

Introduction

Le système est entraîné, depuis la station motrice située au Pic du Midi (2860 m), par une machine à courant continu à inducteur bobiné et à excitation indépendante dont les caractéristiques nominales figurent sur la plaque signalétique ci-dessous (figure C1). Cette machine à courant continu est alimentée à l'aide d'un variateur de vitesse tout thyristors.

Compte tenu des cycles de fonctionnement, la machine associée au variateur possède une capacité de surcharge de **1,6 fois** son courant nominal.

Les figures C2 et C3 décrivent respectivement le bilan de puissance et le modèle simplifié en régime établi de la machine à courant continu. Dans ce modèle U_m, I_m et E représentent respectivement les **valeurs moyennes** de la tension d'alimentation d'induit, du courant d'induit et de la force électromotrice.

La courbe de l'effort exercé par le câble tracteur sur la poulie motrice en fonction du temps, dans le cas où les cabines montante et descendante sont chargées, est donnée dans le document technique **DT C1**.

On remarquera que les cabines sont d'abord **entraînantes** au départ des stations (Force exercée sur la poulie et vitesse cabine de signes contraires). Ensuite, elles sont entraînées par la machine à courant continu jusqu'à l'arrivée (Force et vitesse de mêmes signes). On supposera que ce scénario est vrai quel que soit le sens de déplacement des cabines.

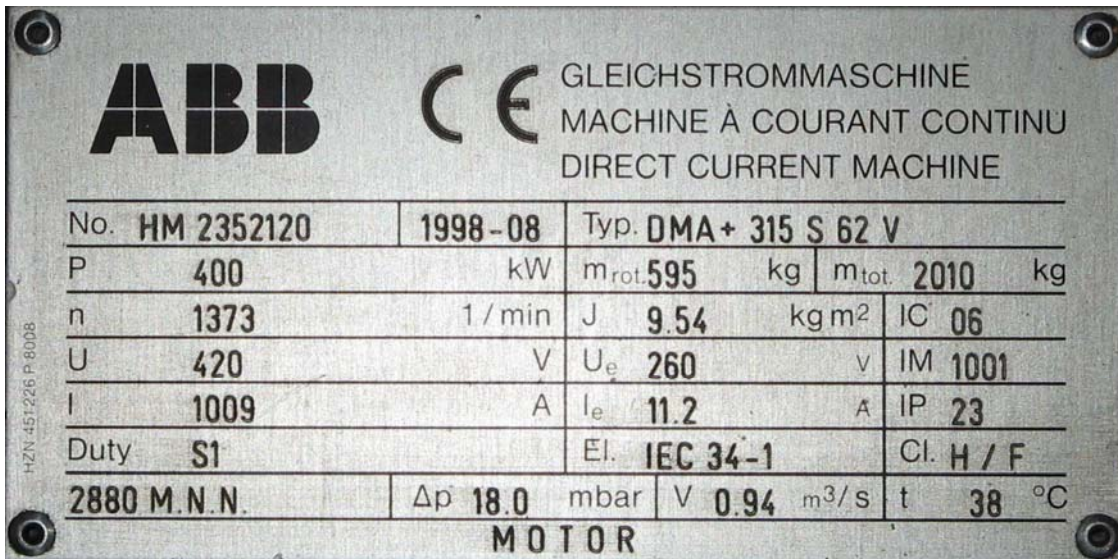
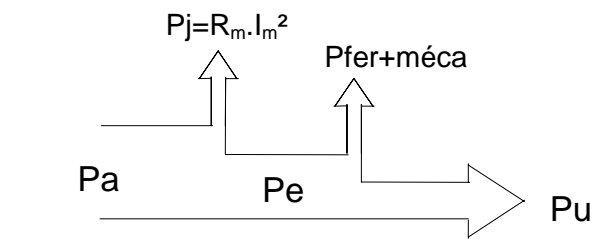


Figure C1 : plaque signalétique de la machine à courant continu.



P_a : puissance absorbée par l'induit
 $P_e = E \cdot I_m = C_e \cdot \Omega$: puissance électromagnétique
 P_u : puissance mécanique utile

figure C2 : bilan de puissance hors excitation

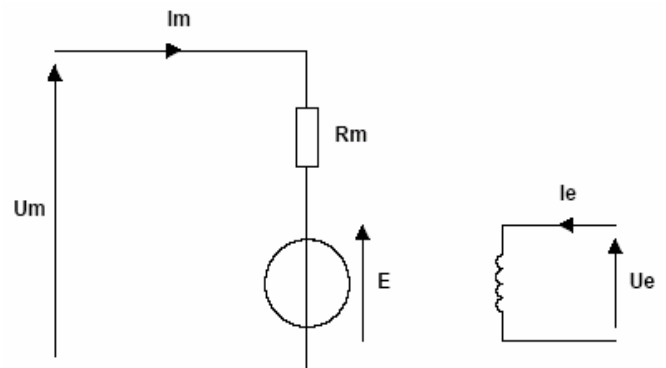


figure C3 : modèle de la machine à courant continu

C.1 Choix de la machine à courant continu

C1.1 La machine à courant continu choisie est donnée pour une puissance de **400 kW** (voir **figure C1**). Cette puissance ne correspond pas à la puissance "catalogue" du constructeur. La machine a en effet été **déclassée** à cause de l'altitude.

Le coefficient de correction ou de déclassement s'écrit :

$$k_d = P1/P2$$

P1 : puissance corrigée

P2 : puissance catalogue

On vous donne la caractéristique de déclassement ci-après. En considérant une température ambiante maximale de **40 °C**, **déterminer** la valeur du facteur de déclassement et la valeur de la puissance "catalogue" de la machine à courant continu la plus proche (voir **document technique DT C2**).

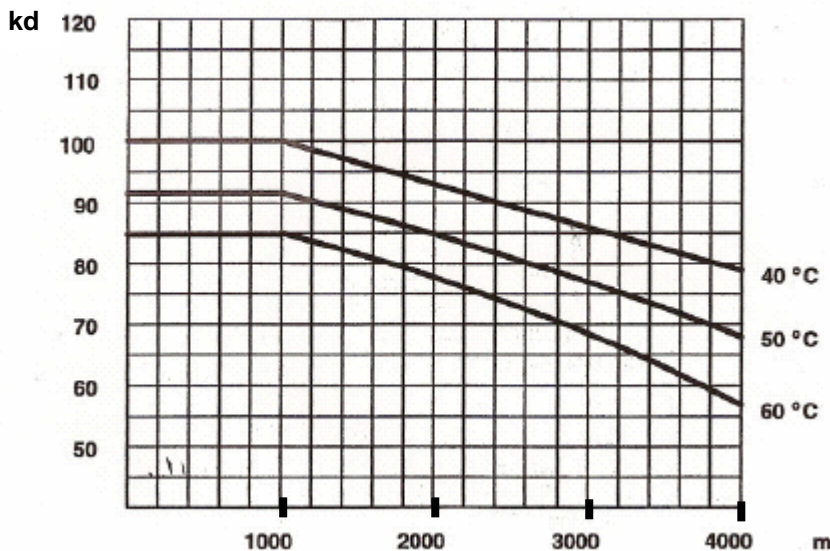


Figure C4 : facteur de correction de la puissance de la machine à courant continu en fonction de l'altitude et de la température ambiante.
(kd est donné en %)

Coefficient de déclassement : $k_d = 0,85$

Puissance catalogue : environ 480 kW ($400/0,85$)

C.2 Refroidissement de la machine à courant continu – Calcul des pertes et du rendement

C.2.1 La machine est refroidie par un ventilateur à entraînement séparé. **Quel est** l'avantage d'une moto-ventilation de ce type, par rapport à une auto-ventilation ?

Une auto-ventilation n'est pas performante pour les faibles vitesses. Les performances de la machine en terme de couple disponible sont réduites à basse vitesse.

C.2.2 La plaque signalétique de la machine à courant continu porte l'indication "CI H/F". **Que signifie-t-elle ?** (Voir document technique **DT C3**)

Classe d'isolation H et classe d'échauffement F. Les capacités de surcharge du moteur sont importantes.

Classe H : 180 °C

Classe F : 155 °C

C.2.3 La résistance de l'enroulement d'induit (froid) mesurée à **20°C** est de **8,5 mΩ**. La résistance de ce même enroulement mesurée à l'équilibre thermique au régime nominal, est de **12 mΩ**. **Calculer** la valeur de la température au point nominal, à l'équilibre thermique et pour une température ambiante de fin d'essai de **40°C**. (voir **DT C3**).

Est-elle compatible avec les indications de la plaque signalétique ?

$T_2 = 125 \text{ °C}$

Cette valeur est compatible avec une classe d'échauffement F (155 °C max)

C.2.4 Compte tenu des indications de la plaque signalétique de la machine à courant continu, **calculer** la puissance absorbée par l'induit au fonctionnement nominal et **en déduire** la valeur des pertes totales (pertes fer+pertes mécaniques+pertes Joule) , hors excitation.

$P_a = 420 \times 1009 = 423,8 \text{ kW}$

$Pertes = P_a - P_u = 23,78 \text{ kW}$

C.2.5 Calculer la part relative (en %) des pertes Joule de l'induit et celle des pertes fer + mécaniques dans les pertes totales déterminées précédemment.

$P_j = 0,012 \times 1009^2 = 12,21 \text{ kW (51,3 \%)}$

NB : On suppose bien entendu un courant parfaitement lissé.

$Pertes \text{ fer + méca} = 23,78 - 12,21 = 11,57 \text{ kW (48,6 \%)}$

C.2.6 Calculer la puissance d'excitation. **En déduire** la valeur du rendement total de la machine à courant continu. Comparer avec la valeur du rendement donnée sur le document **DT C2**.

$Puissance \text{ d'excitation} : U_e \cdot I_e = 260 \times 11,2 = 2912 \text{ W} - Rendement = 93,7 \%$

C.3 Exploitation du modèle de la machine à courant continu pour la prédétermination des grandeurs électriques et mécaniques.

La machine à courant continu fonctionne à flux inducteur nominal constant.

Pour la résistance de l'enroulement de l'induit, on prendra $R_m = 12 \text{ m}\Omega$.

On négligera les pertes fer et mécaniques.

C.3.1 Quelle est la grandeur électrique qui permet le contrôle direct du couple d'une machine à courant continu, à flux inducteur constant ?

Le courant d'induit.

C.3.2 Quelle est la grandeur électrique image de la vitesse de l'arbre d'une machine à courant continu ?

*C'est la tension d'alimentation de l'induit si RI est négligé.
C'est directement la f.e.m*

C.3.3 Calculer le couple utile sur l'arbre de la machine à courant continu, au point de fonctionnement nominal; **en déduire** la valeur du facteur de couple kc qui lie le courant d'induit au couple utile.

$$C = 2783,4 \text{ Nm}$$

$$Kc = 2783,4 / 1009 = 2,75 \text{ Nm/A}$$

C.3.4 En écrivant l'équation de conservation entre la puissance électromagnétique P_e et la puissance mécanique utile P_u , montrer que la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse angulaire Ω de l'arbre de la machine à courant continu et que le facteur de proportionnalité (noté ke) est égal à kc .

$$E.I = T.\Omega = kc.I.\Omega$$

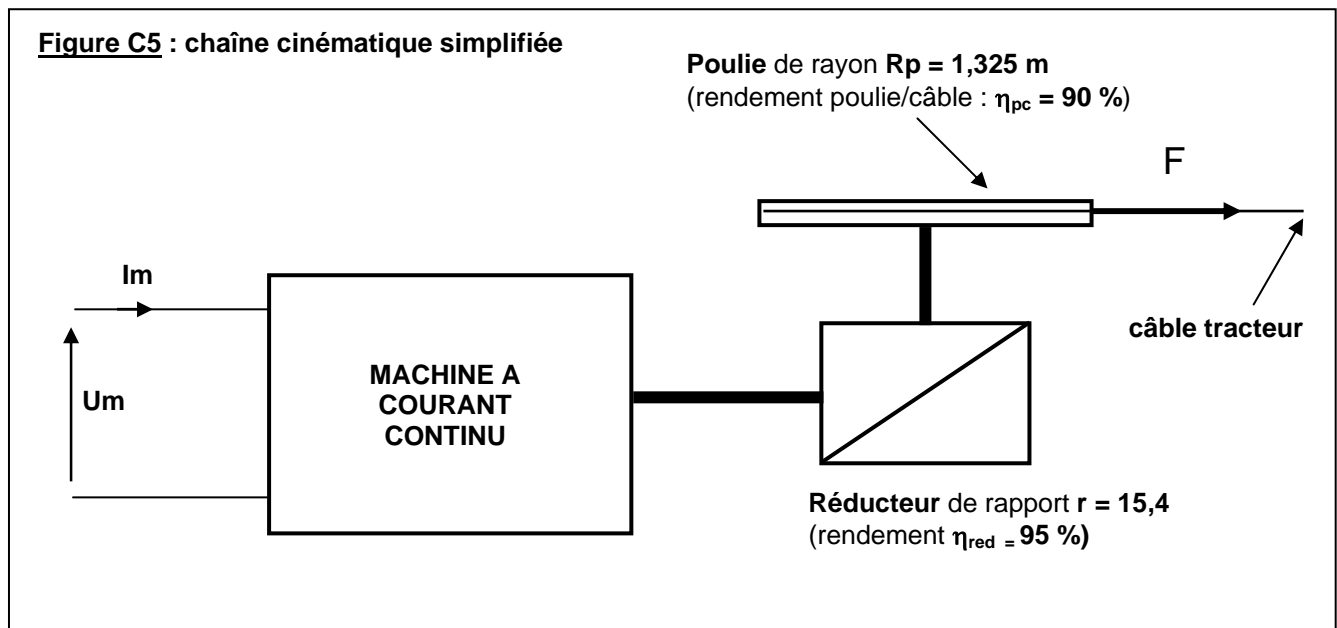
donc $E = kc.\Omega$

C.3.5 Quelle est l'expression de la vitesse angulaire Ω de l'arbre de la machine à courant continu en fonction de la tension U_m , du courant I_m et de kc ?

$$\Omega = \frac{U - R.I}{kc}$$

Pour la suite, on prendra $kc = 2,75 \text{ Nm/A}$.

La chaîne cinématique simplifiée est donnée ci-après. **F** représente la force exercée sur le câble tracteur.



C.3.6 Quelle est l'expression du couple en entrée du réducteur (arbre rapide) en fonction de **F** et des données de la figure C5 ? (voir document technique DT C4).

$$C_{er} = \frac{C_{sr}}{r \cdot \eta_{red}} = \frac{F \cdot R_p}{\eta_{red} \cdot \eta_{pc} \cdot r}$$

C.3.7 En déduire la relation qui exprime la force **F** exercée sur le câble en fonction du courant d'induit **Im**.

Donner la valeur de **F** pour le courant nominal de machine à courant continu.

$$C_m = F \cdot R_p / (15,4 \cdot 0,9 \cdot 0,95) \text{ et } C_m = k_c \cdot I$$

$$\text{Donc } I = F \cdot R_p / (15,4 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot k_c) \text{ ou bien } F = 15,4 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot k_c \cdot I / R_p$$

$$\text{A.N : } F = 27,33 \cdot I = 27,6 \text{ kN}$$

C.3.8 Quelle est la relation qui lie la vitesse linéaire **v** du câble à la tension d'alimentation **Um** et au courant d'induit **Im** ?

Donner la valeur de **v** en m/s pour les valeurs nominales de **Um** et **Im**.

$$v = 0,0312 \cdot U - 0,000375 \cdot I$$

$$\text{A.N : } v = 12,7 \text{ m/s}$$

C.4 Etude de la partie puissance du variateur

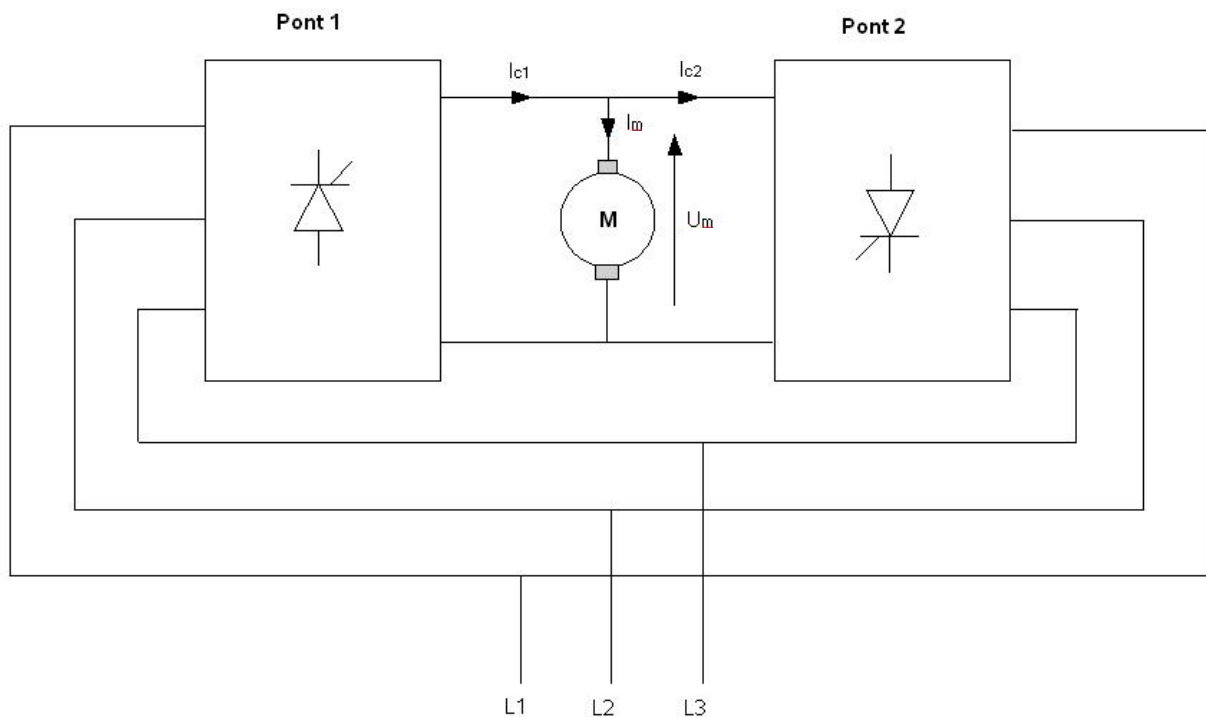


Figure C6 : architecture de la partie puissance du variateur

Le variateur de vitesse associé à la machine à courant continu d'entraînement est de la gamme **DCS** de **ABB**. Il est alimenté à partir du réseau triphasé EDF **3 x 400V – 50 Hz**.

La partie puissance du variateur est composée de 2 ponts de Graëtz à thyristors (pont 1 et pont 2), montés tête-bêche aux bornes de l'induit de la machine à courant continu (**figures C6 et C8**).

Par inversion du courant et/ou de la tension, la machine à courant continu peut fonctionner dans les **4 quadrants** du plan vitesse-couple (**figure C7**).

Ceci autorise, en particulier, des freinages contrôlés et une inversion rapide du sens de rotation.

On supposera que la séquence de commande du variateur utilisé est à logique d'inversion : un seul des 2 ponts est commandé à la fois en fonction du signe du courant.

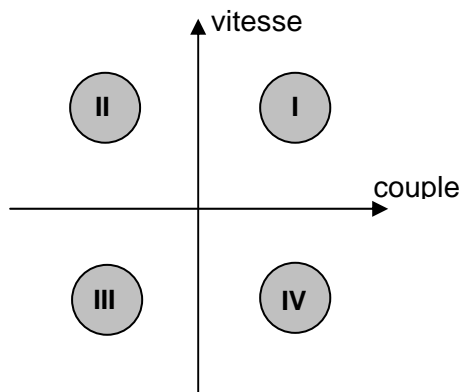


Figure C7 : quadrants du plan vitesse-couple

La structure de puissance des 2 ponts est donnée ci-après.

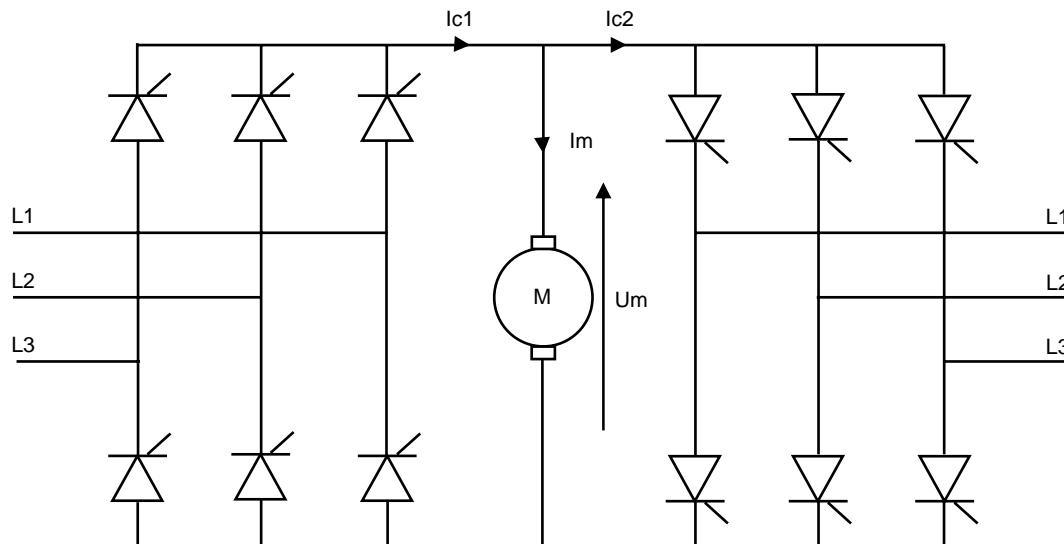


Figure C8 : Schéma de principe de l'étage de puissance du variateur

La tension délivrée en sortie par chacun des ponts est réglée à l'aide des angles de retard à l'amorçage des thyristors. Les angles de retard respectifs seront dénommés par la suite ψ_1 et ψ_2 .

C.4.1 Choix du variateur – Rendement de l'ensemble moto variateur

Le constructeur indique que si le variateur est installé à une altitude supérieure à **1000 m**, un déclassement est nécessaire (voir DT C5).

On suppose que la température ambiante n'excède pas **40 °C**. On rappelle que les caractéristiques nominales de la machine à courant continu sont données sur la plaque signalétique de la **figure C1**.

C.4.1.1 Compte tenu des courbes de l'effort sur la poulie et de la vitesse d'une cabine du document **DT C1**, justifier le choix d'un variateur 4 quadrants.

Pour un sens de rotation du moteur, on parcourt 2 quadrants (I et II). Par symétrie, dans l'autre sens on parcourra également 2 quadrants (III et IV).

C.4.1.2 Déterminer le facteur de déclassement (voir DT C5) puis donner la référence complète du variateur à associer à la machine à courant continu (voir document DT C6). Il faudra en particulier déterminer le calibre, puis attribuer les valeurs adéquates aux lettres **x** et **y** intervenant dans la référence.

*Le facteur de déclassement est de 80 %. On doit avoir calibre variateur $x 0,8 > I_n$ moteur. Il faut donc prendre un calibre de 1500 A.
Référence du variateur : DCS502-1500-41
On a pris $x = 2$ (4 quadrants) et $y = 4$ (réseau 400 V)
Remarque : On peut également considérer l'ensemble motovariateur sans déclassement, faire le choix du variateur et ensuite lui affecter le facteur de déclassement.*

C.4.1.3 En vous aidant du document technique **DT C6**, déterminez les pertes du variateur pour la valeur nominale du courant d'induit, sachant que le choix s'est finalement porté sur un variateur de calibre **1500A**.

*$P_{v-i} = 4069 \text{ W}$; $P_{v-u} = 406 \text{ W}$; $P_{v-c} = 60 \text{ W}$
Pour $I_m = 1009 \text{ A}$, la charge est partielle (67,2%), donc $P_{v-i} = 2375,6 \text{ W}$
Les pertes totales sont donc égales à 2842 W environ*

C.4.1.4 En ne totalisant que les pertes de la machine (excitation comprise) et celles du variateur, **déterminer** le rendement de l'ensemble variateur-machine à courant continu.

*Les pertes totales sont de : $2912 + 2842 + 23780 = 29534 \text{ W}$
Le rendement est donc égal à $400000/(400000+29534) = 93,1 \%$*

C.4.2 : Etude du pont PD3 idéalisé : généralités, expression de la puissance moyenne.

Pour l'étude suivante, on se limitera à un seul pont à thyristors (pont 1) alimentant la machine à courant continu (**figure C9**)

Les formules nécessaires pour répondre aux questions sont données sur le document **DT C7**.

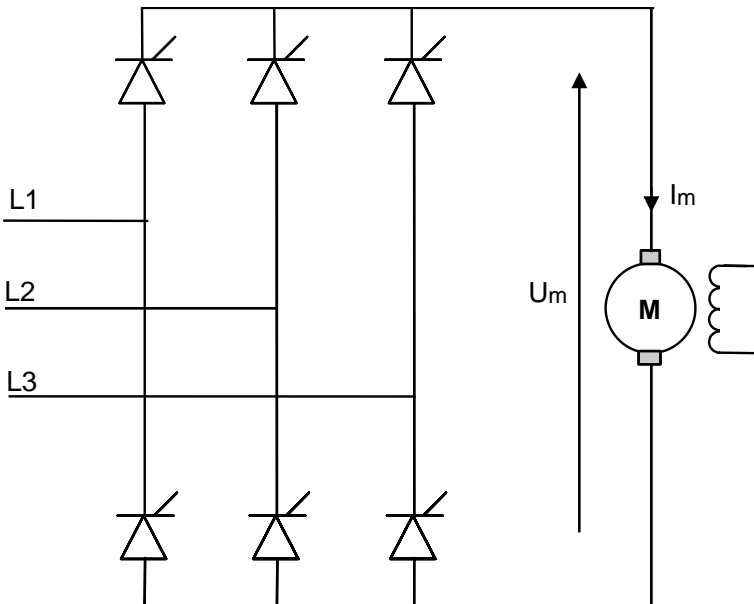


Figure C9 : structure de puissance d'un pont PD3 idéalisé.

C.4.2.1 Est-ce qu'un tel pont est réversible : - en courant ?
- en tension ?

Dans quel(s) quadrant(s) couple-vitesse peut fonctionner la machine à courant continu associée à ce pont ? (voir **figure C7**).

*Le pont est réversible en tension
Le pont n'est pas réversible en courant
Il fonctionne dans les quadrants I et IV*

C.4.2.2 Donner l'expression de la tension moyenne en sortie du variateur en fonction de la valeur efficace **U** de la tension composée du réseau et de l'angle de retard à l'amorçage ψ_1 (voir document **DT C7**).

$$U_{moy} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot \cos \psi_1$$

C.4.2.3 Donner l'expression de la puissance moyenne en sortie du variateur en fonction de la tension efficace U du réseau, de l'angle de retard à l'amorçage ψ_1 et du courant I_m .

$$P_{moy} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot I_m \cdot \cos \psi_1$$

C.4.2.4 Pour quelles valeurs de l'angle de retard à l'amorçage a-t-on un fonctionnement en onduleur ? **Pour quelles valeurs** de cet angle a-t-on un fonctionnement en redresseur ?.

$P_{moy} > 0$: redresseur $\Rightarrow 0 < \psi_1 < \pi/2$

$P_{moy} < 0$: onduleur $\Rightarrow \pi/2 < \psi_1 < \pi$

C.5 Etude de l'association variateur-machine à courant continu

On prendra, pour la machine à courant continu, une constante de couple $k_c = 2,75 \text{ Nm/A}$ et une constante de f.e.m $k_e = 2,75 \text{ V/rad/s}$. La machine à courant continu fonctionne à flux inducteur nominal constant. Les pertes fer et mécaniques sont négligées.

On se limite maintenant à la portion de la caractéristique de l'effort $F(t)$ exercé par le câble tracteur sur la poulie à vitesse constante (et égale à la vitesse nominale positive de $12,5 \text{ m/s}$) avec $49,6 \text{ s} < t < 247,4 \text{ s}$. On rappelle que cette caractéristique est donnée sur le document **DT C1**.

On se propose de **prédéterminer le courant d'induit** et d'étudier les **sens de transfert d'énergie** de l'ensemble machine à courant continu-variateur.

C.5.1 Donner l'équation de la caractéristique $F(t)$ pour t compris entre $49,6 \text{ s}$ et $247,4 \text{ s}$. (F est exprimée en kN).

$$F(t) = (0,325 \cdot t - 39,4) \text{ en kN}$$

C.5.2 En considérant un rendement de l'ensemble réducteur-poulie-câble égal à **85,5 %**, **déduire** de $F(t)$ la fonction $C_m(t)$ décrivant l'évolution du couple sur l'arbre de la machine à courant continu en fonction du temps. On rappelle que le rayon R_p de la poulie motrice est de **1,325 m** et que le rapport de réduction r du réducteur est de **15,4**.

*Nota : on pourra s'aider du document **DT C4**.*

Tracer sur le document réponse **DR C1** page C11, la fonction $C_m(t)$. (C_m est exprimé en kNm).

$$C_m(t) = 0,0327 \cdot t - 3,96 \text{ en kNm}$$

C.5.3 Etablir la fonction d'évolution du courant de l'induit en fonction du temps **$I_m(t)$** .

Tracer $I_m(t)$ en Ampère sur le document **DR C1**. **Situer** le courant nominal d'induit sur le tracé. **Conclure**.

$$I_m(t) = C_m(t)/2,75$$

$$\text{Donc } I_m(t) = 11,8.t - 1440$$

Le courant nominal (donc le couple) est dépassé mais pendant un temps inférieur à 60 s.

NB : Il faut de toute façon, mais ce n'est pas l'objet de l'étude, déterminer la valeur du courant thermique équivalent (ou du couple thermique équivalent) sur un cycle et vérifier par rapport aux capacités nominales de la machine.

C.5.4 En déduire les fonctions **$I_{c1}(t)$** et **$I_{c2}(t)$** représentant les courants des ponts 1 et 2 (voir **figures C6 ou C8**).

Tracer $I_{c1}(t)$ puis **$I_{c2}(t)$** sur le document réponse **DR C1**. **Situer** le courant nominal du variateur sur les tracés et **conclure**.

Le pont 1 conduit pour $I_m > 0$

Le pont 2 conduit pour $I_m < 0$

$$I_{c1}(t) = I_m(t) \text{ pour } 122 \text{ s} < t < 247,4 \text{ s}$$

$$I_{c1}(t) = 0 \text{ pour } 49,6 \text{ s} < t < 122 \text{ s}$$

$$I_{c2}(t) = -I_m(t) \text{ pour } 49,6 \text{ s} < t < 122 \text{ s}$$

$$I_{c2}(t) = 0 \text{ pour } 122 \text{ s} < t < 247,4 \text{ s}$$

C.5.5 Indiquer les intervalles de temps pendant lesquels le pont 1 et/ou le pont 2 fonctionne(nt) ainsi que le type de fonctionnement des ponts (redresseur ou onduleur) et de la machine à courant continu (moteur ou générateur) en **précisant** les quadrants de fonctionnement conformément à la **figure C7**.

NB : la vitesse de la machine à courant continu est de signe positif.

Le pont 2 fonctionne pour $49,6 \text{ s} < t < 122 \text{ s}$ – Quadrant II – MCC en géné – Pont 2 en onduleur

Le pont 1 fonctionne pour $122 \text{ s} < t < 247,4 \text{ s}$ – Quadrant I – MCC en moteur – Pont 1 en redresseur.

C.5.6 Déterminer la fonction d'évolution de la tension d'induit en fonction du temps **$U_m(t)$** .

(On prendra une résistance **R_m** d'enroulement d'induit égale à **12 m Ω**)

Tracer $U_m(t)$ sur le document réponse **DR C1**. **Expliquer** le résultat obtenu.

Pour une vitesse du câble de 12,5 m/s, la vitesse de la poulie est égale à 9,43 rad/s, celle du moteur de 145,2 rad/s et par conséquent la force électromotrice est égale à 399,3 V.

$$\text{Par ailleurs } U_m(t) = R \cdot I_m(t) + E$$

$$\text{Donc } U_m(t) = 0,14.t + 383,5$$

La tension varie peu, c'est normal puisque la vitesse est constante.

DOCUMENT REPOSE DR C1

