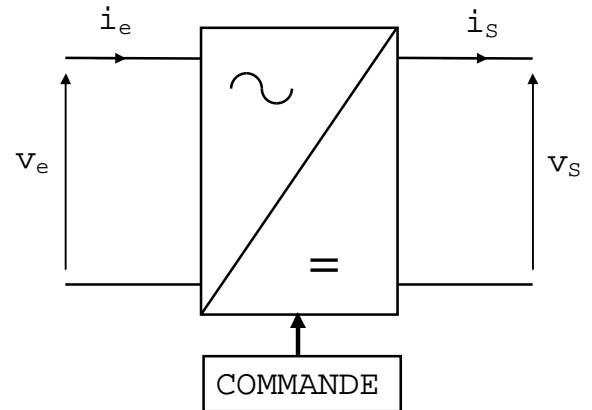


REDRESSEMENT COMMANDE

I. INTRODUCTION.

1. Définition.

Un montage redresseur commandé permet d'obtenir une tension continue réglable (de valeur moyenne non nulle) à partir d'une tension alternative sinusoïdale (de valeur moyenne nulle). L'utilisation de commutateurs commandables tels que les thyristors permet de réaliser des redresseurs dont la tension moyenne de sortie peut varier en fonction de l'angle d'amorçage δ des commutateurs.

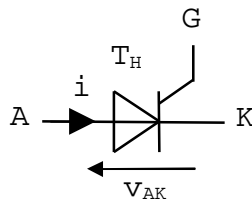


Il existe de nombreuses applications industrielles mettant en oeuvre ce type de redressement :

- variateur de vitesse de moteur à courant continu;
- commande de puissance (chauffage, ...);
- etc.

2. Composant utilisé. Le thyristor

Symbole :

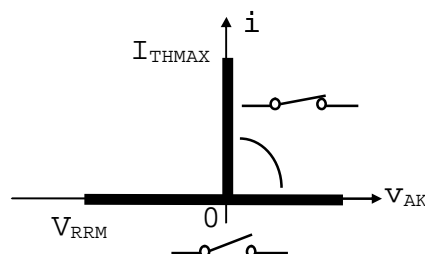


Un thyristor peut être considéré comme une diode comportant une électrode de commande G (gâchette).

Pour être amorcé, le thyristor doit recevoir une impulsion sur la gâchette alors que la tension v_{AK} est positive.

Un thyristor se bloque naturellement lorsque le courant qui le traverse s'annule. On peut également le bloquer en lui appliquant une tension v_{AK} négative.

Caractéristique :



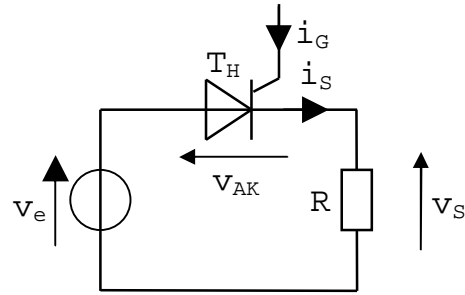
II. REDRESSEMENT MONOALTERNANCE COMMANDE SUR CHARGE RESISTIVE.

On considère le thyristor T_H parfait.

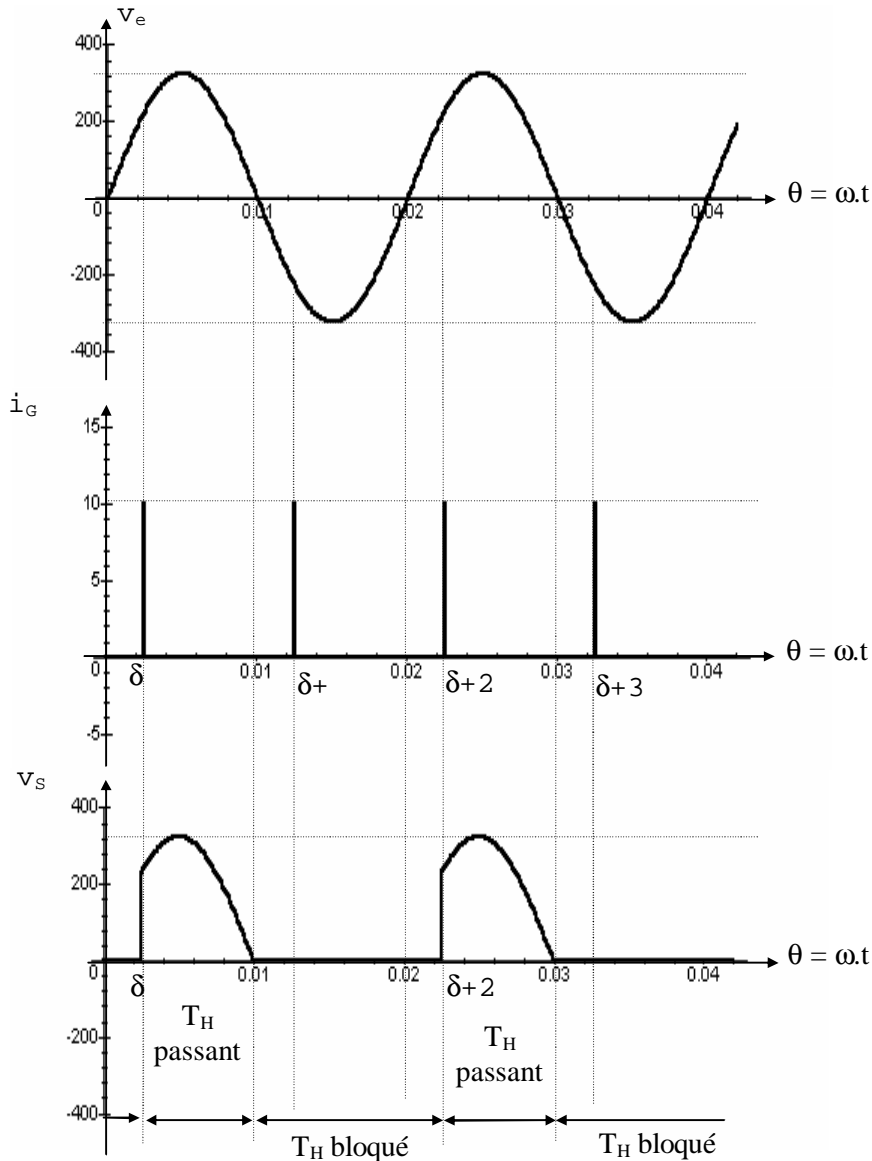
$$v_e(t) = \sqrt{2} V_e \cdot \sin(\omega.t).$$

δ est appelé angle de retard à l'amorçage. Il est synchronisé sur le réseau. Il correspond à un temps de retard

$$\text{à l'amorçage } t_\delta \text{ tel que } t_\delta = \frac{d}{2p} \cdot T.$$



1. Chronogrammes.



2. Analyse du fonctionnement.

Quelque soit l'état de T_H on a : $v_e = v_{AK} + v_S$.

- $v_e(t) > 0 \Rightarrow v_{AK} > 0$: le thyristor peut être amorcé.
 - si $i_G = 0$ A : T_H reste bloqué et $i_S = 0$, $v_S = 0$ et $v_{AK} = v_e$;
 - si une impulsion de courant i_G suffisante apparaît sur sa gâchette alors T_H devient passant et $v_{AK} = 0$, $v_S = v_e$ et $i_S = \frac{v_e}{R}$.

- $v_e(t) = 0 \Rightarrow i_s = 0 \text{ A}$: le thyristor se bloque naturellement.
- $v_e(t) < 0 \Rightarrow v_{AK} > 0$: le thyristor ne peut pas être amorcé. Il reste bloqué même si une impulsion apparaît de courant apparaît sur sa gâchette.
- etc.

Remarques :

- v_s , i_s et v_{AK} ont la même période que $v_e \Rightarrow T = 2.\pi \text{ rad}$.
- le thyristor doit supporter en inverse \hat{V}_e .
- le courant $i_s = \frac{V_s}{R}$ s'annule périodiquement, nous sommes en régime de conduction discontinu : $i_s \geq 0$.
- en pratique (industrie) pour s'assurer que les thyristors s'amorcent, on envoie sur leur gâchette un train d'impulsions (une dizaine à la suite).
- mauvais rendement du dispositif, l'alternance négative est éliminée.

3. Valeur moyenne de la tension redressée.

Calculons la valeur moyenne \overline{V}_s de $v_s(t)$:

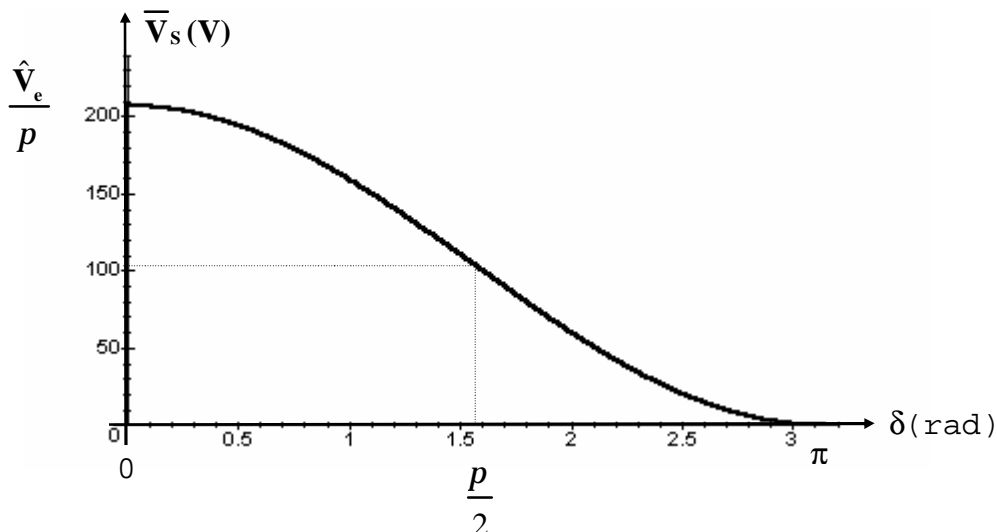
$$\overline{V}_s = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_s(t).dt = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} \hat{V}_e \cdot \sin(q).dq = \frac{\hat{V}_e}{2p} \int_d^p \sin(q).dq = \frac{\hat{V}_e}{2p} \cdot [-\cos(q)]_d^p$$

$$\overline{V}_s = \frac{\hat{V}_e}{2p} \cdot [-\cos(p) + \cos(d)] = \frac{\hat{V}_e}{2p} \cdot [1 + \cos(d)] = \frac{1 + \cos(d)}{2p} \cdot \hat{V}_e$$

Remarques :

- la valeur moyenne de la tension v_s peut être ajustée en fonction de la valeur de l'angle de retard à l'amorçage δ .
- $\overline{I}_s = \frac{\overline{V}_s}{R} = \frac{1 + \cos(d)}{2p \cdot R} \cdot \hat{V}_e$.

Traçons l'allure de $\overline{V}_s = f(\delta)$ pour $0 \leq \delta \leq 2.\pi \text{ rad}$. Donc $0 \leq \overline{V}_s \leq \frac{\hat{V}_e}{p}$



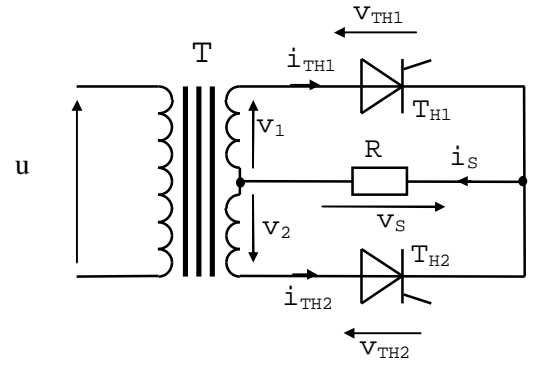
III. REDRESSEMENT DOUBLE-ALTERNANCE COMMANDE.

1. Pont P2 sur charge résistive.

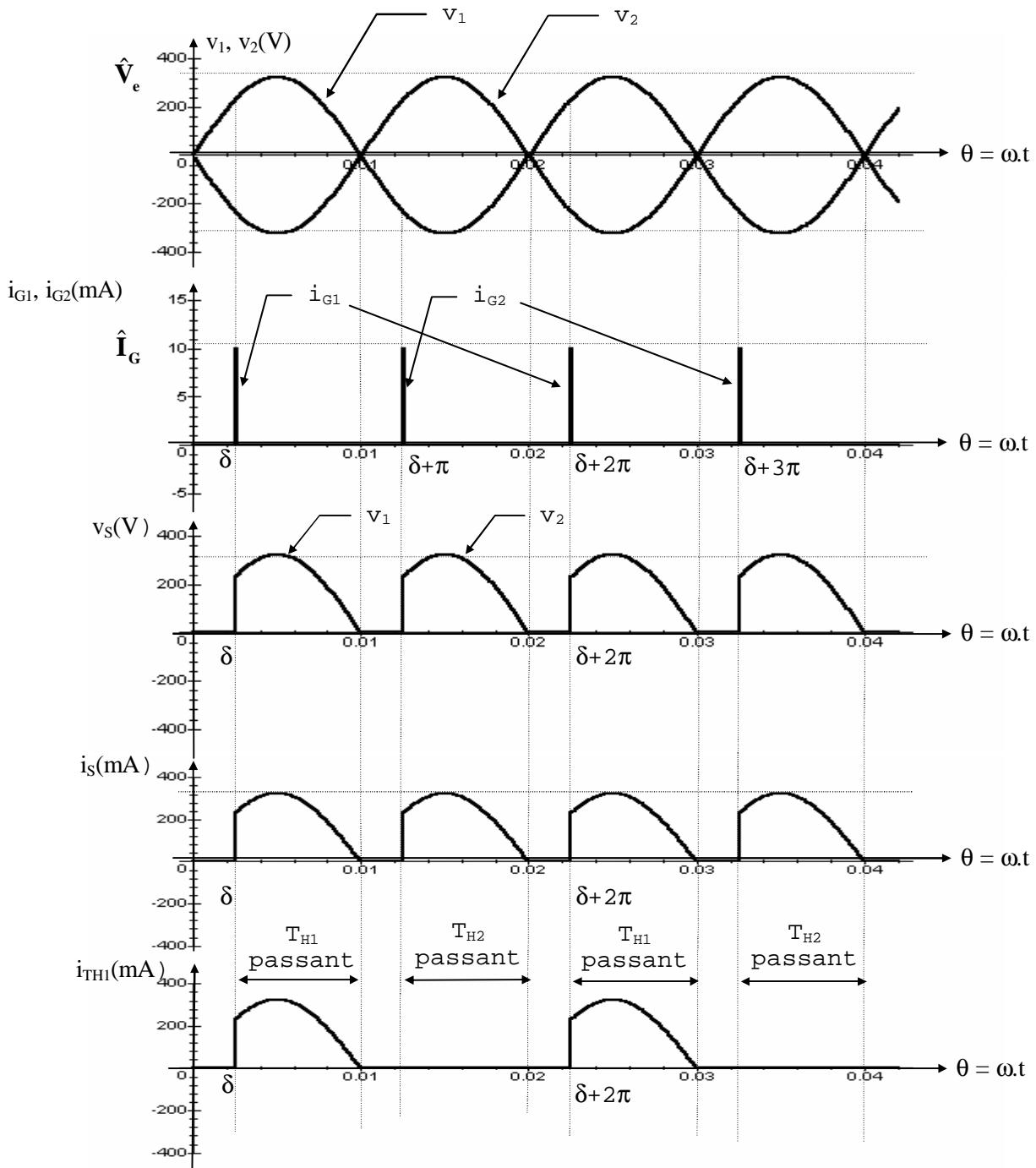
Les thyristors, le transformateur à point milieu sont parfaits.

$$v_1(t) = \hat{V} \cdot \sin(\omega.t) = -v_2(t), f = 50 \text{ Hz.}$$

La commande des thyristors est synchronisée sur le réseau, avec un retard à l'amorçage t_δ , la mise en conduction de T_{H2} étant retardée de $\frac{T}{2}$ par rapport à celle de T_{H1} .



a) Chronogrammes.



b) Analyse du fonctionnement.

- pour $0 \leq \theta < \pi$: $v_1(t) > 0$ et $v_2(t) < 0$:
Par conséquent : $v_{TH1} > 0 \Rightarrow T_{H1}$ peut être amorcé ;
 $v_{TH2} < 0 \Rightarrow T_{H2}$ ne peut être amorcé.

tant que $\theta < \delta$, T_{H1} et T_{H2} sont bloqués :

- $i_S = i_{TH1} = i_{TH2} = 0$;
- $v_S = 0$;
- $v_{TH1} = v_1 > 0$;
- $v_{TH2} = v_2 < 0$.

à $\theta = \delta < \pi$, on amorce T_{H1} , alors :

- $v_{TH1} = 0$;
- $v_S = v_1 > 0$;
- $i_{TH1} = i_S = \frac{v_1}{R}$;
- $i_{TH2} = 0$;
- $v_{TH2} = v_2 - v_1 = -2.v_1 < 0$.

- pour $\theta = \pi$: $v_1 = v_2 = 0$: $i_S = i_{TH1} = 0 \Rightarrow T_{H1}$ se bloque naturellement.

- pour $\pi \leq \theta < 2\pi$: $v_1(t) < 0$ et $v_2(t) > 0$:
Par conséquent : $v_{TH1} < 0 \Rightarrow T_{H1}$ ne peut être amorcé ;
 $v_{TH2} > 0 \Rightarrow T_{H2}$ peut être amorcé.

tant que $\pi \leq \theta < \delta + \pi$, T_{H1} et T_{H2} sont bloqués :

- $i_S = i_{TH1} = i_{TH2} = 0$;
- $v_S = 0$;
- $v_{TH1} = v_1 < 0$;
- $v_{TH2} = v_2 > 0$.

à $\theta = \pi + \delta < 2\pi$, on amorce T_{H2} , alors :

- $v_{TH2} = 0$;
- $v_S = v_2 > 0$;
- $i_{TH2} = i_S = \frac{v_2}{R}$;
- $i_{TH1} = 0$;
- $v_{TH1} = v_1 - v_2 = -2.v_2 < 0$.

- pour $\theta = 2\pi$: $v_1 = v_2 = 0$: $i_S = i_{TH2} = 0 \Rightarrow T_{H2}$ se bloque naturellement.

Remarques :

- la période de la tension redressée v_S est $T' = \frac{T}{2}$; sa fréquence f' est donc le double de celle du réseau : $f' = 100$ Hz.
- le courant i_S s'annule : régime de conduction interrompu.
- chaque thyristor doit supporter en inverse une tension qui dépend de δ mais $\leq 2.V$.
- fonctionne seulement si $\delta \leq \pi$.

c) Valeur moyenne de la tension redressée.

Calculons la valeur moyenne $\overline{V_s}$ de $v_s(t)$:

$$\overline{V_s} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_s(t) dt = \frac{1}{p} \int_0^p \hat{V} \cdot \sin(q) \cdot dq = \frac{\hat{V}}{p} \int_d^p \sin(q) \cdot dq = \frac{1 + \cos(d)}{p} \cdot \hat{V}$$

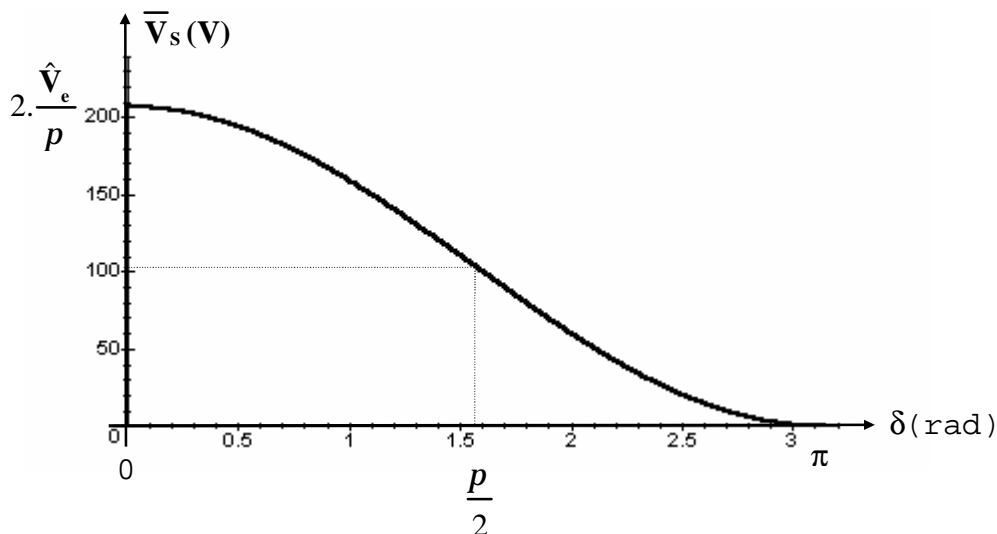
Evident, elle est doublée par rapport au monoalternance

Remarques :

- $\overline{I_s} = \frac{\overline{V_s}}{R} = \frac{1 + \cos(d)}{p \cdot R} \cdot \hat{V}$;
- $\overline{I_{TH1}} = \overline{I_{TH2}} = \frac{\overline{I_s}}{2} = \frac{1 + \cos(d)}{2 \cdot p \cdot R} \cdot \hat{V}$
- Pour $\delta = 0$ rad,

on retrouve la relation établie dans le cas du redressement non commandé : $\overline{V_s} = \frac{2 \cdot \hat{V}}{p}$.

Traçons l'allure de $\overline{V_s} = f(\delta)$ pour $0 \leq \delta \leq \pi$ rad.

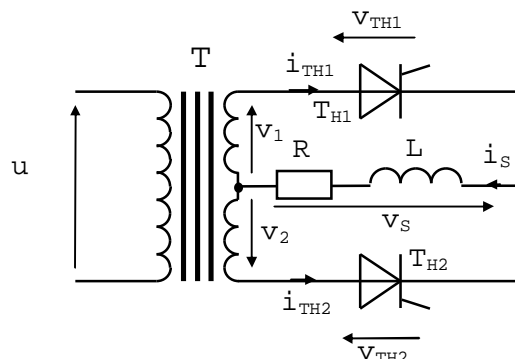


2. Pont P2 sur charge inductive.

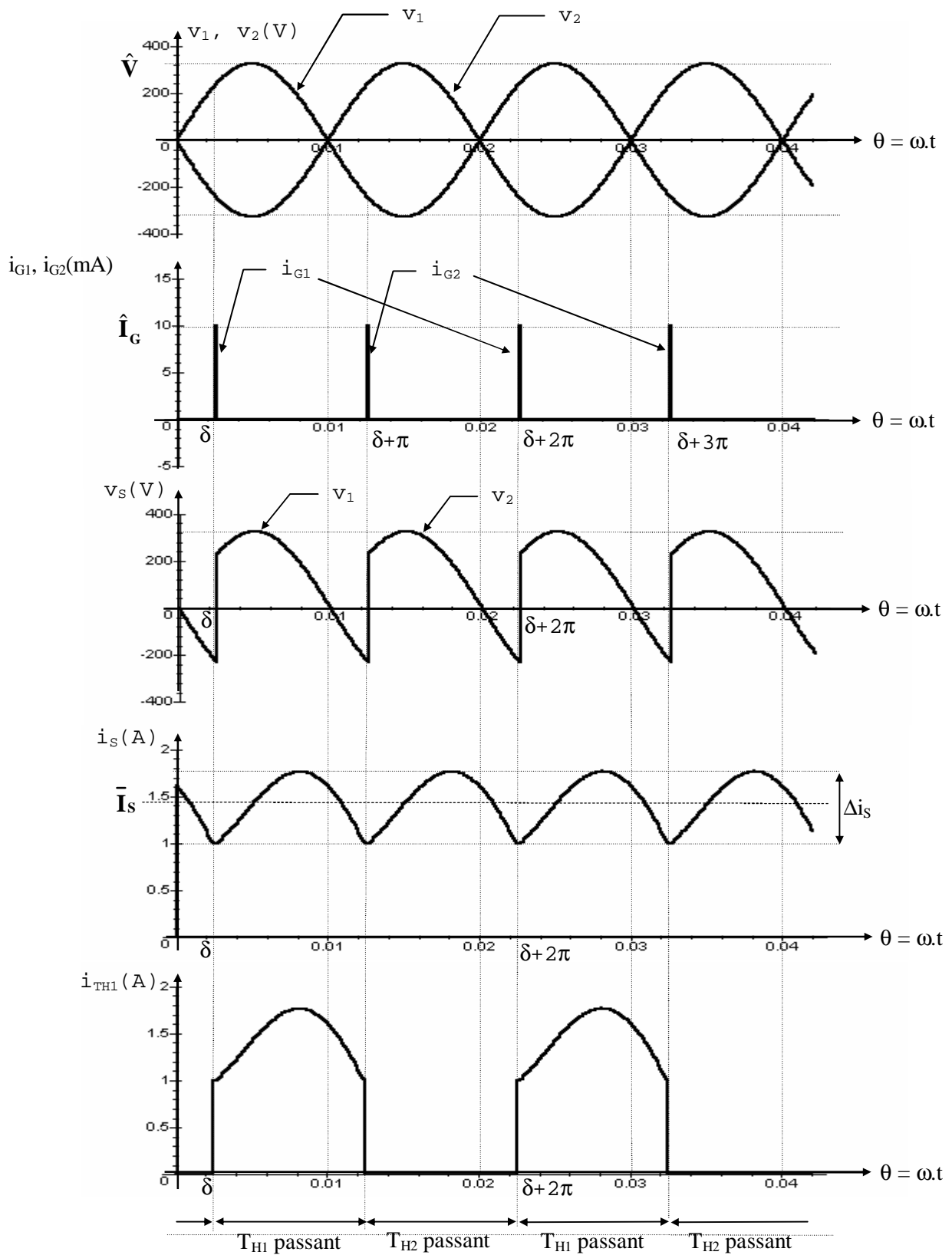
Les thyristors, le transformateur à point milieu sont parfaits.

$$v_1(t) = \hat{V} \cdot \sin(\omega t) = -v_2(t)$$

La commande des thyristors est synchronisée sur le réseau, avec un retard à l'amorçage t_δ , la mise en conduction de T_{H2} étant retardée de $\frac{T}{2}$ par rapport à celle de T_{H1} .



a) Chronogrammes.



b) Analyse du fonctionnement.

L'inductance L est suffisamment grande pour que le courant i_s ne s'annule pas : conduction ininterrompue.

- pour $\delta \leq \theta < \pi + \delta$: $v_1(t) > 0$, $v_2(t) < 0$ et $i_s > 0$:
 - à $\theta = \delta$, on amorce T_{H1} , alors :
 - $v_{TH1} = 0$;
 - $v_s = v_1 > 0$;
 - $i_{TH1} = i_s$;
 - $i_{TH2} = 0$;
 - $v_{TH2} = v_2 - v_1 = -2.v_1 < 0$.
 - pour $\theta = \pi$: $v_1 = v_2 = 0$ or $i_s = i_{TH1} \neq 0 \Rightarrow T_{H1}$ ne peut pas se bloquer naturellement et continue d'assurer la conduction.
 - pour $\pi < \theta < \pi + \delta$: $v_1(t) < 0$ et $v_2(t) > 0$:
 $v_{TH2} = v_2 - v_1 > 0 \Rightarrow T_{H2}$ peut être amorcé mais on ne le fait pas.
 \Rightarrow tant que $\pi \leq \theta < \pi + \delta$, T_{H1} continue d'assurer la conduction puisque $i_s > 0$.
 - $i_s = i_{TH1}$;
 - $v_s = v_1$;
 - $v_{TH1} = 0$;
 - $v_{TH2} = v_2 - v_1 > 0$.
- pour $\pi + \delta \leq \theta < 2\pi + \delta$: $v_1(t) < 0$, $v_2(t) > 0$ et $i_s > 0$:
 - à $\theta = \pi + \delta$, on amorce T_{H2} , alors :
 - $v_{TH2} = 0$;
 - $v_s = v_1 > 0$;
 - $i_{TH2} = i_s$;
 - $i_{TH1} = 0$;
 - $v_{TH1} = v_1 - v_2 = -2.v_2 < 0$.
 - pour $\theta = 2\pi$: $v_1 = v_2 = 0$ or $i_s = i_{TH2} \neq 0 \Rightarrow T_{H2}$ ne peut pas se bloquer naturellement et continue d'assurer la conduction.
 - pour $2\pi < \theta < 2\pi + \delta$: $v_1(t) > 0$ et $v_2(t) < 0$ et $i_s > 0$:
 $v_{TH1} = v_1 - v_2 > 0 \Rightarrow T_{H1}$ peut être amorcé mais on ne le fait pas.
 \Rightarrow tant que $2\pi \leq \theta < 2\pi + \delta$, T_{H2} continue d'assurer la conduction puisque $i_s > 0$.
 - $i_s = i_{TH2}$;
 - $v_s = v_2$;
 - $v_{TH2} = 0$;
 - $v_{TH1} = v_1 - v_2 > 0$.

Remarques :

- la tension redressée v_s est bidirectionnelle et $i_s > 0$:
 - $v_s > 0 \Rightarrow p = v_s.i_s > 0$, la charge reçoit de la puissance ;
 - $v_s < 0 \Rightarrow p = v_s.i_s < 0$, la charge fournit de la puissance (L restitue de l'énergie).

Or, la charge n'est pas active, donc impossible que la puissance qu'elle fournit soit supérieure à celle qu'elle reçoit sur une période \Rightarrow la puissance moyenne reçue par la charge est forcément positive $\Rightarrow \delta \leq \frac{p}{2}$ rad.

- l'ondulation du courant dans la charge Δi_s dépend de L. Souvent on considère que le courant dans la charge est parfaitement lissé, c'est-à-dire que L est infiniment grande. Dans ce cas, on suppose que $\Delta i_s = 0$ et i_s est constant et égal à \bar{I}_s (courant moyen). Transformation tension alternative \Rightarrow courant continu.

- le courant moyen traversant un thyristor est $\bar{I}_{TH} = \frac{\bar{I}_s}{2}$

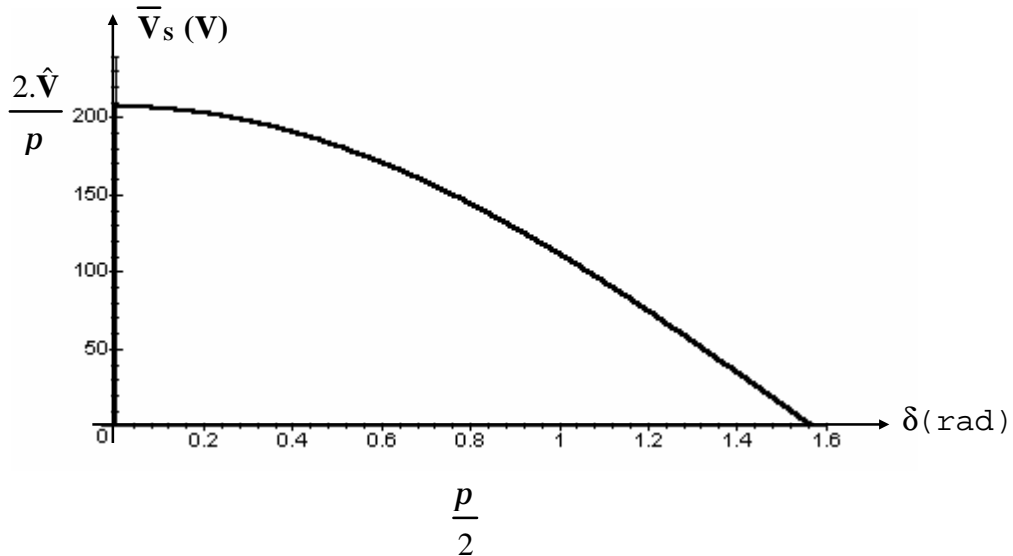
c) Valeur moyenne de la tension redressée.

Calculons la valeur moyenne \bar{V}_s de $v_s(t)$:

$$\bar{V}_s = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_s(t).dt = \frac{1}{p} \int_0^p \hat{V} \cdot \sin(q).dq = \frac{\hat{V}}{p} \int_d^{p+d} \sin(q).dq = \frac{\hat{V}}{p} \cdot [-\cos(q)]_d^{p+d}$$

D'où : $\bar{V}_s = \frac{\hat{V}}{p} \cdot [-\cos(p+d) + \cos(d)] = \frac{2 \cdot \hat{V}}{p} \cdot \cos(d)$

Traçons l'allure de $\bar{V}_s = f(\delta)$ pour $0 \leq \delta \leq \frac{p}{2}$ rad.



d) Valeur moyenne du courant dans la charge.

Calculons la valeur moyenne \bar{I}_s de $i_s(t)$.

On a la relation suivante : $\bar{V}_s = R \cdot \bar{I}_s + L \cdot \frac{di_s}{dt}$.

Or, $L \cdot \frac{di_s}{dt} = 0$ donc : $\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{R} = \frac{2 \cdot \hat{V}}{R \cdot p} \cdot \cos(d)$

e) Puissance échangée.

Si on suppose le courant dans la charge parfaitement lissé et égal à sa valeur moyenne alors :

$$P = \overline{v_s \cdot i_s} = \bar{V}_s \cdot \bar{I}_s = \frac{4 \cdot \hat{V}^2}{R \cdot p^2} \cdot \cos^2(d) \text{ avec } \delta \leq \frac{p}{2} \text{ rad.}$$

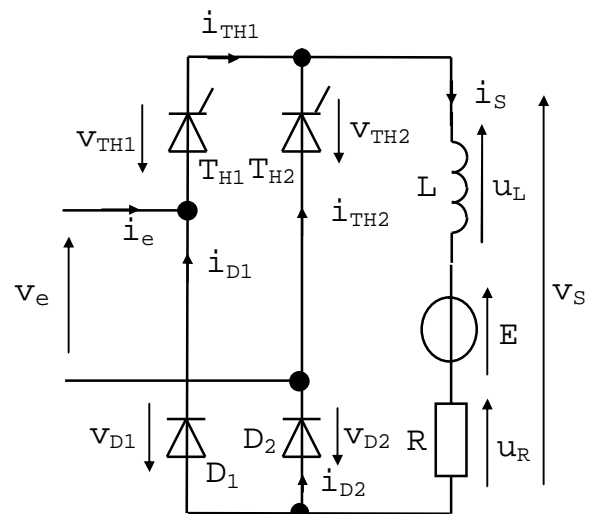
3. Pont mixte symétrique sur charge active.

Les thyristors et les diodes sont parfaits.

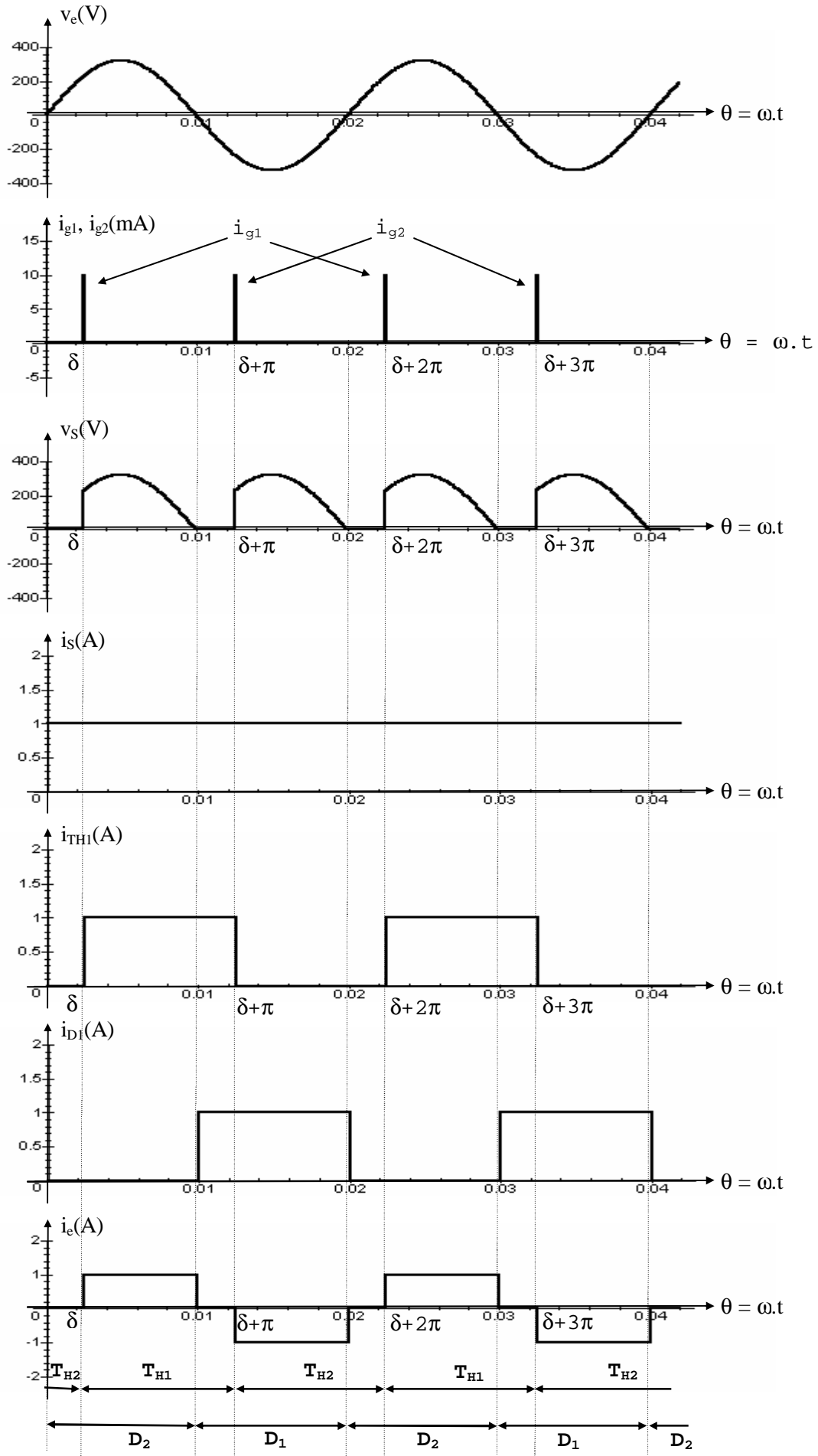
$v_e(t) = \hat{V}_e \cdot \sin(\omega.t)$ avec $f = 50$ Hz.

La commande des thyristors est synchronisée sur $v(t)$, avec un retard à l'amorçage t_δ , la mise en conduction de T_{H2} étant retardée de $\frac{T}{2}$ par rapport à celle de T_{H1} .

On suppose L suffisamment grande pour considérer le courant dans la charge comme constant et ininterrompu $i_s = \bar{I}_s$.

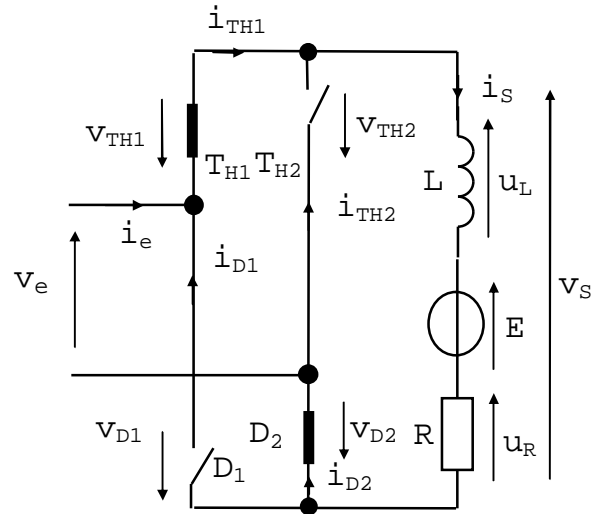


a) Chronogrammes.



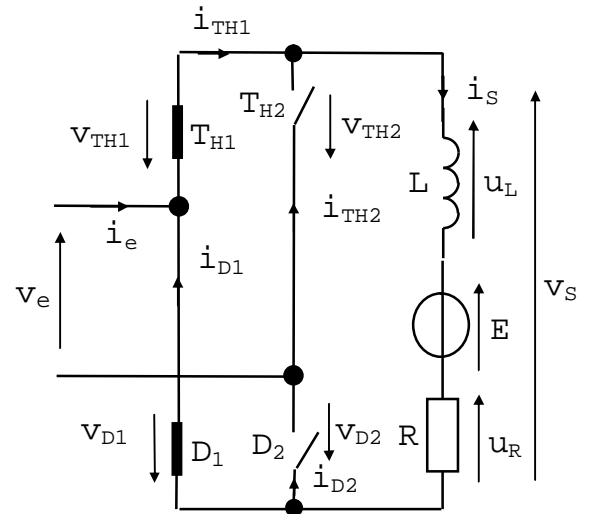
b) Analyse du fonctionnement.

- pour $\delta \leq \theta < \pi + \delta$: $v_e(t) > 0$ et $i_s > 0$:
- à $\theta = \delta$, on amorce T_{H1} , alors :
 - $v_{TH1} = 0$;
 - $v_{D2} = 0$ car D_2 polarisée en directe donc passante ;
 - $v_s = v_e > 0$;
 - $i_{TH1} = i_{D2} = i_s$;
 - $i_e = i_s > 0$;
 - $v_{TH2} = v_{D1} = -v_e < 0$;
 - $i_{TH2} = i_{D1} = 0$ car D_1 polarisée en inverse donc bloquée.



- pour $\theta = \pi$: $v_e = 0$ or $i_s = i_{TH1} \neq 0 \Rightarrow T_{H1}$ ne peut pas se bloquer naturellement et continue d'assurer la conduction. Par contre la diode D_2 se bloque naturellement, D_1 se trouve polarisée en direct et devient passante.

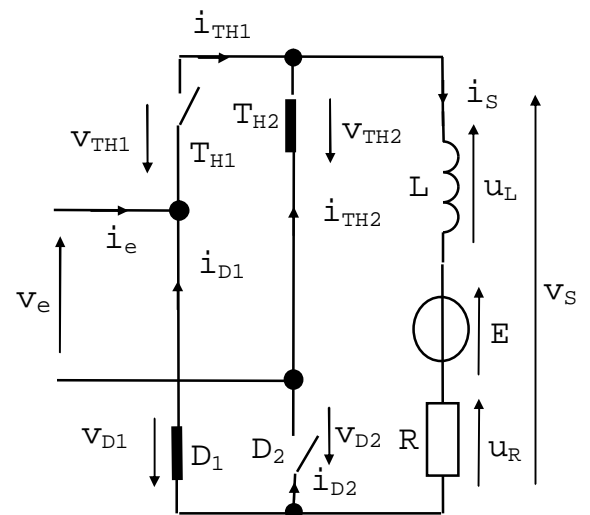
- pour $\pi < \theta < \pi + \delta$: $v_e(t) < 0$:
 $v_{TH2} = -v_e > 0 \Rightarrow T_{H2}$ peut être amorcé mais on ne le fait pas.
 \Rightarrow tant que $\pi \leq \theta < \pi + \delta$, T_{H1} continue d'assurer la conduction puisque $i_s > 0$ avec $D_1 \Rightarrow$ la charge est court-circuitée : **phase de roue libre.**



- $i_s = i_{TH1} = i_{D1}$;
- $v_s = 0$;
- $i_{D2} = i_{TH2} = 0$;
- $i_e = 0$;
- $v_{TH1} = v_{D1} = 0$;
- $v_{TH2} = -v_e > 0$.

- pour $\pi + \delta \leq \theta < 2\pi + \delta$: $v_e(t) < 0$ et $i_s > 0$:

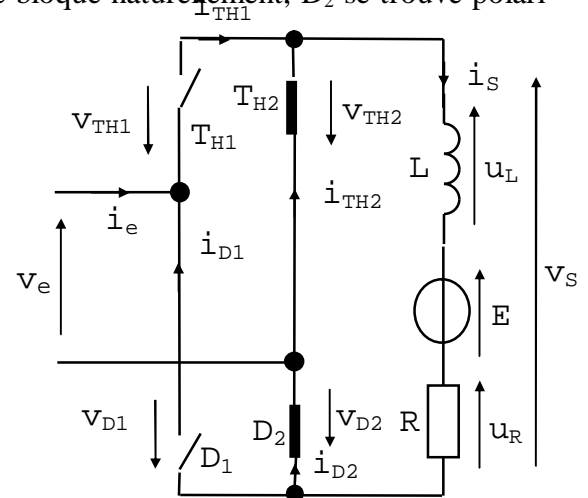
- à $\theta = \pi + \delta$, on amorce T_{H2} , alors :
 - $v_{TH2} = 0$;
 - T_{H1} se bloque simultanément et $i_{TH1} = 0$;
 - $v_{D1} = 0$ car D_1 polarisée en directe donc passante ;
 - $v_s = -v_e > 0$;
 - $i_{TH2} = i_{D1} = i_s$;
 - $i_e = -i_s < 0$;
 - $v_{TH1} = v_{D2} = v_e < 0$ donc D_2 bloquée et $i_{D2} = 0$.



- pour $\theta = 2\pi$: $v_e = 0$ or $i_S = i_{TH2} \neq 0 \Rightarrow T_{H2}$ ne peut pas se bloquer naturellement et continue d'assurer la conduction. Par contre la diode D_1 se bloque naturellement, D_2 se trouve polarisée en direct et devient passante.

- pour $2\pi < \theta < 2\pi + \delta$: $v_e(t) > 0$ et $i_S > 0$:
 $v_{TH1} = v_e > 0 \Rightarrow T_{H1}$ peut être amorcé mais on ne le fait pas.
 \Rightarrow tant que $2\pi \leq \theta < 2\pi + \delta$, T_{H2} continue d'assurer la conduction puisque $i_S > 0$ avec $D_2 \Rightarrow$ la charge est court-circuitée : **phase de roue libre**.

- $i_S = i_{TH2} = i_{D2}$;
- $v_S = 0$;
- $i_{D1} = i_{TH1} = 0$;
- $i_e = 0$;
- $v_{TH2} = v_{D2} = 0$;
- $v_{TH1} = v_e > 0$.



Remarques :

- la fréquence de v_S est le double de celle du réseau ;
- la tension redressée v_S est monodirectionnelle et $i_S > 0$:
 $v_S > 0 \Rightarrow p = v_S \cdot i_S > 0$, la charge reçoit de la puissance.
- les thyristors et les diodes doivent supporter en inverse \hat{v}_e .

c) Valeur moyenne de la tension redressée.

$$\overline{V_S} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_S(t) \cdot dt = \frac{1}{p} \int_0^p \hat{V}_e \cdot \sin(q) \cdot dq = \frac{\hat{V}_e}{p} \int_d^p \sin(q) \cdot dq = \frac{1 + \cos(d)}{p} \cdot \hat{V}_e$$

Il est possible, en agissant sur δ de faire varier $\overline{V_S}$.

δ pouvant varier en théorie de 0 à π , $\overline{V_S}$ décroît de $\frac{2 \cdot \hat{V}_e}{p}$ à 0 sans jamais être négatif.

d) Valeur moyenne du courant dans la charge.

On a la relation suivante : $\overline{V_S} = R \cdot \overline{I_S} + L \cdot \frac{di_S}{dt} + E$.

$$\text{Or, } L \cdot \frac{di_S}{dt} = 0 \text{ donc : } \overline{I_S} = \frac{\overline{V_S} - E}{R} = \frac{\frac{1 + \cos(d)}{p} \cdot \hat{V}_e - E}{R}$$

Remarques : chaque diode et thyristor est traversé par un courant moyen égal à $\frac{\overline{I_S}}{2}$;

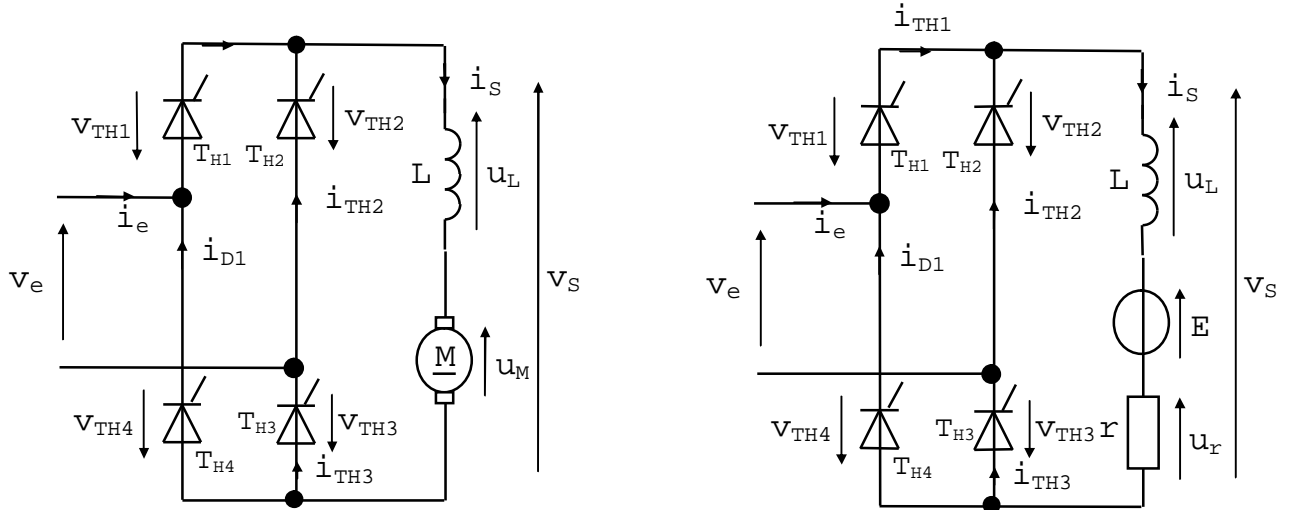
le courant i_e fourni par le réseau est alternatif : $\overline{I_e} = 0$.

e) Conclusion.

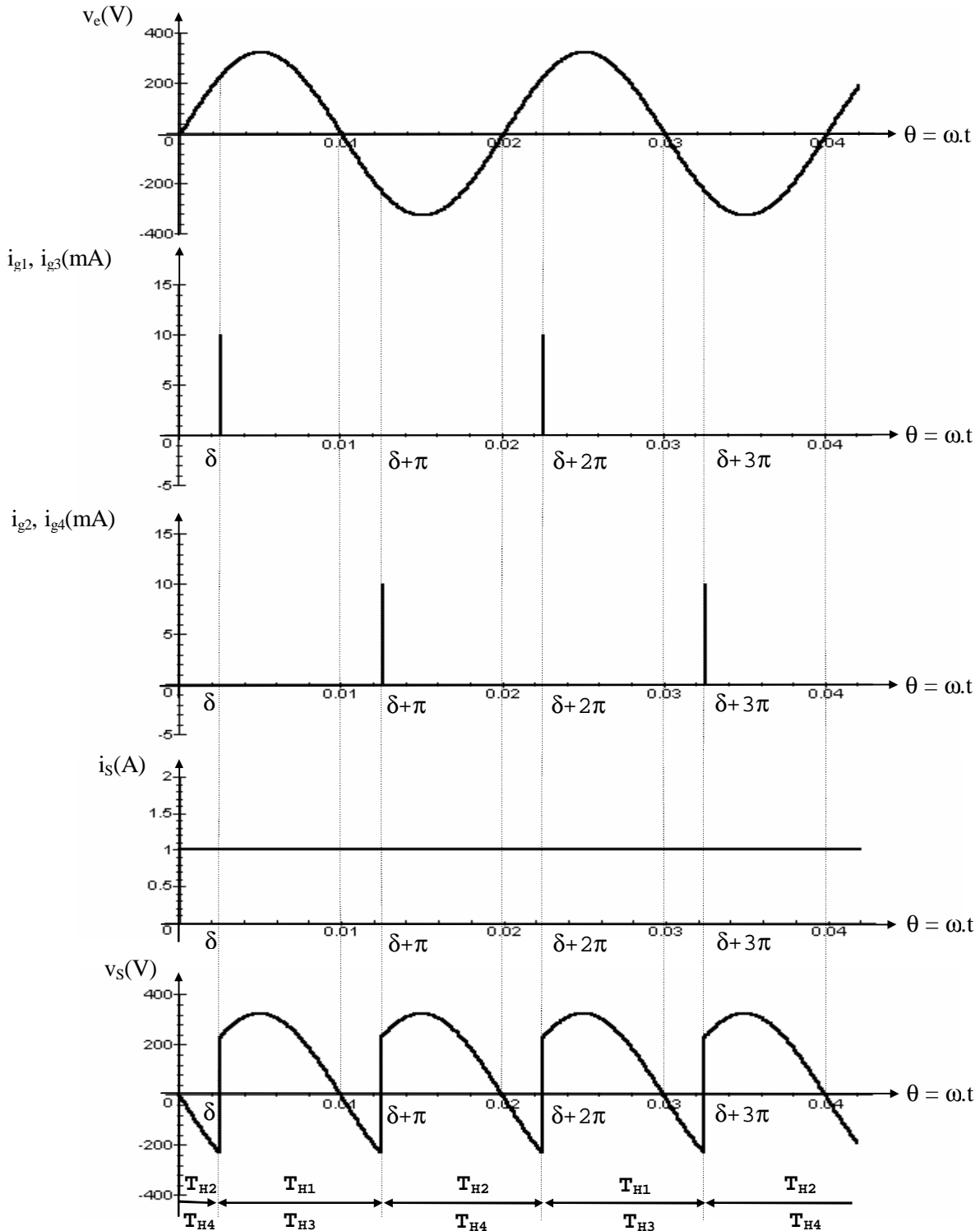
Le pont mixte n'est pas réversible en tension et en courant, le convertisseur ne peut fonctionner qu'en redresseur commandé en raison de la présence des diodes dans le montage.

Application possible : variateur de vitesse moteur DC dans un sens de rotation quadrant • ou f .

4. Pont PD2 tout thyristor sur charge active réversible : moteur DC.



a) Fonctionnement en redresseur.

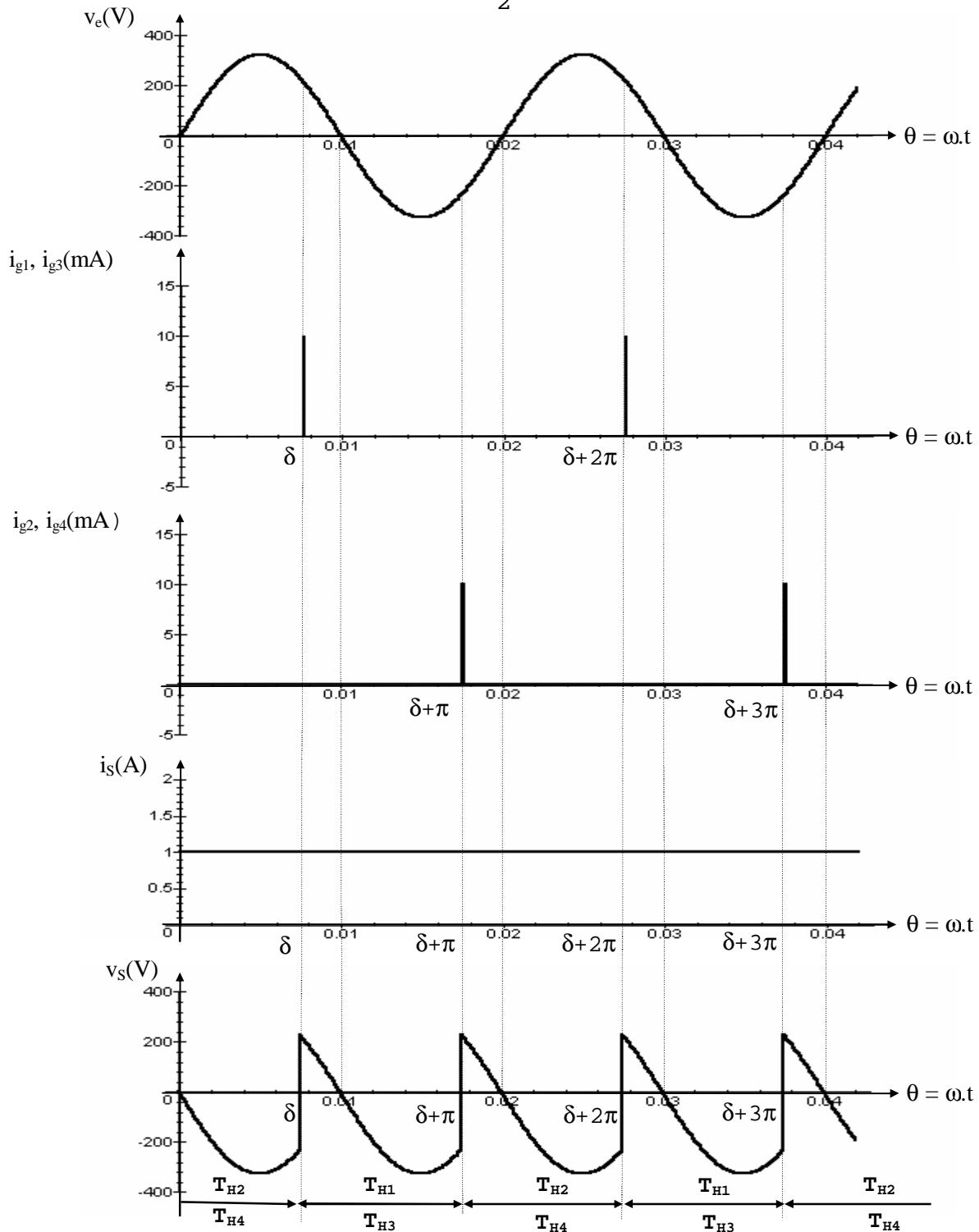


\bar{I}_s est imposé par le moment du couple résistant Γ_r et la f.é.m. varie avec la valeur moyenne de la tension redressée v_s : $E = \bar{V}_s - r \cdot \bar{I}_s = \frac{2 \cdot \hat{V}_e}{p} \cdot \cos d - r \cdot \bar{I}_s = K' \cdot \Omega$

La valeur moyenne de la puissance P consommée par la charge est positive.

b) Fonctionnement en onduleur assisté.

Le montage fonctionne en onduleur assisté si $\delta > \frac{p}{2}$ rad. On a les chronogrammes suivants pour $\delta = 3 \frac{p}{4}$ rad



\bar{I}_S est toujours positif et le couple résistance également.

La valeur moyenne de la tension redressée v_S devient négative :

$$E = \bar{V}_S - r \cdot \bar{I}_S = \frac{2 \cdot \hat{V}_e}{p} \cdot \cos d - r \cdot \bar{I}_S = K' \cdot \Omega < 0$$

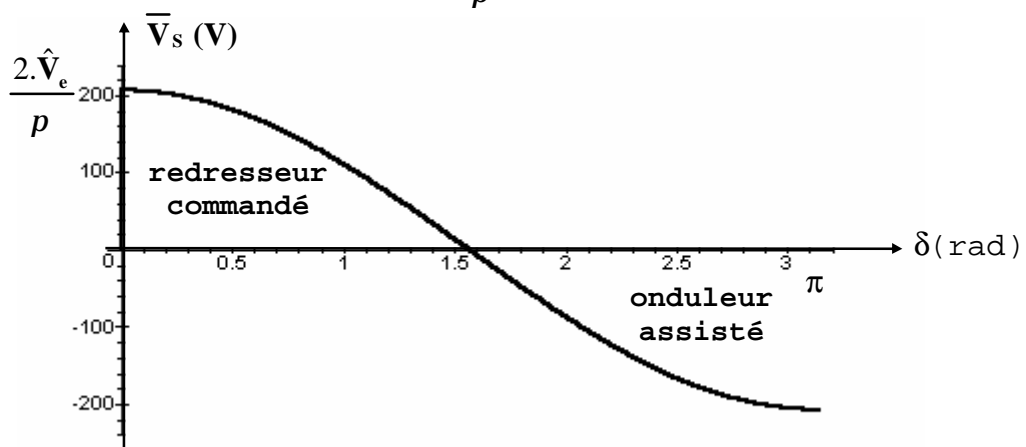
⇒ la vitesse de rotation s'inverse.

La valeur moyenne de la puissance P consommée par la charge devient également négative ⇒ le transfert d'énergie a lieu dans le sens continu (moteur) → alternatif (réseau) caractérisant un fonctionnement en génératrice de la machine. C'est le cas lors des phases de freinage en particulier lorsqu'elle est entraînée par sa charge. Le réseau « récupère » une partie de l'énergie fournie lors du fonctionnement en moteur.

Le pont ne fonctionne plus en redresseur, mais en onduleur assisté (≠ onduleur autonome) car la fréquence de v_S (dans ce cas 100 Hz) est imposée par celle du réseau (50 Hz).

c) Conclusion.

Traçons $\bar{V}_S = f(\delta)$ pour $0 \leq \delta \leq \pi$ rad. $\bar{V}_S = \frac{2 \cdot \hat{V}_e}{p} \cdot \cos(d)$



Avec un seul pont complet à 4 thyristors on peut faire fonctionner le moteur dans les deux quadrants (ici les quadrants 1 et 4). Pour pouvoir le faire fonctionner dans les 4 quadrants, il faut pouvoir également inverser le sens du courant I traversant l'induit, on utilise un second pont complet à 4 thyristors monté tête-bêche avec le premier : on parle de variateur réversible.

