

RESEAU DE BORD D'UN AVION GROS PORTEUR

Recommandations générales

- Vérifier que le sujet comporte 18 pages + 17 pages en annexe + 4 pages de documents réponses
- L'épreuve se compose de 4 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 et D 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.

RESEAU DE BORD D'UN AVION GROS PORTEUR

Sommaire

RESEAU DE BORD D'UN AVION GROS PORTEUR.....	1
PRESENTATION GENERALE.....	3
PARTIE A : Génération Electrique Principale	5
A.1 Etude des bobinages.....	6
A.2 Modélisation de l'alternateur.....	7
A.3 Point de fonctionnement et caractéristiques.....	8
PARTIE B : Distribution.....	10
B.1 Puissances et harmoniques.....	10
B.2 Protection des personnes.....	11
B.3 Câbles et court circuit.....	11
PARTIE C : Correction de facteur de puissance	13
C.1 Etude du transformateur.....	13
C.2 Absorption sinus.....	15
PARTIE D : Convertisseur de puissance	16
D.1 Etude théorique.....	17
D.2 Point de fonctionnement.....	17

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) sur une période
- la notation \hat{X} désigne la valeur crête de la variable.
- j est l'opérateur complexe.

Liste des abréviations utilisées couramment en aéronautique:

- APU : Auxiliary Power Unit (Groupe Auxiliaire de Puissance constitué d'une turbine entraînant un générateur électrique, permettant le démarrage des réacteurs et le conditionnement d'air au sol)
- BCRU : Battery Charge Rectifier Unit
- TR : Transformer Rectifier
- VFG : Variable Frequency Generator
- PMG : Permanent Magnet Generator
- ESS : Essential (caractérise les éléments essentiels devant être alimentés en dernier secours)
- STAT INV : Static Inverter
- BAT : Batteries
- EXT : Branchement extérieur (prise de park utilisée au sol dans les aéroports)
- GEN : Generator
- POR : Point of Regulation (en général, tension simple 115V).

Liste des principales grandeurs

- I_f : courant inducteur de l'alternateur (main exciter field current)
- f : fréquence des courants et tensions du réseau de bord AC
- n, N, Ω : vitesse du rotor de l'alternateur, exprimée respectivement en tr/s, tr/mn et en rd/s
- n_{in} , N_{in} , Ω_{in} : vitesse d'entrée au niveau du réacteur, exprimée respectivement en tr/s, tr/mn et en rd/s
- k_m : Rapport de multiplication de la fréquence de rotation réacteur
- p : nombre de paire(s) de pôles de l'alternateur

- $\cos \varphi$: déphasage entre I_s et V_s
- v_{sa} , v_{sb} et v_{sc} : tensions simples délivrées par le stator d'un alternateur phases (a, b, c), exprimées en V
- i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} : courants par phase statoriques d'un alternateur (a, b, c), exprimés en A
- $M_{si,sj}$: inductance mutuelle stator entre i et j
- $M_{si,r}$: inductance mutuelle stator phase i par rapport au rotor
- R_{si} : résistance phase i du stator
- L_{si} : inductance propre phase i du stator si
- R_r : résistance enroulement rotorique
- Φ_i : flux total d'un enroulement (a,b,c)
- λ : coefficient de proportionnalité fem induite alternateur
- P_s : puissance électrique au stator, exprimée en W
- P_{in} : puissance électrique utile nominale, exprimée en W
- S_s : puissance apparente électrique au stator, exprimée en V.A
- Γ_r : couple résistant sur l'arbre alternateur
- Γ_{in} : couple résistant sur l'arbre au niveau du réacteur
- i : indice valant a, b ou c
- i' : indice valant a', b' ou c'
- P : puissance active exprimée en W
- Q : puissance réactive exprimée en Var
- D : puissance déformante exprimée en VA
- S : puissance apparente exprimée en VA
- α_j : coefficient d'accroissement des pertes joules en ligne
- THD_i : taux de distorsion en courant
- P_{jT} : pertes joules totales en ligne
- P_{j1} : pertes joules en ligne dues au courant fondamental
- T : température, T_a : température ambiante, T_{max} : température maximale
- m_v : masse volumique
- c_p : chaleur massique à pression constante
- q : densité de puissance.
- ℓ : longueur câble
- ρ : résistivité aluminium
- S_c : section aluminium du conducteur
- $i_{a'}$, $i_{b'}$ et $i_{c'}$: courants dans le secondaire de l'autotransformateur (a', b', c'), exprimés en A
- $i_{a''}$, $i_{b''}$ et $i_{c''}$: courants dans le secondaire de l'autotransformateur (a'', b'', c''), exprimés en A
- $\langle i_{dc} \rangle$: courant moyen de sortie du redresseur de courant
- v_{dc} : tension de sortie aux bornes du condensateur du redresseur de courant
- ω : pulsation des courants et des tensions, exprimée en rd/s

PRESENTATION GENERALE

Depuis plusieurs années, l'avion gros porteur A380 d'AIRBUS est à l'étude. Cette année devrait voir la concrétisation de ce projet. Cet avion utilise de plus en plus de systèmes électriques et les progrès en électronique de puissance permettent la mise en oeuvre de conversions d'énergie performantes et fiables. Cette utilisation croissante de l'électricité dans ce domaine d'application est motivée notamment par une réduction de masse de l'appareil et une simplification des réseaux hydrauliques lourds et contraignants en terme de maintenance.

Nous nous intéresserons dans ce problème à la génération d'énergie électrique ainsi qu'aux différents convertisseurs de puissance utilisés dans ce type d'avion.



Caractéristiques générales :

- Motorisation : 4 réacteurs Rolls-Royce
- Capacité : 555 passagers
- Rayon d'action : peut atteindre 14 800 km
- Charge utile : de l'ordre de 150 tonnes pour la version cargo

Principales innovations :

- Commandes de vol électriques
- Réseau alternatif à fréquence variable
- Réseau de secours totalement électrique
- Servocommandes à puissance électrique

Remerciements :

L'auteur remercie les sociétés AIRBUS et THALES pour la fourniture des données numériques qui ont permis la réalisation de ce sujet.

L'architecture type d'un avion de cette catégorie (représentée ici figure 1 pour un Biréacteur) fait intervenir 2 circuits hydrauliques (H1 et H2) et deux réseaux électriques (E1 et E2) complètement indépendants.

Circuits hydrauliques

La génération hydraulique est obtenue par des pompes entraînées par les réacteurs. Par soucis de sécurité, les deux circuits sont totalement indépendants et les pompes d'un même circuit sont placées du même côté de l'avion : vert à gauche et jaune à droite.

Circuits électriques

▪ Réseau alternatif :

La génération du réseau alternatif triphasé à fréquence variable est assurée par 4 VFG (Variable Frequency Generator) directement accouplées sur l'étage haute pression de chaque réacteur.

L'excitation de l'alternateur est commandée de façon à obtenir une tension efficace de sortie régulée de **115/200 V** alternative. (Appelé POR Point of Regulation)

La fréquence du réseau est comprise entre **360 et 800 Hz** environ.

Chaque réacteur entraîne un VFG qui alimente sa propre barre bus principale alternative. L'alimentation de chaque barre peut être également réalisée à l'aide de l'APU (Auxiliary Power Unit).

En cas de secours une éolienne associée à un convertisseur statique (RAT) vient alimenter le bus essentiel alternatif de façon à conserver les fonctions essentielles.

▪ Réseau DC :

Le réseau continu **28 V** comprend une fonction "alimentation sans coupure". Cette fonction est assurée par le BCRU (Batteries Charger Rectifier Unit) qui cumule les fonctions redresseur et chargeur de batteries.

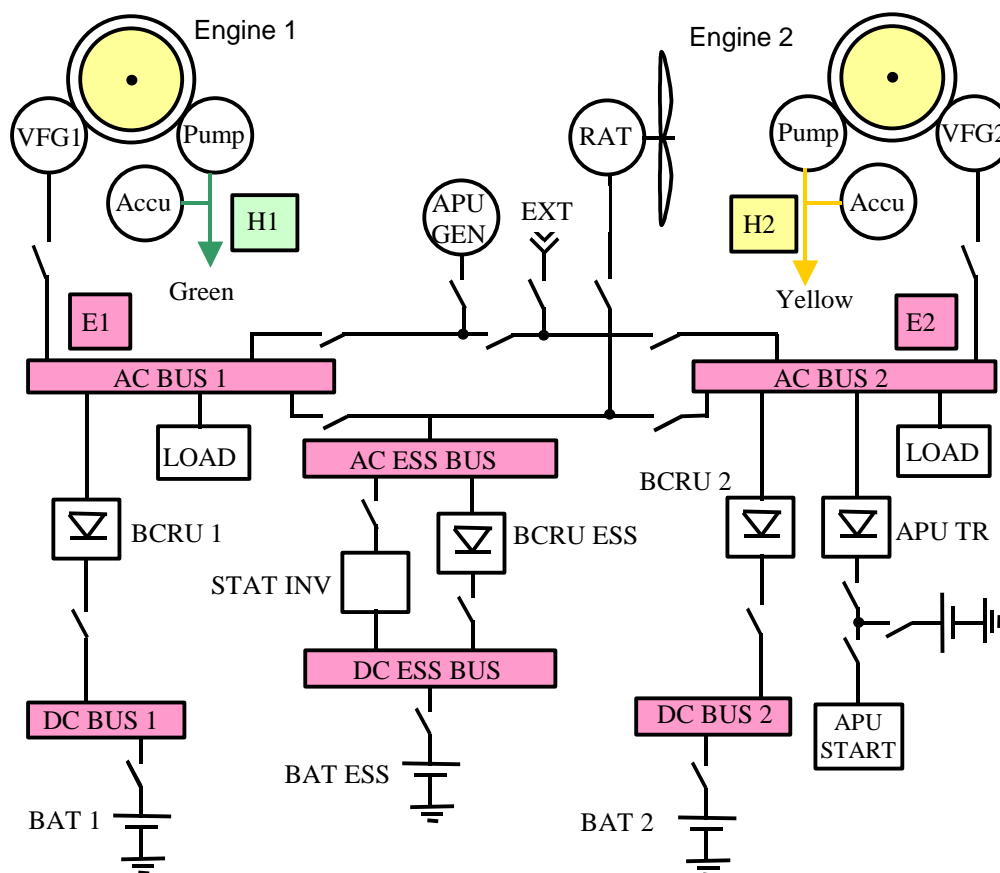


Figure 1: Architecture type d'un réseau pour un biréacteur

PARTIE A : GENERATION ELECTRIQUE PRINCIPALE

La génération du réseau alternatif de bord est réalisée à l'aide de quatre alternateurs VFG.

Chaque alternateur VFG constitue une génératrice autonome à trois étage (PMG, excitatrice, alternateur) accouplée directement au réacteur par un multiplicateur.

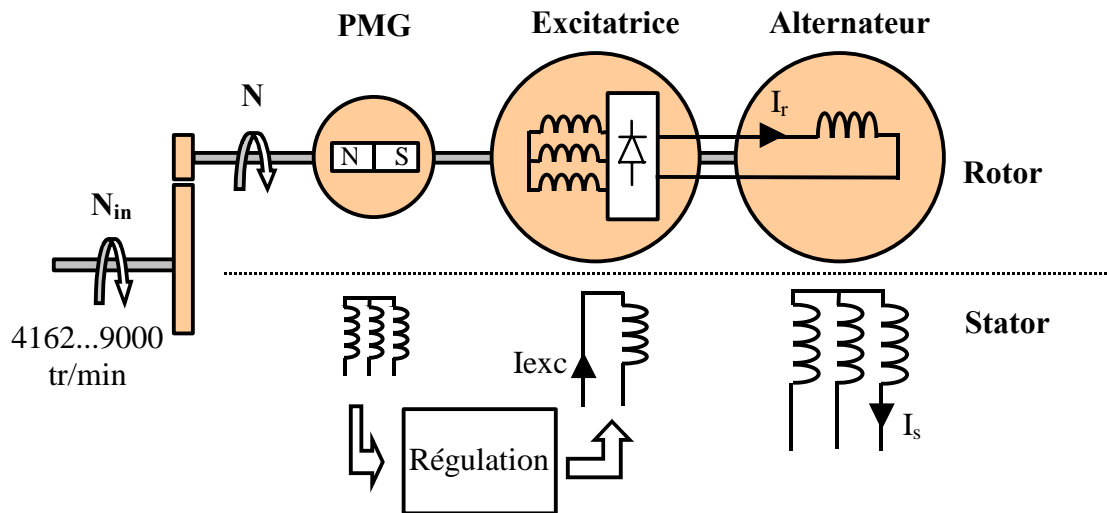


Figure A. 1 : Schéma de principe d'un alternateur VFG

- Alternateur couplage étoile, 370 Hz à $N=11100$ tr/min
- Valeurs nominales : $S_{sn}=150$ kVA, $V_{sn} = 115$ V
- Rapport de multiplication de la fréquence de rotation réacteur N_{in} par rapport à la fréquence de rotation de l'arbre machine N : $k_m = \frac{N}{N_{in}} = 2,667$
- Excitation alternateur qui peut être ajustée de façon à obtenir une tension de sortie régulée à 115/200 V

NOTATION UTILISEE

- p : Nombre de paire de pôles de l'alternateur.
- θ : Angle mécanique.
- θ_0 : Constante représentant la position angulaire initiale du rotor par rapport au stator.
- Ω : Vitesse angulaire du rotor de l'alternateur.

HYPOTHESES :

Sauf mentions contraires :

- l'alternateur est supposé à entrefer constant et ne présentant pas de fuites magnétiques.
- la saturation, l'hystérésis et les courants de Foucault des matériaux magnétiques seront négligés.

A.1 Etude des bobinages

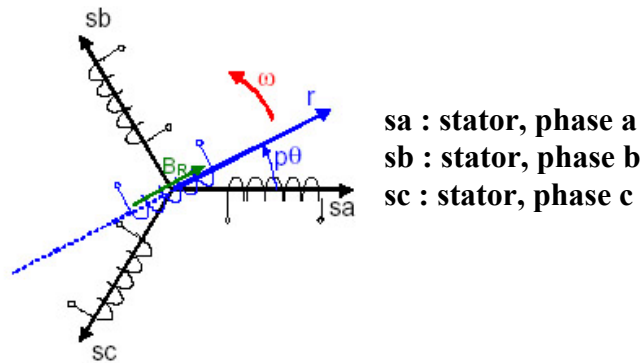


Figure A. 2 : Représentation schématique des enroulements statoriques dans le repère $p\theta$ (angle électrique)

A.1.1 Expliciter le terme de "génératrice 3 étages" en précisant le rôle de chaque sous-fonction. Quels sont les avantages d'un tel système par rapport à une excitation traditionnelle ?

A.1.2 Exprimer la fréquence de sortie réseau f en fonction de N_{in} , k_m et p .

A.1.3 En déduire le nombre de paire de pôles de l'alternateur et les excursions maximale, f_{max} , et minimale, f_{min} , de la fréquence réseau.

A.1.4 Justifier sur des critères mécaniques l'intérêt en aéronautique d'un fonctionnement à fréquence variable sur une telle gamme.

A.1.5 Calculer l'intensité nominale par phase I_{sn} de l'alternateur.

Le flux émis par un pôle $\Phi(t)$ est de la forme $\phi(t) = \hat{\phi} \cdot \cos(p(\Omega t - \theta_0))$.

A.1.6 Exprimer $e_c(t)$ la force électromotrice induite dans une spire d'induit en fonction de $\hat{\phi}$, f , p , t , et θ_0 .

La force électromotrice induite pour une phase i est donnée par : $e_{si}(t) = k_b \cdot N_b \cdot e_c(t)$ où k_b représente un coefficient de bobinage et N_b le nombre de spires pour une phase. Les tôles cobalt du circuit magnétique permettent une induction maximale de $0,7 \text{ T}$ correspondant à un $\hat{\phi} = 6,843 \cdot \text{mWb}$ atteint pour un courant d'excitation $I_r = 2,95 \text{ A}$.

$$k_b = 0,85 \text{ et } N_b = 16 \text{ spires}$$

remarque : la valeur numérique de k_b donnée ici fait intervenir un facteur de forme non pris en compte dans les calculs par souci de simplification.

A.1.7 Quelle est l'origine physique de ce coefficient de bobinage ?

A.1.8 Exprimer E_s la valeur efficace de la fem induite par phase en fonction de (f, I_r) .

A.1.9 Tracer sur le document réponse **REP.A.1** $E_s = f(I_r)$ pour les valeurs extrêmes de f . Conclure.

A.2 Modélisation de l'alternateur

Le sens des courants traversant le stator de l'alternateur est pris en convention générateur.

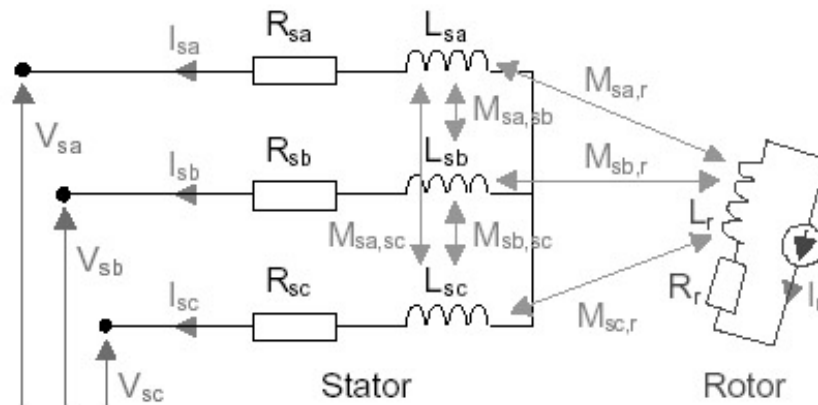


Figure A. 3 : Schéma électrique alternateur

Avec :

- indice $i = a, b$ ou c .
- $M_{si,sj}$: inductance mutuelle stator entre i et j
- $M_{si,r}$: inductance mutuelle stator phase i / rotor
- R_{si} : résistance phase i du stator
- L_{si} : inductance propre phase i du stator

A.2.1 Exprimer sous forme matricielle le flux total statorique par phase $\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$ en fonction de $i_{sa,b,c}$ et I_r en faisant intervenir les différentes inductances et mutuelles.

A.2.2 Exprimer l'équation liant v_{si} à i_{si} et Φ_{si} .

Notre machine étant supposée à entrefer lisse, non saturée et à répartition sinusoïdale, on peut, pour donner un modèle simplifié, faire les simplifications suivantes:

- Résistances du stator : $R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s$
- Inductances propres du stator : $L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_s$
- Inductances mutuelles au stator : $M_{sa,sb} = M_{sb,sc} = M_{sc,sa} = M_s$
- Inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et l'enroulement rotorique : proportionnelles à M et fonction de la position du rotor.

De plus l'alimentation est supposée sinusoïdale, triphasée et équilibrée ($i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$)

A.2.3 En tenant compte des simplifications proposées, donner sous forme matricielle la nouvelle expression du flux total statorique en fonction de $L_s, M_s, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, M, p, \theta$ et I_r .

A.2.4 Montrer que la tension simple statorique v_{si} peut se mettre sous la forme $v_{si} = e_i - R_s i_{si} - L \cdot \frac{di_{si}}{dt}$. Exprimer e_i pour chaque phase et donner l'expression de sa valeur efficace E_s . Donner l'expression et la signification de la constante L .

A.3 Point de fonctionnement et caractéristiques

L'alternateur est modélisé par le modèle de Behn-Eschenburg.

La figure A.4 présente le schéma équivalent par phase de l'alternateur.

En annexe sont disponibles les essais à vide et en court circuit de la machine.

- La fréquence est variable de **370 Hz à 770 Hz**.
- $R_s = 0,4 \text{ m}\Omega$
- On pose : $E_{si} = \lambda \omega \cdot I_r$ (valeur efficace de la fem d'une phase)

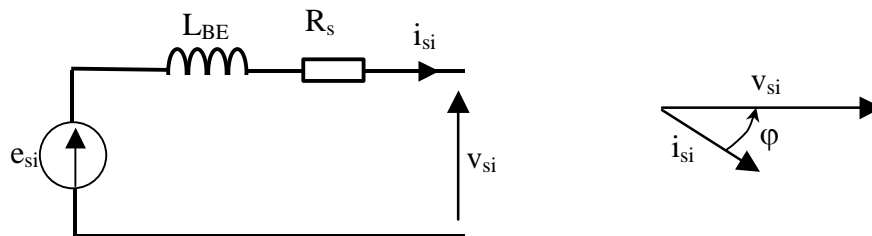


Figure A. 4 : *Modèle équivalent par phase*

A.3.1 Calculer le coefficient λ pour différents points de la caractéristique à vide et remplir la ligne correspondante du tableau du document réponse **REPA.1**. Préciser son unité.

A.3.2 A partir de la caractéristique $E_{si} = f(I_r)$ à 370 Hz (Annexe1), tracer rapidement sur votre feuille l'allure de $E_{si} = f(I_r)$ pour un essai à vide à 770Hz .

A.3.3 Calculer la réactance synchrone $X_{BE} = L_{BE} \cdot \omega$ pour la partie linéaire et en déduire la valeur de l'inductance L_{BE} .

A.3.4 Comment aurait été modifiée la caractéristique $I_{scc} = f(I_r)$ si l'essai en court circuit avait été réalisé à 770Hz. Pourquoi ?

A.3.5 Calculer les valeurs efficaces (V_s, I_s) du point de fonctionnement à $f = 500 \text{ Hz}$ et $I_r = 2A$ correspondant à une charge R_{ch} pure de $0,5 \Omega$. Représenter le diagramme de Behn-Eschenburg en respectant les ordres de grandeur des amplitudes et des angles. Ecrire sur le diagramme le nom de chaque vecteur et angle.

A.3.6 Dans quel sens évoluent les grandeurs ϕ, I_s et V_s si f augmente ? Pourquoi ?

Dans la suite la valeur de R_s sera négligée devant X_{BE} .

L'excitation principale I_r de l'alternateur est maintenue constante. La charge utile alimentée par l'alternateur peut être assimilée à une impédance $\underline{Z}_{ch} = R_{ch} + jL_{ch} \omega = Z_{ch} \cdot e^{j\phi}$.

A.3.7 Tracer l'allure du diagramme de Behn-Eschenburg pour un facteur de puissance de 0,75 (charge inductive).

A.3.8 Exprimer de façon littérale la valeur efficace V_{si} en fonction de $\lambda, \omega, R_{ch}, L_{ch}, L_{BE}$ et I_r .

A.3.9 Exprimer de façon littérale le couple résistant sur l'arbre moteur Γ_r en fonction de p , λ , ω , R_{ch} , L_{ch} , L_{BE} et I_r . (*rappel : les différentes pertes sont négligées*)

A.3.10 Application numérique : On donne $R_{ch} = 0,5 \Omega$ et $L_{ch} = 150 \mu H$. Remplir le tableau du document réponse **REP.A.1** pour les 2 fréquences extrêmes.

A.3.11 Conclure sur la nécessité d'une régulation de V_s et sur l'effet de la variation de f sur le $\cos\phi$ de la charge.

A.3.12 Proposer une solution pour la boucle de régulation en précisant la méthode utilisée pour la mesure de V_s .

On suppose maintenant que V_{si} est parfaitement régulée à 115 V efficaces quel que soit le régime de charge. Pour simplifier on prendra $\lambda = 0,022$ quelle que soit la valeur de I_r .

On désire tracer la caractéristique au point de régulation, de I_r en fonction de la puissance apparente $S_s = 3.V_s.I_s$ demandée pour deux facteurs de puissance de la charge (1 et 0,75).

A.3.13 Exprimer littéralement I_r en fonction de S_s , ϕ , λ , ω , L_{BE} , et V_s .

A.3.14 Remplir le tableau du document réponse **REP.A.2** pour les 2 fréquences extrêmes et pour les facteurs de puissance de la charge (1 et 0,75 inductif).

On se place maintenant à puissance utile constante, avec une charge résistive pure. On suppose toujours la tension V_{si} parfaitement régulée à 115 V.

Le but est de calculer le couple résistant Γ_{in} ramené sur le réacteur pour un fonctionnement à puissance nominale ($P_{sn} = 150 \text{ kW}$) en tenant compte des pertes.

A.3.15 Calculer les pertes joules statoriques P_{js} pour le fonctionnement nominal.

A.3.16 L'ensemble des pertes complémentaires fer, mécaniques et dues à l'excitation des 3 étages de la FVG est caractérisé par la relation $P_{comp} = (850 + 45 \cdot 10^{-2} \Omega)$ exprimé en Watts. En faisant un bilan des puissances, exprimer le couple résistant sur l'arbre rotorique Γ_r en fonction de ω .

A.3.17 Le multiplicateur a un rendement η_m . Exprimer le couple résistant exercé sur l'étage basse pression du réacteur Γ_{in} en fonction de ω .

A.3.18 Application numérique. $\eta_m = 98\%$. $f = 500 \text{ Hz}$, $P_{sn} = 150 \text{ kW}$. Calculer Γ_{in} .

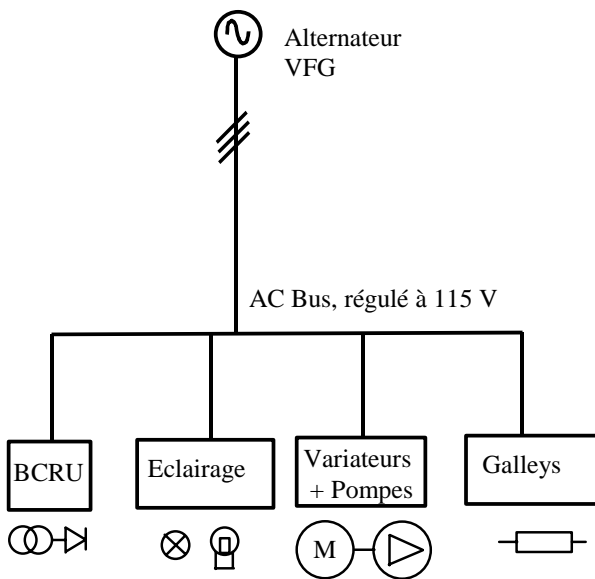
PARTIE B : DISTRIBUTION

Le réseau de bord dispose de moyens de protection des matériels et des personnes :

- liaison alternateur VFG-AC BUS : en temps réel, les courants sur chaque phase sont mesurés à la sortie de l'alternateur et à l'arrivée sur le bus AC. Un défaut amène la désexcitation de l'alternateur puis son isolement; le bus AC étant alimenté par l'un des 3 autres alternateurs.
- départs à partir du bus AC : disjoncteurs.

La structure métallique de l'avion est utilisée comme conducteur neutre.

D'autre part la prolifération de charge de type non linéaires a pour conséquence la présence importante d'harmoniques sur le réseau de bord.



Différents types de charges sont alimentées :

- BCRU : Transformateur et redresseur pour le réseau DC.
- Variateurs + pompes hydrauliques
- Eclairage cabine
- Galleys : plusieurs circuits de type réchauffage cuisine sont prévus.

Figure B. 1: partie du réseau de bord étudiée

B.1 Puissances et harmoniques

Définitions : voir Annexe 5

Hypothèses : pour l'étude théorique suivante on se limitera à une étude en monophasé où :

- la tension simple réseau est $v(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$ prise comme origine des phases.
- le courant en ligne est : $i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sqrt{2} \cdot \sin(k\omega t - \varphi_k)$
- I représente la valeur efficace de $i(t)$

B.1.1 Dans le cas d'un courant **sinusoïdal pur** à la pulsation ω , montrer que la puissance instantanée se met sous la forme $p(t) = P + p_f(t)$. Exprimer P et $p_f(t)$ et donner leurs significations.

B.1.2 Exprimer et tracer l'allure de $p(t)$ pour une charge de type capacitive pure. Quel lien peut on faire entre l'existence de la puissance réactive Q et $p(t)$?

B.1.3 En présence d'harmoniques de courant, exprimer (en le justifiant) les puissances P , Q et D en fonction de V , et des I_k , φ_k concernés.

B.1.4 Pour un même service, défini par des puissances active et réactives constantes, exprimer l'accroissement relatif des pertes joules en ligne ($\alpha_j = \frac{\Delta P_j}{P_{jl}}$) dû à la présence de puissance déformante, en fonction de P, Q et D. En déduire l'expression de α_j en fonction du taux de distorsion en courant THD_i. (remarque : pertes joules totales en ligne $P_{jT} = P_{jl} + \Delta P_j$)

B.1.5 Application numérique : Remplir le tableau du document réponse **REP B.1**. (valeurs et unités). Remarque : les mesures ont été faites à l'arrivée sur le bus AC et l'on suppose le réseau de bord **triphase** parfaitement équilibré.

B.1.6 Conclure sur les effets d'une importante pollution harmonique du courant sur les réseaux et sur les dispositifs associés.

B.2 Protection des personnes

Le neutre de l'alternateur est relié à la structure métallique de l'avion.

B.2.1 Citer les principaux schémas de liaison à la terre existants ainsi que les moyens de protection associés au premier défaut.

B.2.2 Quel est le régime de neutre de notre réseau de bord ? Quel est l'appareillage assurant la protection des personnes ?

B.2.3 Dans ce cas, quelle contrainte a-t-on entre l'appareillage de protection et le courant de défaut?

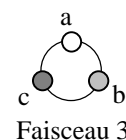
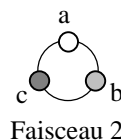
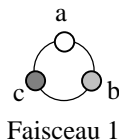
B.3 Câbles et court circuit

On désire choisir le type de câble nécessaire pour réaliser la liaison alternateur VFG - AC bus.

Les caractéristiques techniques sont les suivantes :

- Courant d'emploi efficace pour une phase en régime permanent $I_{\text{emploi}} = 450 \text{ A}$.
- L'installation comprend 3 câbles par phase mis en faisceau indépendant.

(Donc 3 câbles par faisceau)



- Altitude maximum 40 000 pieds
- Accroissement maximal de température en régime permanent 40°C.
- Température maximale supportée par l'isolant : $T_{\text{max}} = 200^\circ\text{C}$.

Etude en régime permanent

B.3.1 Quelle est l'origine physique des coefficients correcteurs à appliquer sur l'intensité admissible d' un câble ? (cf annexe 3)

B.3.2 Citer les raisons principales qui conduisent à limiter la densité de courant dans un câble.

B.3.3 A l'aide des annexes 3 et 4 proposer une référence de câble qui satisfasse au cahier des charges. Pour cela on calculera le courant équivalent thermique I_z pour un câble du faisceau considéré en tenant compte de l'environnement.

B.3.4 Pour quelles raisons principales (mécanique, électrique, thermique ...) n'utilise t-on pas un seul câble par phase ?

Etude en court circuit

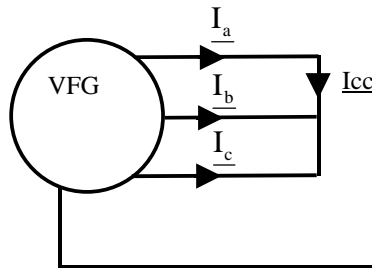


Figure B. 2: Alternateur en court circuit

Le calcul des courants de court circuit sur des distances relativement réduites (avion) est assez complexe, et ne sera pas abordé dans ce sujet.

La protection en cas de court circuit, pour la liaison VFG-AC bus, est assurée par une désexcitation rapide de l'alternateur. Le but est de calculer le temps maximum de réaction laissé à la boucle de régulation de façon à respecter la contrainte thermique maximale sur le câble.

On peut considérer le système comme adiabatique au regard de l'évolution rapide de la température du câble. L'équation de la chaleur s'écrit donc :

$$m_v c_p \frac{\partial T}{\partial t} = q$$

T température, m_v masse volumique, c_p chaleur massique à pression constante, q densité de puissance en $W.m^{-3}$.

Notation : longueur câble ℓ , résistivité aluminium ρ , section du conducteur S_c , température ambiante T_a , température maximale T_{max} .

B.3.5 En partant des pertes joules volumiques dans le câble, montrer que la contrainte thermique se met sous la forme $i^2 \cdot t \leq K^2 \cdot S_c^2$. Exprimer K en fonction de ρ , m_v , c_p , T_{max} et T_a .

B.3.6 Calculer la valeur numérique de K pour le câble choisi. Préciser son unité (cf annexe 4). On se placera dans les conditions suivantes : $T_a = 20^\circ C$, $T_{max} = 200^\circ C$ (pour simplifier les calculs ρ , m_v et c_p seront considérés comme constants et pris à $20^\circ C$).

B.3.7 Si le courant de court circuit maximal présumé est de 2045A pour un seul câble (cas le plus défavorable), calculer le temps t_{max} correspondant à la contrainte thermique maximale. Conclure.

PARTIE C : CORRECTION DE FACTEUR DE PUISSANCE

Une fréquence de réseau de bord variable implique la nécessité de passer par un étage continu pour différents équipements. Les servocommandes à puissance électrique comportent en général une pompe hydraulique entraînée par un moteur synchrone auto-piloté alimenté via un étage continu.

Les solutions possibles de conversion alternatif-continu doivent donc tendre à réduire les harmoniques de courant réinjectés sur le réseau et proposer une faible ondulation de la tension de sortie redressée.

C.1 Etude de l'autotransformateur

Nous allons étudier l'ATRU (Auto Transformer Rectifier Unit) dont le schéma complet est donné en Annexe 6.

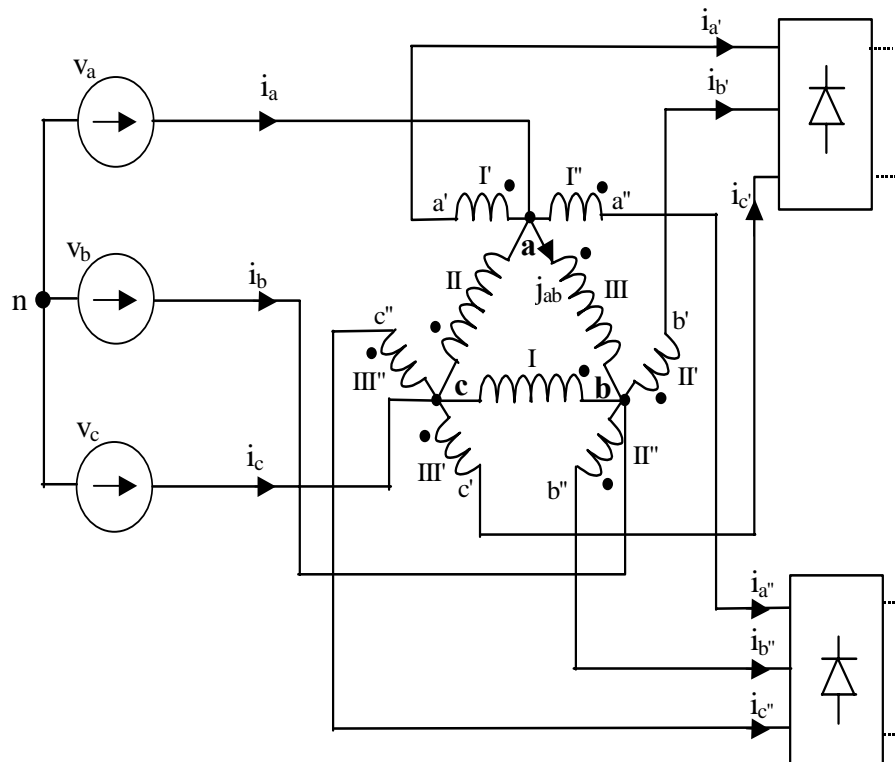


Figure C. 1: Auto Transformer Rectifier Unit

Caractéristiques autotransformateur :

- Le circuit magnétique est composé de trois colonnes A, B, et C identiques reliés par 2 culasses (cf figure C.2).
- Chaque colonne comporte 3 enroulements : 1 enroulement primaire (I, II, III) et deux enroulements secondaires (I', II', III' et I'', II'', III'). Le sens des bobinages est donné par le point indiquant les bornes homologues.
- Les bobines parallèles sur la figure C.1 sont disposées sur une même colonne. Exemple : les bobines secondaires I' et I'' sont sur la même colonne que la bobine primaire I.

Notation :

- Les courants dans les enroulements primaires sont notés j_{ab} , j_{bc} et j_{ca} . Ils forment un système triphasé direct équilibré (j_{ab} , j_{bc} , j_{ca}).
- Le point neutre n est la référence commune de toutes les tensions utilisées (v_a , v_a' , v_a'' , v_b , ...)

- Le système triphasé équilibré et direct (v_a, v_b, v_c) représente le réseau de bord avec une valeur efficace constante V égale à 115V (tension simple) de fréquence f .
- Les tensions (u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}) sont les tensions composées.
- Le courant magnétisant et les pertes dans le circuit magnétique seront négligées.
- Les ponts redresseurs comportent 6 diodes chacun (PD3).
- Le rapport de transformation par colonne est $m_c = \frac{N_s}{N_p}$.
- Le rapport de transformation externe est $m = \frac{V_{a'}}{V_a} = \frac{V_{a''}}{V_a}$ (rapport des valeurs efficaces).
- N_s est le nombre de spires secondaire ($N_s=N_s'=N_s''$) et N_p le nombre de spires primaire.

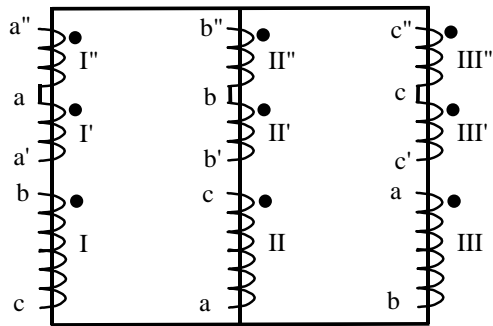


Figure C. 2 : Circuit magnétique et bobinages

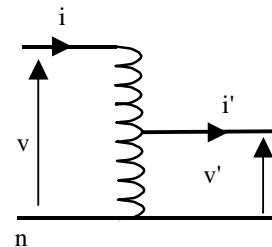


Figure C. 3 : Auto transformateur monophasé

Questions générales :

C.1.1 Quelles sont les spécificités (avantages / inconvénients) d'un auto transformateur ? Vous pourrez vous aider de la figure C.3 pour illustrer vos réponses.

C.1.2 La tension primaire étant parfaitement régulée, quel est l'effet de la variation de la fréquence sur le courant magnétisant et les pertes (que l'on précisera) dans le circuit magnétique ?

Questions sur l'autotransformateur triphasé :

C.1.3 On désire disposer d'un système de tensions de façon à pouvoir réaliser un redressement à diode dodécaphasé. Montrer que le déphasage entre $\vec{V}_{a''}$ et $\vec{V}_{a'}$ doit être de $\frac{\pi}{6}$.

C.1.4 Donner un diagramme de Fresnel des tensions simples ($\vec{V}_a, \vec{V}_b, \vec{V}_c$) et composées ($\vec{U}_{ab}, \vec{U}_{bc}, \vec{U}_{ca}$) primaire. Construire graphiquement les tensions simples secondaire $\vec{V}_{a'}$ et $\vec{V}_{a''}$ de façon à respecter la condition de la question précédente. Placer soigneusement les points a, b, c, a', a'', et n sur le diagramme.

C.1.5 Calculer le rapport de transformation par colonne m_c de ce transformateur. En déduire la valeur du rapport de transformation externe du transformateur $m = \frac{V_{a'}}{V_a}$.

C.1.6 Ecrire la relation que l'on a entre les courants au nœud a.

C.1.7 Exprimer le courant j_{ab} en fonction de m_c et des courants de ligne secondaires.

C.1.8 Exprimer le courant de ligne i_a en fonction des courants de ligne secondaires et du rapport de transformation par colonne m_c .

Si l'on suppose que les courants de ligne secondaires sont parfaitement équilibrés pour tous les rangs d'harmoniques présents : $i_i'(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k \cdot \sin(k(\omega t + \alpha_i'))$ et $i_i''(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k \cdot \sin(k(\omega t + \alpha_i''))$, on peut démontrer la formule générale suivante pour $i_a(t)$:

$$i_a(t) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k \cdot \sin(k\omega t) \left[\cos\left(k \frac{\pi}{12}\right) + 2 \cdot m_c \cdot \sin\left(k \frac{\pi}{12}\right) \cdot \sin\left(k \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

Remarque : On prendra pour les questions suivantes $m_c = 0,155$ quelle que soit la valeur trouvée précédemment.

C.1.9 A partir des mesures faites sur le courant de ligne secondaire i_i' ou i_i'' (redresseur triphasé sur charge capacitive), calculer les valeurs efficaces des harmoniques de courant primaire I_{ak} de $i_a(t)$ et remplir le tableau du document réponse **REP.C.1**.

C.1.10 Pour ce cas de fonctionnement précis, calculer la puissance apparente primaire et la puissance apparente secondaire de l'autotransformateur.

C.1.11 Conclure sur l'intérêt de ce type d'autotransformateur par rapport au classique transformateur Dyd.

C.2 Absorption sinus

Le choix de filtres passifs pour éviter la propagation d'harmoniques de courant sur la ligne n'est pas aisé en utilisation à fréquence variable.

On préfère utiliser pour les plus faibles puissances une topologie de convertisseurs à absorption sinusoïdale monophasé.

C.2.1 Proposer un exemple de topologie de convertisseur à absorption sinus que l'on peut associer à un pont de diode monophasé.

C.2.2 Expliquer le fonctionnement du convertisseur choisi et définir une loi de commande.

C.2.3 Quels types de nouvelles perturbations va-t-on générer avec ce type de convertisseur ?

C.2.4 Comment peut-on limiter la propagation de ces perturbations ?

PARTIE D : CONVERTISSEUR DE PUISSANCE

La maîtrise de la qualité réseau, impose la définition précise d'un niveau maximal de pollution harmonique à ne pas dépasser. Des gabarits précis en termes de réjection de courants harmoniques sont donc imposés aux équipementiers, ce qui rend difficile la conversion alternatif-continu à l'aide d'un pont PD3 capacité en tête...

Nous allons étudier un redresseur PD3 fonctionnant en **redresseur de courant** et regarder l'intérêt de cette solution.

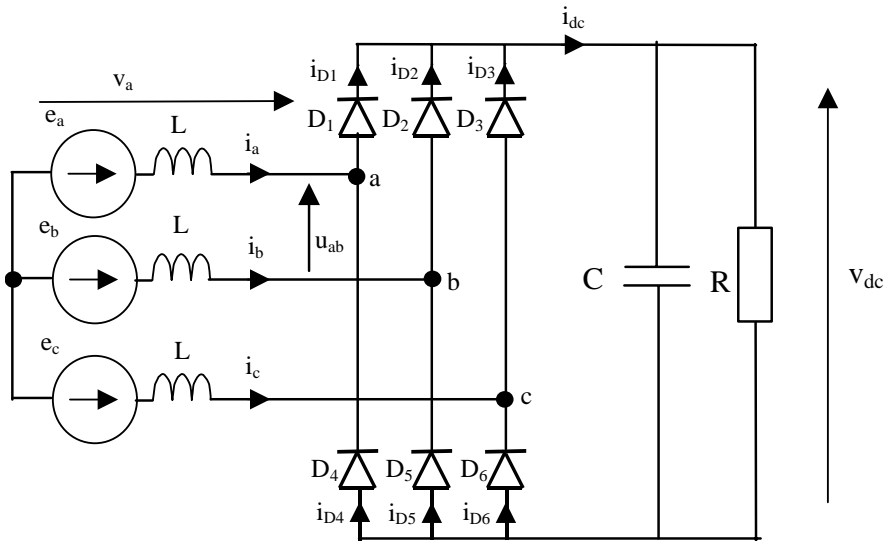


Figure D. 1: Redresseur de courant

Hypothèses d'étude :

- La tension de sortie est supposée continue, correctement filtrée et égale à V_{dc} .
- Le système triphasé équilibré et direct (e_a, e_b, e_c) représente le réseau de bord avec une valeur efficace constante E égale à 115V (tension simple) et une fréquence variable de 370 Hz à 770 Hz.
- Les diodes sont supposées parfaites.
- Les courants (i_a, i_b, i_c) sont parfaitement sinusoïdaux et équilibrés, d'amplitude crête \hat{I} et de valeur efficace I .
- $e_a(t)$ est prise comme référence des phases, ψ est le déphasage défini par la figure D.2.

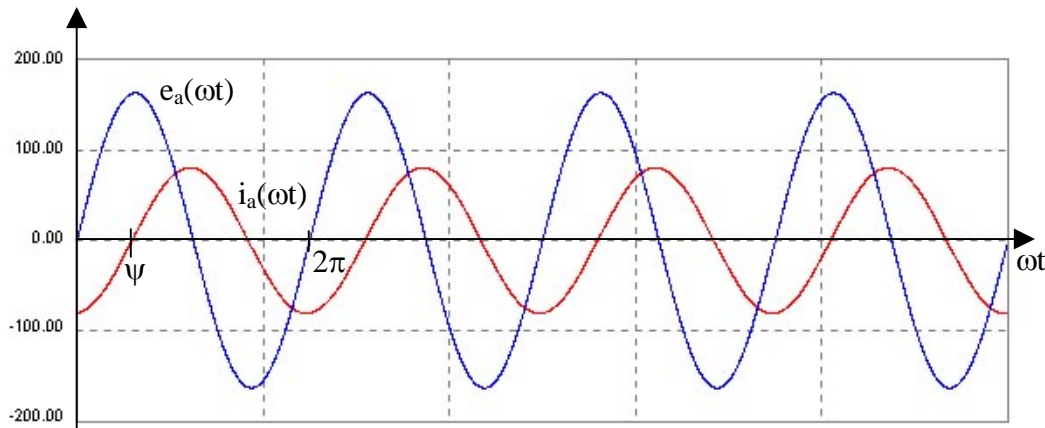


Figure D. 2 : allure de $e_a(\omega t)$ et $i_a(\omega t)$

D.1 Etude théorique

On cherche à exprimer la caractéristique de sortie du convertisseur $V_{dc}=f(\langle i_{dc} \rangle)$.

D.1.1 Quel est le rôle des inductances L ? Comment doit être $L\omega$ par rapport à la charge R ?

D.1.2 Sachant que $i_a + i_b + i_c = 0$, déduire le nombre de diodes conduisant simultanément durant les différentes phases de conduction.

D.1.3 En déduire l'allure de $i_{dc}(\omega t)$ et la tracer sur le document réponse **REP.D.1**. Tracer les intervalles de conceptions des différentes diodes.

D.1.4 Exprimer $\langle i_{dc} \rangle$ la valeur moyenne de i_{dc} en fonction de I .

D.1.5 Tracer l'allure de $u_{ab}(\omega t)$ sur le document réponse **REP.D.1**.

D.1.6 Exprimer v_a en fonction des tensions composées. Tracer l'allure de $v_a(\omega t)$ sur le document réponse **REPD.1**. (*Laisser clairement visible les traits de constructions et utiliser des couleurs*)

D.1.7 Par un bilan des puissances, exprimer $\cos\psi$ en fonction de V_{dc} et E .

D.1.8 On peut décomposer $v_a(t)$ en série de Fourier. Exprimer la valeur efficace du premier harmonique V_1 en fonction de V_{dc} . Préciser la valeur de ϕ_1 . (*Attention à la référence des phases...*)

$$v_a(t) = \langle v_a(t) \rangle + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \sin(k\omega t + \phi_k)$$

D.1.9 Si l'on prend le premier harmonique de v_a , on peut écrire: $\underline{I}_a = \frac{E_a - V_{a1}}{jL\omega}$. Exprimer de façon littérale la puissance $P = 3 \cdot \Re(\underline{E}_a \cdot \underline{I}_a^*)$.

D.1.10 Démontrer qu'avec un bilan des puissances (Question **D.1.9** et en sortie du redresseur) on peut écrire $\sin \Psi = \frac{\pi}{3} \left(\frac{L\omega}{E\sqrt{2}} \right) \cdot \langle i_{dc} \rangle$

D.1.11 Exprimer $V_{dc}=f(\langle i_{dc} \rangle)$ à l'aide des réponses aux questions **D1.7** et **D1.10**. en fonction de E , L , ω , et $\langle i_{dc} \rangle$.

D.1.12 Donner l'expression des valeurs extrêmes de la caractéristique (calcul de $\langle i_{dc} \rangle$ pour $V_{dc}=0$ et calcul de V_{dc} pour $\langle i_{dc} \rangle=0$). Pour quelle raison la valeur de V_{dc} pour le point $\langle i_{dc} \rangle=0$ n'est-elle pas juste ? Quelle valeur est-on en droit d'attendre ?

D.2 Point de fonctionnement

les valeurs des composants sont :

- $L=400\mu\text{H}$, $R=0,28 \Omega$, $C=1000\mu\text{F}$

D.2.1 Tracer l'allure de la caractéristique $V_{dc}=f(\langle i_{dc} \rangle)$ pour les 2 fréquences extrêmes sur le document réponse **REP.D.2**.

D.2.2 Donner graphiquement les 2 points de fonctionnement $V_{dc}, \langle i_{dc} \rangle$ pour la valeur de la résistance R. Que peut-on en conclure ?

D.2.3 En réalité le condensateur est remplacé par un banc de batteries, où la tension peut être considérée comme quasiment constante $V_{dc} = 28V$. Quels sont les nouveaux points de fonctionnement $V_{dc}, \langle i_{dc} \rangle$? Que peut-on en conclure sur le fonctionnement de ce convertisseur lorsque la fréquence varie ?

On désire choisir dans une documentation constructeur des diodes pour ce convertisseur pour un fonctionnement tel que décrit à la question D2.3.

D.2.4 Exprimer $I_{D\text{eff}}$ et $\langle i_D \rangle$ en fonction de $\langle i_{dc} \rangle$

D.2.5 Exprimer $\hat{V}_{D\text{inverse}}$ en fonction de V_{dc}

D.2.6 Choisir une référence de diode dans la documentation fournie en annexe. Justifier votre choix sur des critères précis.

Fin du problème