

CHAPITRE 2

LES MONTAGES REDRESSEURS

II-7-1 Redressement simple alternance non commandé (charge résistive)

a- Montage

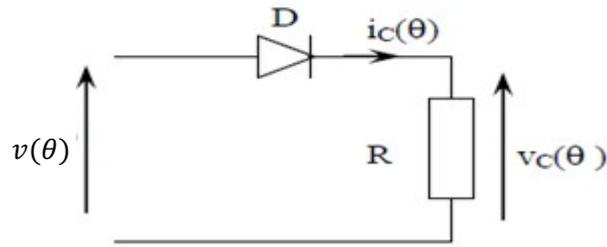


Figure II.5 : Montage simple alternance non commandé alimentant une charge résistive

La tension d'alimentation: $v(\omega t) = v_m \sin(\omega t)$, on pose $\omega t = \theta$

b- Analyse du fonctionnement : • Pour $0 < \theta < \pi$

D est passante (polarisée en directe)

$$v_c(\theta) = v(\theta)$$

$$i_c(\theta) = \frac{v_c(\theta)}{R} = \frac{v_m}{R} \sin(\theta)$$

$i_c(\theta)$ et $v_c(\theta)$ ont la même forme.

• Pour $\pi < \theta < 2\pi$: D est bloquée

$$v_c(\theta) = i_c(\theta) = 0$$

c- Formes d'ondes des différentes grandeurs

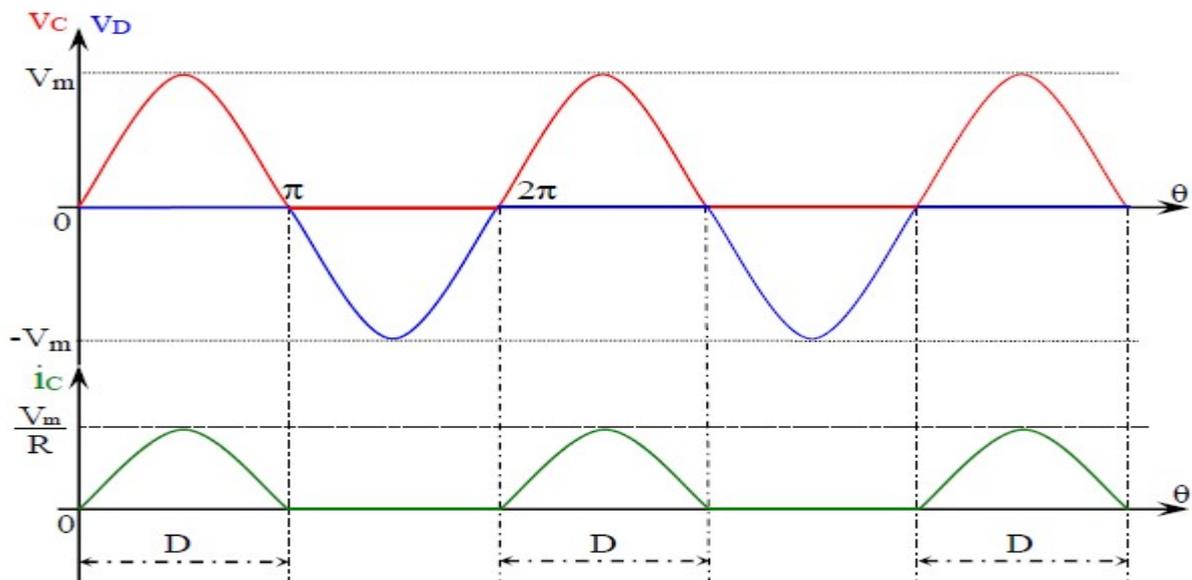


Figure II.6 : Forme d'ondes pour un redresseur monophasé simple alternance non commandé

d- Valeur moyenne de la tension v_c

La valeur moyenne de la tension $v_c(t)$ est :

$$v_{c \text{ moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi v(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi v_m \sin(\theta) d\theta = \frac{v_m}{\pi} \quad \text{II.1}$$

$$\Rightarrow I_{c \text{ moy}} = \frac{v_{c \text{ moy}}}{R} = \frac{v_m}{\pi R} \quad \text{II.2}$$

II-7-2 Redressement simple alternance commandé (charge résistive)

a- Montage

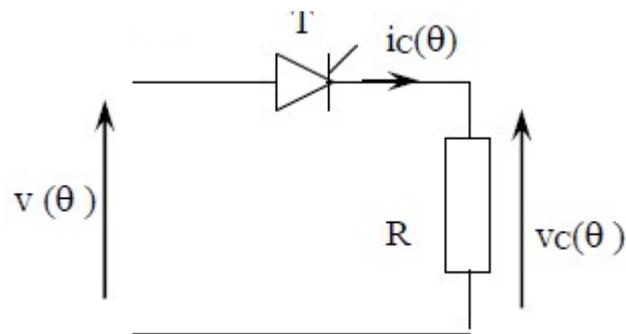


Figure II.7: Montage redresseur monophasé simple alternance commandé (charge résistive)

b- Analyse du fonctionnement

On amorce le thyristor avec un retard à l'amorçage α :

Le thyristor conduit jusqu'à π où le courant s'annule (charge résistive).

L'amorçage suivant s'effectue à $2\pi + \alpha$.

- Pour $\alpha < \theta < \pi$: $v(\theta) > 0$, Th conduit

$$v_c(\theta) = v(\theta)$$

$i_c(\theta)$ et $v_c(\theta)$ ont la même forme.

- Pour $\pi < \theta < 2\pi$: $v(\theta) < 0$, Th bloqué

$$i_c(\theta) = 0 \text{ et } v_c(\theta) = 0.$$

c- Formes d'ondes des différentes grandeurs

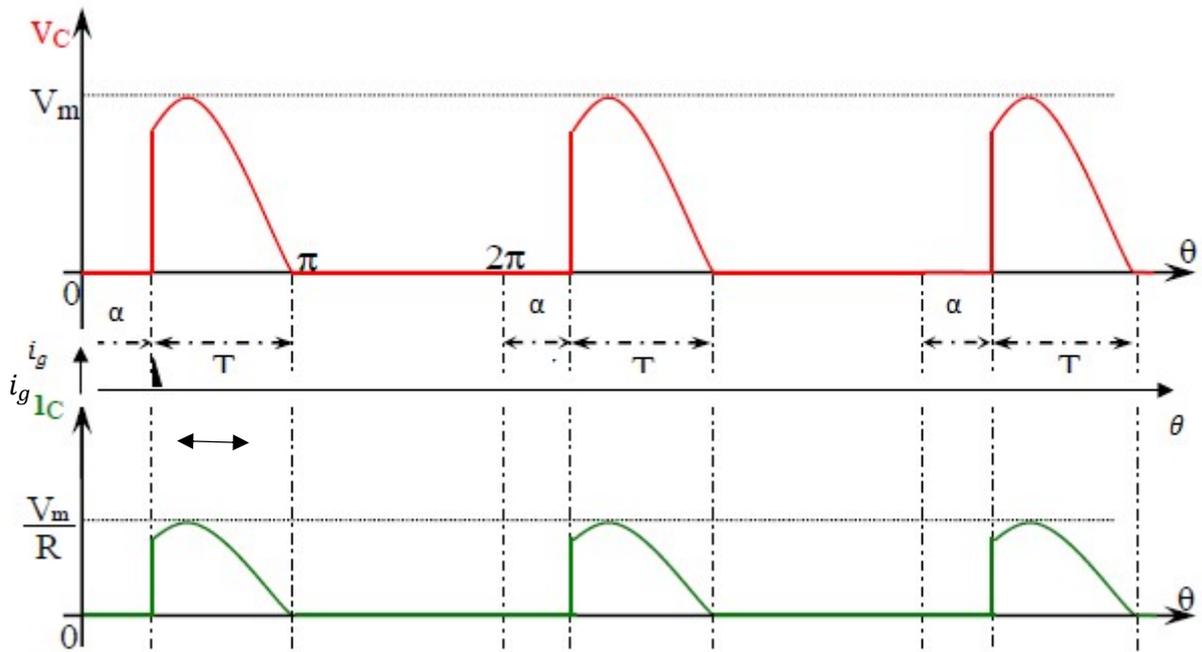


Figure II.8 : Forme d'ondes pour un montage simple alternance commandé (charge résistive)

d- Valeur moyenne de la tension v_c

La valeur moyenne de la tension de charge est :

$$V_{cmoy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_m \sin(\theta) d\theta = \frac{v_m}{2\pi} (1 + \cos\alpha) \quad \text{II.3}$$

En faisant varier α de 0 à π on peut varier la tension moyenne de sortie de $\frac{v_m}{\pi}$ à 0

II-7-3- Redressement simple alternance commandé (charge inductive)

a- Montage

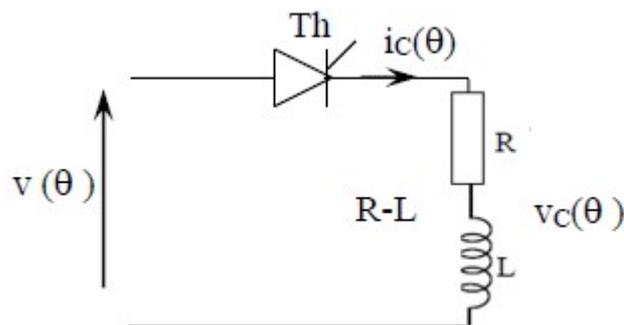


Figure II.9 : Montage redresseur monophasé simple alternance commandé alimentant une charge inductive

b- Analyse du fonctionnement

On amorce le thyristor à un retard à l'amorçage α

Etant donné que la charge est inductive la conduction du thyristor continue jusqu'à un angle $\beta > \pi$ (instant de blocage) où le courant s'annule.

Le courant dans le thyristor ne s'annule pas instantanément au passage de la tension par zéro

Donc sur une période de 2π , la conduction est de α à β .

• Pour $\alpha < \omega t < \beta$:

$$v_c(t) = v(t)$$

$$L \frac{di_c(t)}{dt} + Ri_c(t) = v_m \sin(\omega t)$$

Equation différentielle de 1^{er} ordre avec second membre sinusoïdale

Le courant $i_c(\theta)$ est la somme de deux courants i_f courant permanent ou forcé et i_l courant libre.

$$\text{Donc : } i_c(t) = i_l(t) + i_f(t)$$

$$\text{On a donc : } i_c(t) = Ke^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{v_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\text{Avec } Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}, \tau = \frac{L}{R}, \varphi = \arctg\left(\frac{L\omega}{R}\right)$$

$$\text{Pour } t = \frac{\alpha}{\omega} \Rightarrow i_{ch}(t) = 0$$

$$\Rightarrow 0 = Ke^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} + \frac{v_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi)$$

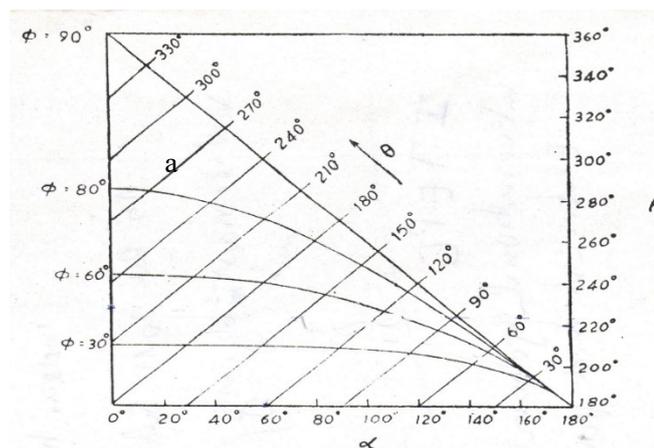
$$\Rightarrow K = -\frac{v_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{+\frac{\alpha}{\omega\tau}}$$

$$\Rightarrow i_c(t) = \frac{v_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\left(\frac{t-\alpha}{\tau}\right)} \right] \quad \text{II.4}$$

Le thyristor est bloqué lorsque :

$$i_c(\beta) = 0 \Rightarrow \frac{v_m}{Z} \left[\sin(\beta - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\beta-\alpha}{\omega\tau}} \right] = 0 \quad \text{II.5}$$

On peut résoudre cette équation graphiquement ou par la méthode des abaques (voir figure II.20).



b

Figure II.20 Méthode des abaques pour la détermination de l'angle d'extinction β

β sera comprise entre : $\pi < \beta < 2\pi$

- Pour $\beta < \theta < 2\pi + \alpha$: Th bloqué

donc : $i_c(t) = 0$ et $v_c(t) = 0$.

c- Valeur moyenne de la tension $v_c(\theta)$

La valeur moyenne de la tension $v_c(\theta)$ est :

$$V_{cmoy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_m \sin(\theta) d\theta = \frac{v_m}{2\pi} (\cos\alpha - \cos\beta) \quad \text{II.6}$$

d- Formes d'ondes des différentes grandeurs

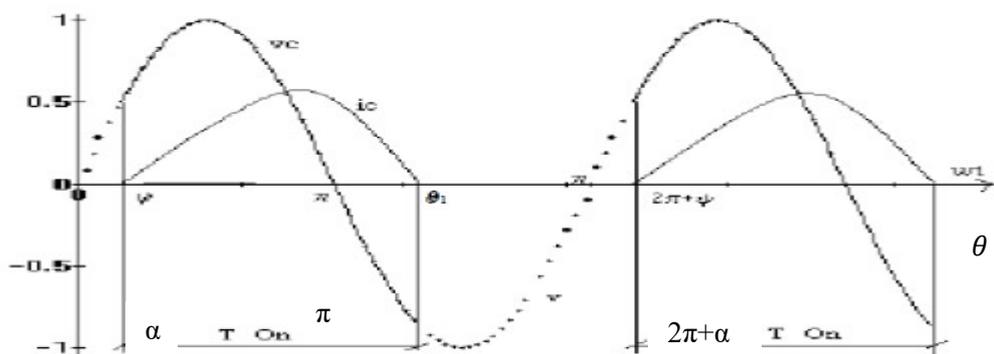


Figure II.21 : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur monophasé commandé

II-7-4- Redressement simple alternance non commandé sur charge inductive avec diode de roue libre

a- Montage

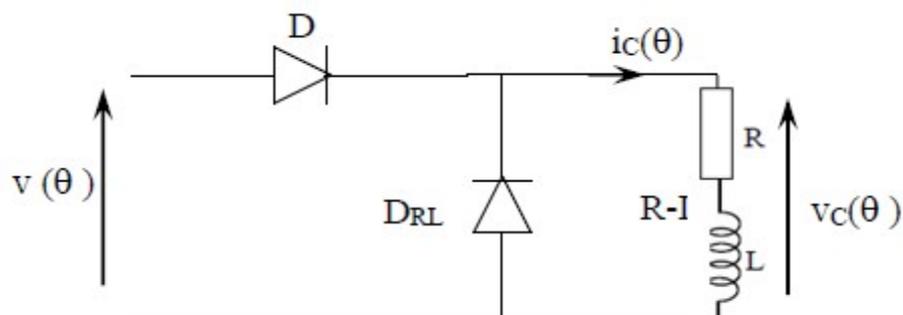


Figure II.22 : Montage simple alternance charge inductive avec D_{RL} (charge RL)

b- Analyse du fonctionnement

- Pour $0 < \theta < \pi: v(\theta) > 0$

La diode D étant passante alors que la diode DRL est bloquée, on a :

$$v_c(\theta) = v(\theta)$$

$$L \frac{di_c(\theta)}{d\theta} + Ri_c(\theta) = v_m \sin \theta$$

$$\text{On a donc : } i_c(\theta) = Ke^{-\frac{\theta}{\tau}} + \frac{v_m}{Z} \sin(\theta - \varphi)$$

$$\text{Avec } Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}, \tau = \frac{L\omega}{R}, \varphi = \arctg\left(\frac{L\omega}{R}\right)$$

$$\text{Pour } \theta=0 \Rightarrow i_{ch}(\theta) = I_0$$

$$\Rightarrow I_0 = Ke^{-\frac{0}{\tau}} + \frac{v_m}{Z} \sin(-\varphi)$$

$$\Rightarrow K = I_0 + \frac{v_m}{Z} \sin(\varphi)$$

$$\Rightarrow i_c(\theta) = \frac{v_m}{Z} \sin(\theta - \varphi) + \left[I_0 + \frac{v_m}{Z} \sin(\varphi) e^{-\frac{\theta}{\tau}} \right] \text{II.7}$$

- Pour $\pi < \theta < 2\pi: v(\theta) < 0$

La D_{RL} est passante alors que la diode D est bloquée, on a : $L \frac{di_c(\theta)}{d\theta} + Ri_c(\theta) = 0$

$$\text{On a donc : } i_c(\theta) = Ke^{-\frac{\theta}{\tau}}$$

$$\text{Pour } \theta=\pi, \text{ on a : } i_c(\pi) = I_\pi = Ke^{-\frac{\pi}{\tau}}$$

À $\theta=2\pi$ le courant de charge revient à sa valeur initiale I_0

c- Formes d'ondes des différentes grandeurs

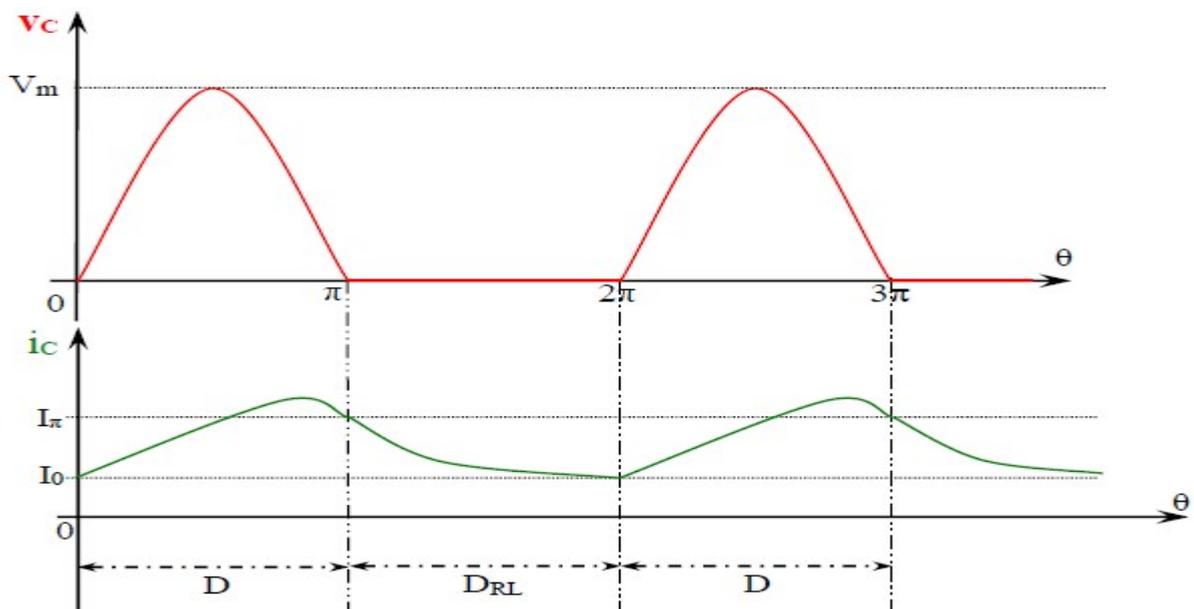


Figure II.23 : Forme d'ondes d'un redresseur non commandé avec D_{RL} (charge RL)

On en déduit le rôle de la diode de roue libre :

- Elle élimine la tension négative
- Elle assure la continuité du courant dans la charge lorsque la tension aux bornes de la charge est nulle

II-7-5- Montage redresseur biphasé à point milieu non commandé P2

a- Montage

Dans ce montage l'alimentation n'est pas directe mais via un transformateur monophasé à point milieu au secondaire. On suppose que la charge absorbe un courant continu i_c constant

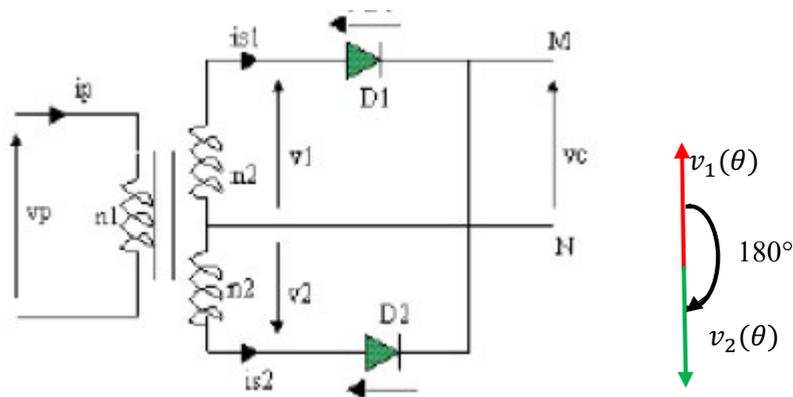


Figure II.24 : Schéma d'un redresseur biphasé simple alternance non commandé.

- $v_1(\theta)$ et $v_2(\theta)$ sont deux tensions égales déphasées de π
- On les redresse avec les diodes D_1 et D_2

$$v_1(\theta) = v_m \sin \theta$$

$$v_2(\theta) = -v_m \sin \theta$$

b- Analyse du fonctionnement

- Pour $0 < \theta < \pi$: D_1 conduit et D_2 bloquée car $v_1(\theta) > 0$ et $v_2(\theta) < 0$, d'où :

$$v_c(\theta) = v_1(\theta) = v_m \sin \theta$$

$$v_{D1} = 0 \text{ et } v_{D2} = v_2(\theta) - v_1(\theta) = -2v_m \sin \theta$$

$$i_c(\theta) = I_c$$

$$i_{s1}(\theta) = I_c$$

$$i_{s2}(\theta) = 0$$

- Pour $\pi < \theta < 2\pi$: D_2 conduit et D_1 bloquée car $v_1(\theta) < 0$ et $v_2(\theta) > 0$, d'où :

$$v_c(\theta) = v_2(\theta) = -v_m \sin \theta$$

$$v_{D2} = 0 \text{ et } v_{D1} = v_1(\theta) - v_2(\theta) = -2v_m \sin\theta$$

$$i_c(\theta) = I_c$$

$$i_{s2}(\theta) = I_c$$

$$i_{s1}(\theta) = 0$$

c- Formes d'ondes des différentes grandeurs

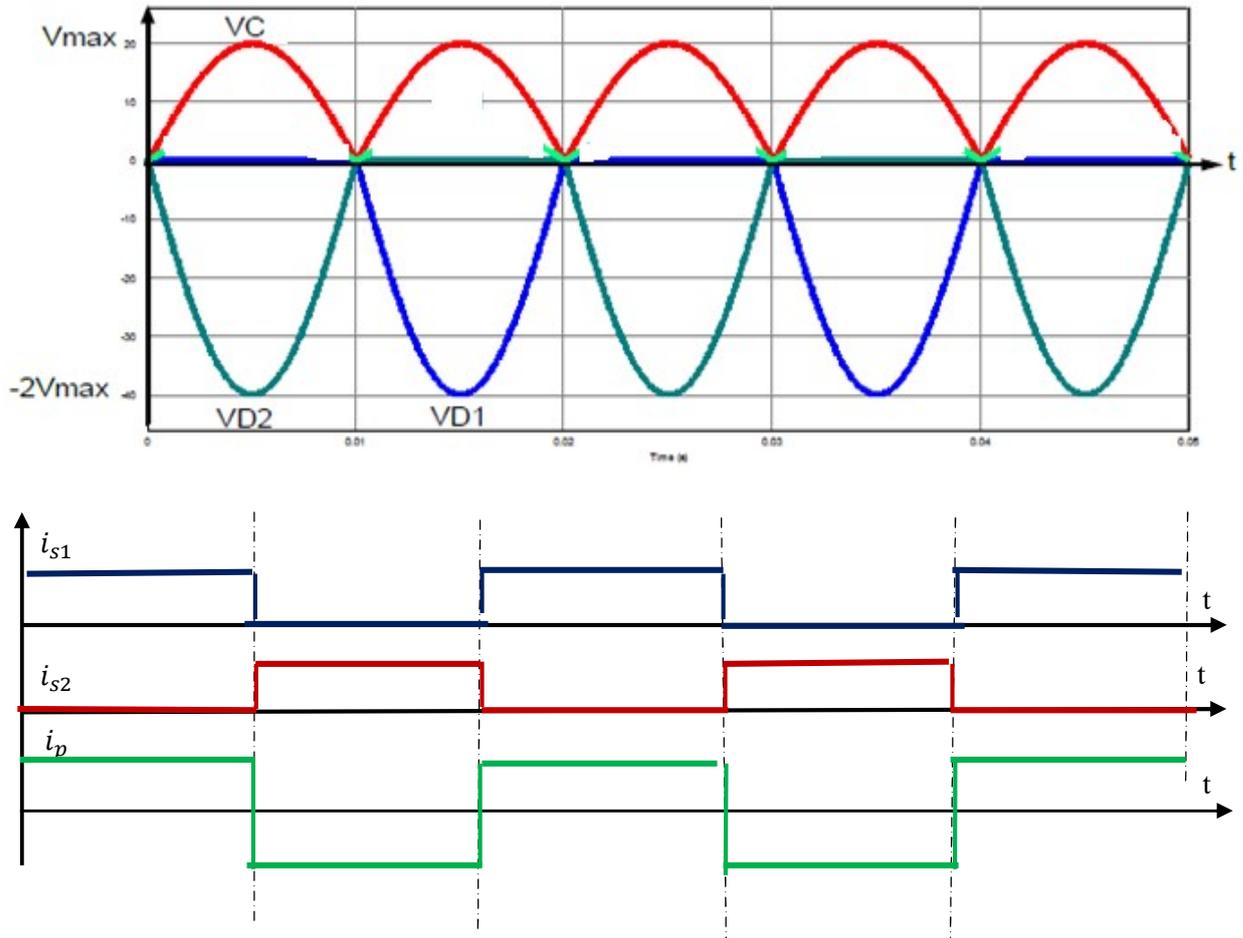


Figure II.25 : Forme d'ondes des différentes grandeurs pour un redresseur à point milieu non commandé

d- Valeur moyenne de la tension redressée

La valeur moyenne de la tension redressée est : $V_{cmoy} = \frac{2}{2\pi} \int_0^\pi v_m \sin(\theta) d\theta = \frac{2v_m}{\pi}$ II.8

e- Etude des courants

Au primaire, nous avons :

$$n_1 i_p = n_2 i_{s1} - n_2 i_{s2} = n_2 (i_{s1} - i_{s2}) \Rightarrow i_p = \frac{n_2}{n_1} (i_{s1} - i_{s2}) = m (i_{s1} - i_{s2}) \quad \text{II.9}$$

avec n_1, n_2 désigne respectivement le nombre des spires du primaire et secondaire.

m le rapport de transformation du transformateur. Le courant i_p est alternatif non sinusoïdal.

f- Courants efficaces dans les diodes et tension inverse maximale :

On peut l'obtenir par intégration sachant que le courant de charge est constant,

$$I_{Deff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_c^2 d\theta} = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \quad \text{II.10}$$

On procède par intégration ou plus simplement en extrayant la racine carrée de la moyenne de la somme des carrés des courants sur deux intervalles égaux soit :

$$I_{Deff} = \sqrt{\frac{i_c^2 + 0^2}{2}} = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \quad \text{II.11}$$

La tension inverse maximale que doit supporter la diode en blocage est déduite de la forme d'onde de la tension aux bornes de la diode (figure 14) : $V_{Dinv} = 2v_m$

g- Facteur de puissance au secondaire : $Fp = \frac{P}{S_s}$

P : puissance active consommée égale à la puissance de la charge

S_s : puissance apparente au secondaire

$$P = P_c = V_{chmoy} I_c = \frac{2v_m}{\pi} V_c$$

$$S = 2V_{eff} I_{seff} = 2 \frac{v_m}{\sqrt{2}} \frac{i_c}{\sqrt{2}} = v_m I_c$$

$$Fp = \frac{\frac{2v_m I_c}{\pi}}{v_m I_c} = \frac{2}{\pi} = \mathbf{0.636} \quad \text{II.12}$$

h- Facteur de puissance au primaire

$$Fp = \frac{P}{S_p} \quad \text{avec : } S_p \text{ puissance apparente au primaire}$$

$$\text{Avec : } P = P_c = V_{cmoy} = \frac{2v_m}{\pi} I_c$$

$$\text{Sachant que } I_{peff} = \sqrt{\frac{I_c^2 + I_c^2}{2}} = I_c$$

$$S = V_{eff} I_{peff} = \frac{v_m}{\sqrt{2}} I_c$$

$$\Rightarrow Fp = \frac{\frac{2v_m I_c}{\pi}}{\frac{v_m I_c}{\sqrt{2}}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = \mathbf{0.9} \quad \text{II.13}$$

II-8- Les montages redresseurs monophasé en pont

Trois cas pratiques existent :

1. Tous les interrupteurs sont des diodes (pont non commandé)
2. Tous les interrupteurs sont des thyristors (pont commandé)
3. Pont mixte (semi commandé symétrique ou asymétrique)

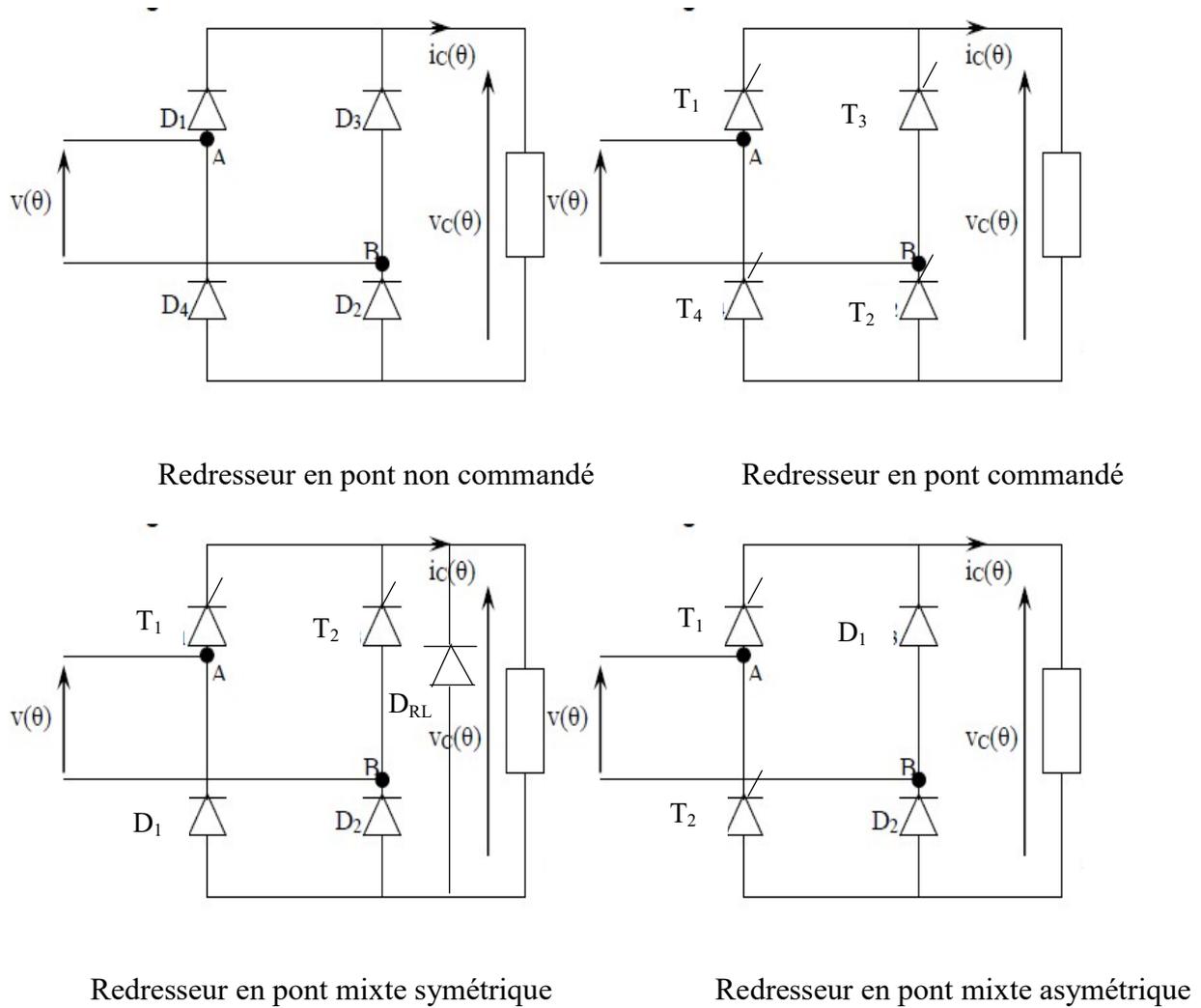


Figure II.26 : Montages redresseurs monophasés en pont

II-8-1- Redresseur en pont à diodes débitant sur charge résistive

a- Montage

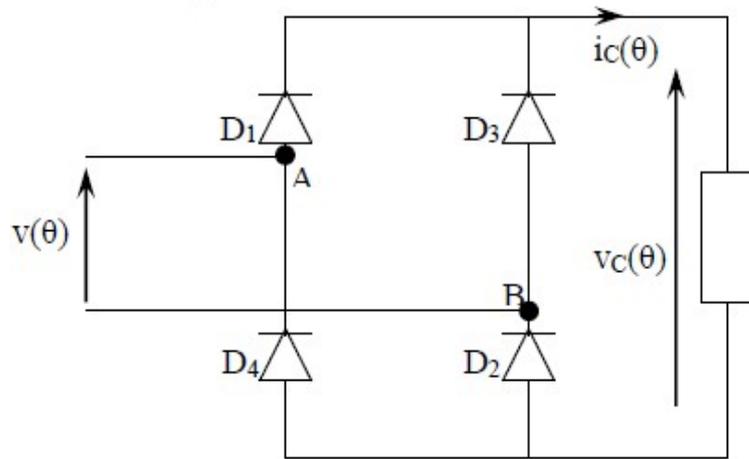


Figure II.27: Schéma d'un pont monophasé tous diodes

b- Analyse du fonctionnement

- Pour $0 < \theta < \pi : v(\theta) > 0$

D1 et D2 sont conductrices car la polarité de la borne A est positive et celle de B est négative, d'où :

$$v_c(\theta) = v_m \sin(\theta)$$

$i_c(\theta)$ et $v_c(\theta)$ ont la même forme.

- Pour $\pi < \theta < 2\pi : v(\theta) < 0$

La polarité de la borne A devient négative et la polarité de la borne B devient positive, donc D3 et D4 conduisent et D1 et D2 se bloquent, d'où :

$$v_c(\theta) = -v_m \sin(\theta)$$

a- Formes d'ondes des différentes grandeurs

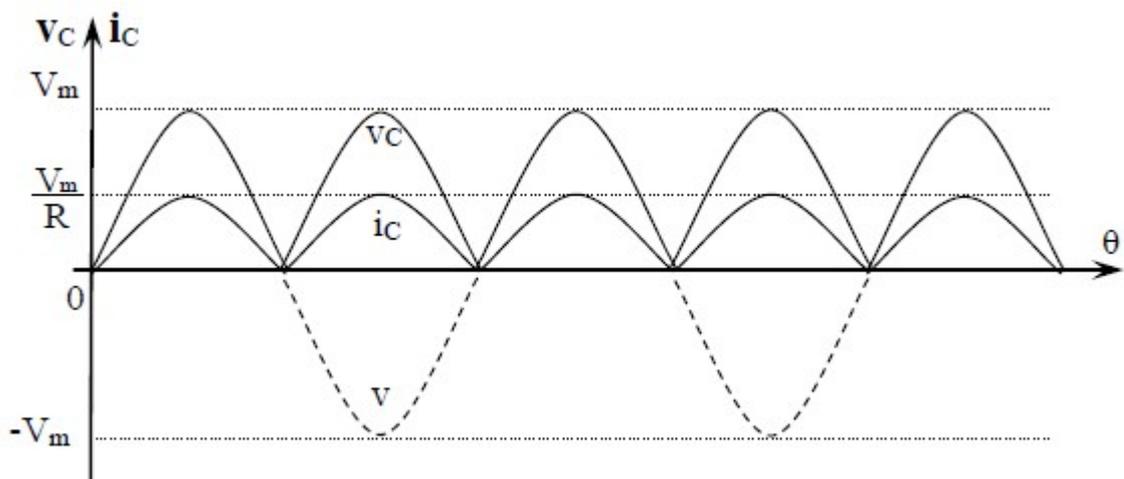


Figure II.28 : Forme d'ondes des différentes grandeurs d'un pont tous diode charge R.

On remarque que le taux d'ondulation s'améliore : le nombre d'alternance par période est égal à deux ; alors qu'il était un dans le cas d'un redressement par une diode, donc :

$$v_{cmoy} = \frac{2}{2\pi} \int_0^\pi v(\theta) d\theta = \frac{2}{2\pi} \int_0^\pi v_m \sin(\theta) d\theta = \frac{2v_m}{\pi} = 0.9 V_{eff} \text{ II.14}$$

* Pas de problème de discontinuité dans le cas des charges inductive (le courant est toujours continu)

II-8-2 Pont tous thyristors (débit sur charge fortement inductive)

a- Montage

Ce montage est utilisé pour alimenter les machines à courant continu (DC). Il permet la récupération de l'énergie électrique en cas de fonctionnement de la machine en mode génératrice. C'est à dire le transfert de l'énergie s'effectue de la machine vers le réseau.

- T₁ et T₂ sont déclenchés à $\alpha \in [0, \pi]$, durant l'alternance positive de la tension d'alimentation
- T₃ et T₄ sont déclenchés à $\alpha + \pi$, durant l'alternance négative de la tension d'alimentation

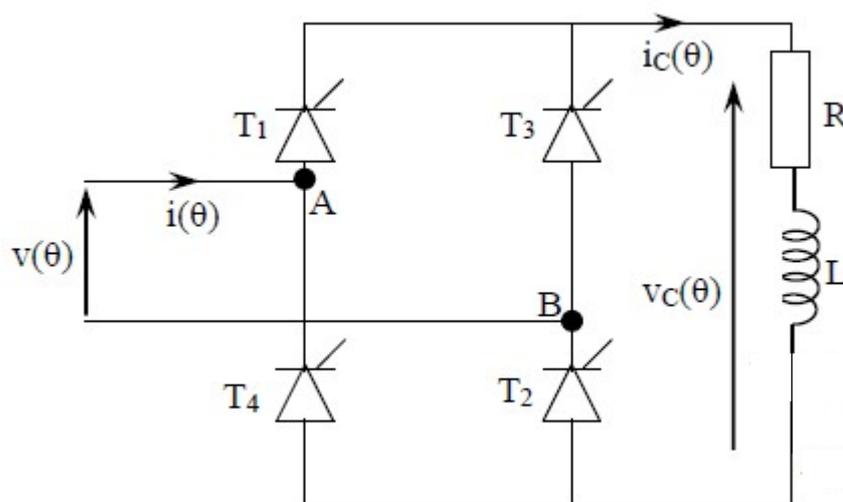


Figure II.29 : Schéma globale d'un pont monophasé tous thyristors

b- Analyse du fonctionnement

On insère habituellement en série avec la charge une inductance élevée que l'on suppose de valeur infinie.

Cette inductance appelée inductance de lissage n'est pas forcément nécessaire quand l'inductance de la charge est elle-même importante (commande d'un moteur série à courant continu...)

Ainsi, le courant dans la charge est constant : $i_c(\theta) = I_c = cst$

- Pour $\alpha < \theta < \pi + \alpha$: T₁ et T₂ conducteurs :

$$v_c(\theta) = v_m \sin(\theta), v_{T1}(\theta) = 0, i_c(\theta) = I_c$$

• Pour $\pi + \alpha < \theta < 2\pi + \alpha$: T₃ et T₄ conducteurs :

$$v_c(\theta) = -v_m \sin(\theta), v_{T1}(\theta) = v(\theta), i_c(\theta) = I_c$$

Le courant coté source d'alimentation est la combinaison des deux courants i_{th1} et i_{th4} :

$$i(\theta) = i_{th1}(\theta) - i_{th4}(\theta) \quad \text{II.15}$$

c- Valeur moyenne de la tension $v_c(\theta)$

La valeur moyenne de la tension redressée est :

$$V_{cmoy} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v_m \sin(\theta) d\theta = \frac{2v_m}{\pi} (\cos\alpha) \quad \text{II.16}$$

Nous remarquons que :

► pour $0 < \alpha < \pi/2$: $V_{cmoy} > 0$

► pour $\pi/2 < \alpha < \pi$: $V_{cmoy} < 0$

Le courant moyen à la sortie du redresseur I_c est toujours positif, donc si $\alpha > \pi/2$

$\Rightarrow V_{cmoy} < 0 \Rightarrow P < 0$ ce qui veut dire que la puissance circule de la machine à la source. Ce mode est utilisé pour la récupération. Dans ce cas, il faut inverser la f.c.e.m. de la machine en inversant le courant d'excitation I_{ex} de telle sorte que la machine se comporte comme une génératrice. Le convertisseur dans ce cas fonctionne en « **Onduleur non autonome** » ou encore **assisté** car la fréquence de sortie de l'onduleur est fixée par le réseau.

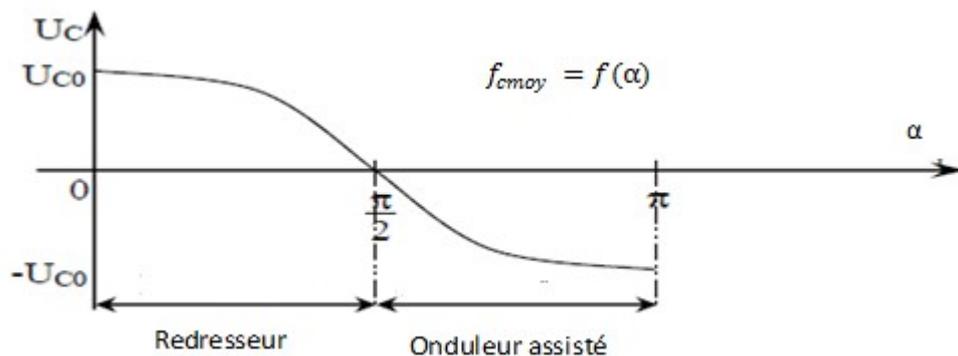


Figure II.30 Caractéristique de réglage

d- Formes d'ondes des différentes grandeurs pour $\alpha=30^\circ$

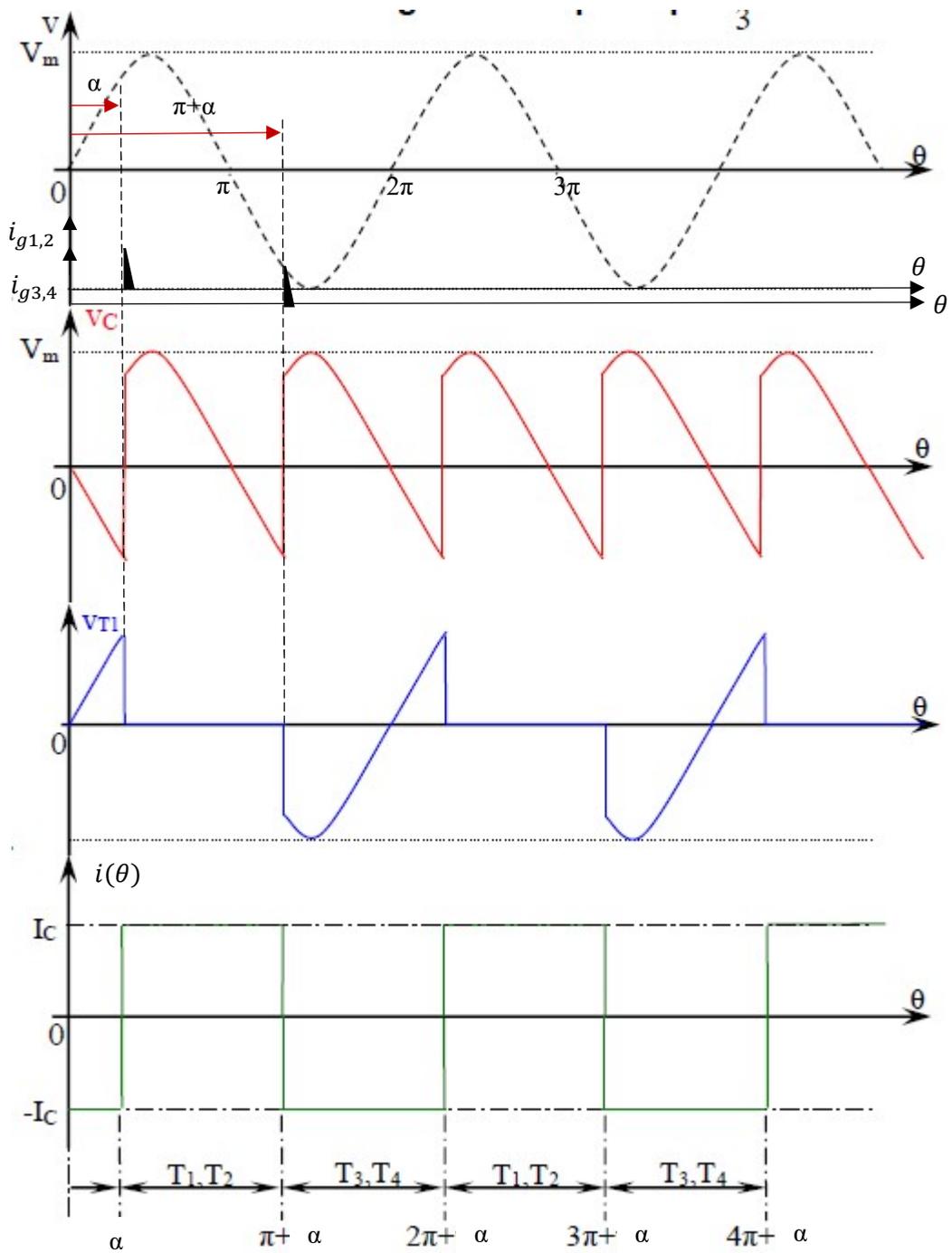


Figure II.31.a : *Forme d'ondes des différentes grandeurs pour un pont tous thyristors
(débit sur charge fortement inductive)*

Remarque : Pour une charge inductive de valeur finie, le courant de charge ne sera pas constant (voir figure II.31.b)

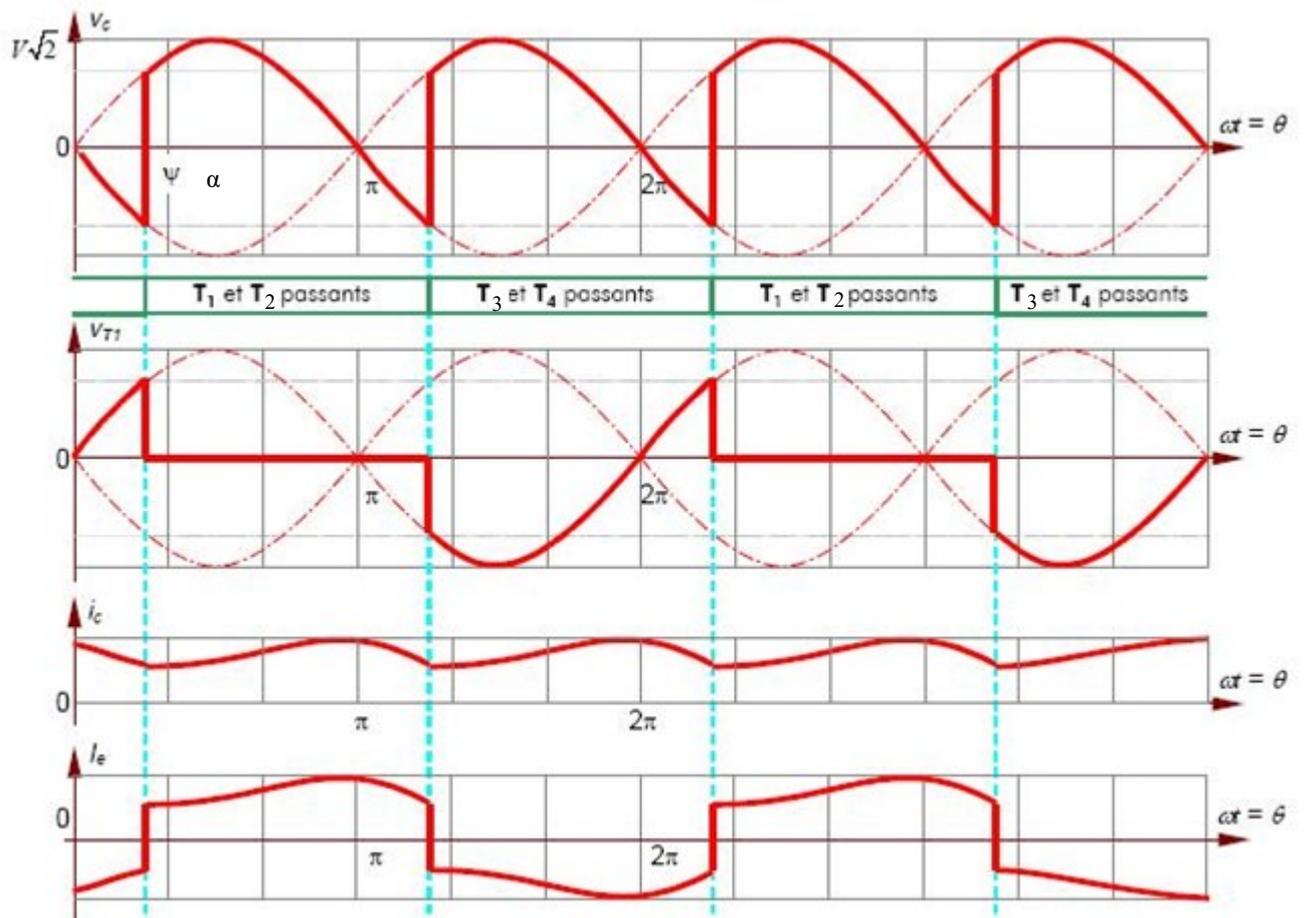


Figure II.31.b Formes d'ondes des différentes grandeurs pour un redresseur monophasé en pont commandé (débit sur une charge RL)

LES MONTAGES REDRESSEURS TRIPHASES

Introduction

On n'étudiera dans ce chapitre que l'allure des tensions obtenues au moyen de montages redresseurs triphasés. Puis on déduira les formules générales pour les systèmes de tension polyphasés. Les diodes sont supposées parfaites (interrupteurs parfaits) et le courant à la sortie du montage redresseur continu. On supposera également négligeable l'inductance ramenée au secondaire du transformateur.

III-1- Redresseur non commandé à point neutre triphasé P3 (diodes)

a- Montage

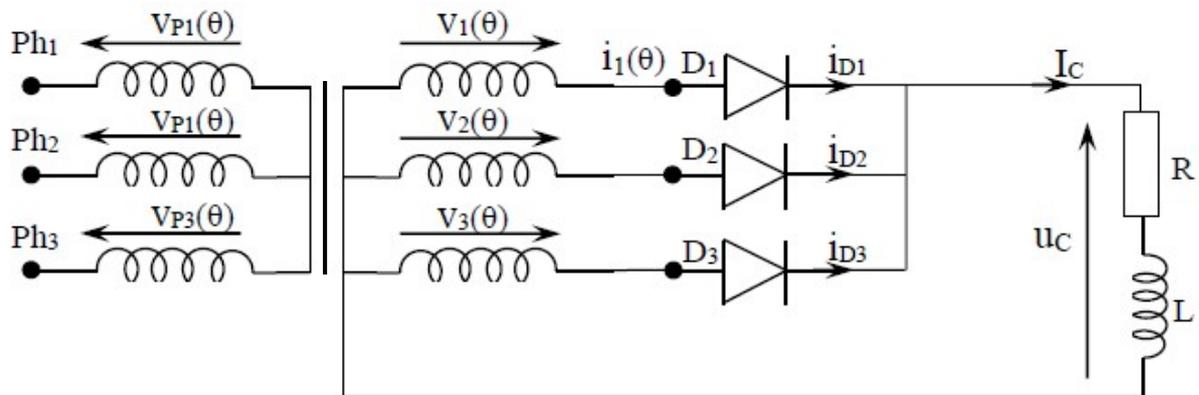
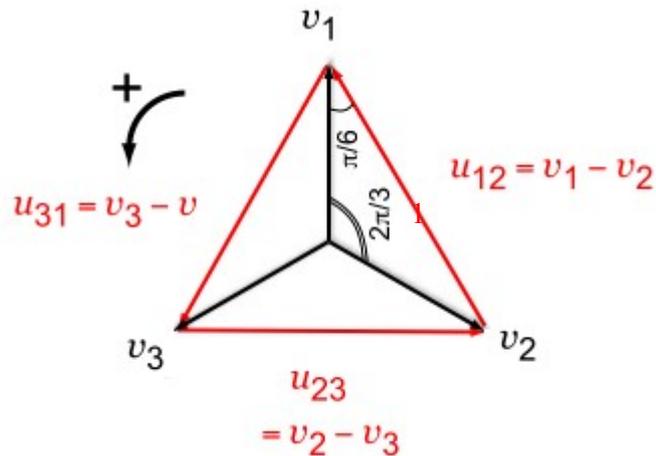


Figure III.1 Redresseur parallèle triphasé non commandé

Le réseau de tensions secondaires du transformateur sera noté de la façon suivante



$$\begin{cases} v_1 = V_m \sin(\omega t) \\ v_2 = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ v_3 = V_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

b- Analyse du fonctionnement

Dans ce montage la diode en conduction est celle dont l'anode est reliée à la tension la plus positive des trois tensions du secondaire, les autres diodes seront bloquées. Le premier point de commutation naturelle est à 30° .

Tableau 1

Intervalle	Diode en conduction	$v_c(\theta)$	v_{D1}
$\left[\frac{\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}\right]$	D_1	v_1	0
$\left[\frac{5\pi}{6}, \frac{3\pi}{2}\right]$	D_2	v_2	$v_1 - v_2$
$\left[\frac{3\pi}{2}, \frac{13\pi}{6}\right]$	D_3	v_3	$v_1 - v_3$

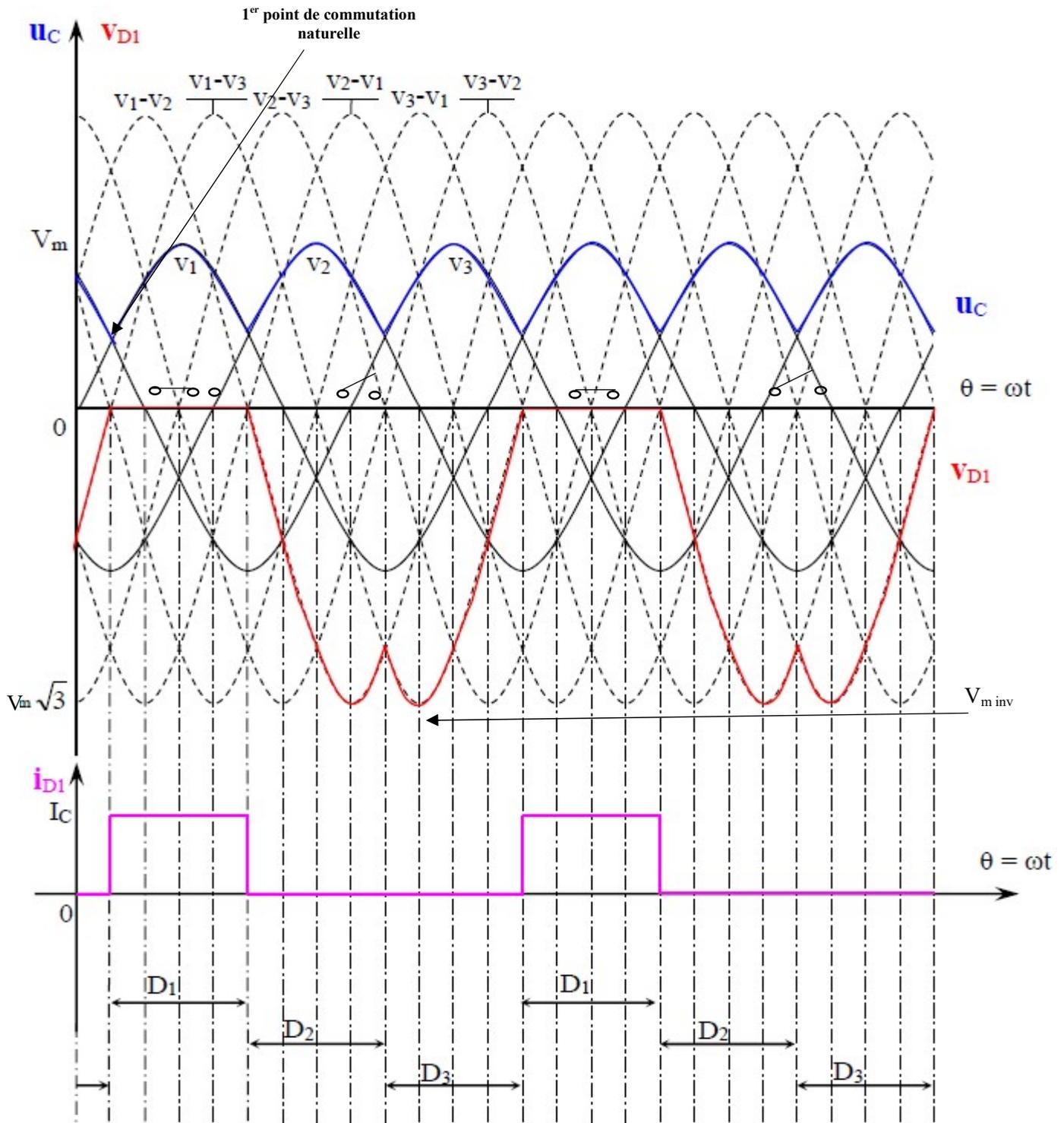


Figure III.2 Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur parallèle triphasé non commandé

c- Valeur moyenne de la tension de sortie v_c

$$V_{cmoy} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_m \sin(\theta) d\theta = \frac{3V_m}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} = 1.17V_{eff} \text{ III.1}$$

d- Tension maximale inverse de chaque diode est :

$$V_{Dmax} = V_m \sqrt{3} \text{ (tension composée maximale)}$$

e-Courant efficace dans la diode

$$I_{Defeff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} i_c(\theta)^2 d\theta} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \text{ III.2}$$

Ou encore

$$I_{Defeff} = \sqrt{\frac{I_c^2 + 0^2 + 0^2}{3}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \text{ III.3}$$

f-Courant efficace au secondaire :

La forme d'onde est identique au courant circulant dans une diode \Rightarrow

$$I_{1eff} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \text{ III.4}$$

g-Facteur de puissance au secondaire

Le facteur de puissance au secondaire est égal : $FP = \frac{P_c}{S}$

Avec : Puissance de la charge : $P_c = V_{cmoy} I_c = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} I_c$

Puissance apparente au secondaire : $S = 3V_{eff} I_{1eff}$

Sachant que le courant efficace au secondaire : $I_{1eff} = I_{D1eff} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$

$$\Rightarrow S = 3V_{eff} I_{1eff} = 3 \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_c}{\sqrt{3}} \frac{3V_m I_c}{\sqrt{6}}$$

$$\Rightarrow \text{Facteur de puissance : } FP = \frac{P_c}{S} = \frac{\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} I_c}{\frac{3V_m I_c}{\sqrt{6}}} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} = \mathbf{0.675} \text{ III.5}$$

III-2- Redresseur commandé à point neutre P3 (thyristors)

a- Montage

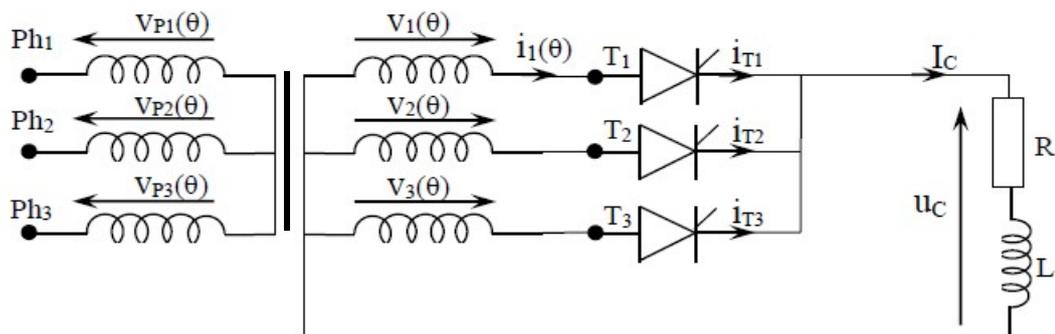
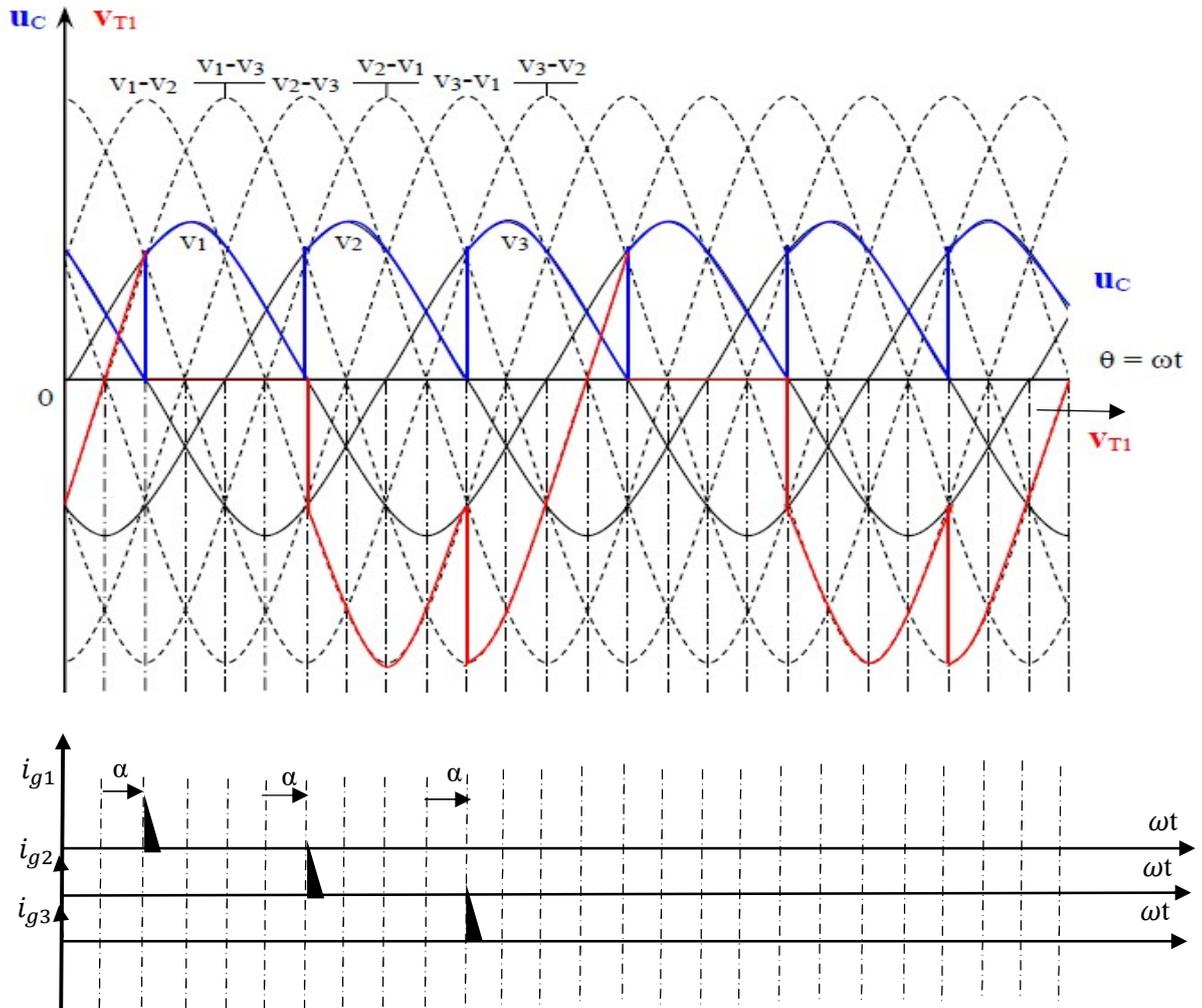


Figure III.3 Redresseur parallèle triphasé commandé

b- Analyse du fonctionnement

Dans ce montage on remplace les diodes par des thyristors

- Les trois thyristors sont commandés à la fermeture avec un retard angulaire α mesurée à partir des instants de commutations naturelle (voir figure)
- Le thyristor relié à la tension la plus positive reste en conduction tend que le thyristor suivant n'a pas reçu d'impulsion.



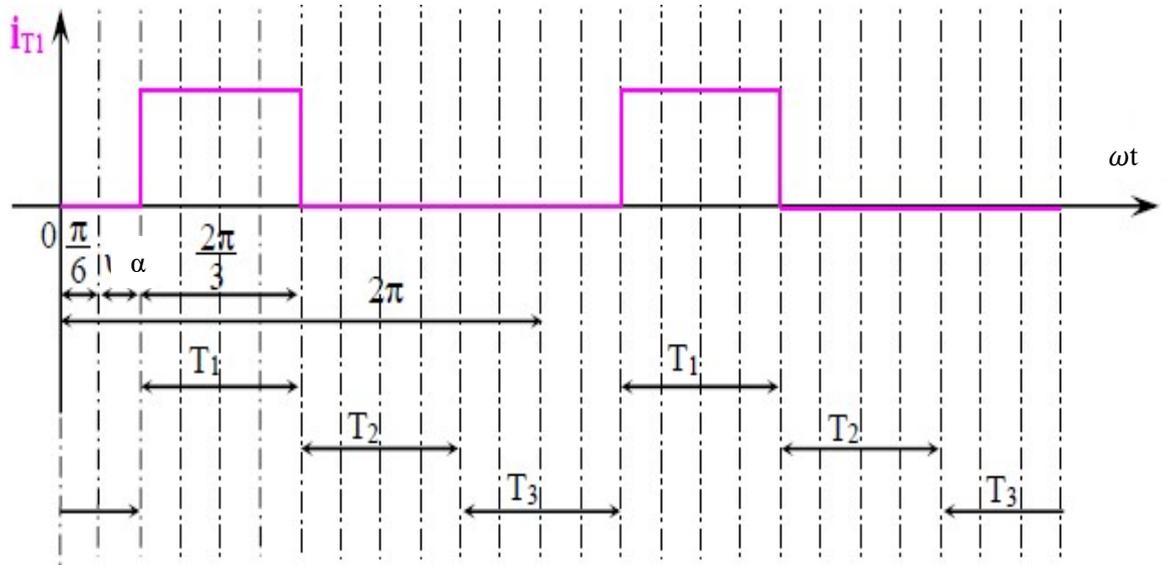


Figure III.4 Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur parallèle triphasé commandé

Tableau 2

Intervalle	Diode en conduction	$v_c(\theta)$	v_{D1}
$\left[\frac{\pi}{6} + \alpha, \frac{5\pi}{6} + \alpha\right]$	T_1	v_1	0
$\left[\frac{5\pi}{6} + \alpha, \frac{3\pi}{2} + \alpha\right]$	T_2	v_2	$v_1 - v_2$
$\left[\frac{3\pi}{2} + \alpha, \frac{13\pi}{6} + \alpha\right]$	T_3	v_3	$v_1 - v_3$

c- Valeur moyenne de la tension redressée

La tension v_c est périodique de période $2\pi/3$

$$V_{cmoy} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_m \sin(\theta) d\theta = \frac{3V_m}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

$$= \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\alpha) = 1.17V_{eff} \cos(\alpha) \text{ III.6}$$

On note que la tension moyenne maximale est obtenue lorsque α est nulle

$$V_{cmoy} = V_{(cmoy)0} \cos(\alpha)$$

d-Tension maximale inverse aux bornes du thyristor :

$$v_{Tmax} = v_m \sqrt{3} \text{ (tension composée maximale)} \quad \text{III.7}$$

e-Courant efficace dans le thyristor :

$$I_{Teff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} I_c(\theta)^2 d\theta} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad \text{III.8}$$

$$\text{Ou encore ; } I_{Teff} = \sqrt{\frac{I_c^2 + 0^2 + 0^2}{3}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad \text{III.9}$$

f-Courant efficace au secondaire :

La forme d'onde est identique au courant circulant dans un thyristor (la durée de conduction est de $\frac{2\pi}{3}$) le courant est seulement retardé de $\alpha \Rightarrow I_{1eff} = I_{T_{heff}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$ III.10

g-Facteur de puissance au secondaire

Le facteur de puissance au secondaire est égal : $FP = \frac{P_c}{S}$

Puissance de la charge : $P_c = V_{cmoy} I_c = \frac{3\sqrt{3}v_m}{2\pi} \cos(\alpha) I_c$

Puissance apparente au secondaire : $s = 3V_{eff}I_{1eff} = 3V_{eff}V_{1ef} = 3 \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_c}{\sqrt{3}} = \frac{3V_m I_c}{\sqrt{6}}$

\Rightarrow Facteur de puissance : $FP = \frac{P_c}{S} = \frac{\frac{3\sqrt{3}v_m}{2\pi} \cos(\alpha) I_c}{\frac{3V_m I_c}{\sqrt{6}}} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \cos(\alpha) = 0.675 \cos(\alpha)$ III.11

Le facteur de puissance dépend de l'angle de retard à l'amorçage α ; il est maximal pour α nul (redresseur non commandé) et nul pour α égale à $\frac{\pi}{2}$

h-Caractéristique de réglage : on peut régler la tension moyenne à la sortie de façon à gérer le sens de circulation de la puissance

Lorsque : $0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \Rightarrow V_{moy} > 0$ **fonctionnement redresseur**

Lorsque : $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \Rightarrow V_{moy} < 0$ **fonctionnement onduleur autonome ou assisté**

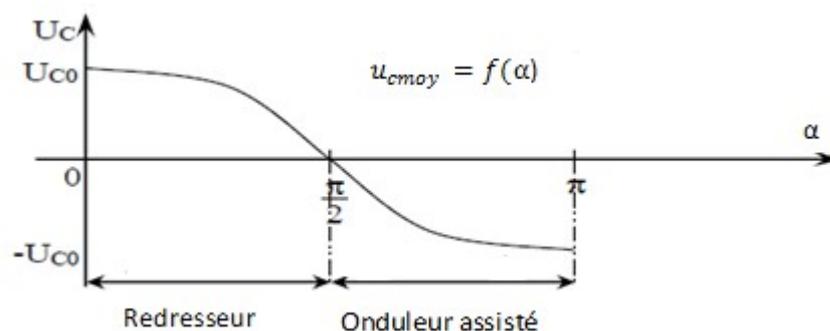


Figure III.5 caractéristique de réglage

III.3 Redresseur non commandé en pont PD3 (diodes)

Ce montage est très utilisé ; il est dit montage en pont, parallèle double PD3 ou même pont de GRAETZ triphasé. Il est l'association de deux montages l'un à anode commune et l'autre à cathode commune. La cathode commune constitue l'entrée positive de la charge continue et l'anode commune constitue la sortie négative de la charge.

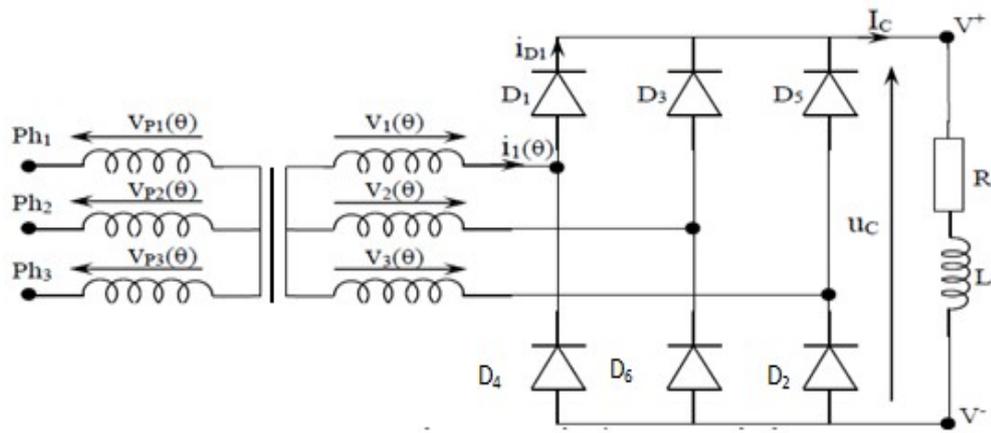


Figure III.6 Redresseur parallèle double triphasé non commandé

b-Analyse de fonctionnement

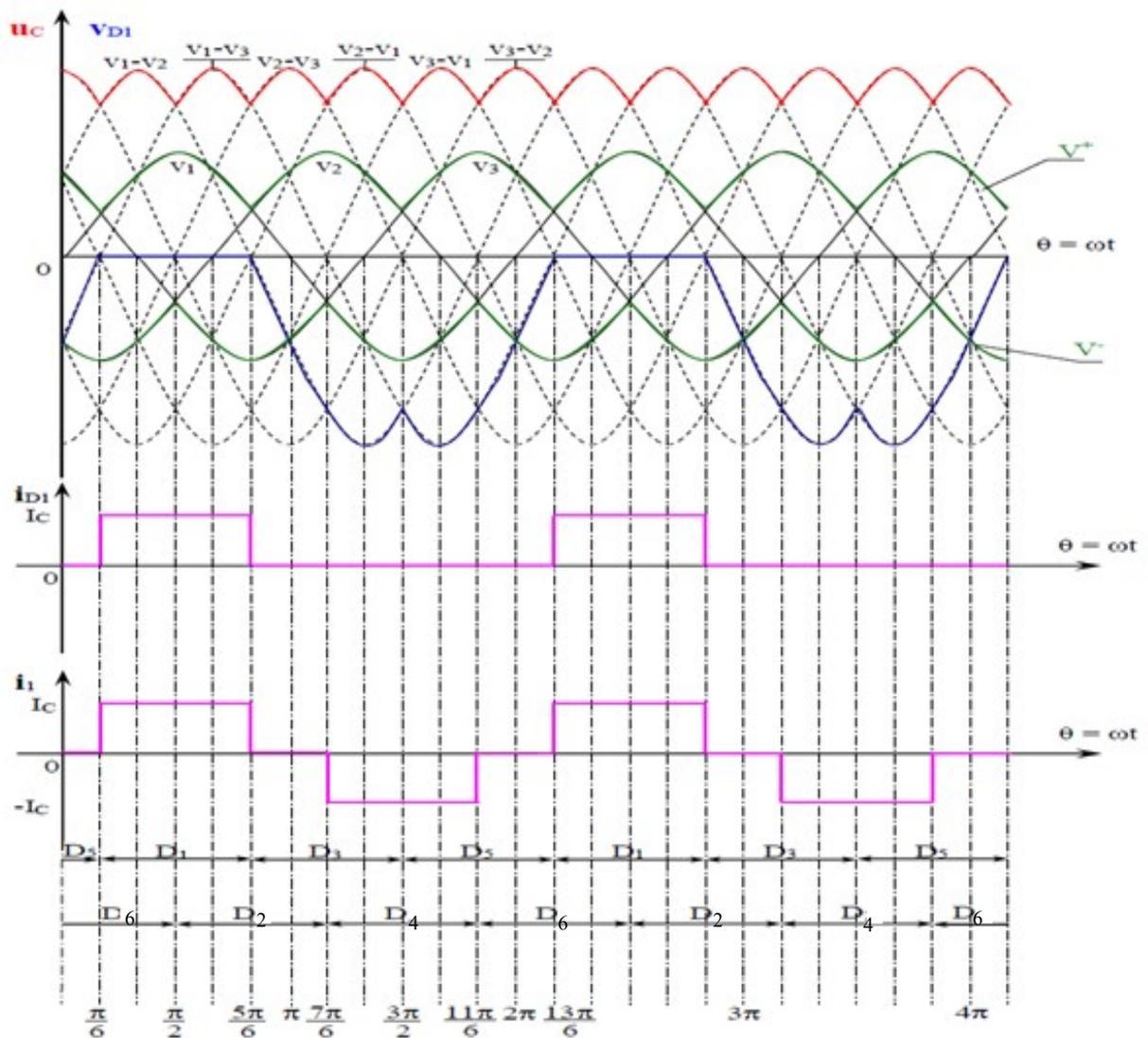


Figure III.7 Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur parallèle double non commandé

Intervalle	Diode en conduction	$v_c(\theta)$	v_{D1}
$\left[\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{2}\right]$	D_1 et D_6	v_{12}	0
$\left[\frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{6}\right]$	D_1 et D_2	v_{13}	0
$\left[\frac{5\pi}{6}, \frac{7\pi}{6}\right]$	D_3 et D_2	v_{23}	$v_1 - v_2$
$\left[\frac{7\pi}{6}, \frac{3\pi}{2}\right]$	D_3 et D_4	v_{21}	$v_1 - v_2$
$\left[\frac{3\pi}{2}, \frac{11\pi}{6}\right]$	D_5 et D_4	v_{31}	$v_1 - v_3$
$\left[\frac{11\pi}{6}, \frac{13\pi}{6}\right]$	D_5 et D_6	v_{32}	$v_1 - v_3$

La tension de sortie se répète 6 fois durant une période de 2π ; ainsi la période de cette tension est $\frac{\pi}{3}$.

c- Valeur moyenne de la tension de sortie v_c

$$\begin{aligned}
 V_{cmoy} &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} v_{12}(\theta) d\theta = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3}V_m \sin(\theta) d\theta = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right] \\
 &= \frac{3\sqrt{3}v_m}{\pi} = 2.34V_{eff} \quad \text{III.12}
 \end{aligned}$$

On considérant le groupe GI le groupe à cathode commune et le groupe GII à anode commune, on peut calculer v_{cmoy} par :

$$\begin{aligned}
 V_{cmoy} &= V_{cmoy\ GI} - V_{cmoy\ GII} \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} - \left(-\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \right) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad \text{III.13}
 \end{aligned}$$

d-Tension maximale inverse de chaque diode :

$$V_{Dmax} = V_m\sqrt{3} \text{ (tension composée maximale)}$$

e-Courant efficace dans la diode :

$$V_{Deff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} i_c(\theta)^2 d\theta} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad \text{III.14}$$

Ou encore

$$I_{Deff} = \sqrt{\frac{I_c^2 + 0^2 + 0^2}{3}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad \text{III.15}$$

f-Courant efficace au secondaire : Le courant circulant dans la 1^{ère} phase du secondaire est composé des deux courants de diodes D_1 et D_4

$$i_1(\theta) = i_{D1}(\theta) - i_{D4}(\theta)$$

$$I_{1eff} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_c(\theta)^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c \quad \text{III.16}$$

Ou encore

$$I_{1eff} = \sqrt{\frac{I_c^2 + I_c^2 + 0^2}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c \quad \text{III.17}$$

g-Facteur de puissance au secondaire

$$FP = \frac{P_c}{S}$$

Avec :

$$\text{Puissance de la charge : } P_c = V_{cmoy} I_c = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} I_c$$

$$\text{Puissance apparente au secondaire : } S = 3V_{eff}I_{1eff} = 3 \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2}{3}} I_c = \sqrt{3}V_m I_c$$

$$\Rightarrow \text{Facteur de puissance : } FP = \frac{P_c}{S} = \frac{\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} I_c}{\sqrt{3}V_m I_c} = \frac{3}{\pi} = 0.955 \quad \text{III.18}$$

III.4 Redresseur triphasé en pont PD3 (thyristors)

a- Montage

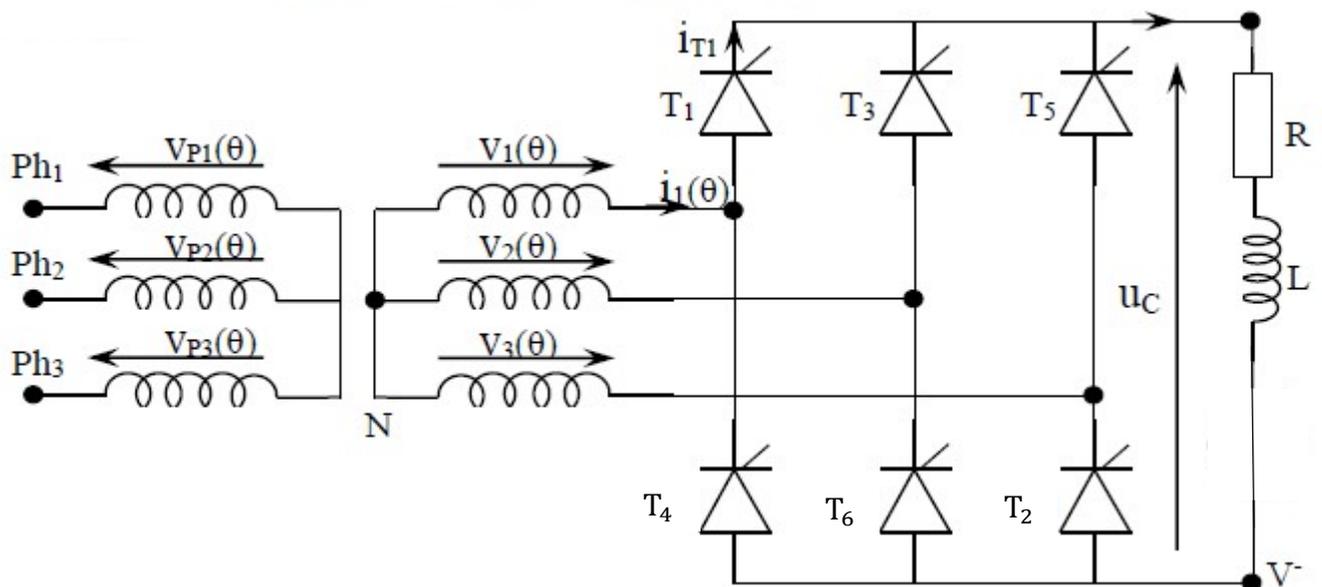


Figure III.8 Redresseur parallèle double triphasé commandé

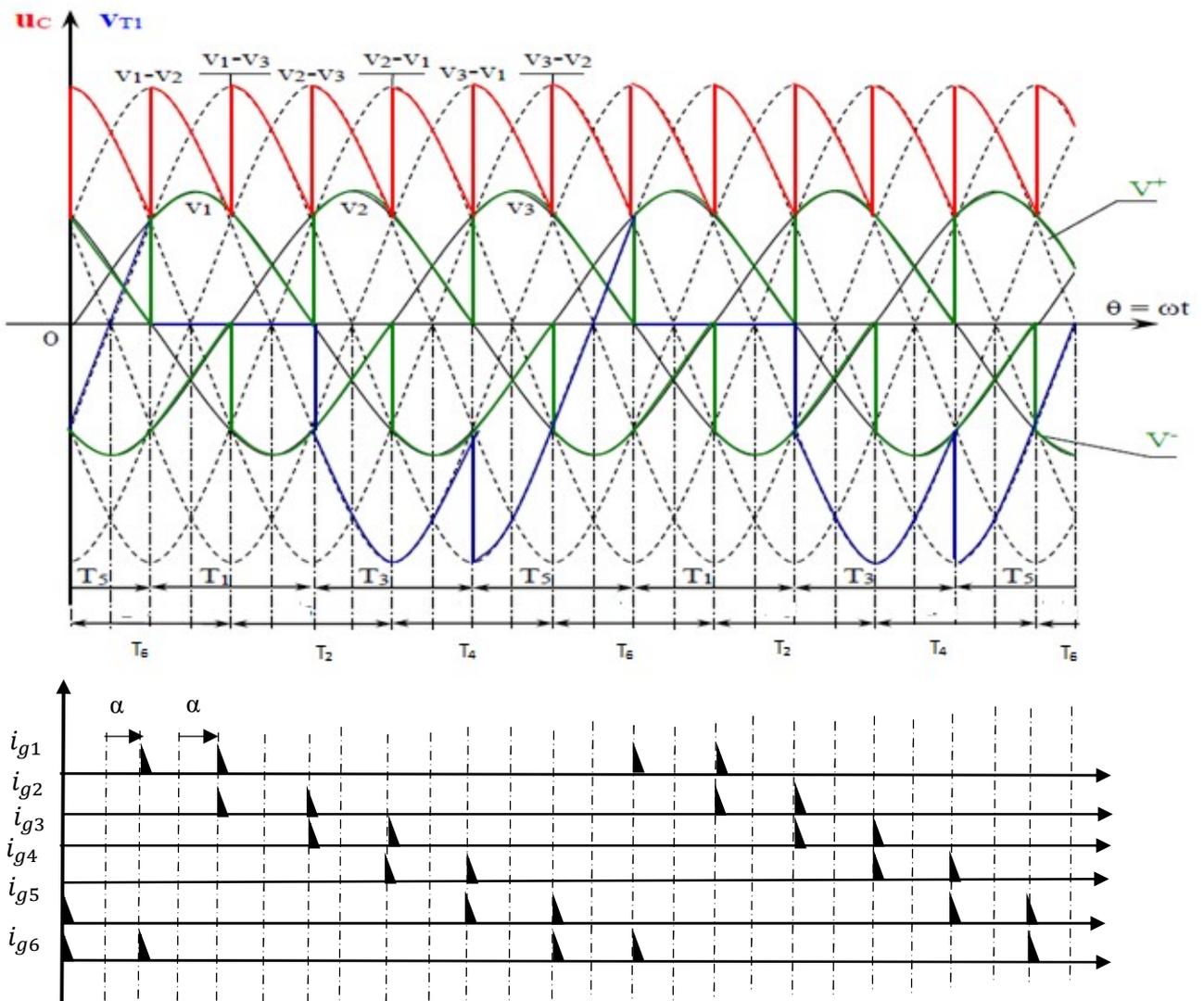
On substitue les 6 diodes du montage précédent par 6 thyristors. Les thyristors T₁, T₃ et T₅ sont amorcés pendant l'alternance positive des tensions V₁, V₂ et V₃. Les thyristors T₂, T₄ et T₆ sont amorcés pendant l'alternance négative. Les références des angles d'amorçage est toujours l'angle d'amorçage naturel. Le transformateur est couple en étoile- étoile. On considère que le convertisseur

alimente une charge inductive d'inductance infiniment grande qui absorbe un courant I_C constant. On néglige les inductances des enroulements primaire et secondaire.

b- Analyse du fonctionnement

Lorsque la tension V_{12} est la plus positive, ($\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{2}$) il faut amorcer les deux thyristors T_1 et T_6 simultanément. Le premier thyristor T_1 ramène le courant du réseau vers la charge l'autre thyristor T_6 renvoie le courant de charge vers le réseau, ainsi le circuit se ferme. Lorsque la tension V_{13} est la plus positive ($\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{5\pi}{6}$); on doit envoyer de nouveau une impulsion au thyristor T_1 pour qu'il puisse conduire avec le thyristor T_2 . Pour des raisons de démarrage du fonctionnement du redresseur, le circuit de commande doit envoyer une impulsion de confirmation à 60° après la première impulsion. Une fois le redresseur en route, la deuxième impulsion n'aura aucun effet puisque le thyristor conduit déjà.

Les formes d'ondes des courants au secondaire sont similaires à ceux du pont à diodes mais décalés de α .



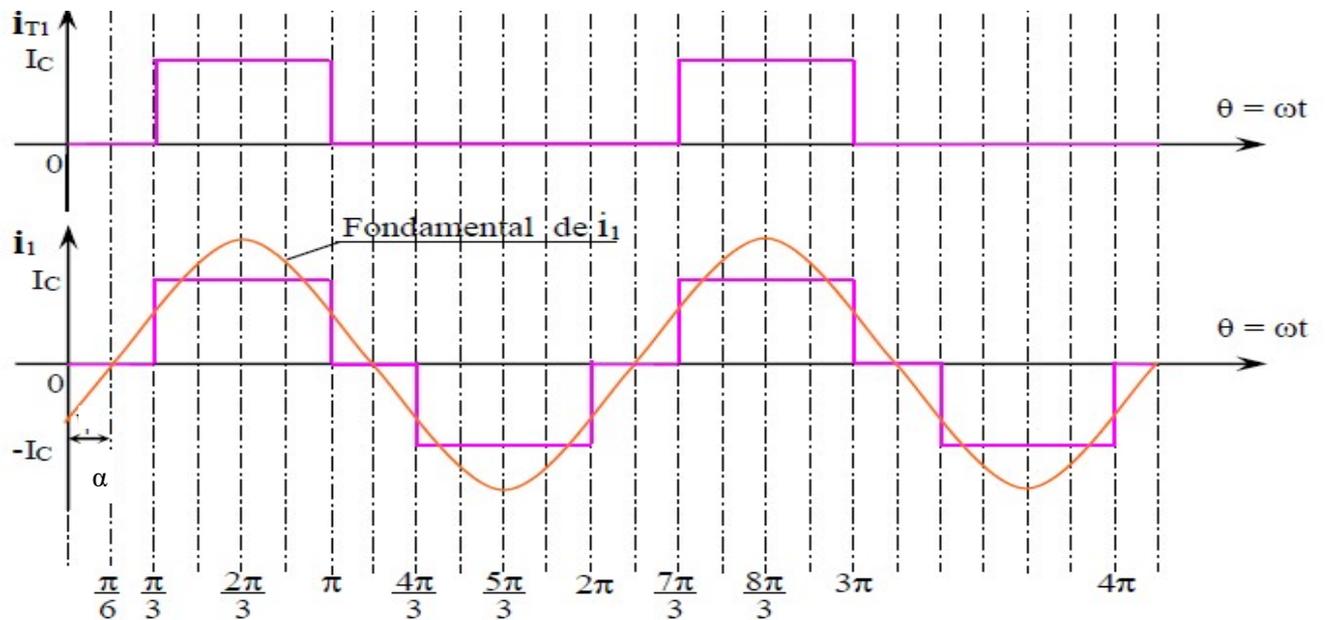


Figure III.9 Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur parallèle double triphasé commandé

(pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$)

Tableau 4

Intervalle	Diode en conduction	$v_c(\theta)$	v_{D1}
$\left[\frac{\pi}{6} + \alpha, \frac{\pi}{2} + \alpha\right]$	T_1 et T_6	v_{12}	0
$\left[\frac{\pi}{2} + \alpha, \frac{5\pi}{6} + \alpha\right]$	T_1 et T_2	v_{13}	0
$\left[\frac{5\pi}{6} + \alpha, \frac{7\pi}{6} + \alpha\right]$	T_3 et T_2	v_{23}	$v_1 - v_2$
$\left[\frac{7\pi}{6} + \alpha, \frac{3\pi}{2} + \alpha\right]$	T_3 et T_4	v_{21}	$v_1 - v_2$
$\left[\frac{3\pi}{2} + \alpha, \frac{11\pi}{6} + \alpha\right]$	T_5 et T_4	v_{31}	$v_1 - v_3$
$\left[\frac{11\pi}{6} + \alpha, \frac{13\pi}{6} + \alpha\right]$	T_5 et T_6	v_{32}	$v_1 - v_3$

c- Valeur moyenne de la tension de sortie v_c

$$\begin{aligned}
 V_{cmoy} &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} v_{12}(\theta) d\theta = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{3} V_m \sin(\theta) d\theta \\
 &= \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right] \\
 &= \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \cos(\alpha) = 2.34 v_{eff} \cos(\alpha) \text{ III.19}
 \end{aligned}$$

On considérant le groupe GI le groupe à cathode commune et le groupe GII à anode commune, on peut calculer v_{cmoy} comme suite :

$$V_{cmoy} = V_{cmoy GI} - V_{cmoy GII}$$

$$= \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\alpha) - \left(-\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\alpha) \right) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha) = 2.34V_{eff} \cos(\alpha) \quad \text{III.20}$$

d-Tension maximale inverse de chaque thyristor :

$$V_{Tmax} = V_m \sqrt{3} \text{ (tension composée maximale)}$$

e-Courant efficace dans le thyristor :

$$I_{Teff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} (I_c(\theta))^2 d\theta} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad \text{III.21}$$

ou encore

$$I_{Teff} = \sqrt{\frac{I_c^2 + 0^2 + 0^2}{3}} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad \text{III.22}$$

D'une manière générale :

Le courant efficace dans un semi-conducteur

$$I_{s/c-ef} = \frac{I_c}{\sqrt{q}} \quad \text{III.23}$$

La tension maximale inverse

$$V_{s/c-in} = V_{eff} \sqrt{6} \quad \text{III.24}$$

Avec q indice de commutation du redresseur

f-Courant efficace au secondaire : Le courant circulant dans la 1^{ère} phase du secondaire est composé des deux courants de thyristors T_1 et T_4

$$i_1(\theta) = i_{T1}(\theta) - i_{T4}(\theta)$$

$$I_{1eff} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_c^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c \quad \text{III.25}$$

Ou encore

$$I_{1eff} = \sqrt{\frac{I_c^2 + I_c^2 + 0^2}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c \quad \text{III.26}$$

g-Facteur de puissance au secondaire

$$FP = \frac{P_c}{S}$$

Avec :

Puissance de la charge : $P_c = V_{cmoy} I_c = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} I_c \cos(\alpha)$

Puissance apparente au secondaire : $S = 3V_{eff}I_{1eff} = 3\frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{2}{3}}I_c = \sqrt{3}V_mI_c$

⇒Facteur de puissance : $FP = \frac{P_c}{S} = \frac{\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} I_c \cos(\alpha)}{\sqrt{3}V_mI_c} = \frac{3}{\pi} \cos(\alpha) = \mathbf{0.95 \cos(\alpha)}$ III.27

Remarque

A noter que :

- Pour : $0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \Rightarrow V_{cmoy} > 0$ **fonctionnement redresseur**
- Pour : $\alpha = 0^\circ \Rightarrow V_{cmoy} = 0$
- Pour : $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \Rightarrow V_{cmoy} < 0$; dans ce cas, la puissance $P_c = V_{cmoy}I_c$ est inférieure à zéro.
Donc la puissance est transmise du moteur au réseau. C'est le processus de régénération et le convertisseur fonctionne comme **un onduleur non autonome**.

La variation de l'angle de commande α est théoriquement de 0 à π . En fait la variation possible est seulement de 0 à $\pi - \delta$, où δ désigne un angle appelé angle de garde.

III.5 Etude du redresseur triphasé mixte

a-Montage

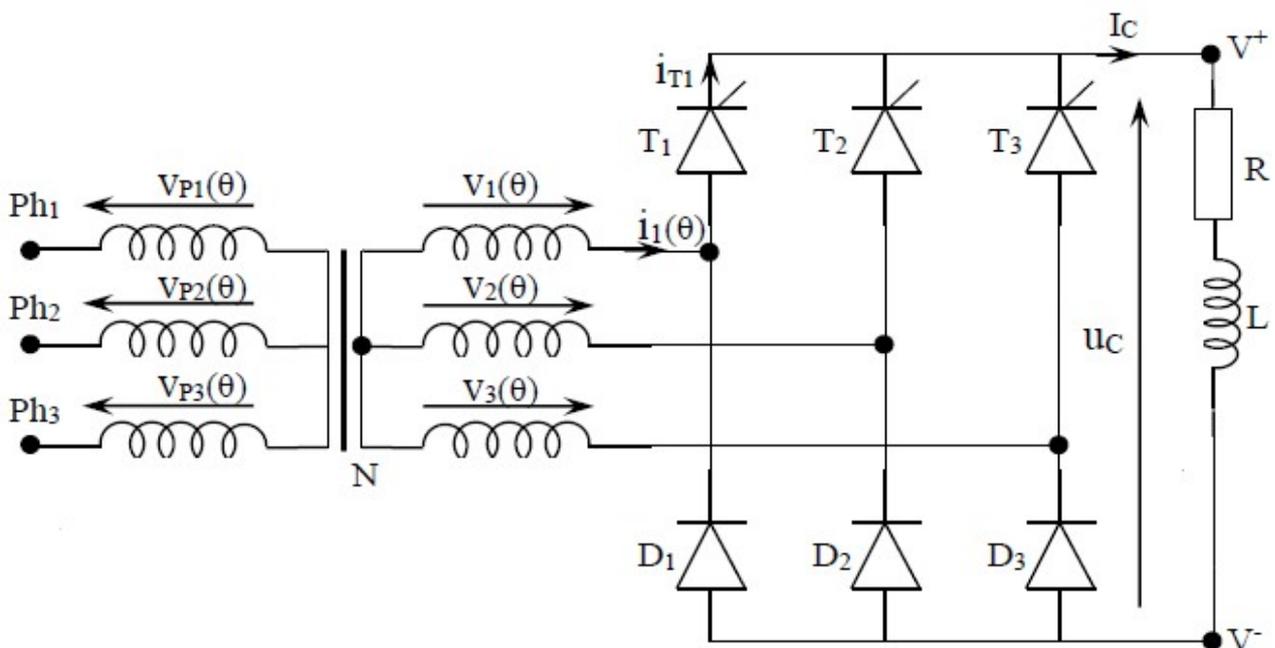


Figure III.10 Redresseur parallèle double triphasé mixte

Un redresseur semi-commandé est constitué de deux commutateurs parallèle disposés en série. Un commutateur à thyristor à cathode commune qui donne une tension positive $v_{cmoy GI}$ et un

commutateur à diodes à anode commune qui donne une tension négative $v_{cmoy\ GII}$. On considère que le convertisseur alimente un moteur à courant continu qui absorbe un courant I_C constant. On néglige les inductances des enroulements primaire et secondaire.

b-Analyse du fonctionnement

Afin de déterminer l'allure de la tension redressée, on doit tracer la tension redressée de chaque groupe séparément. La tension redressée du groupe à cathode commune (à thyristors) la tension redressée du groupe à anode commune positive (à diodes). La tension du pont sera :

$$v_c(\theta) = v_{cGI}(\theta) - v_{cGII}(\theta) \quad \text{III.28}$$

Avec :

$v_{cGI}(\theta)$: Tension redressée du groupe à cathode commune (à thyristors)

$v_{cGII}(\theta)$: Tension redressée du groupe à anode commune (à diodes)

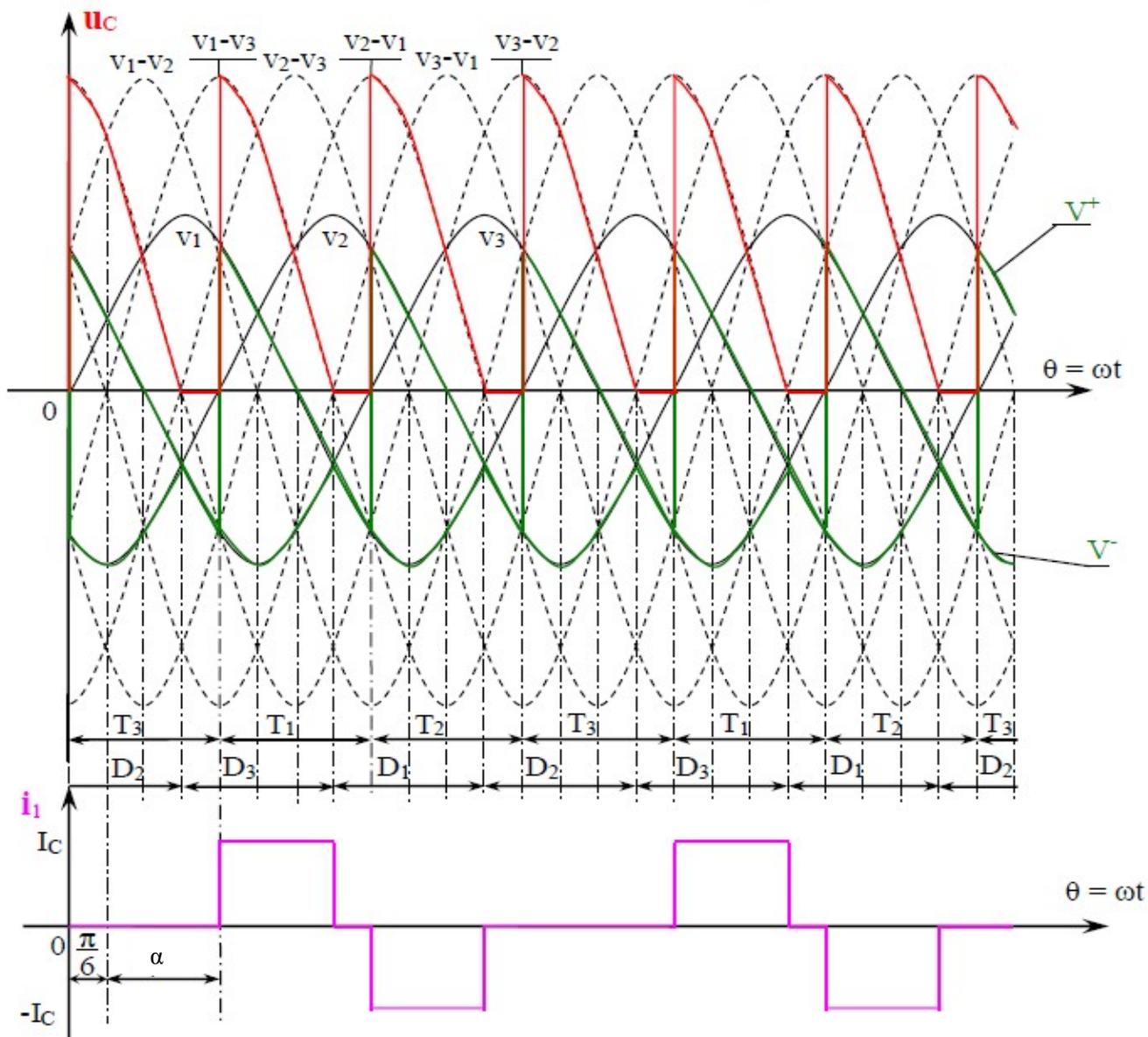


Figure III.11 Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur parallèle double triphasé mixte

Pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$, on établit le tableau suivant : Tableau 5

Intervalle	Diode en conduction	$v_c(\theta)$
$\left[\frac{2\pi}{3}, \frac{7\pi}{6}\right]$	T_1 et D_3	v_{13}
$\left[\frac{7\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}\right]$	T_1 et D_1	0
$\left[\frac{4\pi}{3}, \frac{11\pi}{6}\right]$	T_2 et D_1	v_{21}
$\left[\frac{11\pi}{6}, 2\pi\right]$	T_2 et D_2	0
$\left[2\pi, \frac{5\pi}{2}\right]$	T_3 et D_2	v_{32}
$\left[\frac{5\pi}{2}, \frac{8\pi}{3}\right]$	T_3 et D_3	0

c- Valeur moyenne de la tension de sortie v_c

La tension redressée moyenne sera donnée par la relation suivante :

$$v_{cmoy} = v_{cmoy GI} - v_{cmoy GII}$$

$$= \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\alpha) - \left(-\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi}\right) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} (\cos(\alpha) + 1) = v_{c0moy} (\cos(\alpha) + 1) \quad \text{III.29}$$

Avec : $v_{c0-moy} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}$ la tension redressée moyenne pour $\alpha=0$

La figure suivante représente la variation de la tension de sortie aux bornes de la charge v_{cmoy} pour le pont mixte et pour le pont tous thyristors.

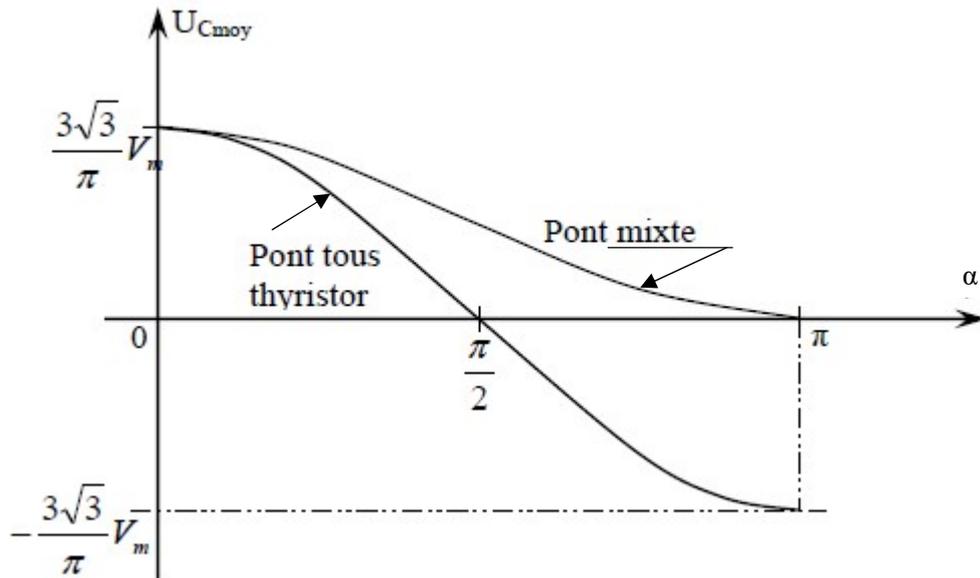


Figure III.12 Caractéristique de réglage d'un redresseur parallèle double mixte

d- Avantages et inconvénients des redresseurs mixtes

Avantages :

- La commande des redresseurs mixte est plus facile que les redresseurs complètement commandé (il n'a pas de problème de démarrage) et le coût de réalisation est plus faible.

Inconvénients

- Pas de fonctionnement en onduleur c'est à dire que le système n'est pas réversible
- Le résidu harmonique de la forme d'onde de la tension de charge et des courants d'alimentation est plus grand que pour le cas des montages redresseurs complètement commandé.

~~III.6 Grandeurs caractéristiques des montages redresseurs parallèle et parallèle double~~