

Etude de l'onduleur de secours et de son filtre

(Extrait du BTS ET 2000 - Etude de l'alimentation électrique d'un Airbus A320)

Dans le cas, extrêmement improbable, où les différents alternateurs seraient tous hors service, il est encore possible d'alimenter les organes essentiels de l'avion pendant une demi-heure par l'intermédiaire d'un onduleur autonome dit "convertisseur de dernier secours". Celui-ci permet de reconstituer un réseau alternatif 115 V / 400 Hz monophasé à partir d'une batterie délivrant une tension continue U_B .

Ce convertisseur indirect est constitué de deux étages :

- un onduleur en pont complet qui fournit la tension $v_{MN}(t)$ (figure 5),
- un filtre de sortie qui fournit la tension $v_s(t)$ (figure 6a).

Le schéma de principe de l'onduleur est celui de la figure 5

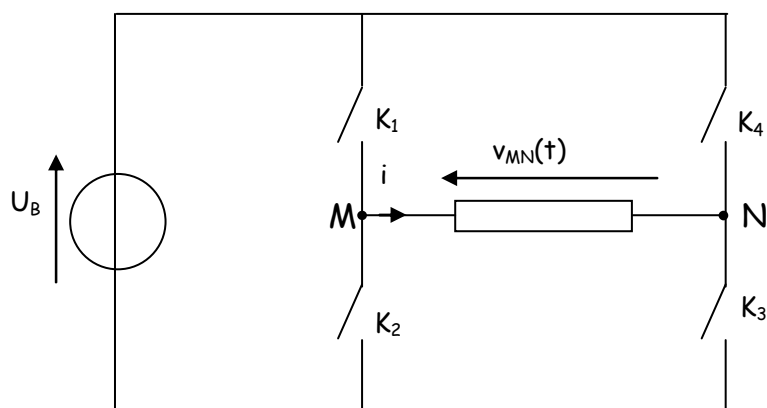


Figure 5

Cahier des charges de l'onduleur de secours muni de son filtre de sortie passe-bas :

Valeur efficace du fondamental de la tension de sortie du filtre : V_{S1}	115 V
Fréquence de sortie : f	400 Hz
Puissance apparente nominale de sortie : P_S	1,0 kVA
Facteur de puissance	$0,70 < \cos \varphi \leq 1$
Distorsion globale de la tension de sortie : d_g	$< 5 \%$

3° partie : Etude des tensions de sortie de l'onduleur

3.1 On envisage le cas d'une commande "pleine onde" selon la loi définie sur le document réponse 1 a.

3.1.1 Tracer le graphe de la tension $v_{MN}(t)$ sur le document réponse 1 a.

3.1.2 Exprimer la valeur efficace V_{MN} de $v_{MN}(t)$ en fonction de U_B .

3.2 La décomposition en série de Fourier de $v_{MN}(t)$ est la suivante :

$$v_{MN}(t) = \frac{4U_B}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right]$$

3.2.1 Donner l'expression de $v_1(t)$, fondamental de $v_{MN}(t)$.

En déduire l'expression de sa valeur efficace V_1 en fonction de U_B .

3.2.2 Quelle devrait être la valeur de U_B pour obtenir $V_1 = 115 \text{ V}$?

3.2.3 La distorsion globale de la tension de sortie $v_{MN}(t)$ dépend du taux d'harmoniques :

Si V_1 est la valeur efficace du fondamental de $v_{MN}(t)$ et $V_2, V_3, V_4, \dots, V_n, \dots$ les valeurs efficaces des autres harmoniques de cette tension (certaines de ces valeurs pouvant être nulles), la distorsion globale d_g est définie comme suit :

$$d_g = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2 + \dots}}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

Comme $V_{MN}^2 = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}$, on peut également écrire : $d_g = \frac{\sqrt{V_{MN}^2 - V_1^2}}{V_1}$

(2).

Calculer d_g dans le cas précédent.

3.3 Le montage effectivement réalisé est un onduleur à modulation de largeur d'impulsions (MLI). La commande des interrupteurs est définie sur le document réponse 1 b.

3.3.1 Tracer la tension $v_{MN}(t)$ correspondant à ce cas sur le document réponse 1 b.

3.3.2 Exprimer la valeur efficace V_{MN} de $v_{MN}(t)$ en fonction de U_B (on pourra pour cela effectuer un calcul d'aire).

3.3.3 La tension $v_{MN}(t)$ ne comporte pas d'harmonique de rang pair. Par ailleurs les angles $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ et α_5 sont choisis de manière à annuler les harmoniques de rang 3, 5, 7, 9 et 11. Il en résulte la décomposition en série de Fourier de $v_{MN}(t)$ suivante :

$$v_{MN}(t) = \frac{4U_B}{\pi} \times 0,802 \times \sin(\omega t) - \frac{4U_B}{13\pi} \times 2,01 \times \sin(13\omega t) - \frac{4U_B}{15\pi} \times 2,64 \times \sin(15\omega t) + \dots$$

Donner l'expression de $v_1(t)$, fondamental de $v_{MN}(t)$.

Donner l'expression de sa valeur efficace V_1 en fonction de U_B .

La distorsion globale qui correspond à ce deuxième cas est $d_g = 49\%$. Elle n'est donc pas meilleure que la précédente. Elle rend donc nécessaire la présence d'un filtre.

4° partie : Filtre de sortie de l'onduleur

La charge est assimilable à un circuit purement résistif R (figure 6a).

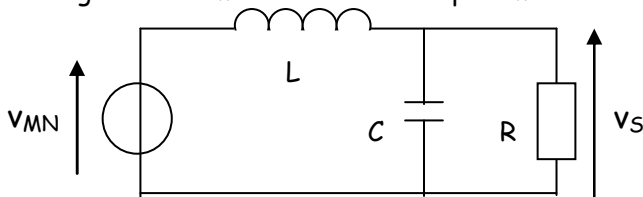


Figure 6a

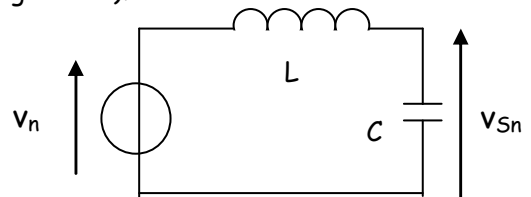


Figure 6b

4.1 Etude de l'action du filtre sur le fondamental de $v_{MN}(t)$

4.1.1 Calculer la valeur de R lorsque le filtre fournit $1,0 \text{ kW}$ à la charge sous 115 V .

Pour la suite du problème on prend $R = 13 \Omega$, $L = 0,47 \text{ mH}$ et $C = 22 \mu\text{F}$.

Dans ces conditions, si l'on note V_1 le fondamental de $v_{MN}(t)$ et V_{S1} le fondamental de $v_s(t)$, le

filtre de la figure 6a impose la relation : $\frac{V_{S1}}{V_1} = 1,06$.

4.1.2 On rappelle l'expression de la tension $v_{MN}(t)$ fournie par l'onduleur MLI, alimenté sous la tension U_B :

$$v_{MN}(t) = \frac{4U_B}{\pi} \times 0,802 \times \sin(\omega t) - \frac{4U_B}{13\pi} \times 2,01 \times \sin(13\omega t) - \frac{4U_B}{15\pi} \times 2,64 \times \sin(15\omega t) + \dots$$

Déterminer la valeur de U_B qui permet d'obtenir $V_{S1} = 115$ V.

Pour la suite du problème, on prendra $U_B = 150$ V.

4.2 Etude de l'action du filtre sur les harmoniques de $v_{MN}(t)$

4.2.1 Donner les expressions de Z_{L13} et Z_{C13} , impédances complexes de la bobine et du condensateur vis à vis de l'harmonique de rang 13. Calculer les modules Z_{L13} et Z_{C13} .

4.2.2 Montrer que pour l'harmonique 13, et, plus généralement, pour tous les harmoniques non nuls de $v_{MN}(t)$, le filtre de la figure 6a se ramène au filtre simplifié de la figure 6b.

4.2.3 On note \underline{V}_n le nombre complexe associé à l'harmonique de rang n de $v_{MN}(t)$ et V_n sa valeur efficace ; de même \underline{V}_{Sn} est le nombre complexe associé à l'harmonique de rang n de v_S et V_{Sn} sa valeur efficace.

Démontrer que $\frac{V_{Sn}}{V_n} = \frac{1}{1 - n^2 LC \omega^2}$.

4.2.4 En déduire l'égalité approchée $\frac{V_{S13}}{V_{13}} \approx \frac{1}{10}$, et, pour $n > 13$, les inégalités $\frac{V_{Sn}}{V_n} < \frac{1}{10}$.

4.2.5 On rappelle que la distorsion globale $d_{g_{v_{MN}}}$ de la tension $v_{MN}(t)$ fournie par l'onduleur MLI est égale à 49 %. À partir de la définition (1) de d_g donnée à la question 3.2.3 pour $v_{MN}(t)$, donner l'expression de la distorsion globale $d_{g_{v_S}}$ de la tension de sortie $v_S(t)$ du filtre.

En utilisant cette définition et les résultats des questions 4.1.1 et 4.2.4, montrer que $d_{g_{v_S}}$ est inférieure à 5 %.

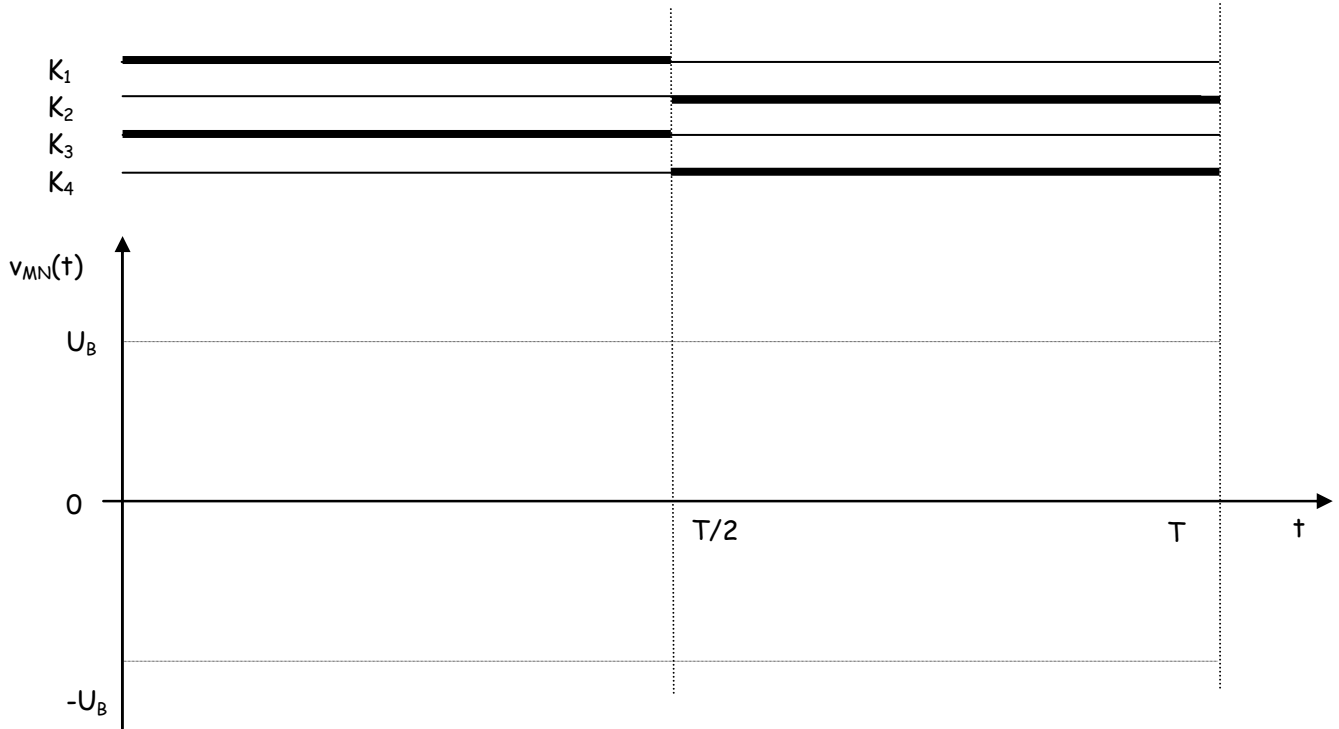
4.3 On revient à la solution "pleine onde" de la question 3.1 pour laquelle on utilise un filtre de même nature que celui de la figure 6a.

Dans ce cas, pour obtenir une distorsion globale $d_{g_{v_S}} < 5\%$ de la tension $v_S(t)$, on trouve qu'il faut une valeur du produit LC environ 10 fois plus grande que celle qui est utilisée dans le filtre associé à l'onduleur MLI.

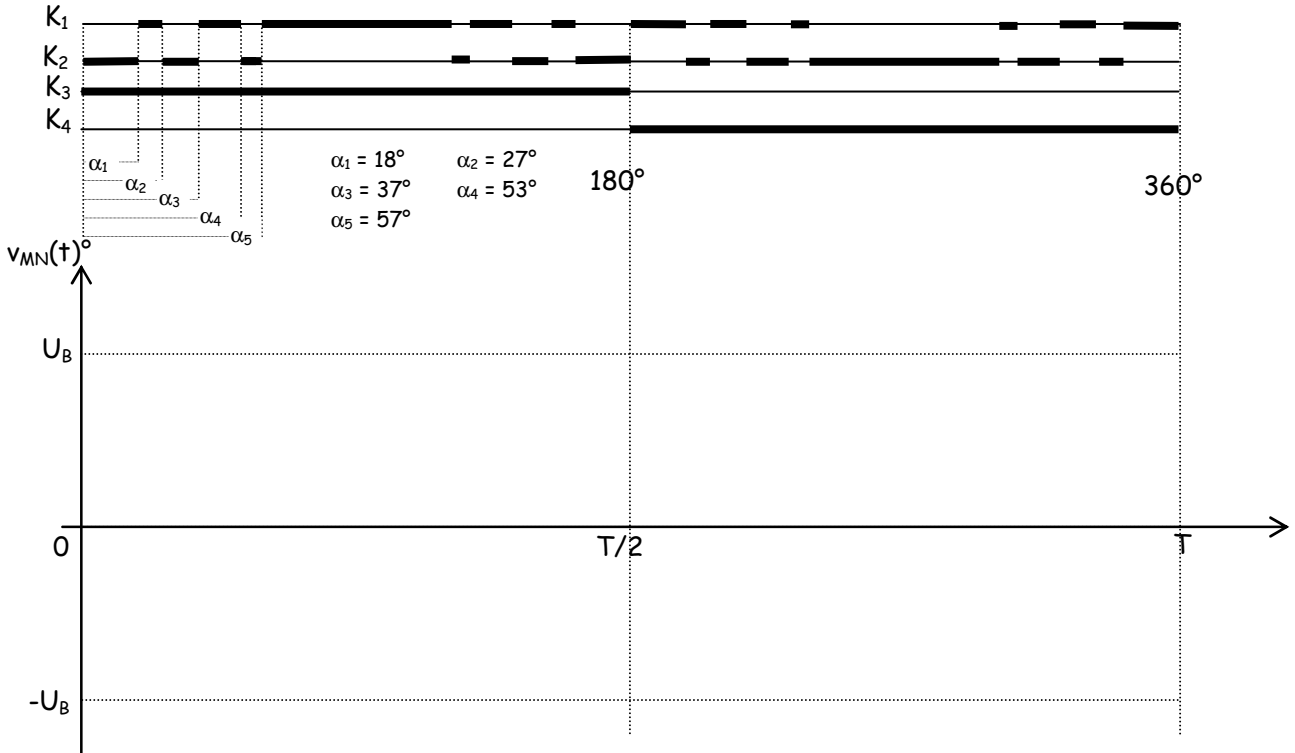
Quel est, de ce point de vue, l'intérêt de la commande MLI ?

DOCUMENT REponse N° 1 a

Les parties en trait épais correspondent à l'état fermé des interrupteurs
 Les parties en trait fin correspondent à l'état ouvert des interrupteurs.



DOCUMENT REponse N° 1 b



MOTEUR ASYNCHRONE

Un moteur asynchrone à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau triphasé 50Hz, 220V/380V. Le couplage de l'enroulement stator est en triangle, celui du rotor est en étoile. En mesurant à chaud la résistance entre 2 bornes on trouve au stator $R_s = 0,267 \Omega$ et au rotor $R_r = 0,1 \Omega$. Un essai à vide a été effectué sur cette machine. Le moteur tourne pratiquement à la vitesse de synchronisme ($N = 1500$ tr/min). La méthode des 2 wattmètres indique :

$$P_1 = 2200 \text{ W} \quad P_2 = -700 \text{ W} \quad I_0 \text{ (courant de ligne)} = 20 \text{ A.}$$

Un essai en charge est effectué à l'aide d'une charge mécanique, les courants absorbés étant alors équilibrés. On a les résultats suivants:

$$N' = 1450 \text{ tr/min} \quad P_1 = 14481 \text{ W} \quad P_2 = 5519 \text{ W} \quad I = 38,5 \text{ A.}$$

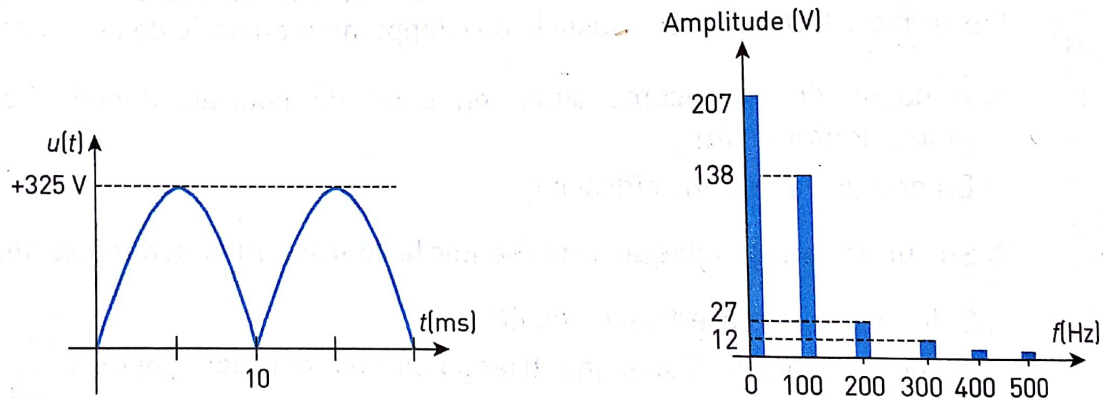
Sachant que les pertes mécaniques sont constantes et égales à 700 W:

- 1) Calculer les pertes Joule au stator lors de cet essai à vide de 2 façons différentes. En déduire les pertes fer au stator P_{fs} (que l'on supposera constante dans la suite du problème).
- 2) Calculer les puissances active et réactive totales absorbées par le moteur. En déduire le facteur de puissance lorsqu'on charge le moteur.
- 3) Calculer la fréquence des courants rotoriques. Que peut-on dire sur les pertes fer au rotor P_{fr} ?
- 4) Faire un bilan de puissance et calculer les pertes Joule au stator et la puissance transmise. En déduire les pertes Joule rotor P_{jr} . Calculer la valeur efficace des courants rotoriques de 2 façons différentes.
- 5) Calculer la puissance utile P_u et le rendement du moteur lors de cet essai.
- 6) Calculer le couple utile T_u et le couple électromagnétique T .

Qualité de l'énergie

Analyse spectrale d'une tension redressée

La tension en sortie d'un pont redresseur monophasé ainsi que son spectre en amplitude sont représentés sur les figures ci-dessous.



La décomposition en série de Fourier de $u(t)$ est :

$$u(t) = \frac{2U_{\max}}{\pi} - \frac{4U_{\max}}{3\pi} \cos(\omega t) - \frac{4U_{\max}}{15\pi} \cos(2\omega t) - \frac{4U_{\max}}{35\pi} \cos(3\omega t) - \dots$$

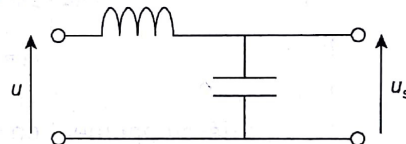
1. Exprimer la valeur moyenne $\langle u \rangle$ du signal en fonction de U_{\max} .

Faites l'application numérique et comparez la avec la valeur indiquée sur le spectre.

2. Donner l'expression $u_1(t)$ du fondamental. En déduire son amplitude \hat{U}_1 .

3. Ce signal $u(t)$ est filtré par une cellule LC.

Ce filtre passe-bas a pour effet de ne pas modifier la composante continue $\langle u \rangle$ et d'atténuer le fondamental de $u(t)$ d'un facteur 10. Les autres harmoniques auront une amplitude négligeable.



3.1 Représenter le spectre de $u_s(t)$.

3.2 En déduire l'allure de $u_s(t)$ en fonction du temps de $u_s(t)$.

Correction

Etude de l'onduleur de secours et de son filtre

Etude de l'alimentation électrique d'un Airbus A320

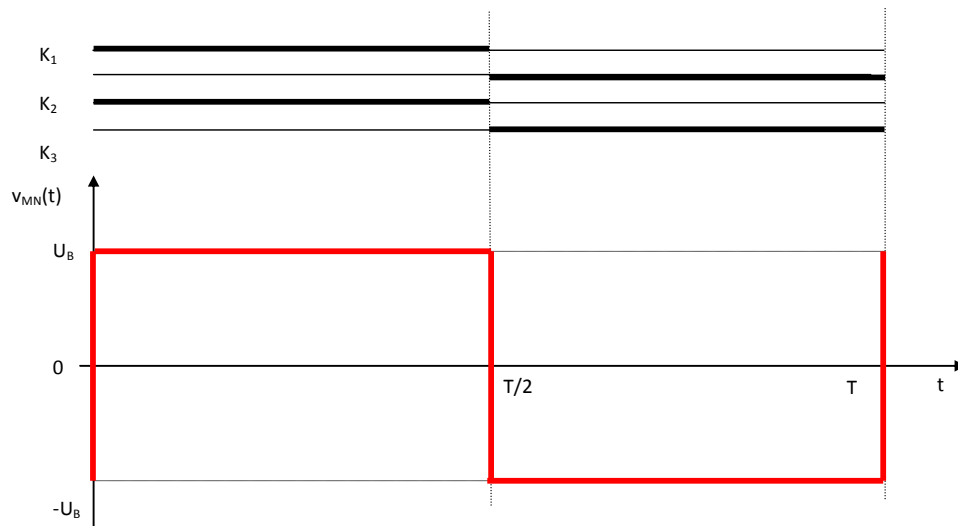
3°) Etude des tensions de sortie de l'onduleur

3.1°) Commande "pleine onde"

3.1.1)

- $v_{MN}(t) = U_B$ si K_1 et K_3 sont commandés
- $v_{MN}(t) = -U_B$ si K_2 et K_4 sont commandés

[Ces valeurs de $v_{MN}(t)$ se déduisent par l'observation ou encore par l'application de la loi des mailles.]



3.1.2) La valeur efficace de V_{MN} est déterminée en mettant au carré le signal $v_{MN}(t)$ puis on trouve sa valeur moyenne et on prend la racine :

$$V_{MN} = \sqrt{\langle v_{MN}(t)^2 \rangle}$$

[C'est la définition de la valeur efficace d'un signal]

$$V_{MN} = \sqrt{\frac{U_B^2 \times T}{T}} = U_B$$

3.2.) La décomposition en série de fourier

$$\text{étant } v_{MN}(t) = \frac{4U_B}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right]$$

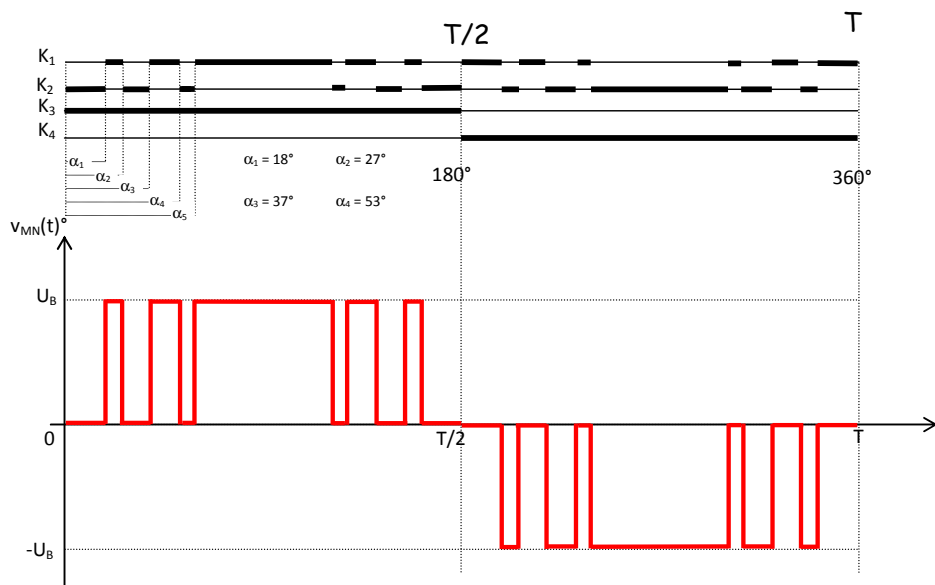
3.2.1) $v_1(t) = \frac{4U_B}{\pi} \sin(\omega t)$ donc la valeur efficace de $v_1(t)$ est $V_1 = \frac{4U_B}{\pi\sqrt{2}}$

3.2.2) $V_1 = \frac{4U_B}{\pi\sqrt{2}} = 115$ donc $U_B = \frac{115\pi\sqrt{2}}{4} = 128V$

$$3.2.3) d_g = \frac{\sqrt{V_{MN}^2 - V_1^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{128^2 - 115^2}}{115} = 0,48$$

3.3°) Onduleur MLI

3.3.1)



3.3.2) Pour chercher la valeur efficace on prend un quart de la courbe donc jusqu'à 90° et l'on multiplie cette aire par 4

$$V_{MN} = \sqrt{\frac{U_B^2 \times 4 \times ((90 - \alpha_5) + (\alpha_4 - \alpha_3) + (\alpha_2 - \alpha_1))}{360}}$$

$$V_{MN} = U_B \sqrt{\frac{90 + \alpha_4 + \alpha_2 - \alpha_5 - \alpha_3 - \alpha_1}{90}}$$

$$V_{MN} = 128 \sqrt{\frac{90 + 53 + 27 - 57 - 37 - 18}{90}} = 102,7$$

3.3.3)

$$v_{MN}(t) = \frac{4U_B}{\pi} \times 0,802 \times \sin(\omega t) - \frac{4U_B}{13\pi} \times 2,01 \times \sin(13\omega t) - \frac{4U_B}{15\pi} \times 2,64 \times \sin(15\omega t) + \dots$$

Donc l'expression temporelle du fondamental est $v_1(t) = \frac{4U_B}{\pi} \times 0,802 \times \sin(\omega t)$

et sa valeur efficace est $V_1 = \frac{4U_B}{\pi} \times \frac{0,802}{\sqrt{2}} = \frac{4 \times 128}{\pi} \times \frac{0,802}{\sqrt{2}} = 92,4 \text{ V}$

4°) Filtre de sortie de l'onduleur

4.1°) Action du filtre sur le fondamental

4.1.1°)

$$P = \frac{115^2}{R} = 1kW \text{ donc } R = \frac{115^2}{1000} = 13,2\Omega$$

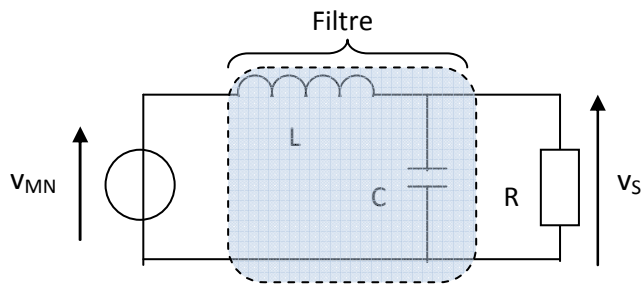


Figure 6a

4.1.2°)

$$V_{S1} = 1,06 \times V_1 = 1,06 \times \frac{4U_B}{\pi\sqrt{2}} \times 0,802 \quad \text{donc} \quad U_B = \frac{\pi\sqrt{2} \times 115}{4 \times 0,802 \times 1,06} = 150V$$

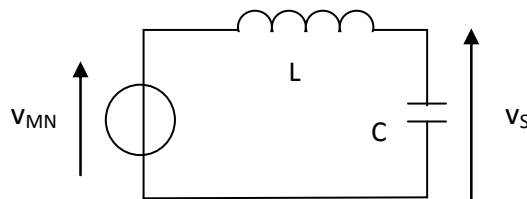
4.2°) Etude de l'action du filtre sur V_{MN}

4.2.1°) La pulsation du fondamental vaut $\omega = 2\pi \times 400 = 2513 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Celle du 13^e harmonique vaut $13\omega = 13 \times 2\pi \times 400 = 32673 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

$$\text{Donc } \underline{Z}_{C13} = \frac{1}{13C\omega} = 1,4 \Omega \quad \text{et} \quad \underline{Z}_{L13} = 13L\omega = 15,3 \Omega$$

4.2.2°) $\underline{Z}_{C13} \ll R$ donc la capacité court-circuite la résistance pour le 13^{ème} harmonique et plus d'où le schéma proposé



4.2.3°) En appliquant le pont diviseur de tension

$$\frac{V_{sn}}{V_n} = \frac{\underline{Z}_{Cn}}{\underline{Z}_{Cn} + \underline{Z}_{Ln}} = \frac{\frac{1}{jCn\omega}}{\frac{1}{jCn\omega} + jLn\omega} = \frac{1}{1 + j^2 n^2 LC\omega^2} = \frac{1}{1 - n^2 LC\omega^2}$$

Le rapport est un réel donc $\frac{V_{sn}}{V_n} = \left| \frac{1}{1 - n^2 LC\omega^2} \right|$

4.2.4°) Pour $n=13$ on obtient $\frac{V_{s13}}{V_{13}} = \left| \frac{1}{1 - 13^2 \times 0,47 \cdot 10^{-3} \times 22 \cdot 10^{-6} \times (2\pi \times 400)^2} \right| \approx \frac{1}{10}$

Pour $n > 13$ $\frac{V_{sn}}{V_n} = \left| \frac{1}{1 - n^2 LC\omega^2} \right| \approx \frac{1}{n^2 LC\omega^2} < \frac{1}{13^2 LC\omega^2} \approx \frac{1}{10}$

4.2.5°) Par définition $d_g = \frac{\sqrt{V_S^2 - V_{S1}^2}}{V_{S1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n>1} V_{sn}^2}}{V_{S1}}$

Sachant que $\frac{V_{sn}}{V_n} < \frac{1}{10}$ pour $n > 13$ donc $\frac{V_{sn}^2}{V_n^2} < \frac{1}{100}$ donc

$$d_{g_{V_s}} = \frac{\sqrt{\sum_{n>1} V_{sn}^2}}{V_{S1}} \leq \frac{\sqrt{\sum_{n>1} \frac{V_n^2}{100}}}{V_{S1}} = \frac{1}{10} \frac{\sqrt{\sum_{n>1} V_n^2}}{V_{S1}} = \frac{1}{10} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n>1} V_n^2}}{1,06 \times V_1} = \frac{d_g}{10 \times 1,06} = \frac{0,49}{10 \times 1,06}$$

On a bien $d_{g_{V_s}} < 5\%$

4.3°) Si le produit LC est 10 fois plus grand cela va nécessiter une inductance et une capacité plus grande et donc plus encombrante d'où l'avantage de la MLI

MOTEUR ASYNCHRONE

1) Pertes Joules et pertes fer au stator

Pertes Joule au stator à vide (P_{js0})

Quel que soit le couplage, les pertes Joule au stator sont données par l'expression

$$P_{js0} = (3/2) \cdot R_s \cdot I_0^2 = \mathbf{160,2 \text{ W}}$$

Elles peuvent aussi être calculées à partir du courant dans les enroulements du stator. Ce dernier étant couplé en triangle, les enroulements sont parcourus par les courants j de valeur efficace :

$$J_0 = \frac{I_0}{\sqrt{3}} = 11,55 \text{ A}$$

et la résistance par phase est de :

$$R' = (3/2) \cdot R = 0,4 \ \Omega$$

Les pertes Joule dans ces enroulements sont alors :

$$P_{js0} = 3 \cdot R' \cdot J_0^2 = \mathbf{160,1 \text{ W}}$$

Pertes fer (P_{fs})

A vide, la puissance utile (P_u) est nulle. Les pertes Joule au rotor (P_{jr}) sont proportionnelles au glissement. Celui-ci étant peu différent de zéro, à vide les pertes Joule au rotor sont négligeables. La puissance absorbée par le moteur se décompose alors en

$$P_0 = P_m + P_{fs} + P_{js0}$$

où P_m représente les pertes mécaniques.

Par ailleurs, la méthode des deux wattmètres nous donne

$$P_0 = P_1 + P_2 = 1500 \text{ W}$$

d'où

$$P_{fs} = P_0 - P_{js0} - P_m = \mathbf{639,8 \text{ W}}$$

2) Puissances active et réactive - facteur de puissance

Toujours en exploitant les résultats donnés par la méthode des deux wattmètres

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 = 20 \text{ kW} \\ Q &= \sqrt{3}(P_1 - P_2) = 15,523 \text{ kVAR} \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = 25,317 \text{ kVA} \end{aligned}$$

et le facteur de puissance

$$\cos \phi = P / S = \mathbf{0,79}$$

3) Fréquence au rotor, pertes fer au rotor

Le glissement en charge est de

$$g = (N - N') / N = \mathbf{0,033}$$

La fréquence des courants au rotor est donc

$$f_r = gf_s = \mathbf{1,66 \text{ Hz}}$$

Les pertes fer sont une fonction croissante de la tension et de la fréquence. Pour un moteur asynchrone, les enroulements du rotor sont en court-circuit et, comme nous venons de le calculer, la fréquence est très faible. Les pertes fer au rotor seront par conséquent négligeables.

4) Bilan de puissance en charge

La puissance utile est:

$$P_u = P - P_{js} - P_{fs} - P_{jr} + P_m = (1 - g) (P_{abs} - P_{js} - P_{fs}) = (1 - g)P_{tr} - P_m$$

P_u : puissance utile

P_{jr} : pertes Joule au rotor en charge

P_{js} : pertes Joule au stator en charge

P_{tr} : puissance transmise

Connaissant le courant absorbé en charge, on obtient les pertes Joule au stator en charge

$$P_{js} = (3/2)R_s I^2 = \mathbf{593,6 \text{ W}}$$

Les pertes fer au stator étant constantes, la puissance transmise est

$$P_{tr} = P - P_{js} - P_{fs} = \mathbf{18,766 \text{ kW}}$$

On en déduit les pertes Joule au rotor

$$P_{jr} = gP_{tr} = \mathbf{619,3 \text{ W}}$$

Le couplage des enroulements rotor étant en étoile on peut écrire

$$P_{jr} = 3RJ^2 \quad \text{ou} \quad P_{jr} = (3/2)R_r J^2$$

où J désigne la valeur efficace du courant au rotor et R la résistance mesurée sur une phase. Pour un couplage étoile on a $R_r = 2R$

d'où

$$J = \sqrt{\frac{2P_{jr}}{3R_r}} = 64,2 \text{ A}$$

5) Puissance utile et rendement en charge

La puissance utile

$$P_u = (1 - g) P_{tr} - P_m = \mathbf{17,441 \text{ kW}}$$

et le rendement

$$\eta = P_u / P = \mathbf{0,91 = 91 \%}$$

6) Couples utile et électromagnétique

Connaissant la puissance utile et la puissance transmise, on en déduit les couples correspondant

Couple utile :

$$T_u = P_u / 2\pi N' = \mathbf{114,9 \text{ Nm}}$$

Couple électromagnétique

$$T = P_{tr} / 2\pi N = \mathbf{119,5 \text{ Nm}}$$

Qualité de l'énergie

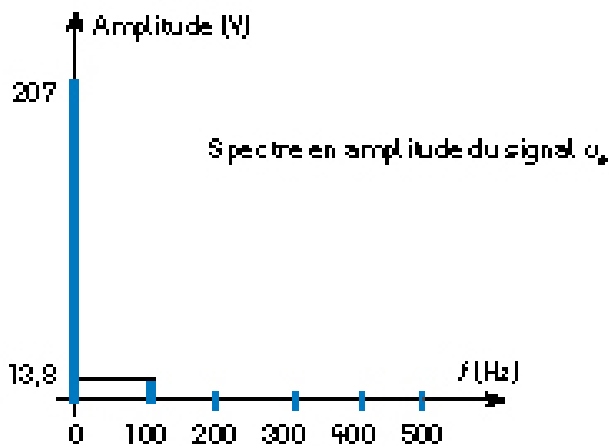
1) $\langle u(t) \rangle = 2U_{\max}/\pi$

Application numérique : $\langle u(t) \rangle = 207 \text{ V}$.

Sur n spectre en amplitude, la valeur moyenne se situe à la fréquence nulle ($f = 0 \text{ Hz}$). On constate sur le spectre de la tension $u(t)$, à $f = 0 \text{ Hz}$, une composante (une raie) avec un niveau de tension égal à 207 V . Cette composante correspond à la valeur moyenne de $u(t)$.

2) $u_1(t) = (-4U_{\max}/3\pi) \cdot \cos(\omega t)$

$\hat{U}_1 = 4 \cdot U_{\max}/3\pi = 138 \text{ V}$.



En première approximation, le signal u_s est constitué d'une composante continue égale à 207 V avec une composante alternative sinusoïdale d'amplitude égale à 14 V .

