce polygone**) et donc dans l'un de ces secteurs peuvent être obtenues en effectuant une moyenne temporelle des vecteurs \vec{v}_i et \vec{v}_{i+1} qui limitent le secteur.

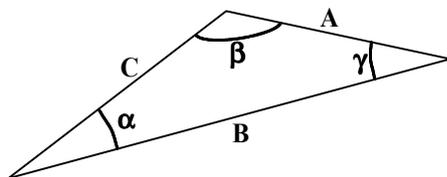
Q.B.25. En utilisant la figure du document réponse REP.B.8 et les résultats des questions Q.B.20 et Q.B.23, donner l'amplitude maximum en fonction de U_a des trois tensions simples ($v_{AN} = V_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$, $v_{BN} = V_{\max} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right)$ et $v_{CN} = V_{\max} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)$) que l'on peut obtenir en utilisant ce principe de MLI.

Notations utilisées :

- $\vec{v}_{3_{\text{ref}}} = \begin{bmatrix} v_{a_{\text{ref}}} \\ v_{b_{\text{ref}}} \\ v_{c_{\text{ref}}} \end{bmatrix}$ est le vecteur des tensions de référence ;
 - $\vec{v}_{2_{\text{ref}}} = \begin{bmatrix} v_{\alpha_{\text{ref}}} \\ v_{\beta_{\text{ref}}} \end{bmatrix}$ représente le vecteur des tensions de référence dans le repère (α, β) .
- $$\vec{v}_{2_{\text{ref}}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \vec{v}_{3_{\text{ref}}} ;$$
- Les modules de $\vec{v}_{2_{\text{ref}}}$, \vec{v}_i et \vec{v}_{i+1} sont notés respectivement $V_{2_{\text{ref}}}$, V_i et V_{i+1} .

Rappel

Avant de traiter les questions suivantes, nous vous rappelons quelques résultats relatifs aux opérations dans les triangles :



$$\frac{\sin(\alpha)}{A} = \frac{\sin(\beta)}{B} = \frac{\sin(\gamma)}{C}$$

Q.B.26. Nous allons considérer dans un premier temps un vecteur de consigne situé dans le secteur I. En vous reportant à la figure correspondante sur le document réponse REP.B.11, donner l'expression de α_i et α_{i+1} en fonction de γ , $V_{2_{\text{ref}}}$, V_i et V_{i+1} puis en fonction de $v_{\alpha_{\text{ref}}}$, $v_{\beta_{\text{ref}}}$ et U_a .

- Q.B.27.** Procéder de même pour chacun des secteurs et compléter les documents réponse REP.B.11 et REP.B.12.
- Q.B.28.** Compléter les documents réponse REP.B.13 et REP.B.14 représentant les 6 aspects possibles des séquences de conduction des interrupteurs en indiquant le numéro du secteur concerné dans chacun des cas de figure.
- Q.B.29.** En utilisant les résultats obtenus aux questions Q.B.26 et Q.B.27, déterminer les expressions des temps T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 et T_6 en fonction de $v_{\alpha_{ref}}, v_{\beta_{ref}}, U_a$ et T_e . Vous reporterez ces résultats sur les documents réponse REP.B.13 et REP.B.14.
- Q.B.30.** Le choix des séquences est effectué selon un algorithme que vous complétez sur le document réponse REP.B.15.

Nous imposons maintenant les tensions de références suivantes :

$$\vec{v}_{3_{ref}} = \begin{bmatrix} 0.5 \cdot U_a \cdot \cos(\omega \cdot t - \pi/12) \\ 0.5 \cdot U_a \cdot \cos(\omega \cdot t - 2\pi/3 - \pi/12) \\ 0.5 \cdot U_a \cdot \cos(\omega \cdot t - 4\pi/3 - \pi/12) \end{bmatrix}$$

Les formes d'onde obtenues pour la tension simple v_{AN} ont les allures données à la Figure B.2 pour une fréquence d'échantillonnage F_e égale à $12 \times$ la fréquence des signaux de référence $F = \omega / 2\pi$ et à la Figure B.3 pour une fréquence d'échantillonnage F_e égale à $50 \times$ la fréquence des signaux de référence F .

Les figures B.2 et B.3 donnent également les 100 premiers harmoniques des tensions v_{xN} correspondantes sous la forme $\frac{|V_{xN_n}|}{|V_{xN_1}|}$ où V_{xN_n} représente l'amplitude de l'harmonique de rang n .

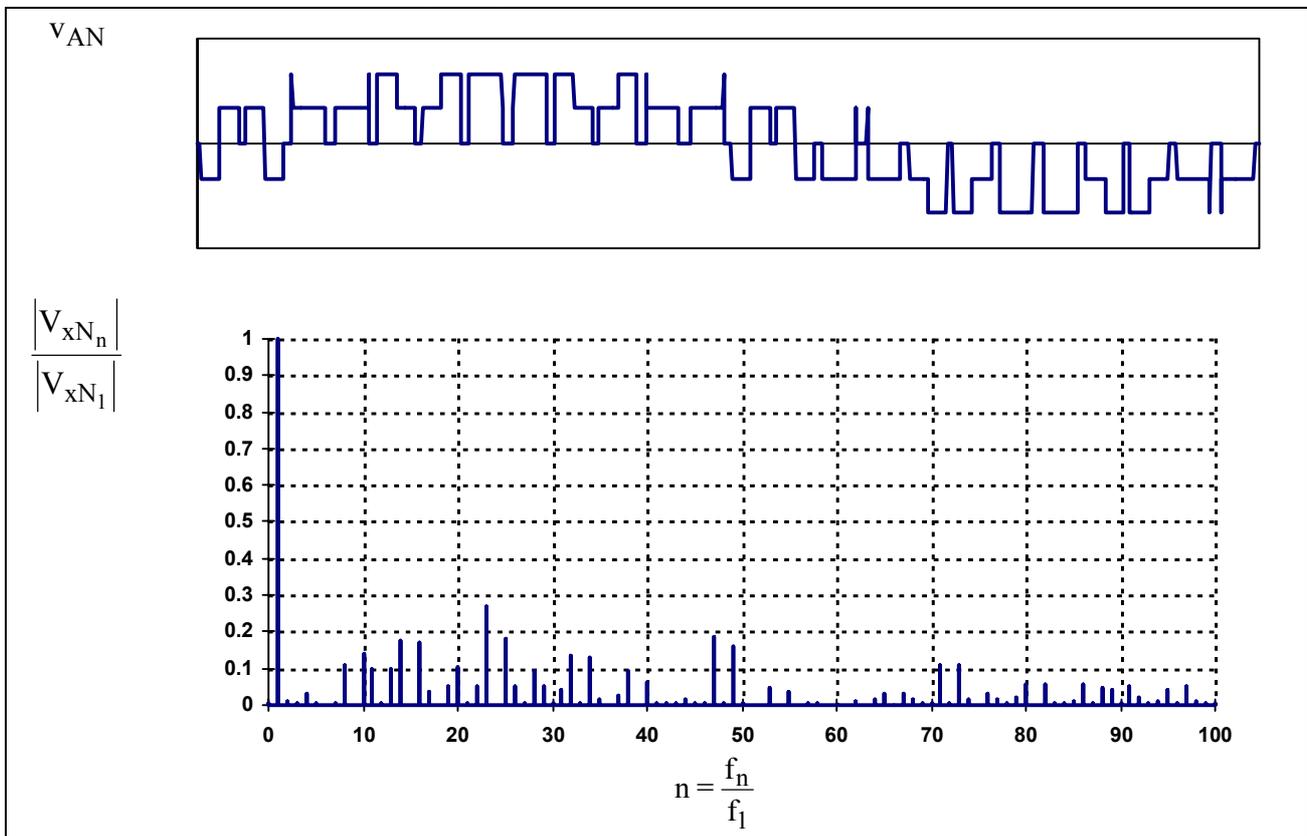


Figure B.2

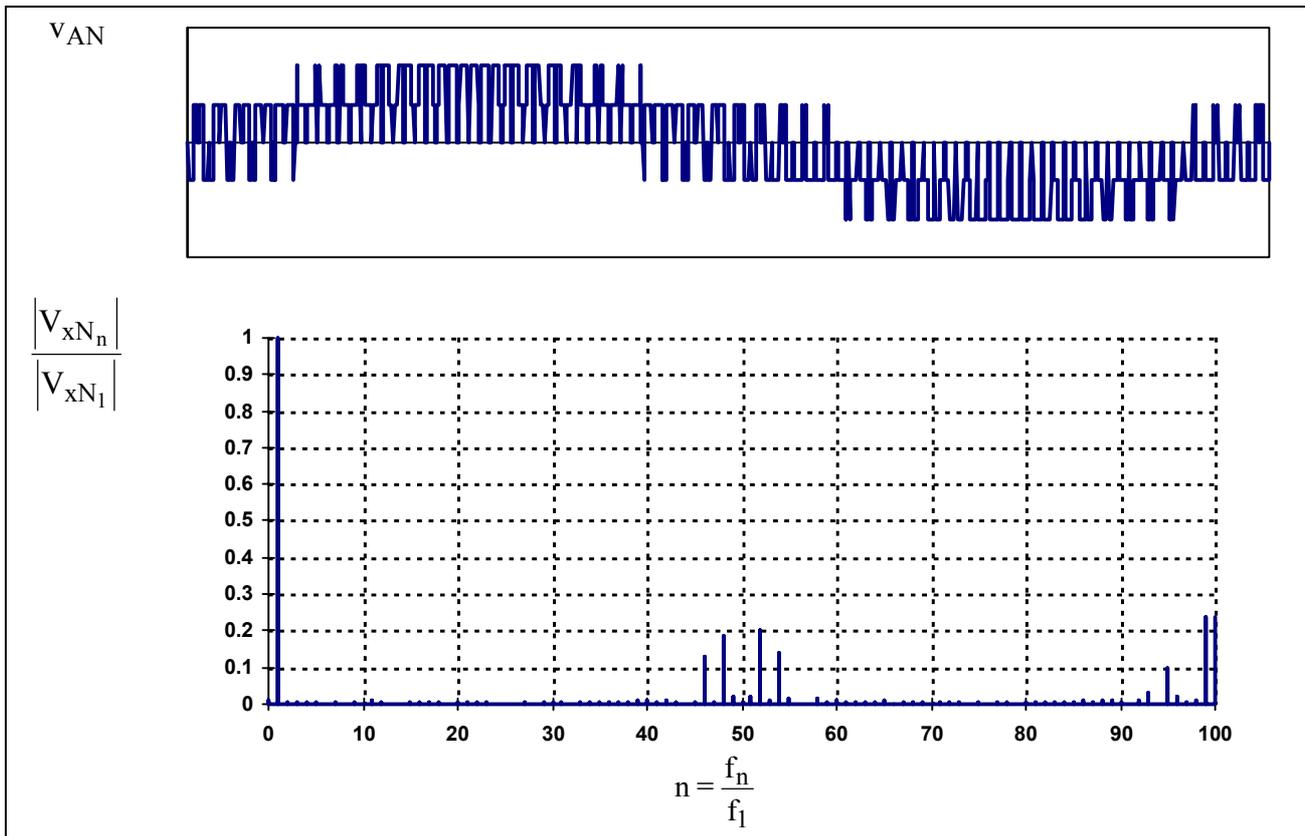


Figure B.3

Nous allons dans un premier temps nous intéresser au cas correspondant à la fréquence d'échantillonnage F_e égale à $12 \times$ la fréquence des signaux de référence. Les valeurs de ces signaux sont donc échantillonnées tous les $T/12$ en prenant comme instant de démarrage de l'échantillonnage l'instant $t = 0$.

Q.B.31. Donner l'expression du vecteur $\vec{v}_{2_{ref}}$ correspondant au vecteur de référence $\vec{v}_{3_{ref}}$.

Q.B.32. En déduire, les expressions numériques (fonction de U_a) des grandeurs $v_{\alpha_{ref}}$ et $v_{\beta_{ref}}$.
Vous noterez les résultats sur le document réponse REP.B.16.

Q.B.33. Reporter alors sur ce document réponse et pour chacun des instants d'échantillonnage, le numéro de secteur correspondant.

Q.B.34. Compléter ce document en donnant les valeurs numériques des trois rapports cycliques des bras de l'onduleur pour les quatre premiers échantillons. Ce rapport cyclique noté α_x ($x = A, B$ ou C) est défini comme le rapport du temps pour lequel $C_x = 1$ sur le temps T_e .

Nous allons maintenant analyser les résultats obtenus pour les deux fréquences d'échantillonnage.

Q.B.35. Comparer et commenter les trois spectres respectivement obtenus avec la commande par instants de commutation prédéfinis (voir document réponse REP.B.6) et avec la commande par modulation vectorielle (Figures B.2 et B.3) pour une fréquence d'échantillonnage $12 \times$ et $50 \times$ supérieure à la fréquence du signal de référence. Vous vous intéresserez tout particulièrement à la "qualité" des tensions simples appliquées à la machine asynchrone et à la fréquence de commutation des interrupteurs.

Q.B.36. Présenter les avantages et inconvénients respectifs de la commande par instants de commutation prédéfinis et de la commande par modulation vectorielle.

B.I.5 Influence des harmoniques de tension sur le comportement de la machine asynchrone

La machine asynchrone associée à un onduleur de tension n'est pas alimentée par des tensions sinusoïdales. Nous allons voir dans cette partie l'influence des harmoniques de tension sur le comportement de cette machine. Nous supposons que la machine asynchrone se comporte comme une charge triphasée linéaire et équilibrée (ce qui n'est strictement vrai qu'à vitesse constante et sans saturation des circuits magnétiques).

Le modèle équivalent par phase de la machine asynchrone dans le cas d'un fonctionnement à vitesse de rotation constante est donné à la Figure B.4.

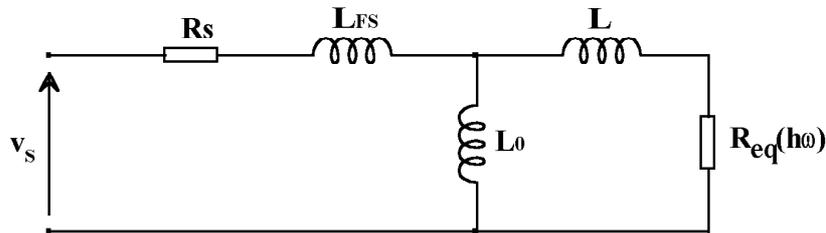


Figure B.4

La résistance rotorique de ce modèle équivalent dépend de la vitesse de rotation et de la fréquence du courant qui la traverse. Quand ce courant n'est pas sinusoïdal mais périodique, la résistance peut être calculée pour chacun des harmoniques en utilisant l'expression suivante :

$$R_{eq}(h \cdot \omega) = R \cdot \frac{h \cdot \omega}{h \cdot \omega - p \cdot \Omega_r} = \frac{R}{g_h}$$

Notations utilisées :

- La pulsation du fondamental est notée ω ;
- Le rang de l'harmonique est noté h . La pulsation correspondante vaut donc $\omega_h = h \cdot \omega$;
- La vitesse de rotation de la machine est notée Ω_r en rad/s et N_r en tr/mn. ;
- Le nombre de paires de pôles de la machine est noté p ;
- g_h est le glissement correspondant à l'harmonique de rang h .

Dans la suite et pour simplifier les calculs, nous utiliserons le modèle électrique simplifié suivant :

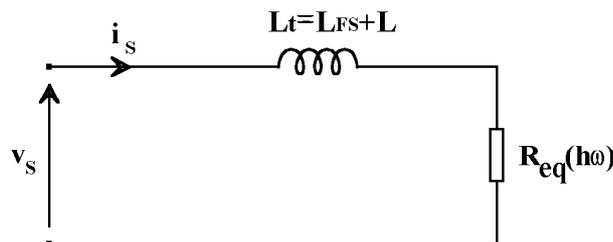


Figure B.5

Dans les questions qui vont suivre, nous allons utiliser les notations complexes définies par :

$$x(t) = \sum X_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t - \varphi_i) \rightarrow \underline{x}(t) = \sum X_i \cdot e^{j(\omega_i \cdot t - \varphi_i)}$$

En utilisant ces notations, le couple électromagnétique **instantané** fourni par la machine asynchrone peut se mettre sous la forme :

$$\Gamma(t) = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \text{Imaginaire}(\underline{\psi}_s^* \cdot \underline{i}_s)$$

avec :

- $v_s = R_s \cdot i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \approx \frac{d\psi_s}{dt}$ (fonctionnement à haute vitesse) où ψ_s représente le flux statorique ;
- Imaginaire signifie partie imaginaire du nombre complexe : $\text{Imaginaire}(a + jb) = b$;
- \underline{x}^* est le complexe conjugué de \underline{x} .

Q.B.37. En supposant que les tensions d'alimentation de la machine asynchrone sont sinusoïdales et que la tension alimentant la phase A est $v_s = V_s \cdot \cos(\omega \cdot t)$, donner l'expression du couple instantané fourni par la machine asynchrone en fonction de V_s , p , ω , L_t , R et g_1 .

Q.B.38. Application numérique : donner la valeur numérique de Γ pour les valeurs suivantes :

$$V_s = 450V, f = \omega / 2\pi = 88\text{Hz}, p = 2, R = 0,138\Omega, L_t = 2,38\text{mH}, N_r = 2610 \text{ tr / mn}.$$

Q.B.39. Reprendre la question Q.B.37 pour un système de tensions triphasées non sinusoïdales défini par l'expression de la tension alimentant la phase A de la machine :

$v_s = V_{s_1} \cdot \cos(\omega \cdot t) + V_{s_h} \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t)$. Vous donnerez l'expression du couple instantané en fonction de V_{s_1} , V_{s_h} , p , h , ω , L_t , R , g_h et g_1 .

Q.B.40. Application numérique : donner l'expression numérique de Γ pour les valeurs suivantes : $V_{s_1} = 450V$, $h = 13$, $V_{s_{13}} = -172V$, $f = \omega / 2\pi = 88\text{Hz}$, $p = 2$, $R = 0,138\Omega$, $L_t = 2,38\text{mH}$, $N_r = 2610 \text{ tr / mn}$.

Vous pourrez mettre le résultat sous la forme suivante : $\Gamma = _ + _ \cdot \cos(_ \omega t) + _ \cdot \sin(_ \omega t)$.

Q.B.41. Quelles conséquences liées à ces variations de couple pouvez vous envisager sur le fonctionnement (mécanique) d'une chaîne de traction.

B.II Solution retenue et étude du fonctionnement

Chaque onduleur de traction alimente deux des quatre machines asynchrones placées sur chaque bogie. Cette commande indépendante des roues situées à droite et à gauche du bogie permet d'effectuer les passages en courbe.

Le schéma retenu pour les onduleurs de traction est donné à la Figure B.6. Ce schéma qui diffère du schéma classique se nomme onduleur de tension trois niveaux. Ces onduleurs sont réalisés à partir de modules associant des transistors bipolaires montés en Darlington et une diode antiparallèle (Figure B.7).

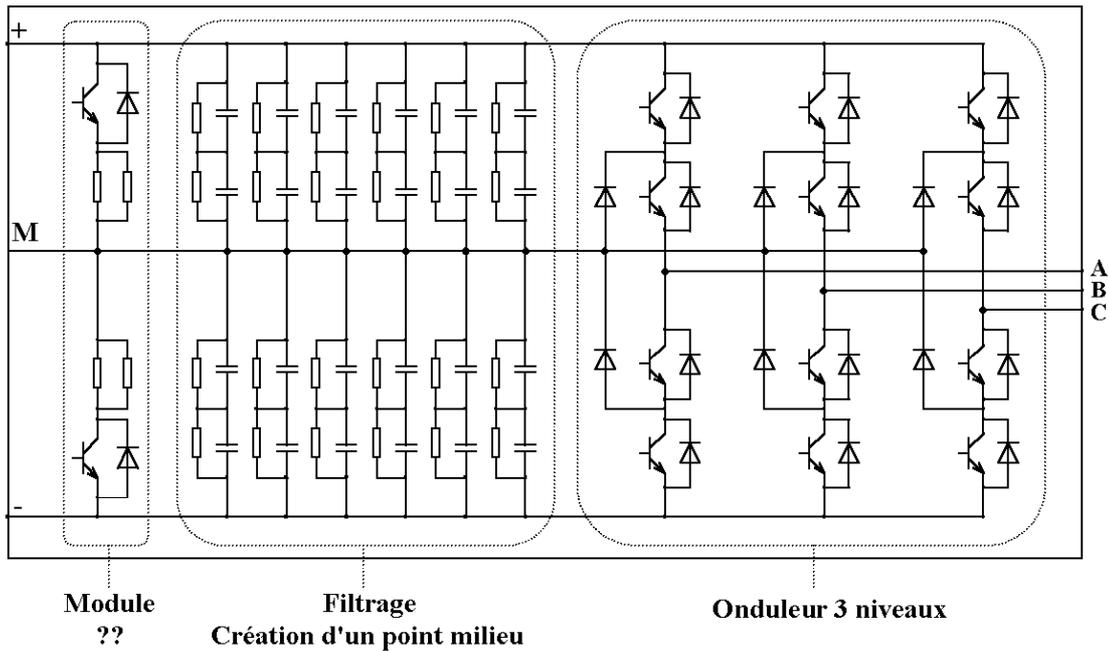


Figure B.6

Q.B.42. Préciser le rôle du module placé sur le bus continu en tête de la structure.

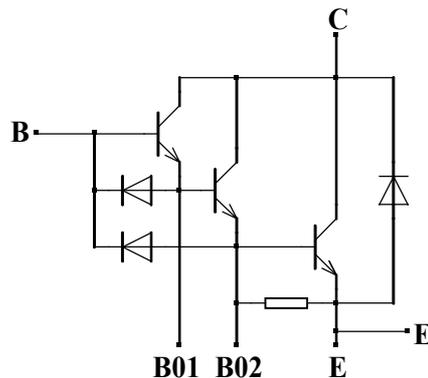


Figure B.7

Q.B.43. Justifier l'emploi de la structure Darlington dans le cas d'utilisation de transistors bipolaires en forte puissance.

Q.B.44. Donner le principal inconvénient de cette structure.

Q.B.45. Justifier l'utilité des diodes reliant les points B01 et B02 au point B.

Les notations utilisées dans les questions qui suivent sont les suivantes : les douze commandes relatives aux trois bras d'onduleurs (Figure B.8) sont notées C_{A1} , C_{A2} , C_{A3} et C_{A4} pour le bras associé à la phase A, C_{B1} , C_{B2} , C_{B3} et C_{B4} pour le bras associé à la phase B et C_{C1} , C_{C2} , C_{C3} et C_{C4} pour le bras associé à la phase C.

$C_{Xi} = 1$ implique que l'interrupteur correspondant est fermé et $C_{Xi} = 0$ implique que l'interrupteur correspondant est ouvert.

Nous allons définir quatre séquences de fermetures des interrupteurs d'un bras. Ces quatre séquences sont définies par un mot binaire constitué de deux bits. Ces mots notés MC_A , MC_B et MC_C sont associés respectivement aux bras alimentant les phases A, B et C. La table donnant la correspondance entre les valeurs de ces mots et les commandes des interrupteurs est donnée ci-dessous :

MC_X		C_{X1}	C_{X2}	C_{X3}	C_{X4}
$MC_{X_{b1}}$	$MC_{X_{b0}}$				
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1
1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	0

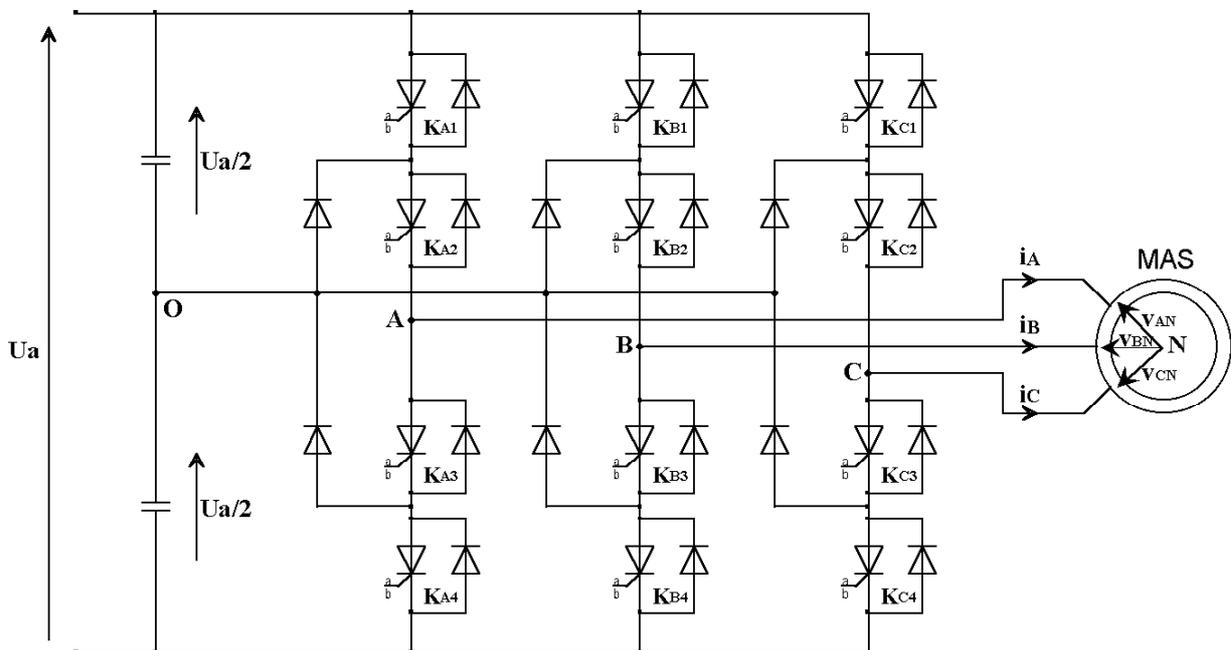


Figure B.8

B.II.1 Fonctionnement d'une des cellules de commutation de l'onduleur

Nous allons nous intéresser au fonctionnement de l'un des bras de l'onduleur trois niveaux.

Q.B.46. Compléter le document réponse REP.B.17 en représentant la circulation du courant dans les interrupteurs et la valeur de la tension v_{XO} pour les valeurs du mot de commande indiquées.

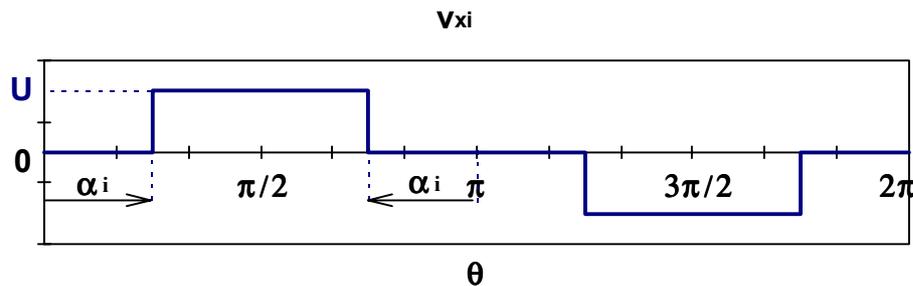
Les stratégies de commande des onduleurs trois niveaux du Tramway de Strasbourg dépendent à la fois de la fréquence des signaux de référence et de leur amplitude. De façon très générale, la commande par modulation vectorielle est choisie pour des fréquences inférieures à 20Hz. Pour les fréquences supérieures, la commande choisie est une commande par instants de commutation prédéfinis qui, selon la valeur de la fréquence des signaux de référence, peut être une modulation **Octuple** (quatre angles précalculés), une modulation **Quadruple** (deux angles précalculés) ou une modulation **Double** (un angle précalculé).

Q.B.47. En vous appuyant sur les résultats obtenus aux questions Q.B.35 et Q.B.36, proposer une justification de la commande choisie.

B.II.2 Fonctionnement à haute vitesse

Lors du fonctionnement à "haute" vitesse (fréquence des signaux de référence supérieure à 20Hz), la commande choisie est une commande par instants de commutation prédéfinis. Le fait que cette commande soit appliquée à un onduleur trois niveaux va modifier les formes d'onde et donc le calcul des angles de commutation. Nous allons donc déterminer les équations permettant le calcul de ces angles dans le cas de l'onduleur trois niveaux.

Rappel : les signaux v_{xi} qui sont utilisés dans la suite des questions sont identiques à ceux de la première partie de cette étude et ont l'allure suivante :



Q.B.48. Représenter la tension v_{AO} sur le document réponse REP.B.18 correspondant à la commande par instants de commutation prédéfinis associée à l'onduleur trois niveaux.

Q.B.49. Montrer que ce signal peut se mettre sous la forme d'une combinaison linéaire de signaux v_{xi} . Vous représenterez pour cela sur le document réponse REP.B.18 les signaux v_{x1} , v_{x2} , v_{x3} et v_{x4} définis de telle sorte que $v_{AO} = v_{x1} + v_{x2} + v_{x3} + v_{x4}$.

Q.B.50. En utilisant le résultat obtenu à la question Q.B.4, déterminer l'expression de la décomposition en série de Fourier des signaux v_{AO} , v_{BO} et v_{CO} en fonction de α_1 , α_2 , α_3 et α_4 (les commandes des trois bras de l'onduleur sont décalées de $\theta_0 = 2\pi / 3$). Vous mettrez

le résultat sous la forme suivante : $v_{xO}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{xO_n} \cdot \sin(n \cdot (\theta - \varphi_{xO_n}))$ où x vaut

A, B ou C.

Q.B.51. En déduire l'expression de la décomposition en série de Fourier des signaux v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} . Vous mettrez le résultat sous la forme suivante :

$$v_{xN}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{xN_n} \cdot \sin(n \cdot (\theta - \varphi_{xN_n})).$$

Q.B.52. En déduire les quatre équations permettant de fixer l'amplitude du fondamental des tensions v_{xN} et d'annuler les harmoniques 5, 7 et 11. Vous mettrez les résultats sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{xN_1} = f_1(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, U_a) \\ 0 = f_2(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\ 0 = f_3(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\ 0 = f_4(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \end{cases}$$

Q.B.53. Donner pour les valeurs suivantes l'amplitude du fondamental et des harmoniques 5, 7 et 11 en fonction de U_a . Conclure.

$$\alpha_1 = 0,3333; \alpha_2 = 0,8123; \alpha_3 = 0,9177; \alpha_4 = 1,4914$$

Le calcul que vous venez de mener concerne la modulation **Octuple**. Dans le cas de la modulation **Quadruple** et **Double**, seuls, respectivement, deux et un angle peuvent être précalculés.

Q.B.54. En supposant que nous souhaitons éliminer l'harmonique 5 et régler l'amplitude du fondamental de la tension pour la modulation **Quadruple** et régler l'amplitude du fondamental pour la modulation **Double**, déduire de la question précédente les équations permettant de calculer les angles de commutation dans ces deux cas. Vous mettrez le résultat sous la forme suivante :

$$\text{Quadruple : } \begin{cases} V_{xN_1} = f_1(\alpha_1, \alpha_2, U_a) \\ 0 = f_2(\alpha_1, \alpha_2) \end{cases} \quad \text{Double : } V_{xN_1} = f_1(\alpha_1, U_a)$$

Q.B.55. Donner, pour la modulation Octuple, l'expression du rapport $\frac{|V_{xN_n}|}{|V_{xN_1}|}$ où V_{xN_n} représente l'amplitude de l'harmonique de rang n.

Q.B.56. Représenter sur le document réponse REP.B.19 l'amplitude des 27 premiers harmoniques des tensions v_{xN} pour les valeurs de α_1 de la question Q.B.53. **Vous préciserez sur le graphique l'amplitude correspondant à chacun des harmoniques non nuls.**

Q.B.57. Comparer le spectre de la question précédente à celui de la question Q.B.18 correspondant au même principe de commande mais pour un onduleur "classique" à deux niveaux.

B.II.3 Fonctionnement à basse vitesse

Nous ne développerons pas la commande à basse vitesse de l'onduleur trois niveaux dans ce sujet. Nous allons toutefois en donner les grands principes :

La commande utilisée dans ce cas (fréquence des signaux de référence inférieure à 20Hz) est basée sur le principe de la modulation vectorielle. Cette modulation vectorielle est sensiblement remaniée pour pouvoir être appliquée à un onduleur trois niveaux.

Les principes fondamentaux restent identiques à ceux de la modulation vectorielle d'un onduleur de tension "classique" à deux niveaux. Les différences tiennent au plus grand nombre de combinaisons possibles des états des différents bras (27 si on ne prend pas en compte les états où

tous les interrupteurs d'un bras sont bloqués). Ces 27 combinaisons ne donnent pas 27 couples de valeur (v_α, v_β) différents mais seulement 19 parmi lesquels on trouve le couple (0,0). Les 18 vecteurs non nuls associés à ces couples de valeur définissent les limites de 18 secteurs. Les valeurs des tensions de référence situées dans ces secteurs peuvent être obtenues en effectuant une moyenne temporelle des vecteurs bordant le secteur. Les séquences de fermeture des interrupteurs de la structure correspondant à chacun de ces vecteurs ne sont pas nécessairement uniques (contrairement au cas précédent), le choix de la séquence est alors réalisé selon une stratégie visant à réduire le contenu harmonique des ondes de tension résultantes.

C MOTORISATION DU TRAMWAY

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la structure du bobinage du moteur asynchrone, à sa modélisation en régime dynamique et au principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

C.I Enroulements statoriques du moteur asynchrone.

Nous vous proposons d'étudier quelques aspects d'un enroulement statorique développant une force magnétomotrice à répartition sinusoïdale dans l'entrefer de la machine.

Hypothèses :

- L'induction est radiale dans l'entrefer de la machine et comptée positivement lorsqu'elle sort du rotor ;
- La perméabilité des matériaux magnétiques du stator et du rotor est supposée infinie ;
- On néglige la saturation, l'hystérésis et les courants de Foucault des matériaux magnétiques ;
- On néglige les effets de denture ;
- On suppose que l'entrefer est constant ;
- L'épaisseur de l'entrefer est négligeable devant le rayon du rotor.

Notations utilisées :

- p : Nombre de paires de pôles ;
- m : Nombre d'encoches par pôle et par phase ;
- θ : Angle mécanique ;
- α : Angle électrique ;
- e : Épaisseur de l'entrefer ;
- R : Rayon du rotor ;
- L : Longueur du rotor ;
- μ_0 : Perméabilité du vide ;
- β : Pas dentaire.

Force magnétomotrice développée par une section à pas diamétral

La Figure C.1 représente la coupe d'une machine, dans l'espace électrique, portant une section statorique diamétrale de N_S conducteurs actifs par encoche, parcouru par le courant I_S . L'encoche avec N_S conducteurs est représentée par un cercle portant un point lorsque le courant sort du plan et une croix lorsque le courant entre dans le plan.

Q.C.1. Donner la relation liant l'angle électrique α à l'angle mécanique θ .

Q.C.2. Représenter sur le document réponse REP.C.1. l'allure de la force magnétomotrice $\varepsilon = f(\alpha)$ au point M de l'entrefer de la machine pour $0 \leq \alpha \leq 2\pi$. *On appelle force magnétomotrice la circulation du champ magnétique H dans l'entrefer du rotor vers le stator.*

Q.C.3. Calculer la série de Fourier de $\varepsilon = f(\alpha)$ en exprimant A_h , amplitude de l'harmonique de rang h , en fonction de N_S et de I_S

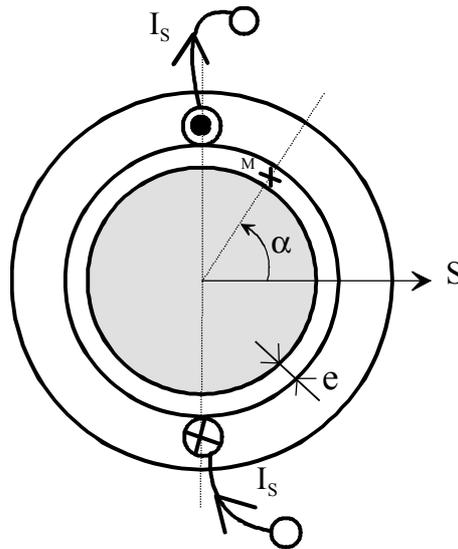


Figure C.1

Q.C.4. Donner l'expression de l'induction magnétique $B = f(\alpha)$.

Force magnétomotrice développée par une section à pas raccourci

Le pas de la section de la Figure C.1 est maintenant raccourci et vaut $\delta\pi$ avec $\delta \leq 1$ comme le montre la Figure C.2.

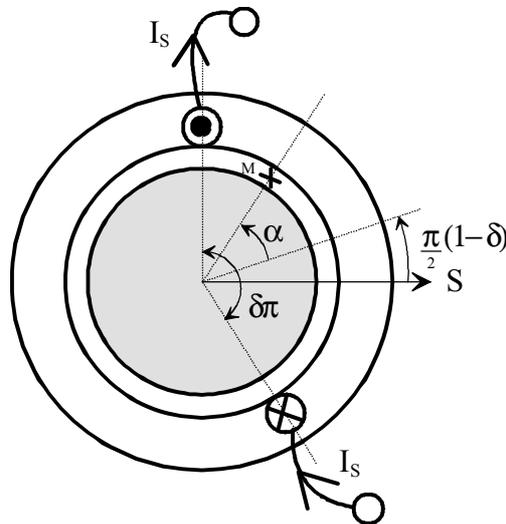


Figure C.2

La partie positive de la force magnétomotrice d'entrefer est notée ε_a et la partie négative est notée ε_b .

Q.C.5. Donner la relation liant N_S , I_S , ε_a et ε_b .

Q.C.6. Calculer le flux de l'induction magnétique sortant du rotor en fonction de ε_a et le flux de l'induction magnétique rentrant dans le rotor en fonction de ε_b .

Q.C.7. Donner l'expression du rapport $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b}$ en fonction de δ .

Q.C.8. Déterminer les relations $\varepsilon_a = f(\delta, N_S, I_S)$ et $\varepsilon_b = f(\delta, N_S, I_S)$.

Q.C.9. Représenter sur le document réponse REP.C.1. l'allure de la force magnétomotrice $\varepsilon = f(\alpha)$ développée dans l'entrefer par la section pour $0 \leq \alpha \leq 2\pi$. Prendre $\delta = 5/6$.

Enroulement réparti

Un enroulement statorique de la machine asynchrone est constitué de 4 sections à pas raccourci, branchées en série, logées dans des encoches espacées de $p\beta$ radians électriques. Chaque encoche porte $N_S/4$ conducteurs actifs. La Figure C.3 représente l'enroulement réparti, avec $m = 4$, dans l'espace électrique. L'utilisation de sections à pas raccourcis plutôt qu'à pas diamétraux permet de réduire la longueur des têtes de bobines. Celles-ci ne sont pas représentées sur le croquis de la Figure C.3.

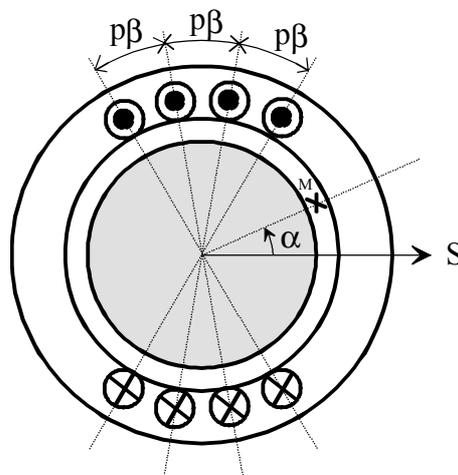


Figure C.3

Q.C.10. Calculer le nombre d'encoches N_{ES} du stator ainsi que le pas dentaire $p\beta$.

Q.C.11. On désire réaliser un bobinage par sections et par pôles consécutifs en utilisant des sections à pas diamétral. Réaliser le schéma du bobinage d'une phase statorique, correspondant à une paire de pôle, sur le document réponse REP.C.2.

Q.C.12. On veut maintenant réaliser un bobinage par sections et par pôles en utilisant des sections à pas raccourci ($\delta = 5/6$). Réaliser le schéma du bobinage d'une phase statorique, correspondant à une paire de pôle, sur le document réponse REP.C.2.

Q.C.13. Représenter l'allure de la force magnétomotrice $\varepsilon = f(\alpha)$ au point M de l'entrefer de la machine pour $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ sur le document réponse REP.C.1. lorsque l'enroulement est parcouru par le courant I_S

Q.C.14. Calculer $\varepsilon_h = f(N_S, I_S, h, p\beta, \alpha)$, qui est l'harmonique de rang h du développement en série de Fourier de ε , en vous servant de la réponse à la question Q.C.3. En déduire l'expression de B_h qui est l'amplitude de ε_h .

Q.C.15. Calculer les valeurs numériques de $K_{Sh} = \frac{B_h}{A_h}$ et ceci jusqu'au rang $h = 5$. Que représente K_{Sh} ?

C.II Vecteur complexe.

Nous allons introduire dans cette partie la notion de *vecteur complexe*. L'utilisation de cet outil permet de déterminer aisément le modèle de la machine asynchrone nécessaire pour la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

On introduit une armature diphasée orthogonale, représentée à la Figure C.4, équivalente du point de vue de la force magnétomotrice à l'armature triphasée. Chaque enroulement, des armatures triphasée et diphasée, produit en un point de l'entrefer situé sur son axe une force magnétomotrice proportionnelle au courant dans l'enroulement et à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer. Le coefficient de proportionnalité est noté k_E . Les enroulements de l'armature triphasée sont branchés en étoile donc $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.

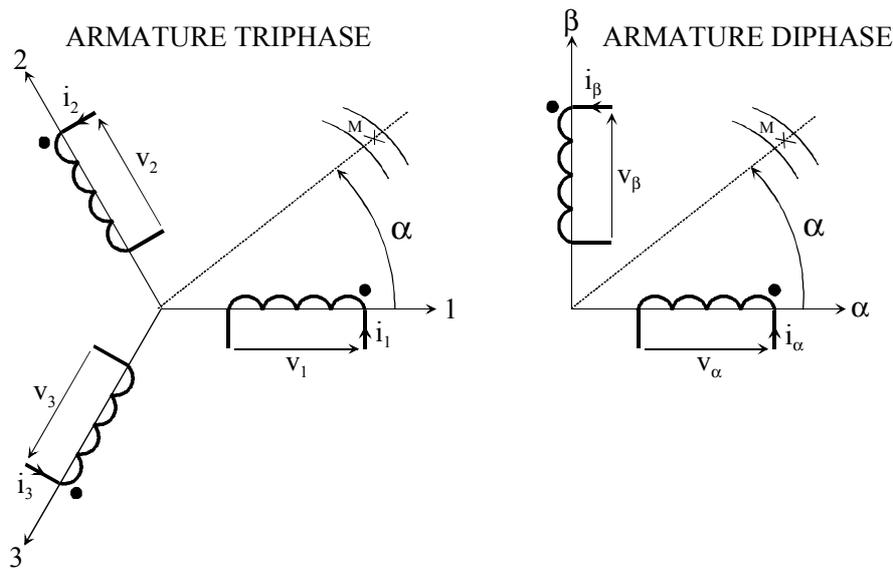


Figure C.4

Q.C.16. Donner l'expression de la force magnétomotrice ε produite au point M par l'armature triphasée parcourus par les courants i_1 , i_2 et i_3 .

Q.C.17. On place le plan complexe en prenant comme axe des réels l'axe 1. Montrer que la force magnétomotrice ε peut se mettre sous la forme :

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \cdot k_E \cdot \Re(\underline{I} e^{-j\alpha})$$

\underline{I} est un vecteur complexe courant qui s'écrit $\underline{I} = \frac{2}{3}(i_1(t) + a \cdot i_2(t) + a^2 \cdot i_3(t))$ et dont le conjugué

est $\underline{I}^* = \frac{2}{3}(i_1(t) + a^2 \cdot i_2(t) + a \cdot i_3(t))$ avec $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

\Re signifie qu'il faut prendre la partie réelle du nombre complexe qui lui est associé.

Ces expressions peuvent également être notées sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{I}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{I}^* \end{bmatrix}$$

De façon générale, on peut associer à chaque système triphasé équilibré de tensions, courants et flux un vecteur complexe tension, courant et flux. Les relations matricielles liant les grandeurs complexes aux grandeurs temporelles et réciproquement se mettent sous la même forme que précédemment à savoir :

$$\begin{bmatrix} \underline{X} \\ \underline{X}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{X} \\ \underline{X}^* \end{bmatrix}$$

Ou x peut être une tension, un courant ou un flux.

Q.C.18. Donner l'expression du vecteur complexe \underline{I} et de la force magnétomotrice ϵ dans le cas où les courants i_1 , i_2 et i_3 forment un système triphasé équilibré direct de pulsation ω_s et ont une amplitude égale à $I\sqrt{2}$. Que représente le vecteur complexe dans ce cas ? Que peut-on dire de ϵ ?

Dans le référentiel $\alpha\beta$ lié aux enroulements de l'armature diphasé, le vecteur complexe courant s'écrit $\underline{I} = i_\alpha + j i_\beta$. Le courant i_α représente la composante réelle du vecteur \underline{I} et le courant i_β représente la composante imaginaire du vecteur \underline{I} .

Q.C.19. Donner les relations liant i_α et i_β à i_1 , i_2 et i_3 . Ces relations peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32}^t \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$$

Déterminer les éléments de la matrice C_{32}^t .

Les enroulements du repère $\alpha\beta$ subissent un rotation de φ ce qui donne le repère dq de la Figure C.5.

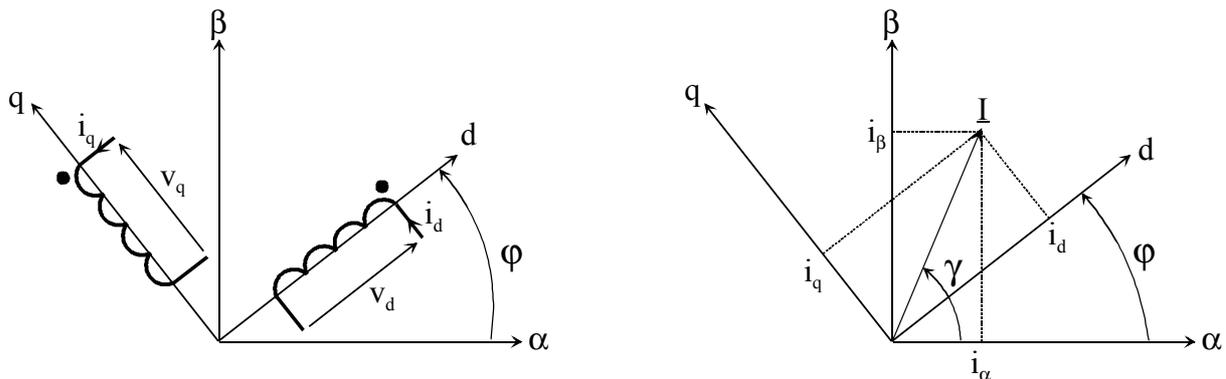


Figure C.5

Dans le repère $\alpha\beta$, le vecteur courant complexe peut aussi s'écrire $\underline{I} = |\underline{I}|e^{j\gamma}$. Dans le repère dq, décalé à un instant donné d'un angle φ par rapport au repère $\alpha\beta$, le vecteur complexe courant est noté \underline{I}^{dq} et s'écrit $\underline{I}^{dq} = i_d + j i_q$.

Q.C.20. Exprimer \underline{I}^{dq} en fonction de \underline{I} . À quelle opération se ramène ce changement de repère ?

Q.C.21. Donner les relations liant i_d et i_q à i_α et i_β . Ces relations peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = R(-\varphi) \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Déterminer les éléments de la matrice $R(-\varphi)$.

La puissance instantanée absorbée par l'armature triphasée réelle peut s'exprimer en fonction des courants et des tensions de l'armature diphasée fictive du repère dq.

Q.C.22. Donner l'expression de la puissance instantanée p de l'armature triphasée en fonction de v_1, v_2, v_3, i_1, i_2 et i_3 . Ecrire l'expression de p sous forme matricielle en fonction des

matrices $\underline{[i_{123}]} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$ et $\underline{[v_{123}]} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$.

On donne :

•

$$C_{32} \cdot C_{32}^t = \frac{4}{9} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

• Propriétés de la transposée :

$$(\underline{[A]} \times \underline{[B]})^t = \underline{[B]}^t \times \underline{[A]}^t \quad (\underline{[A]}^t)^t = \underline{[A]}$$

Q.C.23. Réécrire l'expression de la puissance instantanée de l'armature triphasée et montrer que cette puissance peut s'écrire en fonction des vecteurs complexes de l'armature diphasée du repère dq de la manière suivante :

$$p = \frac{3}{2} \Re(\underline{V}^{dq} \cdot \underline{I}^{dq*}).$$

Pour l'armature triphasée, on peut écrire que $\underline{[v_{123}]} = \underline{[R]} \underline{[i_{123}]} + \frac{d\underline{[\Psi_{123}]}}{dt}$ où R est la résistance d'un enroulement.

Q.C.24. Écrire la relation précédente en utilisant les vecteurs complexes \underline{V} , \underline{I} et $\underline{\Psi}$.

Q.C.25. En déduire l'expression complexe liant \underline{V}^{dq} , \underline{I}^{dq} et $\underline{\Psi}^{dq}$ du repère dq. Donner les expressions de $v_d = f(i_d, \Psi_d, \Psi_q, \varphi, t)$ et de $v_q = f(i_q, \Psi_d, \Psi_q, \varphi, t)$.

C.III Modélisation de la machine asynchrone.

La machine asynchrone dont les enroulements statoriques sont couplés en étoile peut être représentée, dans l'espace électrique, par deux armatures diphasées fictives. Une armature statorique constituée de deux enroulements alimentés par les tensions v_{sd} et v_{sq} et parcourus par les courants i_{sd} et i_{sq} et une armature rotorique constituée de deux enroulements en court circuit parcourus par les courants i_{rd} et i_{rq} . Les deux armatures sont placées dans un repère dq unique comme le montre la Figure C.6.

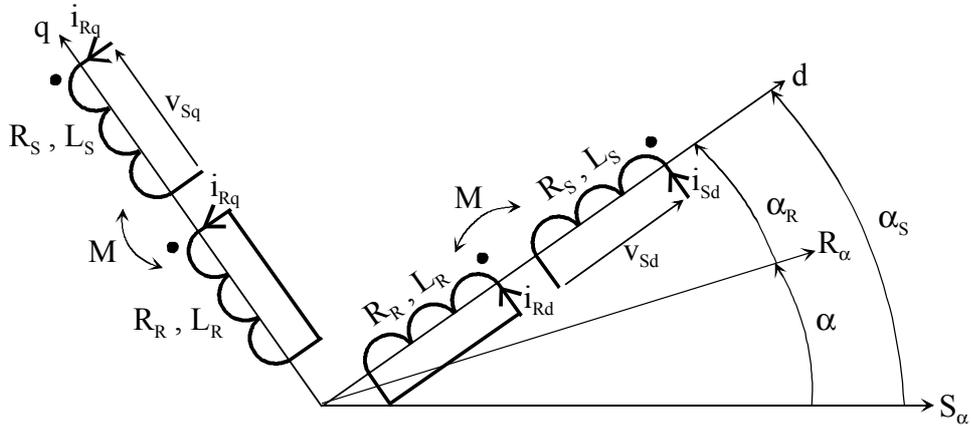


Figure C.6

On note :

- M : Mutuelle inductance cyclique stator-rotor ;
- L_S : Inductance cyclique du stator ;
- R_S : Résistance d'un enroulement statorique ;
- L_R : Inductance cyclique du rotor ;
- R_R : Résistance d'un enroulement rotorique.

Un courant positif dans un enroulement produit un flux positif.

La modélisation en régime dynamique de la machine asynchrone triphasé avec les vecteurs complexes dans le référentiel dq conduit au schéma équivalent de la Figure C.7.

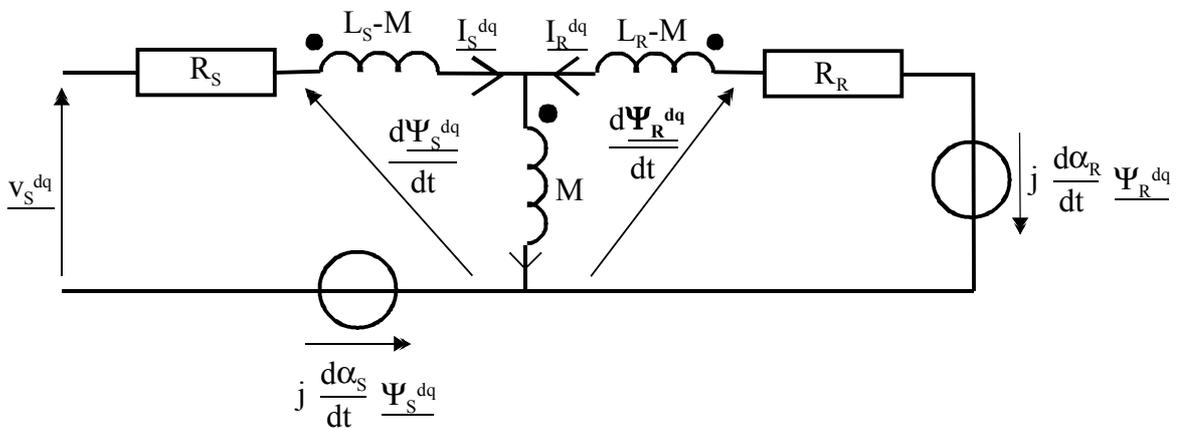


Figure C.7

On choisit de placer le référentiel dq dans un repère lié au champ tournant. On pose : $\frac{d\alpha_S}{dt} = \omega_S$;

$$\frac{d\alpha_R}{dt} = \omega_R ; \frac{d\alpha}{dt} = \omega .$$

En régime sinusoïdal permanent, la vitesse angulaire de rotation du référentiel dq par rapport à un point fixe lié au stator est égale à la pulsation des courants statoriques. De même, la vitesse angulaire de rotation du référentiel dq par rapport à un point fixe lié au rotor est égale à la pulsation des courants rotoriques.

Equations au stator

Q.C.26. Donner l'expression complexe des tensions statoriques $\underline{V}_S^{dq} = f(\underline{I}_S^{dq}, \underline{\Psi}_S^{dq})$ ainsi que l'expression complexe du flux statorique $\underline{\Psi}_S^{dq} = f(L_S, M, \underline{I}_S^{dq}, \underline{I}_R^{dq})$.

Q.C.27. Déduire des expressions précédentes les expressions de :

$$v_{Sd} = f(R_S, i_{Sd}, \Psi_{Sd}, \Psi_{Sq}, \omega_S) ; v_{Sq} = f(R_S, i_{Sq}, \Psi_{Sd}, \Psi_{Sq}, \omega_S)$$

$$\Psi_{Sd} = f(L_S, M, i_{Sd}, i_{Rd}) ; \Psi_{Sq} = f(L_S, M, i_{Sq}, i_{Rq})$$

Equations au rotor

Q.C.28. Donner l'expression complexe des tensions rotoriques $0 = f(\underline{I}_R^{dq}, \underline{\Psi}_R^{dq})$ ainsi que l'expression complexe du flux rotorique $\underline{\Psi}_R^{dq} = f(L_R, M, \underline{I}_S^{dq}, \underline{I}_R^{dq})$.

Q.C.29. Déduire des expressions précédentes les expressions de :

$$0 = f(R_R, i_{Rd}, \Psi_{Rd}, \Psi_{Rq}, \omega_R) ; 0 = f(R_R, i_{Rq}, \Psi_{Rd}, \Psi_{Rq}, \omega_R)$$

$$\Psi_{Rd} = f(L_R, M, i_{Rd}, i_{Sd}) ; \Psi_{Rq} = f(L_R, M, i_{Rq}, i_{Sq})$$

Couple électromagnétique

L'énergie électrique totale dW_E apportée à la machine asynchrone peut se décomposer de la manière suivante :

$$dW_E = dW_J + dW_{MAG} + dW_{MECA}$$

dW_J : Énergie dissipée par effet Joule

dW_{MAG} : Énergie magnétique.

dW_{MECA} : Énergie mécanique.

Q.C.30. Établir les expressions suivantes en utilisant l'expression de la puissance instantanée de la question Q.C.23 ($p = \frac{3}{2} \Re(\underline{V}^{dq} \cdot \underline{I}^{dq*})$).

$$\frac{dW_J}{dt} = f(R_S, R_R, i_{Sd}, i_{Sq}, i_{Rd}, i_{Rq})$$

$$\frac{dW_{MAG}}{dt} = f(\Psi_{Sd}, \Psi_{Sq}, i_{Sd}, i_{Sq}, \Psi_{Rd}, \Psi_{Rq}, i_{Rd}, i_{Rq})$$

$$\frac{dW_{MECA}}{dt} = f(\Psi_{Sd}, \Psi_{Sq}, i_{Sd}, i_{Sq}, \Psi_{Rd}, \Psi_{Rq}, i_{Rd}, i_{Rq}, \omega_S, \omega_R)$$

Q.C.31. Montrer que $\Psi_{Sd} i_{Sq} - \Psi_{Sq} i_{Sd} = -(\Psi_{Rd} i_{Rq} - \Psi_{Rq} i_{Rd})$.

Q.C.32. Établir les expressions suivantes :

$$\frac{dW_{MECA}}{dt} = f(\Psi_{Sd}, \Psi_{Sq}, i_{Sd}, i_{Sq}, \omega)$$

$$\frac{dW_{MECA}}{dt} = f(\Psi_{Rd}, \Psi_{Rq}, i_{Rd}, i_{Rq}, \omega)$$

Q.C.33. Montrer alors que le couple électromagnétique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$C_{EM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p M}{L_R} (\Psi_{Rd} \cdot i_{Sq} - \Psi_{Rq} \cdot i_{Sd})$$

C.IV Commande de la machine asynchrone.

La machine asynchrone, dont les enroulements statoriques sont couplés en étoile, peut être représentée, dans l'espace électrique, par deux armatures diphasées fictives. Une armature statorique constituée de deux enroulements alimentés par les tensions v_{Sd} et v_{Sq} et parcourus par les courants i_{Sd} et i_{Sq} et une armature rotorique constituée de deux enroulements en court circuit parcourus par les courants i_{Rd} et i_{Rq} . Les deux armatures sont placées dans un repère dq unique comme le montre la Figure C.8.

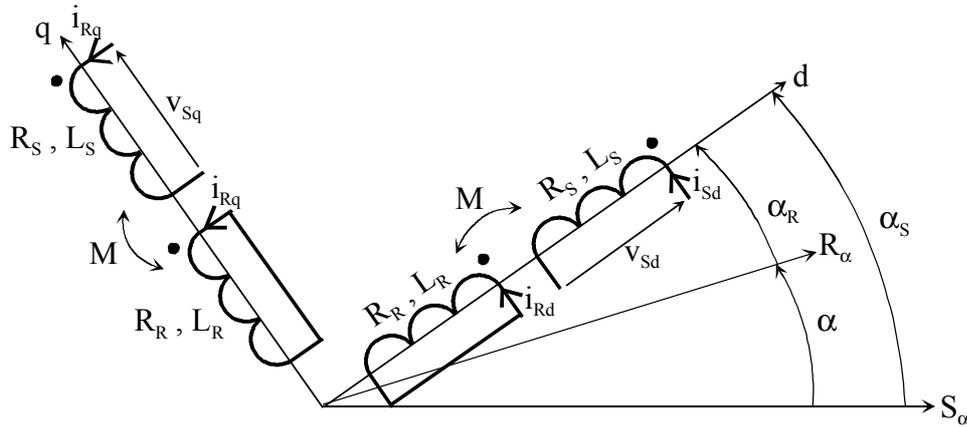


Figure C.8

On pose : $\frac{d\alpha_S}{dt} = \omega_S$; $\frac{d\alpha_R}{dt} = \omega_R$; $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$.

- R_S : Résistance d'un enroulement statorique ;
- R_R : Résistance d'un enroulement rotorique ;
- L_S : Inductance cyclique du stator ;
- L_R : Inductance cyclique du rotor ;
- M : Mutuelle inductance cyclique stator-rotor ;
- σ : Coefficient de dispersion ;
- ω_S : Pulsation instantanée des grandeurs statoriques ;
- ω_R : Pulsation instantanée des grandeurs rotoriques ;
- α_S : Position angulaire instantanée, dans l'espace électrique, de l'axe d par rapport à l'axe de l'enroulement statorique pris comme référence ;
- α : Position angulaire instantanée, dans l'espace électrique, de l'axe de l'enroulement rotorique pris comme référence par rapport à l'axe de l'enroulement statorique pris comme référence ;
- p : Nombre de paires de pôles.

Le principe de la commande vectorielle consiste à faire tourner le repère dq à la vitesse angulaire de ω_s radians par seconde et d'orienter l'axe d sur le flux rotorique Ψ_R , donc $\Psi_{Rq} = 0$. Les équations de la machine asynchrone dans le repère dq avec $\Psi_{Rq} = 0$ s'écrivent :

Au stator :

$$v_{Sd} = R_S i_{Sd} + L_S \frac{di_{Sd}}{dt} + M \frac{di_{Rd}}{dt} - L_S \omega_s i_{Sq} - M \omega_s i_{Rq} \quad (1)$$

$$v_{Sq} = R_S i_{Sq} + L_S \frac{di_{Sq}}{dt} + M \frac{di_{Rq}}{dt} + L_S \omega_s i_{Sd} + M \omega_s i_{Rd} \quad (2)$$

Au rotor :

$$0 = R_R i_{Rd} + \frac{d\Psi_{Rd}}{dt} \quad (3) \qquad \Psi_{Rd} = L_R i_{Rd} + M i_{Sd} \quad (4)$$

$$0 = R_R i_{Rq} + \omega_R \Psi_{Rd} \quad (5) \qquad 0 = L_R i_{Rq} + M i_{Sq} \quad (6)$$

Expression du couple électromagnétique :

$$C_{EM} = p(1 - \sigma)L_S \cdot i_M \cdot i_{Sq} \quad (7) \quad \text{avec} \quad i_M = \frac{\Psi_{Rd}}{M} \quad \text{et} \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_S L_R}$$

Remarque : En régime sinusoïdal permanent, la valeur efficace des grandeurs sinusoïdales réelles se calcule à l'aide des grandeurs du repère dq par la relation suivante :

$$X = \sqrt{\frac{x_d^2 + x_q^2}{3}} \quad X \text{ peut être un courant, une tension ou bien un flux.}$$

Les moteurs asynchrones du tramway sont alimentés par des onduleurs de tension à MLI vectorielle. Les grandeurs de commande de l'onduleur sont $v_{S\alpha}$ et $v_{S\beta}$. Un calculateur numérique élabore, à chaque période d'échantillonnage, les valeurs de $v_{S\alpha}$ et $v_{S\beta}$. Ces deux valeurs permettent de calculer les séquences d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de l'onduleur pour chaque période d'échantillonnage. L'algorithme de commande effectue les asservissements des courants i_M et i_{Sq} . Pour réaliser ces asservissements il est nécessaire d'accéder à certaines grandeurs (ω_R , Ψ_R) qui ne sont pas directement mesurables avec des capteurs. Pour avoir accès à ces grandeurs non mesurables on utilise des *estimateurs* dont la fonction est de calculer leur valeur à l'aide des grandeurs mesurables (courants statoriques et vitesse de rotation de la machine) et des paramètres de la machine (résistance statorique, résistance rotorique...etc.).

Le schéma fonctionnel de la commande est donné à la Figure C.9. Les grandeurs estimées seront affectées de l'exposant ^ et les grandeurs de référence seront affectées de l'exposant *

Les matrices de transformation utilisées sont :

$$R(\alpha_S) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_S) & -\sin(\alpha_S) \\ \sin(\alpha_S) & \cos(\alpha_S) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

Lorsqu'une matrice est suivie de l'exposant t, il s'agit de la matrice transposée.

On utilisera la lettre s pour l'opérateur de Laplace.

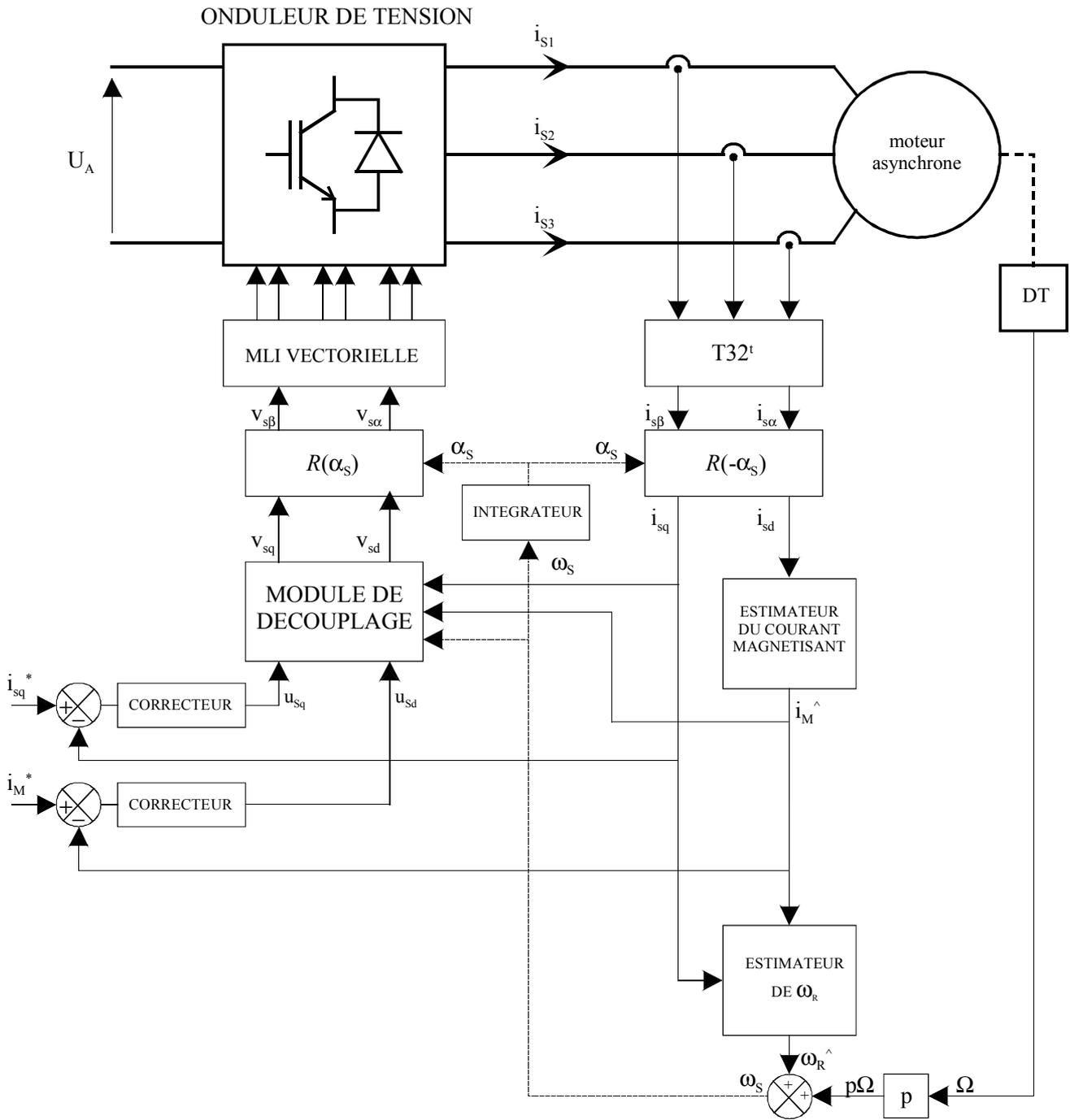
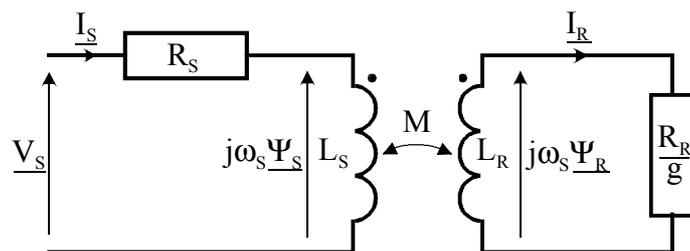


Figure C.9

Q.C.34. Le schéma équivalent pour le régime sinusoïdal permanent d'une phase de la machine peut se mettre sous la forme suivante :



Montrer que ce schéma peut se mettre sous la forme donné dans la partie présentation du tramway de Strasbourg. On néglige les pertes fers.

Q.C.35. Exprimer L_{FS} , L_s , L_0 et R en fonction de L_S , L_R , M , R_R et u . Calculer les valeurs numériques de L_S , R_R , L_R et M . En déduire la valeur du coefficient de dispersion σ .

Le conducteur du tramway impose une caractéristique couple vitesse à l'aide d'un manipulateur situé dans la cabine de pilotage.

Pour un fonctionnement normal en marche avant, la caractéristique maximum du couple électromagnétique appliqué à un moteur en fonction de la vitesse linéaire de la rame de tramway est donnée à la Figure C.10.

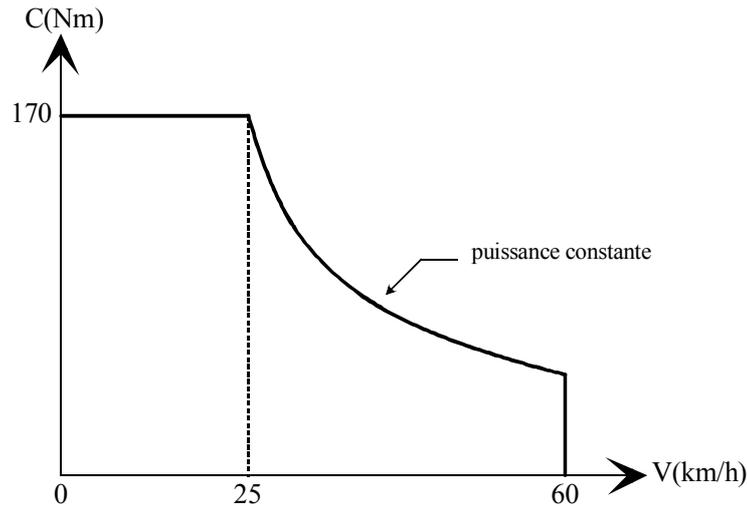


Figure C.10

On suppose que les boucles de régulation de i_M et de i_{sq} fonctionnent de façon idéale. La consigne du courant magnétisant i_M^* , pour une vitesse du moteur inférieure à 25 km/h, correspond à la valeur de Ψ_R pour un fonctionnement à vide ($g=0$) en régime sinusoïdal permanent, le moteur étant alimenté dans les conditions nominales.

Q.C.36. Calculer la valeur de Ψ_R correspondant à la caractéristique de la Figure C.10 pour une vitesse comprise entre zéro et 25 km/h. En déduire les valeurs des grandeurs de consignes i_M^* et i_{sq}^* .

Q.C.37. Ecrire les équations de la machine asynchrone dans le repère dq lorsque la rame de tramway avance à vitesse constante et que le couple est constant.

Q.C.38. Calculer la valeur efficace du courant dans une phase du moteur pour les courants de consigne déterminés à la question Q.C.36.

Q.C.39. Pour le point de fonctionnement à $V = 25$ km/h de la caractéristique de la Figure C.10 calculer les valeurs de v_{sd} , v_{sq} et ω_R . En déduire la valeur efficace de la tension appliquée aux bornes d'un enroulement statorique du moteur ainsi que la valeur efficace et la fréquence de la tension composée fournie par l'onduleur (on néglige les harmoniques de tension).

Lorsque la vitesse de la rame dépasse 25 km/h on maintient i_{sq} toujours constant par contre on défluxe la machine en diminuant Ψ_R .

Q.C.40. Pour le point de fonctionnement à $V = 30 \text{ km/h}$ de la caractéristique de la Figure C.10 Calculer la nouvelle valeur de i_M^* , puis calculer les valeurs de v_{sd} , v_{sq} et ω_R . En déduire la valeur efficace de la tension appliquée aux bornes d'un enroulement statorique du moteur ainsi que la valeur efficace et la fréquence de la tension composée fournie par l'onduleur (on néglige les harmoniques de tension).

On souhaite maintenant déterminer les équations et les fonctions de transfert régissant le fonctionnement de l'estimateur du courant magnétisant, de l'estimateur de ω_R et du module de découplage. Celles-ci sont établies à partir des équations en régime transitoire de la machine dans le repère dq. On note $\tau_S = L_S / R_S$ la constante de temps statorique et $\tau_R = L_R / R_R$ la constante de temps rotorique.

Q.C.41. Estimateur du courant magnétisant i_M .

Déterminer la fonction de transfert de l'estimateur du courant magnétisant $\frac{\hat{i}_M(s)}{i_{sd}(s)} = f(\tau_R, s)$.

Q.C.42. Estimateur de la pulsation des grandeurs rotoriques ω_R .

Donner l'expression de la valeur estimée $\hat{\omega}_R$ de la pulsation ω_R en fonction de \hat{i}_M , τ_R et i_{sq} .

La Figure C.11. représente le schéma fonctionnel correspondant au modèle de la machine asynchrone dans le repère dq avec v_{sd} et v_{sq} en entrées et i_M et i_{sq} , grandeurs que l'on souhaite réguler, en sorties

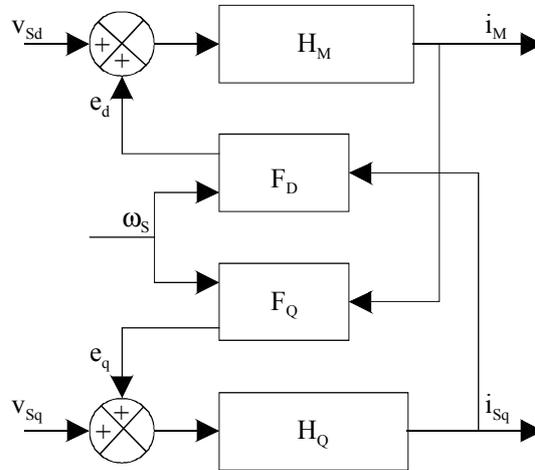


Figure C.11

Q.C.43. Montrer que les équations de la machine peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$v_{sd} + e_d = R_S \left(i_M + A \frac{di_M}{dt} + B \frac{d^2 i_M}{dt^2} \right)$$

$$v_{sq} + e_q = R_S \left(i_{sq} + C \frac{di_{sq}}{dt} \right)$$

Donner les expressions de e_d et de e_q .

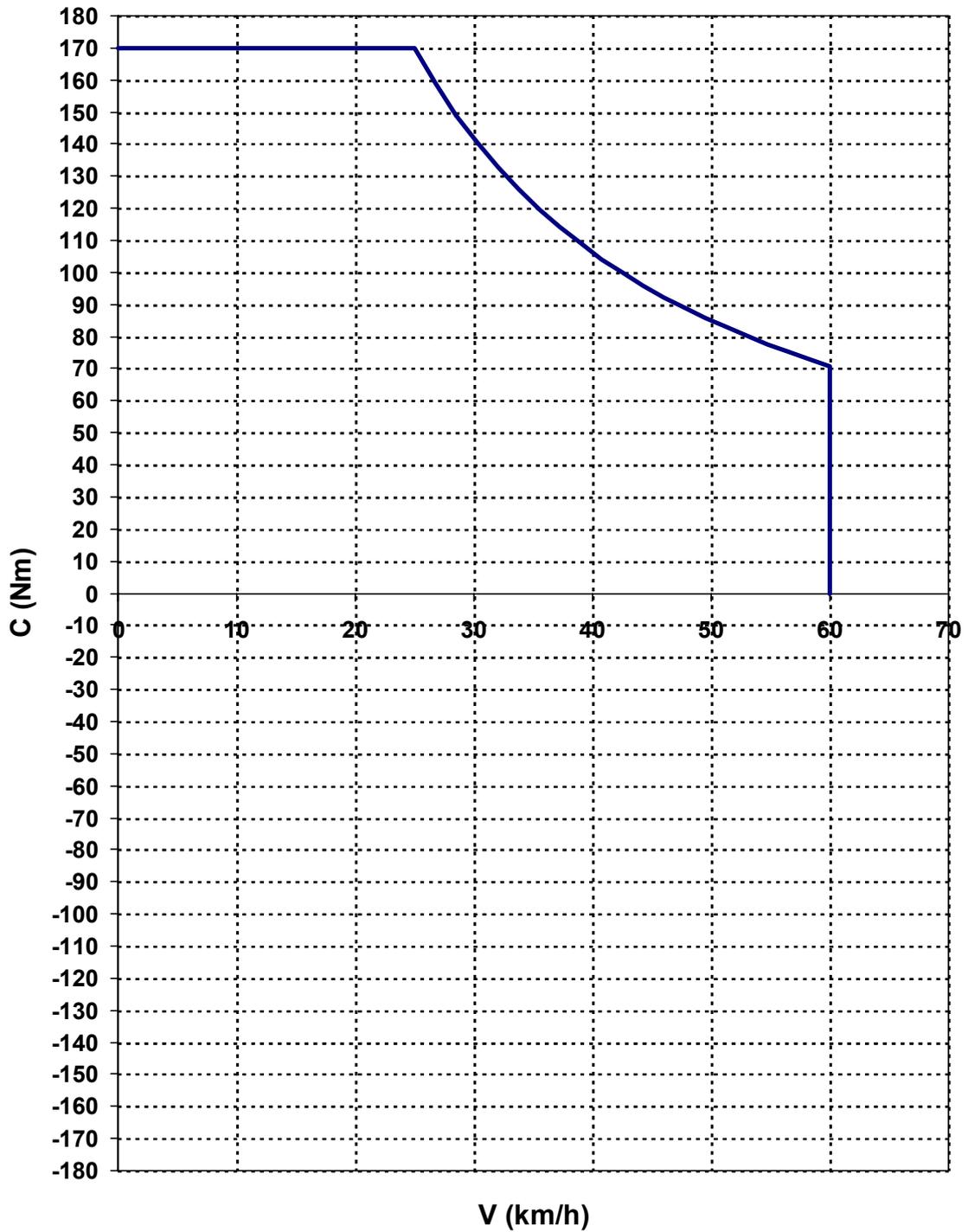
Q.C.44. Donner les expressions de A,B et C en fonction de σ , τ_S et τ_R . Calculer les fonction de transfert $H_M(s)$ et $H_Q(s)$.

Une action sur v_{sd} permet d'agir sur i_M et une action sur v_{sq} permet d'agir sur i_{sq} mais les deux systèmes sont couplés entre eux et les tensions e_d et e_q agissent comme des perturbations. Il est donc nécessaire d'utiliser un module de découplage afin de commander indépendamment i_M et i_{sq} . Le principe du découplage consiste à estimer les grandeurs e_q et e_d et les soustraire aux nouvelles grandeurs de commandes u_{sq} et u_{sd} .

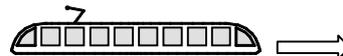
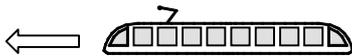
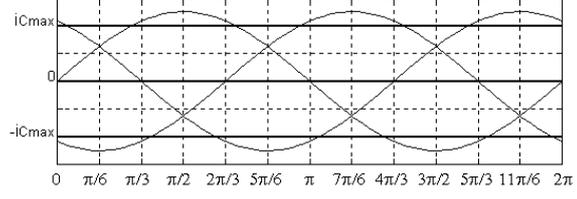
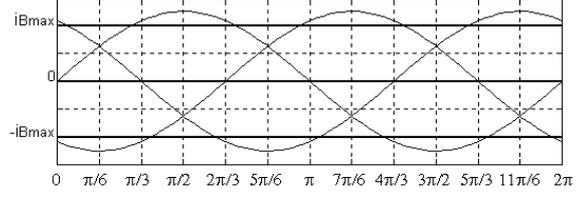
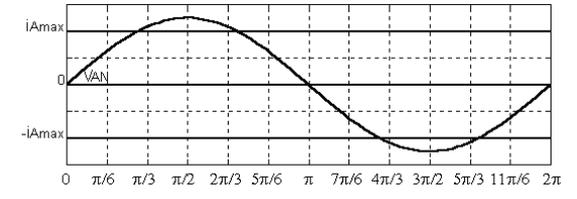
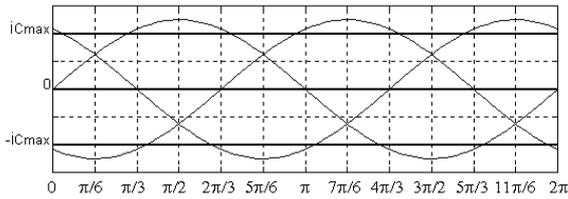
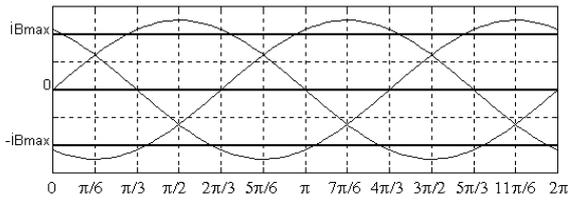
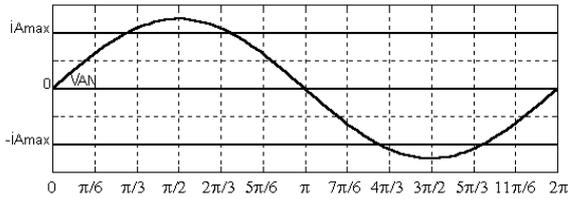
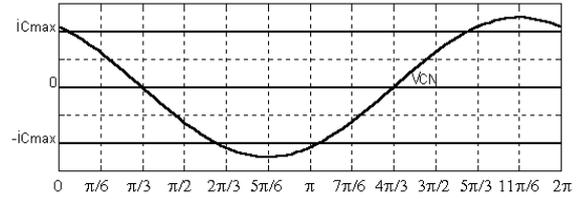
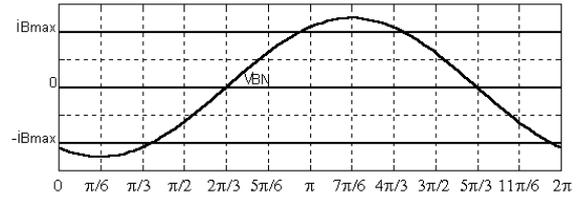
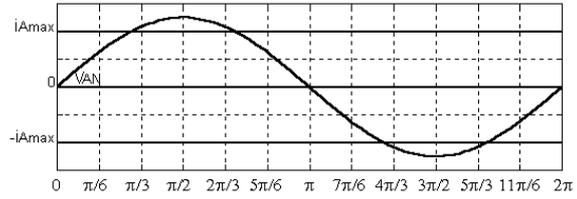
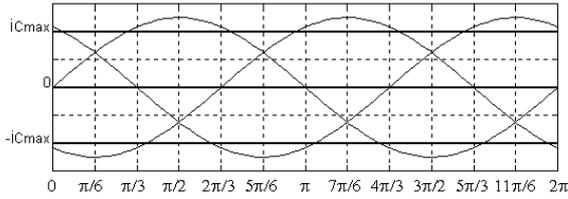
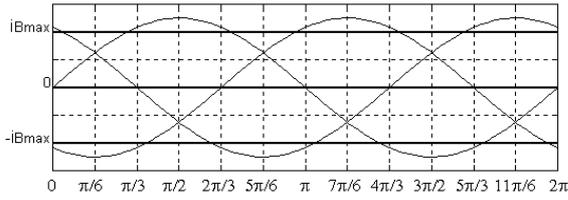
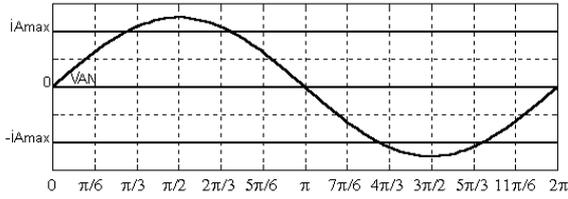
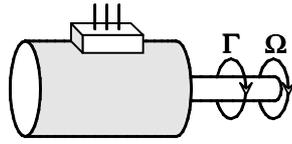
Q.C.45. Compléter sur le document réponse REP.C.3. le schéma fonctionnel du module de découplage.

Q.C.46. Compléter sur le document réponse REP.C.3. le schéma bloc de la commande du couple électromagnétique de la machine asynchrone, les boucles de régulation de i_M et de i_{sq} étant totalement découplées.

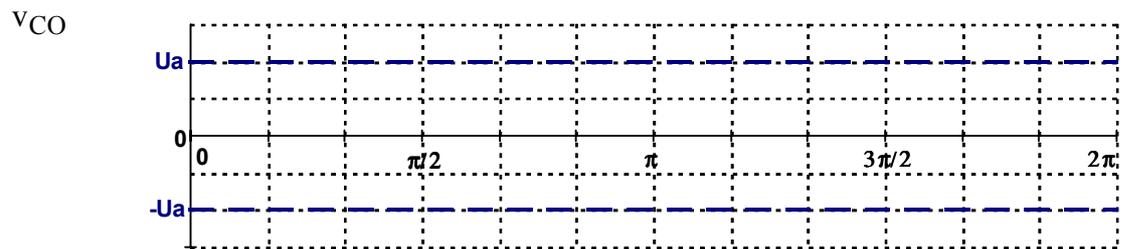
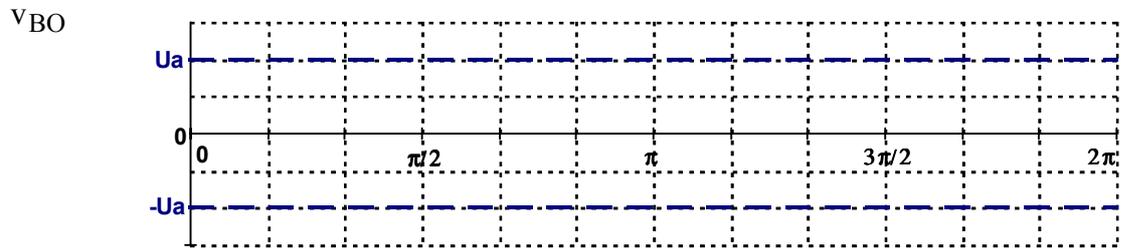
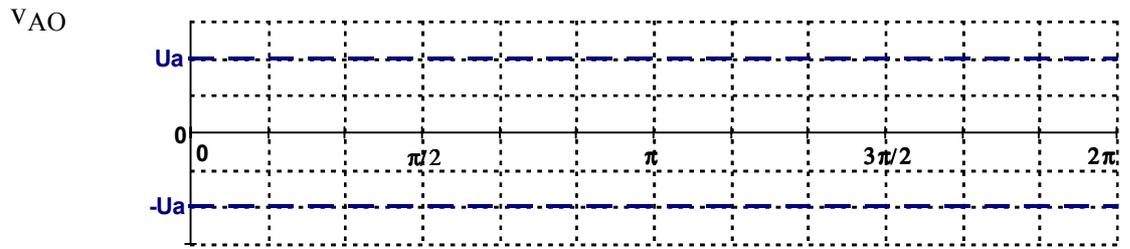
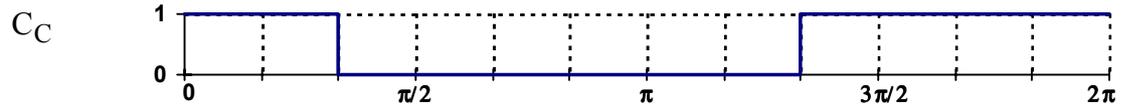
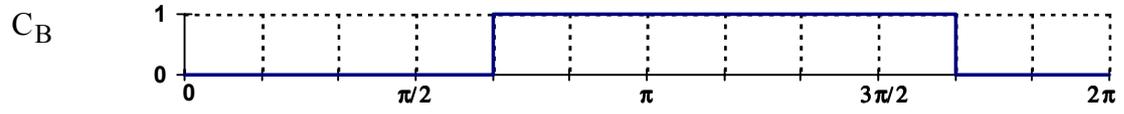
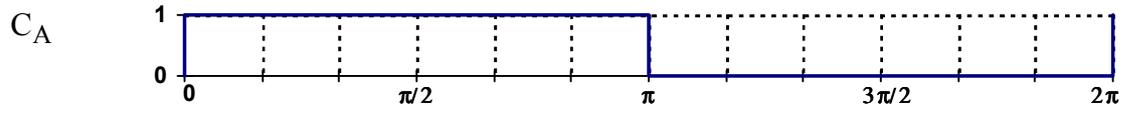
DOCUMENT RÉPONSE REP.A.1
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



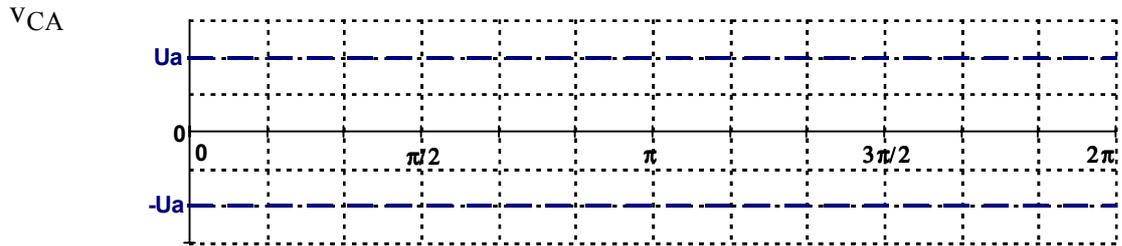
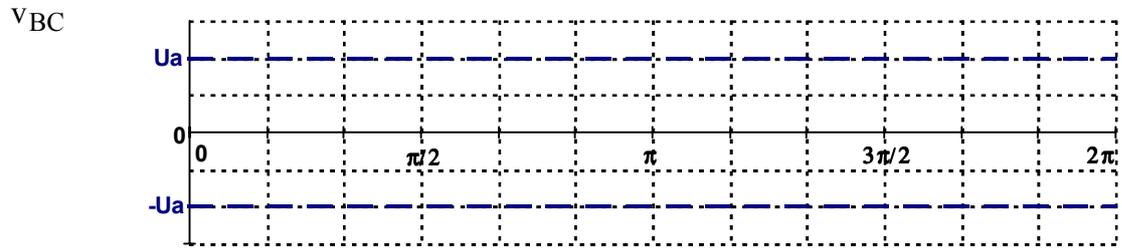
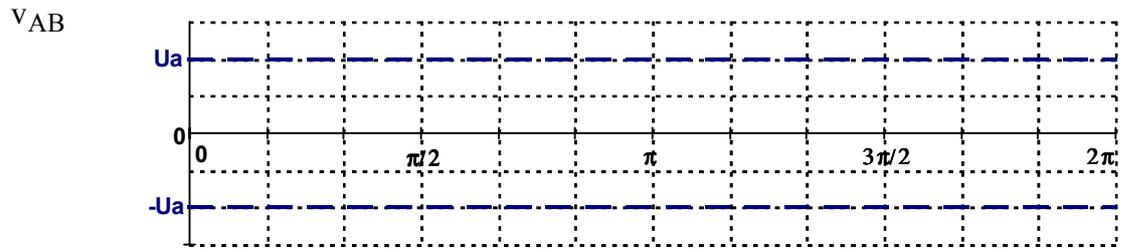
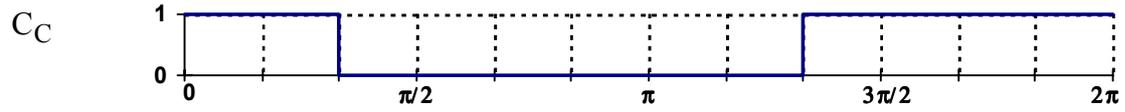
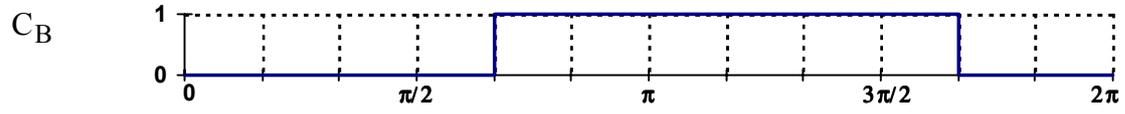
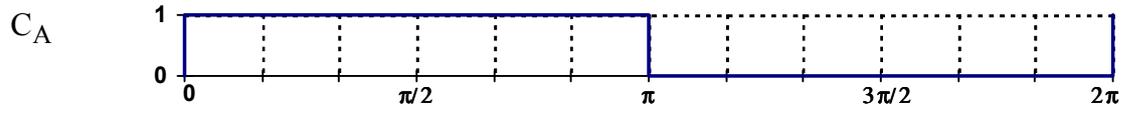
DOCUMENT RÉPONSE REP.A.2
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



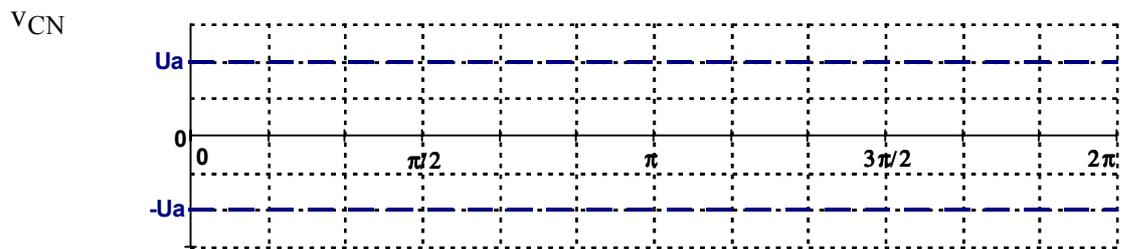
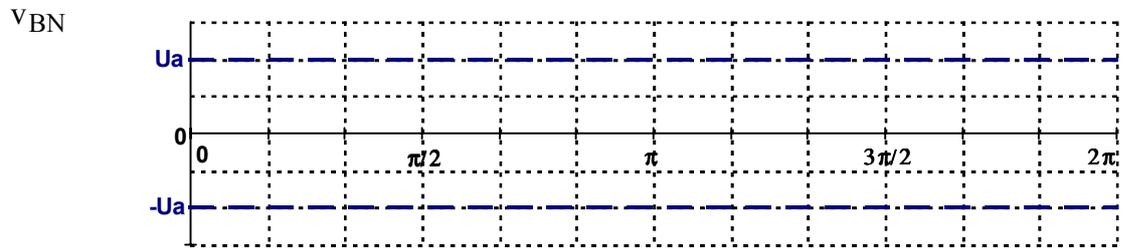
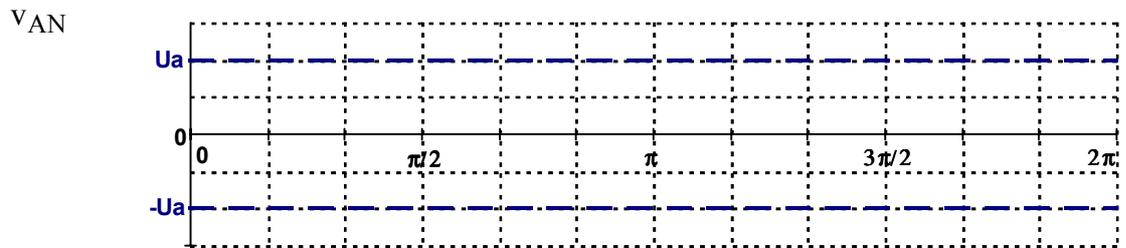
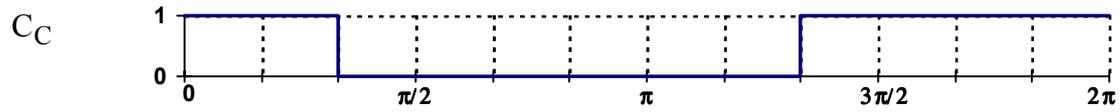
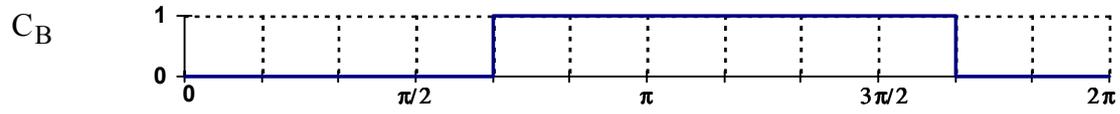
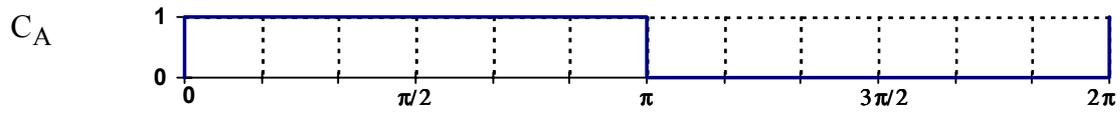
DOCUMENT RÉPONSE REP.B.1
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



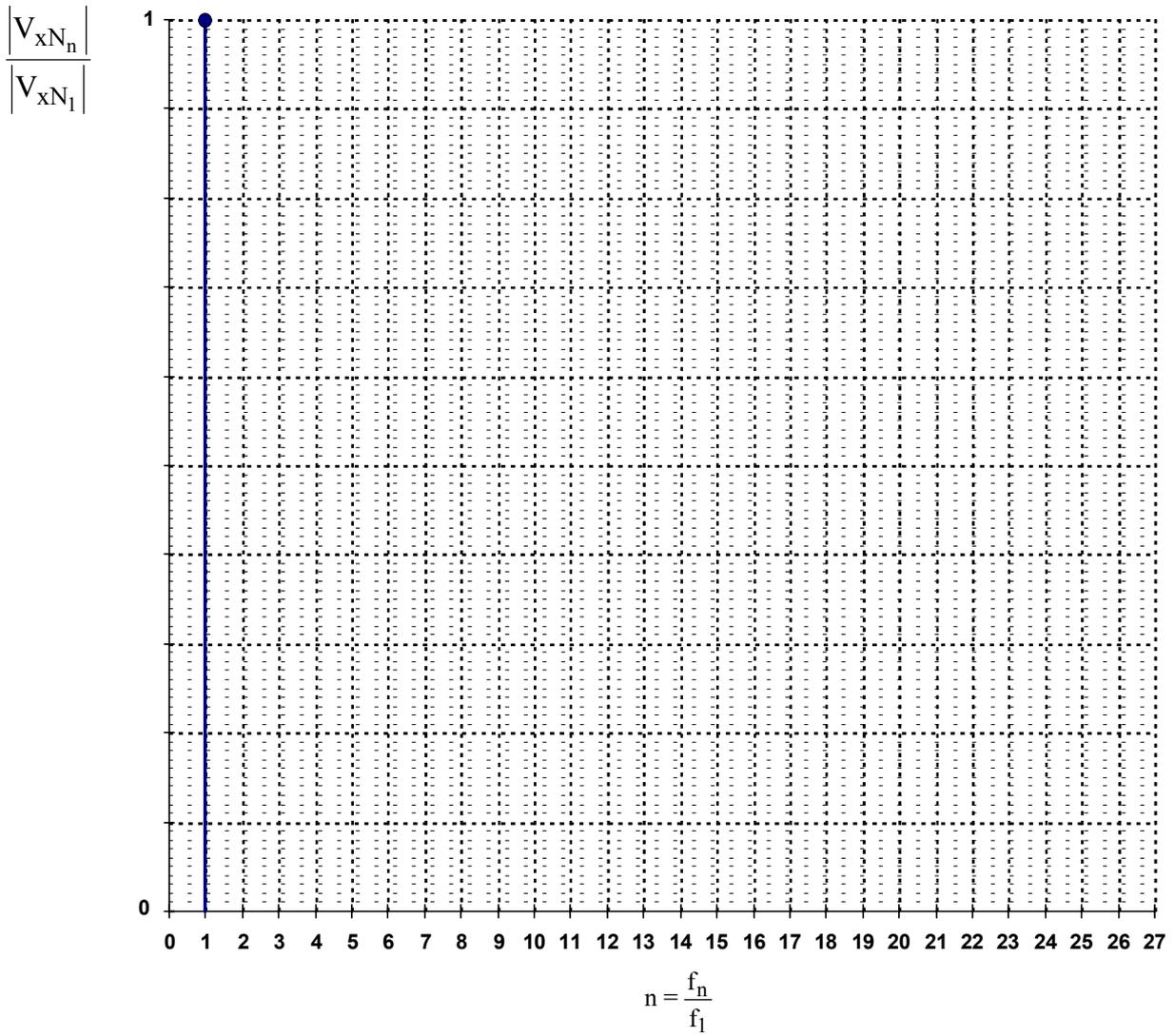
DOCUMENT RÉPONSE REP.B.2
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



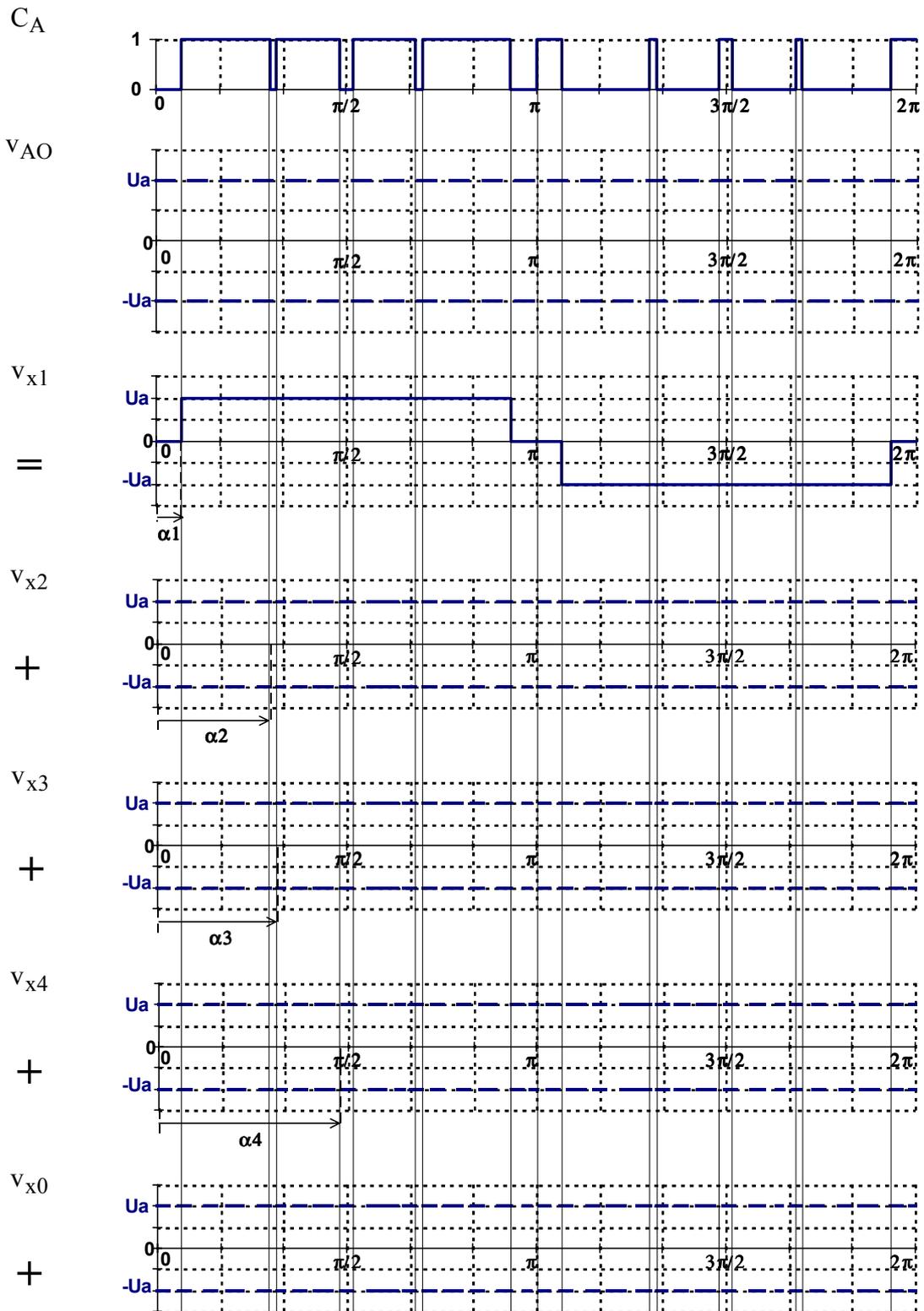
DOCUMENT RÉPONSE REP.B.3
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



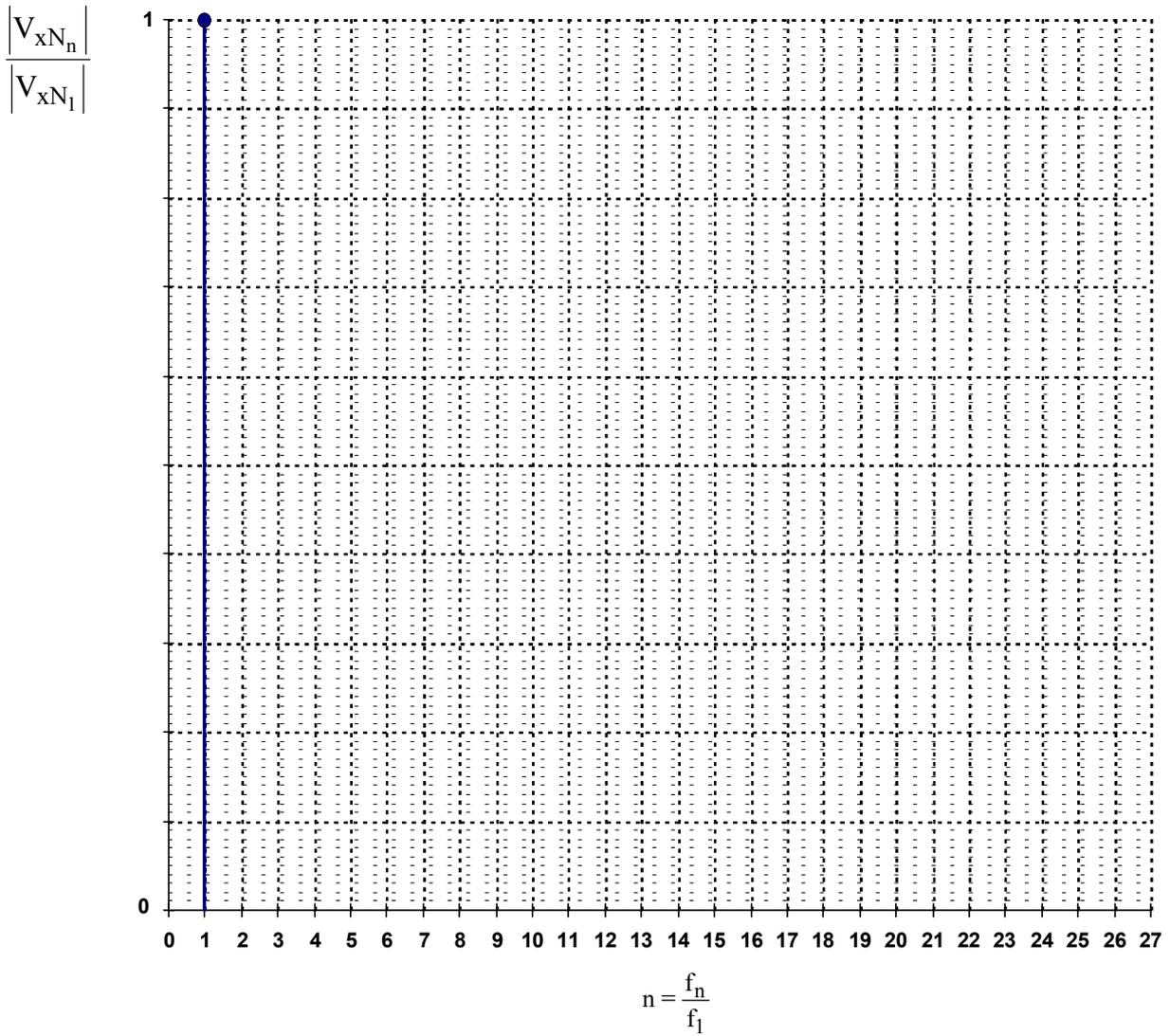
DOCUMENT RÉPONSE REP.B.4
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



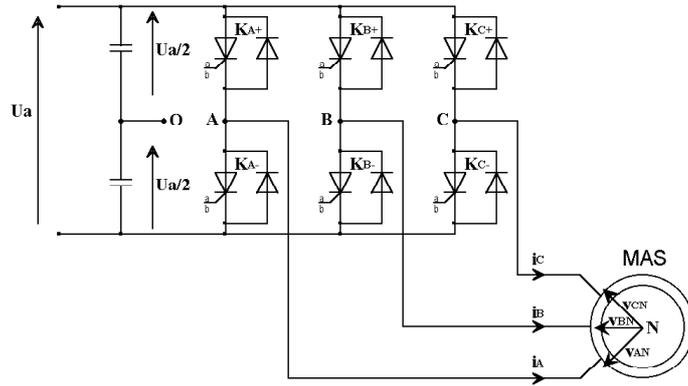
DOCUMENT RÉPONSE REP.B.5
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



DOCUMENT RÉPONSE REP.B.6
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

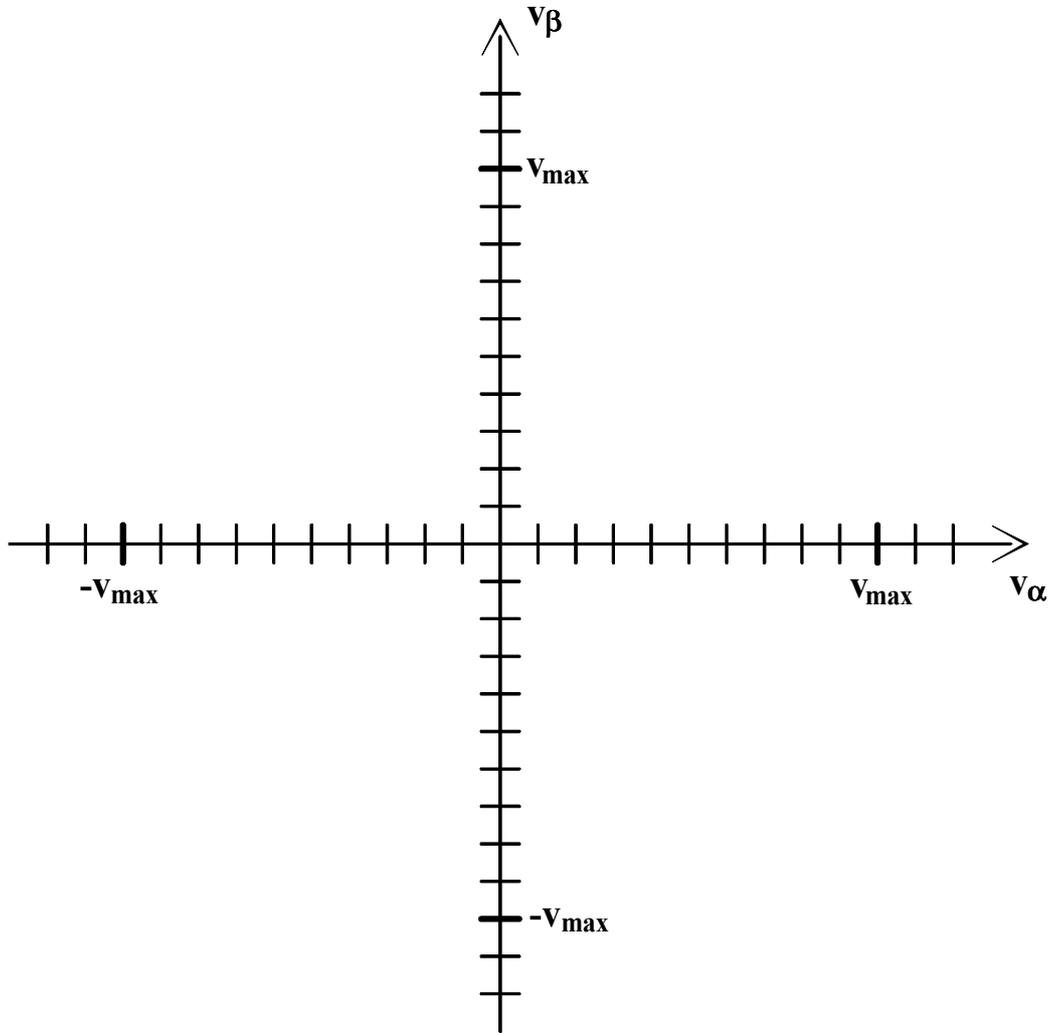


DOCUMENT RÉPONSE REP.B.7
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

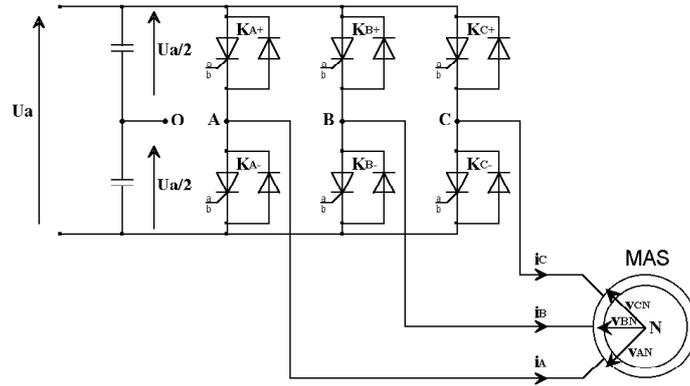


C_A	C_B	C_C	v_{A0}	v_{B0}	v_{C0}	v_{AN}	v_{BN}	v_{CN}
0	0	0						
0	0	1						
0	1	0						
0	1	1						
1	0	0						
1	0	1						
1	1	0						
1	1	1						

DOCUMENT RÉPONSE REP.B.8
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

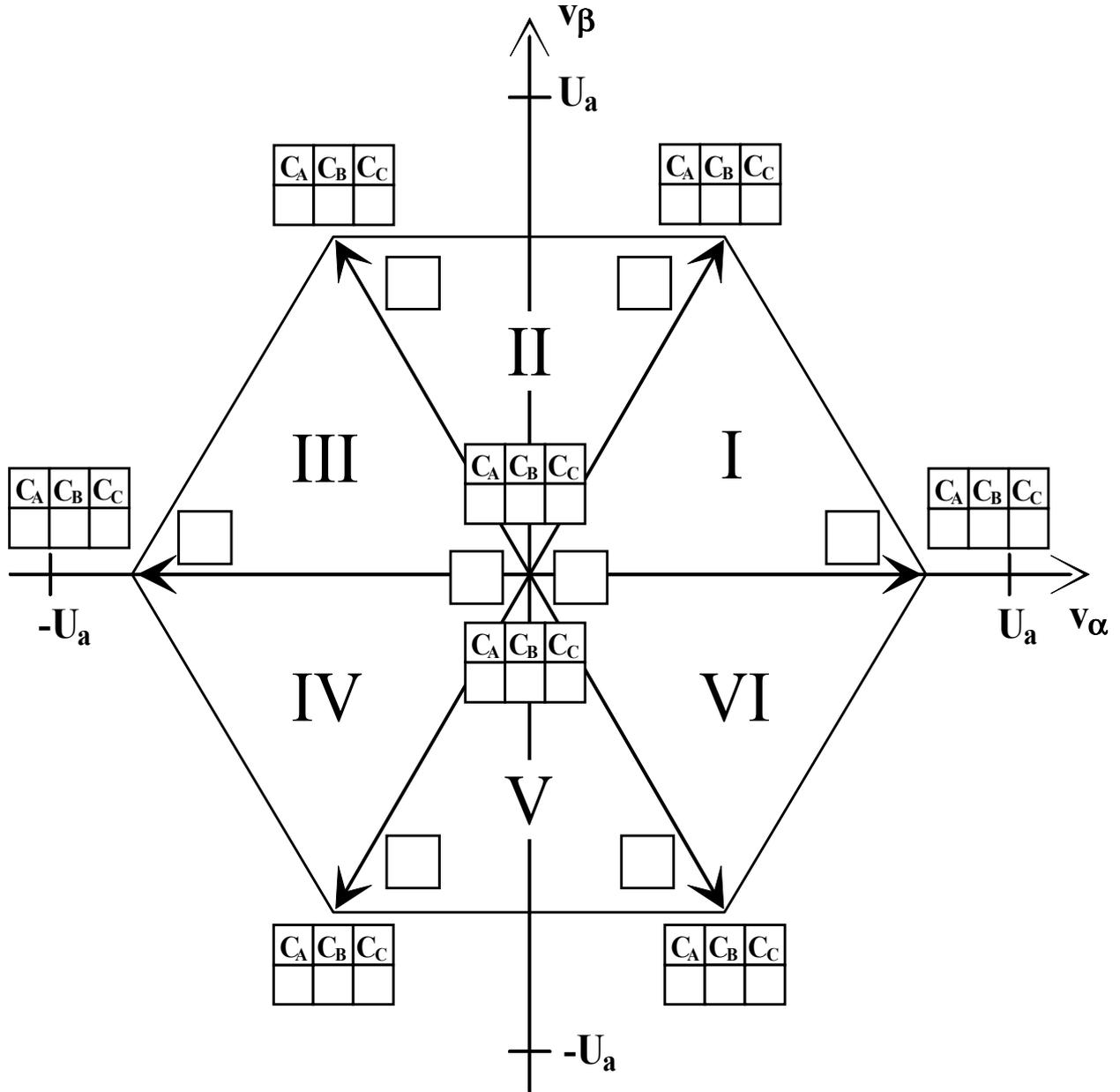


DOCUMENT RÉPONSE REP.B.9
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



C_A	C_B	C_C	v_α	v_β	Nom du vecteur
0	0	0			\vec{V}_0
0	0	1			\vec{V}_5
0	1	0			\vec{V}_3
0	1	1			\vec{V}_4
1	0	0			\vec{V}_1
1	0	1			\vec{V}_6
1	1	0			\vec{V}_2
1	1	1			\vec{V}_7

DOCUMENT RÉPONSE REP.B.10
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



DOCUMENT RÉPONSE REP.B.11
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

	<p><u>SECTEUR I</u></p> $\alpha_i = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$ $\alpha_{i+1} = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$
	<p><u>SECTEUR II</u></p> $\alpha_i = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$ $\alpha_{i+1} = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$
	<p><u>SECTEUR III</u></p> $\alpha_i = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$ $\alpha_{i+1} = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$

DOCUMENT RÉPONSE REP.B.12
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

	<p><u>SECTEUR IV</u></p> $\alpha_i = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$ $\alpha_{i+1} = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$
	<p><u>SECTEUR V</u></p> $\alpha_i = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$ $\alpha_{i+1} = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$
	<p><u>SECTEUR VI</u></p> $\alpha_i = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$ $\alpha_{i+1} = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a}$

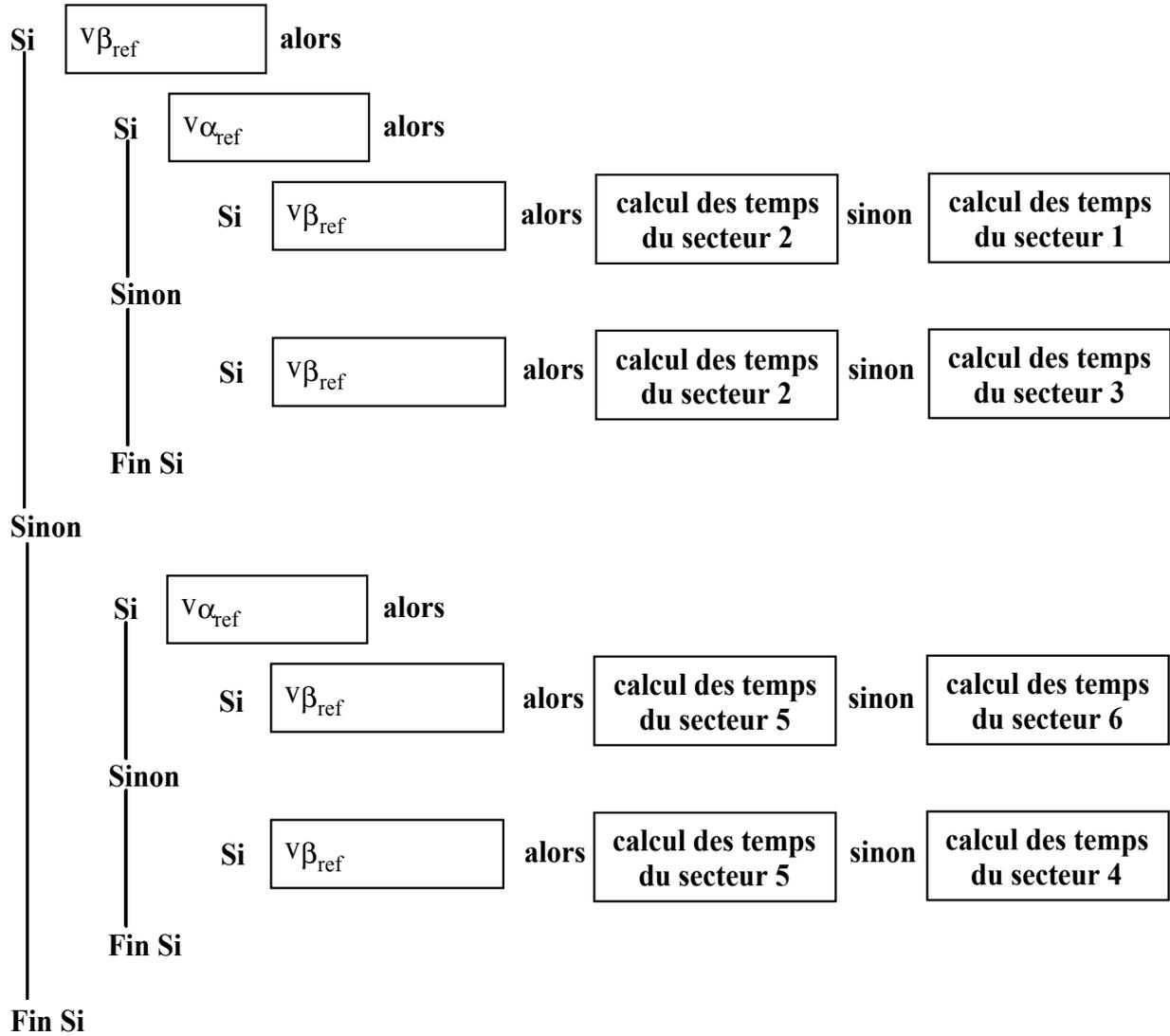
DOCUMENT RÉPONSE REP.B.13
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

<p style="text-align: center;">SECTEUR _____</p>	$T_1 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}} \cdot T_e}{U_a}$ $T_2 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}} \cdot T_e}{U_a}$ $T_0 = \frac{T_e - T_1 - T_2}{4}$
<p style="text-align: center;">SECTEUR _____</p>	$T_2 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}} \cdot T_e}{U_a}$ $T_3 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}} \cdot T_e}{U_a}$ $T_0 = \frac{T_e - T_2 - T_3}{4}$
<p style="text-align: center;">SECTEUR _____</p>	$T_3 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}} \cdot T_e}{U_a}$ $T_4 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}} \cdot T_e}{U_a}$ $T_0 = \frac{T_e - T_3 - T_4}{4}$

DOCUMENT RÉPONSE REP.B.14
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

<p align="center">SECTEUR _____</p>	$T_4 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a} \cdot T_e$ $T_5 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a} \cdot T_e$ $T_0 = \frac{T_e - T_4 - T_5}{4}$
<p align="center">SECTEUR _____</p>	$T_5 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a} \cdot T_e$ $T_6 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a} \cdot T_e$ $T_0 = \frac{T_e - T_5 - T_6}{4}$
<p align="center">SECTEUR _____</p>	$T_6 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a} \cdot T_e$ $T_1 = \frac{\cdot v_{\alpha_{ref}} \cdot v_{\beta_{ref}}}{U_a} \cdot T_e$ $T_0 = \frac{T_e - T_6 - T_1}{4}$

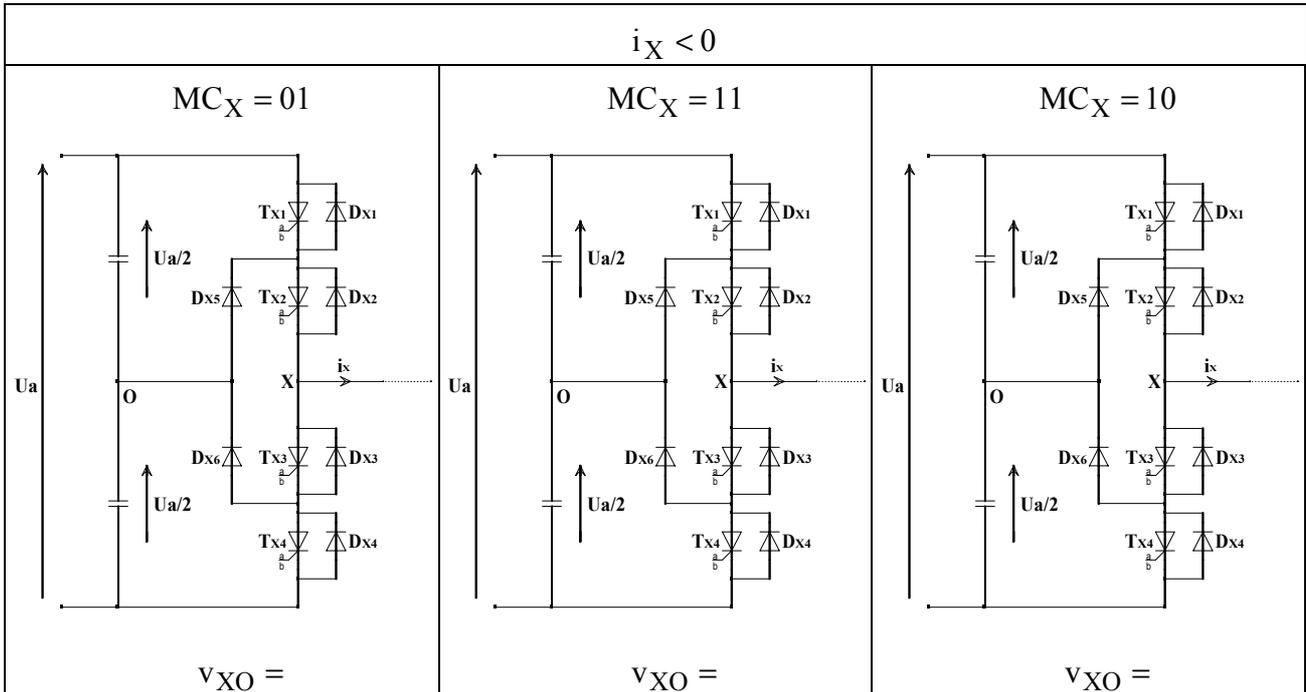
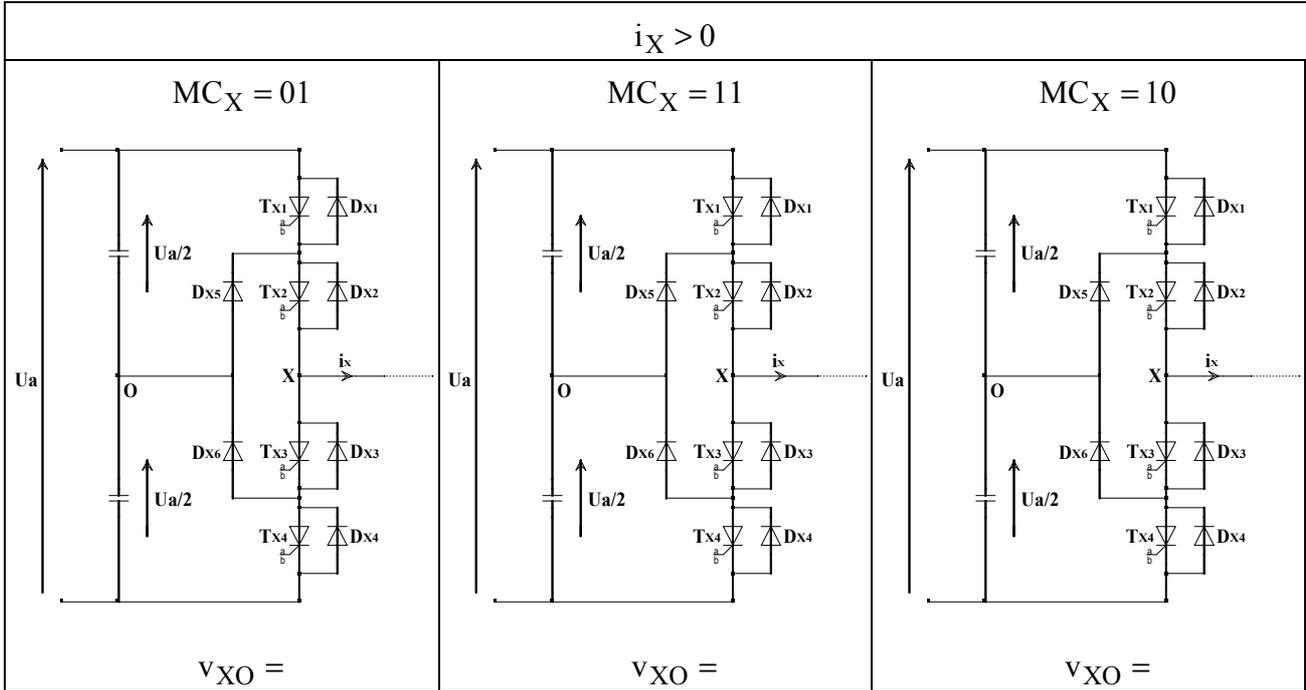
DOCUMENT RÉPONSE REP.B.15
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS



DOCUMENT RÉPONSE REP.B.16
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

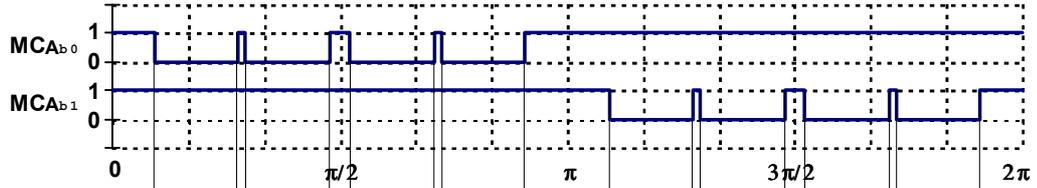
t	$v_{\alpha_{ref}}$	$v_{\beta_{ref}}$	N° Secteur	α_A	α_B	α_C
0						
T/12						
T/6						
T/4						
T/3						
5T/12						
T/2						
7T/12						
2T/3						
3T/4						
5T/6						
T						

DOCUMENT RÉPONSE REP.B.17
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

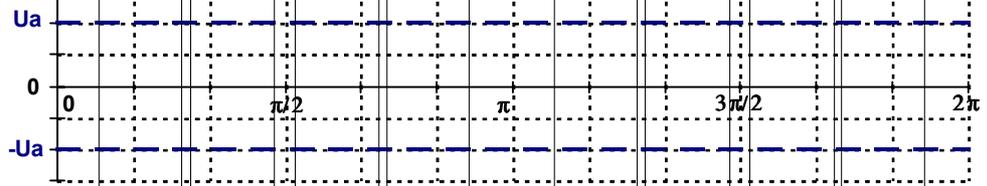


DOCUMENT RÉPONSE REP.B.18
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

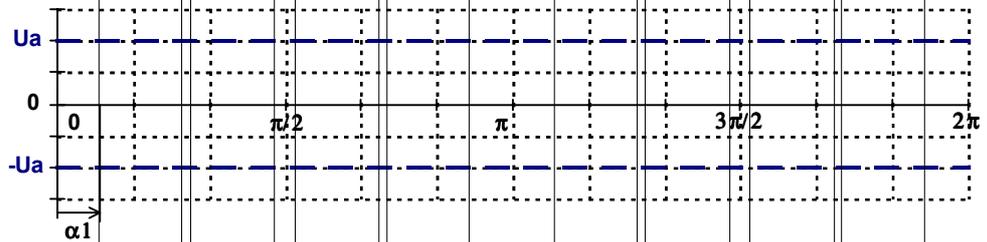
MC_A



V_{AO}



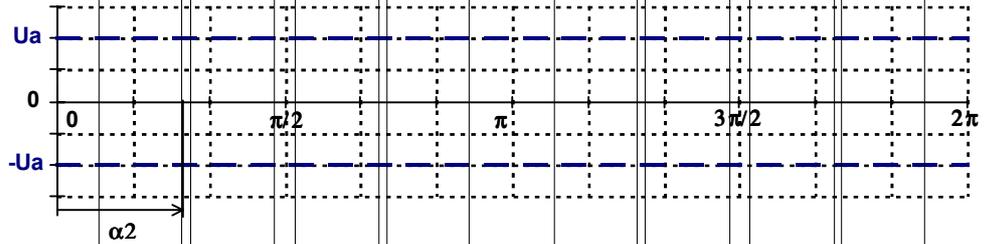
V_{x1}



=

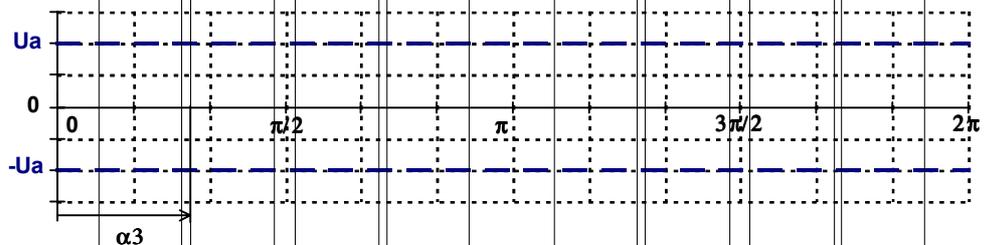
$\frac{\hat{v}_x(s)}{\hat{v}_s(s)} = f(\alpha, s)$

+



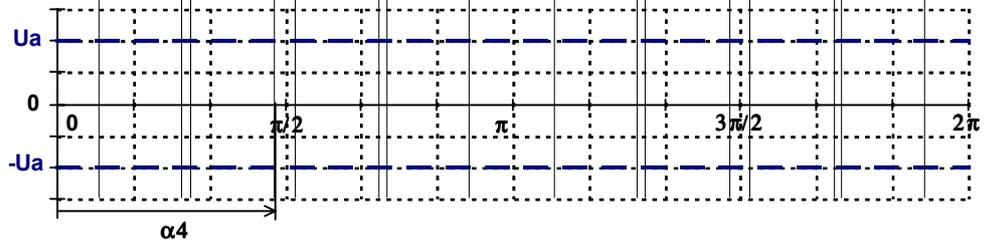
V_{x3}

+

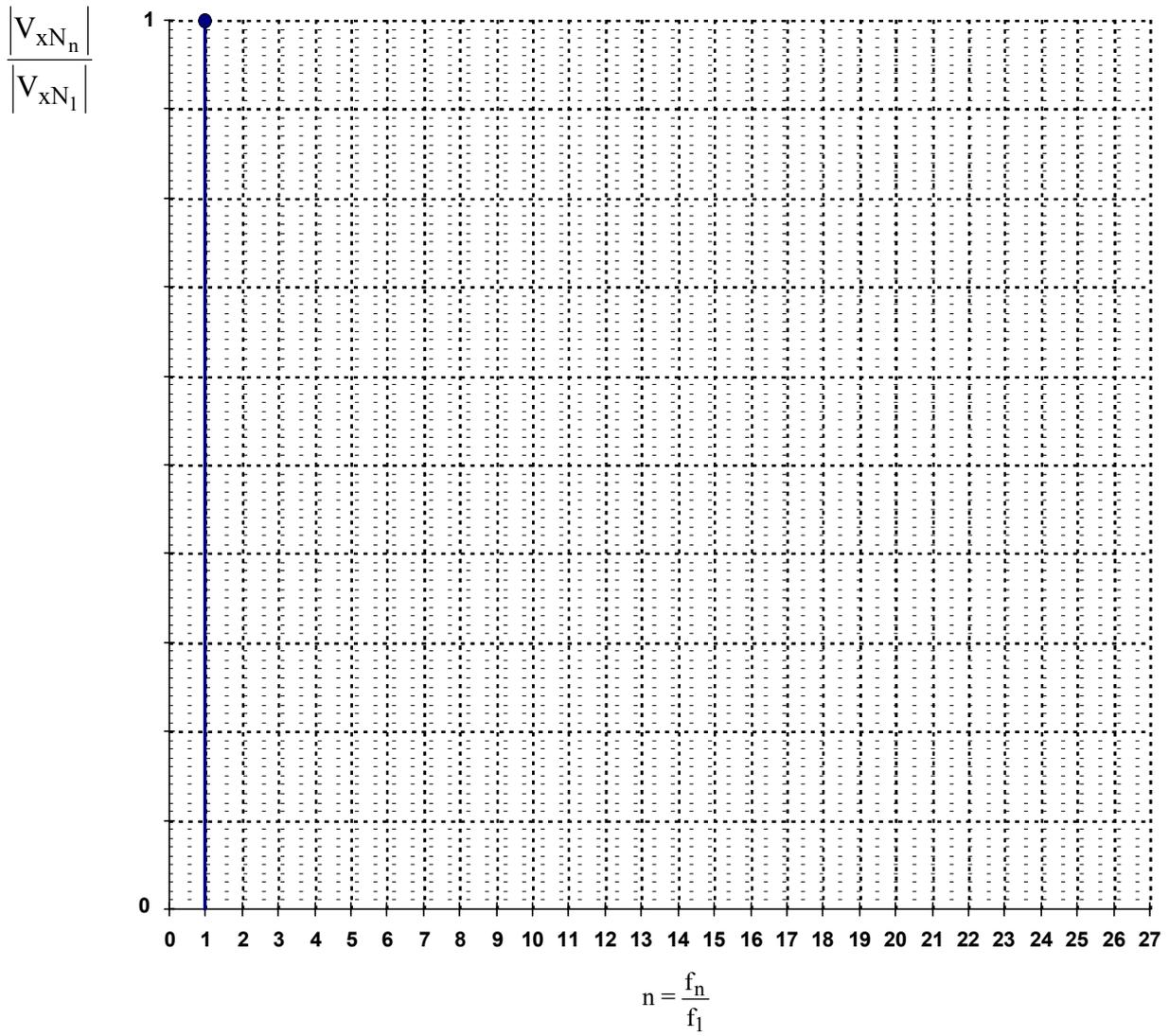


V_{x4}

+

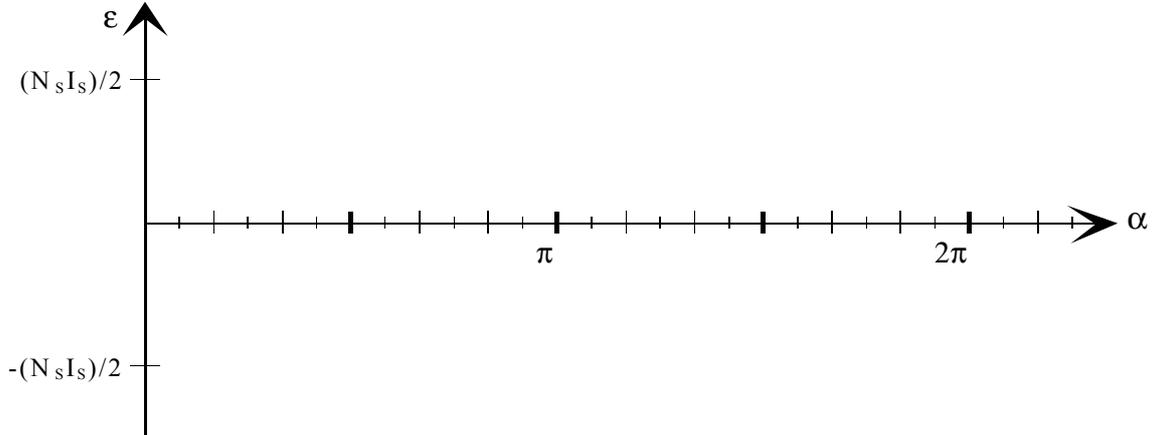


DOCUMENT RÉPONSE REP.B.19

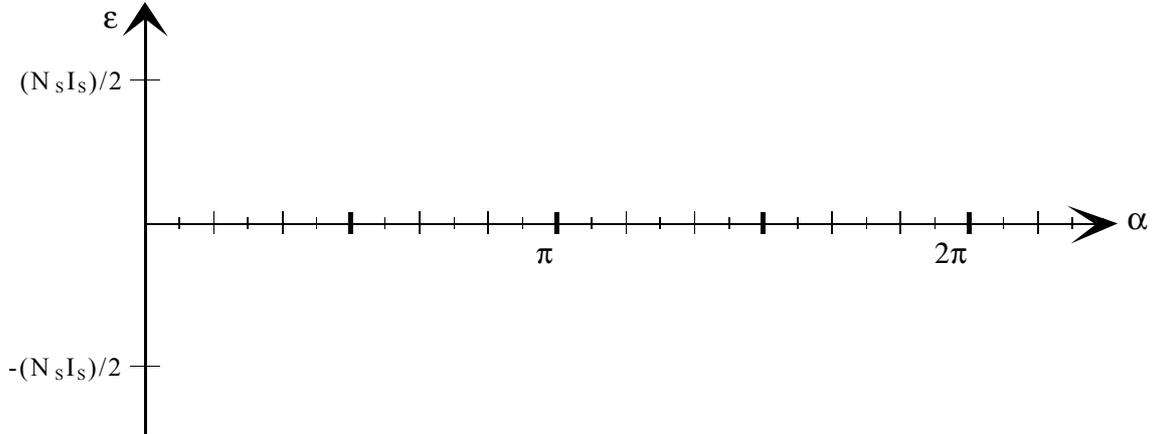


DOCUMENT RÉPONSE REP.C.1
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

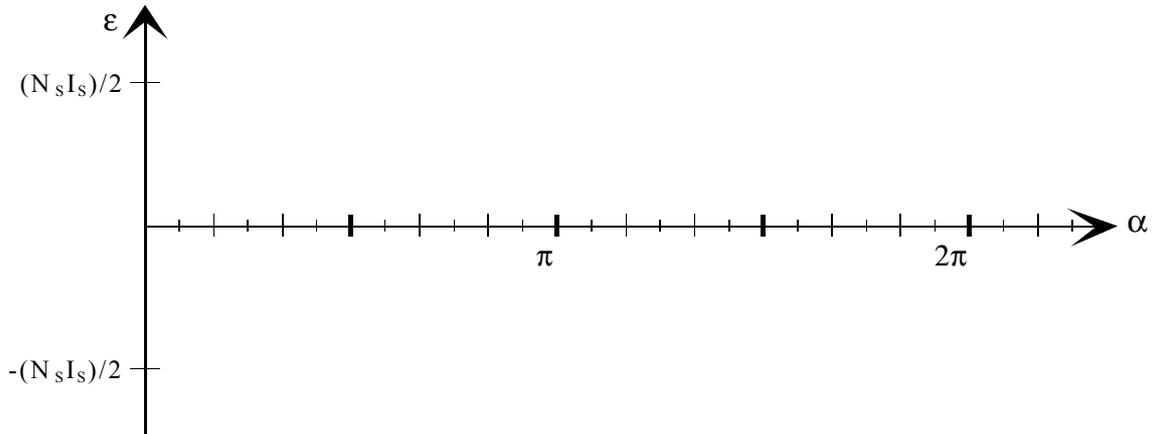
Question Q.C.2.



Question Q.C.9.



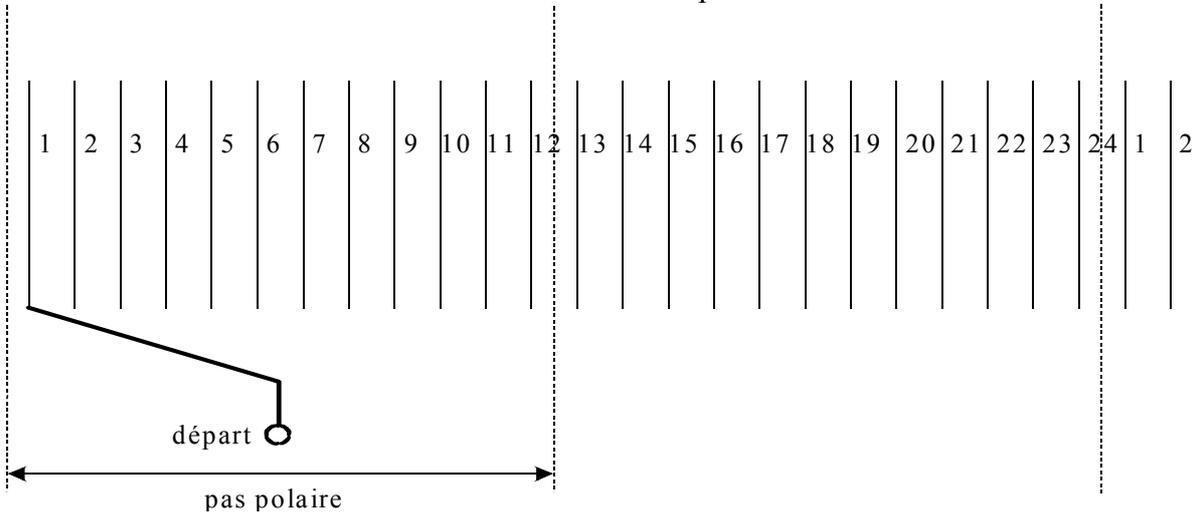
Question Q.C.13.



DOCUMENT RÉPONSE REP.C.2
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

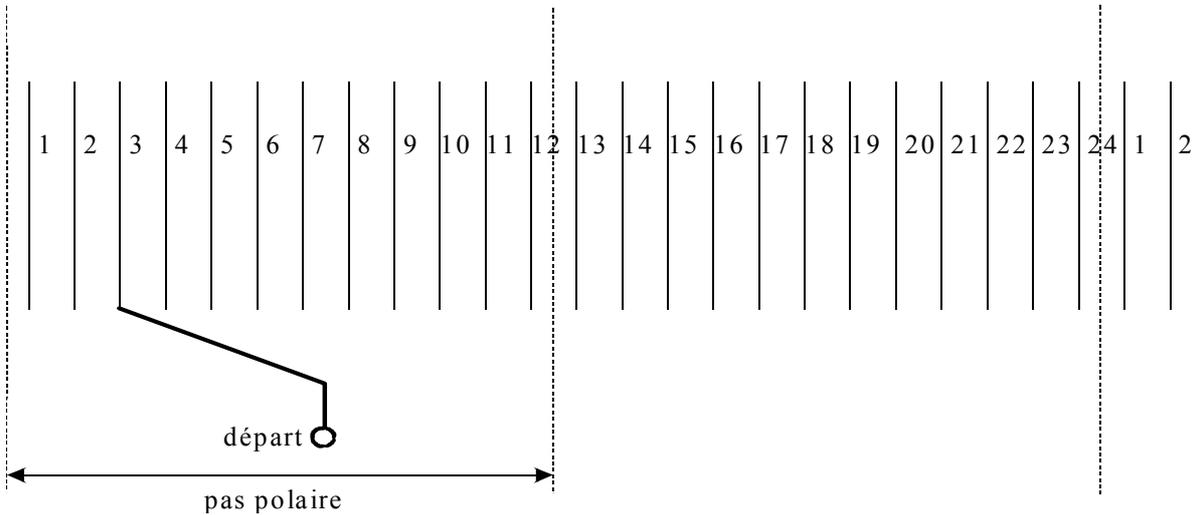
Question Q.C.11.

Enroulement avec sections à pas diamétral.



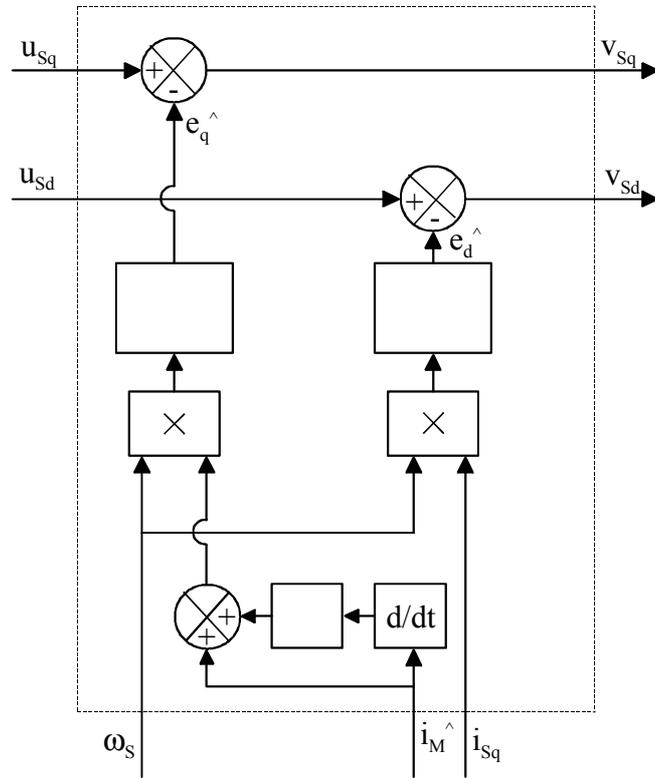
Question Q.C.12.

Enroulement avec sections à pas raccourci $\delta = \frac{5}{6}$.



DOCUMENT RÉPONSE REP.C. 3
A COMPLÉTER AVEC SOIN ET EN UTILISANT DES COULEURS

Question Q.C.45.



Question Q.C.46.

