

Commandes électroniques de moteurs



EL KACEM EL MOSTAFA

Types de commande électronique des moteurs

1- Introduction:

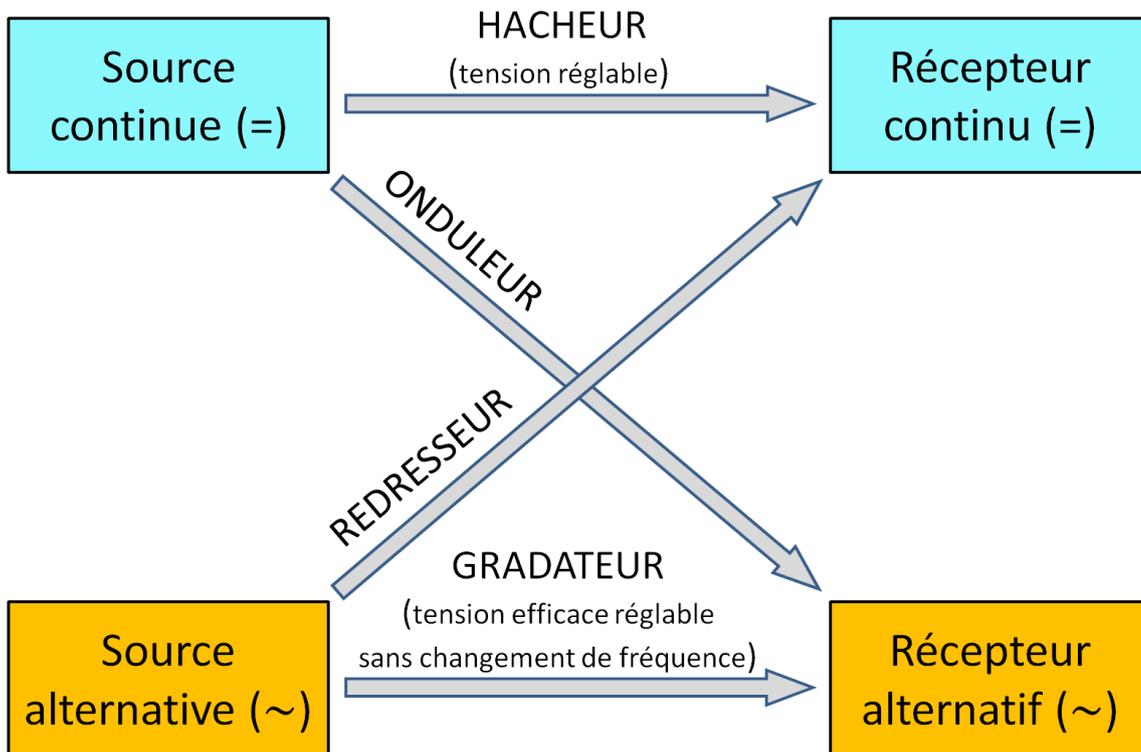
Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

On distingue deux types de sources de tension:

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.
- Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace V et de la fréquence f .

On différencie quatre types de convertisseurs dont les schémas de principe sont donnés sur la figure ci-dessous:

- Convertisseur alternatif-continu : **redresseur** ;
- Convertisseur continu-continu : **hacheur** ;
- Convertisseur continu-alternatif : **onduleur** ;
- Convertisseur alternatif-alternatif : c'est un **gradateur** lorsque seule la valeur efficace de la tension alternative est modifiée, si non c'est un **cyclo convertisseur**.



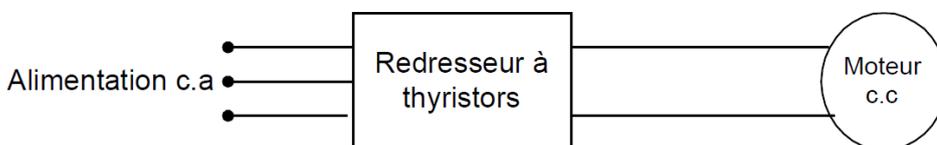
Voilà quelques applications des convertisseurs statiques:

- **Redresseurs** : alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries
- **Hacheurs** : commande des moteurs à courant continu (vitesse variable) ; fonctions d'interrupteur onduleurs;
- **Onduleurs** : production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes, protection contre les surtensions et coupures de réseau (informatique), commande des machines à courant alternatif ;
- **Cyclo-convertisseurs** : production des vitesses variables en alternatif (levage, machine-outil).

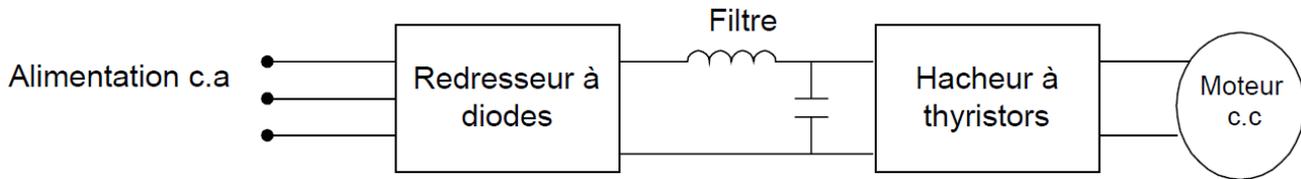
2- Commande de moteurs à courant continu :

Les moteurs à courant continu sont alimentés à partir :

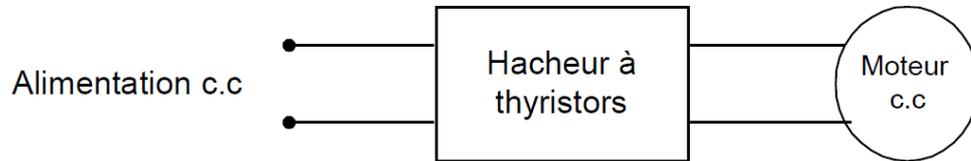
- d'un réseau alternatif (monophasé ou triphasé) par l'intermédiaire de redresseur à thyristors



- de redresseurs à diodes suivis de hacheurs à thyristor



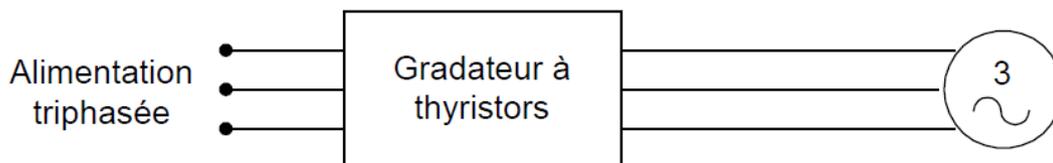
- d'une batterie d'accumulateurs par l'intermédiaire d'hacheurs à thyristors



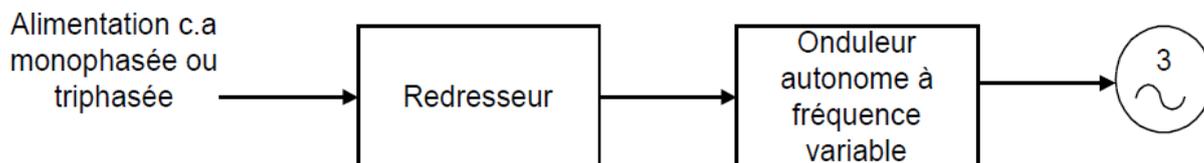
3- Commande de moteurs asynchrones triphasés :

Les moteurs à courant alternatif sont alimentés par des tensions et des fréquences variables à partir :

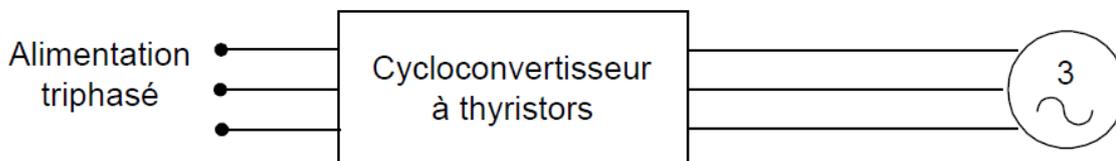
- de gradateurs à thyristors



- d'onduleurs autonomes à fréquence variable



- de cycloconvertisseurs



Le convertisseur alternatif-continu (Redresseur)

Le convertisseur C.A à C.C nous donne, à partir d'une source de tension alternative monophasée ou triphasée, une tension continue qui peut être fixe ou variable.



1- Le redresseur à tension fixe en sortie (Redressement non commandé) :

1.1- Redressement monophasé :

Le redresseur fixe ou non commandé contient seulement des diodes produisant ainsi une tension continue fixe à sa sortie.

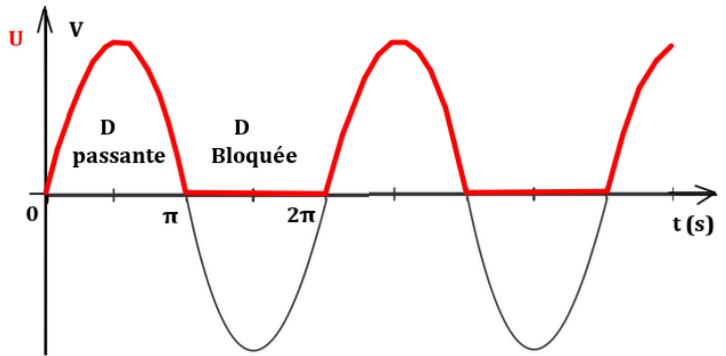
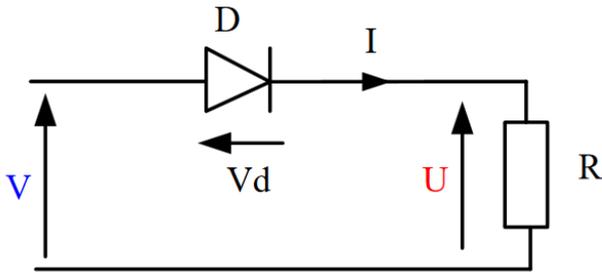
On retrouve deux types de redresseurs monophasés, soit:

A) redresseur simple alternance ou demi-onde;

B) redresseur double alternance ou pleine-onde.

A1) Redressement simple alternance (charge résistive)

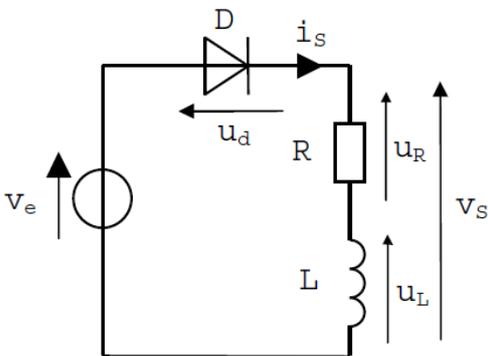
Le redressement simple alternance est composé d'une seule diode et la tension moyenne à la charge nous est donnée par l'équation ci-dessous :



$$U_{moy} = \frac{v \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{V_{max}}{\pi}$$

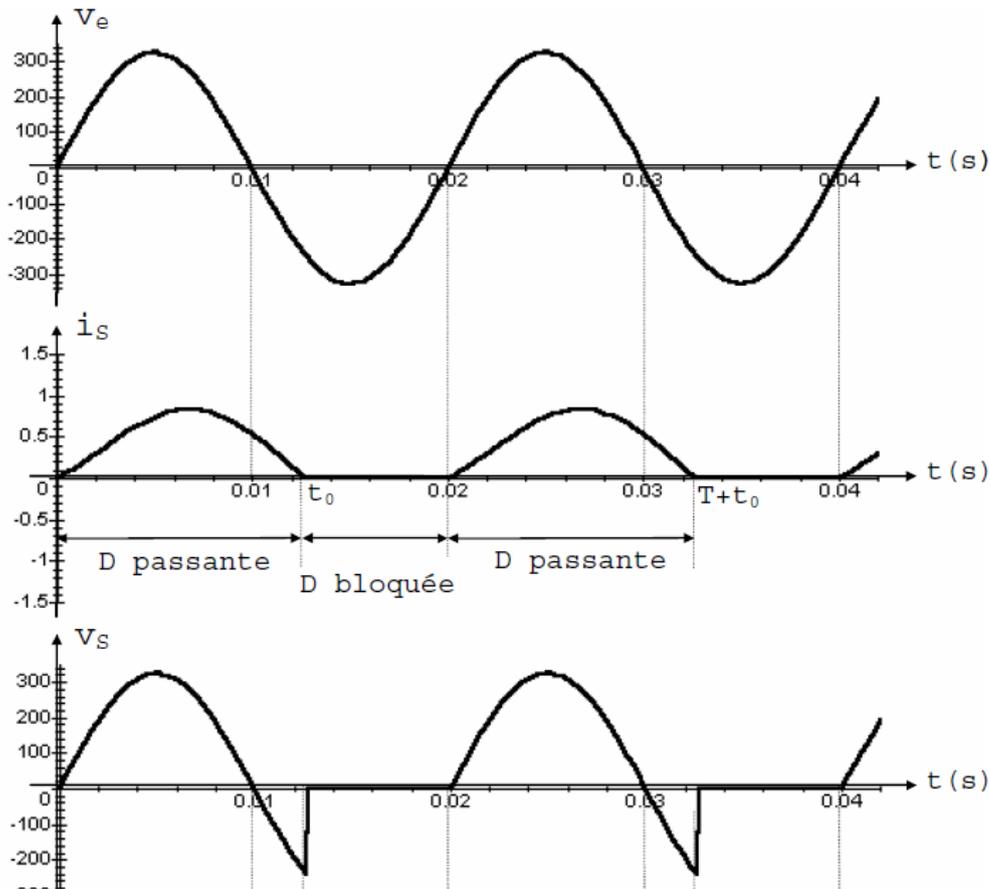
$$U_{eff} = \frac{v \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{V_{max}}{2}$$

A2) Redressement simple alternance (charge inductive)



$$V_{s.moy} = \frac{v_e \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{V_{e.max}}{\pi}$$

$$V_{s.eff} = \frac{v_e \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{V_{e.max}}{2}$$



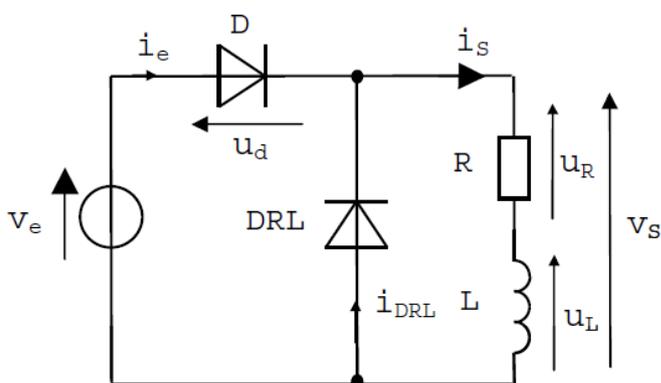
La charge inductive introduit un retard à l'établissement et à la suppression du courant. Le courant est « lissé ».

Les performances du montage sont médiocres, la tension redressée V_s étant en partie négative, sa valeur moyenne est diminuée par rapport au cas d'une charge résistive.

Remède :

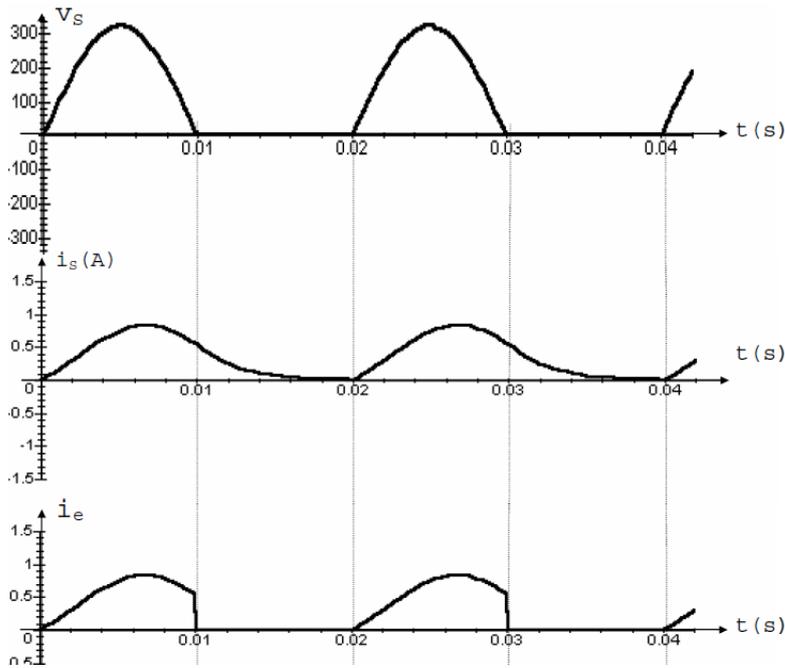
Pour éviter cet inconvénient, on emploie une diode DRL dite de « roue libre », montée en parallèle inverse sur la charge inductive.

Dès que la tension redressée V_s tend à devenir négative, la diode DRL se met à conduire, court-circuitant et démagnétisant la charge inductive.

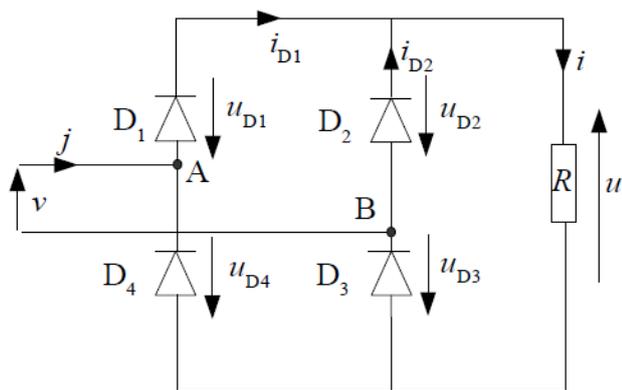


$$V_s.moy = \frac{V_e \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{V_e.max}{\pi}$$

$$V_s.eff = \frac{V_e \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{V_e.max}{2}$$

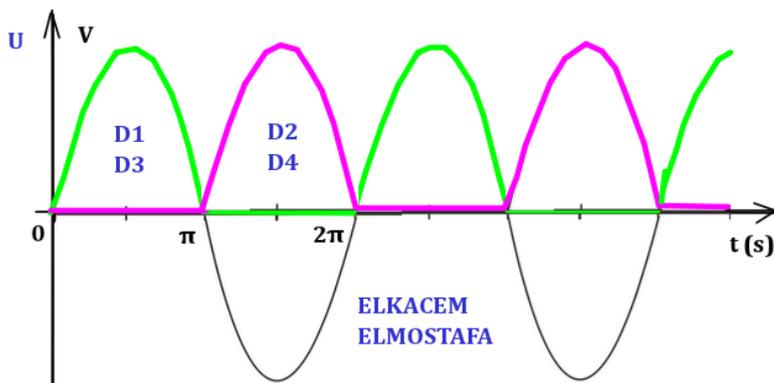


B1) Redressement double alternance (charge résistive) :



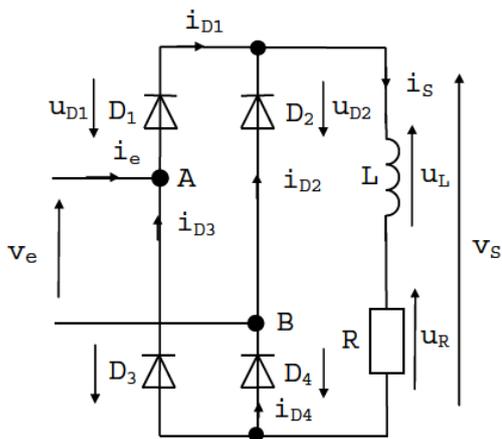
$$U_{moy} = \frac{2 \cdot V \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{2 \cdot V_{max}}{\pi}$$

$$U_{eff} = V_{eff}$$



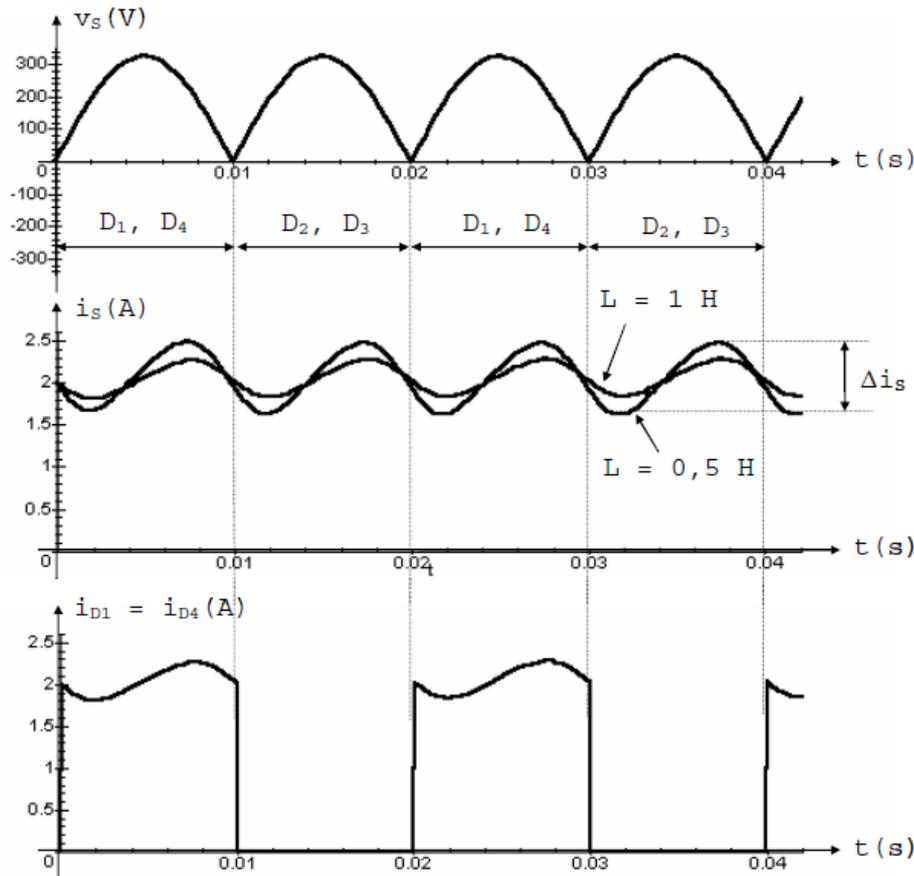
B2) Redressement double alternance (charge inductive) :

L'inductance L s'oppose aux variations du courant i_s . Elle « lisse » le courant i_s .
 Si on donne à L une valeur suffisante, le courant dans
 La charge devient ininterrompue : c'est le régime de conduction « continu ».



$$V_{s.moy} = \frac{2.V_e.\sqrt{2}}{\pi} = \frac{2.V_e.max}{\pi}$$

$$V_{s.eff} = V_{e.eff}$$



Remarque :

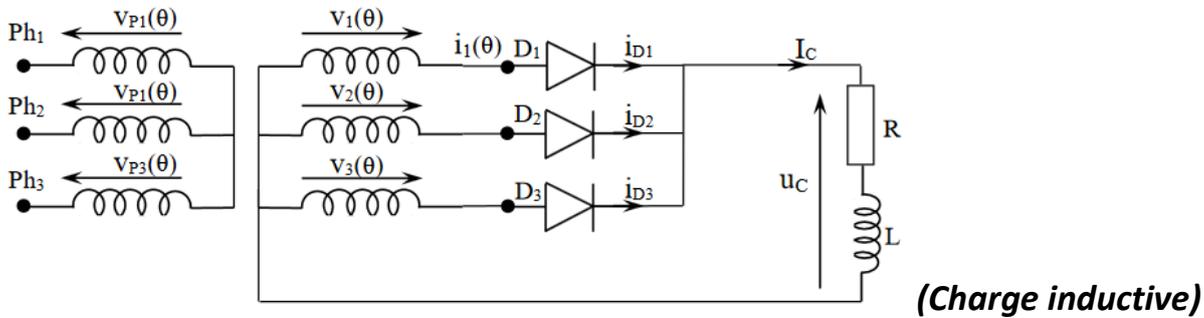
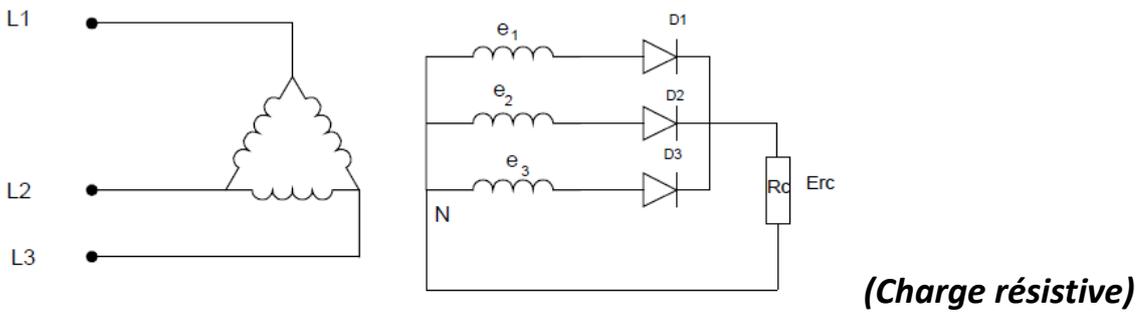
Plus l'inductance est grande, plus l'ondulation Δi_s du courant i_s est faible. En théorie, souvent on suppose que L est suffisamment grande pour pouvoir considérer i_s comme constant.

1.2- Redressement triphasé :

Le redresseur monphasé est limité à des puissances pouvant atteindre 10 kW. Pour alimenter des puissances supérieures à cette valeur, on utilise des redresseurs triphasés, comme :

- A) Le redresseur en étoile à simple alternance;
- B) Le redresseur en pont.

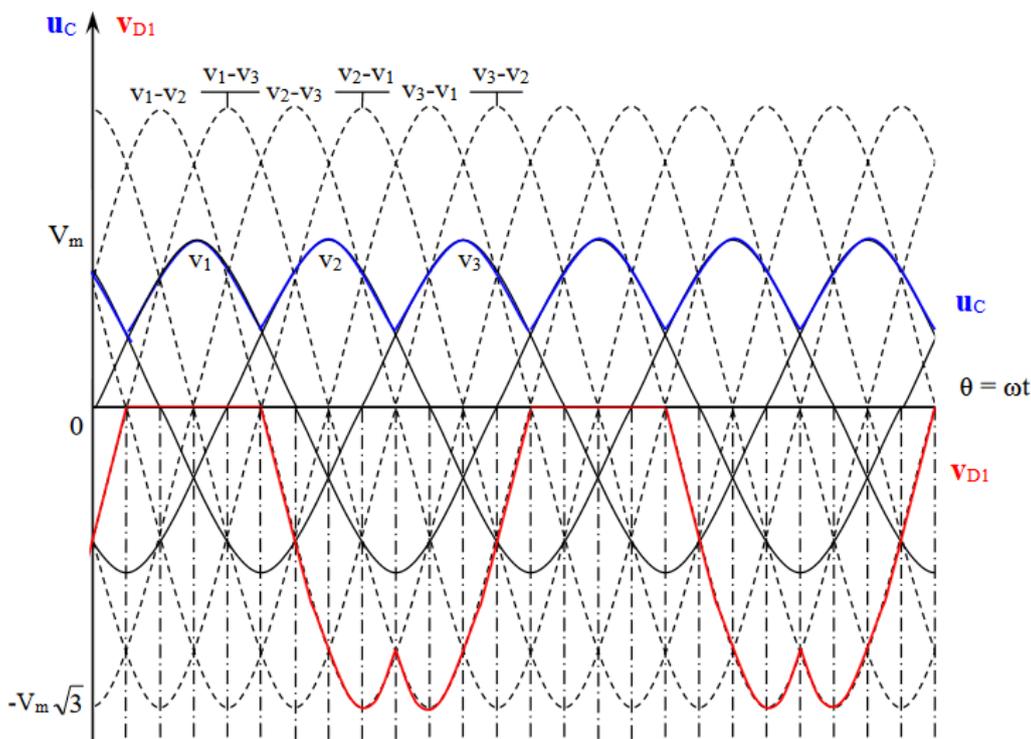
A1) Le redressement simple alternance triphasé :



Dans ce montage la diode en conduction est celle dont l'anode est reliée à la plus positive des tensions du générateur, les autres sont bloquées. Donc, nous avons à partir de $\theta = \pi/6$ qu'on appelle l'angle d'amorçage.

Les intervalles de conduction sont les suivants

Intervalle	Diode en conduction	Diodes bloquées	Tension de sortie u_C	Tension aux bornes de D_1	Courant i_1
$[\frac{\pi}{6}; \frac{5\pi}{6}]$	D1	D2 et D3	v_1	0	I_C
$[\frac{5\pi}{6}; \frac{3\pi}{2}]$	D2	D1 et D3	v_2	$v_1 - v_2$	0
$[\frac{3\pi}{2}; \frac{13\pi}{6}]$	D3	D1 et D2	v_3	$v_1 - v_3$	0
$[\frac{13\pi}{6}; \frac{17\pi}{6}]$	D1	D2 et D3	v_1	0	I_C



$$U_{C_{moy}} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{2\pi} = 0,827 V_m$$

$$\text{On a } V_m = V\sqrt{2} \text{ donc } U_{C_{moy}} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} V$$

Le courant moyen dans chaque diode équivaut au tiers du courant de charge et la fréquence du signal de sortie est égale à trois fois le signal d'entrée.

Ce redresseur est employé que pour des montages industriels de petites puissances.

Exemple d'application :

Dans un redressement simple alternance triphasé, la tension entre PH-N est $V= 220 V$ à 50 HZ , et la charge est une résistance de valeur $R_c=10 \Omega$. En négligeant la chute de tension des diodes, calculez:

- la tension moyenne à la charge ;
- le courant moyen de charge ;
- le courant moyen des diodes ;
- la fréquence du signal à la charge.

Solution :

$$a. \quad V_{O \text{ moy}} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \right) E_{\text{max}} = 0,827 E_{\text{max}}$$

$$V_{O \text{ moy}} = 0,8277 \times (220v \times \sqrt{2}) = 256,5354 V$$

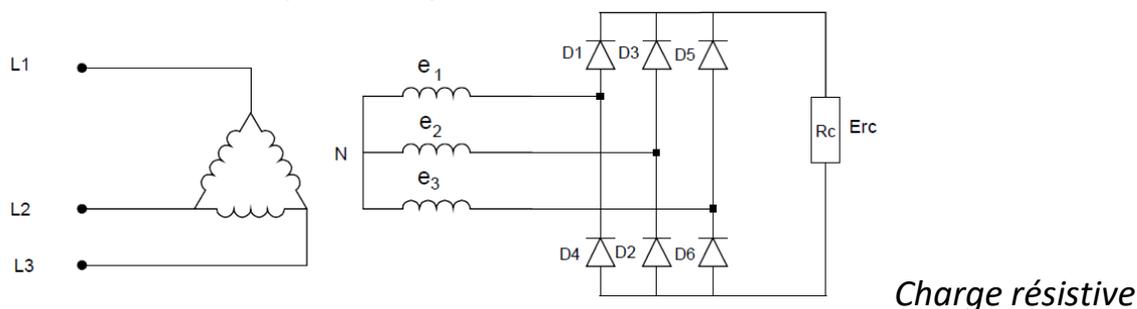
$$b. \quad I_{rc} = \frac{V_{omoy}}{R_c} = \frac{256,53V}{10\Omega} = 25,65A$$

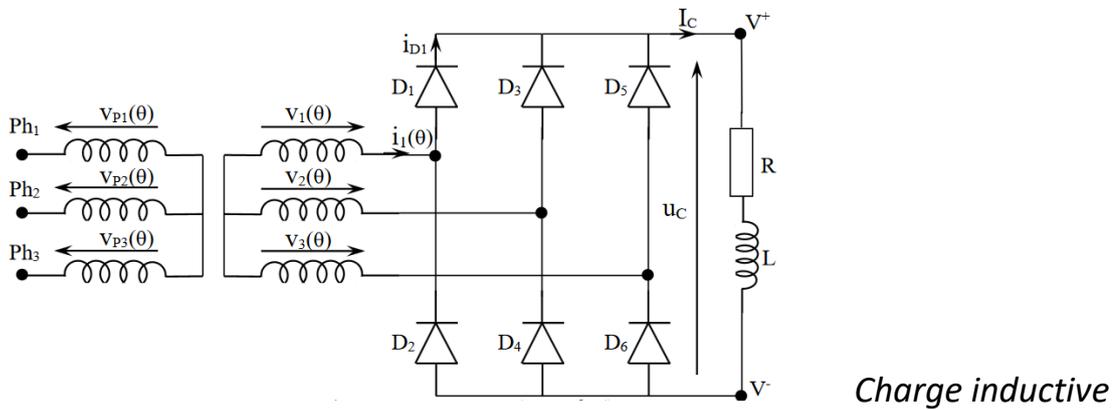
$$c. \quad I_D = \frac{I_{RC}}{3} = \frac{25,65}{3} = 8,54A$$

$$d. \quad f_o = 3 \times 50 \text{ hz} = 150 \text{ hz}$$

B) Le redressement double alternance triphasé :

Le redressement triphasé en pont est l'un des circuits redresseurs industriels les plus efficaces.

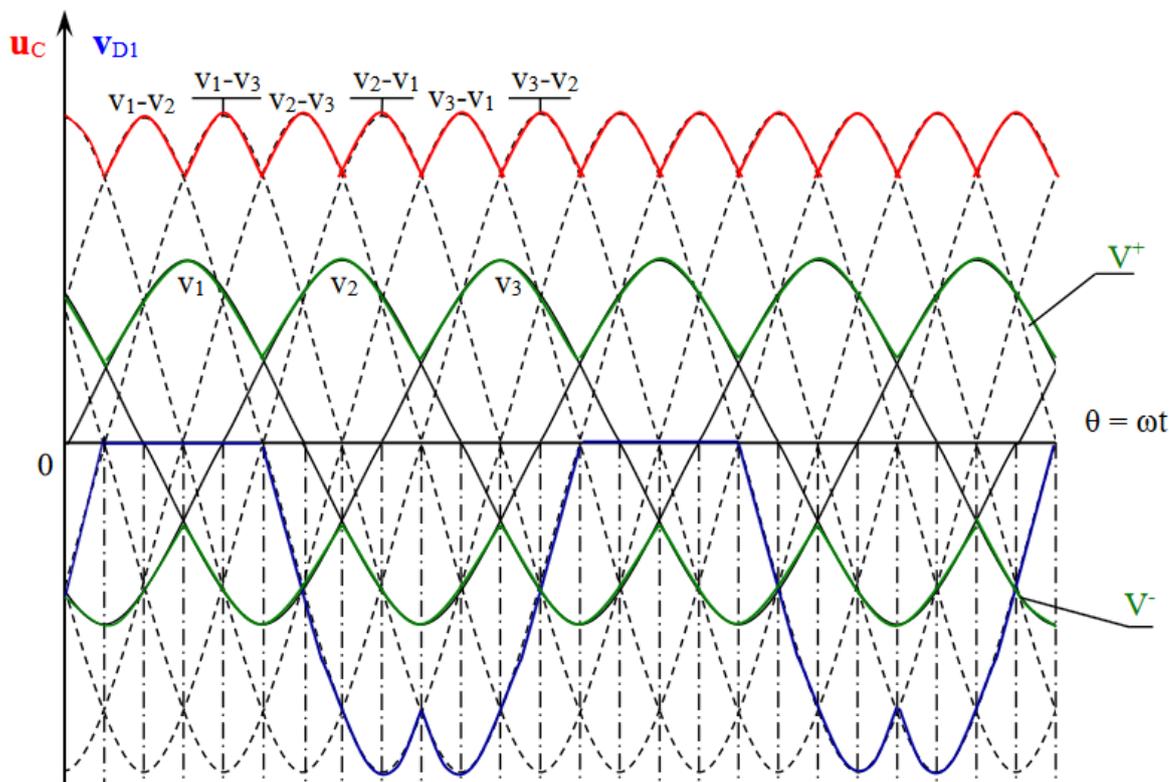




Intervalle	Diodes en conduction	Tension de sortie u_C	Tension aux bornes de D_1	Courant i_{D1}	Courant i_1
$\left[\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{2} \right]$	D_1 et D_4	$v_1 - v_2 = u_{12}$	0	I_C	I_C
$\left[\frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{6} \right]$	D_1 et D_6	$v_1 - v_3 = u_{13}$	0	I_C	I_C
$\left[\frac{5\pi}{6}, \frac{7\pi}{6} \right]$	D_3 et D_6	$v_2 - v_3 = u_{23}$	$v_1 - v_2$	0	0
$\left[\frac{7\pi}{6}, \frac{3\pi}{2} \right]$	D_3 et D_2	$v_2 - v_1 = u_{21}$	$v_1 - v_2$	0	$-I_C$
$\left[\frac{3\pi}{2}, \frac{11\pi}{6} \right]$	D_5 et D_2	$v_3 - v_1 = u_{31}$	$v_1 - v_3$	0	$-I_C$
$\left[\frac{11\pi}{6}, \frac{13\pi}{6} \right]$	D_5 et D_4	$v_3 - v_2 = u_{32}$	$v_1 - v_3$	0	0

Le courant moyen dans chaque diode est égal au tiers du courant de charge. La fréquence du signal à la sortie équivaut à six fois la fréquence d'entrée.

Une bobine peut être rajoutée en série avec la charge pour diminuer le taux d'ondulation.



$$U_{C\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad i_{D1\text{moy}} = \frac{I_C}{3} \quad I_{D1\text{eff}} = \frac{I_C}{\sqrt{3}}$$

Exemple d'application :

Dans un redresseur en pont triphasé double alternance, la tension simple au secondaire du transformateur est de 220 V à 50 Hz. La charge est une résistance de 10Ω. En négligeant la chute de tension des diodes, calculez les valeurs suivantes: (PH-PH, $U = V \cdot \sqrt{3} = 220 \cdot \sqrt{3}$)

- la tension moyenne à la charge ;
- le courant moyen à la charge ;
- le courant moyen des diodes ;
- la fréquence de l'ondulation à la charge.

Solution :

$$V_{O \text{ moy}} = 1,65 E_{\text{max}} = 1,65 \times 220\text{V} \times \sqrt{2} = 511,83\text{V}$$

$$I_{O \text{ moy}} = \frac{V_{O \text{ moy}}}{R_C} = \frac{511,83}{10\Omega} = 51,18\text{A}$$

$$I_D = \frac{I_{RC}}{3} = \frac{51,18}{3} = 17,06\text{A}$$

$$f_o = 6 \times 50 \text{ hz} = 600 \text{ hz}$$

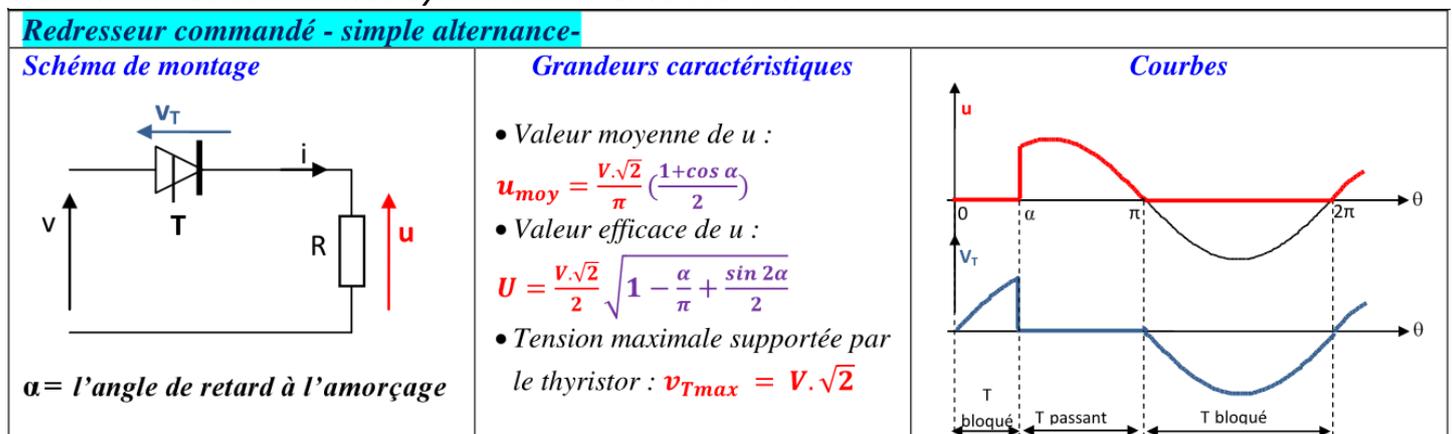
$$f_o = 300 \text{ Hz}$$

2- Le redresseur à tension variable en sortie (Redressement commandé) :

Les redresseurs commandés permettent de contrôler la tension moyenne à la charge. On les utilise surtout dans la commande des moteurs à courant continu pour varier la vitesse. On retrouve les redresseurs commandés à simple et double alternance pour des tensions monophasées et triphasées.

Le redresseur commandé monophasé à simple alternance

Pour varier la tension moyenne à la charge, on utilise un thyristor qui est déclenché à partir d'un circuit de commande synchronisé sur le secteur.



Le redresseur monophasé double alternance

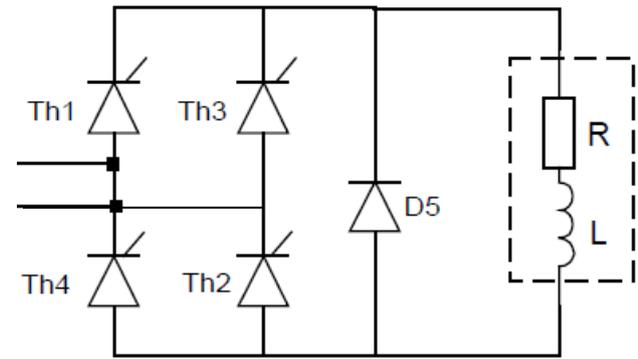
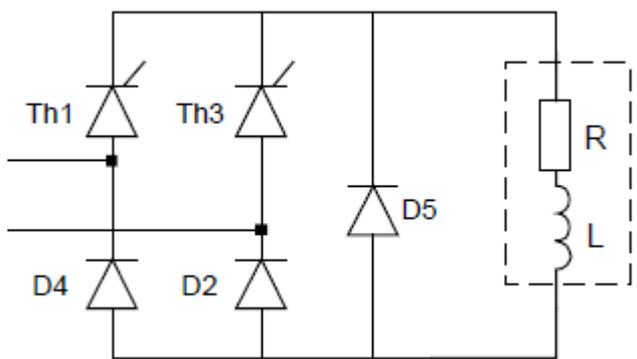
Dans le cas du redresseur en pont mixte avec deux thyristors et deux diodes, les deux alternances sont contrôlées et le circuit nécessite des signaux de gâchette déphasés de 180° .

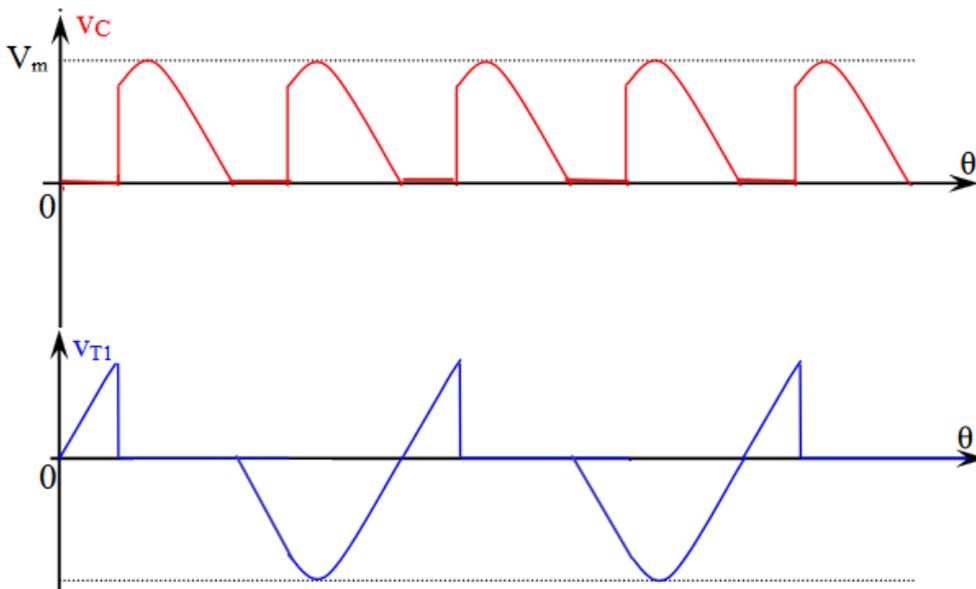
Redresseur commandé - double alternance – pont mixte		
Schéma de montage	Grandeurs caractéristiques	Courbes
	<ul style="list-style-type: none"> Valeur moyenne de u : $u_{moy} = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{1+\cos\alpha}{2} \right)$ Valeur efficace de u : $U = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$ Tension maximale supportée par le thyristor : $v_{Tmax} = v_{Dmax} = V\sqrt{2}$ 	
$\alpha =$ l'angle de retard à l'amorçage		

Le redresseur monophasé commandé DA sans DRL

Le redresseur monophasé mixte commandé

Le redresseur monophasé en pont complètement commandé





Avec DRL

• Valeur moyenne de u :

$$u_{\text{moy}} = \frac{2V_m \sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

• Valeur efficace de u :

$$U = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

Exemple :

Dans le montage en pont monophasé, la tension au secondaire du transformateur d'alimentation est de 220 volts à 50 hertz, et la charge a une impédance de 5 ohms. Calculez :

- la tension moyenne à la charge pour un angle d'amorçage de 120° ;
- la tension inverse de crête (T.I.C) que doivent supporter les diodes et les thyristors.

Solution :

$$a) V_{c.moy} = \frac{V_{\text{max}}}{\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos 120) = 49,54 \text{ V}$$

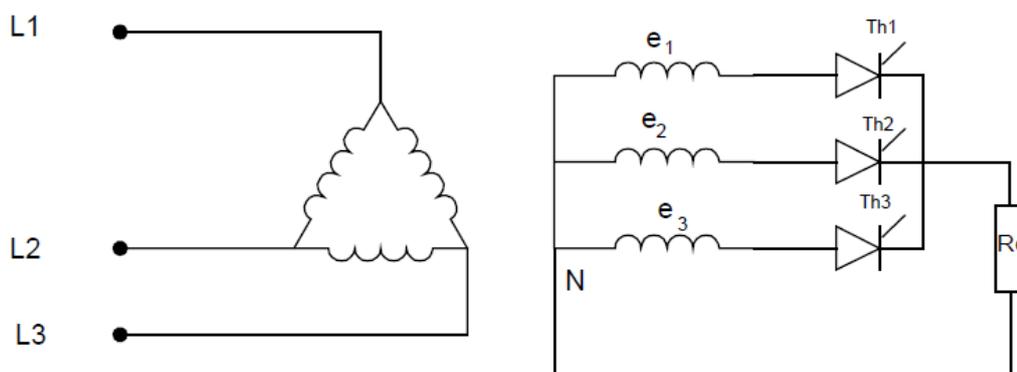
$$b) V_{Th.inv} = TIC = -V_{\text{max}} = -220 \cdot \sqrt{2} = -310,2 \text{ V}$$

Redresseur commandé triphasé à simple alternance

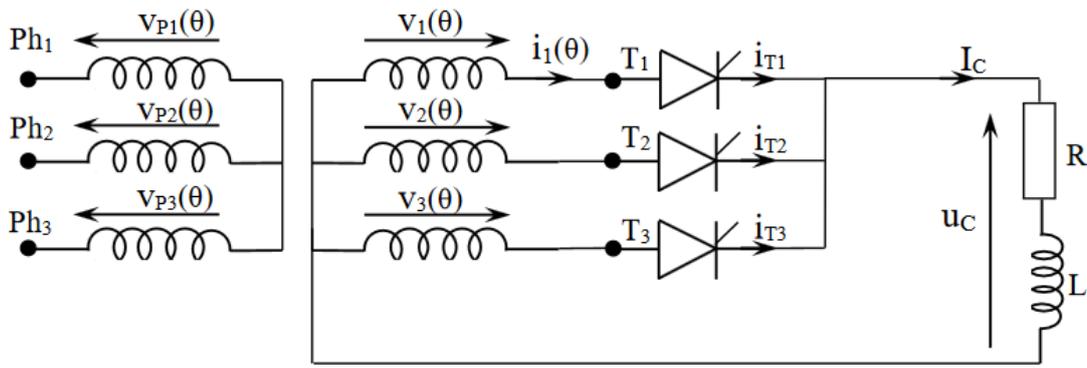
Ce type de montage correspond à trois circuits redresseurs commandés monophasés à simple alternance qui fonctionnent les uns après les autres.

Le circuit de commande du redresseur doit envoyer, sur la gâchette des thyristors des impulsions décalés de 120° .

Charge résistive



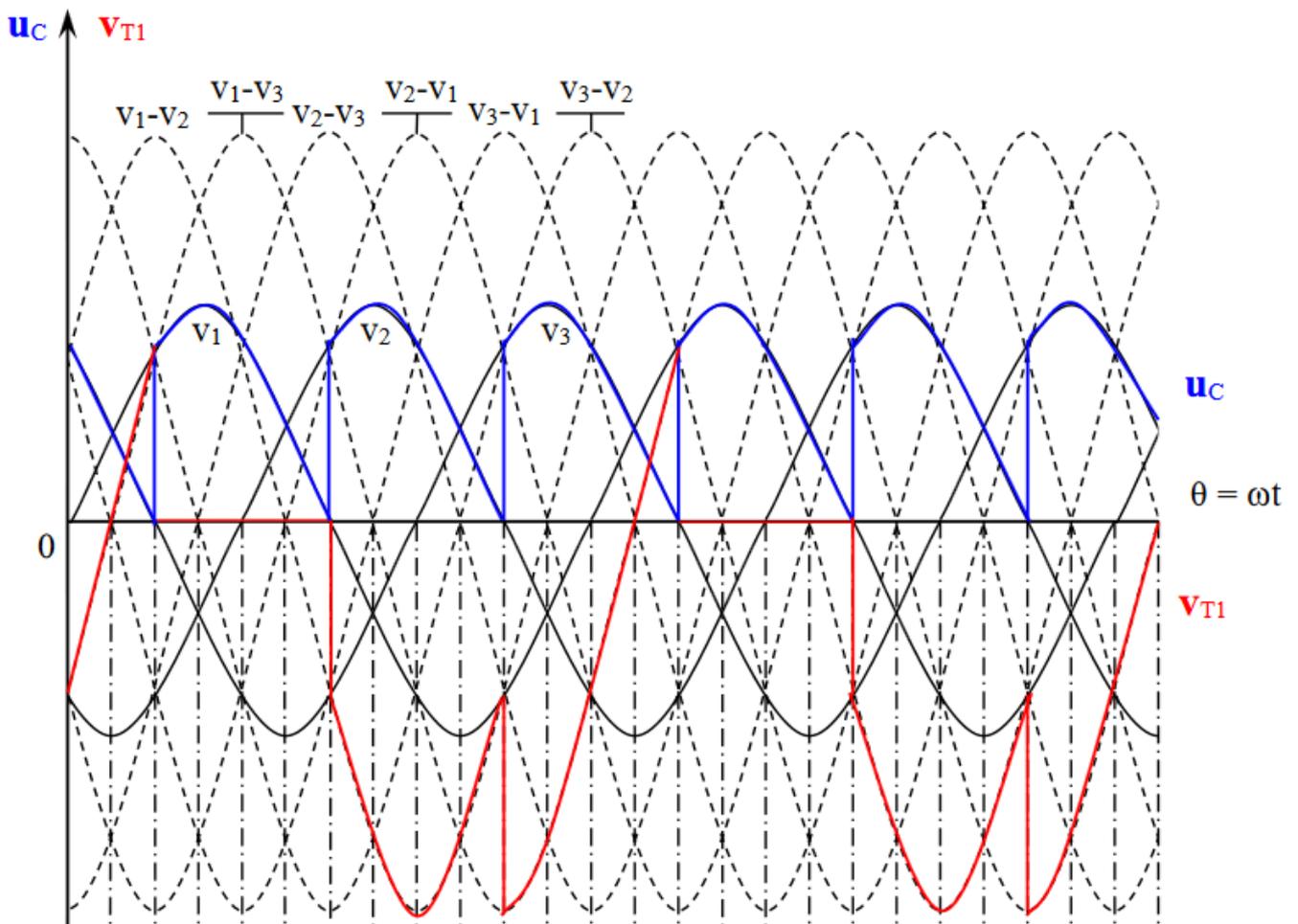
Charge inductive



$$U_{Cmoy} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\psi)$$

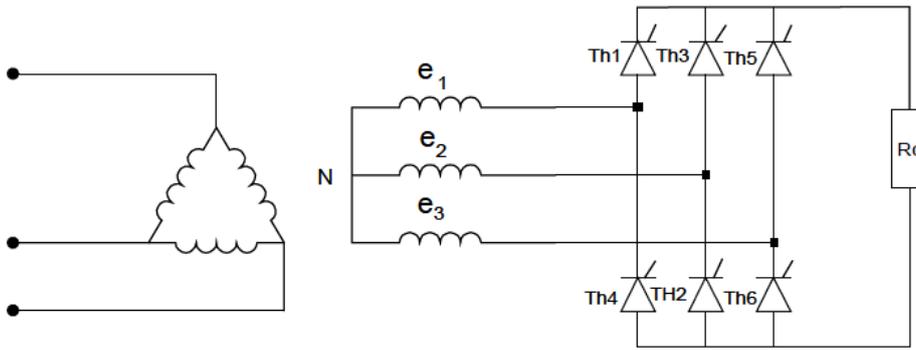
On note $U_{C0moy} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$ qui correspond à la valeur moyenne maximale obtenue quand le convertisseur n'est pas commandé.

Dans ce cas, on retient : $U_{Cmoy} = U_{C0moy} \cos(\psi)$

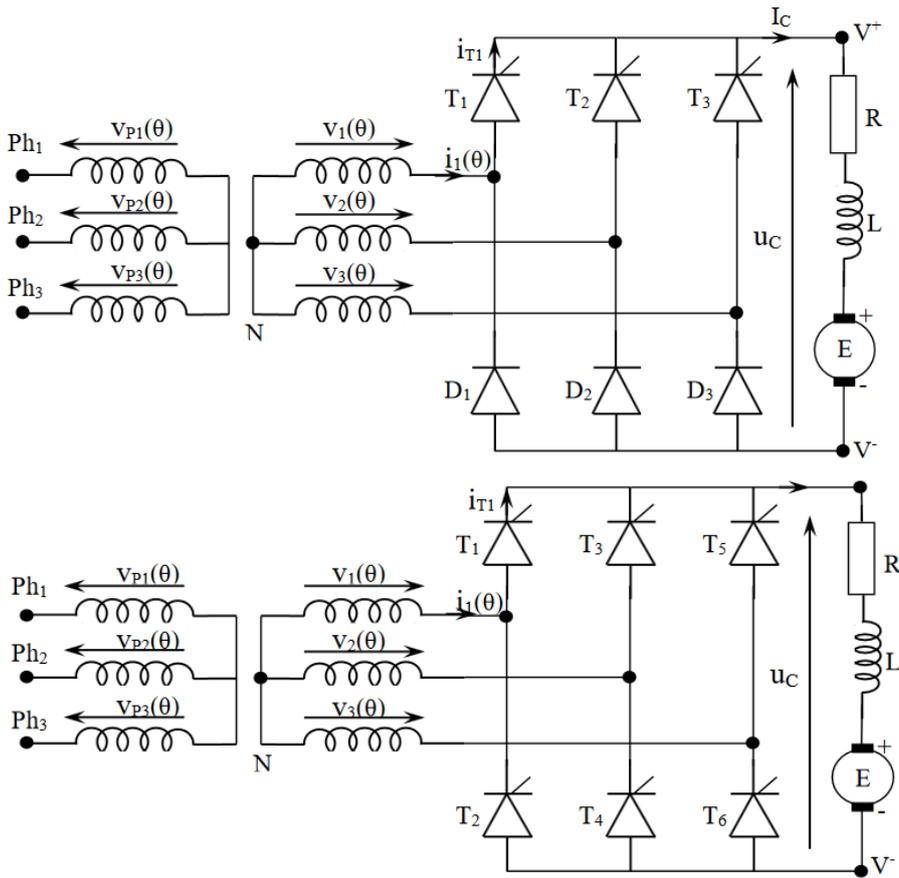


Redresseur commandé triphasé double alternance :

Charge résistive



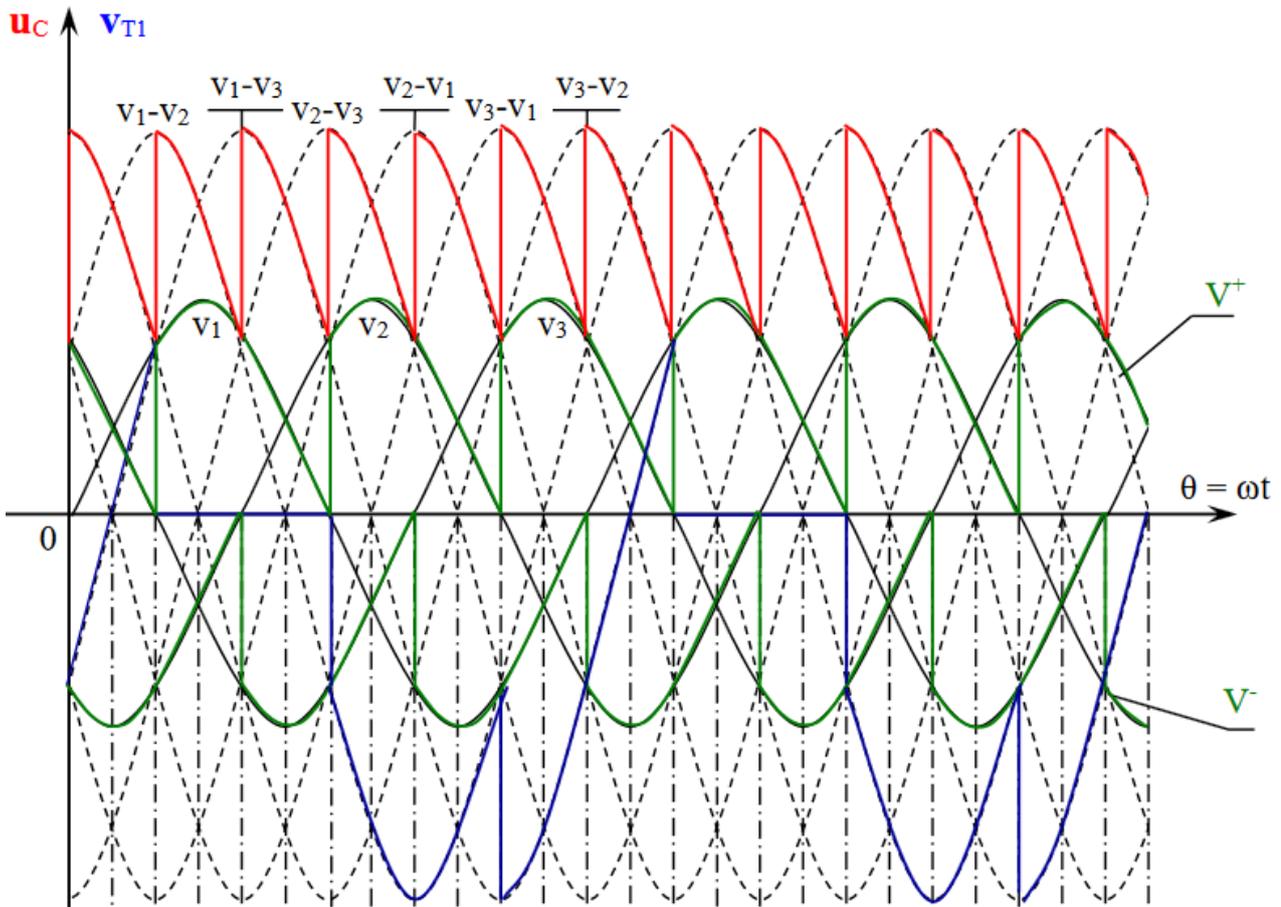
Charge inductive



$$U_{Cmoy} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 + \cos(\psi))$$

$$\text{Pour } \psi = 0 \Rightarrow U_{Cmoy} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

$$\text{Pour } \psi = \pi \Rightarrow U_{Cmoy} = 0$$

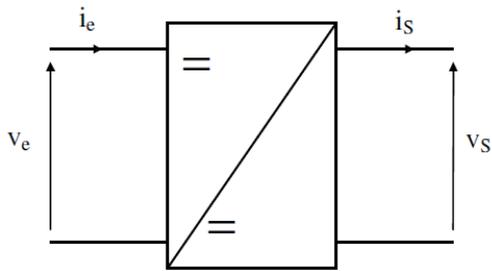


Le convertisseur continu-continu (Hacheur)

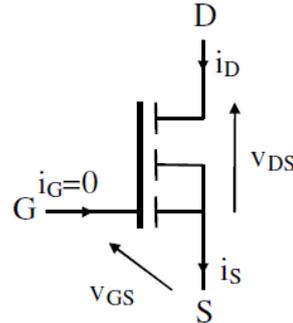
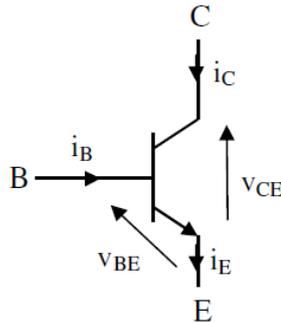
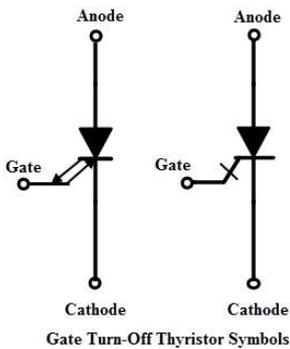
Définition :

Un hacheur est un convertisseur continu-continu (tension V_e continue - courant I_s continu), il permet d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue.

Symbole :

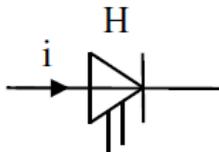


Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteurs électroniques commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les **thyristors GTO** ou les **transistors bipolaires** ou à **effet de champ à grille isolée**.



Remarque :

Les interrupteurs électroniques unidirectionnels, quelle que soit leur nature, peuvent être représentés par le symbole ci-contre :

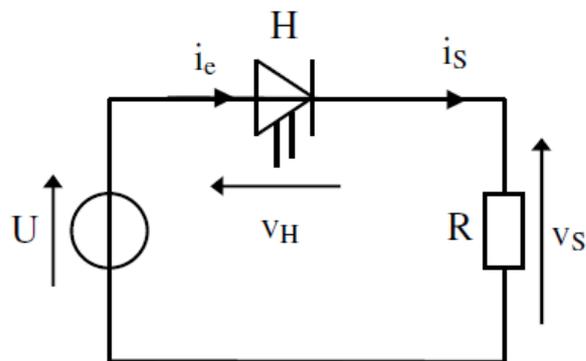


Electrodes de commande
amorçage et blocage

Hacheur série (abaisseur de tension ou dévolteur).

Charge résistive.

On considère le montage:



H : interrupteur électronique considéré parfait.

L'interrupteur électronique *H* est commandé par un signal V_c périodique de période T , de rapport cyclique $\alpha = t_1/T$ (durée de fermeture sur la période), élaboré par un circuit électronique isolé du hacheur. L'état haut de ce signal commande la fermeture de *H*, l'état bas, sa fermeture.

a) Analyse du fonctionnement.

$0 < t < t_1 = \alpha.T$: *H* est fermé.

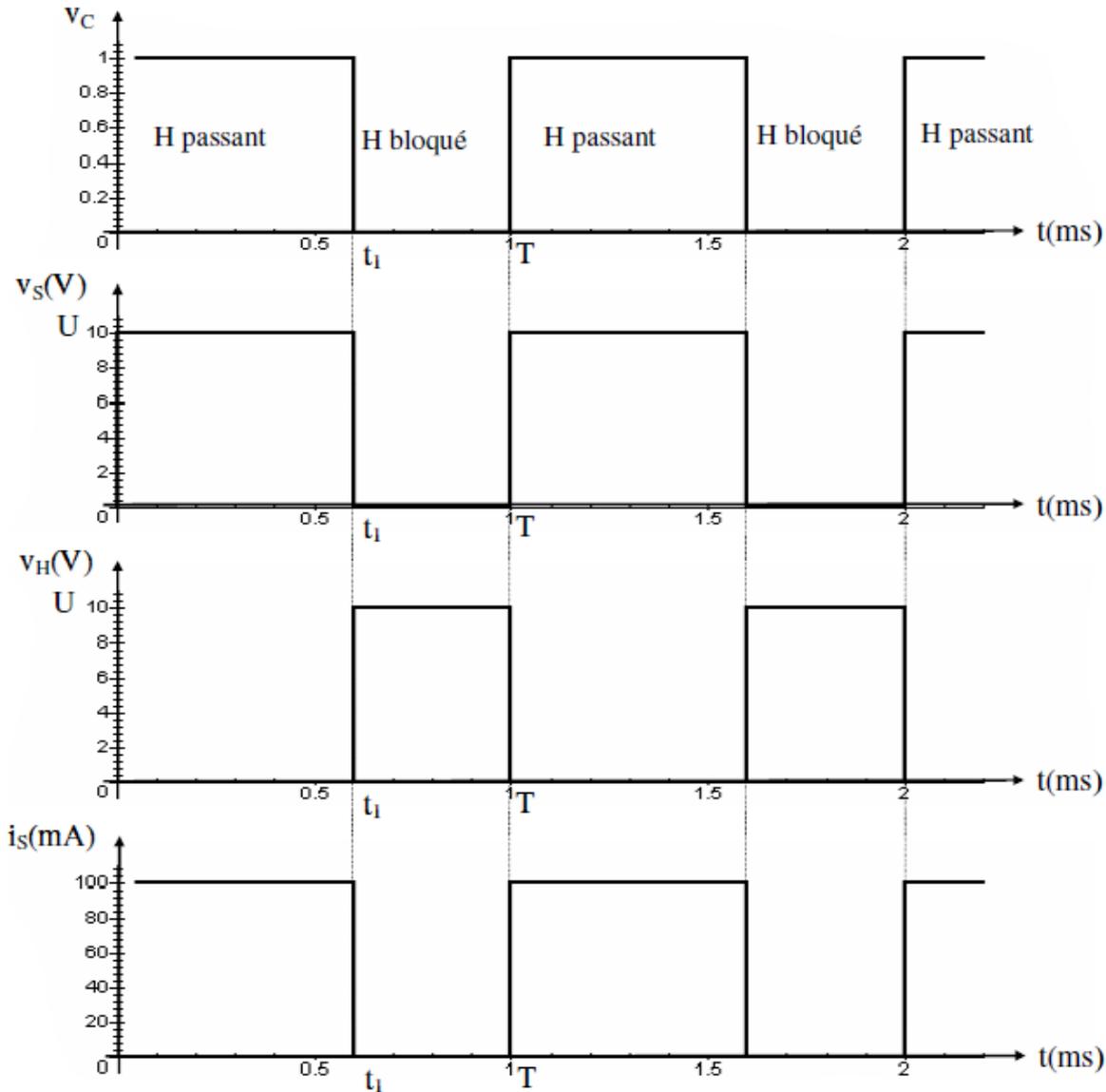
$$V_H = 0; V_s = U = R.i_s = R.i_e \quad i_s = U/R$$

⚡ $t_1 < t < T$: H est ouvert.

$$i_s = i_e = 0; \quad V_s = R.i_s = R.i_e = 0; \quad V_H = U$$

b) Chronogrammes.

$U = 10 \text{ V}; R = 100 \Omega; \alpha = 0,6 \text{ et } T = 1 \text{ ms.}$



c) Valeur moyenne de la tension V_s .

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

$$\overline{V_s} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_s(t).dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} U.dt = \frac{U}{T} \int_0^{t_1} dt = \frac{U}{T} \cdot [t]_0^{t_1}$$

$$\overline{V_s} = \frac{U}{T} \cdot [t_1 - 0] = \frac{t_1}{T} \cdot U = \alpha \cdot U$$

Remarque :

- La valeur moyenne de la tension V_s peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α donc sur la commande de H.

$$\overline{I_s} = \frac{\overline{V_s}}{R} = \frac{\alpha}{R} \cdot U$$

d) Conclusion.

Quelle que soit la nature de la charge, on aura $V_s = \alpha \cdot U < U$.

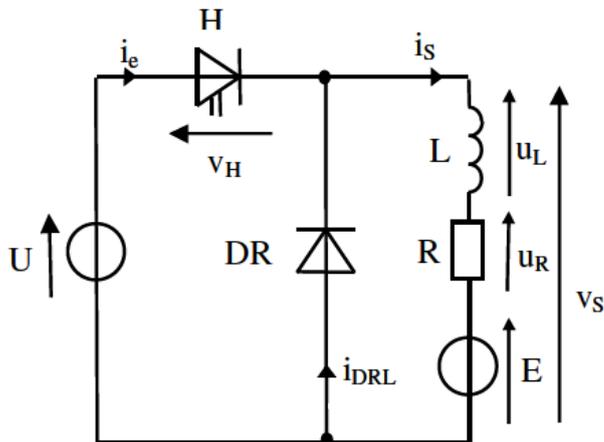
Le hacheur série est bien abaisseur de tension ou « hacheur dévolteur ».

Si la charge est résistive, le courant i_s est interrompu.

L'ajout d'une inductance L de valeur suffisante en série avec la charge permettra le lissage du courant.

Charge active : R, L, E.

On suppose H et DRL parfaits. DRL : diode de roue libre. L suffisamment grande pour avoir i_s ininterrompu.



$$V_s = \alpha \cdot U$$

E est capable de recevoir i_s (batterie ou moteur à courant continu).

H est commandé par un signal V_c .

a) Analyse du fonctionnement.

✚ $0 < t < \alpha \cdot T$: H est fermé.

- la diode de roue libre DRL est polarisée en inverse donc DRL bloquée d'où $i_{DRL} = 0$;

- $i_e = i_s$; $V_H = 0$; $U = V_s$

$$U = E + R \cdot i_s + L \frac{di}{dt}$$

✚ $\alpha \cdot T < t < T$: H est ouvert.

- la diode de roue libre DRL assure la continuité du courant dans la charge et protège H contre les surtensions donc DRL passante d'où $i_{DRL} = i_s$;

- $i_e = 0$; $V_H = U$; $U = 0$;

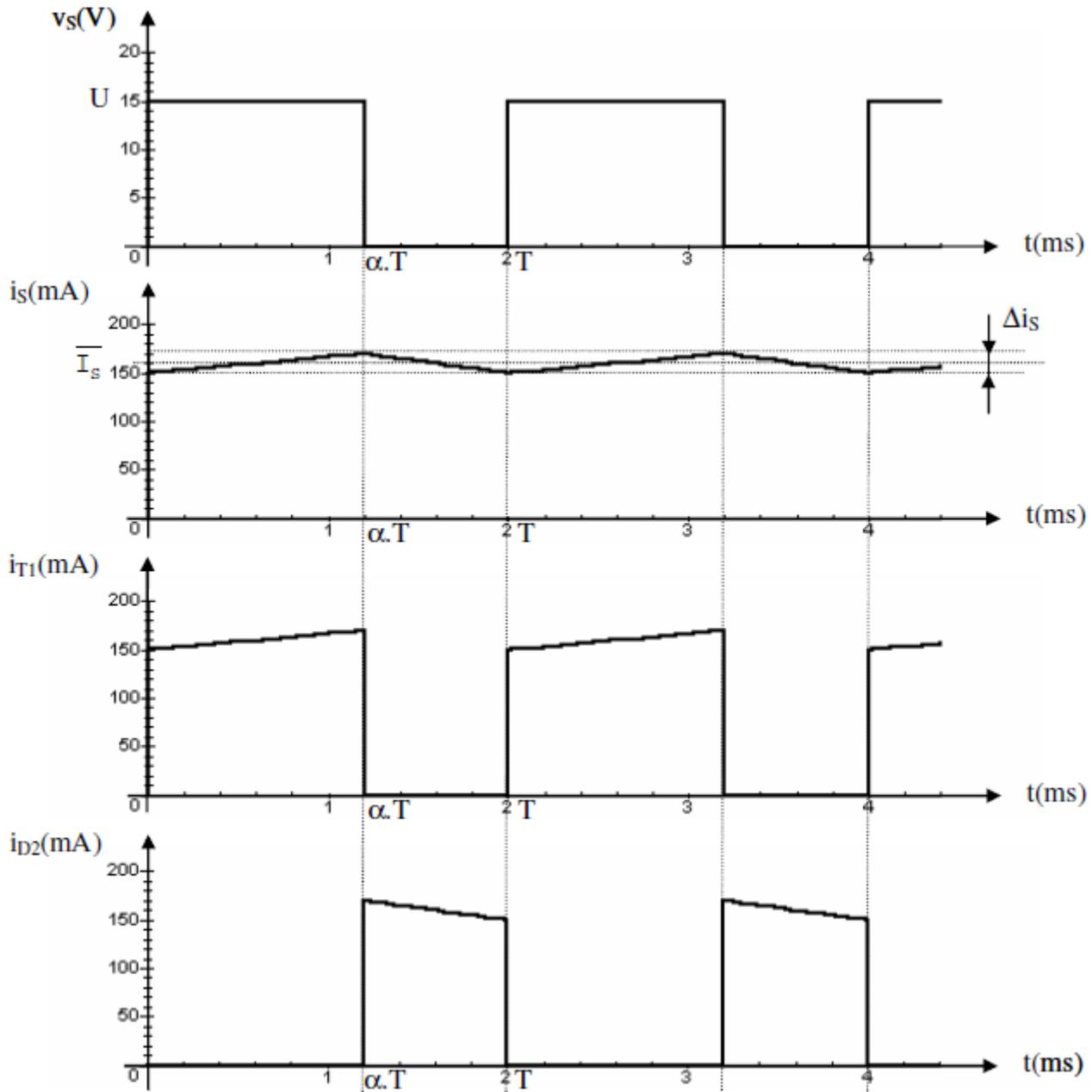
$$0 = E + R \cdot i_s + L \frac{di}{dt}$$

Si L est suffisamment grande pour avoir i_s ininterrompu donc $L \frac{di}{dt} = 0$.

b) Chronogrammes.

Pour $E = 6 \text{ V}$; $R \approx 1 + 12 \ \Omega$; $L = 0,4 \text{ H}$; $U = 15 \text{ V}$ et $f = 500 \text{ Hz}$. Pour $\alpha = 0,6$

Allure des courbes :



Remarque :

- Plus L augmente, plus Δi_s diminue ;
- Plus f augmente, plus Δi_s diminue ;

c) Valeur moyenne du courant dans la charge.

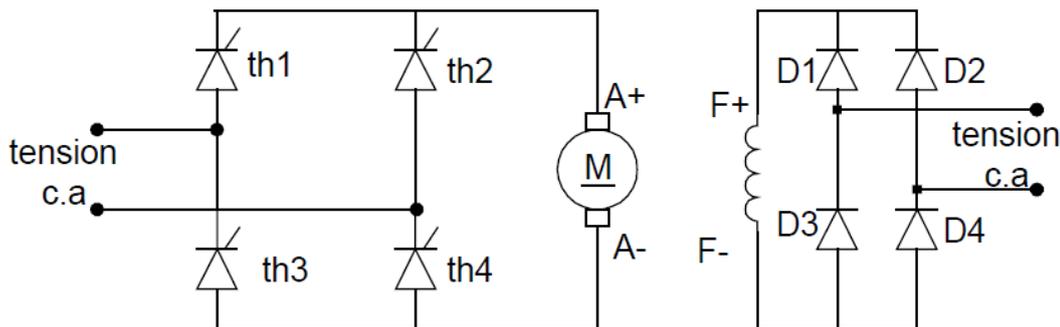
On a la relation suivante entre les valeurs moyennes :

$$\overline{V_S} = R \cdot \overline{I_S} + E + L \cdot \overline{\frac{di_S}{dt}}$$

Or $\overline{V_S} = \alpha \cdot U$ et sur une période $L \cdot \overline{\frac{di_S}{dt}} = 0$, donc : $\overline{I_S} = \frac{\alpha \cdot U - E}{R} = \frac{\hat{I}_S + \hat{I}_S}{2}$

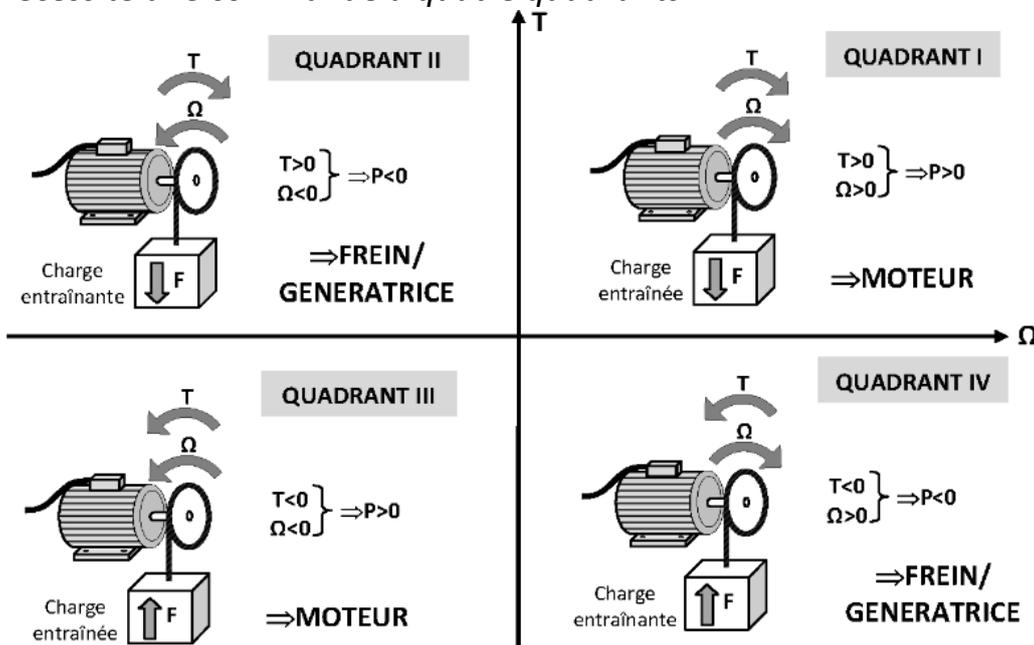
Commande de vitesse pour moteur à courant continu

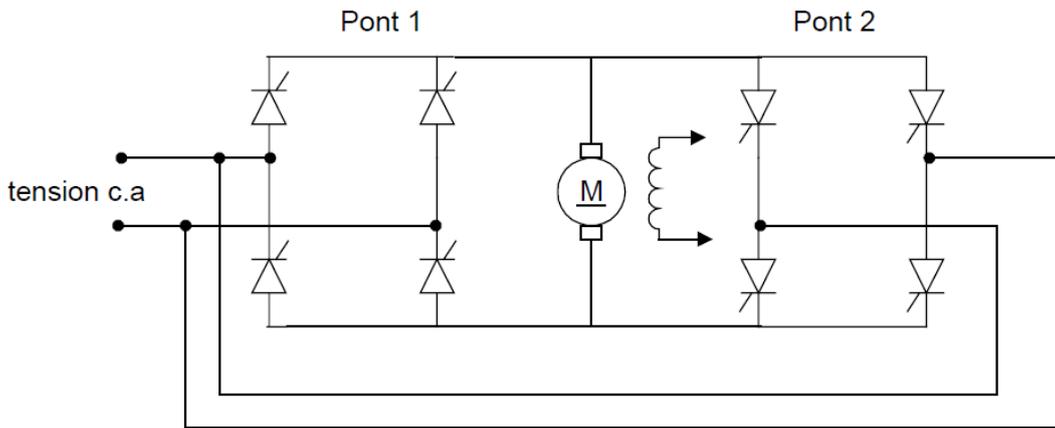
Les convertisseurs alternatif-continu sont les variateurs de vitesse les plus répandus pour les moteurs à courant continu, puisqu'ils utilisent directement la tension du réseau. Ils sont monophasés ou triphasés. Les ponts monophasés sont utilisés dans les variateurs de faible puissance (jusqu'à 10kw environ). Ils comprennent soit un pont complet de quatre thyristors ou un pont mixte à deux thyristors et deux diodes. Les ponts triphasés sont employés pour les puissances supérieures à 10kw. On peut choisir un pont complet à six thyristors ou mixte à trois thyristors et trois diodes.



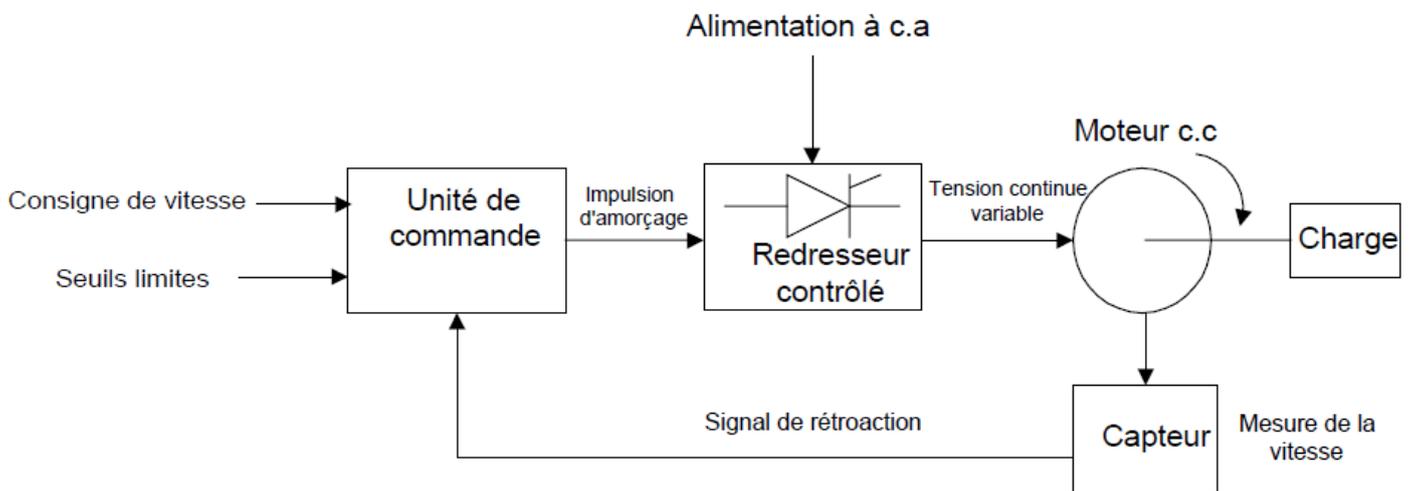
Variateur de vitesse réversible

Un variateur est réversible lorsqu'il permet un changement rapide du sens de marche. Cela nécessite une commande à quatre quadrants :





Les variateurs de vitesse permettent non seulement de contrôler la vitesse et d'inverser le sens de rotation, mais aussi d'asservir la vitesse, soit en la maintenant égale à une valeur déterminée, quel que soit le couple résistant exercé sur l'arbre. Le schéma synoptique de la Figure présente les principaux éléments d'un variateur de vitesse pour un moteur CC à excitation séparée.



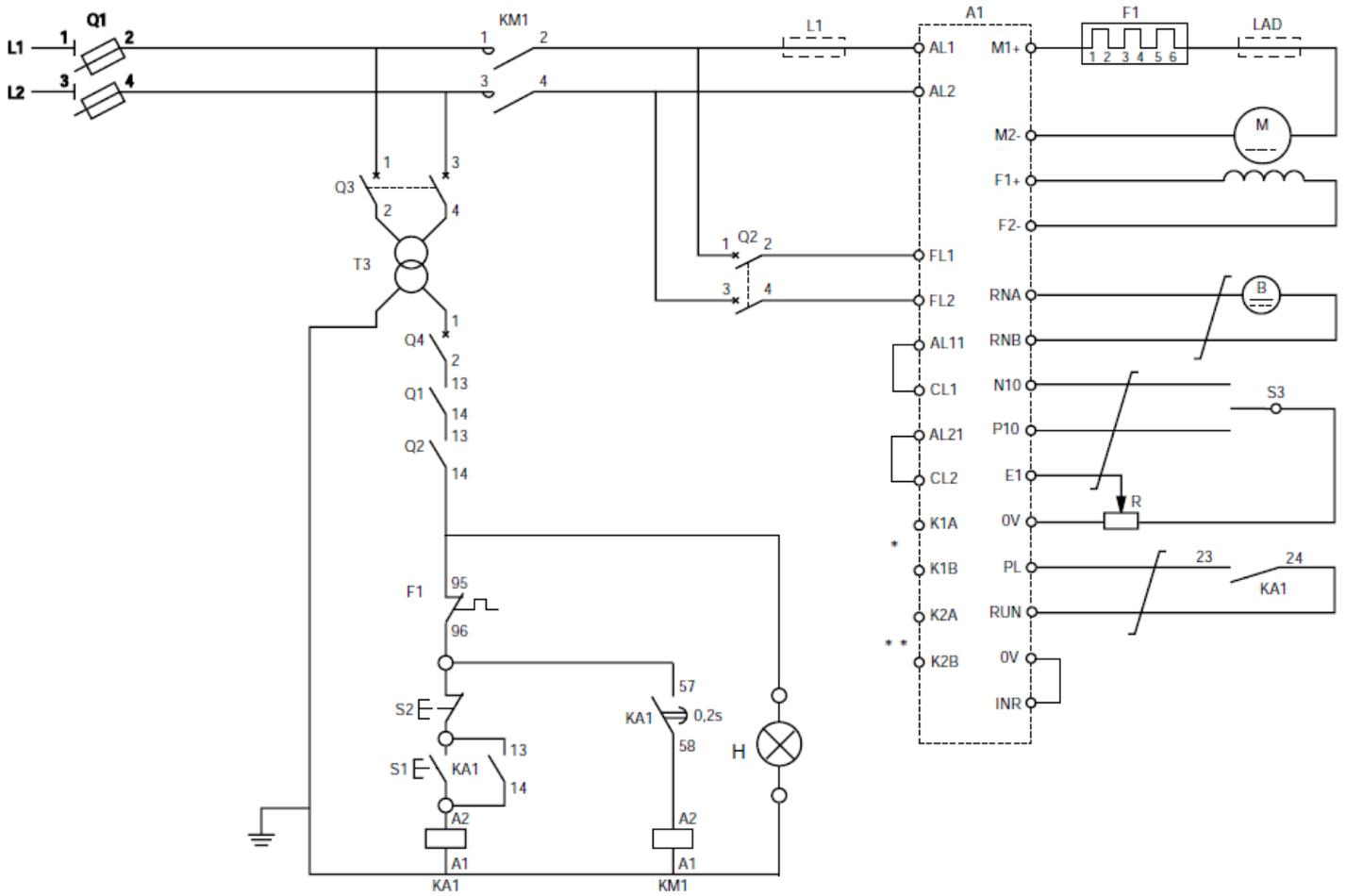
Variateur de vitesse Rectivar 4

Les variateurs de vitesse RTV-44 de Télémécanique sont destinés à la régulation de vitesse des moteurs à courant continu à excitation séparée ou à aimants permanents, à partir d'un réseau alternatif monophasé. La commande peut être réalisée à partir d'une carte analogique ou d'un microprocesseur. Ces variateurs sont réversibles, double pont et fonctionnent dans les 4 quadrants du plan couple/vitesse. Ces variateurs peuvent contrôler des moteurs ayant une capacité comprise entre 0,65KW et 1770 KW.



Alimentation		Courant		Moteur				RECTIVAR (1)					
monophasée		côté continu		Puissance maximale				Tension	Excitation		Courant	Référence	Masse
Tension	Courant	Maximal	Pointe	limitation (2)				recom-	redressement				
ligne	permanent			classique	à rabatement			mandée	double	simple			
				Cd/Cn = 1,2	Id/In = 1,5				alter-	alter-			
									nance	nance			
U eff.	I eff.	Im	Ip	In	P	Pn ⁽⁴⁾	Pc ⁽³⁾	UA	I ex.				
V	A	A	A	A	kW	kW	kW	V	V	V	A		kg
220V 50/60 Hz	8	6	9	5	0,6	0,5	1,15	150	190	100	2	RTV-44U60M	3,600
	16	12	18	10	1,25	1	2,3	150	190	100	2	RTV-44D12Q	3,600
	32	24	36	20	2,55	2	4,6	150	190	100	2	RTV-44D24Q	6,000
	58	44	66	36	4,6	3,7	8,4	150	190	100	2	RTV-44D44Q	6,000
240V 50/60 Hz	8	6	9	5	0,65	0,55	1,2	160	205	110	2	RTV-44U60M	3,600
	16	12	18	10	1,35	1,1	2,45	160	205	110	2	RTV-44D12Q	3,600
	32	24	36	20	2,7	2,2	4,9	160	205	110	2	RTV-44D24Q	6,000
	58	44	66	36	4,9	4	9	160	205	110	2	RTV-44D44Q	6,000
380V 50/60 Hz	16	12	18	10	2,2	1,8	4	260	330	170	2	RTV-44D12Q	3,600
	32	24	36	20	4,4	3,5	8	260	330	170	2	RTV-44D24Q	6,000
	58	44	66	36	8	6,4	14,6	260	330	170	2	RTV-44D44Q	3,600

Schéma développé conseillé :



Borniers de raccordement :

Pont puissance 24/44A

Appellation	Fonction
AL1 AL2	} Alimentation réseau du pont puissance jusqu'à 415V 50/60Hz
\perp	
M2 - M1 +	} Induit moteur

Carte interface puissance 24/44A

AL11 AL21	} Reprise des tensions réseau AL1-AL2
CL1 CL2	
FL1 FL2	} Alimentation monophasée du pont d'excitation
F1 + F2 -	

Carte puissance 6/12A

M2 - M1 +	} Induit moteur
AL1 AL2	
AL11 AL21	} Reprise des tensions réseau AL1-AL2
CL1 CL2	
FL1 FL2	} Alimentation monophasée du pont d'excitation
F1 + F2 -	

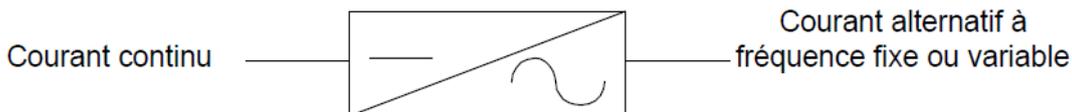
Carte contrôle

RNA RNB	} Entrée capteur de vitesse
AT (1) 0V	
E1	Entrée consigne de vitesse 0 à $\pm 10V$ (23 k Ω)
SP	Signal vitesse [0 ± 8 V pour la vitesse maximale réglée (3 mA maxi)]
IRT	Augmentation du temps de rampe par tension extérieure (page 15)
SAO	Sortie de la boucle vitesse. Isortie $\leq 3mA$
CAI	Entrée de la boucle courant (68 k Ω)
ECL	Entrée pour limitation du courant 0/-10 V
DCC	Signal courant. I sortie ≤ 3 mA (1,5V pour I réglée, valeur moyenne)
RUN	Validation du variateur (allumeur, boucles, rampe)
PL	Alimentation des entrées logiques (24 V), RUN, option1 et option 2
INR	Validation de la rampe par 0V
ISI	Suppression de l'intégration de l'amplificateur de vitesse par 0V
P10 0V	Alimentation + 10V $\pm 0,2V$ du potentiomètre de référence (5 mA)
N10	
P15	Alimentation +15 V $\pm 0,6$ V. I maxi = 50 mA
N15	Alimentation -15 V $\pm 0,6$ V. I maxi = 50 mA
K1A (2), K1B validé par cavalier :	Contact libre de potentiel du relais K1 (verrouillage) fermé quand le variateur est K2A (2), K2B Contact libre de potentiel du relais K2 à fonction configurable

Le convertisseur continu - alternatif (l'onduleur)

Définition :

Un onduleur autonome est un convertisseur statique continu-alternatif ; il permet d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée.



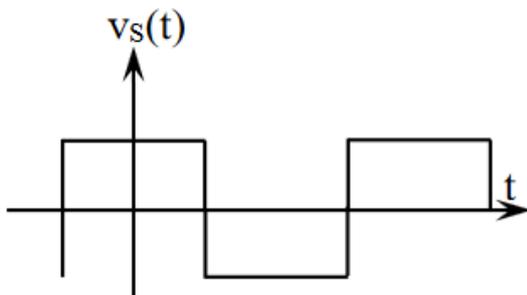
Classification des onduleurs autonomes:

Les onduleurs autonomes se classent en deux groupes :

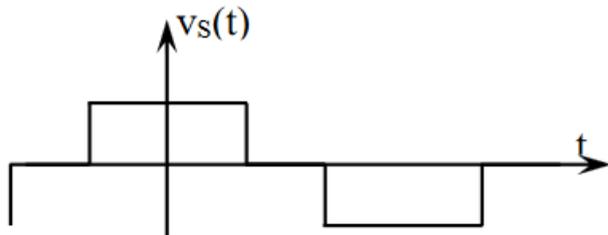
- Onduleurs à fréquence fixe : ceux-ci sont utilisés comme alimentation de sécurité dans les centres hospitaliers, les centrales téléphoniques, les ordinateurs, etc. Ces onduleurs sont alimentés à partir d'une batterie d'accumulateurs.
- Onduleurs à fréquence variable : ceux-ci sont alimentés en courant continu à partir du réseau alternatif par l'intermédiaire d'un redresseur. Ils fournissent des tensions de fréquence et d'amplitude variables utilisées pour contrôler la vitesse de moteurs à courant alternatif.

Les onduleurs autonomes se classent aussi d'après la forme d'onde de leur tension de sortie :

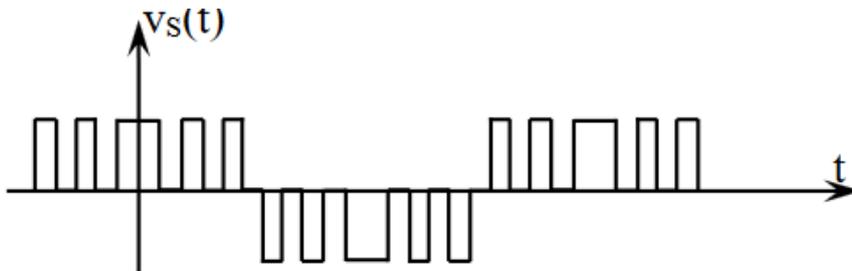
- Onduleur avec commande symétrique (2 états : tension en créneaux $+U$, $-U$) : La valeur efficace de la tension de sortie n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée.



- Onduleurs avec commande décalée (3 états : $+U$, 0 , $-U$) : La valeur efficace de la tension de sortie est réglable en agissant sur la durée du créneau.

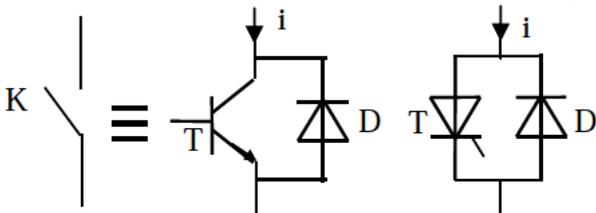


- Onduleurs à modulation de largeur d'impulsions (MLI) L'onde de sortie est avec train d'impulsions de largeur et d'espacement variables. On peut même obtenir une onde de sortie voisine de l'onde sinusoïdale.



Interrupteurs électroniques

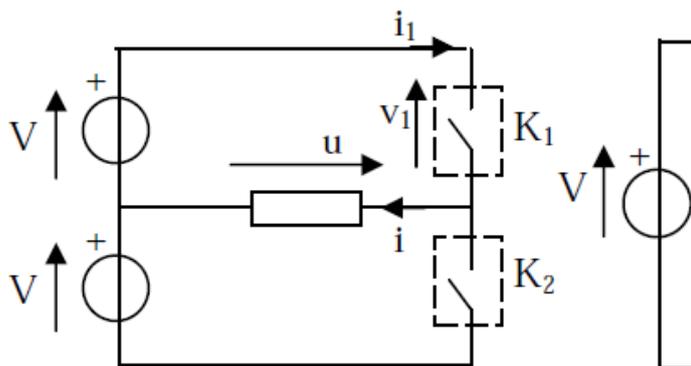
L'interrupteur peut être à transistor (ou thyristor si grande puissance), plus une diode de récupération (indispensable si la charge est inductive).



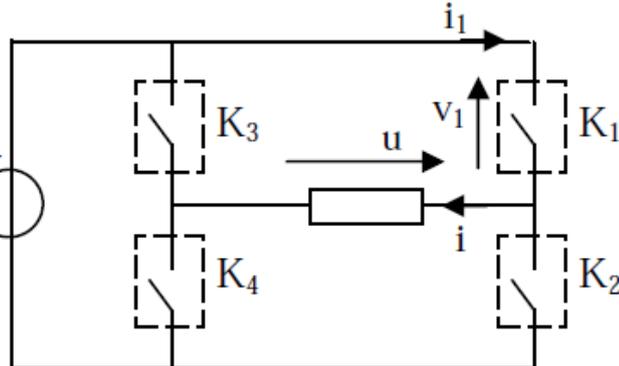
- **K** ouvert \leftrightarrow **T** bloqué et **D** en inverse
- **K** fermé \leftrightarrow **T** commandé :
 - si $i > 0$: **T** conduit
 - si $i < 0$: **D** conduit

Fonctionnement d'un onduleur à commande symétrique :

Onduleur en demi-pont à deux interrupteurs



Onduleur en pont à quatre interrupteurs



Montage en demi-pont

$0 < t < T/2$

$K1$ est fermé $\Rightarrow v1 = 0$

$K2$ est ouvert $\Rightarrow i2 = 0$

$\Rightarrow u = V$

$i = i1 = V/R$

$v2 = V + u = 2.V$

$T/2 < t < T$

$K1$ est ouvert $\Rightarrow i1 = 0$

$K2$ est fermé $\Rightarrow v2 = 0$

$\Rightarrow u = -V$

$i = i2 = -V/R$

Montage en pont

$0 < t < T/2$

$K1$ et $K4$ sont fermés $\Rightarrow v1 = v4 = 0$

$K2$ et $K3$ sont ouverts $\Rightarrow i2 = i3 = 0$

$\Rightarrow u = V$

$i = i1 = V/R$

$v2 = v3 = u = V$

$T/2 < t < T$

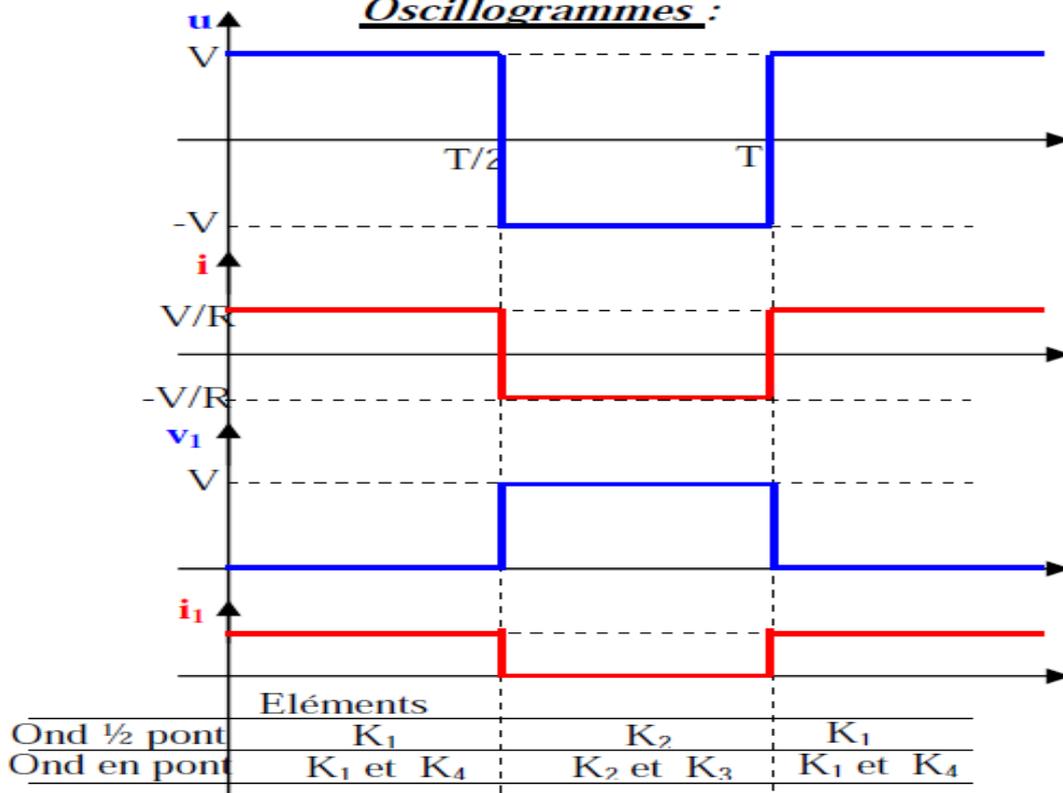
$K1$ et $K4$ sont ouverts $\Rightarrow i1 = i4 = 0$

$K2$ et $K3$ sont fermés $\Rightarrow v2 = v3 = 0$

$\Rightarrow u = -V$

$i = i2 = -V/R$

Oscillogrammes :



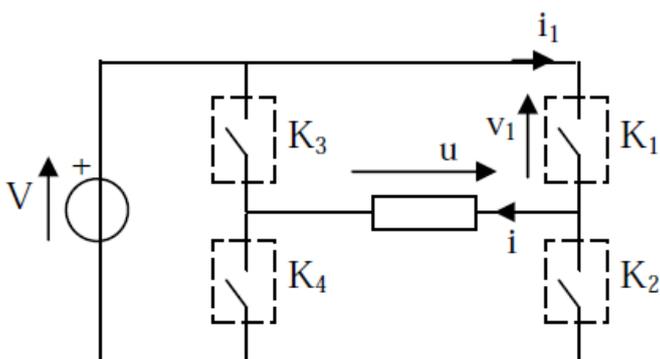
Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = 0$.

Valeur efficace de la tension u : $U = V$.

Tension maximale supportée par les interrupteurs : V (en pont) et $2V$ (en demi-pont).

Fonctionnement d'un onduleur à commande décalée :



Analyse du fonctionnement :

La fermeture des interrupteurs d'un bras est décalée de l'angle α

$0 < t < \alpha$

K_1 et K_3 sont fermés $\Rightarrow u = 0$

$\alpha < t < T/2$

K_1 et K_4 sont fermés $\Rightarrow u = V$

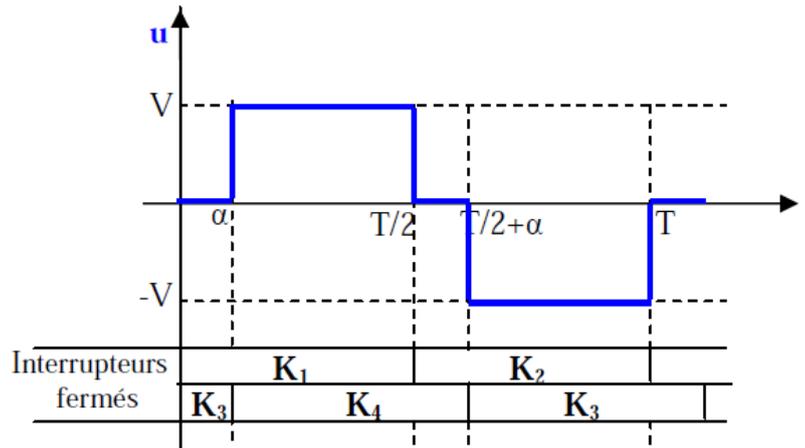
$T/2 < t < T/2 + \alpha$

K_2 et K_4 sont fermés $\Rightarrow u = 0$

$T/2 + \alpha < t < T$

K_2 et K_3 sont fermés $\Rightarrow u = -V$

Oscillogrammes :



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension $u : \langle u \rangle = 0$.

Valeur efficace de la tension $u : U = V \sqrt{1 - \frac{2t_0}{T}}$ ou $U = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$.

Tension maximale supportée par les interrupteurs est V .

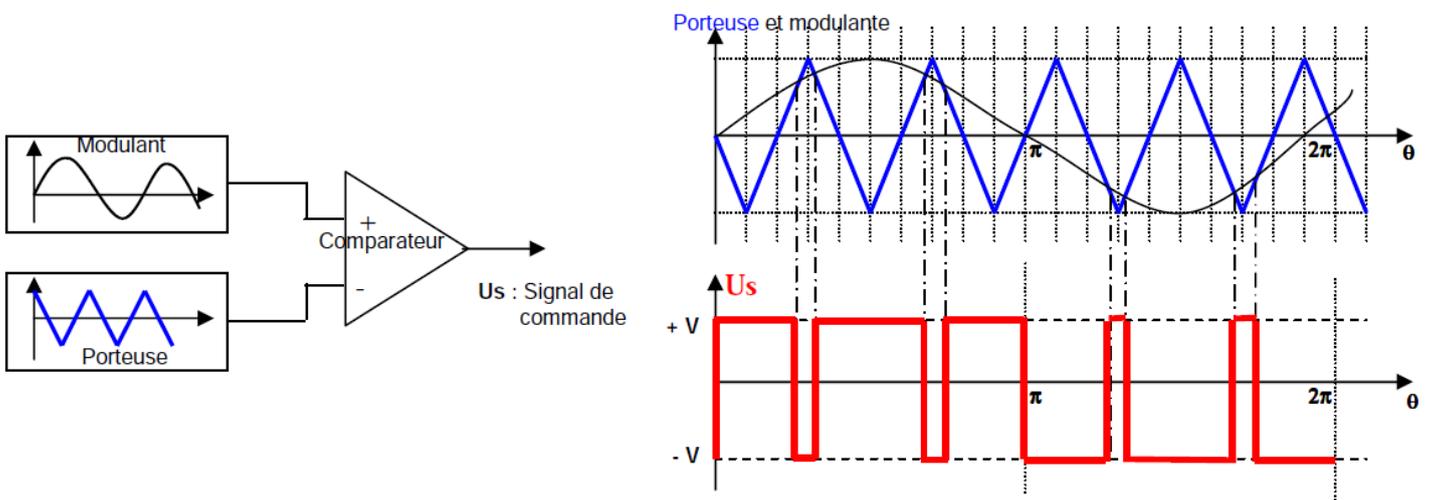
Fonctionnement d'un onduleur à Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion MLI :

Ici, il y a modulation par un signal modulant sinusoïdal. Pour obtenir la tension de commande des transistors, on compare un signal triangulaire appelé porteuse au signal modulant sinusoïdal de fréquence beaucoup plus faible.

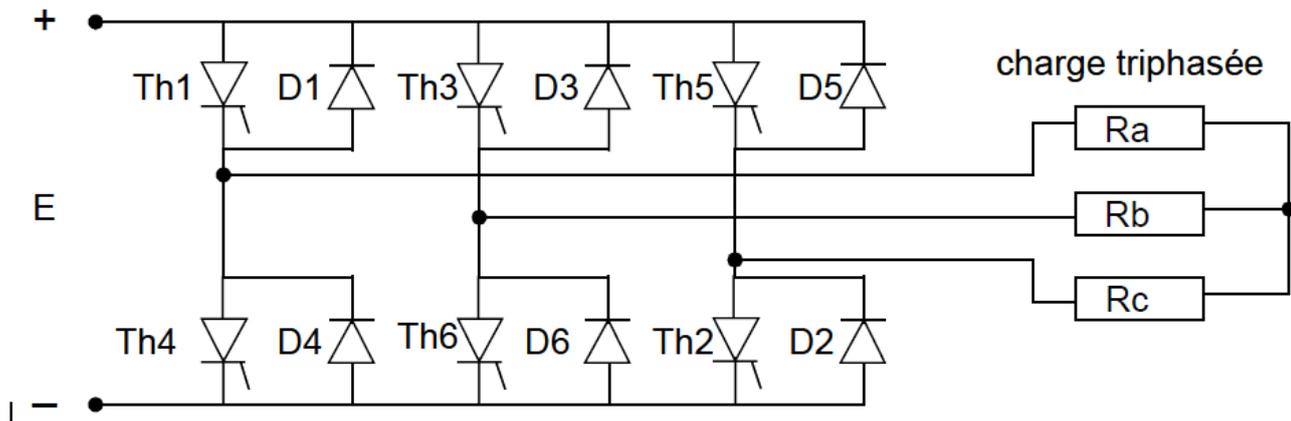
La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tension (négative et positive).

Principe de commande MLI du bras K1 – K2 :

L'onde modulante, est comparée à l'onde porteuse et à la sortie du comparateur on obtient la tension de commande U_s .

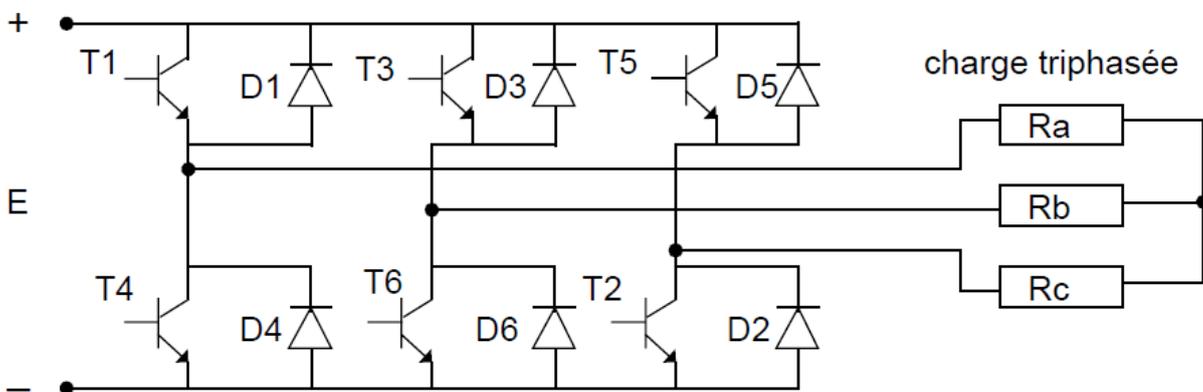


Onduleurs triphasés autonomes à fréquence fixe :

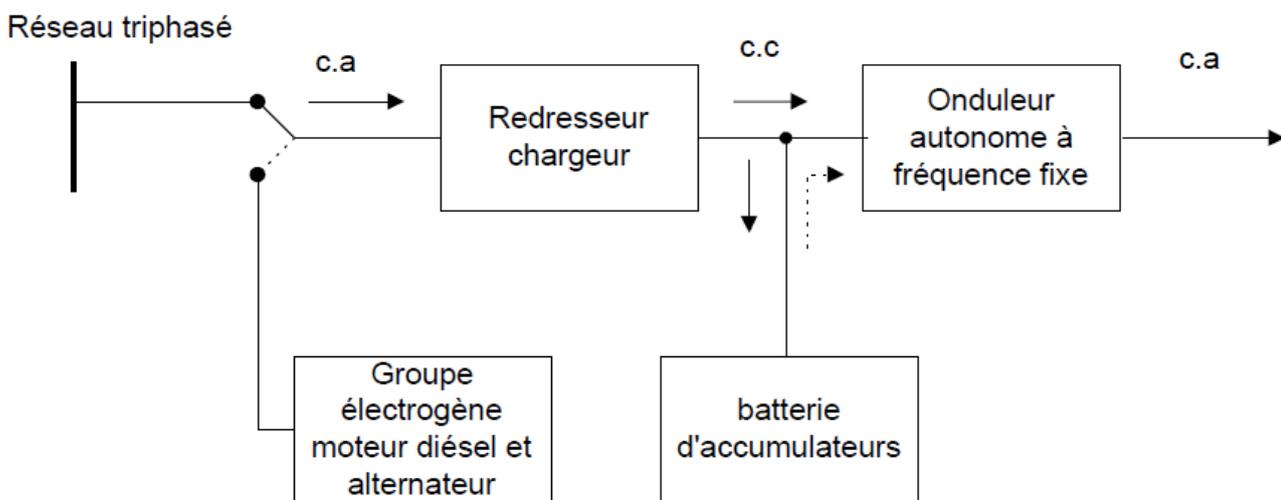


ONDULEUR AUTOMOME TRIPHASÉ AVEC THYRISTORS

Pour des puissances plus petites, on peut remplacer les six thyristors par des transistors



Les onduleurs autonomes à fréquence fixe sont surtout utilisés dans les alimentations de sécurité qui se substituent automatiquement au réseau alternatif en cas de panne de courant. Ces alimentations de secours sont appelées UPS (Uninterruptible Power Supplies).



L'onduleur triphasé à fréquence variable

La méthode la plus utilisée pour varier la vitesse d'un moteur triphasé est sans aucun doute celle utilisée par l'onduleur autonome à fréquence variable.

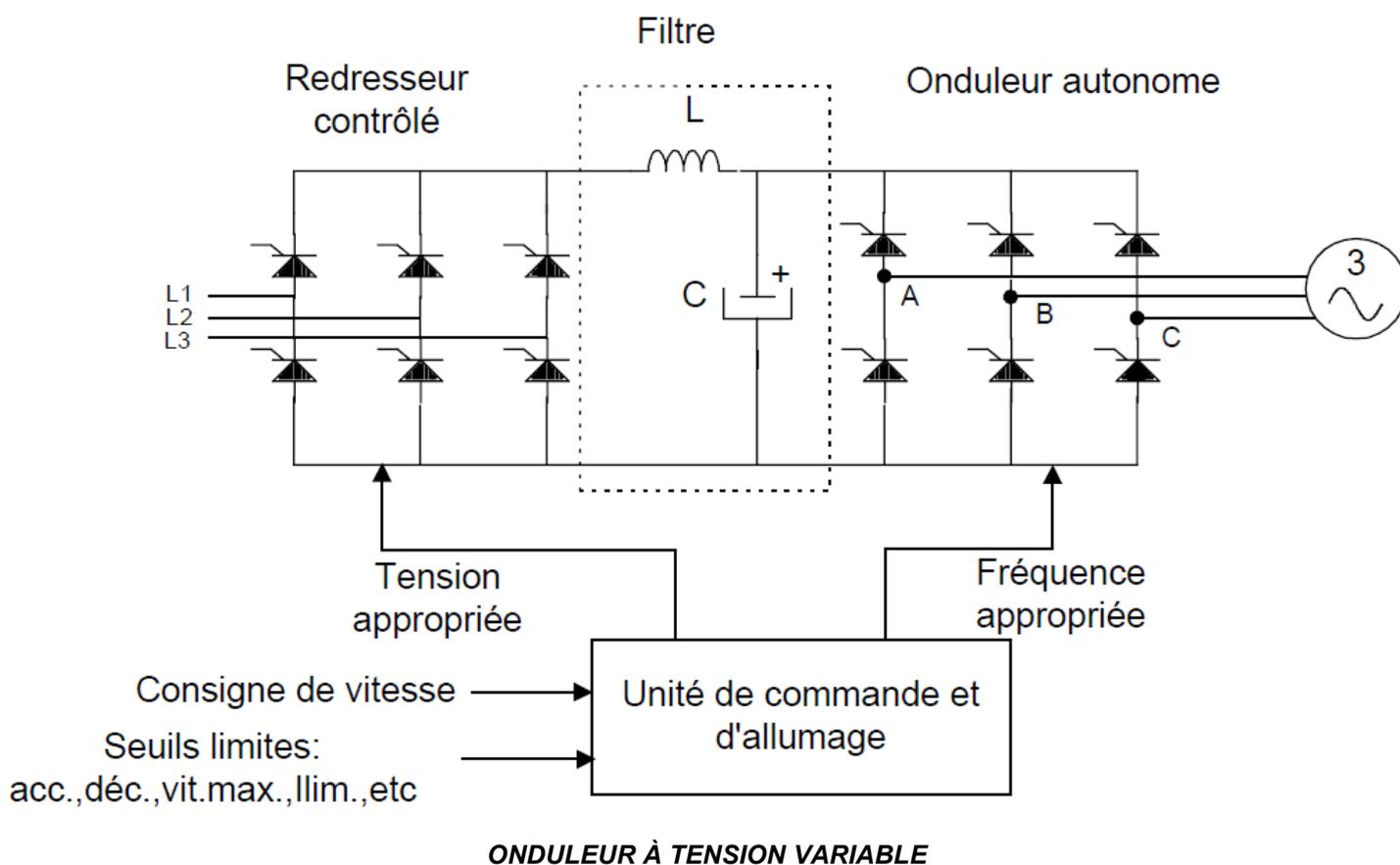
Dans ce type de variateurs, différents montages sont utilisés, et chacun d'eux présente des avantages et des inconvénients selon le domaine d'application.

On retrouve :

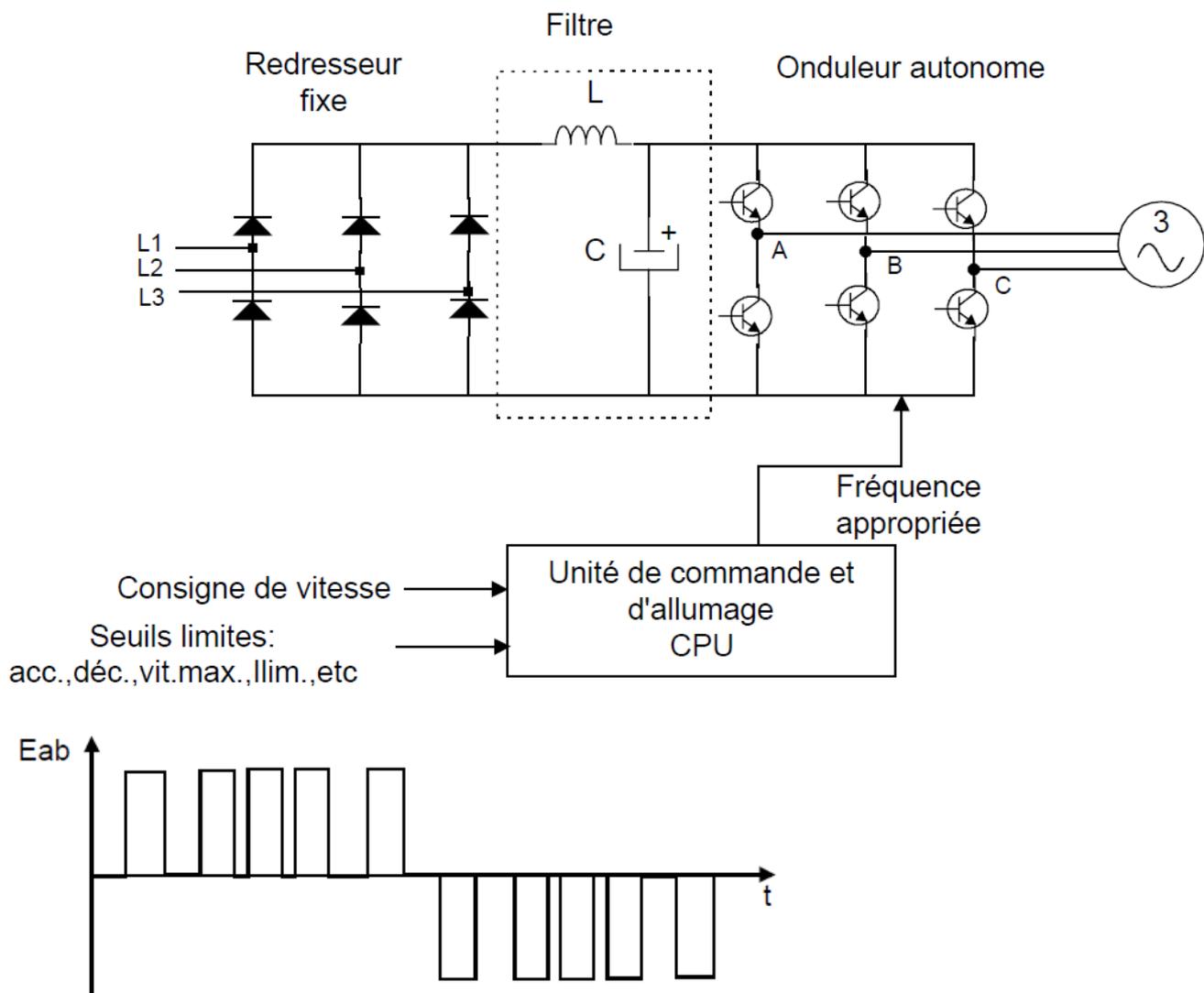
- L'onduleur autonome à source de tension;
- L'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

A- L'onduleur autonome à source de tension

Ce variateur de vitesse est constitué d'un redresseur triphasé à thyristors complètement commandés, suivi d'un filtre de tension (inductance et condensateur) et d'un onduleur autonome à thyristors ou à transistors.



B- L'onduleur autonome à modulation de largeur d'impulsion (MLI)



Variateur de vitesse ALTIVAR

Le variateur de vitesse ALTIVAR de Télémécanique est un convertisseur de fréquence destiné à l'alimentation des moteurs asynchrones triphasés à cage, dans une gamme de puissance de 500w à 100Kw selon le modèle.

Ils fonctionnent suivant le principe MLI.

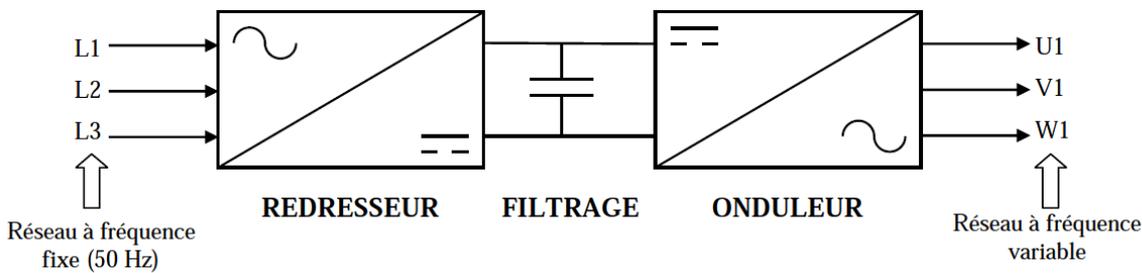
L'ALTIVAR est muni d'un microprocesseur 16 bits qui est l'organe de contrôle, La programmation des paramètres de réglage et de configuration est réalisée à partir d'un logiciel qui chargée dans le variateur à l'aide d'une interface RS232.

Les paramètres de réglage standard sont :

- l'accélération ;
- la décélération ;
- la vitesse minimum ;
- la vitesse maximum ;

- le rapport tension/fréquence ;
- la protection thermique ($I. Th$).

Structure interne



Les variateurs de vitesse industriels comportent principalement comme on vient de le voir sur le schéma précédent :

- Un redresseur (monophasé ou triphasé) permettant d'élaborer une source de tension continue.
- Un circuit de filtrage (permettant l'obtention d'un signal pratiquement continu).
- Un onduleur triphasé autonome qui recrée à partir de la tension continue fixe un réseau de tension alternative triphasé de fréquence et de tension variable.

Choix du variateur

Le choix d'un variateur se fait essentiellement en fonction :

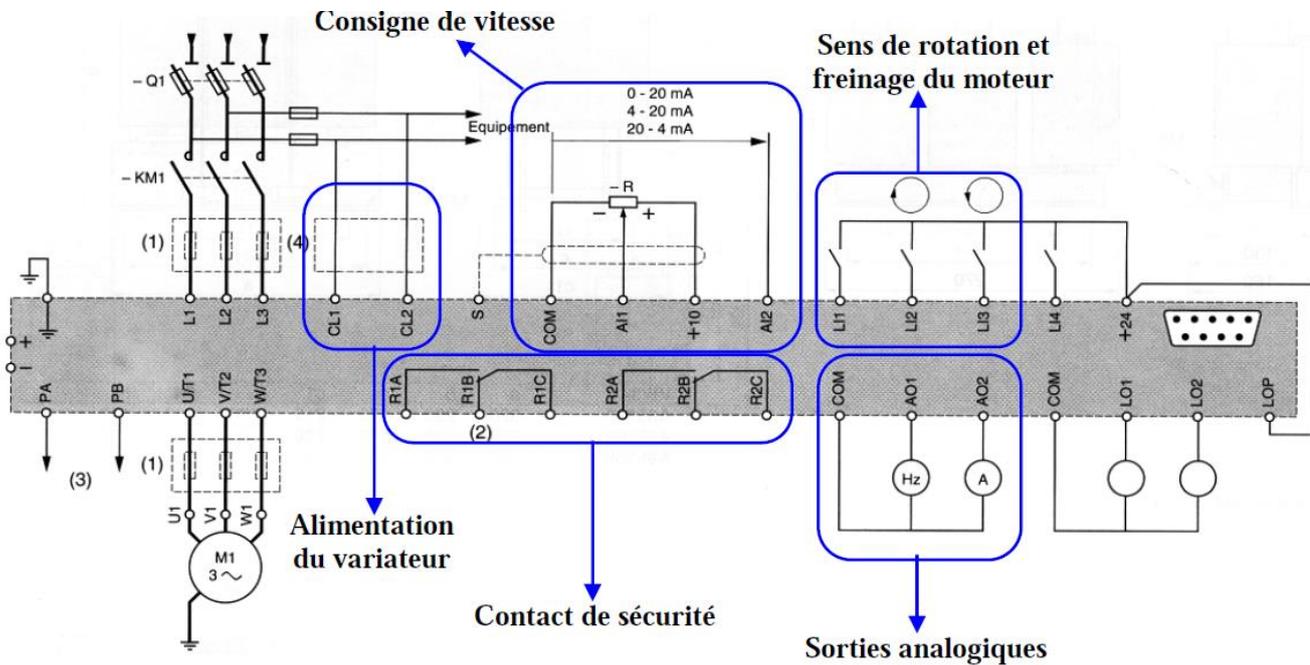
- Du réseau d'alimentation : tension d'alimentation, système monophasé ou triphasé
- De la puissance utile du moteur à commander

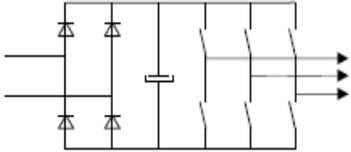
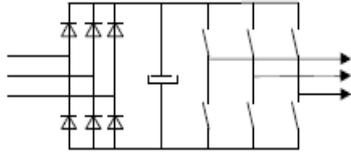
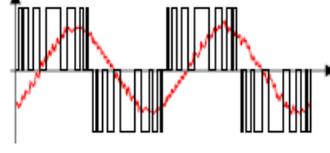
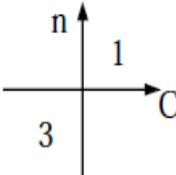
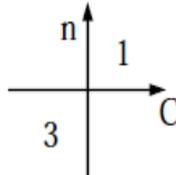
CHOIX DU VARIATEUR

Réseau		Moteur			ALTIVAR 18			Référence	Masse
Tension d'alimentation U1...U2	Courant de ligne (1)		Puissance indiquée sur plaque		Courant de sortie permanent	Courant Transitoire maxi (2)	Puissance dissipée à la charge nominale		
	à U1	à U2	kW	HP				A	A
200 ... 240 50/60 Hz Monophasé	4,4	3,9	0,37	0,5	2,1	3,1	23	ATV-18U09M2	1,5
	7,6	6,8	0,75	1	3,6	5,4	39	ATV-18U18M2	1,5
	13,9	12,4	1,5	2	6,8	10,2	60	ATV-18U29M2	2,1
	19,4	17,4	2,2	3	9,6	14,4	78	ATV-18U41M2	2,8
200 ... 230 50/60 Hz Triphasé	16,2	14,9	3	-	12,3	18,5	104	ATV-18U54M2	3,3
	20,4	18,8	4	5	16,4	24,6	141	ATV-18U72M2	3,3
	28,7	26,5	5,5	7,5	22	33	200	ATV-18U90M2	7,8
	38,4	35,3	7,5	10	28	42	264	ATV-18D12M2	7,8
380 ... 460 50/60 Hz Triphasé	2,9	2,7	0,75	1	2,1	3,2	24	ATV-18U18N4	2
	5,1	4,8	1,5	2	3,7	5,6	34	ATV-18U29N4	2,1
	6,8	6,3	2,2	3	5,3	8	49	ATV-18U41N4	3,1
	9,8	8,4	3	-	7,1	10,7	69	ATV-18U54N4	3,3
	12,5	10,9	4	5	9,2	13,8	94	ATV-18U72N4	3,3
	16,9	15,3	5,5	7,5	11,8	17,7	135	ATV-18U90N4	8
	21,5	19,4	7,5	10	16	24	175	ATV-18D12N4	8
	31,8	28,7	11	15	22	33	261	ATV-18D16N4	12
	42,9	38,6	15	20	29,3	44	342	ATV-18D23N4	12

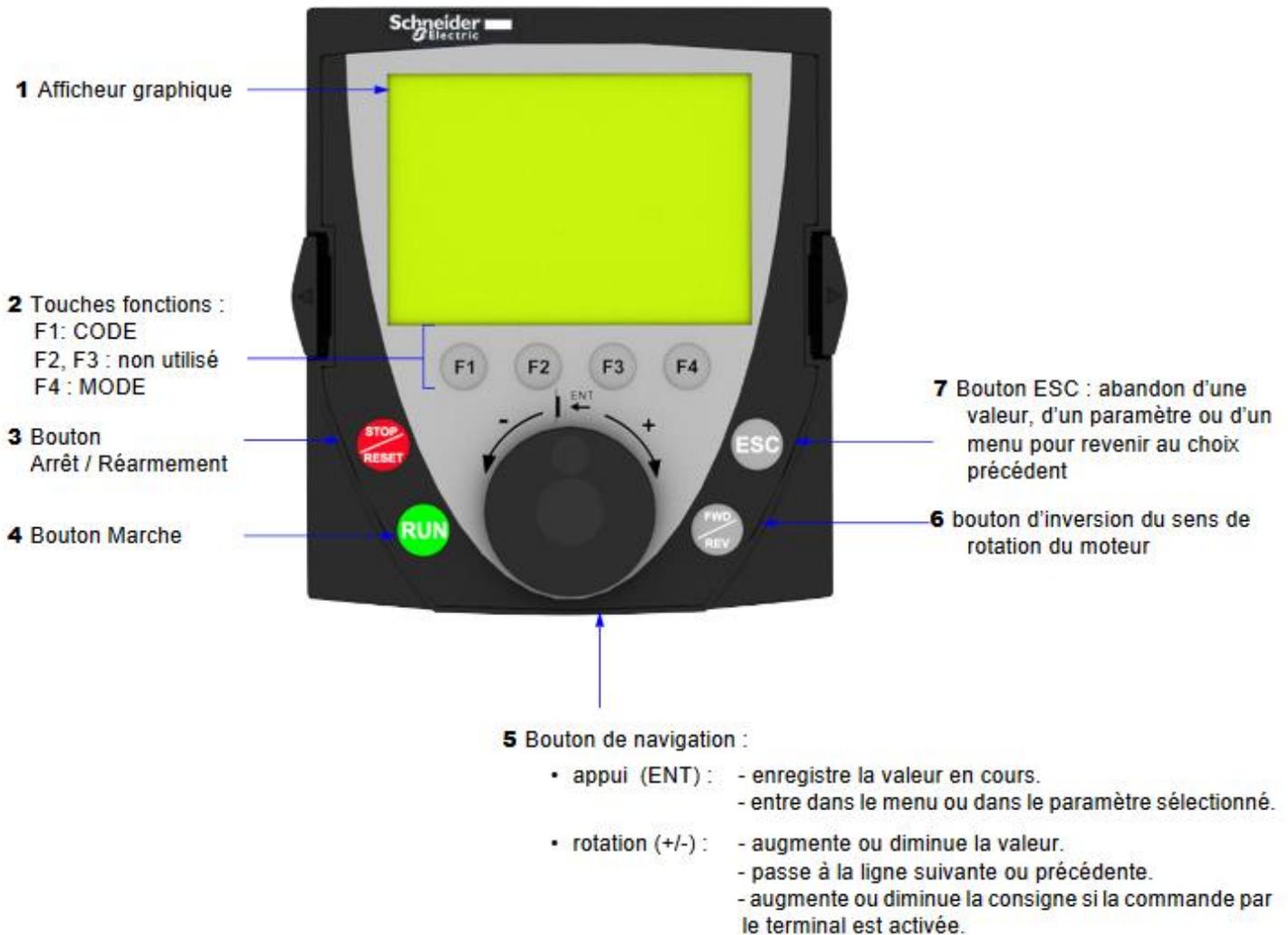
(1) Valeur typique sans inductance additionnelle.

(2) Pendant 60 secondes.



Référence	ATV 66 M2	ATV 66 N4
<i>Alimentation du redresseur</i>	Monophasé	Triphasé
<i>Réseau d'alimentation</i>	220-240 V 50 : 60 Hz	380-415 V 50 : 60 Hz
<i>Pont de puissance</i>		
<i>Forme de la tension et du courant</i>		
<i>Gamme de fréquence</i>	1 à 67 Hz	1 à 110 Hz
<i>Sens de marche</i>	2	2
<i>Quadrant de fonctionnement</i>		
<i>Freinage d'arrêt</i>	////	Par injection de courant continu
<i>Freinage de ralentissement</i>	Rhéostatique avec module option	Rhéostatique avec module option
<i>Tension moteur</i>	220-240 V	380-415 V
<i>Gamme de puissance</i>	0.75 à 37 kW	0.75 à 250 kW





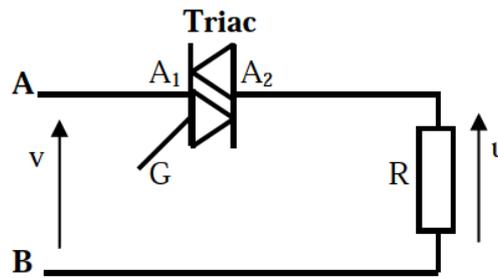
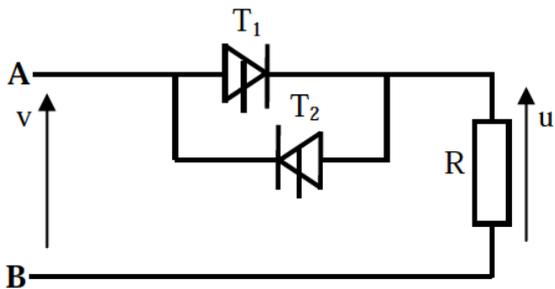
Le convertisseur alternatif- alternatif (Gradateur)

Ce dispositif permet de convertir une tension alternative à fréquence fixe en une tension alternative à tension variable (gradateur) ou à fréquence variable (cycloconvertisseur).



En utilisant deux thyristors montés en parallèle inverse, nous pouvons contrôler la puissance dans une charge résistive de zéro à sa pleine puissance. Pour obtenir des angles d'amorçage égaux, il faut appliquer à chaque thyristor des signaux de gâchette isolés et déphasés de 180°. Le signal de commande peut varier de 0° à 180°.

Montage :



Analyse du fonctionnement : Commande par la phase

Analyse du fonctionnement :

$0 < \theta < \pi : v > 0 \rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé.

A $\theta = \alpha$ T_1 est amorcé, le courant i circule la maille :

$$A \rightarrow T_1 \rightarrow R \rightarrow B$$

On en déduit que :

$$u = v$$

$$i = u / R = v / R$$

T_1 se bloque naturellement en $\theta = \pi$ ($i = 0$).

$\pi < \theta < 2\pi : v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

Le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé.

A $\theta = \pi + \alpha$ T_2 est amorcé, le courant i circule la maille :

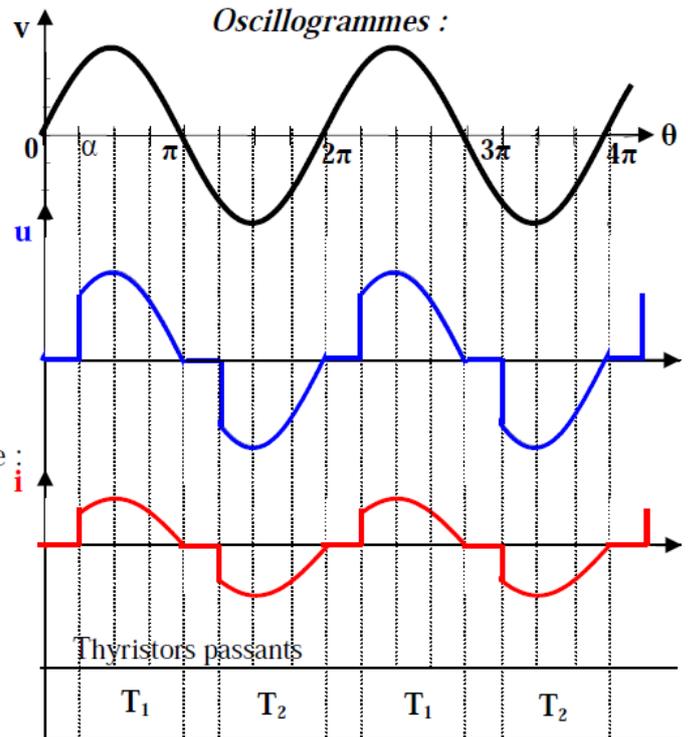
$$B \rightarrow R \rightarrow T_2 \rightarrow A$$

On en déduit que :

$$u = v$$

$$i = u / R = v / R$$

T_2 se bloque naturellement en $\theta = 2\pi$ ($i = 0$).



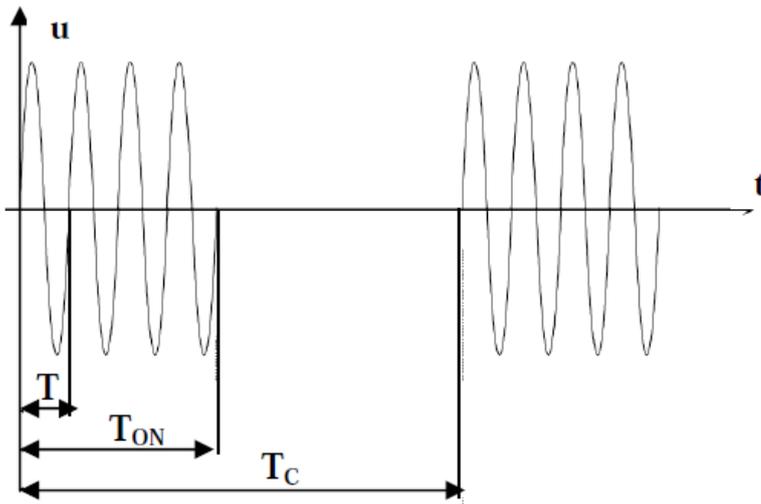
Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = 0$ (tension alternative)
- Valeur efficace de la tension u : $U = V \cdot \sqrt{1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi}$
- Tension maximale supportée par les éléments : $V_{Tmax} = V\sqrt{2}$

$$E_{\text{eff}} = \left(\frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \right) \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Analyse du fonctionnement : Commande par train d'ondes

Dans ce type de gradateur, le signal envoyé sur l'entrée de commande du gradateur est de type TOR.



Avec :

T : période du réseau

T_{ON} : Durée du train d'ondes,
(Temps de conduction)

T_C : Temps de cycle du
gradateur

Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = 0$ (tension alternative)
- Valeur efficace de la tension u : $U = V \cdot \sqrt{\alpha}$ avec $\alpha = T_{ON}/T_C$
- Tension maximale supportée par les éléments : $V_{Tmax} = V\sqrt{2}$

Commandes

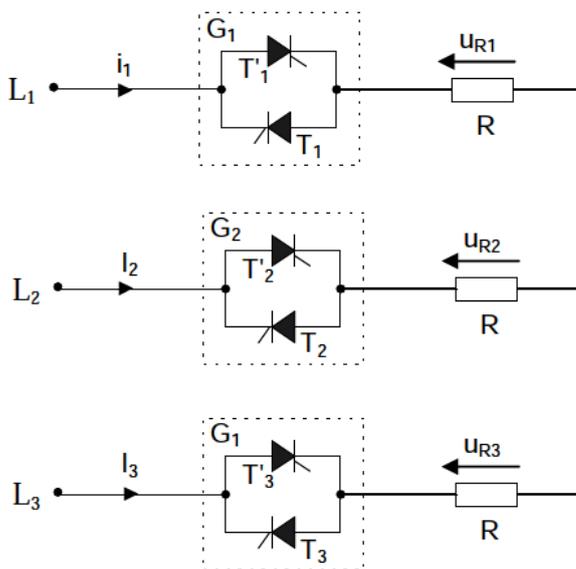
Les deux thyristors doivent être commandés avec le même angle de retard α pour obtenir une tension u alternative (valeur moyenne nulle).

Deux modes de commande de l'énergie transférée à la source sont possibles :

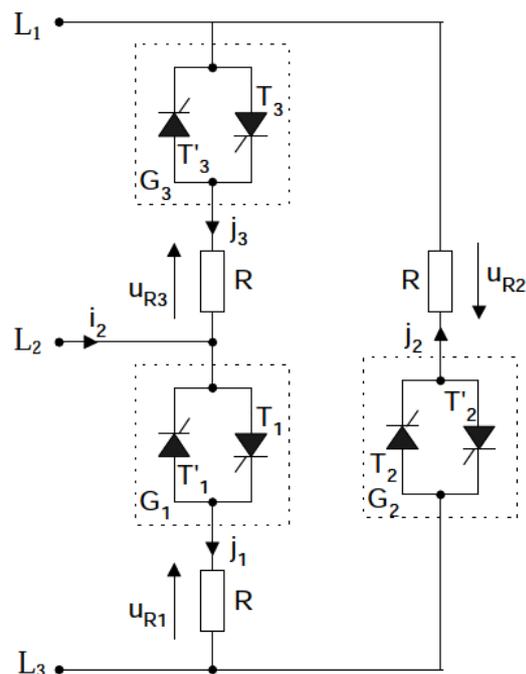
- **Commande par la phase** : la variation de la valeur efficace U est obtenue en agissant sur l'angle de retard α .
- **commande par train d'ondes** : les deux thyristors sont commandés plein onde pendant le temps T_{ON} (période de conduction) puis sont bloqués jusqu'à la fin de la période de modulation. La variation de T_{ON}/T_C permet de commander la tension efficace U .

Gradateur triphase

Montage étoile



Montage triangle



Exemple d'application :

Un gradateur monophasé est alimenté par une source de 220 volts à 50hz.

Calculez la tension efficace et la puissance débitée dans une charge de 10Ω , pour un angle de 90° .

Solution :

$$E_{\text{eff}} = \left(\frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \right) \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$$E_{\text{eff}} = 220V \sqrt{1 - \frac{90}{180} + \frac{\sin 2 \times 90}{360}} = 220V \times 0,5 = 110 V$$

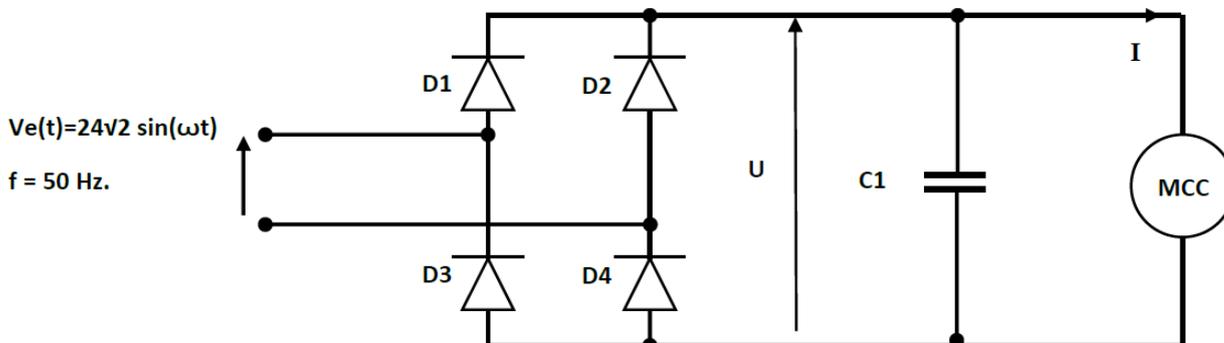
$$P = \frac{E^2}{R} = \frac{110V^2}{10} = 1210W$$

Exercices

Convertisseur AC-DC (Redressement)

Exercice 1 :

Soit le circuit d'alimentation du moteur à courant continu



Les diodes sont supposées parfaites (tensions de seuils nulles).

- 1- Calculer la période T de la tension $V_e(t)$.
- 2- Quelle est la valeur efficace V_e de la tension $V_e(t)$.
- 3- Calculer la valeur maximale $V_e \text{ max}$ de $V_e(t)$.
- 4- Calculer la valeur moyenne $\langle U \rangle$ de la tension U .
- 5- Donner le rôle du composant $C1$.

- 6- Donner le modèle électrique équivalent de l'induit de MCC à aimant permanent
- 7- Calculer la puissance moyenne électrique absorbée P_a par le moteur, sachant que le courant I absorbé par le moteur est égal à 730 mA.

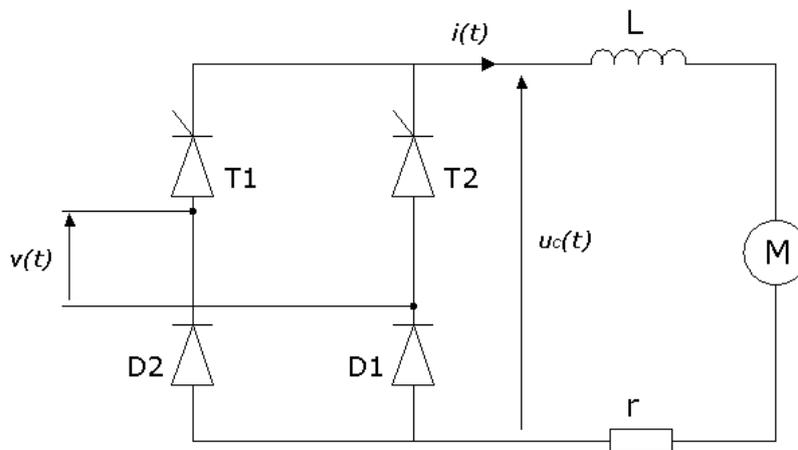
Exercice 2 :

Un pont de redressement mixte est soumis à une tension sinusoïdale $v(t)$ de fréquence 50 Hz et de valeur efficace $V = 230V$.

Les diodes et thyristors sont supposés parfaits.

Les thyristors sont amorcés avec un temps de retard $t_0 = 2 ms$

La charge du pont est constituée par l'association de l'induit du moteur à courant continu en série avec une inductance L .



1. Quel est le rôle de la bobine d'inductance L ?
2. Reprendre la figure 1 et représenter $V(t)$ et $U_c(t)$ en concordance de temps
3. Déterminer l'angle de retard à l'amorçage des thyristors
4. Calculer la tension U_c moy

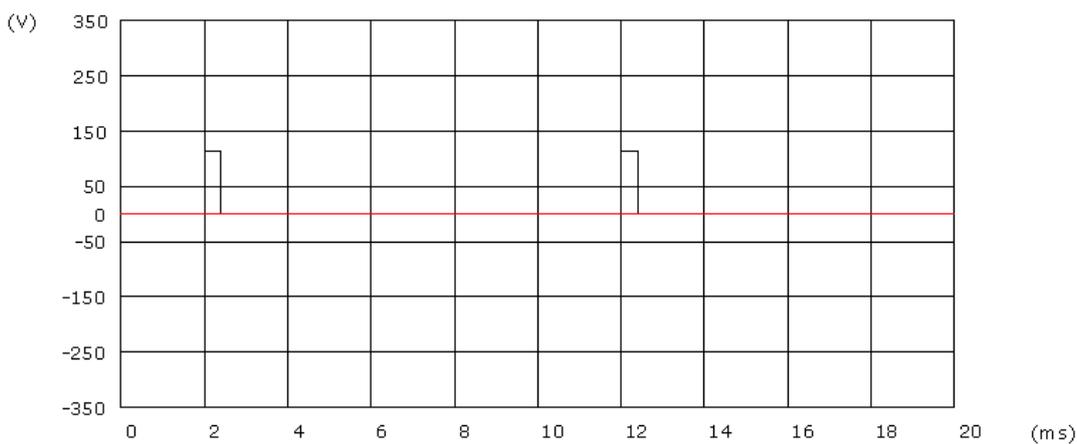


Figure 1

Exercice 3 :

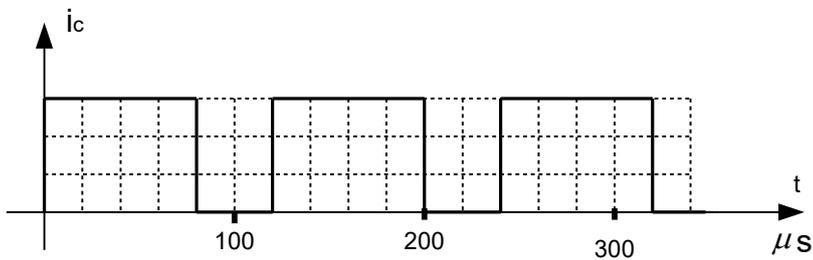
Soit un redresseur Monophasé en pont Mixte alimenté par le secondaire du transformateur à une tension 220V, 50Hz la charge est une résistance de 10Ω , En négligeant la chute de tension aux bornes des diodes.

- 1) Tracer le circuit redresseur.
 - 2) Calculer la tension moyenne à la charge, et déduire le courant moyen.
- On donne : $E_{moy} = \frac{E_{max}}{\pi} (1 + \cos\alpha)$ avec $\alpha=120^\circ$
- 3) Calculer le courant moyen des diodes et des thyristors.
 - 4) Calculer la fréquence d'ondulation à la charge.
 - 5) Tracer l'allure de la tension aux bornes de la charge.

Convertisseur DC-DC (Hacheurs)

Exercice 1 :

Un hacheur série alimente une charge purement résistive à partir d'une tension continue de 24 V (tension d'entrée du hacheur). Ci-dessous est donnée la représentation de i_c (courant dans la charge). Un ampèremètre mesure $i_{c moy} = 1,6$ A



- 1) Expliquer le principe de fonctionnement de ce hacheur en donnant son schéma de principe.
- 2) Quelles sont la fréquence de commande du hacheur et la durée de conduction ?
- 3) Calculer la tension moyenne U_c (aux bornes de la charge) et en déduire la valeur de la résistance de la charge.
- 4) Calculer la valeur du courant i_c durant la conduction.

Exercice 2 :

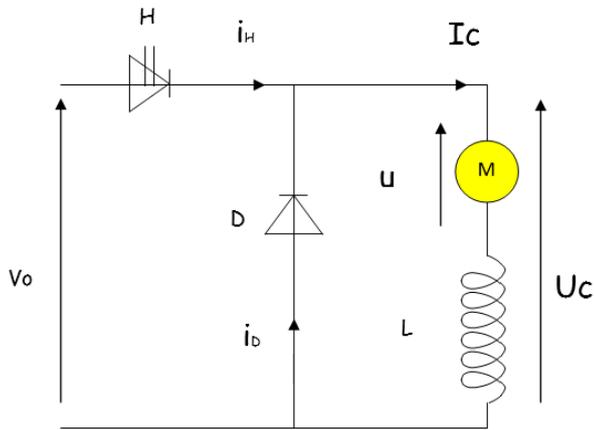
L'induit d'un moteur à courant continu est alimenté par un hacheur série

On suppose que l'interrupteur H et la diode D sont parfaits.

La charge est constituée de l'association en série de l'induit du moteur avec une bobine.

On appelle V_0 , la tension d'alimentation du montage et U_c la tension aux bornes de la charge. On donne $V_0 = 200$ V.

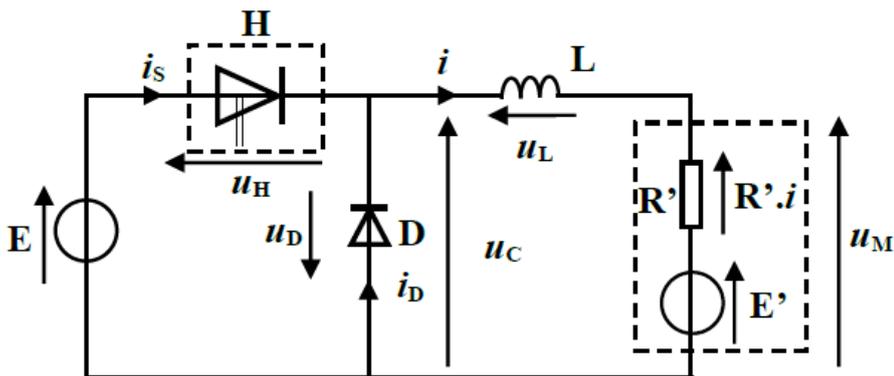
(On rappelle que : $U_{c moy} = (t_1/T) \times V_0$; T = période de hachage ; t_1 = le temps de conduction)



- 1) Expliquer le principe de fonctionnement de ce hacheur.
- 2) Quel est le nom particulier de la diode D? Quel est le rôle de cette diode ?
- 3) On donne la fréquence de hachage égale à 50 Hz et $U_{C_{moy}} = 140$ V.
Calculer le temps de conduction t_1
- 4) Présenter l'allure de U_c et i_c

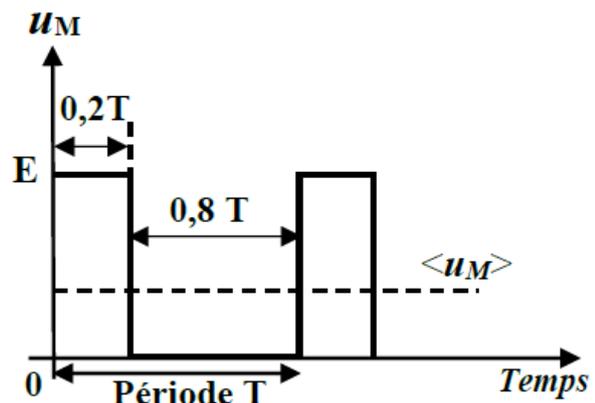
Exercice 3 :

La variation de la vitesse d'un moteur à courant continu est réalisée par Le schéma de principe le suivant :



U_M = tension aux bornes du moteur. On suppose que la diode D et le hacheur H sont parfaits et E une tension continue, le moteur à C.C est modélisé par E' en série avec R'

- 1- Que représente E' et R' ?
- 2- Qu'appelle-t-on la diode D ? Et quel est son rôle ?
- 3- Expliquer le rôle de la bobine L ?
- 4- On suppose que la fréquence du hacheur H est égale à 400 Hz et que la forme de la tension



U_M aux bornes du moteur est la suivante :

Calculer la période du signal de hachage ; puis donner l'expression de $\langle u_M \rangle$.

5- Calculer α suivant les indications du graphe ci-dessus.

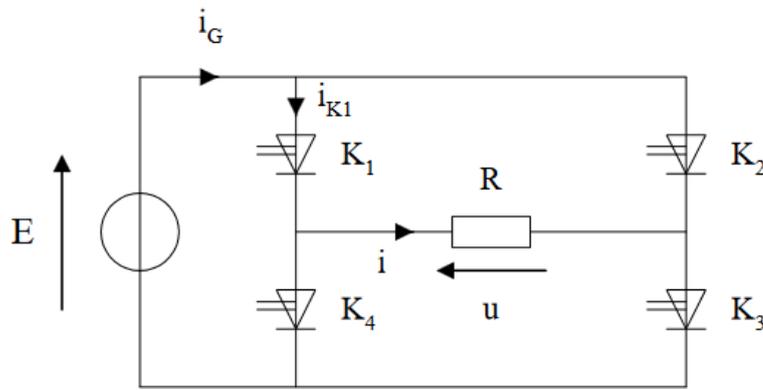
6- Pour $E = 48V$, compléter le tableau des valeurs de $\langle u_M \rangle$

α	0,2	0,5	0,8
$\langle u_M \rangle$ (V)

Convertisseur DC-AC (Onduleur)

Exercice 1 :

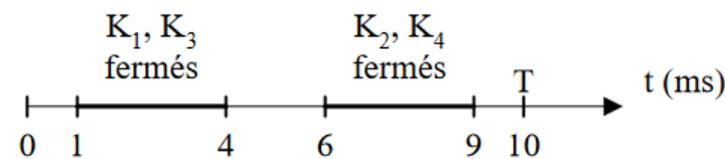
On réalise le montage suivant en utilisant quatre interrupteurs électroniques, fonctionnant deux par deux :



Le générateur de tension continue a une f.é.m. E égale à 24 V.

La charge est une résistance de valeur $R = 100 \Omega$.

Le fonctionnement des interrupteurs est résumé sur le diagramme ci-dessous :



Les interrupteurs sont supposés parfaits.

1- Représenter les chronogrammes :

- de la tension U aux bornes de la charge
- des courants i , i_{K1} et i_G .

2- Calculer la valeur efficace de la tension U .

En déduire la valeur efficace du courant i et la puissance reçue par la charge.

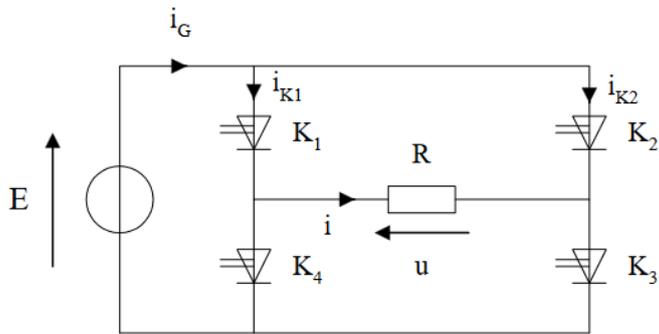
3- Calculer la valeur moyenne du courant débité par le générateur.

En déduire la puissance fournie par le générateur et le rendement de l'onduleur.

Exercice 2 :

L'onduleur suivant est constitué de quatre interrupteurs électroniques commandés ($K1$ à $K4$) supposés parfaits. E est une source de tension continue parfaite de valeur 200 V.

La charge est une résistance de valeur $R = 100 \Omega$.



Le tableau ci-dessous indique les états de conduction des interrupteurs.

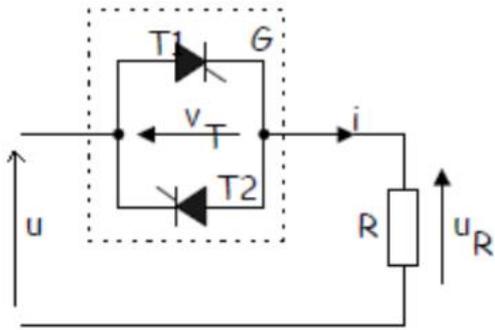
	$0 < t < \alpha T/2$	$\alpha T/2 < t < T/2$	$T/2 < t < (1+\alpha)T/2$	$(1+\alpha)T/2 < t < T$
K ₁	Fermé	Fermé	Ouvert	Ouvert
K ₂	Ouvert	Fermé	Fermé	Ouvert
K ₃	Fermé	Ouvert	Ouvert	Fermé
K ₄	Ouvert	Ouvert	Fermé	Fermé

- 1- Quel type de conversion réalise un onduleur autonome ? Citer une application de ce type de convertisseur.
- 2- Représenter en fonction du temps la tension u aux bornes de la charge et le courant i circulant dans celle-ci (on prendra $\alpha = 1/3$).
- 3- Exprimer la valeur moyenne et la valeur efficace du courant i en fonction de E , R et α . Faire l'application numérique (avec $\alpha = 1/3$).
- 4- En déduire la valeur moyenne de la puissance fournie à la charge.
- 5- Tracer les chronogrammes des courants i_{K1} , i_{K2} et i_G .
- 6- Exprimer les valeurs moyennes des courants i_{K1} , i_{K2} et i_G en fonction de E , R et α . Faire l'application numérique.
- 7- En déduire la valeur moyenne de la puissance fournie par la source E .
- 8- Quels composants peut-on utiliser pour réaliser les interrupteurs ?

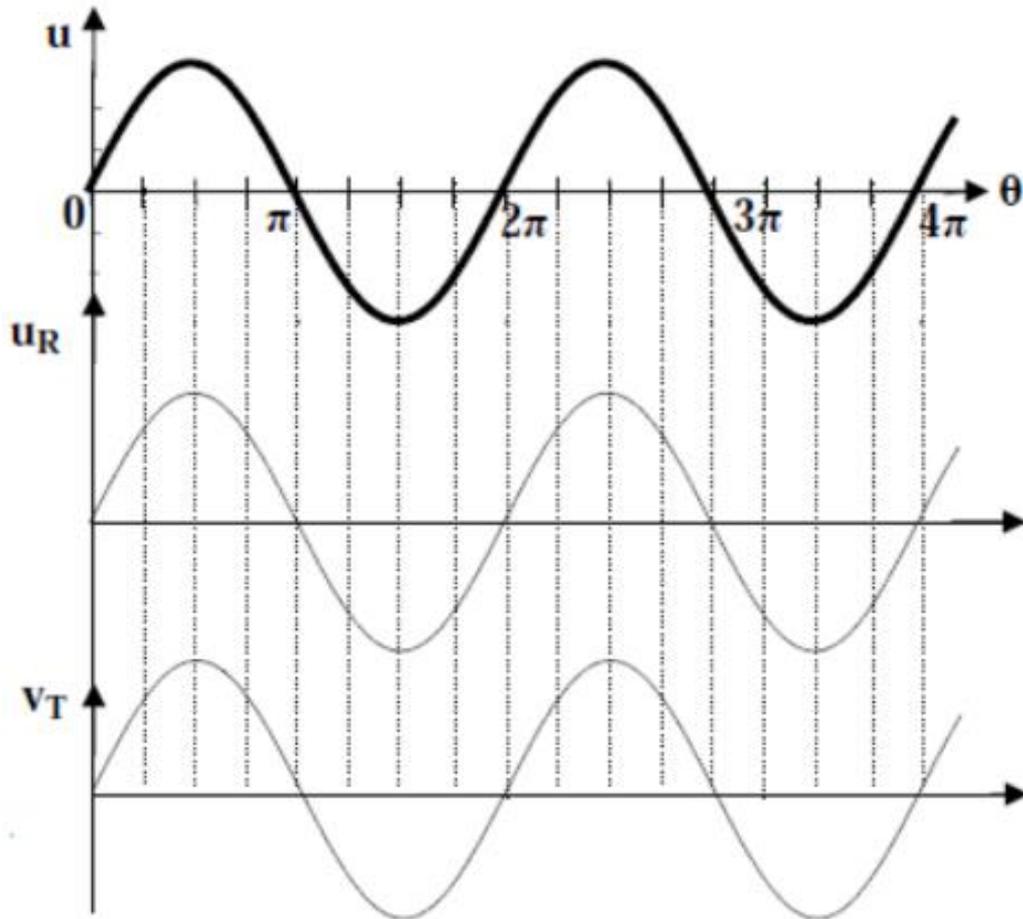
Convertisseur AC-AC (Gradateur)

Exercice 1 :

Un gradateur monophasé à commande par modulation de l'angle de phase est alimenté par un réseau monophasé 50Hz, 230V. Il est connecté à une charge purement résistive de résistance $R = 10\Omega$.



Pour un angle de retard à la conduction $\alpha = 45^\circ$, indiquer les intervalles de conduction des deux thyristors et tracer les chronogrammes des tensions $U_R(t)$ et $V_T(t)$.



2. Calculer la valeur moyenne et la valeur efficace de la tension $U_R(t)$.
3. Calculer la puissance P dissipée dans R .