

MP 21 : Conversion de puissance électrique - électrique.

①

Biblio: Duffaut électronique T17
Quaranta IV. T27
HPrépa Electronique II. T37
Précis Bréal Electrotech T47

Intro:

L'électricité est un excellent moyen de transport de l'énergie. Il apparaît donc nécessaire, compte tenu des différents modes de production et de consommation, de procéder à des transformations. Nous allons étudier comment sont réalisées ces transformations. On utilise des dispositifs permettant d'assurer un transfert de puissance entre une source et une charge avec un bon rendement énergétique.

Nous nous intéresserons en premier lieu au transformateur qui permet une conversion d'un courant alternatif. Puis nous détaillerons le fonctionnement d'un redresseur double alternance qui permet une conversion alternatif continu et enfin celui d'un hacheur d'abaisseur qui abaisse une tension continue injectée en entrée.

I. Le transformateur T37, T47.

L'énergie électrique est produite dans des centrales qui sont souvent éloignées du lieu d'utilisation. Pour transporter l'énergie avec peu de pertes, il faut de très hautes tensions (200 kV). Or les centrales ne peuvent pas fournir directement de telles tensions, il est nécessaire d'utiliser un transformateur qui va abaisser ou au contraire élever la tension. Il transfère, en alternatif, de la puissance électrique d'une source placée dans le circuit primaire à une charge placée dans le circuit secondaire (lié à la charge).

Ces deux enroulements sont bobinés sur un noyau ferromagnétique.

On note N_1 le nombre de spires de l'enroulement primaire

N_2 le nombre de spires de l'enroulement secondaire

Dans l'hypothèse du transformateur parfait:

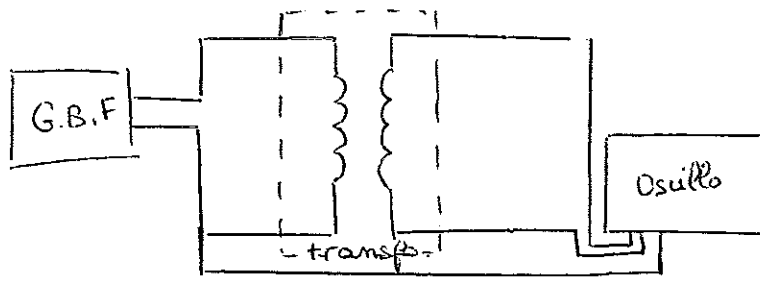
on note $m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$

le rapport de transformation.

$$m = - \frac{j_1}{j_2}$$

Expérience qualitative.

(2)



On envoie sur bobine 1 un signal sinusoïdal (on visualise en voie 1 de l'osillo)

C'est la tension U_1

ex : $N_1 = 500$ spires.

On place la bobine 2 en influence (former le transfo avec noyau feuilleté)
On visualise U_2 en voie 2.

Si $N_2 = 500$ spires $U_1 = U_2$ Si $N_2 = 1000$ spires $\frac{U_2}{U_1} = 2 = m$

⇒ On peut abaisser ou élever la tension en jouant sur le rapport $\frac{N_2}{N_1}$
 m est indépendant de la charge branchée au secondaire

Le transformateur est un convertisseur statique qui permet de modifier en sortie la valeur efficace de la tension sinusoïdale appliquée à son entrée sans en modifier la fréquence

Ce qui nous intéresse c'est que la conversion se fasse avec le meilleur rendement possible.

Modèle du transformateur parfait :

hypothèses :

- circuit magnétique linéaire, homogène et isotrope. $\mu_r \rightarrow \infty$
- aucune fuite magnétique
- enroulements sans résistance

Dans ce cas la puissance instantanée est $P = U_1 i_1 + U_2 i_2$.

avec $\boxed{U_2 = m U_1 \text{ et } i_2 = -\frac{i_1}{m} \quad P = 0}$

La puissance fournie à l'enroulement primaire du transformateur parfait est intégralement transférée à la charge par le secondaire.

Il n'y a ni stockage, ni dissipation d'énergie, donc le rendement est de 100 %.

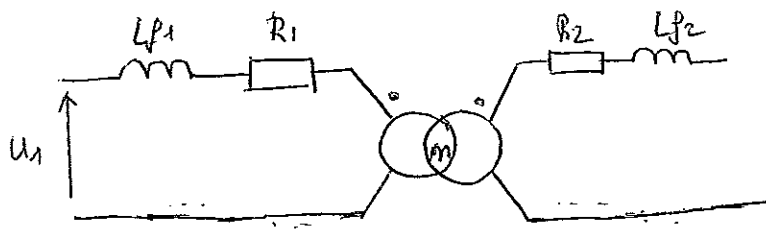
En réalité, une partie de l'énergie communiquée au primaire va se retrouver sous forme magnétique dans le circuit et crée un échauffement thermique et donc une perte par courants de Foucault

D'autre part toutes les lignes de champ ne sont pas localisées dans le noyau. Il y a des fuites magnétiques.

Et bien sûr, les conducteurs ont toujours une résistance, ce qui se traduit par des pertes par effet Joule (deux enroulements)

le modèle du transformateur réel est :

(3)



L_{p1} modélise les fuites de champ
 L_{p2}

R_1 modélise la résistance des
 R_2 bobinages.

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} + L_{p1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

Donc nous savons que le transformateur réel possède des défauts en comparaison du transformateur parfait

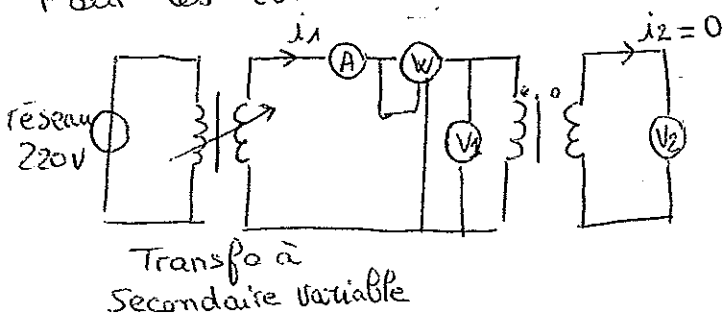
Dans l'industrie, les transformateurs peuvent atteindre des rendements de l'ordre de 99%.

Nous allons étudier un petit transformateur didactique monophasé 220V / 24V de puissance nominale 120 VA et déterminer son rendement. Nous allons donc évaluer les pertes :

• Pertes fer : le noyau du transformateur est un bon conducteur ohmique plongé dans un champ magnétique variable ; donc il est le siège de courants de Foucault. Une énergie est dissipée par effet Joule. Les propriétés magnétiques de la carcasse induisent aussi des pertes par hystérésis.

Ces deux causes de pertes ne dépendent que de $\vec{B}$ à l'intérieur de la carcasse ; ce sont les pertes fer.

Pour les évaluer : étude à vide.



$$U_1 = -e_1 = \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 S \frac{dB}{dt}$$

donc les pertes fer ne dépendent que la tension du primaire.

¶ i_1 faible donc montage avant pour le wattmètre.

Pour estimer ces pertes, il faut que les pertes Joule dues aux bobinages soient négligeables, donc $i_2 \sim 0$ A et d'après $m = -\frac{i_1}{i_2}$ $i_1 \sim 0$ A

donc la puissance dissipée est négligeable. Si on réalise l'étude à vide ($i_2 = 0$) alors on estimera les pertes fer.

L'impédance du voltmètre au secondaire est considérée comme très grande. On a bien un fonctionnement à vide.

Mesures de U_1, U_2, I_1 et P_1 pour différentes valeurs de U_p (faire varier la manivelle du transfo à secondaire variable). en préparation ④

Présentation: brancher le wattmètre et le voltmètre.
prendre un point.

Tracé: $U_2 = f(U_1) \rightarrow$ pente = mv = rapport de transfo à vide

Comparer à $\frac{24}{220} = 0,11$ Différences = ? faire pente max / pente min?

$I_1 = f(U_1) \rightarrow$ on a pas une droite, le transfo n'est pas un dipôle linéaire

$P_1 = f(U_1^2) \rightarrow$ on a une droite. Or U_1 est proportionnel à $\vec{B}_{\max}$ (champ dans le noyau) donc les pertes fer sont proportionnelles à $B_{\max}^2$

Point théorique: Relation de Baucherat. (ne pas faire en présentation)

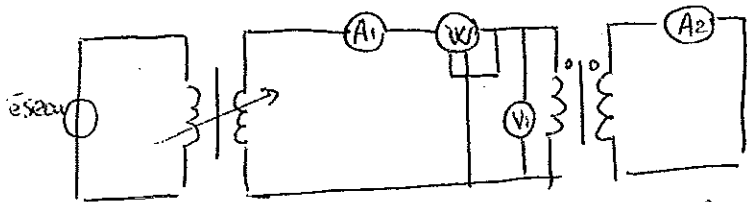
$U_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$ fonctionnement à flux forcé: car si U_1 sinusoïdale alors ϕ aussi et déphasé de 90° .

$$\phi(t) = \frac{1}{N_1} \int U_1(t) dt = \frac{1}{N_1} \int V\sqrt{2} \cos \omega t dt = \frac{V\sqrt{2}}{N_1} \times \frac{\sin \omega t}{\omega} = \phi_{\max} \sin \omega t$$

$$V = \frac{\phi_{\max} \omega N_1}{\sqrt{2}} = \frac{B_{\max} S}{\sqrt{2}} \times 2\pi f N_1 = 4,44 B_{\max} N_1 S f.$$

• Pertes cuivre: Nous avons vu que les pertes fer sont proportionnelles à U_1^2 donc pour étudier les pertes cuivre; c'est à dire les pertes par effet Joule dues aux bobinages, on va travailler à $U_1 \sim 10\%$ valeur nominale. (on pourra considérer les pertes fer négligeables). On a alors $U_2 \sim 0V$, on réalise l'étude en court circuit. L'impédance d'entrée de l'ampèremètre est supposée assez petite pour pouvoir faire ces mesures.

On travaille à U_2 faible, sinon i_2 est très grand et il peut détruire les enroulements.



ici fort donc montage aval pour le wattmètre

Mesures de U_1, I_1, I_2, P_1 pour différentes valeurs de U_p .

Présentation: prendre un point.

Tracé : $I_1 = f(I_2) \rightarrow$ droite de pente m .

⑤

$M_{\text{mesuré}} =$

En court circuit, un transformateur réel est parfait pour les courants

$P_1 = f(I_2^2) \rightarrow$ on a une droite.

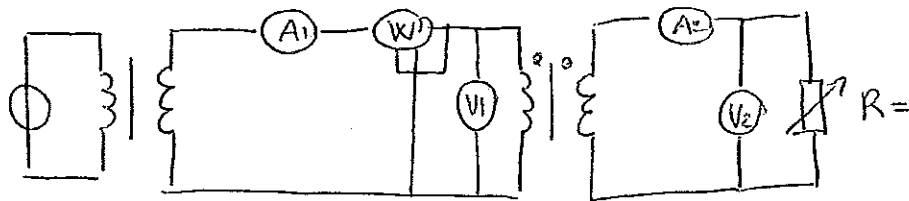
On a une dissipation par effet Joule proportionnelle au carré de I_2

Car $P = U i$ et $i = \frac{U}{R}$ pour un dipôle résistif $P = R i^2$.

On voit que le rendement pour cette conversion de puissance n'est pas de 100 %.

Pour limiter les pertes fer on utilise des carcasses réalisées avec des matériaux doux pour limiter les pertes par hystérésis et on utilise des carcasses feuilletées pour limiter les courants de Foucault.

• Caractéristique en charge: purement résistive. (rhéostat).



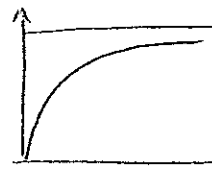
$A_2; V_2$ remplacé par Wattmètre

Mesures de P_1, P_2, U_2, I_2 à $U = U_{\text{nominale}} = 220 \text{ V}$.

• On constate que $U_2 - U_{2\text{vide}} = \Delta U$ chute de tension au secondaire ne dépasse pas % de la tension à vide.

Présentation: prendre un point η

Tracé : $P_2 / P_1 = f(I_2)$



Le rendement augmente avec I_2 jusqu'au voisinage de la puissance nominale, au delà il diminue.

On a $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{\text{charge}}}{P_{\text{charge}} + P_{\text{vide}} + P_{\text{court-circuit}}}$

Méthode des pertes séparées:

La détermination de η est grossière, donc on utilise une autre méthode.

La méthode des pertes séparées dit que la puissance perdue dans le transfo en charge $\sim$ somme de la puissance dissipée à vide, le primaire étant alimenté à sa tension nominale, et de la puissance dissipée en court circuit, le secondaire étant traversé par le courant nominal.

$$P_{\text{charge}} = P_2 + P_{\text{vide}} + P_{\text{court-circuit}}$$

$$\Rightarrow P_2 = P_{\text{charge}} - P_{\text{vide}} - P_{\text{court-circuit}}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{charge}} - P_{\text{court-circuit}} - P_{\text{vide}}}{P_{\text{charge}}} =$$

On lit $P_{\text{vide}} = 6,0 \text{ W}$ $P_{\text{court-circuit}} = 3,63 \text{ W}$

P_{vide} déterminée pour $U_1 = 220 \text{ V}$: tension nominale.

$P_{\text{court-circuit}}$ déterminée pour I_2 max de la courbe $\eta = f(I_2)$.

$$\eta =$$

Même avec un transformateur didactique, on voit que le rendement du transformateur pour la conversion alternatif - alternatif est correct.

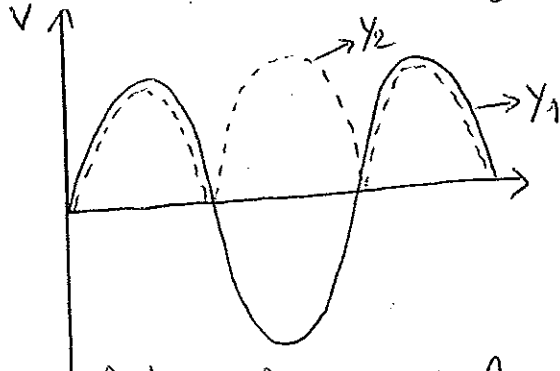
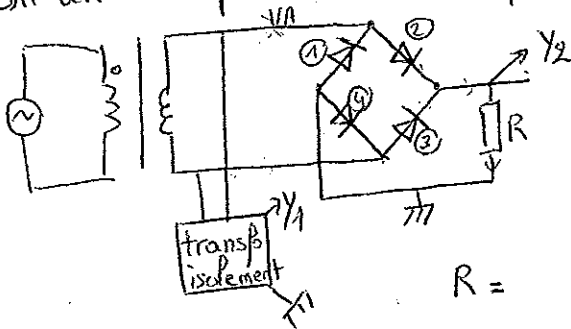
II. Redresseur double alternance [1], [2].

Dans les convertisseurs, c'est le transfert d'énergie depuis une alimentation vers une charge qui est l'aspect le plus important. La notion de rendement est essentielle. En électronique, les convertisseurs de puissance à haut rendement énergétique ne comprennent donc que des « interrupteurs » et des dipôles non dissipatifs qui permettent de stocker l'énergie. Ces éléments fonctionnent en régime de commutation.

Nous allons étudier un montage classique à diode permettant de réaliser une conversion alternatif continu.

Ce problème est d'une grande importance pratique car tous les composants de l'électronique sont alimentés par des tensions continues alors que l'énergie électrique est fournie sous forme de tension alternative sinusoïdale.

On utilise pour cela un pont de diode, ou pont de Graetz.



Quelquesoit le sens du courant dans la branche avant le pont de diode, le courant a toujours le même sens après le pont.

Les alternances négatives sont transformées en alternance positives par le pont. Le courant reste variable mais a toujours le même sens : il n'est plus alternatif.

Le transfo d'isolement permet de mesurer V_1 sans problème de mise à l'oscille.

Lors de l'alternance positive de la tension d'entrée seules les deux diodes ayant une tension d'anode supérieure à la tension cathode conduiront les deux autres diodes seront bloquées. Pour l'alternance négative, ce sont les deux autres qui conduisent.

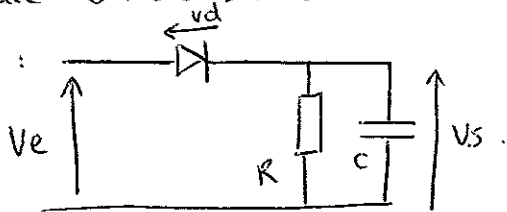
Inconvénients: la chute de tension dans le pont est égale à deux fois la tension de seuil. Cela est gênant si on veut redresser des tensions de faible valeurs. (visualiser à l'oscillo). Baisser $V \rightarrow$ pont inefficace

FFT oscillo: la tension redressée est composée d'une tension continue (moyenne) et de composantes alternatives dont le fondamental est le double de la fréquence

La tension va être lissée pour supprimer toutes les composantes sinusoïdales et ne garder que le premier terme du développement c'est à dire la valeur moyenne.

Pour cela on va réaliser un détecteur d'enveloppe.

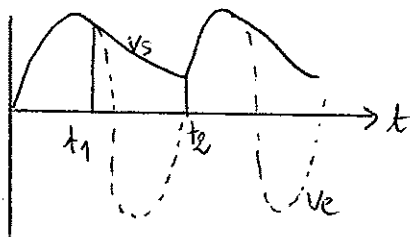
Principe:



C'est initialement déchargé
On applique V_e sinusoïdale
Tant que $V_e > V_{seuil \text{ diode}}$, elle est passante. On a $V_s = V_e$.

A la date t_1 , $V_e < V_{seuil}$, la diode est bloquée. Le condensateur C se décharge dans la résistance R. V_s décroît selon une loi exponentielle de constante $\tau = RC$.

A la date t_2 , la diode est de nouveau passante, $V_s = V_e$.



Il faut que $\tau \gg T$
avec T : période de V_e .

On va donc rajouter C = en parallèle de R. On réalise un filtre passe bas qui va nous permettre de garder que la composante continue.

Pour caractériser la qualité de la tension de sortie continue, on définit le taux d'ondulation $\tau = \frac{V_{eff}(AC)}{V_{moy}}$

Or τ est proportionnelle à $1/RC$

En préparation tracer $\tau = f(1/R)$ à C fixé. C =
R allant de à

On lit V_{eff} sur le voltmètre (en dérivation de C) en position AC^⑧ et V_{moy} en position DC.

⚠ utiliser des voltmètres TRUE RMS

V_{eff} = V efficace de la composante alternative de la tension et non pas V efficace du total (composante alternative + composante continue)

Bilan de puissance: placé wattmètre avant le pont et après le pont. Utiliser des valeurs grandes de tension sinon la puissance est trop faible pour que le wattmètre l'affiche

⚠ ne pas dépasser 3A dans le circuit car les diodes de redressement ne le supporte pas -

On a $P_1 =$ et $P_2 =$ pour $U =$
 $R =$
 $C =$

On voit que le rendement énergétique dépend de la charge R

Mais $\eta = \frac{P_2}{P_1} =$ reste bon même si on travaille à faibles puissances ici.

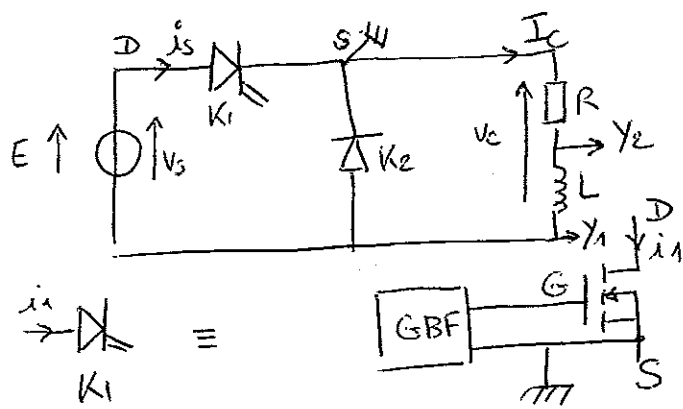
Plus la charge est faible, plus P est élevée $P = \frac{U^2}{R}$

III. Hacheur dévolteur [1], [2].

les hacheurs permettent des conversions de puissance continu - continu avec un bon rendement. Il se pose en courant continu le même problème que l'on rencontre en courant alternatif: celui d'alimenter un dipôle d'utilisation (la charge) sous une tension (ou plutôt un courant) différente de celle de la source continue dont on dispose.

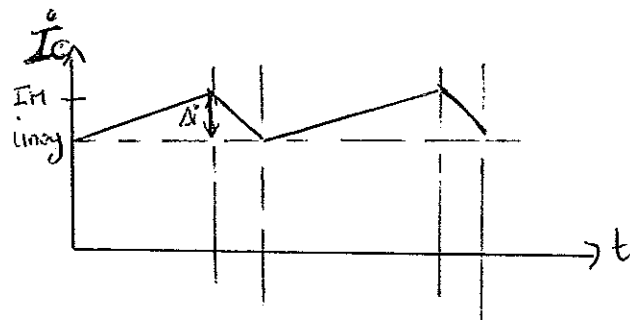
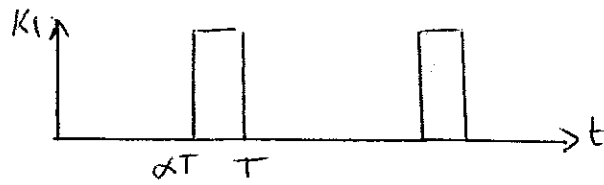
Cela peut être réalisé dans les hacheurs en utilisant des régimes de commutation: les courants sont hachés périodiquement par des interrupteurs commandés (dans notre cas: transistor MOSFET)

On étudie le hacheur abaisseur ou hacheur série car l'interrupteur commandé est en série avec la source. Il permet d'alimenter une charge sous une tension ajustable et de valeur moyenne inférieure à celle de la source.



$E = 12 \text{ V.} = U_{\text{source}}$ (continu, masse flottante)
 K_1 : transistor MOSFET BUK 455.
 K_2 : diode de redressement
 $R = 10 \Omega$.
 $L = 11 \text{ mH}$.
 GBF permet la commande de K_1

K_1 est un interrupteur commandé à la fréquence f de rapport cyclique α



lorsque K_1 est fermé, K_2 est bloquée

$$U_{\text{source}} = Ri + L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{U_{\text{source}}}{L} \sim \frac{di}{dt}$$

Le courant i fournit dans la charge croît linéairement.

C'est la source qui fournit de l'énergie dont une partie est accumulée par L

Lorsque K_1 est ouvert, K_2 est passante l'inductance restitue l'énergie

emmagasinée $-e = L \frac{di}{dt}$ i décroît

e : fem induite

En moyenne $\langle i_s \rangle = \alpha I_c$. I : courant dans la charge $\langle V_c \rangle = \alpha E$

Bilan de puissance: $P_s = \langle V_s i_s \rangle = E \langle i_s \rangle = \alpha EI$

$$P_c = \langle V_c I_c \rangle = I \langle V_c \rangle = \alpha EI$$

$\eta_{theo} = \frac{P_c}{P_s} = 1$. En réalité les interrupteurs ne sont pas idéaux et $\eta < 1$

La charge est un dipôle qui alimenté sous une tension crêteaux réalise un filtrage du courant I_c qui sera égal à $\langle I_c \rangle$ à un terme d'ondulation Δi près.

L'inductance permet de stocker l'énergie et détermine la vitesse d'établissement des courants dans les circuits. Elle permet d'avoir dans la charge un courant pratiquement constant alors que la tension est en crêteaux.

Quelle est l'influence de f (fréquence de commande de K_1) ?

Si la fréquence de commutation est trop faible alors $T > \tau = \frac{L}{R}$ et le courant s'annule dans la charge, on a une conduction interrompue



$f_{\text{interrompu}} = \text{Hz.}$

Le rapport cyclique α est tel que $\alpha = \frac{V_c}{V_s} = \frac{I_s}{I_c}$

On vérifie que I_c (tension sur V_{ce}) est proportionnel à α
 en préparation: $\langle I_c \rangle$ (mesuré à l'oscillo) = $f(\alpha)$

Pente = $\neq \frac{E}{R}$ car la bobine a une résistance

Enfin $\Delta i = I_{\pi} - \langle I_c \rangle = I_{\pi} - i_{\text{moy}}$ dépend de f et α

$$\Delta i = \frac{\alpha(1-\alpha)E}{fL_c}$$

En préparation $\Delta i = f(\alpha)$ ondulation nulle pour $\alpha=0, \alpha=1$
 ondulation max pour $\alpha = \frac{1}{2}$
 pas prendre de point

Prendre un point. à $f = 25 \text{ kHz}$

$\Delta i = f$ (fréquence) $\rightarrow$ linéaire en $\frac{1}{f}$ pour $1 \text{ kHz} < f < 10 \text{ kHz}$
 pour $\alpha = 37\%$

Bilan de puissance :

On mesure $\langle V_c \rangle =$ $(\frac{1}{2}), P_c = \frac{\langle V_c^2 \rangle}{R_c}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \langle i_s \rangle = \\ , P_s = E \langle i_s \rangle \end{array} \right\} \eta = \frac{P_c}{P_s} =$

Application au moteur :

En utilisant un interrupteur commandé, on ajoute un paramètre de réglage qui autorise le contrôle du flux d'énergie entre la source et la charge. Dans le cas d'un moteur à courant continu, nous avons la possibilité de modifier et éventuellement d'asservir sa vitesse de rotation.

Conclusion: Nous avons pu étudier trois systèmes permettant la conversion électrique-électrique. D'une part le transformateur qui permet une conversion alternatif-alternatif et d'autre part deux dispositifs utilisant des interrupteurs: le pont de diode qui permet de redresser une tension alternative et le hacheur qui permet d'abaisser ou d'élever la valeur d'une tension continue.

Ce qui nous a tenu à cœur tout au long de ce montage; c'est le souci d'estimer les rendements de ces convertisseurs de puissance.