

Montage de spécialité:

Redresseurs en pont mixte et en pont complet. Mesures des puissances, des facteurs de puissance et tracé des diagrammes $Q(P)$.

PAR OLIVIER MARTIN

Le 05 janvier 2010

Résumé

Nous mettons en avant dans ce montage les principes de fonctionnement des redresseurs double alternance monophasés et commandés, chargés par une charge active. Nous montrons la réversibilité des transferts de puissance avec le réseau, dans le cas d'un pont complet « tout thyristor » et que le diagramme $Q = f(P)$ est un cercle dont le rayon dépend du sens de transfert de puissance. À noter aussi que la puissance déformante ne dépend pas de l'angle de commande car la forme d'onde du courant réseau reste un créneau quelque soit l'angle de commande.

Pour le pont mixte, le seul mode possible est le fonctionnement redresseur, mais le courant réseau a ici trois paliers qui font que la puissance déformante est plus faible. Avec un pont mixte, bien que la puissance active augmente avec l'angle de commande, on peut augmenter de 2% le facteur de puissance maximal par rapport à un pont complet en mode redresseur.

Table des matières

1	Présentation du montage, problématiques	2
1.1	Problématique du montage	2
1.2	Présentation du montage	2
1.2.1	Rappels sur les thyristors	3
1.2.2	Élaboration de la charge active	3
2	Redresseur en pont complet : réversibilité des transferts de puissance	4
2.1	Principe et formes d'ondes	5
2.2	Mesures de puissances	6
3	Redresseur en pont mixte: transfert unilatéral	8
3.1	Principe et formes d'ondes	8
3.2	Mesures de puissances	9

1 Présentation du montage, problématiques

1.1 Problématique du montage

On se propose ici de réaliser un **convertisseur AC/DC monophasé¹, double alternance, commandé et potentiellement réversible**. On connaît déjà une solution simple à mettre en œuvre: le pont de Graëtz composé de quatre diodes. Néanmoins, on souhaite se placer dans le cadre d'un niveau de tension moyen de sortie réglable, ce qui n'est pas réalisable avec un simple pont de diodes.

On se tourne alors vers les ponts dits commandés réalisés à partir de **thyristors**. De là on distingue deux familles: les redresseurs commandés en **pont complet** et les redresseurs en **pont mixte**.

Ces deux familles permettent, par l'utilisation de composants commandables à l'amorçage, de régler le niveau de tension moyen² de sortie du redresseur.

Il faut remarquer par ailleurs qu'un hacheur quatre quadrants permet aussi bien la réversibilité des transferts de puissance que la possibilité de réguler la tension moyenne de sortie. Toutefois, ce dernier nécessite en entrée une source de tension continue (convertisseur DC/DC) ce qui n'est pas le cas ici.

On peut alors étudier les différents modes de transfert de puissance possibles entre la charge et le réseau:

- Le fonctionnement **en redresseur** : le transfert de puissance se fait d'un réseau alternatif vers une charge dont la tension à ses bornes peut être considérée comme constante (MCC en mode moteur). La charge consomme alors la puissance.
- Le fonctionnement **en onduleur** : le transfert de puissance se fait de la charge (MCC en mode génératrice) vers le réseau alternatif. La fréquence et le niveau de tension du réseau étant imposés, on parle d'onduleur non autonome (ou assité).

On montrera par la suite qu'avec le pont complet, on peut évoluer dans ces deux modes de fonctionnement, alors que le pont mixte ne permet que le fonctionnement redresseur.

1.2 Présentation du montage

Pour réaliser ce montage, nous disposons de ponts complets de thyristors dont la commande sera synchrone sur le réseau³ ainsi qu'un banc de deux MCC couplées permettant de réaliser une charge active.

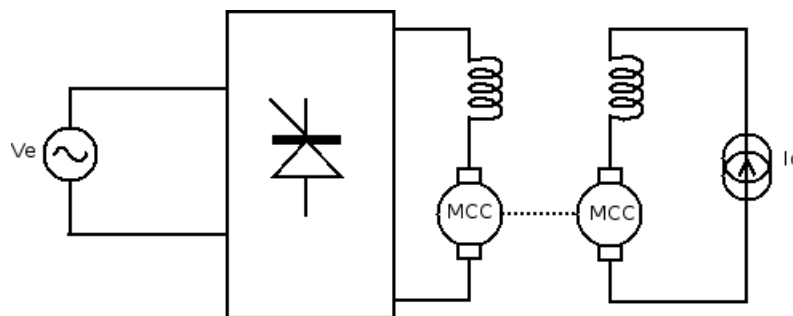


Figure 1. Schéma de principe du montage.

1. On ne se place pas en triphasé afin d'obtenir une ondulation de tension de sortie plus élevée et mettre les différents défauts.

2. On souhaite réguler uniquement la valeur moyenne de la tension commandée de la charge, dans notre cas une machine à courant continu, car celle-ci est uniquement sensible à la valeur moyenne.

3. Ne pas oublier de brancher la synchronisation au réseau.

Par la suite les mesures de puissances seront réalisées avec une pince FLUKE 41B grise qui mesure la puissance réactive comme $Q = \langle v(t - \frac{T}{4})i(t) \rangle$.

On notera V_e la tension efficace du réseau, V la tension moyenne aux bornes de la charge et I_c le courant moyen qu'elle absorbe.

1.2.1 Rappels sur les thyristors

Pour rappel, un thyristor est un interrupteur unidirectionnel en courant mais bidirectionnel en tension dont l'amorçage est commandé:

- le thyristor s'amorce en envoyant une impulsion de courant de gâchette de valeur supérieure à I_{GT} , d'une durée suffisamment longue pour que le courant d'anode dépasse le courant d'accrochage I_l et seulement lorsque la tension anode-cathode v_{ak} est positive et supérieure à une tension de seuil. Le thyristor est alors assimilable à une diode
- le blocage se fait naturellement par l'annulation du courant d'anode, ou plus précisément lorsque ce courant devient inférieur au courant de maintien I_h .

Une fois bloqué, il faut s'assurer que la tension v_{ak} reste inférieure à une tension dite de retournement, pendant un temps au moins égal à un temps dit de recouvrement inverse. Sans cette précaution, on n'évacue pas la totalité des charges en excès dans le composant et le thyristor risque de se réamorcer.

Il faut aussi s'assurer que les variations de la tension v_{ak} soient suffisamment lentes pour empêcher l'amorçage du thyristor.

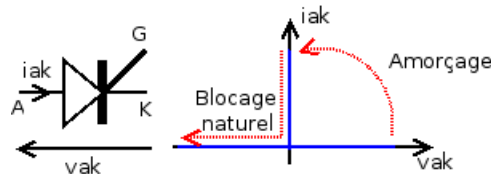


Figure 2. Représentation du thyristor et caractéristiques courant-tension.

Dans toute la suite on appelle Ψ l'angle d'amorçage du thyristor, qui correspond à l'angle (associé au temps $t = \frac{\Psi}{\omega}$) pour lequel on amorce le thyristor. Théoriquement cet angle peut évoluer de 0 à 180°. Néanmoins:

- s'il est trop proche de 0, le courant i_{ak} risque de ne pas dépasser le courant d'accrochage et on ne pourra pas amorcer le thyristor
- s'il est trop de proche de 180°, le temps pour lequel la tension v_{ak} reste négative est inférieur au temps de recouvrement inverse et le thyristor pourrait se réamorcer.

Sur les ponts de thyristors utilisés, cet angle de commande est généralement limité entre quelques degrés et 150°.

1.2.2 Élaboration de la charge active

Pour mettre en évidence ces deux modes de fonctionnement dans le cas du pont complet, nous avons besoin d'une charge active qui permette la réversibilité des transferts de puissance.

Nous utiliserons donc une première Machine à Courant Continu (MCC) commandée en tension (continue) par le redresseur à thyristor étudié. L'arbre de cette MCC sera couplé à l'arbre d'une autre MCC commandée en courant par un autre redresseur. Celle-ci a pour but d'imposer un couple résistant à la première MCC⁴.

Afin de justifier la commande en courant, nous allons nous intéresser à l'expression du couple en fonction de la vitesse:

$$C = \frac{k}{R}(V - k\Omega) \Leftrightarrow \Omega = \frac{V}{k} - \frac{R}{k^2}C, \quad (1)$$

4. Cette MCC doit donc tourner dans le sens contraire de la première.

avec V la tension de commande, k la constante de la machine et R la résistance du modèle de la machine. Le point de fonctionnement est alors l'intersection entre les deux caractéristiques.

Si les deux machines sont commandées en tension, les pentes seront sensiblement identiques; ainsi pour une faible variation de vitesse on aura une grande variation de couple. Pour limiter l'influence des perturbations, il faut coupler les deux machines, l'une commandée en tension (MCC_1) et l'autre en courant (MCC_2).

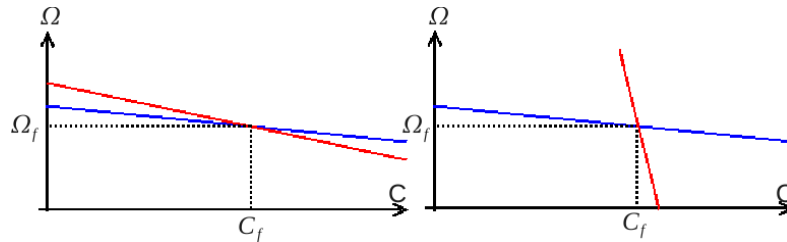


Figure 3. Diagramme $\Omega = f(C)$ pour deux machines commandées en tension à gauche, et deux machines commandées en courant pour l'une et en tension pour l'autre. à droite Pour une commande en courant, on impose le couple qui reste quasi-constant. Pour une commande en tension, on impose la vitesse qui reste quasi-constante.

En pratique, on prendra comme charge un banc de deux machines couplées de tension nominale $V_n = 200V^5$ et de courant nominal $I_n = 9,9A$. La charge totale sera considérée comme une boîte noire.

On utilisera un redresseur monophasé en pont complet possédant une boucle de régulation de courant pour commander la MCC_2 . Ainsi, selon la tension moyenne de commande de la première machine, c'est-à-dire l'angle de commande des thyristors, on pourra régler le transfert de puissance du réseau à la charge.

On utilisera aussi des bobines mises en serie avec les MCC afin de limiter les ondulations de courant (donc de couple et donc de vitesse) et donc de pouvoir considérer que le courant absorbé. Les formes d'ondes qu'on représentera seront visualisées en régime permanent ($\Omega = \text{constante}$).

2 Redresseur en pont complet : réversibilité des transferts de puissance

On propose dans un premier temps d'étudier le redresseur en pont complet dont le schéma de principe est donné en figure 2. Nous mettrons principalement en avant les formes d'ondes et la caractéristique $Q = f(P)$.

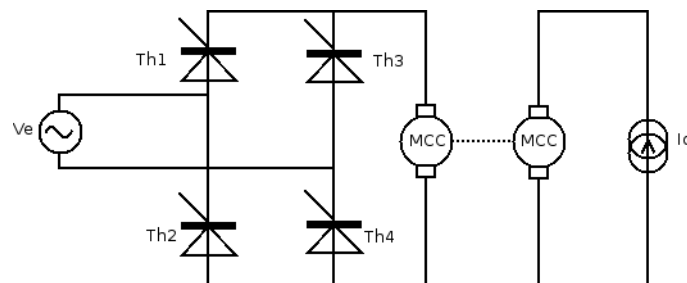


Figure 4. Redresseur en pont complet. Les thyristors $\{Th_1, Th_4\}$ et $\{Th_2, Th_3\}$ ont une commande complémentaire.

5. On s'assurera que pour un angle de commande nul on ne dépasse pas cette valeur.

2.1 Principe et formes d'ondes

On redresse la tension réseau à partir d'un pont de thyristor dont Ψ est l'angle de commande. On peut rappeler l'expression de la valeur moyenne du signal redressé en fonction de Ψ :

$$\langle v(t) \rangle = \frac{2\sqrt{2}V_e}{\pi} \cos(\Psi). \quad (2)$$

On visualise à l'oscilloscope la tension réseau, la tension redressée ainsi que le courant fourni à la charge pour des angles de commande différents. Grâce à cette manipulation on montre qu'on ne peut pas atteindre un angle de commande de 0 ou de 180° , ce qui peut s'expliquer par les conditions de blocage et d'amorçage du thyristor.

Un intérêt immédiat de telles structures est le réglage simple de la tension moyenne redressée, positive ou négative, ainsi que le réglage de la puissance transmise du réseau à la charge.

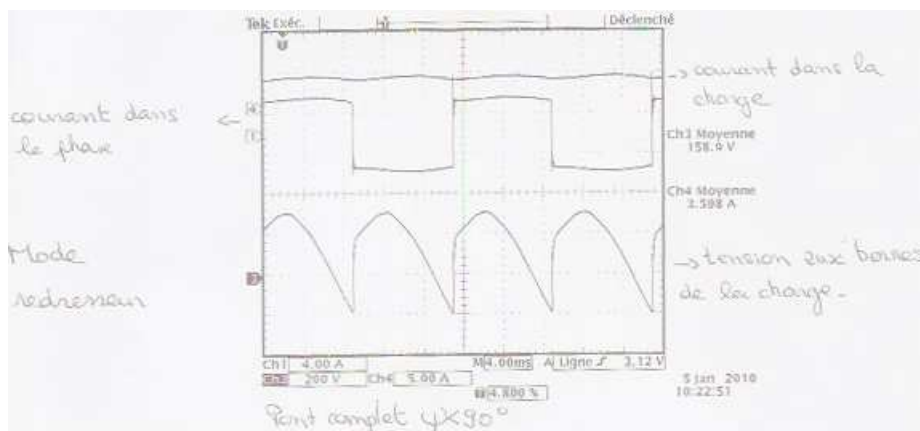


Figure 5. Formes d'ondes pour le pont complet en mode de fonctionnement redresseur.

En supposant que le courant absorbé dans la charge est constant, le courant réseau est un signal quasi-crêteau dont la forme ne dépend pas de l'angle de commande. Nous retrouverons ce résultat à partir de l'expression de la puissance déformante.

L'expression de la tension moyenne aux bornes de la charge indique que cette tension peut changer de signe. Lorsqu'elle est positive la puissance transite du réseau vers la charge (mode redresseur), tandis que lorsqu'elle est négative la puissance transite de la charge vers le réseau (mode onduleur).

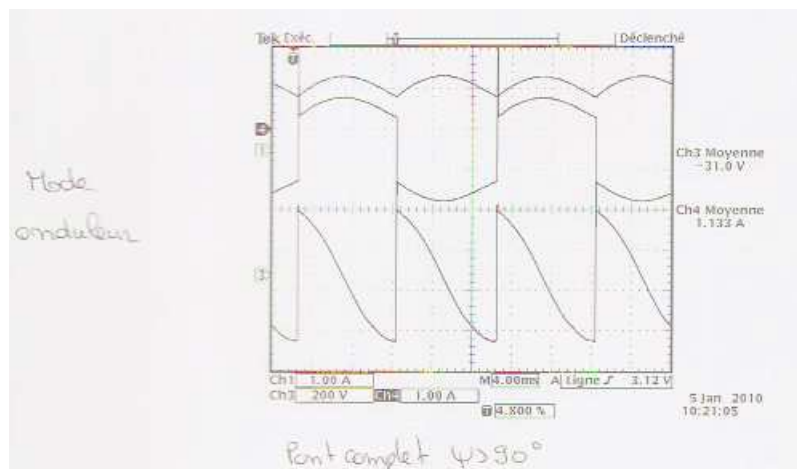


Figure 6. Formes d'ondes pour le pont complet en mode de fonctionnement onduleur (angle de commande proche de 90° ici).

Dans notre cas, si le couple développé par la seconde machine n'est pas élevé, on peut observer des oscillations de la tension aux bornes de la charge⁶. Ce phénomène provient de l'annulation du courant dans la charge. Bien qu'on ait toujours considéré ce courant constant, il possède des oscillations qui peuvent l'amener à s'annuler. On parle alors de régime de conduction discontinue.

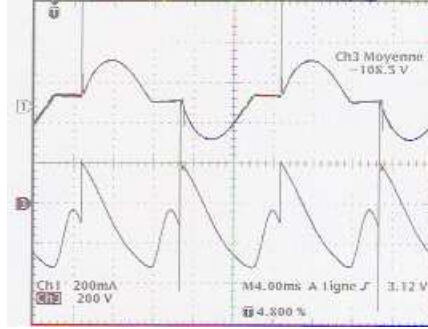


Figure 7. Régime de conduction discontinue pour le pont complet.

2.2 Mesures de puissances

Faisons l'expérience de pensée suivante: on utilise non plus une charge active mais une résistance. En utilisant la pince FLUKE 41B on pourrait alors mesurer les puissances absorbées au niveau du réseau et on se rendrait compte que la puissance réactive n'est pas nulle. Pourtant la charge étant purement résistive il n'est pas intuitif de trouver un tel résultat. Ce phénomène est directement dû au « découpage » de la tension réseau par le pont. Ainsi, le fondamental du courant est déphasé par rapport à la tension réseau ce qui se traduit par la présence d'une puissance réactive.

Nous avons théoriquement, en considérant le courant absorbé par la charge I_c constant:

$$P(\Psi) = \frac{2\sqrt{2}V_e I_c}{\pi} \cos(\Psi) \quad (3)$$

$$Q(\Psi) = \frac{2\sqrt{2}V_e I_c}{\pi} \sin(\Psi) \quad (4)$$

$$S(\Psi) = V_e I_c \Rightarrow \text{PF}(\Psi) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos(\Psi) \leq 90\% \quad (5)$$

Cette dernière équation donne un maximum du facteur de puissance qui ne peut être unitaire. En effet, pour $\Psi = 0$ le courant réseau n'est pas sinusoïdal donc il est bien normal d'avoir un facteur de puissance non unitaire, bien que la puissance réactive soit nulle. C'est la puissance déformante qui en est la cause et qui est définie par:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 = \left(1 - \frac{8}{\pi^2}\right) V_e^2 I_c^2 \Rightarrow D \simeq 0,43 V_e I_c. \quad (6)$$

Étrangement, cette puissance déformante ne dépend pas de l'angle de commande Ψ . **En effet la forme d'onde du courant réseau ne se déforme pas, seul le déphasage du fondamental du courant avec la tension réseau évolue.** On représentera le facteur de puissance théorique avec celui du pont mixte pour observer les différences.

On peut s'affranchir du paramètre Ψ et exprimer l'équation dans le plan $Q(P)$:

$$P^2 + Q^2 = \frac{8V_e^2 I_c^2}{\pi^2} \quad (7)$$

6. Théoriquement, la tension aux bornes de la charge reste constante lorsque le courant s'annule. Les oscillations traduisent un phénomène de commutation interne à la machine.

Dans le diagramme $Q(P)$, cette équation est celle d'un cercle centrée au point $(0,0)$ et de rayon $r = \left| \frac{2\sqrt{2}V_e I_c}{\pi} \right|$ qui dépend du courant absorbée par la MCC_1 . Le diagramme expérimental est donné en figure 6.

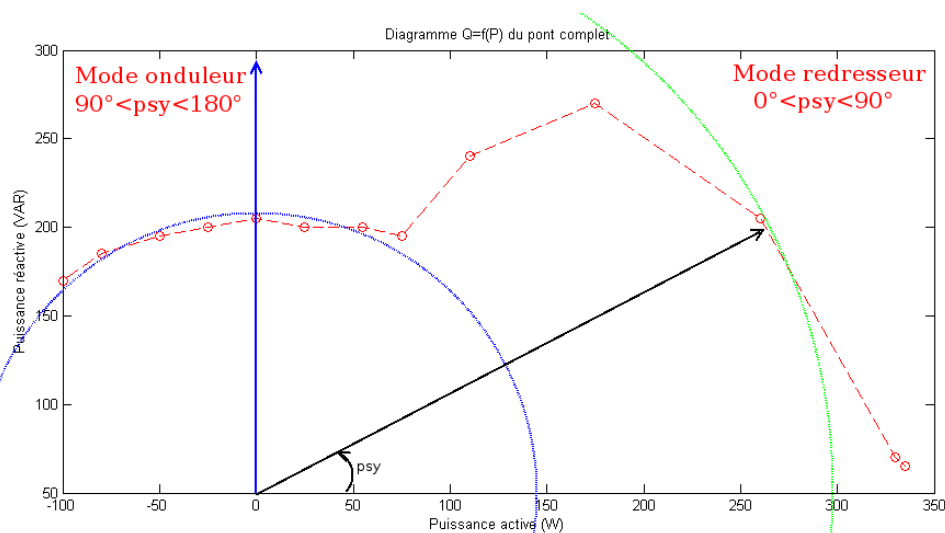


Figure 8. Diagramme $Q = f(P)$ du redresseur à pont complet. Entre les deux cercles, il y a une zone de transitions entre les deux modes de fonctionnement.

On observe que le diagramme expérimental ne correspond pas à un cercle. Selon le mode de fonctionnement, on a bien un arc de cercle mais de rayon différent entre le mode redresseur ($P > 0 \rightarrow R_{red}$) et le mode onduleur ($P < 0 \rightarrow r_{ond}$). La seule variable qui peut être amenée à évoluer ici est le courant absorbé par la charge qui est donc image du couple sur l'arbre. Si on suppose le rendement de la machine unitaire et si on appelle C_f le couple de frottement extérieur dû au couplage entre les deux machines, on peut exprimer ces deux rayons.

Dans le cas du mode redresseur, le couple développé par la première machine est opposé au couple de la deuxième machine d'où :

$$R_{red} = P(\Psi = 0) = |C_{1_{red}}|\Omega = |(-C_2 - C_f)|\Omega \simeq 300W. \quad (8)$$

Dans le cas du mode onduleur, le couple développé par la première machine a la même orientation que le couple de la deuxième machine d'où :

$$r_{ond} = |P(\Psi = \pi)| = C_{1_{ond}}\Omega = (C_2 - C_f)\Omega \simeq 150W. \quad (9)$$

. Le rayon du cercle en mode onduleur est donc inférieur au rayon du cercle en mode redresseur à cause du couple de frottement qui s'oppose toujours au mouvement et à même vitesse de rotation. On peut ainsi remonter à la valeur du couple de frottement en soustrayant les deux rayons.

On peut constater que la transition entre les deux modes de fonctionnement ne se fait pas pour $\Psi = 90^\circ$. Pour cet angle de commande à puissance nulle, la tension aux bornes de la charge est aussi nulle. Or le rotor de la première machine est soumis à un couple non nul donc le courant de charge n'est pas nul. Or nous avons $R.I_c + k\Omega = 0 \Rightarrow \Omega \neq 0$. La vitesse de rotation est donc non nulle bien que la machine ne soit pas commandée. Néanmoins, on peut déterminer un angle de commande tel cette vitesse de rotation s'annule, c'est-à-dire lorsqu'on change de mode de fonctionnement.

3 Redresseur en pont mixte: transfert unilatéral

Il y a ici deux possibilités: le pont mixte symétrique et le pont mixte asymétrique. Nous travaillerons nous sur le pont mixte symétrique.

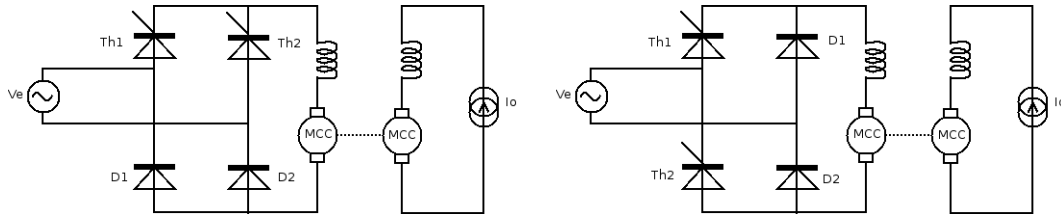


Figure 9. À gauche le pont mixte symétrique et à droite le pont mixte asymétrique.

Le pont asymétrique permet d'aller jusqu'à un angle de commandes proche de 180° car les modes de roue libre se font grâce à une diode et non pas avec un thyristor contrairement au pont symétrique. Puisque nous sommes limités à 150° avec les blocs utilisés nous avons étudié le pont symétrique.

3.1 Principe et formes d'ondes

Dans le cas du pont mixte la tension moyenne aux bornes de la charge est donnée par l'expression:

$$\langle v(\Psi) \rangle = \frac{\sqrt{2}V_e}{\pi}(1 + \cos(\Psi)). \quad (10)$$

On constate directement que cette expression est toujours positive quelque soit l'angle d'amorçage, donc on doit s'attendre à obtenir un transfert unilatéral de la puissance du réseau vers la charge ($P(\Psi) > 0 \forall \Psi$).

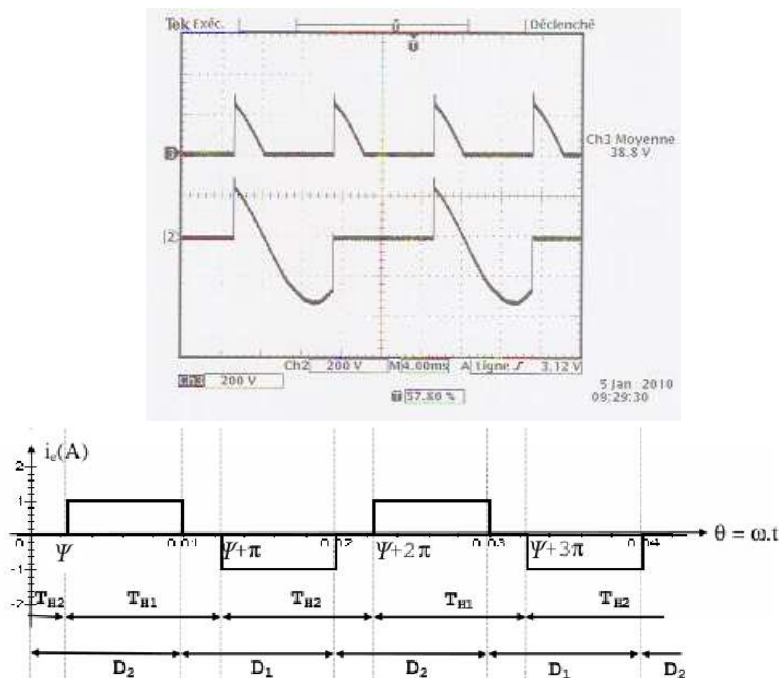


Figure 10. Formes d'ondes pour le redresseur en pont mixte symétrique. Sur le premier chronogramme, on représente en haut la tension de sortie et en bas la tension aux bornes de Th_1 . Le chronogramme au-dessous est un chronogramme théorique du courant réseau.

Contrairement au pont complet, le courant réseau⁷ dans le cas du pont mixte se déforme et prend « trois états » : égal à $\pm I_c$ ou 0. Ainsi, lorsque l'angle de commande augmente la largeur pour laquelle le courant est nul augmente (sa forme d'onde se déforme) et son allure est plus proche d'une sinusoïde que dans le cas d'un pont complet. Dans le cas où $\Psi = 0$ on retrouve les formes d'ondes du redresseur à pont de Graëtz monophasé double-alternance.

3.2 Mesures de puissances

En ce qui concerne les puissances, nous avons les expressions suivantes:

$$P(\Psi) = \frac{\sqrt{2}V_e I_c}{\pi} (1 + \cos(\Psi)) \quad (11)$$

$$Q(\Psi) = \frac{\sqrt{2}V_e I_c}{\pi} \sin(\Psi) \quad (12)$$

$$I_{\text{eff}} = I_c \sqrt{1 - \frac{\Psi}{\pi}} \Rightarrow S(\Psi) = V_e I_c \sqrt{1 - \frac{\Psi}{\pi}} \Rightarrow \text{PF}(\Psi) = \frac{\sqrt{2}(1 + \cos(\Psi))}{\pi \sqrt{1 - \frac{\Psi}{\pi}}} \quad (13)$$

La puissance déformante a maintenant l'expression:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 = V_e^2 I_c^2 \left(1 - \frac{4}{\pi^2} - \frac{\Psi}{\pi} - \frac{4}{\pi^2} \cos(\Psi)\right). \quad (14)$$

Contrairement au pont complet, la puissance déformante dépend directement de l'angle de commande. On retrouve ici l'intuition qu'on avait en observant les formes d'ondes du courant réseau concernant le facteur de puissance. Dans un cas idéal on peut se rapprocher d'une puissance déformante nulle ce qui améliore le facteur de puissance par rapport au pont complet.

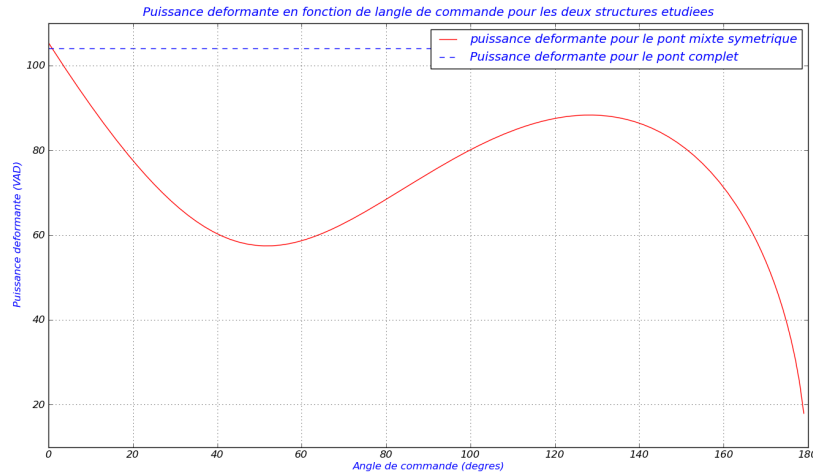


Figure 11. Évolution de la puissance déformante en fonction de l'angle de commande.

On peut constater ici que la puissance déformante a un minimum local pour $\Psi = 51^\circ$, ce qui ne correspond pas à un maximum du facteur de puissance. En effet il faut prendre aussi compte de la puissance réactive qui elle augmente avec Ψ .

⁷ Pour visualiser le courant réseau, il faut prendre une pince ampémétrique et non pas visualiser la sortie du capteur de courant disponible sur le pont, ce qui n'a pas été fait.

Dans le diagramme $Q(P)$ nous avons:

$$\left(P - \frac{\sqrt{2}V_e I_c}{\pi}\right)^2 + Q^2 = \frac{2V_e^2 I_c^2}{\pi^2}. \quad (15)$$

Il s'agit donc d'un cercle centré en $\left(\frac{\sqrt{2}V_e I_c}{\pi}, 0\right)$ et de rayon $r = \frac{\sqrt{2}V_e I_c}{\pi} \simeq 160W$. Dans les mêmes conditions expérimentales (même couple C_2), ce rayon doit être deux fois plus faible que le rayon en mode redresseur du pont complet, ce qu'on retrouve assez bien.

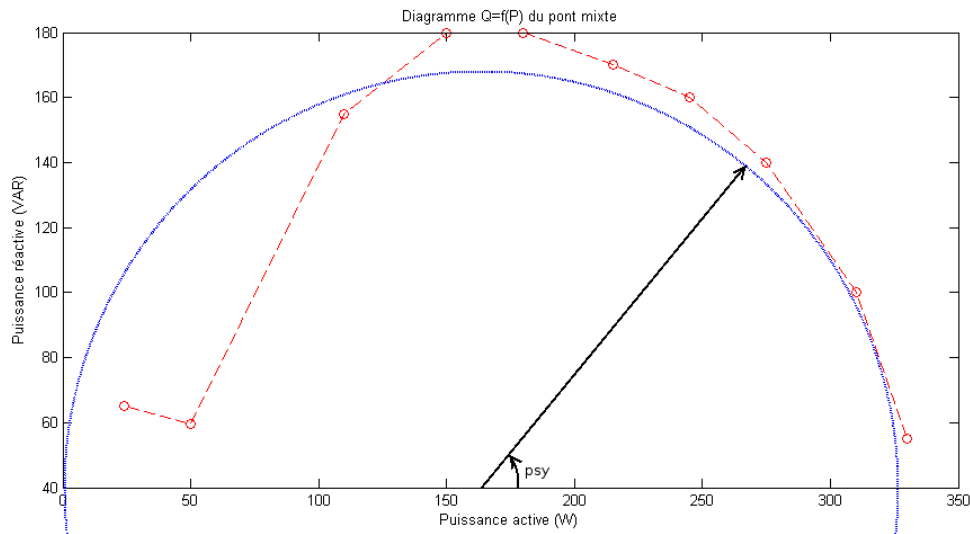


Figure 12. Diagramme $Q = f(P)$ du pont mixte symétrique.

La puissance active reste toujours positive donc le transfert de puissance ne peut se faire que du réseau vers la charge. Le pont mixte ne permet donc pas la réversibilité des transferts de puissance mais assure un facteur de puissance meilleur que dans le cas du pont complet. Lorsque cette réversibilité n'est pas nécessaire, on optera pour ce type de structure.

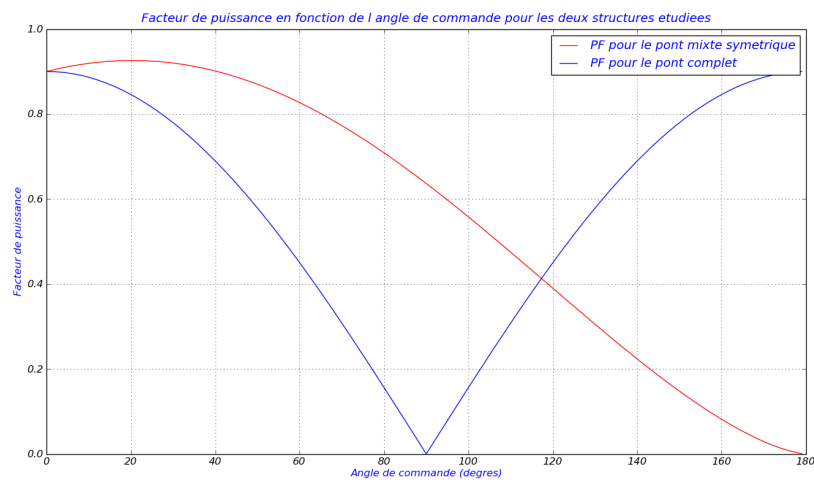


Figure 13. Facteur de puissance pour le pont mixte et le pont complet.

On a ici dans le cas du pont mixte un maximum du facteur de puissance de 92,6% pour un angle de commande de 20° ce qui ne correspond pas à un minimum de la puissance déformante. Le pont mixte permet d'augmenter de 2% le facteur de puissance maximal par rapport au pont complet en mode redresseur. Sur une motrice de $1MW$ (motrice de TGV par ex.), on gagne $20kW$ sur la puissance active.