

ETUDE D'UN VEHICULE TOUT ELECTRIQUE

Recommandations générales

- Vérifier que le sujet comporte 25 pages + 4 pages en annexe + 7 pages réponses.
- L'épreuve de **l'option B** se compose de 6 parties indépendantes. A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. *Le candidat est donc invité à lire rapidement et entièrement l'énoncé avant de commencer à composer afin de bien répartir le temps de composition entre les différentes parties.*
- Les parties A, B, C, D, E et F doivent être rédigées sur des copies séparées en respectant scrupuleusement la numérotation des questions et les notations de l'énoncé. Une rédaction soignée, une écriture lisible et des résultats encadrés seront appréciés par les correcteurs.
- Si au cours de l'épreuve, le candidat détecte ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale par écrit dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant précisément les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Présentation générale du système

Le programme 106 VEDELIC

Initié par la Région Poitou-Charentes, ce programme avait réuni des partenaires régionaux impliqués de longue date dans la voiture électrique : le groupe Heuliez, Saft, Leroy Somer, Sagem et les universités régionales. Afin de concrétiser le fruit de certains de leurs travaux de recherche sur les technologies de batteries et de moteur électrique, l'ensemble des partenaires précédents s'était engagé dans le projet VEDELIC.

Le projet VEDELIC comportait un programme « 106 VEDELIC » qui a abouti à la présentation d'une Peugeot 106 équipée d'une nouvelle chaîne de traction composée d'un système de batterie lithium-ion et d'un groupe motopropulseur électrique synchrone à aimants permanents.

Performances mécaniques :

- Vitesse maximale supérieure à 110 km/h
- Accélérations
 - de 0 à 50 km/h en 5,3 secondes
 - de 50 à 80 km/h en 7 secondes
- Autonomie 200 km
- Puissance nominale : 15 kW (en régime permanent)
- Puissance maximale : 30 kW (limitée dans le temps)



<http://www.peugeot.fr/>

Remerciements :

L'auteur remercie les sociétés **Moteurs Leroy Somer**, **Saft** et **Sagem** pour la fourniture des données numériques qui ont permis la réalisation de ce sujet.

Sommaire

Notations utilisées.....	3
Liste des principales grandeurs.....	3
Caractéristiques de la machine synchrone.....	4
Hypothèses simplificatrices – conventions de signe.....	4
Partie A : Etude de la Mécanique.....	5
Calculs préliminaires.....	6
Calcul des performances du véhicule à l'accélération et à sa vitesse maximum.....	6
Partie B : Calcul d'autonomie du véhicule.....	8
Description de la batterie :.....	8
Partie C : Etude du Bobinage de la machine synchrone.....	10
Partie D : La Machine synchrone et son alimentation.....	11
Schéma de principe de l'alimentation de la machine synchrone.....	11
Modélisation de la machine.....	12
Identification des paramètres du modèle.....	12
Caractérisation du moteur avec son alimentation et sa stratégie de commande.....	13
Onduleur.....	14
Stratégie de commande de l'onduleur.....	15
Pertes dans l'onduleur.....	17
Partie E : Etude thermique.....	19
Modélisation thermique.....	19
Etude du refroidissement de l'onduleur.....	21
Etude du refroidissement du moteur.....	21
Partie F : Etude de la commande.....	22
Structure de commande "ab".....	22
Structure de commande "dq".....	23
ANNEXE.....	A1 à A4

Notations utilisées

- lettre minuscule: valeur électrique instantanée
- lettre majuscule soulignée: grandeur complexe (tension, courant, impédance)
- lettre majuscule: valeur constante ou valeur efficace ou module d'une grandeur complexe ($V=|V|$).
- la notation $\langle x \rangle$ désigne la valeur moyenne de la variable x (temporelle, efficace ou crête) sur une période de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions).
- la notation \hat{X} désigne la valeur crête de la variable.

Liste des principales grandeurs

- C_m , C_n : Couples totaux ramenés sur l'axe des roues respectivement maximal et nominal exprimés en N.m
- C_{el} : Couple électromagnétique sur l'axe de la machine synchrone, exprimé en N.m
- C_u : Couple utile sur l'axe de la machine synchrone, exprimé en N.m
- e : largeur de l'entrefer
- g : la gravitation de la terre ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
- i : indice valant a, b ou c
- i_a , i_b et i_c : courants dans le repère fixe (a, b et c) exprimés en A
- i_d et i_q : courants dans le repère tournant de Park (d et q) exprimés en A
- I_o : courant continu à l'entrée de l'alimentation continue de l'onduleur exprimé en A
- j : opérateur complexe
- F : la fréquence des courants et des tensions exprimée en Hz
- H_e : champ magnétique dans l'entrefer de la machine exprimé en A-Tours/m
- L_{BE} : Inductance de Behn Eschenburg exprimée en H
- N_r , Ω_r : vitesse de rotation des roues exprimée respectivement en t/mn et en rd/s
- N , Ω : vitesse de l'arbre de la machine synchrone exprimée respectivement en t/mn et en rd/s
- P_{tc} : Puissance totale de charge (frottements), exprimée en W (sur l'axe des roues)
- P_o : Puissance à l'entrée de l'onduleur ou sortie des batteries, exprimée en W
- P_{abs} : Puissance absorbée à l'entrée de la machine synchrone, exprimée en W

- P_u : Puissance utile sur l'axe de la machine synchrone, exprimée en W
- P_{dl} : Puissance perdue en conduction dans un IGBT exprimée en W
- P_{dd} : Puissance perdue en conduction dans une diode exprimée en W
- P_{mr} , P_{nr} : Puissances disponibles sur l'axe des roues respectivement maximale et nominale exprimées en W
- R : Résistance d'une phase exprimée en Ω
- R_d : Résistance dynamique d'un IGBT à l'état passant
- R_{dd} : Résistance dynamique d'une diode à l'état passant
- $R_{th(j-c)}$: Résistance thermique jonction – boîtier du module IGBT et Diodes exprimée en $^{\circ}C/W$
- $R_{th(c-f)}$: Résistance thermique boîtier – plaque du module IGBT et Diodes exprimée en $^{\circ}C/W$
- $R_{th(pf-w)}$: Résistance thermique plaque - eau de la plaque froide exprimée en $^{\circ}C/W$
- $R_{th(w-a)}$: Résistance thermique eau - air de l'échangeur exprimée en $^{\circ}C/W$
- $R_{th(m-w)}$: Résistance thermique culasse - eau du moteur exprimée en $^{\circ}C/W$
- R_r : rayon d'une roue exprimé en m
- u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} : tensions composées entre les bornes de la machine exprimées en V
- v_a , v_b , v_c : tensions simples aux bornes de la machine exprimées en V
- V_o : demi-tension de l'alimentation continue de l'onduleur exprimée en V
- v_{IGBT} : Chute de tension aux bornes d'un IGBT à l'état passant exprimée en V
- v_{diode} : Chute de tension aux bornes d'une diode à l'état passant exprimée en V
- V_{ol} : Tension de seuil aux bornes d'un IGBT à l'état passant exprimée en V
- V_{od} : Tension de seuil aux bornes d'une diode à l'état passant exprimée en V
- V_v : vitesse du véhicule en m/s ou en km/h
- α : déphasage entre la position des champs statorique et rotorique
- α_{TMLI} : rapport cyclique de la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI)
- β_a , β_b et β_c : grandeurs de commande de l'onduleur dans le repère fixe (a, b et c)
- β_d et β_q : grandeurs de commande de l'onduleur dans le repère tournant de Park (d et q)
- β_e : pas dentaire ramené sur l'échelle électrique exprimé en $^{\circ}$
- φ : déphasage entre le courant et la tension d'une phase de la machine
- θ : position du champ rotorique
- θ_C : température des boîtiers des modules IGBT et Diodes exprimée en $^{\circ}C$
- θ_{J_I} et θ_{J_D} : températures des jonctions des IGBT et diodes exprimées en $^{\circ}C$
- θ_{pf} : température de la plaque froide exprimée en $^{\circ}C$
- v : déphasage entre le courant et la fem d'une phase de la machine (angle d'autopilotage)
- ω : pulsation des courants et des tensions exprimée en rd/s
- Ω : vitesse de l'arbre de la machine synchrone exprimée en rd/s
- Ω_r : vitesse de rotation des roues exprimée en rd/s

Caractéristiques de la machine synchrone

Ces caractéristiques sont définies par le constructeur lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur.

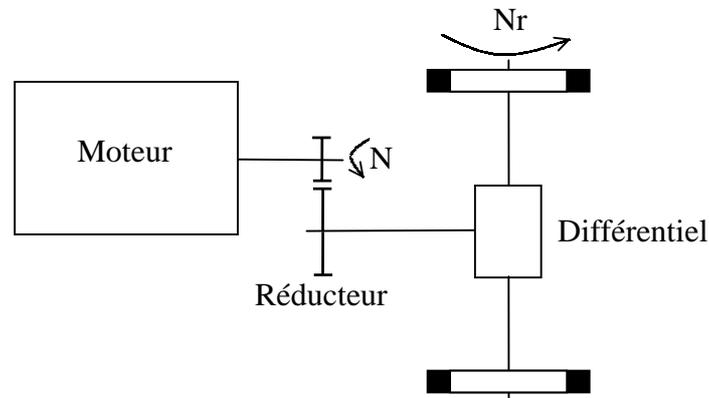
- 8 pôles, rotor à aimants
- puissance mécanique nominale : $P_{UN}=15$ kW

Hypothèses simplificatrices – conventions de signe

- Pour simplifier l'étude analytique, les pertes mécaniques de la machine seront supposées négligeables. Pour les pertes mécaniques du différentiel + réducteur, on considérera le rendement de cet ensemble constant et égal à 98 %.
- Toutes les puissances seront comptées positivement lorsqu'elles correspondent à de l'énergie prise sur la batterie ce qui correspond aux notations habituelles lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur. Ainsi, lors d'un freinage électrique, la machine fournit de l'énergie à la batterie, la puissance correspondante sera négative.

Partie A : Etude de la Mécanique

La structure de la chaîne cinématique est composée du moteur électrique + d'un réducteur mécanique à pignons et d'un différentiel comportant deux sorties d'arbres pour les deux roues motrices.



- Poids du véhicule : 1200 kg
- Le coefficient de pénétration dans l'air du véhicule : $SCx = 15 \text{ N}/(\text{m/s})$
- Diamètre des roues : 0,52 m
- Rapport de réduction de la vitesse de rotation des roues par rapport à la vitesse de rotation de l'arbre du moteur (différentiel + réducteur) : $7,2 = \frac{N}{N_r}$
- Rendement du différentiel + réducteur dans le sens moteur-roue et l'inverse (roue-moteur) : 0,98
- Les lois : couple maximal et couple nominal du moteur en fonction de la vitesse de rotation des roues sont données par la figure A.1.

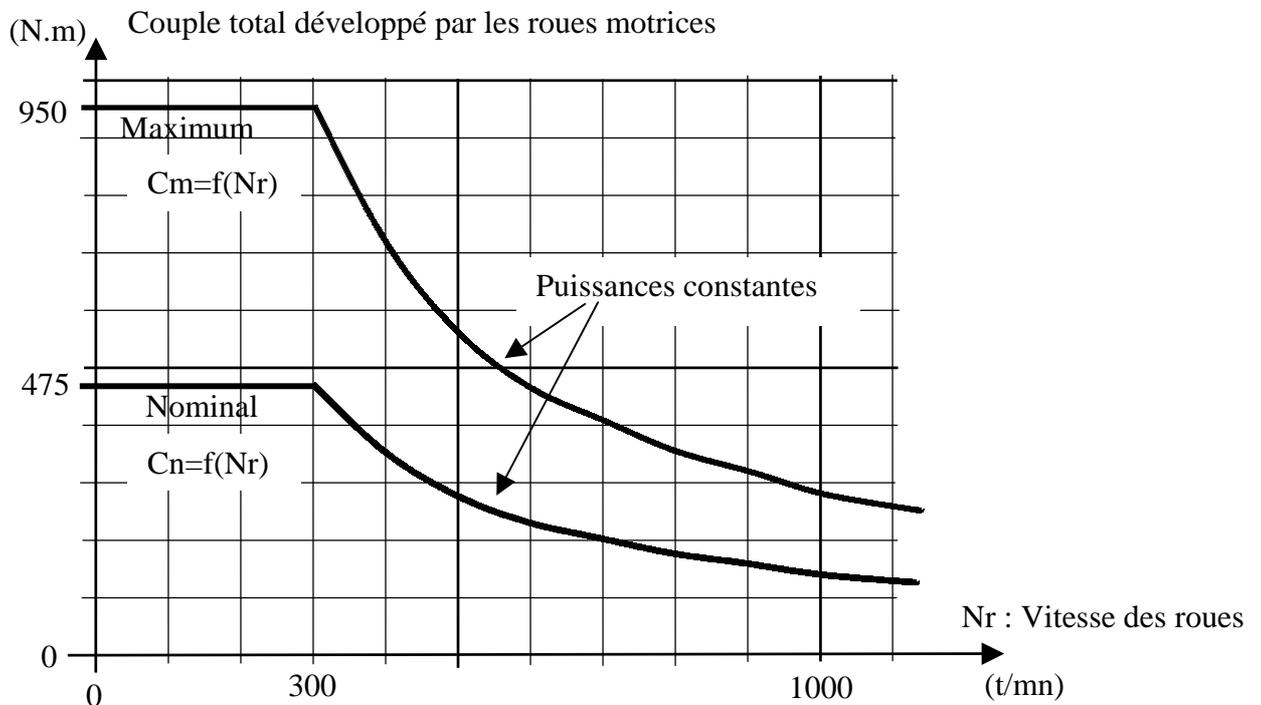


Figure A.1

Calculs préliminaires

- Q.A.1.** Pour la vitesse des roues supérieures à 300 t/mn, calculer la valeur numérique de la puissance maximale (P_{mr}) développée par les roues motrices.
- Q.A.2.** Pour la vitesse des roues supérieures à 300 t/mn, calculer la valeur numérique de la puissance nominale (P_{nr}) développée par les roues motrices.
- Q.A.3.** Pour la vitesse des roues égales à 300 t/mn, calculer la valeur numérique de la vitesse du véhicule (V_v) (en km/h et en m/s).
- Q.A.4.** Pour la vitesse du véhicule égale à 50 km/h, calculer la valeur numérique de la vitesse des roues (N_r).
- Q.A.5.** Pour la vitesse du véhicule égale à 50 km/h, calculer la valeur numérique du couple total maximum (C_m) développé par les roues motrices.

Calcul des performances du véhicule à l'accélération et à sa vitesse maximum.

On désire connaître les performances d'accélération du véhicule selon la loi couple–vitesse donnée.

Dans tous les cas, on considère que le véhicule circule sur une route parfaitement horizontale, et on négligera tous les frottements sauf la force de pénétration dans l'air pour les vitesses supérieures à 50 km/h.

Rappel :

- L'amplitude de la force de pénétration dans l'air est proportionnelle à la vitesse du véhicule : $|F| = SC_x \cdot V_v$ (V_v : vitesse du véhicule en m/s).
- $J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = \text{couple moteur} - \text{couple résistant}$ (Equation dynamique d'un arbre tournant rigide)
- $J = M \cdot R_r^2$ (J : Inertie totale ramenée sur l'arbre, M = Masse véhicule, R_r : rayon d'une roue)
- $V_v = R_r \cdot \Omega_r$ (Ω_r : vitesse de rotation des roues en rd/s).

Q.A.6. Exprimer de façon littérale l'équation dynamique complète du véhicule
(en fonction de $\frac{dV_v}{dt}$, V_v , M , C_m , Sc_x , R_r).

Q.A.7. Calculer le temps d'accélération pour que le véhicule atteigne la vitesse de 50 km/h à partir de l'arrêt en appliquant le couple $C_m = f(N_r)$ précédemment défini (négliger la force de pénétration dans l'air).

Attention le couple C_m ne reste pas constant pendant tout ce temps. Il faut décomposer ce temps en deux. Les questions suivantes vous aident à trouver la réponse.

a. Calculer le temps d'accélération (ta_1) pour que les roues atteignent la vitesse de 300t/mn à partir de l'arrêt en appliquant le couple $C_m = f(N_r)$.

b. Calculer le temps d'accélération (ta_2) pour que le véhicule atteigne la vitesse de 50 km/h à partir de la vitesse des roues de 300t/mn en appliquant le couple $C_m = f(N_r)$.

c. A partir des deux réponses précédentes, en déduire le temps d'accélération (ta_1+ta_2) pour que le véhicule atteigne la vitesse de 50 km/h à partir de l'arrêt.

Q.A.8. Calculer le temps d'accélération pour que le véhicule atteigne la vitesse de 80 km/h à partir de la vitesse de 50 km/h en appliquant le couple $C_m = f(N_r)$ précédemment défini (sans négliger la force de pénétration dans l'air).

Q.A.9. Calculer la distance faite par le véhicule pour atteindre la vitesse de 50 km/h à partir de l'arrêt en appliquant le couple $C_m = f(N_r)$ précédemment défini (négliger la force de pénétration dans l'air) (**utiliser les résultats de la question Q.A.7.**)

Attention le couple C_m ne reste pas constant pendant tout ce temps. Il faut décomposer cette distance en deux. Les questions suivantes vous aident à trouver la réponse.

a. Calculer la distance (d_1) fait par le véhicule lorsque les roues atteignent la vitesse de 300t/mn à partir de l'arrêt en appliquant le couple $C_m = f(N_r)$.

b. Calculer la distance (d_2) fait par le véhicule pour atteindre la vitesse de 50 km h / à partir de la vitesse des roues de 300t/mn en appliquant le couple $C_m = f(N_r)$.

c. A partir des deux réponses précédentes, en déduire la distance (d_1+d_2) fait par le véhicule pour atteindre la vitesse de 50 km/h à partir de l'arrêt.

Q.A.10. Calculer la vitesse maximum du véhicule en régime permanent sur le plat
($V_{v_{max}}$ en km/h).

Q.A.11. Calculer la vitesse maximum du véhicule en régime permanent pour une pente de 15% montante ($V_{v_{max}}$ en km/h) (prendre pour la gravitation de la terre $g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

Partie B : Calcul d'autonomie du véhicule

Pour les questions suivantes, prendre comme hypothèses :

- La vitesse du véhicule est stabilisée
- La route est horizontale
- Prise en compte de la force de pénétration dans l'air et des frottements secs (pneus - route).

Avec ces hypothèses, la puissance de traction (Ptc) nécessaire au niveau des roues en fonction de la vitesse a pour expression :

$$P_{tc} = SCx \cdot Vv^2 + 22 \cdot Vv \quad (Vv : \text{vitesse du véhicule en m/s}).$$

Rappel :

Pour une vitesse de rotation du moteur de 8000 t/mn, le véhicule a une vitesse de 108,91 km/h.

Q.B.1. Compléter les lignes de la vitesse du véhicule Vv en km/h et en m/s du tableau du document réponse **REP.B.1**

Q.B.2. Calculer la puissance de traction pour les vitesses du moteur de 4000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Présenter les résultats dans le tableau du document réponse **REP.B.1**.

Description de la batterie :

L'unité de base des batteries Lithium - Ion est appelé "Elément". Sa tension varie en fonctionnement de 4V (état chargé) à 2,7V (état déchargé). On définit par habitude la tension nominale comme étant la tension moyenne, c'est à dire 3,5V. Les éléments sont montés en sous-ensemble appelés "Modules", qui contiennent 6 éléments (3 éléments en parallèle x 2 en série). La tension nominale d'un module est donc $2 \times 3,5 = 7V$

Pour la 106 VEDELIC, la batterie est composée de 30 modules en série, soit une tension nominale de $30 \times 7 = 210V$.

Q.B.3. Calculer le nombre d'éléments constituant la batterie.

Q.B.4. Pour une quantité d'énergie totale de 25 200 Wh et en considérant la tension moyenne, calculer la capacité d'un élément de batterie (en Ah).

L'énergie disponible dans la batterie dépend de la température et de la puissance qu'elle débite. La figure B.1 présente pour 23 °C la caractéristique de l'énergie (Wh) de la batterie en fonction de la puissance de décharge (à décharge constante).

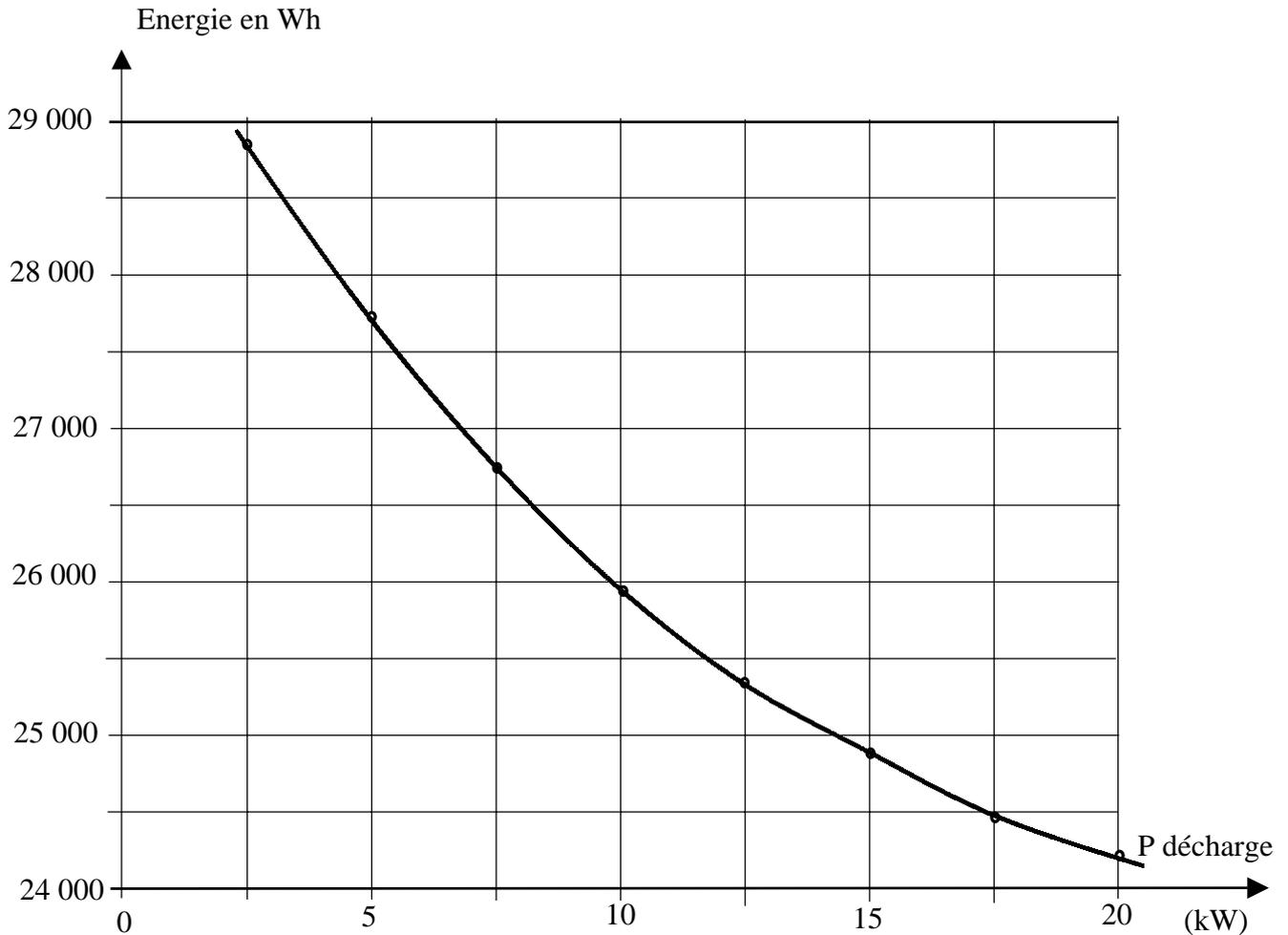


Figure B.1

- Q.B.5.** Calculer la puissance (P_{bat}) demandée à la batterie en fonction des vitesses de rotation du moteur de 4000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000) en utilisant le rendement donné dans le tableau du document réponse **REP.B.1**. Présenter les résultats dans le tableau du document réponse **REP.B.1**.
- Q.B.6.** Calculer l'énergie disponible dans la batterie en fonction des vitesses de rotation du moteur de 4000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000) en utilisant la figure B.1. Présenter les résultats dans le tableau du document réponse **REP.B.1**.
- Q.B.7.** Calculer l'autonomie du véhicule en fonction des vitesses de rotation du moteur de 4000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Présenter les résultats dans le tableau du document réponse **REP.B.1**.
- Q.B.8.** En extrapolant les résultats de la question précédente, à quelle vitesse moyenne stabilisée du véhicule l'autonomie est de 200 km ?

Partie C : Etude du Bobinage de la machine synchrone

Le bobinage triphasé de la machine synchrone a les caractéristiques suivantes :

- nombre de pôles : 8
 - nombre total d'encoches : 48
 - nombre de conducteurs /encoche : 2 (une seule phase par encoche)
 - style de bobinage : Concentrique par bobine
 - tous les conducteurs sont en série pour une bobine
 - **Particularité : Afin d'obtenir une machine basse tension - fort courant, toutes les bobines d'une même phase sont connectées en parallèle.**
-
- Courant efficace maximum par phase : 185 A
 - μ_0 : perméabilité de l'air.
 - β_e : pas dentaire ramené sur l'échelle électrique. 360° électrique correspond dans l'espace de l'entrefer à un angle mécanique recouvrant une paire de pôles.
 - e : largeur de l'entrefer

Q.C.1. Calculer le nombre d'encoches par pôle et par phase.

Q.C.2. Sur le document réponse **REP.C.1**, désigner par une croix tous les conducteurs aller et par un point tous les conducteurs retour pour une seule phase.

Q.C.3. L'entrée de la bobine 1 est marquée sur le document réponse **REP.C.1**. Marquer par une flèche la sortie de la bobine 1.

1 bobine correspond à l'ensemble des conducteurs aller et retour pour une paire de pôles.

Q.C.4. Calculer l'intensité efficace du courant qui circule dans un conducteur d'une encoche.

Q.C.5. En prenant 15 A efficace par mm^2 la densité du courant dans les conducteurs, calculer la section d'un conducteur.

Q.C.6. En prenant un coefficient de foisonnement dans l'encoche de 0,8 , calculer la section d'une encoche.

Q.C.7. Calculer le pas dentaire (β_e) ramené sur l'échelle électrique.

Q.C.8. Sur le document réponse **REP.C.1**, représenter l'allure du champ magnétique créé par une bobine ($H_e = f(\theta \text{ électrique})$) parcourue par un courant constant I . *Prendre en compte la position des encoches et négliger la magnétisation du fer.*

Q.C.9. Calculer l'amplitude du champ magnétique ($H_{e_{\max}}$) créé par la bobine parcourue par un courant constant I .

Partie D : La Machine synchrone et son alimentation

Schéma de principe de l'alimentation de la machine synchrone

Avant de modéliser la machine synchrone, il est nécessaire de connaître le principe de son alimentation dans la 106 VEDELIC. Pour que cette machine fonctionne à vitesse variable en moteur et en générateur (mode freinage électrique), il est nécessaire d'imposer la phase des courants dans la machine en fonction de la position du rotor (fonctionnement d'autopilote). Ainsi la fréquence des courants est en permanence proportionnelle (synchrone) à la fréquence de rotation. La structure de commande suivante (figure D.1) permet d'imposer l'amplitude du courant (I_{ref}) et l'angle d'autopilote (v_{ref}). v correspond au déphasage entre le courant et la fem, et I_{ref} à l'amplitude des courants de la machine.

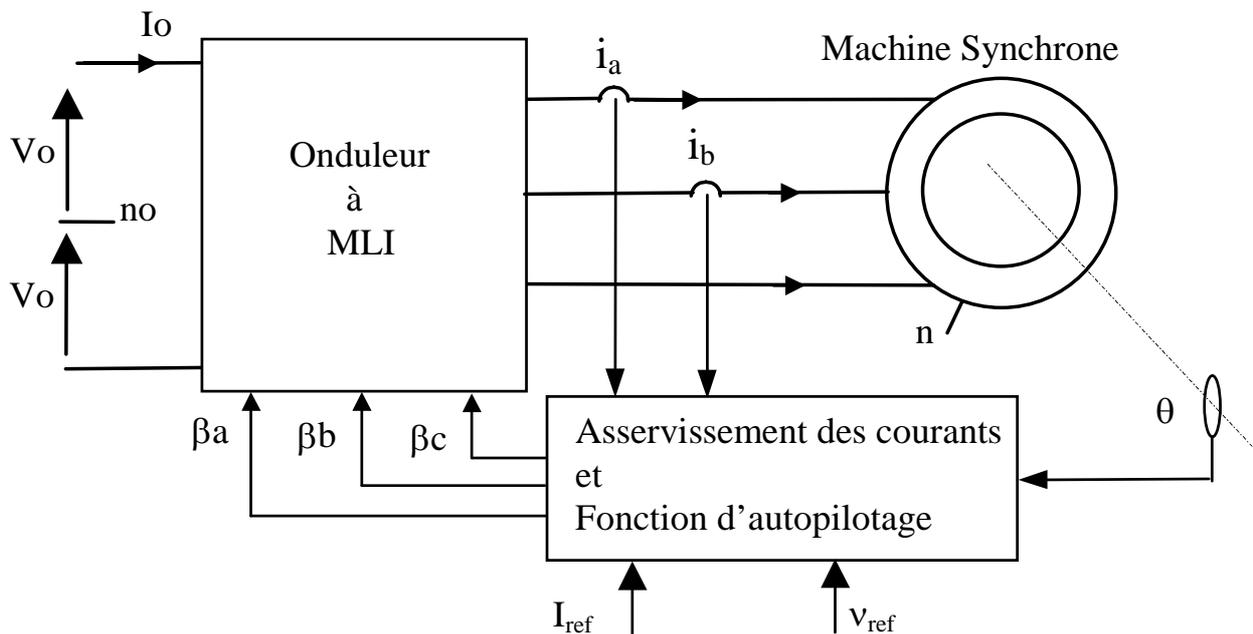


Figure D.1

- Caractéristique de la machine:

- . Puissance apparente nominale = 15 kVA
- . Couplage étoile
- . 8 pôles ($p=4$)

avec : V_o tension continue , I_o : courant continu

Q.D.1. Calculer la fréquence des courants de la machine pour la vitesse de rotation de 8000 t/mn.

Modélisation de la machine

La machine est modélisée par le modèle de **Behn Eschenburg**.

Hypothèses :

- Les pertes mécaniques sont négligeables.
- Les pertes fer sont supposées nulles pour l'identification des paramètres.

La figure D.2 présente le schéma équivalent par phase de la machine.

La figure D.3 représente le diagramme de Behn Eschenburg dans un cas quelconque.

Le schéma, l'équation et le diagramme sont représentés avec la **convention récepteur**.

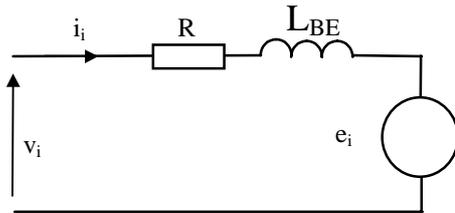


Figure D.2

Avec $\underline{v}_i = \underline{e}_i + R \cdot \underline{i}_i + j \cdot X_{BE} \cdot \underline{i}_i$

Avec

$i = a, b$ ou c et j : opérateur complexe

φ : correspond au déphasage entre le courant et la tension d'une phase,

R : Résistance d'une phase, L_{BE} : Inductance de Behn Eschenburg ($X_{BE} = L_{BE} \cdot p \cdot \Omega = L_{BE} \cdot \omega$) ;

$E_{i\text{eff}} = \frac{K \cdot \Phi \cdot p}{\sqrt{2}} \cdot \Omega$ (valeur efficace de la fem d'une phase);

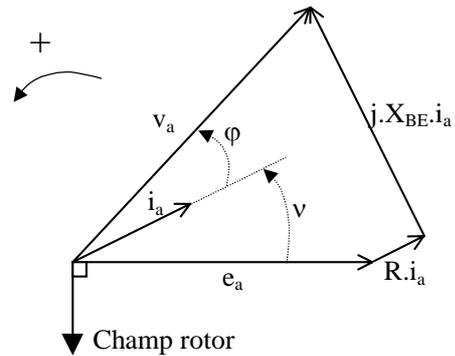


Figure D.3

Identification des paramètres du modèle

Pour caractériser la machine synchrone, nous avons fait trois essais en charge en fonctionnement moteur :

$V_{i\text{eff}}$ (V)	$I_{i\text{eff}}$ (A)	φ (°)	N (t/mn)	ν (°)
19,39	185	24,67	500	0
34,14	185	28,31	1 000	0
48,94	185	29,74	1 500	0

Tableau TD.1

Q.D.2. Tracer le diagramme de Behn Eschenburg pour le premier essai ($V_{i\text{eff}} = 19,39\text{V}$) en respectant les ordres de grandeur des amplitudes et des angles. Ecrire sur le diagramme le nom de chaque vecteur et angle.

Q.D.3. Exprimer de façon littérale la relation entre $V_{i\text{eff}}$, φ , L_{BE} , ω et $I_{i\text{eff}}$.

Q.D.4. Dédurre de la relation précédente la valeur numérique de L_{BE} .

Q.D.5. Exprimer de façon littérale, la relation entre $V_{i\text{eff}}$, φ , R , $I_{i\text{eff}}$ et $E_{i\text{eff}}$.

Q.D.6. En remplaçant $E_{i\text{eff}}$ par son expression, exprimer de façon littérale la relation entre $V_{i\text{eff}}$, φ , R , $I_{i\text{eff}}$, $K.\Phi$, p et Ω .

Q.D.7. Dédurre de la relation précédente les valeurs numériques de R et du produit $K.\Phi$.

Attention : la détermination de deux inconnues nécessite de prendre en compte plusieurs essais.

Caractérisation du moteur avec son alimentation et sa stratégie de commande

Pour des vitesses de rotation de l'axe de la machine synchrone supérieures à 2000 t/mn, l'angle d'autopilotage ν est modifié de façon à réduire la tension d'alimentation aux bornes des enroulements de la machine synchrone et par conséquent de diminuer le flux dans la machine.

Les essais sur banc de la machine avec son alimentation et sa commande sont donnés dans le tableau TD.2. Ils correspondent à la puissance maximum pour différentes vitesses de la machine avec $2.V_0 = 220V$.

Notations : P_0 : Puissance à l'entrée de l'onduleur, P_{abs} puissance électrique absorbée par le moteur synchrone, I_i courant dans le moteur, C_u : Couple utile sur l'axe du moteur synchrone.

$P_0 = V_0.I_0$ (W)	$I_{i\text{eff}}$ (A)	P_{abs} (W)	C_u (Nm)	ν (°)	N (t/mn)
35 080	157	33 163	96	31	3 000
36 020	155	34 549	72	49,5	4 000
36 205	155	34 745	57,6	58,5	5 000
36 468	155	35 010	48	64,3	6 000
34 207	151	32 752	38	69,5	7 000
26 833	134	25 504	25	74,75	8 000

Tableau TD.2

A l'aide du tableau précédent, on désire analyser les caractéristiques de l'ensemble alimentation – moteur – commande.

Q.D.8. En prenant (indépendamment des résultats des questions précédentes) $R = 0,03\Omega$, $L_{BE} = 0,2$ mH et le produit $K.\Phi = 0,08$ V/(rd/s), tracer le diagramme de Behn Eschenburg pour la vitesse de 5000t/mn en respectant les ordres de grandeur des amplitudes et des angles. Ecrire sur le diagramme le nom de chaque vecteur et angle.

Q.D.9. Calculer la valeur de la tension efficace ($V_{i\text{eff}}$) pour la vitesse de 5000t/mn.

Q.D.10. Calculer les valeurs de la puissance utile maximum disponible sur l'arbre en fonction des vitesses de rotation du moteur de 3000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Reporter les valeurs sur le document réponse **REP.D.1**,

Q.D.11. Calculer les valeurs du rendement du moteur en fonction des vitesses de rotation du moteur de 3000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Reporter les valeurs sur le document réponse **REP.D.1.**

Q.D.12. Calculer les valeurs du rendement global du moteur + l'onduleur en fonction des vitesses de rotation du moteur de 3000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Reporter les valeurs sur le document réponse **REP.D.1.**

Q.D.13. En prenant la résistance d'un enroulement d'une phase du moteur égale à $0,03 \Omega$, Calculer les valeurs des pertes Joule dans le moteur en fonction des vitesses de rotation du moteur de 3000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Reporter les valeurs sur le document réponse **REP.D.1.**

Q.D.14. Calculer les valeurs des autres pertes (hors pertes Joule) présentes dans le moteur en fonction des vitesses de rotation du moteur de 3000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Reporter les valeurs sur le document réponse **REP.D.1.**

Q.D.15. Expliquer la provenance des deux principales pertes (hors pertes Joule) présentes dans le moteur. De quelles grandeurs sont-elles dépendantes ? Donner les expressions littérales de ces deux principales pertes en les décomposant au maximum.

Onduleur

Q.D.16. Calculer les valeurs des pertes présentes dans l'onduleur pour les essais du tableau **TD.2** en fonction des vitesses de rotation du moteur de 3000 à 8000 t/mn (de 1000 en 1000). Reporter les valeurs sur le document réponse **REP.D.1**

Q.D.17. Expliquer la provenance des deux principales pertes présentes dans l'onduleur. De quelles grandeurs sont-elles dépendantes ?

L'onduleur est constitué de 3 modules IGBT 600V – 400A de référence : 2MBI 400N-060 (documentation en annexe) avec une fréquence de découpage de 8 kHz et alimenté par deux sources continues de 110V ($2.V_0 = 220V$).

Pour l'étude qui suit, on considérera que :

- Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.
- les courants dans les phases de la machine sont parfaitement sinusoïdaux et d'amplitude crête \hat{I} .
- le fondamental de la tension délivrée par l'onduleur a une amplitude crête (\hat{V}) aux bornes des phases de la charge.

Le schéma de l'onduleur est donné par la figure D.4 où les notations et conventions de signe sont définies (*lettre minuscule : valeur électrique instantanée*).

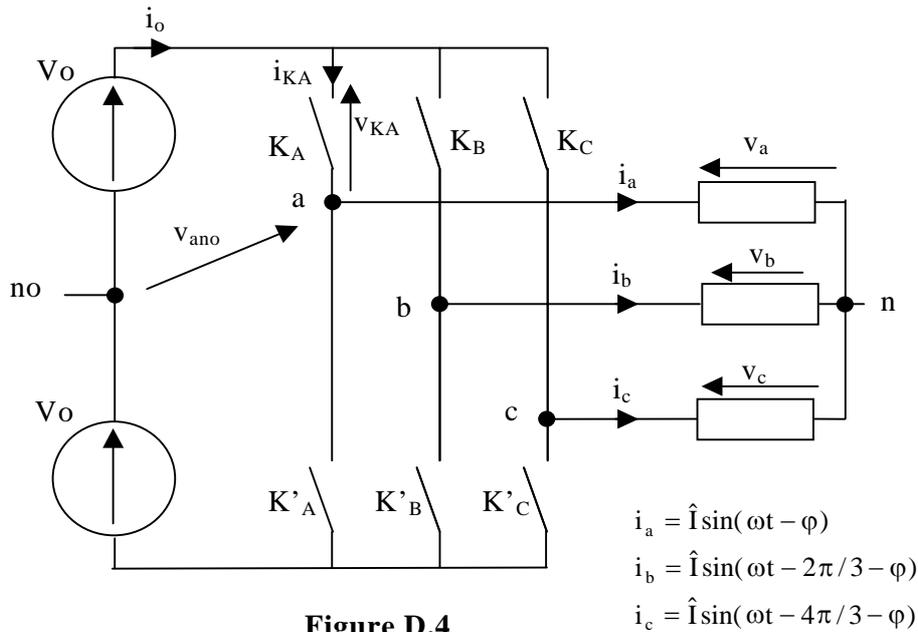


Figure D.4

Chaque interrupteur électronique est repéré par un symbole (K_A , K'_A , K_B , K'_B , K_C , K'_C), le même symbole désigne aussi sa variable logique de commande ($K_A=1$ signifie que l'interrupteur K_A est fermé et $K_A=0$ signifie que l'interrupteur K_A est ouvert). On a toujours une commande complémentaire pour chaque bras ($K_A \neq K'_A$, $K_B \neq K'_B$ et $K_C \neq K'_C$).

La façon d'obtenir la commande des interrupteurs n'est pas abordée dans ce sujet.

Stratégie de commande de l'onduleur

3 stratégies de commande sont étudiés ci-dessous.

1. Commande MLI simple

La commande MLI (à Modulation de Largeur d'Impulsions) permet de délivrer une tension (v_{ino}) entre le point i (a , b ou c) et no (potentiel milieu des sources continues) ayant la forme représentée par la figure D.5.

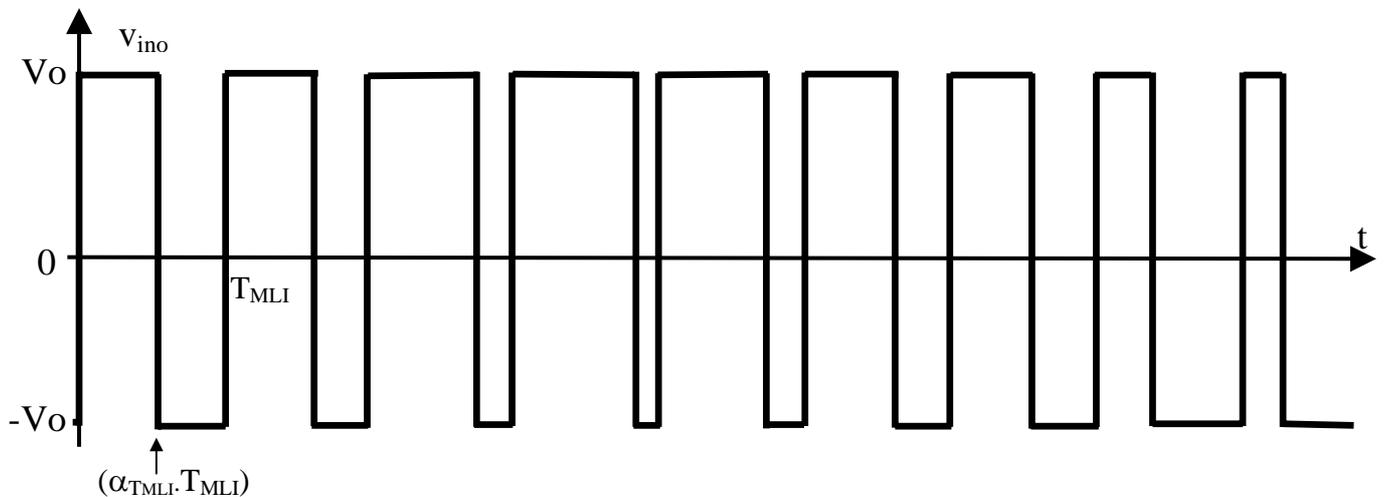


Figure D.5

- *Notation* : $\langle x \rangle$ désigne la valeur moyenne de la variable x (temporelle, efficace ou crête) sur une période de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions).

Dans la stratégie MLI simple, la tension $\langle v_{nno} \rangle$ vis à vis de T_{MLI} vaut zéro.

- Q.D.18.** Exprimer de façon littérale la relation entre v_{ino} , v_i et v_{nno} . ($i = a, b$ ou c)
- Q.D.19.** Sachant que $v_a + v_b + v_c = 0$, exprimer de façon littérale la relation de v_{nno} en fonction de v_{ano} , v_{bno} , v_{cno} .
- Q.D.20.** Exprimer de façon littérale les relations de v_a , v_b , v_c en fonction de v_{ano} , v_{bno} , v_{cno} .
- Q.D.21.** Dans la stratégie MLI simple et sachant que α_{TMLI} peut varier de 0 à 1, calculer, en fonction de V_o , la valeur crête maximale $\langle \hat{v}_i \rangle$ de la tension fondamentale de $\langle v_i \rangle$ que peut délivrer l'onduleur avec cette stratégie et en déduire, en fonction de V_o , la valeur efficace maximale $\langle v_{i\text{eff}} \rangle$.
- Q.D.22.** De la question précédente, en déduire, en fonction de V_o , la valeur crête maximale $\langle \hat{u}_{ij} \rangle$ de la tension fondamentale entre phase $\langle u_{ij} \rangle$ ($ij = ab, bc$ ou ca).
- Q.D.23.** Compléter la feuille réponse **REP.D.2**, type de composant qui conduit (IGBT ou Diode)

2. Commande MLI avec une tension $\langle v_{nno} \rangle \neq 0$

La réponse à la question **Q.D.22.**, montre qu'avec la MLI simple la valeur crête $\langle \hat{u}_{ij} \rangle$ entre phase est inférieure à $2 \times V_o$. Ainsi, il existe une stratégie de commande plus performante qui permet d'obtenir la valeur crête $\langle \hat{u}_{ij} \rangle$ entre phase égale à $2 \times V_o$. Il faut que la différence de potentiel moyen de $\langle v_{nno} \rangle$ varie de façon adaptée.

- Q.D.24.** Calculer, en fonction de V_o , l'amplitude crête maximale $\langle \hat{v}_i \rangle$ de la tension fondamentale de $\langle v_i \rangle$ que peut délivrer l'onduleur avec cette stratégie et en déduire, en fonction de V_o , la valeur efficace maximale $\langle v_{i\text{eff}} \rangle$.
- Q.D.25.** A l'aide de la réponse à la question **Q.D.18**, lorsque $\langle v_i \rangle$ est supérieure à V_o , quelle est la valeur de $\langle v_{ino} \rangle$?
- Q.D.26.** A l'aide des formes de $\langle v_a \rangle$, $\langle v_b \rangle$ et $\langle v_c \rangle$ données (dont l'amplitude est supérieure à V_o), compléter la feuille réponse **REP.D.3** en traçant la forme de $\langle v_{nno} \rangle$.
- Q.D.27.** A l'aide des formes de $\langle v_a \rangle$, $\langle v_b \rangle$ et $\langle v_c \rangle$ données et $\langle v_{nno} \rangle$ précédent, compléter la feuille réponse **REP.D.3** en traçant la forme de $\langle v_{ano} \rangle$ délivrée par l'onduleur vis à vis du point no.

3. Commande sans MLI

Une dernière stratégie consiste à ne pas utiliser la MLI. C'est la commande "carrée" où K_k et K'_k sont fermés chacun la moitié de la période. ($k = A, B$ ou C)

Pour l'étude qui suit, on considérera que :

- les courants dans les phases de la machine sont parfaitement sinusoïdaux et d'amplitude crête $\hat{I} = 200A$.
- le fondamental de la tension délivrée par l'onduleur (v_{if}) a une amplitude crête \hat{V}_{if} aux bornes des phases de la machine.
- le $\cos \varphi$ égal à 0,866 arrière (v_{if} en avance sur i_{if}) (φ déphasage entre i_{if} et v_{if})

Q.D.28. Compléter la feuille réponse **REP.D.4** en dessinant la forme de v_{ano} avec cette stratégie et en respectant les tensions fondamentales dessinées en pointillées.

Q.D.29. Compléter la feuille réponse **REP.D.4** en dessinant la forme de i_a
(en respectant φ donné).

Q.D.30. Calculer, en fonction de V_o , l'amplitude crête maximale \hat{V}_{if} de la tension fondamentale délivrée par l'onduleur (v_{if}) avec cette stratégie et en déduire la valeur efficace maximale $V_{if\text{eff}}$ (en fonction de V_o).

Q.D.31. Compléter la feuille réponse **REP.D.4** en dessinant en correspondance avec la figure utilisée pour les réponses aux questions **Q.D.28** et **Q.D.29**, le nom (K_A ou K'_A) et le type (IGBT ou Diode) du composant qui conduit à chaque instant pour le bras qui alimente la phase a.

Pertes dans l'Onduleur (*partie non totalement indépendante des questions précédentes*)

Les pertes dans l'onduleur sont concentrées dans les composants de puissance (IGBT et Diodes).

L'onduleur utilise la commande "carrée" lorsque la vitesse du moteur est importante pour obtenir le maximum de tension en sortie.

Pour l'étude qui suit, on considérera que :

- les courants dans les phases de la machine sont parfaitement sinusoïdaux et d'amplitude crête $\hat{I} = 200A$.
- le $\cos \varphi$ égal à 0,866 arrière (v_{if} en avance sur i_{if}) (φ déphasage entre i_{if} et v_{if})

Q.D.32. Pour le bras d'onduleur (K_A K'_A) et dans le contexte du fonctionnement donné (voir réponse à **Q.D.31**), calculer le pourcentage de temps de conduction du courant i_a pour chaque composant (2 IGBT et 2 diodes).

Q.D.33. A l'instant des commutations des diodes et des IGBT d'un même bras, calculer l'amplitude du courant à ces instants. Présenter les résultats sous la forme d'un tableau en complétant la feuille réponse **REP.D.5**.

Q.D.34. Dans la documentation du module 2MBI 400N-060 (annexe), pour $V_{GE} = 15V$ et pour une température de jonction de 125 degrés, relever la chute de tension aux bornes de l'IGBT lorsque $i_{IGBT} = 100A$.

Q.D.35. Calculer de façon littérale la puissance perdue par conduction (P_{dl}) dans un IGBT en prenant :

- $i_{if} = 0$ pour θ compris entre 0 et $\pi/6$
- $i_{if} = \hat{I} \sin(\theta - \pi/6)$ pour θ compris entre $\pi/6$ et π
- $i_{if} = 0$ pour θ compris entre π et 2π
- $v_{IGBT} = V_{o1} + R_d \cdot i_{if}$ (modèle de la chute de tension : v_{IGBT} : chute de tension directe aux bornes d'un IGBT, V_{o1} : Tension de seuil, R_d : résistance dynamique)

Q.D.36. Application numérique de la question **Q.D.35**, calculer P_{dl} avec $V_{o1} = 1V$ et $R_d = 3,7m\Omega$.

Q.D.37. Dans la documentation du module 2MBI 400N-060 (annexe), pour $V_{GE} = 0V$ et pour une température de jonction de 125 degrés, relever la chute de tension aux bornes de la diode lorsque $i_D = 100A$.

Q.D.38. Calculer de façon littérale la puissance perdue par conduction (P_{dd}) dans une diode en prenant :

- $i_{if} = \hat{I} \sin(\pi/6 - \theta)$ pour θ compris entre 0 et $\pi/6$
- $i_{if} = 0$ pour θ compris entre $\pi/6$ et 2π
- $v_{diode} = V_{od} + R_{dd} \cdot i_{if}$ (modèle de la chute de tension : v_{diode} : chute de tension directe aux bornes d'une diode, V_{od} : Tension de seuil, R_{dd} : résistance dynamique)

Q.D.39. Application numérique de la question **Q.D.38**, calculer P_{dd} avec $V_{od} = 0,8V$ et $R_{dd} = 3,7m\Omega$.

Q.D.40. Dans la documentation du module 2MBI 400N-060 (annexe), pour $V_{GE} = \pm 15V$, $V_{cc} = 300V$, $R_G = 4,7\Omega$ et pour une température de jonction de 125 degrés, relever les valeurs de l'énergie perdue (par cycle) dans un IGBT uniquement lors de l'ouverture lorsque $i_{IGBT} = 100A$.

Q.D.41. A l'aide des réponses des **questions Q.D.33** et **Q.D.40**, calculer la puissance perdue par commutation dans un IGBT, en considérant la fréquence de i_{if} égale à 500 Hz.

Q.D.42. A l'aide des réponses des **questions Q.D.36**, **Q.D.39**, et **Q.D.41**, calculer la puissance totale perdue dans un module 2MBI 400N-060, (2 IGBT et 2 diodes),
(en négligeant les pertes par commutation dans les diodes)

Partie E : Etude thermique

Pour l'étude thermique, nous avons retenu le cas qui a obtenu une puissance perdue par effet Joule la plus importante (en régime permanent). Sur banc, il s'agit de l'essai réalisé à 7000 t/mn de la machine avec son alimentation et sa commande. Les résultats sont donnés dans le tableau TE.1.

Notations : P_o : Puissance à l'entrée de l'onduleur, P_{abs} puissance électrique absorbée par le moteur synchrone, I_i courant dans le moteur, P_u : puissance utile sur l'axe du moteur synchrone.

V_o (V)	$P_o = V_o \cdot I_o$ (W)	$I_{i\text{eff}}$ (A)	P_{abs} moteur (W)	P_u moteur (W)	N (t/mn)
220	18 581	105	17 603	14 572	7 000

Tableau TE.1.

A partir de cet essai, on envisage de dimensionner le circuit de refroidissement. Il est composé d'un circuit d'eau à pression atmosphérique dont la température ne doit jamais dépasser 95 °C avec une température de l'air ambiant sous capot de 45 °C. Le circuit d'eau est commun au refroidissement du moteur (passage de l'eau dans la culasse du stator) et de l'électronique de puissance (les composants sont fixés sur une plaque "froide" refroidie par le passage de l'eau), et l'eau est refroidie par un échangeur eau – air à ventilation forcée.

Pour l'onduleur, les 3 modules 2MBI 400N-60 sont montés sur la même plaque froide. Le principe de la circulation de l'eau est donné par la figure E.1.

Dans la suite du problème, on considérera que les puissances mises en jeu correspondent au tableau TE.1, que toutes les questions prennent comme hypothèses que le régime permanent est atteint, et que les températures limites sont obtenues pour le circuit de l'eau, pour le moteur et pour les modules à IGBT et diodes.

Modélisation thermique

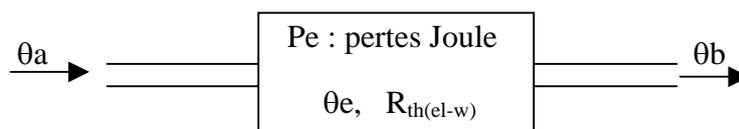
L'étude thermique est réalisée à une température ambiante de 45°C. La température de l'air restera constante dans toute l'étude.

Pour simplifier l'étude, on prendra comme hypothèses que la température dans les tuyaux à l'extérieur de l'onduleur, du moteur et de l'échangeur est homogène, que les résistances thermiques restent constantes, que les températures de la plaque froide, de la culasse du moteur et de l'échangeur sont isothermes et que $\theta_1 = \theta_4$ (voir figure E.1).

Dans la plaque froide, le moteur et l'échangeur, on prendra comme modèle thermique des échanges : le modèle moyen de conduction thermique.

Exemple : un élément transmet P_e (W) au circuit d'eau.

La température de l'élément vaut θ_e , la température de l'eau entrante est de θ_a et la température de l'eau sortante vaut θ_b . La résistance thermique entre l'élément et l'eau vaut $R_{th(e-l-w)}$.



On prendra la relation d'échange suivante : $\theta_e - \frac{\theta_a + \theta_b}{2} = R_{th(ei-w)} \cdot P_e$

Caractéristiques des éléments :

- La résistance thermique (eau - air) de l'échangeur ($R_{th(w-a)}$) avec ventilation forcée : $R_{th(w-a)} = 0,0093^\circ\text{C/W}$
- La température de la culasse du moteur est limitée à 120°C .
- La température des jonctions est limitée à 125°C .
- Les pertes dans les diodes valent 1/3 des pertes totales de l'onduleur.
- Les pertes dans les IGBT valent 2/3 des pertes totales de l'onduleur.

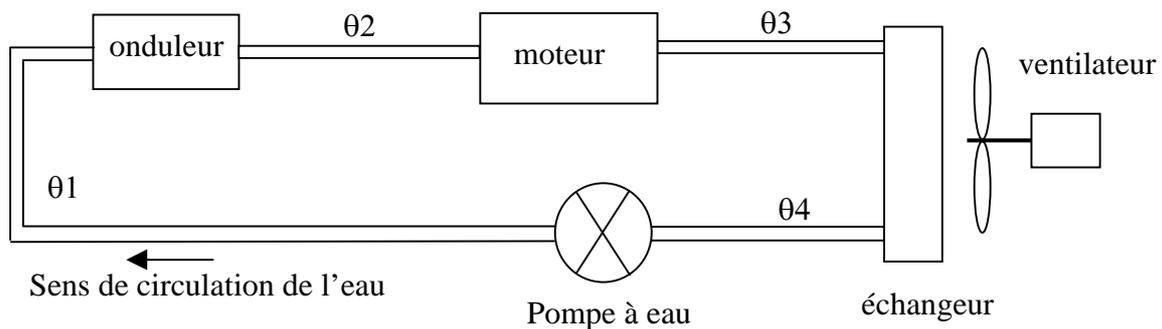


Figure E.1.

θ_1 , θ_2 , θ_3 et θ_4 correspondent aux températures aux différents points du circuit.

L'objectif est de calculer les résistances thermiques maximum de la plaque froide ($R_{th(pf-w)}$) et du moteur ($R_{th(m-w)}$). L'étude thermique est réalisée à une température ambiante de 45°C avec les données du tableau **T.E.1** et telles que toutes les températures limites soient atteintes.

- Q.E.1.** Quelle est la température la plus élevée du circuit ? Quelle est sa valeur ?
- Q.E.2.** Calculer la température θ_4 (en considérant le modèle thermique décrit dans la présentation de cette partie).
- Q.E.3.** Sachant que 1 gramme d'eau qui s'élève de 1°C absorbe 1 calorie et que 1 calorie vaut 4,184 Joule, calculer le débit de la pompe à eau (litres/h) (en prenant comme hypothèse que 1 litre d'eau pèse 1 kg).
- Q.E.4.** Le débit étant commun à l'onduleur et au moteur, calculer la température θ_2 (rappel $\theta_1 = \theta_4$).

Etude du refroidissement de l'onduleur

L'onduleur est composé de 3 modules 2MIBI 400N-060 (voir annexe pour les caractéristiques thermiques). θ_{J_I} et θ_{J_D} : températures des jonctions des IGBT et diodes, θ_C température des boîtiers des modules et θ_{Pf} température de la plaque froide traversée par l'eau.

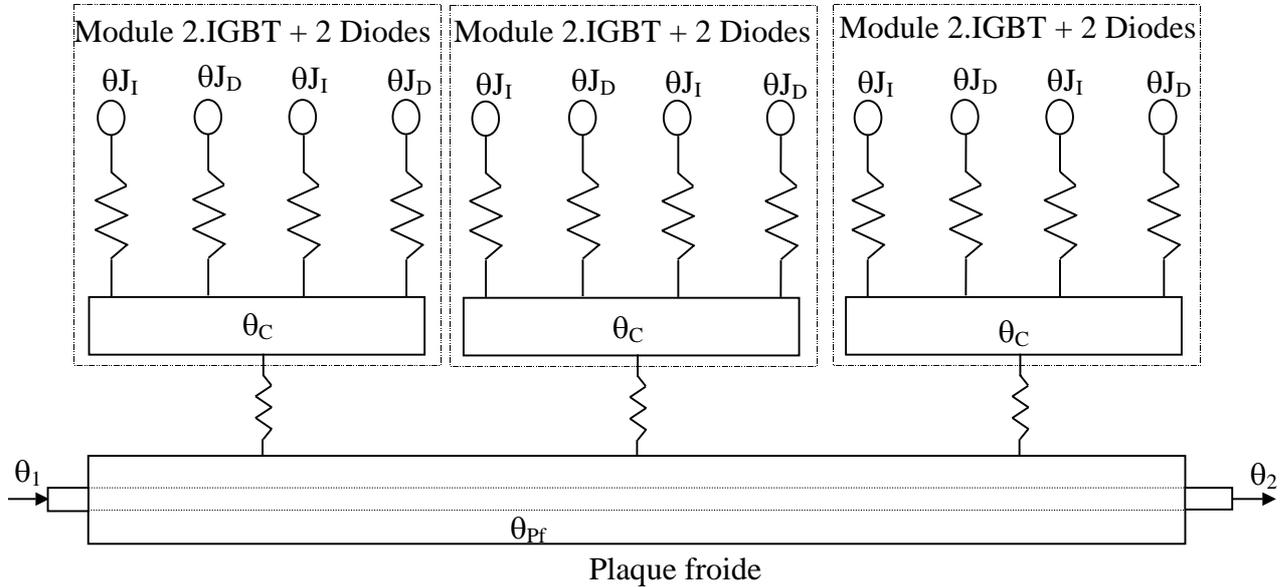


Figure E.2.

Q.E.5. Selon la répartition des pertes entre les IGBT et les diodes, et de leurs résistances thermiques jonction – boîtier ($R_{th(j-c)}$), calculer la différence de température entre la jonction des IGBT (θ_{J_I}) et la jonction des diodes (θ_{J_D}).

Q.E.6. Selon la question précédente et en considérant que la température de la jonction la plus chaude atteint la limite maximum admissible, calculer la températures θ_C .

Q.E.7. Calculer la températures θ_{Pf} , sachant que la résistance thermique boîtier – plaque est notée $R_{th(c-f)}$ dans la documentation.

Q.E.8. Calculer la résistance thermique plaque - eau ($R_{th(pf-w)}$)
(pour rendre cette question indépendante, prendre $\theta_1=69^\circ C$ et $\theta_2= 75^\circ C$).

Etude du refroidissement du moteur

Q.E.9. Calculer la résistance thermique culasse - eau ($R_{th(m-w)}$) du moteur (en considérant que la culasse a atteint la température limite)

(pour rendre cette question indépendante, prendre $\theta_2=75^\circ C$ et $\theta_3= 94^\circ C$).

Partie F : Etude de la commande

Structure de commande "ab"

Le principe de la structure de commande "ab" est donné par la figure F.1.

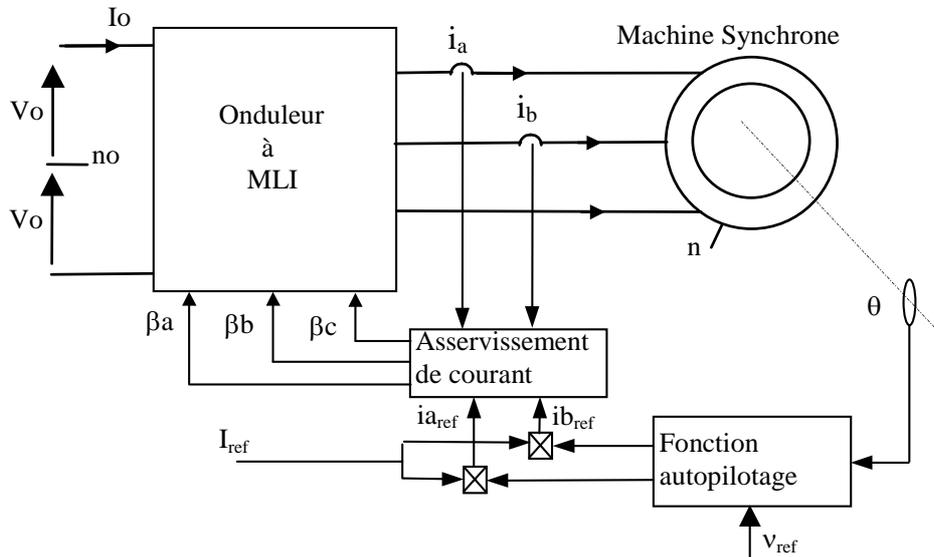


Figure F.1.

La fonction "asservissement de courant" permet de délivrer les grandeurs de commande (β_a , β_b , et β_c) de chaque bras de l'onduleur qui alimente les 3 phases de la machine synchrone telles que les tensions (v_i) valent ($\beta_i \cdot V_o$) pour obtenir $i_{iref} = i_i$ (avec $i = a, b, \text{ ou } c$).

Modèle et repère de la machine (représentation en grandeur électrique)

(angle électrique = p fois l'angle mécanique (p : paires de pôles))

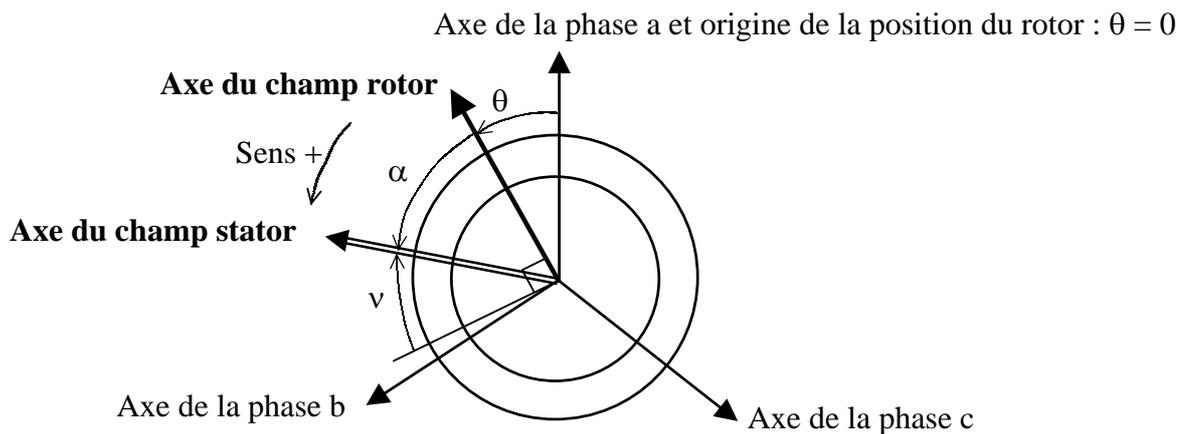


Figure F.2.

L'angle θ représente la position du champ rotorique créé par les aimants

L'angle α représente le déphasage entre les positions des champs statorique et rotorique.

Le champ statorique est créé par 3 courants équilibrés (i_a , i_b et i_c) tel que :

- $i_a = \hat{I} \cos(\theta + \alpha)$
- $i_b = \hat{I} \cos(\theta + \alpha - 2\pi/3)$
- $i_c = \hat{I} \cos(\theta + \alpha - 4\pi/3)$

On définit $\nu = \alpha - \pi/2$ (ν : angle d'autopilotage)

L'objectif de cette structure est de maintenir l'angle α constant quel que soit la position du rotor.

- Q.F.1.** Selon le schéma de principe de la **figure F.1**, exprimer les relations littérales de $i_{a_{ref}}$ et $i_{b_{ref}}$ en fonction de I_{ref} , θ et ν_{ref} .
- Q.F.2.** Si le rotor tourne à vitesse constante ($p.\Omega$), exprimer $i_{a_{ref}}$ et $i_{b_{ref}}$ en fonction du temps.
- Q.F.3.** Pour $p = 4$ et une vitesse de rotation de la machine de 8000 t/mn, calculer la fréquence des courants de référence des asservissements $i_{a_{ref}}$ et $i_{b_{ref}}$.
- Q.F.4.** Sachant que $\hat{E}_i = K.\Phi.p.\Omega$ (valeur crête de la fem d'une phase), déterminer l'expression du couple (C_{el}) en fonction de I_{ref} , $K.\Phi$, p , et ν_{ref} .
- Q.F.5.** Pour $p = 4$, $K.\Phi = 0,08$ Nm/A, $I_{ref} = 200$ A et $\nu_{ref} = -30^\circ$, calculer le couple.
- Q.F.6.** En vous référant à la figure **D.3** de la partie **D**, avec les valeurs numériques de la question précédente, $L_{BE} = 0,2$ mH et une vitesse positive ($p\Omega = \omega = 1000$ rd/s), tracer le diagramme simplifié de Behn-Eschenburg (en négligeant la résistance R) en respectant les ordres de grandeur des amplitudes et des angles.
- Q.F.7.** Même question que la précédente sauf $I_{ref} = -200$ A. Quel est, dans ce cas, le mode de fonctionnement de la machine ?

Structure de commande "dq"

Le principe de la structure de commande "dq" est donné par la figure F.3.

Les asservissements de courant contrôlent les courants transformés i_d et i_q (courants exprimés dans un repère dq (diphase) tournant en synchronisme avec le rotor).

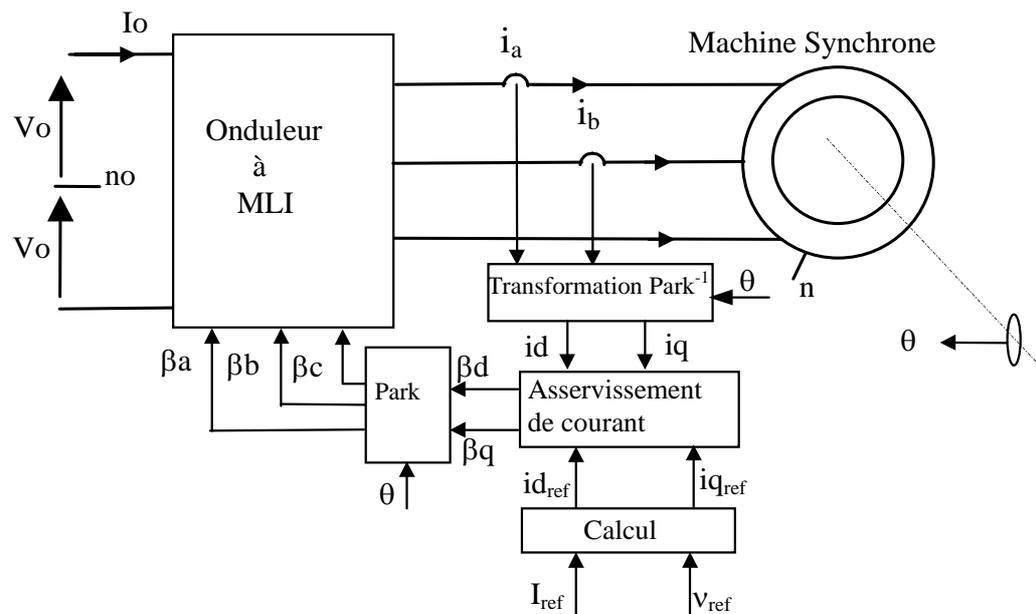
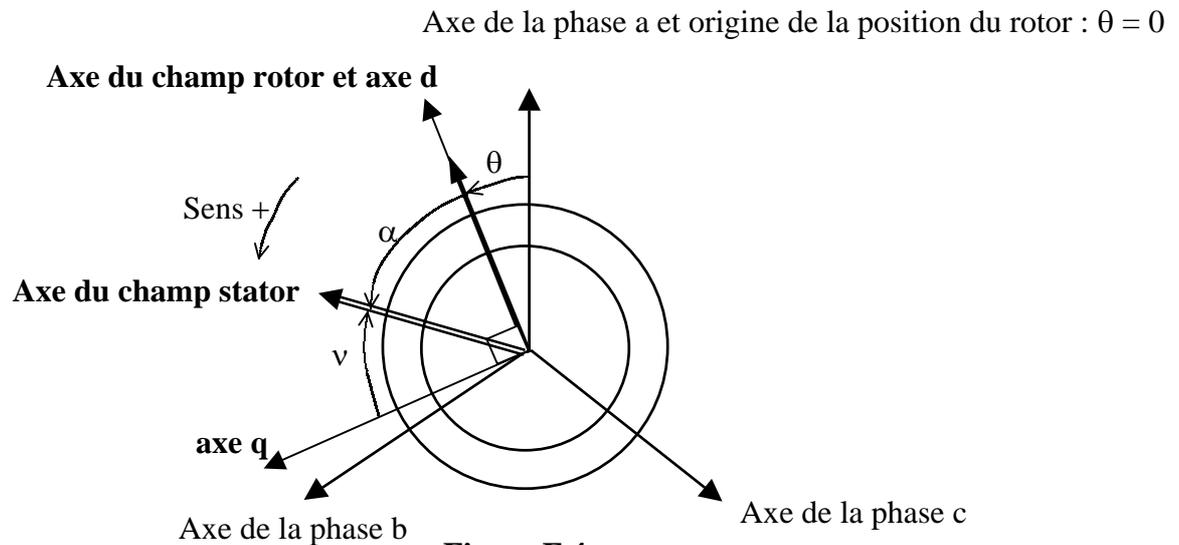


Figure F.3.

Modèle et repère de la machine (représentation en grandeur électrique)



L'axe d est confondu avec l'axe du champ rotorique créé par les aimants.

L'axe q est en avance de $\pi/2$ par rapport à l'axe d.

L'objectif de cette structure est la même que celui de la structure précédente, c'est de maintenir l'angle α constant quelle que soit la position du rotor.

On définit toujours $\nu = \alpha - \pi/2$ (ν : angle d'autopilotage)

Rappel : La transformée de Park (sans homopolaire)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P^{-1}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$



Cette transformée multiplie les amplitudes des tensions et courants par $\sqrt{\frac{3}{2}}$
(mais respecte l'énergie).

Q.F.8. Si $i_a + i_b + i_c = 0$, on a $\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P_r^{-1}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}$ exprimer de façon littérale $P_r^{-1}(\theta)$.

Q.F.9. Selon le schéma de principe de la **figure F.3**, exprimer les relations littérales de $i_{d,ref}$ et $i_{q,ref}$ en fonction de I_{ref} et ν_{ref} (prendre en compte l'expression de la transformée de Park).

Le modèle de la machine (en régime permanent) dans le repère dq est le suivant :

- $v_d = R \cdot i_d - L_q \cdot \omega \cdot i_q$
- $v_q = e_q + R \cdot i_q + L_d \cdot \omega \cdot i_d$ (avec $e_q = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot K \cdot \Phi \cdot \omega$)

On peut associer des vecteurs pour les tensions et courants tels que : $\vec{V} = \vec{V}_d + \vec{V}_q$ et $\vec{I} = \vec{I}_d + \vec{I}_q$

Q.F.10. Pour $p = 4$, $K \cdot \Phi = 0,08$ Nm/A, $I_{ref} = 200$ A, $v_{ref} = -30^\circ$, $L_d = L_q = 0,2$ mH, une vitesse positive ($\omega = 1000$ rd/s) et en négligeant la résistance R, tracer le diagramme vectorielle de \vec{V} et \vec{I} dans le repère dq en respectant les ordres de grandeur des amplitudes et en nommant chaque vecteur.

Q.F.11. Même question que la précédente sauf $v_{ref} = +30^\circ$.

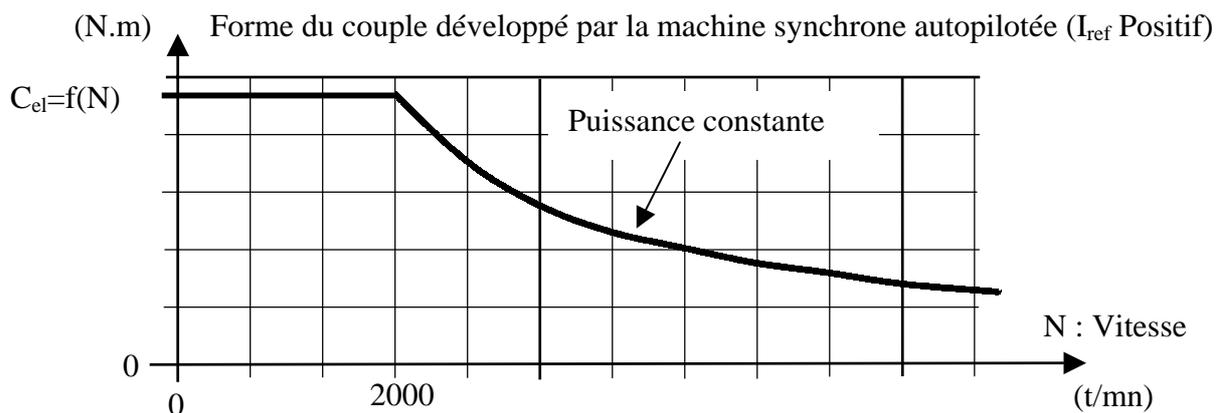


Figure F.5

Q.F.12. Selon la caractéristique du couple électromagnétique (C_{el}) de la **figure F.5**, pour une vitesse inférieure à 2000 t/mn, la commande est réglée pour obtenir des courants minimum dans les phases de la machine pour un couple donné. Quelles sont, dans ce cas, les amplitudes du courant $i_{d,ref}$ et de l'angle v_{ref} ?

Q.F.13. Selon la caractéristique du couple électromagnétique (C_{el}) de la **figure F.5**, pour une vitesse supérieure à 2000 t/mn, la commande est réglée pour obtenir des tensions minimum dans les phases de la machine pour un couple donné. Quels sont, dans ce cas, les signes du courant $i_{d,ref}$ et de l'angle v_{ref} ? Expliquer les réponses.

Q.F.14. Pour les grandeurs de commande, on a $\begin{bmatrix} \beta_a \\ \beta_b \\ \beta_c \end{bmatrix} = P(\theta) \cdot \begin{bmatrix} \beta_d \\ \beta_q \end{bmatrix}$, exprimer de façon littérale $P(\theta)$.

Q.F.15. En régime permanent et pour une vitesse $p \cdot \Omega$, quelle est la fréquence des courants de référence des asservissements $i_{d,ref}$ et $i_{q,ref}$?

Q.F.16. Comparer les contraintes fréquentielles (bande passante) sur les régulateurs de courant pour les commandes « ab » et « dq » lorsque la machine fonctionne de l'arrêt à 8000 t/mn. Estimer la bande passante des régulateurs pour les deux commandes (penser au régime transitoire du couple qui doit avoir une bande passante de 30Hz environ).

Fin du problème