

2011

Electronique de Puissance

(Cours et Exercices)



M.L.LOUAZENE

Département de Génie
Electrique
Université de Ouargla

Table des matières

Introduction générale 1**Chapitre 1 : Les composants de l'électronique de puissance 2**

1	Introduction	2
2	Diode de puissance	2
2.1	Présentation	2
2.2	Principe de fonctionnement	3
2.3	Caractéristique Tension-Courant	3
2.4	Critères de choix d'une diode	4
2.5	Protection de la diode.....	4
3	Thyristor (SCR)	5
3.1	Présentation	5
3.2	Principe de fonctionnement	6
3.3	Caractéristique Tension-Courant	6
3.4	Critères de choix d'un thyristor	7
3.5	Protection du thyristor	8
4	Thyristor (GTO)	9
4.1	Présentation	9
4.2	Principe de fonctionnement	9
5	Triac	10
5.1	Présentation	10
5.2	Principe de fonctionnement	10
5.3	Caractéristique Tension-Courant	10
6	Le diac	11
6.1	Présentation	11
6.2	Principe de fonctionnement	11
7	Transistor bipolaire de puissance	12
7.1	Présentation	12
7.2	Principe de fonctionnement	12
7.3	Critères de choix d'un transistor	13
7.4	Protection du transistor	13
8	Transistor MOS de puissance	14
8.1	Présentation	14
8.2	Principe de fonctionnement	14
9	Transistor IGBT	14

Chapitre 2 : Les hacheurs..... 15

1	Définition	16
1.1	Principe de fonctionnement	17
1.2	Le rapport cyclique : α	17
2	Le hacheur série	17
2.1	Débit sur une charge résistive	17
2.2	Débit sur une charge active R, L, E.	19
3	Hacheur à deux quadrants	22
3.1	Equations du circuit	23
3.2	Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge	23

3.3 Valeur moyenne du courant	24
3.4 Ondulation du courant dans la charge	24
4 Hacheur à quatre quadrants	25
4.1 Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge	25
4.2 Principe du fonctionnement	26
4.3 Stratégie de commande	26
5 Hacheur parallèle (élevateur de tension)	27
5.1 Analyse du fonctionnement	28
5.2 Valeur moyenne de la tension	29
5.3 Ondulation du courant dans la charge	29
6 Exercices sur le hacheur série	30
7 Exercices sur le hacheur à quatre quadrants	34
8 Exercices sur le hacheur parallèle	36
Chapitre 3 : Le redressement commandé	34
I Redressement monophasé commandé	39
1 Définition	39
1.1 Le thyristor	39
1.2 Fonctionnement du thyristor	40
2 Redressement commandé mono-alternance	41
2.1 Débit sur charge résistive	41
2.2 Analyse du fonctionnement	41
2.3 Valeur moyenne de la tension redressée	42
2.4 Valeur du courant moyen	42
3 Redressement commandé double-alternance	42
3.1 Pont mixte	42
3.1.1 Débit sur charge inductive	41
3.1.2 Débit sur charge (R –L-E) moteur à courant continu	41
3.2 Pont tout thyristors	45
3.2.1 Débit sur charge résistive (R)	42
3.2.2 Débit sur charge (R –L-E) moteur à courant continu	42
3.3 Transformateur à point milieu avec deux thyristors	48
II Redressement triphasé commandé	49
1 Redressement triphasé commandé simple alternance	49
2 Pont triphasé tout thyristors	51
3 Pont triphasé mixte	52
4 Exercices sur Le redressement monophasé commandé	54
Chapitre 4 : Le gradateur monophasé	48
1 Définition	58
2 Constitution d'un gradateur	58
3 Types de gradateurs	59
3.1 Gradateur à angle de phase	59
3.2 Gradateur à train d'onde	61
4 Exercices sur Le gradateur monophasé	63

Chapitre 5 : Les onduleurs 62

1 Définition	64
2 L'onduleur à quatre interrupteurs (pont)	64
3 Principe general de fonctionnement	65
3.1 Commande symétrique	65
3.2 Commande décalée	68
3.3 Modulation de largeur d'impulsion : MLI	70
4 Les harmoniques.....	71
5 Exercices sur l'onduleur monophasé.....	73

Chapitre 6 : Circuit de commande et de puissance..... 76

1 Introduction	76
2 Description generale du montage d'electronique de puissance.....	77
2.1 Bloc de commande.....	77
2.2 Bloc d'amplification	78
2.3 Bloc de protection	78
2.4 Bloc de puissance	79

Introduction

L'électronique de puissance est l'une des branches de l'électrotechnique, elle concerne l'étude de la conversion statique de l'énergie électrique, la conversion est réalisée au moyen des **convertisseurs** permettant de **changer la forme** de l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge.

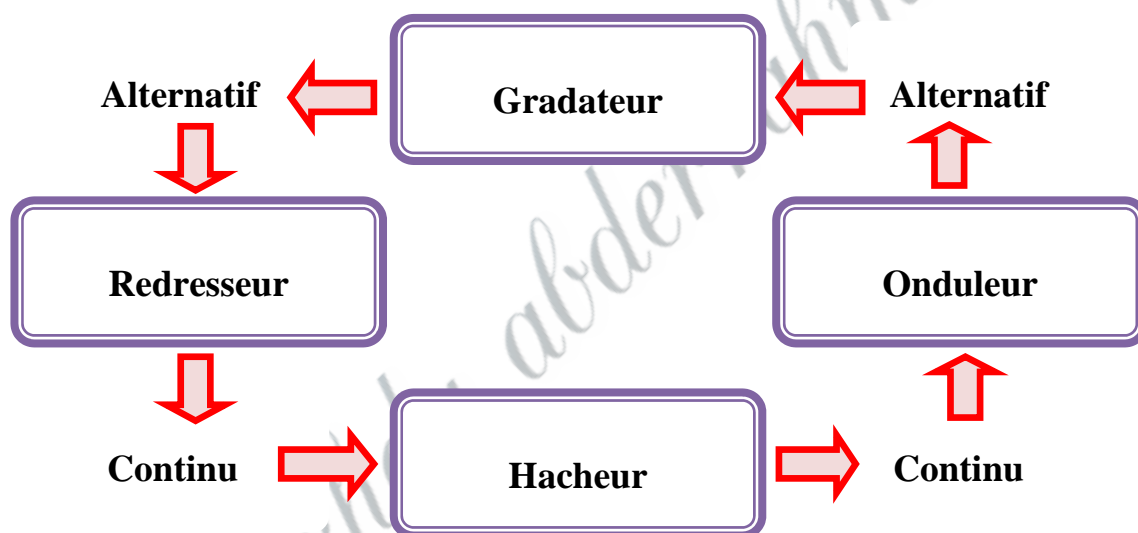
L'électronique de puissance comprend l'étude, la réalisation, la maintenance :

Des composants électroniques utilisés en forte puissance.

Des structures des convertisseurs de la commande de ces convertisseurs.

Des applications industrielles de ces convertisseurs.

On distingue généralement quatre grandes fonctions des convertisseurs de l'électronique de puissance :



Le document est structuré en six chapitres qui couvrent le programme officiel d'électronique de puissance de la première année master en génie électrique. Les chapitres sont complétés par des travaux dirigés et travaux pratiques.

Le premier chapitre s'intéresse à l'étude des **caractéristiques des composants** utilisés en électronique de puissance. On y trouve l'étude des diodes, des thyristors, des transistors et ces dérivés. Le second chapitre est réservé à l'étude des **convertisseurs DC/DC**. Le troisième chapitre est consacré à l'étude des **redresseurs monophasés et triphasés commandés**. Le quatrième chapitre traite les **convertisseurs AC/AC** On étudie les différentes configurations de gradateur. Le cinquième chapitre s'intéresse à l'étude des **onduleurs monophasés DC/AC**. Le sixième chapitre traite les **circuits de commandes des convertisseurs**.

Les composants de l'électronique de puissance

1. Introduction :

L'électronique de puissance concerne les dispositifs (convertisseurs) permettant de **changer la forme de l'énergie électrique**. L'électronique de puissance utilise **des composants semi-conducteurs** pour réaliser les fonctions de commutation (**interrupteurs**) chargées d'adapter les tensions et les courants issus d'un réseau de distribution pour satisfaire les besoins de la charge à alimenter.

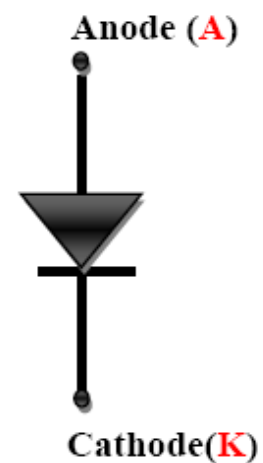


TGV «Train à grande vitesse »

2. Diode de puissance :

2.1 Présentation :

La diode de puissance Figure ci-contre, est un composant électronique **unidirectionnel non commandable** (ni à la fermeture ni à l'ouverture). Elle n'est pas réversible en tension et ne supporte qu'une tension anode-cathode négative ($V_{AK} < 0$) à l'état bloqué. Elle n'est pas réversible en courant et ne supporte qu'un courant dans le sens anode-cathode positif à l'état passant ($i_{AK} > 0$).



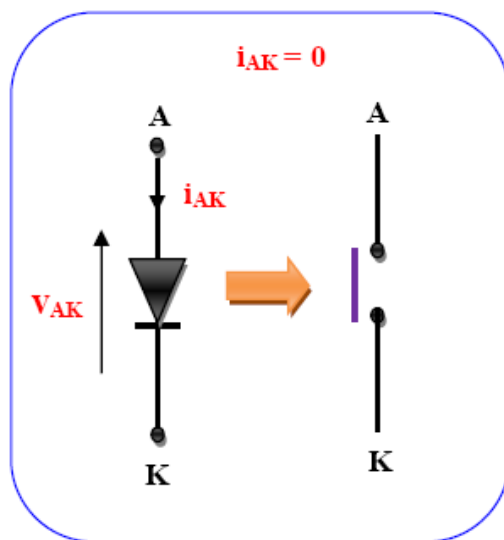
« Symbole de la diode »

2.2 Principe de fonctionnement :

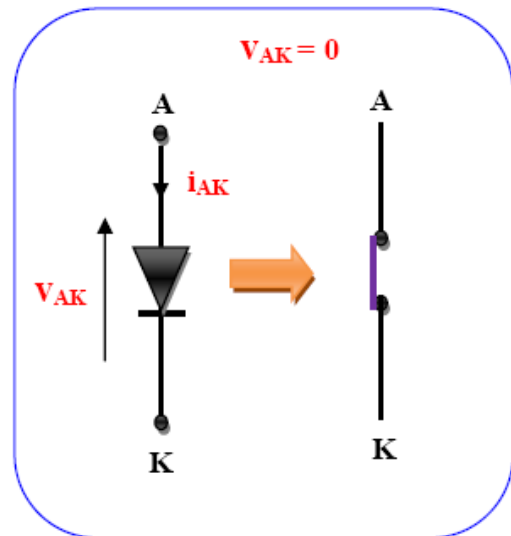
Le fonctionnement de la diode s'opère suivant deux modes :

- ✚ Diode **passante** (ON), tension $V_{AK} = 0$ pour $i_{AK} > 0$
- ✚ Diode **bloquée** (OFF), courant $i_{AK} = 0$ pour $V_{AK} < 0$

Diode bloquée : $V_{AK} < 0$, $i_{AK} = 0$



Diode passante : $V_{AK} = 0$, $i_{AK} > 0$



2.3 Caractéristique Tension-Courant :

Valeurs maximales admissibles :

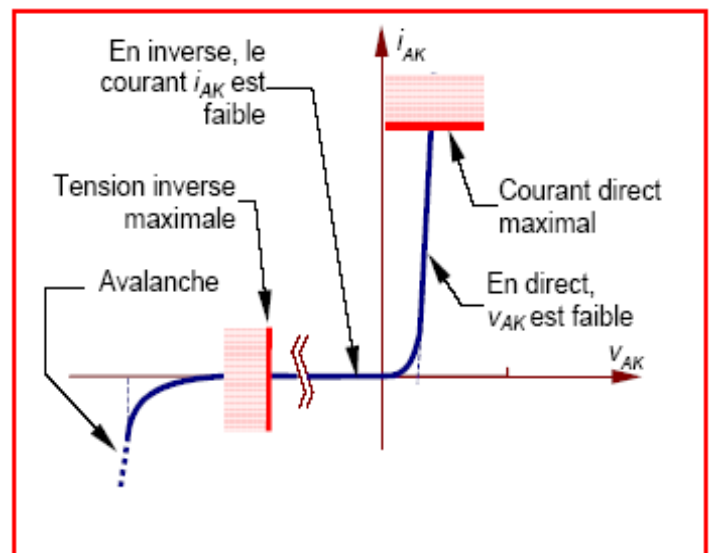
IF max : courant direct (Forward) maximal admissible.

VRmax : tension inverse (Reverse) maximale admissible.

Tension de seuil (ou de "déchet") :

$V_d \approx 0,6 \text{ à } 0,7 \text{ V}$

Phénomène "d'avalanche" : danger !



« Caractéristiques Tension-Courant de la diode »

2.4 Critères de choix d'une diode :

Avant tout dimensionnement en vue de choisir les composants, on se base sur les valeurs extrêmes de ces grandeurs qui sont prises en considération :

- la tension inverse de V_{AK} à l'état bloqué ;
- le courant moyen de i_{AK} ($<i_{AK}>$) à l'état passant ;

Remarque : Par sécurité de dimensionnement, on applique un coefficient de sécurité (de 1,2 à 2) à ces grandeurs.

« Diode de puissance »



2.5 Protection de la diode :

1-Protection contre les surintensités :

Cette protection est assurée par un fusible ultra rapide (UR) dont la contrainte thermique est plus faible que celle de la diode. (Si bien qu'il « fond » avant la diode.)



« Fusible ultra rapide »

2-Protection thermique :

a-Refroidissement naturelle : En fonctionnement normal, la jonction PN soumise le risque d'atteindre une température trop élevée (θ_{jmax} donnée par le constructeur). Pour palier cet inconvénient, le composant est monté sur un dissipateur thermique ou « radiateur » pour assurer l'évacuation de l'énergie thermique.

b-Refroidissement par ventilation forcée : Il est utilisé pour les composants de moyennes puissances.

c-Refroidissement à eau ou à huile : Il est réservé aux composants de forte puissances, le liquide circulant dans le radiateur pour évacuer la chaleur.



« Dissipateur thermique »

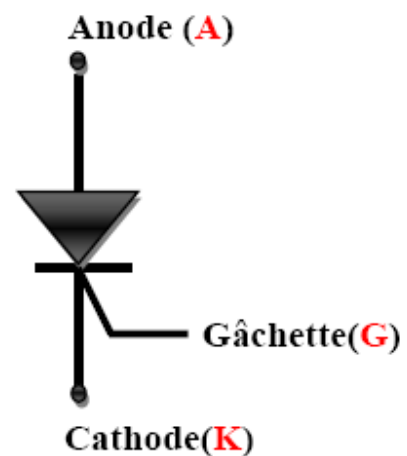
3-Protection en dv/dt et di/dt :

Les semi-conducteurs sont très sensibles aux variations brutales de tension et de courant qui apparaissent lors des commutations. Contre les variations de courant, on utilise une inductance (qui retarde le courant) tandis que le condensateur retarde la tension.

3. Thyristor (SCR) :

3.1 Présentation :

Le thyristor est un composant électronique **unidirectionnel** (le courant passe dans un seul sens)_ **commandé à la fermeture**, mais pas à l'ouverture Figure ci-contre. Il est réversible en tension et supporte des tensions V_{AK} aussi bien positives que négatives. Il n'est pas réversible en courant et ne permet que des courants i_{AK} positifs, c'est à dire dans le sens anode-cathode, à l'état passant.



« Symbole du thyristor »

3.2 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du thyristor s'opère suivant deux modes :

✚ L'état passant (ON) :

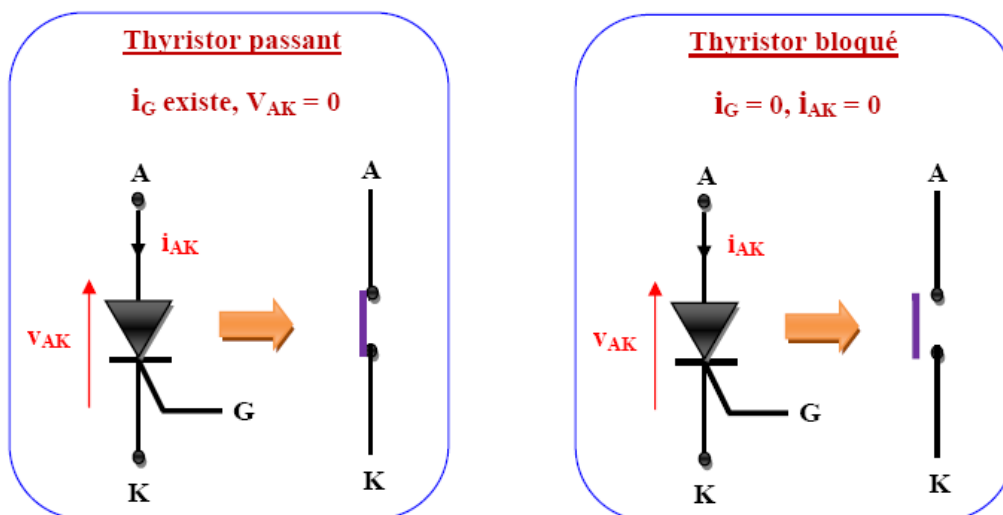
L'amorçage du thyristor est obtenu par un courant de gâchette i_G **positif** d'amplitude suffisante alors que la tension V_{AK} est positive.

Cet état est caractérisé par une tension V_{AK} nulle et un courant i_{AK} positif.

✚ L'état bloqué (OFF) :

En distingue deux types de blocage:

- Blocage naturelle par annulation du courant i_{AK} .
- Blocage forcée par inversion de la tension V_{AK} .



3.3 Caractéristique Tension-Courant :

Valeurs maximales admissibles :

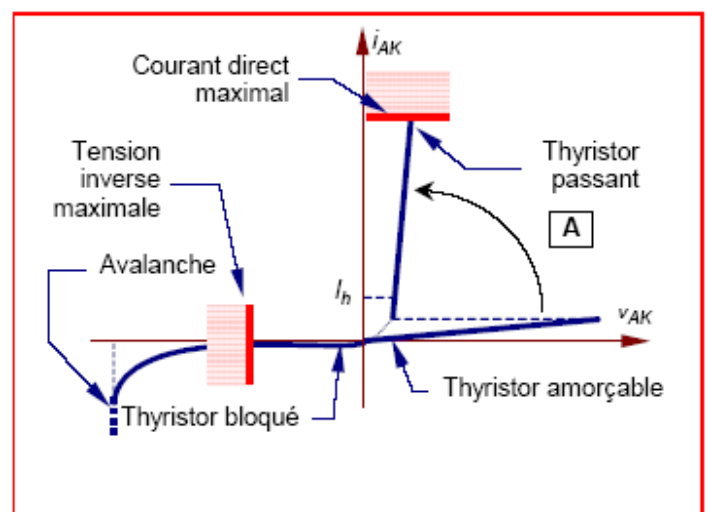
IFmax : courant direct (Forward) maximal admissible.

VDRM: tension maximale directe répétitive.

VRRM : tension maximale inverse répétitive.

tension de seuil (ou de "déchet") :

$V_d \approx 0,6 \text{ à } 0,7 \text{ V}$



3.4 Critères de choix d'un thyristor :

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement du thyristor (v_{AK} et i_{AK}) dans le système envisagé, on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- la tension inverse V_{RRM} ou directe V_{DRM} maximale de v_{AK} ;
- le courant moyen de i_{AK} à l'état passant ;

Remarque : De la même manière que la diode, on applique un coefficient de sécurité (de 1,2 à 2) à ces grandeurs.



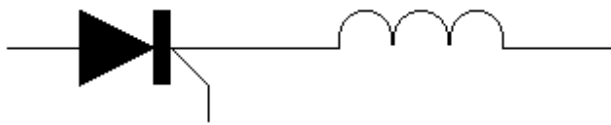
« Différents formes du thyristor »

3.5 Protection du thyristor :

Pour la protection contre les surintensités, les surtensions, **la variation brusque** et thermique ne diffère pas avec celles d'une diode.

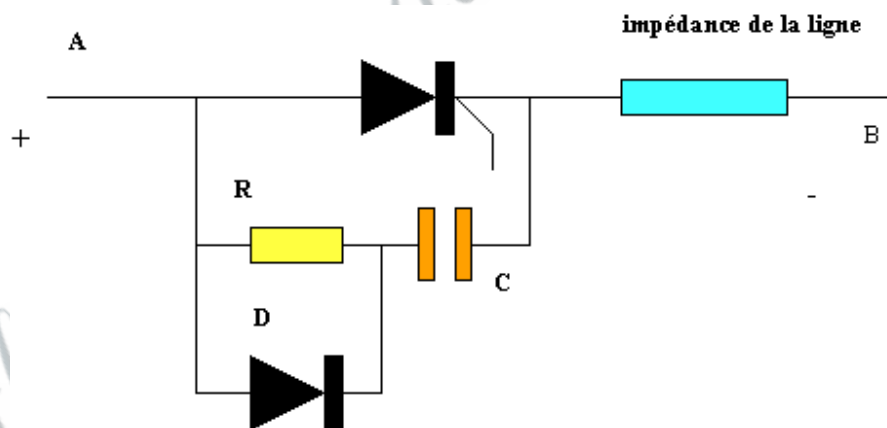
Protection contre les di/dt :

Au début de l'amorçage du thyristor, seule une petite partie de la jonction est conductrice. Si la vitesse de croissance du courant principal est trop importante, elle peut entraîner des densités de courant énormes qui vont détruire le composant. Pour limiter ce phénomène, on utilise des petites inductances en série avec le thyristor.



Protection contre les dv/dt :

Si la tension anode-cathode augmente trop rapidement, elle peut entraîner un amorçage intempestif du thyristor (sans signal de gâchette). Pour neutraliser ce phénomène, on utilise le circuit suivant :



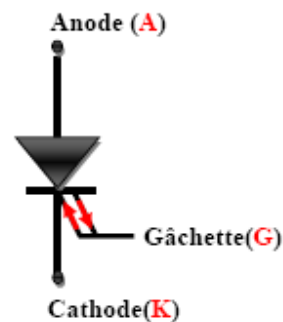
Lorsqu'un surtension présente entre les points A et B, le condensateur se charge à travers D et l'impédance de la ligne. La tension V_{ak} évolue plus lentement (comme aux bornes du condensateur). La résistance R intervient lors de l'amorçage commandé et limite le courant de décharge du condensateur dans le thyristor.

4. Thyristor GTO :

4.1 Présentation :

Le thyristor GTO (Gate Turn Off) est une évolution du thyristor classique qui a la propriété de pouvoir être bloqué à l'aide de la gâchette, contrairement aux thyristors classiques. Il est utilisé pour les commutations des fortes puissances.

« Symbole du thyristor GTO »



4.2 Principe de fonctionnement :

✚ L'état passant (ON) :

Un GTO s'amorce par la gâchette (avec $V_{gK} > 0$) comme un thyristor ordinaire. Le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction amorcée, elle se maintient.

✚ L'état bloqué (OFF) :

Le mode de blocage spécifique du GTO consiste à détourner le quasi totalité du courant d'anode dans la gâchette. En pratique, on applique donc une tension négative sur la gâchette ($V_{gK} < 0$) pour détourner le courant. L'opération doit avoir une durée minimale pour assurer un blocage fiable.

« Thyristor de puissance GTO »

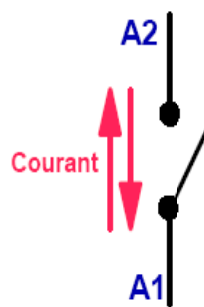
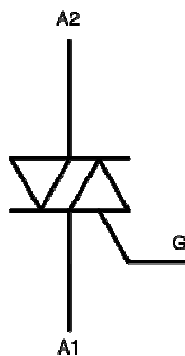


5. Triac :

5.1 Présentation :

Le Triac est un composant électronique **bidirectionnel** (le courant passe dans les deux sens) **commandé à la fermeture**. C'est l'équivalent de deux thyristors montés tête-bêche et commandés par une seule gâchette.

« Symbole de triac »



5.2 Principe de fonctionnement :

✚ L'état passant (ON) :

Pour commander le triac, un courant doit passer par la gâchette (une impulsion pour des valeurs positives ou négatives).

✚ L'état bloqué (OFF) :

Une fois amorcé, il reste passant. Pour le désamorcer, il faut annuler le courant Anode1/Anode2.

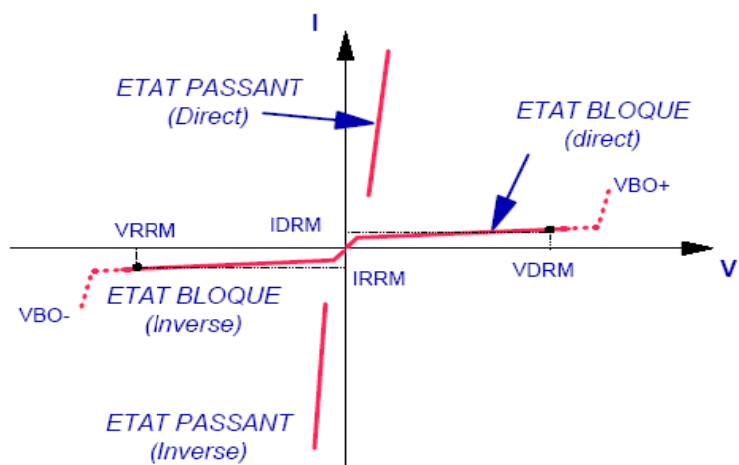
5.3 Caractéristique Tension-Courant :

Valeurs maximales admissibles :

IFmax : courant direct ou inverse maximal admissible.

VDRM : tension maximale directe répétitive.

VRRM : tension maximale inverse répétitive.

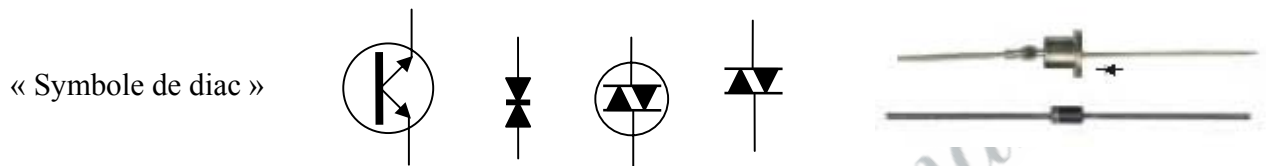


« Caractéristiques Tension-Courant du triac »

6. Le diac :

6.1 Présentation :

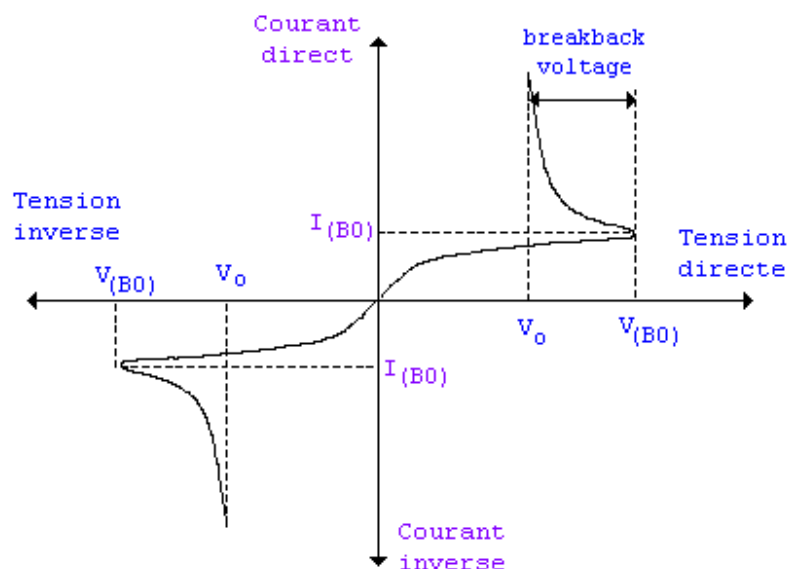
Le diac (Diode Alternatif Current) est un élément semi conducteur à deux électrodes. C'est un composant électronique à amorçage **bidirectionnel** par la tension à ses bornes. Il est souvent utilisé en électronique de puissance pour déclencher les triac et les thyristors (circuits de commande).



6.2 Principe de fonctionnement :

Le diac ne conduit pas le courant tant qu'une tension appliquée à ses bornes est inférieure à une certaine valeur notée V_{BO} (Break over voltage) souvent comprise entre 20 et 35 volts dans les deux sens.

Lorsque cette tension d'avalanche est atteinte, le diac entre en conduction (amorçage), il serait assimilé à un interrupteur fermé, dans ce cas la tension entre ses deux électrodes serait pratiquement nulle.

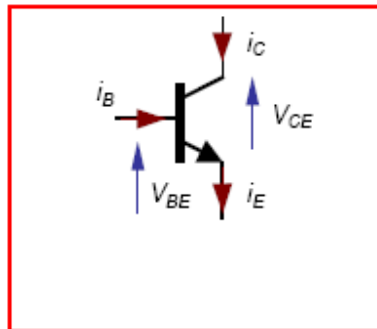


« Caractéristiques Tension-Courant du diac »

7. Transistor bipolaire de puissance :

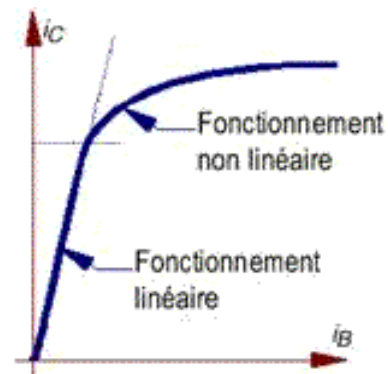
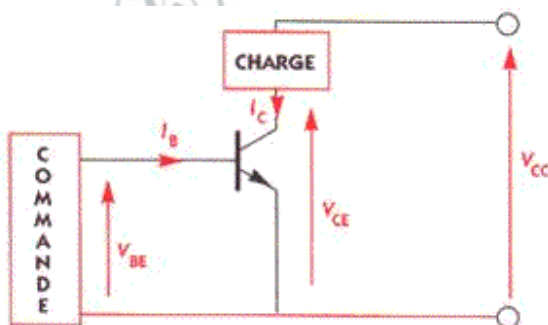
7.1 Présentation :

Parmi les deux types, NPN et PNP, le transistor de puissance existe essentiellement dans la première catégorie. Le transistor est un composant **totalelement commandé** : à la fermeture et à l'ouverture. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur i_C positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions V_{CE} positives lorsqu'il est bloqué.



7.2 Principe de fonctionnement :

- ✚ **Transistor bloqué (B) ou OFF** : état obtenu en annulant le courant i_B de commande, ce qui induit un courant de collecteur nul et une tension V_{CE} (tension de source). L'équivalent d'un commutateur ouvert.
- ✚ **Transistor saturé (S) ou ON** : ici, le courant i_B est tel que le transistor impose une tension V_{CE} nulle tandis que le courant i_C atteint une valeur limite dite de saturation, $i_{C\text{sat}}$. L'équivalent d'un commutateur fermé.



Modes de fonctionnement du transistor :

$$I_B = 0$$

$$I_C = 0 \text{ (commutateur ouvert)}$$

$$I_B > 0$$

$$I_C = \beta \cdot I_B \text{ (Amplificateur)}$$

$$I_B = I_{Bsat}$$

$$I_C = I_{Cmax} \text{ (commutateur fermé)}$$

7.3 Critères de choix d'un transistor :

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement (V_{CE} et i_C), on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- la tension V_{CE} (à l'état bloqué) ;
- le courant max i_C (à l'état saturé).



« Transistor de puissance »

7.4 Protection du transistor :

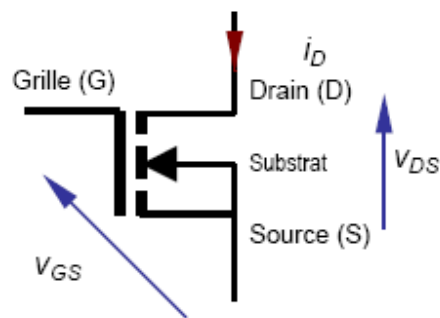
La protection est assurée par l'intermédiaire d'un circuit électronique qui mesure i_C ou i_E et interrompe la commande en cas de danger.

8. Transistor MOS de puissance :

8.1 Présentation :

Le transistor MOS est un composant **totalelement commandé** : à la fermeture et à l'ouverture. Il est rendu passant grâce à une tension **V_{GS} positive** (de l'ordre de quelques volts). La grille est isolée du reste du transistor, ce qui procure une impédance grille-source très élevée. La grille n'absorbe donc aucun courant en régime permanent. La jonction drain-source est alors assimilable à une résistance très faible (**interrupteur fermée**). On le **bloque** en annulant la tension V_{GS} .

« Symbole de transistor MOS »



8.2 Principe de fonctionnement :

✚ **Transistor bloqué ou OFF** : L'équivalent d'un commutateur ouvert.

$$V_{GS}=0 \quad I_D=0$$

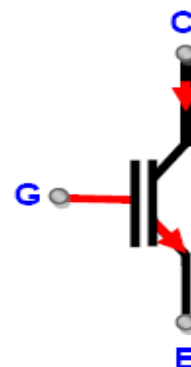
✚ **Transistor saturé ou ON** : L'équivalent d'un commutateur fermé.

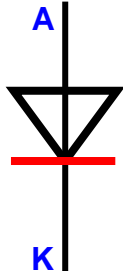
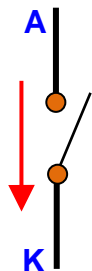
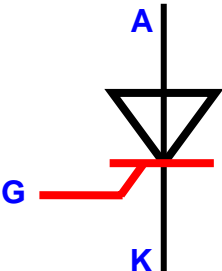
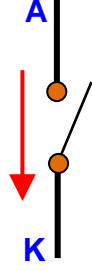
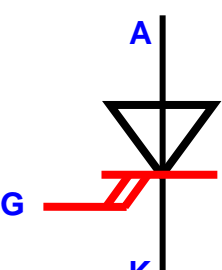
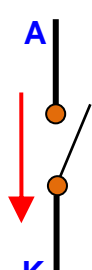
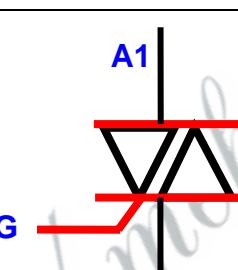
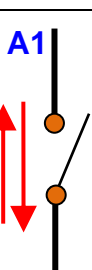
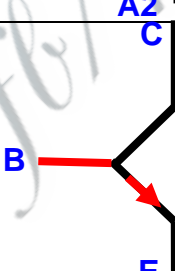
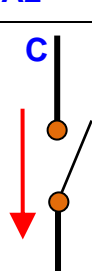
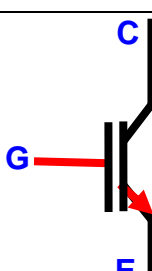
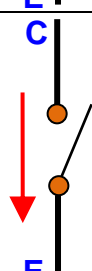
$$V_{GS}>0 \quad I_D>0$$

9. Transistor IGBT :

Transistor bipolaire à grille isolée est le mariage du bipolaire et du MOS, Le transistor bipolaire assure une chute de tension à l'état passant (V_{CE}) plus favorable que le MOS. Par contre, c'est le MOS qui est plus avantageux en raison de sa commande en tension. Un transistor hybride, commande MOS en tension et circuit de puissance bipolaire, permet de meilleures performances : c'est le transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

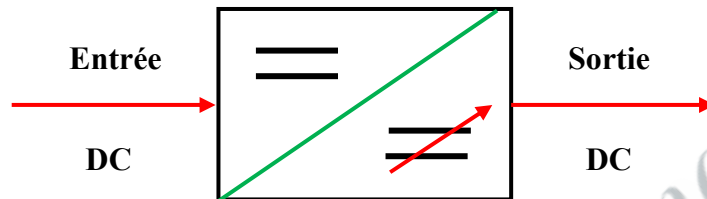
« Symbole de transistor IGBT »



Composant	Symbole	Commande	Source	Fonctionnement
Diode		Non commandable	Alternative	
Thyristor		Commande à la fermeture par impulsion positive	Alternative	
Thyristor GTO		Commande à la : - fermeture par impulsion positive - l'ouverture par impulsion négative	Alternative ou continu	
Triac		Commande à la fermeture par impulsion positive ou négative	Alternative	
Transistor bipolaire		Commande à la : - fermeture par un courant positive - l'ouverture par annulation du courant	Continu	
Transistor IGBT		Commande à la : - fermeture par une tension positive - l'ouverture par annulation de tension	Continu	

Les hacheurs

1-Définition : L'hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de **valeur moyenne réglable** à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur - alimenté par le réseau de distribution).



« Symbole du hacheur »

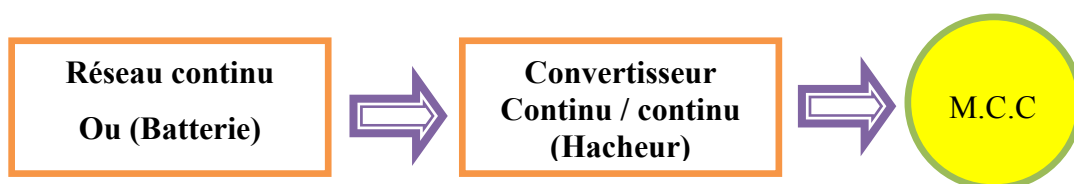
Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

Commande du transistor :

Pour alimenter la base du transistor, il faut réaliser un montage électronique délivrant un signal en créneaux avec un rapport cyclique réglable. Il s'agit d'un oscillateur.

Exemple d'application : le hacheur permet de faire varier et de régler la vitesse des moteurs à courant continu.

Commande de vitesse pour moteur à courant continu



1.1-Principe de fonctionnement :

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide d'un interrupteur électronique.

1.2-Le rapport cyclique : α

Le rapport cyclique est défini comme le temps t_F pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T .

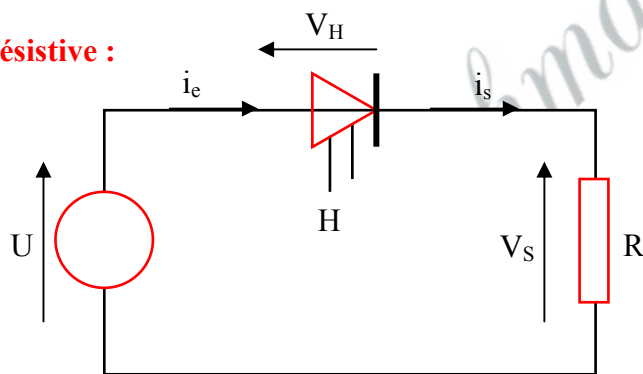
$$\alpha = \frac{t_F}{T}$$

La valeur de rapport cyclique : $0 \leq \alpha \leq 1$

2-Le hacheur série(buck):

2.1-Débit sur une charge résistive :

Soit le montage suivant :



H : Interrupteur unidirectionnel parfait

1)-Analyse du fonctionnement :

- $0 < t < \alpha T$: H est fermé.

$$v_H = 0$$

$$v_s = U$$

$$i_s = \frac{U}{R}$$

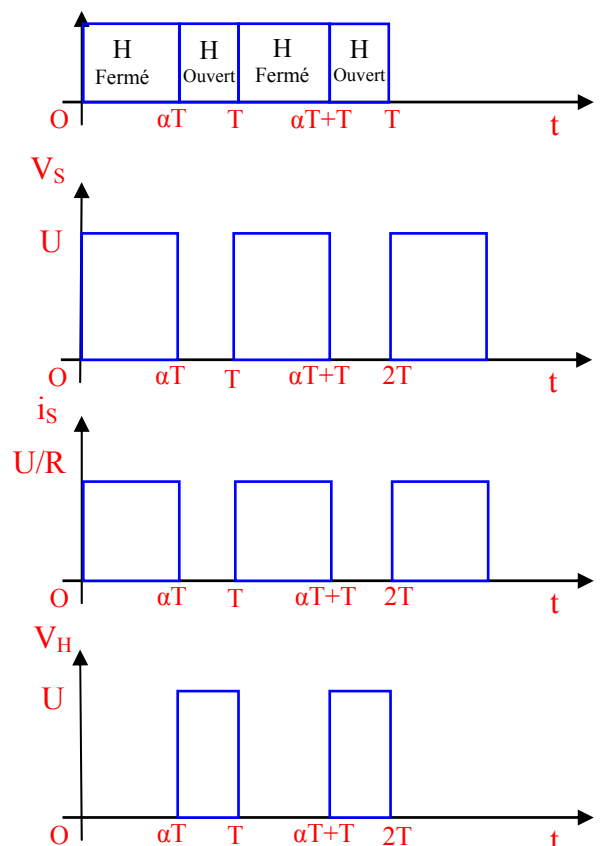
$$i_s = i_e$$

- $\alpha T < t < T$: H est ouvert.

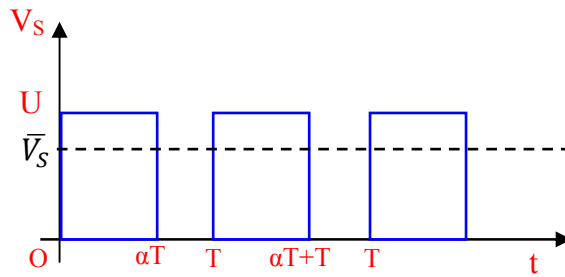
$$v_H = U$$

$$v_s = 0$$

$$i_s = i_e = 0$$



2)-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :



Exprimons la valeur moyenne de v en fonction du rapport cyclique.

$$\bar{v}_s = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt$$

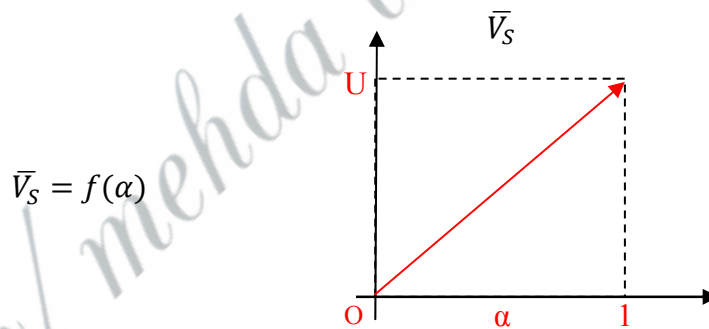
$$\bar{v}_s = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha U$$

Pour cela nous calculons sa valeur moyenne sur une période :

Valeur moyenne de la tension: $\bar{v}_s = \alpha U$

La valeur moyenne de la tension \bar{v}_s peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α .

Quand on fait varier α de 0 à 1, \bar{v}_s varie linéairement de 0 à U .



3)-Conclusion : Quelle que soit la nature de la charge, on aura $\bar{V}_s = 0 \leq \alpha U \leq U$. Le hacheur série est bien abaisseur de tension (hacheur dévolteur).

Commentaires :

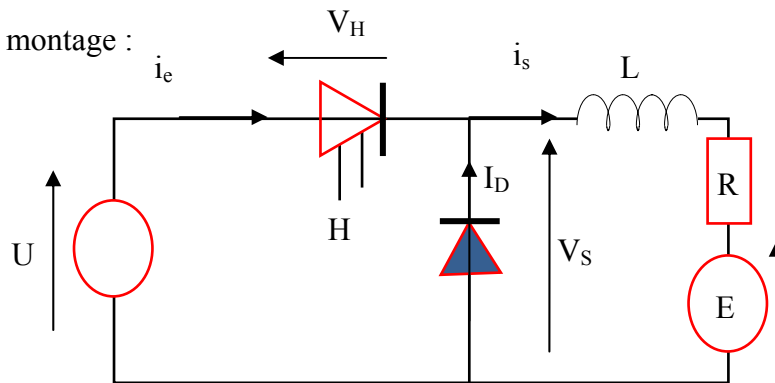
La tension de sortie du hacheur n'est pas continue mais toujours positive. Lorsque la période est assez faible (fréquence de 100 à 1000 Hz) la charge ne « voit » pas les créneaux mais la valeur moyenne de la tension.

Valeur moyenne du courant : $\bar{i}_s = \alpha U / R$

Calcul de puissance : $U \cdot i_e = \bar{v}_s \cdot i_s \rightarrow i_s = \frac{i_e}{\alpha}$

2.2-Débit sur une charge active R, L, E. :

On considère le montage :



1)-Analyse du fonctionnement :

- $0 < t < \alpha T$: H est fermé.

$$i_e = i_s$$

$$v_H = 0$$

$$v_s = U$$

-L'intensité du courant dans la charge
vérifier l'équation suivante :

$$U = E + R \cdot i_s + L \frac{di_s}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

- $\alpha T < t < T$: H est ouvert.

Le courant imposé par la bobine pourra passer
par la diode de roue libre.

Donc la diode assure la continuité du courant
dans la charge.

$$i_e = 0$$

$$v_H = U$$

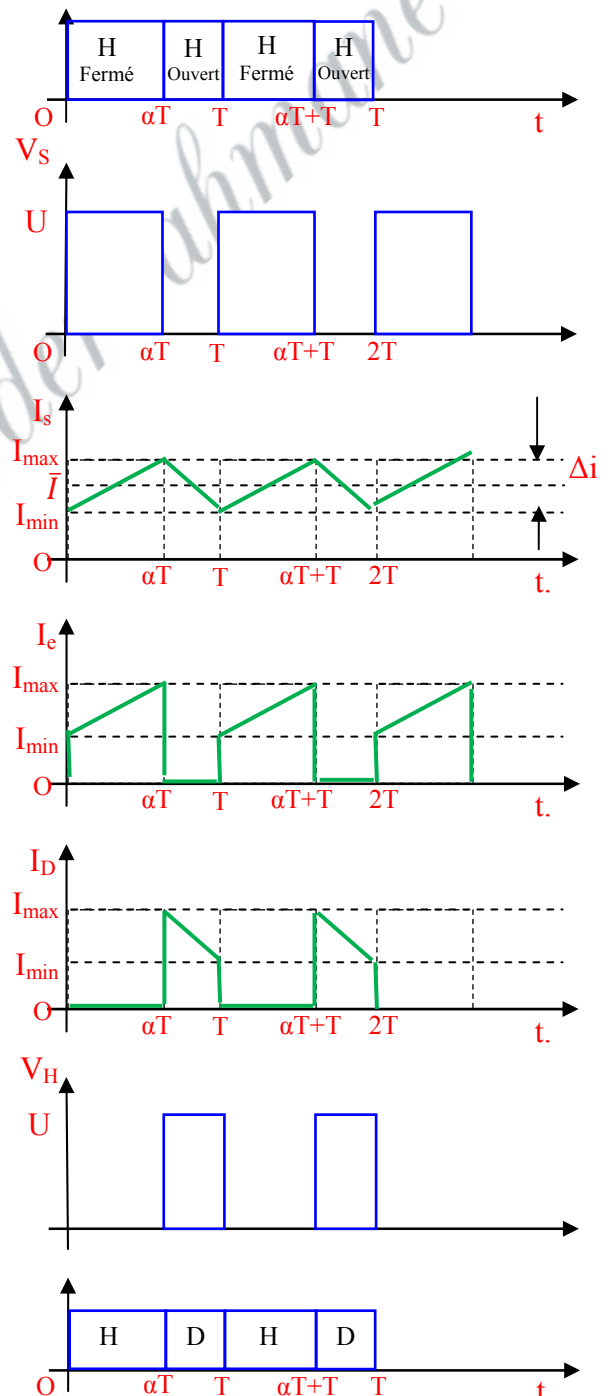
$$v_s = 0$$

-L'intensité du courant dans la charge vérifier
l'équation suivante :

$$0 = E + R \cdot i_s + L \frac{di_s}{dt} \dots \dots \dots (2)$$

Remarque : en général les résistances de l'induit
et l'inductance sont très faibles, donc on suppose
que la chute de tension $R \cdot i_s$ est nulle.

*l'équation (1) devient :



$$U = E + L \frac{di_s}{dt} \rightarrow di_s = \frac{U - E}{L} dt$$

Pour trouver la valeur du courant on intègre l'équation dans l'intervalle $0 < t < \alpha T$:

$$\int_0^{\alpha T} di_s = \int_0^{\alpha T} \frac{U - E}{L} dt$$

$$i_s(t) = \frac{U - E}{L} (t) + i_{min}$$

*l'équation (2) devient :

$$0 = E + L \frac{di_s}{dt} \rightarrow di_s = -\frac{E}{L} dt$$

Pour trouver la valeur du courant on intègre l'équation dans l'intervalle $\alpha T < t < T$:

$$\int_{\alpha T}^T di_s = \int_{\alpha T}^T -\frac{E}{L} dt$$

$$i_s(t) = -\frac{E}{L} (t - \alpha T) + i_{max}$$

Valeur moyenne du courant :

$$\bar{V}_s = E + R \cdot \bar{I}_s + L \frac{d\bar{I}_s}{dt}$$

$$\text{Avec : } \bar{V}_s = \alpha U, \quad L \frac{d\bar{I}_s}{dt} = 0$$

La valeur moyenne du courant est calculée par la formule suivante :

$$\bar{I}_s = \frac{\alpha U - E}{R} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

On peut déduire les valeurs moyennes des courants \bar{I}_H et \bar{I}_D en fonction de \bar{I}_s .

$$\text{Intensité moyenne dans le Hacheur : } \bar{I}_H = \alpha \bar{I}_s$$

$$\text{Intensité moyenne dans la diode : } \bar{I}_D = (1 - \alpha) \bar{I}_s$$

2)-Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{\alpha(1 - \alpha)U}{Lf}$$

L'ondulation Δi est maximale pour $\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \implies \alpha = 0.5$

$$\Delta i_{max} = \frac{U}{4Lf}$$

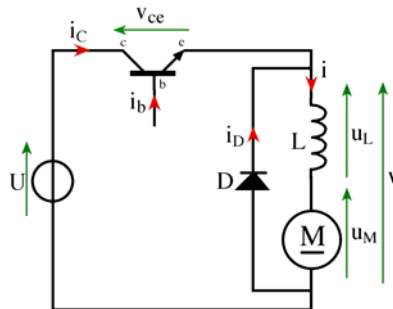
Pour diminuer Δi , il faut augmenter l'inductance L ou/et la fréquence f.

3)-Application au moteur :

Le hacheur série est souvent employé pour commander un moteur à courant continu.

On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

Montage :



Commentaire :

Pour un bon fonctionnement du moteur, il est préférable que le courant soit le plus régulier possible, d'où la présence d'une bobine de lissage. Si son inductance est suffisamment grande, on pourra considérer le courant comme constant ($\Delta i \approx 0$).

Loi des mailles :

$$v_s = u_L + u_M$$

On passe aux valeurs moyennes :

$$\bar{V}_s = \bar{u}_M + \bar{u}_L$$

Et comme pour un signal périodique :

$$\bar{u}_L = 0$$

Nous obtenons pour le moteur :

$$\bar{V}_s = \bar{u}_M = E$$

$$\bar{V}_s = E = \alpha U$$

$$E = k \cdot N \cdot \Phi \quad \left\{ \begin{array}{l} N : \text{La vitesse de rotation du moteur} \\ \Phi : \text{Le flux d'inducteur (égale à constant pour le moteur à excitation séparé)} \end{array} \right.$$

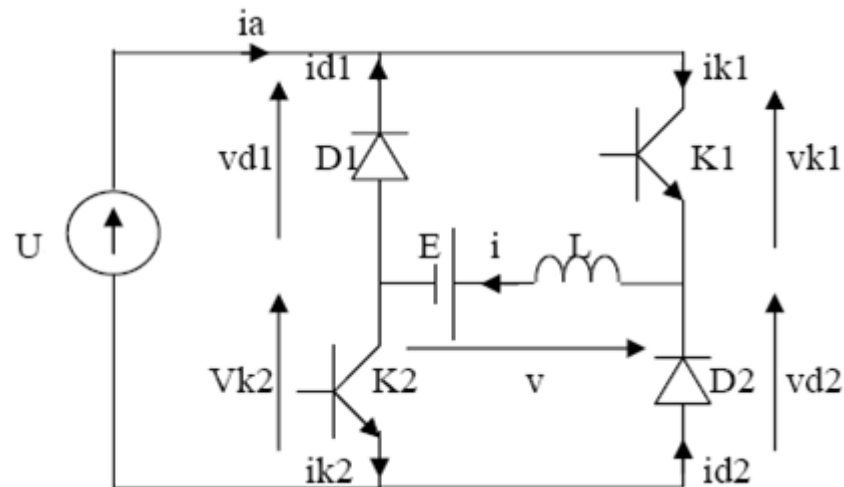
Finalement la f.é.m. du moteur peuvent être régler grâce au rapport cyclique par la relation :

$$E = k' \cdot N = \alpha U \rightarrow N = k'' \cdot \alpha$$

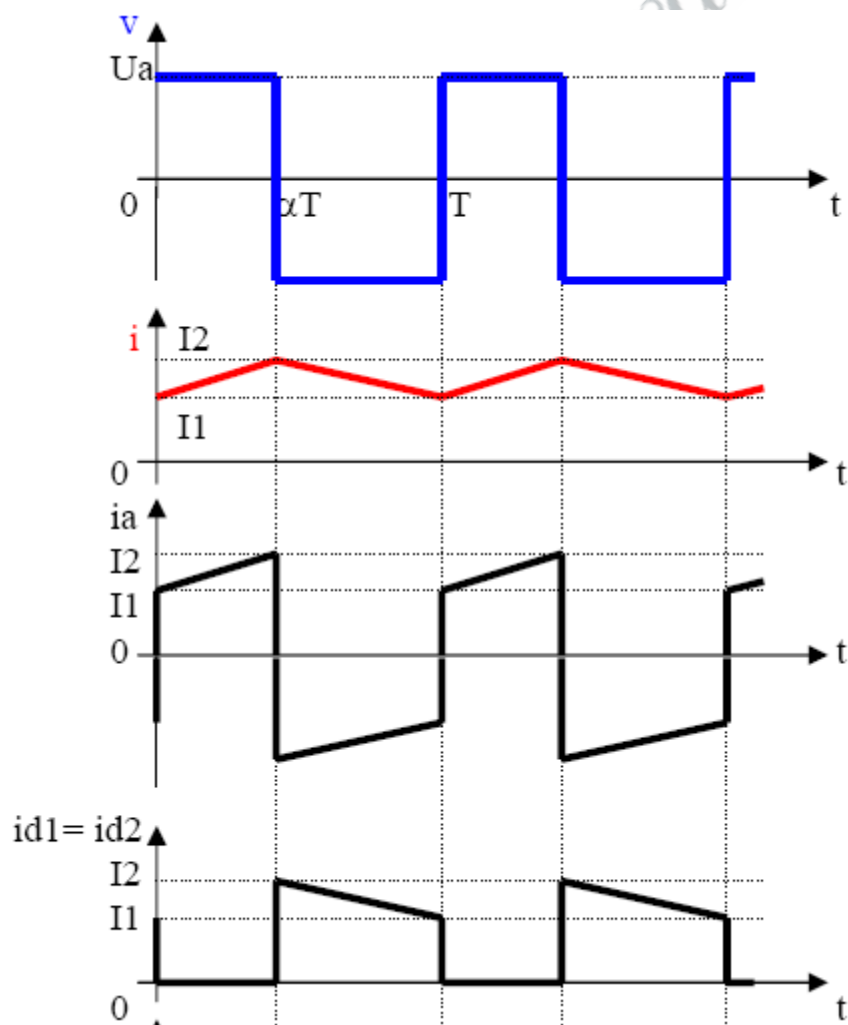
On voit ici que la vitesse varie linéairement avec le rapport cyclique α , lequel est proportionnel à la tension de commande.

3-Hacheur à deux quadrants : Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

K1 et K2 sont commandés simultanément avec le même état à la période T.



Formes d'ondes en conduction continue :



Remarque :

Afin d'obtenir un arrêt rapide, il est nécessaire d'appliquer un couple de freinage.

3.1-Equations du circuit :

$$V = E + R \cdot i + L \frac{di}{dt}$$

- $0 < t < \alpha T$: K_1 et K_2 sont fermés. (Transfert de l'énergie vers la charge)

$$V = U$$

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

En intègre l'équation précédente :

$$i(t) = \frac{U - E}{L} (t) + i_{min}$$

- $\alpha T < t < T$: K_1 et K_2 sont ouverts (Récupération de l'énergie)

Le blocage de K_1 et K_2 impose la circulation du courant emmagasiné dans la bobine à travers les diodes. Comme $i = I_2 \neq 0$ dans L , celui-ci ne peut varier spontanément. La seule solution à la continuité de i est $i = i_{d1} = i_{d2} = -i_a = I_2$.

Alors : $V = -U$

$$-U = E + L \frac{di}{dt}$$

En intègre l'équation précédente :

$$i(t) = -\frac{U + E}{L} (t - \alpha T) + i_{max}$$

3.2-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U \cdot d(t)$$

$$\bar{V} = (2\alpha - 1)U$$

Le convertisseur est réversible deux quadrants car $i > 0$ et $\bar{V} > 0$ ou < 0 .

$0.5 < \alpha \leq 1$: $U > 0 \rightarrow$ Moteur ;

$0 \leq \alpha < 0.5$: $U < 0 \rightarrow$ freinage;

$\alpha = 0.5 \rightarrow$ Arrêt ;

3.3-Valeur moyenne du courant :

Soit l'équation du circuit suivante :

$$V = E + R \cdot i + L \frac{di}{dt}$$

$$\bar{V} = E + R \cdot \bar{I}_s + L \frac{d\bar{I}}{dt}$$

La valeur moyenne du courant est calculée par la formule suivante :

$$\bar{I} = \frac{\bar{V} - E}{R} = \frac{(2\alpha - 1)U - E}{R}$$

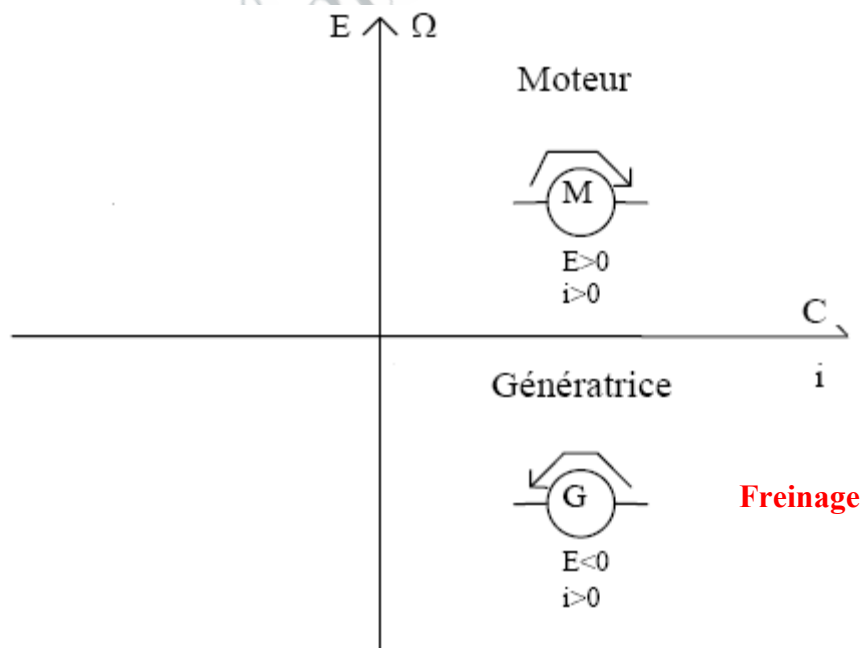
3.4-Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{2\alpha(1 - \alpha)U}{Lf}$$

Remarque :

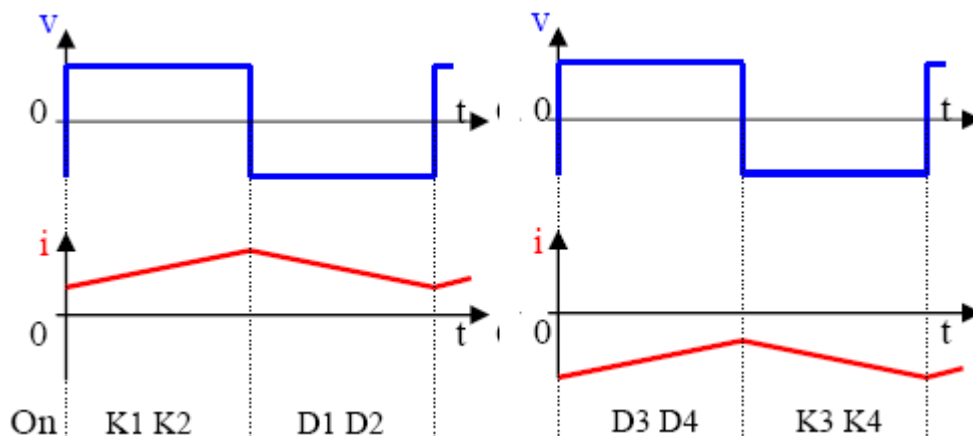
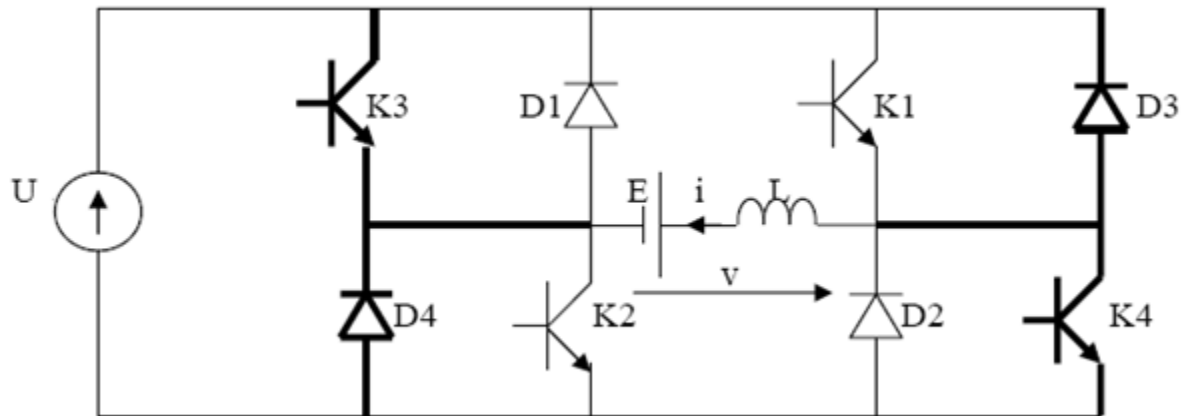
Variations de la tension de sortie deux fois plus grand, ce qui augmente l'ondulation du courant.



4-Hacheur à quatre quadrants :

Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête bêche deux hacheurs réversibles deux quadrants (K1, K2, D1, D2) et (K3, K4, D3, D4).

La tension peut être négative ou positive, le courant aussi.



4.1-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U \cdot d(t)$$

$$\bar{V} = (2\alpha - 1)U$$

Remarque :

Maintenant on peut avoir $V_{\text{moy}} < 0$ (formule), le courant pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation négatif.

Quand α varie de 1 à 0, la tension moyenne varie de $-U$ à $+U$.

4.2-Principe du fonctionnement : on dispose de 4 quadrants.

$$\text{Modes de fonctionnement : } \left\{ \begin{array}{l} V > 0 \text{ et } I > 0, \text{ Rotation dans le premier sens.} \\ V < 0 \text{ et } I > 0, \text{ Phase de freinage (récupération de l'énergie).} \\ V < 0 \text{ et } I < 0, \text{ Rotation dans le deuxième sens.} \\ V > 0 \text{ et } I < 0, \text{ Phase de freinage (récupération de l'énergie).} \end{array} \right.$$

4.3-Stratégie de commande :

On procède ainsi :

A chaque période T :

On commande la fermeture de K_1 et K_2 pendant $0 < t < \alpha T$;

On commande la fermeture de K_3 et K_4 pendant $\alpha T < t < T$;

Pour $0 < t < \alpha T$:

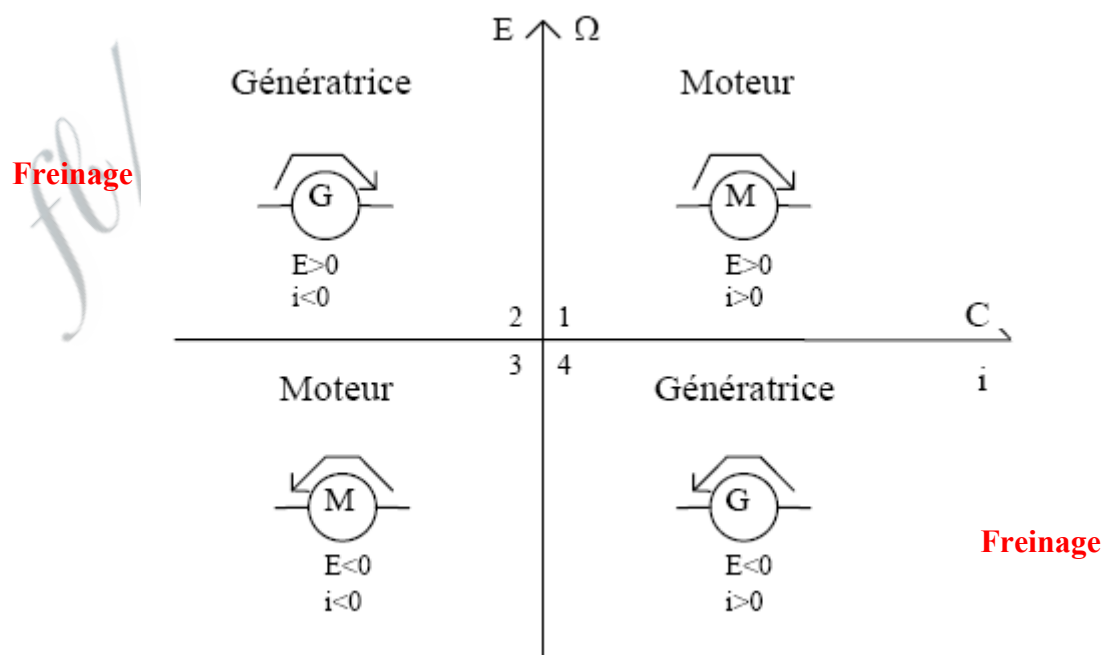
Si $I > 0$, il passe par K_1 et K_2 et $V = U$;

Si $I < 0$, il passe par D_3 et D_4 et $V = U$;

Pour $\alpha T < t < T$:

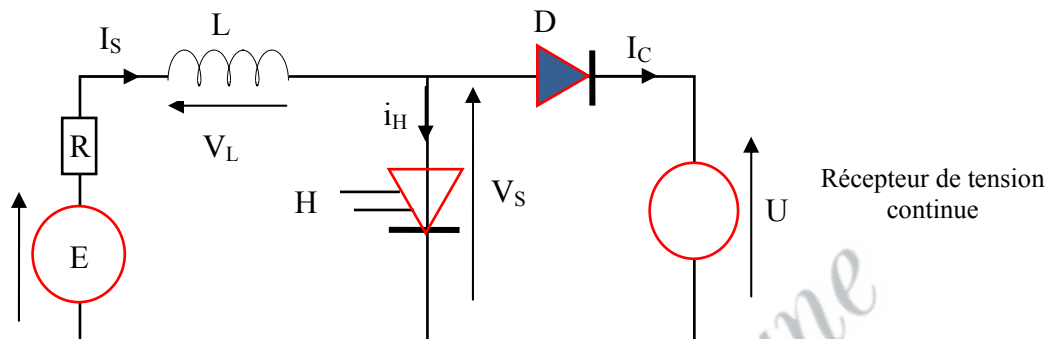
Si $I > 0$, il passe par D_1 et D_2 et $V = -U$;

Si $I < 0$, il passe par K_3 et K_4 et $V = -U$;

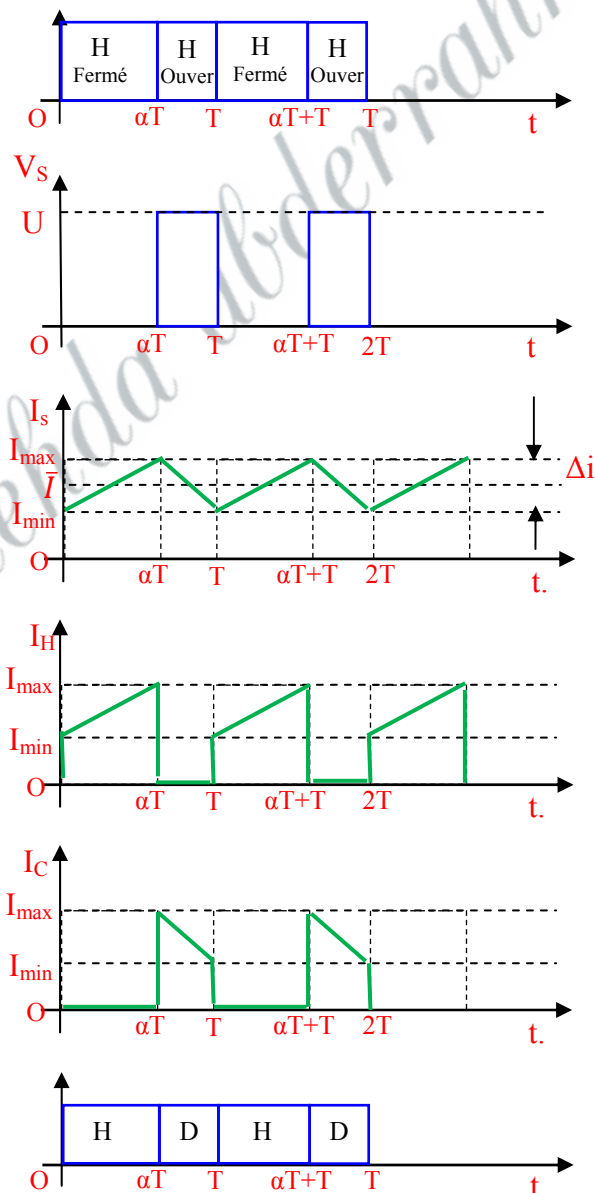


5-Hacheur parallèle (boost) :

Ce montage permet de produire une tension moyenne U à partir d'une source de tension continue $E < U$ (élevateur de tension). Le montage étudié est donné à la figure ci-dessous :



On donne les séquences de conduction de H et D dans le chronogramme suivant :



5.1-Analyse du fonctionnement :

Les deux interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

- $0 < t < \alpha T$: L'interrupteur **H est fermé** et l'intensité $i_s(t)$ croît linéairement :

$$\text{L'interrupteur H est fermé donc : } \left\{ \begin{array}{l} i_s = i_H \\ V_s = 0 \\ i_c = 0 \end{array} \right.$$

Remarque : en supposant la résistance R est négligeable.

$$V_s = E - V_R - V_L \rightarrow E = V_L$$

L'intensité du courant vérifier l'équation suivante :

$$E = L \frac{di_s}{dt} \rightarrow di_s = \frac{E}{L} dt$$

On obtienne la valeur du courant par l'intégration de l'équation précédente :

$$\int_0^{\alpha T} di_s = \int_0^{\alpha T} \frac{E}{L} dt$$

$$i_s(t) = \frac{E}{L} \cdot t + i_{min}$$

- $\alpha T < t < T$: L'interrupteur **H est ouvert**, l'inductance l se démagnétise et le courant $i_s(t)$ décroît :

$$\text{L'interrupteur H est ouvert : } \left\{ \begin{array}{l} i_s = i_c \\ i_H = 0 \\ V_s = U \end{array} \right.$$

L'intensité du courant dans la charge vérifier l'équation suivante :

$$V_s = U = E - L \frac{di_s}{dt}$$

$$di_s = \frac{E - U}{L} dt$$

On intègre l'équation précédente :

$$\int_{\alpha T}^T di_s = \int_{\alpha T}^T \frac{E - U}{L} dt$$

$$i_s(t) = \frac{E - U}{L} (t - \alpha T) + i_{max}$$

5.2-Valeur moyenne de la tension:

$$V_s = U = E - L \frac{di_s}{dt}$$

$$\bar{V}_s = E - L \frac{d\bar{I}_s}{dt} = E$$

La valeur moyenne de V_s vaut :

$$\bar{V}_s = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} 0 \cdot d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T U \cdot d(t)$$

$$\bar{V}_s = (1 - \alpha)U$$

On remplace \bar{V}_s par E.

$$E = (1 - \alpha)U \rightarrow U = E/(1 - \alpha)$$

Comme $0 < \alpha < 1$ Le hacheur parallèle est élévateur de tension.

Le réglage de α permet de faire varier la tension disponible aux bornes de la charge U :

5.3-Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{\alpha E}{Lf} = \frac{\alpha(1 - \alpha)U}{Lf}$$

Intérêt du hacheur parallèle :

Si on considère un moteur à courant continu entraînant une charge lourde (train par exemple) .lors d'une phase de freinage il est intéressant de récupérer l'énergie mécanique en le transformant en énergie électrique.

La machine fonctionne en génératrice mais sa f.e.m décroît car sa vitesse diminue est inférieure à la tension du réseau qui alimente le moteur .Pour assurer le transfert d'énergie vers le réseau, il faut un hacheur survolteur.

6. Exercices sur le hacheur série

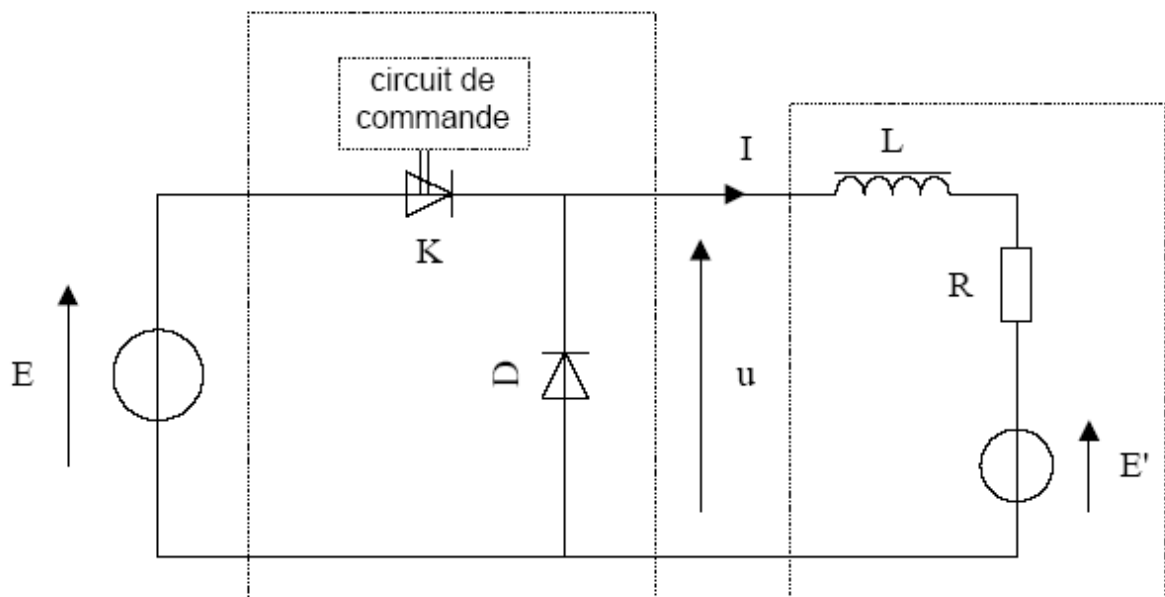
EXERCICE 1 :

On alimente un moteur à courant continu dont le schéma équivalent est donné ci-dessous, à l'aide d'un hacheur. L'interrupteur électronique K et la diode sont supposés parfaits. La période de hachage est T, le rapport cyclique α . L'inductance L du bobinage de l'induit du moteur a une valeur suffisante pour que la forme du courant dans l'induit soit pratiquement continue.

Le hacheur est alimenté par une tension continue $E = 220 \text{ V}$.

La f.é.m. E' du moteur est liée à sa vitesse de rotation n par la relation :

$E' = 0,20 \cdot n$ avec E' en V et n en tr/min. L'induit a pour résistance $R = 2,0 \Omega$.



1- Etude de la tension u pour $\alpha = 0,80$.

1-1- Représenter l'allure de la tension u.

On prendra comme instant origine celui où l'interrupteur K se ferme.

1-2- Déterminer l'expression de la valeur moyenne $\langle u \rangle$ de la tension u, en fonction de E et du rapport cyclique α .

Calculer sa valeur numérique.

2- Fonctionnement du moteur pour $\alpha = 0,80$.

Le moteur fonctionne en charge, la valeur moyenne du courant d'induit est $\langle I \rangle = 10 \text{ A}$.

Déterminer E' et en déduire n.

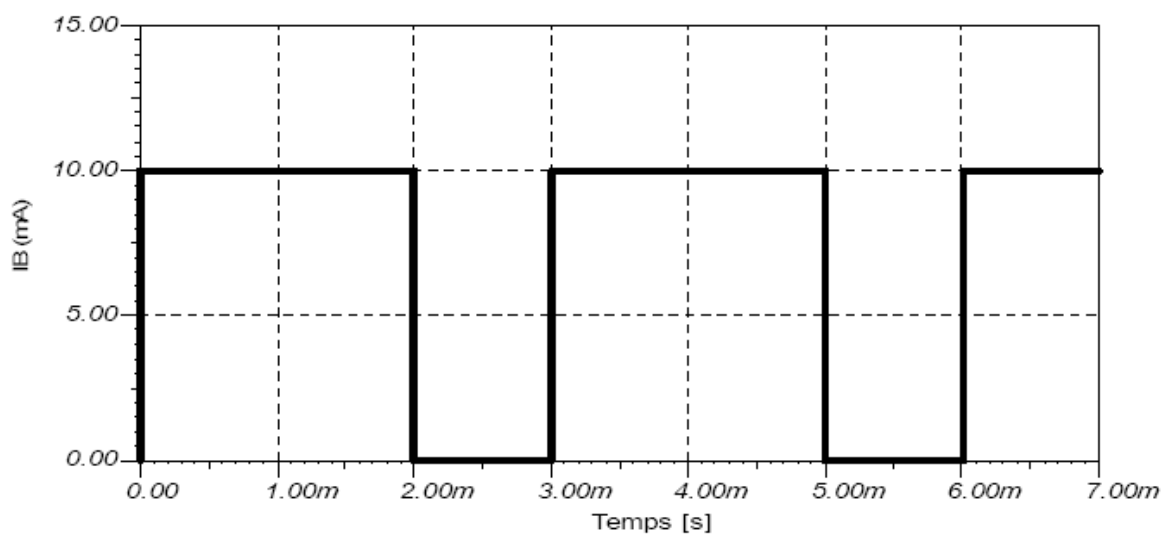
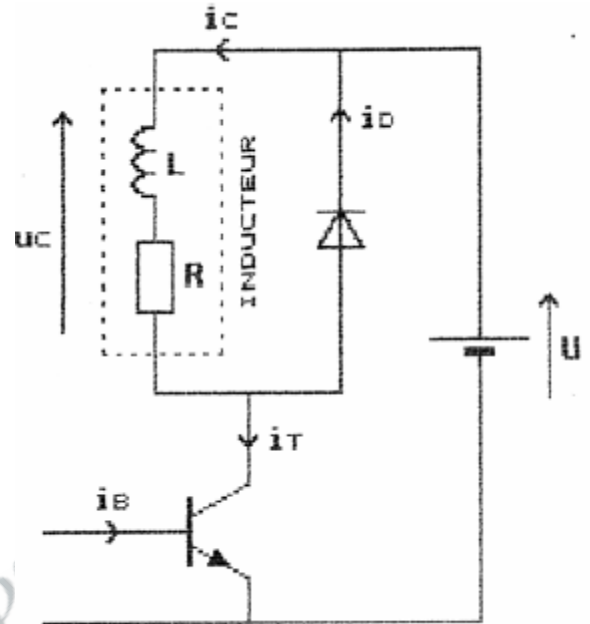
EXERCICE 2 :

On utilise un hacheur à transistor pour alimenter l'inducteur d'une machine à courant continu à excitation indépendante.

La tension d'alimentation délivrée par une batterie est $U = 24 \text{ V}$. L'inducteur est équivalent à une résistance $R = 20 \Omega$ en série avec une bobine d'inductance $L = 0,8 \text{ H}$. Quand l'intensité i_b vaut 10 mA , le transistor est saturé avec une tension collecteur-émetteur négligeable. La diode est supposée parfaite.

1. En fonctionnement normal, l'intensité i_b est maintenue constante et égale à 10 mA . Quelles sont alors les valeurs de u_c , i_c , i_T et i_D ?

2. Pour obtenir une fréquence de rotation du moteur plus élevée quand sa charge est réduite, on fait varier i_b comme l'indique la courbe ci-dessous.



2.1 Calculer la fréquence de hachage et le rapport cyclique.

2.2 Représenter l'allure de i_c , i_T et i_D en fonction du temps en considérant que i_c est continue.

2.3 Calculer les valeurs moyennes des grandeurs précédentes.

EXERCICE 3 :

Un hacheur alimente un moteur à excitation indépendante dont la f.é.m. E est proportionnelle à la fréquence de rotation n' exprimée en tours par minute : $E = kn'$ avec $k = 8 \cdot 10^{-2} \text{ V/(tr/min)}$.

La résistance R de l'induit du moteur est égale à $1,0\Omega$. on néglige les pertes du moteur autres que les pertes par effet Joule et on confond la tension u aux bornes du moteur avec sa valeur moyenne U .

La tension d'alimentation U_a du hacheur est égale à 150 V .

1. Quelle doit être la valeur α_1 du rapport cyclique α pour que la vitesse de rotation du moteur à vide soit égale à $n'_1 = 1\,500\text{ tr/min}$?
2. La charge entraînée par le moteur est telle que le courant dans l'induit a une intensité moyenne $I = 15\text{ A}$. Quelle est la vitesse de rotation n'_2 du moteur si $\alpha = \alpha_1$?
3. Quelle valeur α_2 faut-il donner à α pour que le moteur tourne de nouveau à $1\,500\text{ tr/min}$?

EXERCICE 4 :

On considère le circuit ci-contre où la source alimente une charge modélisée par une résistance R en série avec une bobine d'inductance L .

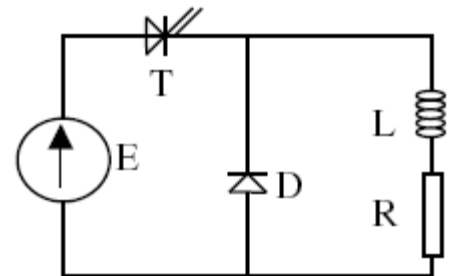
L'interrupteur T est fermé de $t = 0$ à $t = \alpha T$ et ouvert de $t = \alpha T$ à $t = T$, ceci se reproduisant avec une période T .

On suppose le régime périodique établi. On note I_{\max} et I_{\min} les valeurs maximale et minimale de $i(t)$ au cours d'une période.

- a) Ecrire l'équation différentielle vérifiée par $i(t)$, et en déduire sa valeur moyenne I .
- b) Résoudre les équations vérifiées par $i(t)$ pour $0 \leq t \leq \alpha T$ puis pour $\alpha T \leq t \leq T$.
- c) Déterminer les expressions de I_{\max} et I_{\min} .
- d) Déterminer l'ondulation de courant ΔI .

Pour quelle valeur de α cette ondulation est-elle maximale ?

Quelle est alors sa valeur ?



EXERCICE 5 :

Un hacheur série, parfait, alimente un moteur de traction électrique. La tension aux bornes du moteur se confond avec sa f.é.m. E . Le hacheur est commandé par un système périodique à la fréquence $f = 600\text{ Hz}$. Une tension continue $U = 750\text{ V}$ est appliquée à l'entrée du hacheur.

1. Pour la valeur du rapport cyclique $\alpha = 2/3$

1.1. Donner l'allure des courbes $v(t)$ et $u_H(t)$.

1.2. Quelle est la valeur de la f.é.m. E du moteur ?

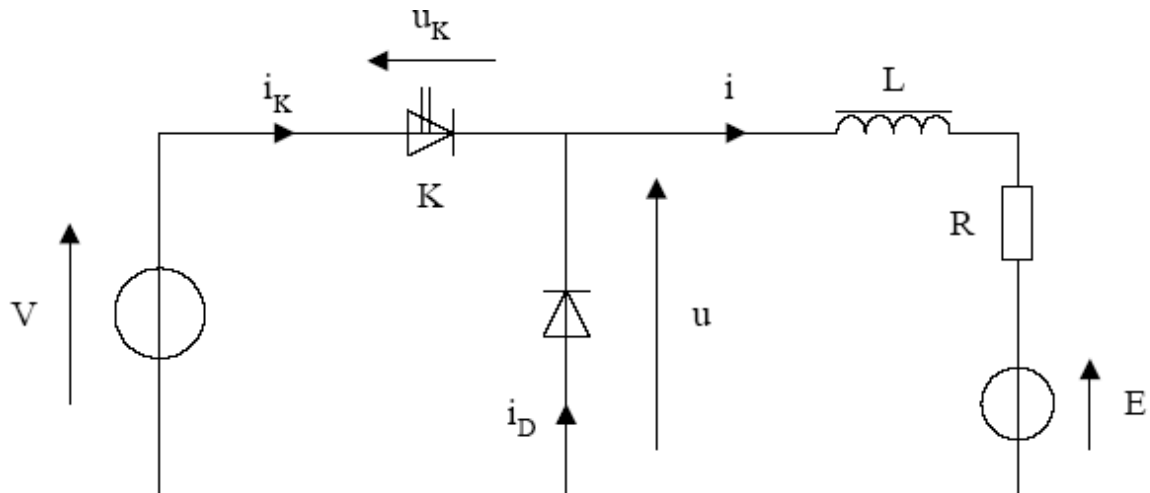
2. La valeur moyenne de l'intensité du courant qui traverse le moteur est 340 A . Les valeurs instantanées de i sont : à l'instant 0 : $i = 233\text{ A}$; à l'instant αt : $i = 447\text{ A}$. Les courbes des variations de $i(t)$ sont assimilables à des segments de droites.

2.1. En fonction du temps, représenter les intensités des courants dans le hacheur H et dans la diode de roue libre D.

2.2. Quelle est la valeur de l'inductance L ?

EXERCICE 6:

Un moteur à courant continu travaillant à couple constant est inclus dans le montage ci-dessous :



Le hacheur fonctionne à une fréquence $f = 500 \text{ Hz}$.

L'interrupteur K est fermé lorsque $0 \leq t \leq \alpha T$ et ouvert entre αT et T . La diode est supposée parfaite.

L'inductance de la bobine de lissage L est de valeur suffisante pour que le courant dans le moteur soit considéré comme constant : $i = I = \text{cte}$.

La résistance de l'induit du moteur est : $R = 1 \Omega$.

1- Représenter les allures de u et u_K en fonction du temps.

2- Exprimer la valeur moyenne de u en fonction de V et α .

3- Représenter les allures de i_K et i_D en fonction du temps.

4- Exprimer les valeurs moyennes des courants i_K et i_D en fonction de I et α .

5- Déterminer l'intensité I du courant dans le moteur en fonction de V, E, R et α .

6- Application numérique :

Calculer $\langle u \rangle$, I et $\langle i_D \rangle$ pour $V = 220 \text{ V}$, $E = 145 \text{ V}$ et $\alpha = 0,7$.

7- Établir la relation liant la vitesse n du moteur (en tr/min) à α pour $E = 0,153 n$, sachant que

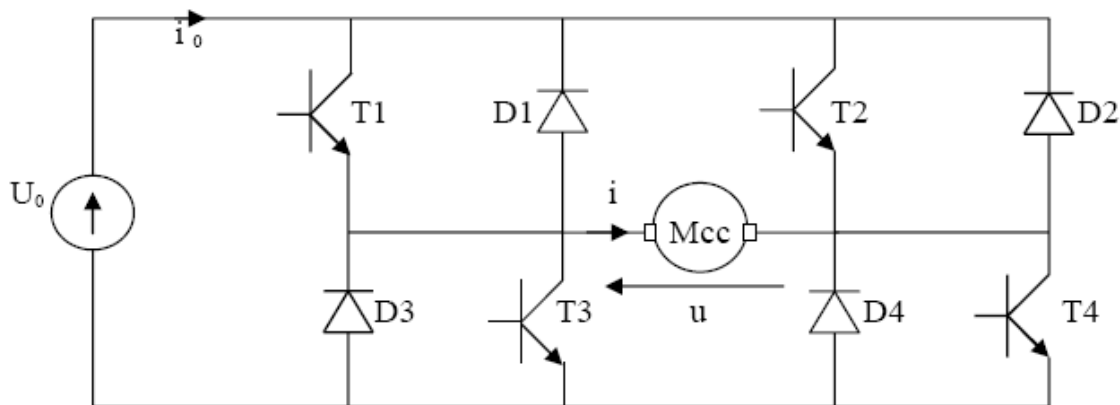
$R = 1 \Omega$, $V = 220 \text{ V}$ et $I = 9 \text{ A}$.

8- Tracer n en fonction de α .

7. Exercices sur le hacheur quatre quadrants

EXERCICE 1 :

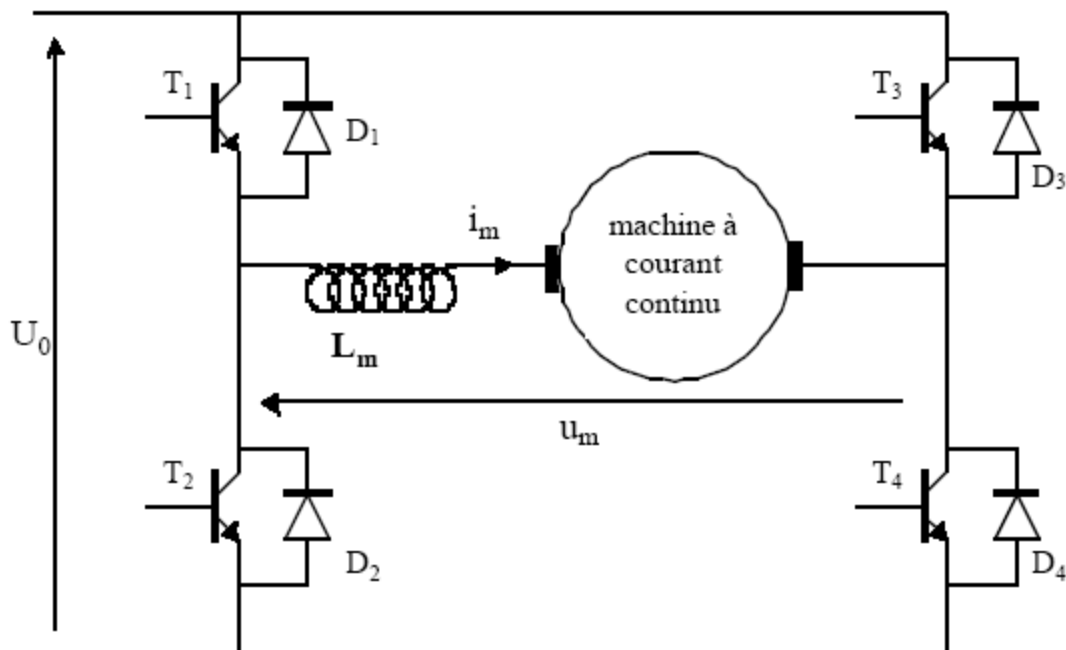
Afin de faire varier la tension aux bornes de la Mcc, à partir de la tension issue de la batterie d'accumulateur, nous utilisons un convertisseur continu - continu (hacheur). Dans ce convertisseur, les interrupteurs sont alternativement commandés à la fermeture et à l'ouverture sur une période de découpage (T). $T1$ et $T4$ sont commandés à la fermeture pendant une partie de la période (αT) pendant que $T2$ et $T3$ sont commandés à l'ouverture. Sur l'autre partie de la période de découpage $(1-\alpha) T$, ce sont $T2$ et $T3$ qui sont commandés à la fermeture et $T1$ et $T4$ à l'ouverture.



- Donner l'expression de la valeur moyenne de la tension (u), notée U_{moy} , aux bornes de la charge (ici la Mcc), en fonction de la source continue (U_0) et du rapport cyclique (α).
- Sachant que la charge est une Mcc, de résistance (R), d'inductance de l'induit (L) et de force contre-électromotrice (E), donner l'expression de l'ondulation du courant d'induit (i), notée ΔI , en fonction de U_0 , α , L et f (la fréquence de découpage).
- Quelle est la valeur de L , permettant d'obtenir une valeur de l'ondulation du courant inférieure à 5% du courant moyen maximum ? Application numérique : $U_0 = 48V$; $f = 20kHz$; $I_{moy} = 25A$.

EXERCICE 2 :

Le hacheur quatre quadrants est constitué de quatre transistors et de quatre diodes comme l'indique la figure ci-dessous suivante. Les semi-conducteurs sont supposés idéaux. Lorsqu'ils conduisent, ils sont assimilés à des courts circuits et lorsqu'ils sont bloqués, ils sont équivalents à des circuits ouverts.



Les signaux de commande des transistors sont « rectangulaires », de fréquence f (la période étant $T = 1/f$) et de rapport cyclique α . La commande est de type complémentaire et total, les transistors $T1$ et $T4$ étant pilotés simultanément, les transistors $T2$ et $T3$ l'étant également.

Lorsque $T1$ et $T4$ sont commandés pour conduire, $T2$ et $T3$ sont maintenus bloqués. Puis, lorsque $T1$ et $T4$ sont bloqués, $T2$ et $T3$ sont commandés pour conduire.

Dans cette partie, on suppose que la tension d'alimentation du hacheur est strictement constante, assimilée à U_0 . La machine à courant continu est modélisée par un dipôle de résistance R et de force électromotrice E . On rappelle que cette f.e.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation : $E = k.n$ (n désignant la vitesse de rotation en rd/s). On donne les valeurs numériques suivantes : $U_0 = 210 \text{ V}$, $L_m = 3 \text{ mH}$, $f = 20 \text{ kHz}$, $k = 1,12 \text{ V.s.rd}^{-1}$.

I- Etude des formes d'onde sur une période de découpage. Dans cette question, on néglige la résistance R de l'induit de la machine.

- Sur l'intervalle de temps $[0, \alpha T]$, que vaut la tension u_m ? Déterminer l'équation différentielle à laquelle satisfait le courant i_m sur cet intervalle en fonction de U_0 et E .
- Sur l'intervalle de temps $[\alpha T, T]$, que vaut la tension u_m ? Déterminer l'équation différentielle à laquelle satisfait le courant i_m sur cet intervalle en fonction de U_0 et E .
- Calculer la valeur moyenne U_m sur une période T en fonction de α et de U_0 .
- Déterminer l'ondulation du courant, sur une période de découpage en fonction de α , U_0 , L_m et f .
- Pour $\alpha = 0,75$, calculer numériquement U_m , E et ΔI .

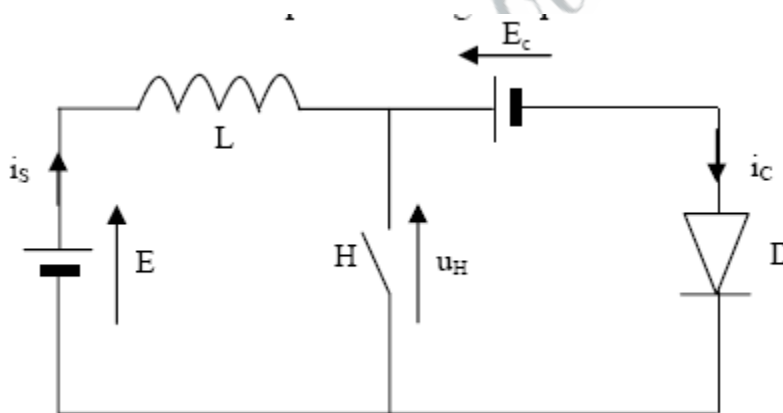
II-Tracé des courbes pour $\alpha = 0,75$ (la résistance de la machine étant toujours négligée).

- Tracer l'allure de la tension u_m sur deux périodes T .
- Tracer ensuite, sur le même graphe, l'allure du courant i_m sur deux périodes T lorsque ce courant i_m a une valeur moyenne positive.
- Préciser, sous le tracé précédent, quels sont les semi-conducteurs réellement parcourus par un courant sur les intervalles de temps $[0, \alpha T]$ et $[\alpha T, T]$.
- Si le courant i_m avait une autre valeur moyenne (positive ou négative), comment seraient modifiés les deux graphes précédents ? Répondre sans faire aucun autre tracé.

8. Exercices sur le hacheur parallèle

EXERCICE 1 :

Soit le montage fourni ci-dessous où H désigne un interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture. On se place en régime permanent de fonctionnement :



De $t_0=0$ à $t_1=2T/3$: H est fermé ;

De $t_1=2T/3$ à $t_2=T$: H est ouvert.

On précise les valeurs des composants et de la période :

$E=48V$; $L=25mH$; $T=0,5ms$.

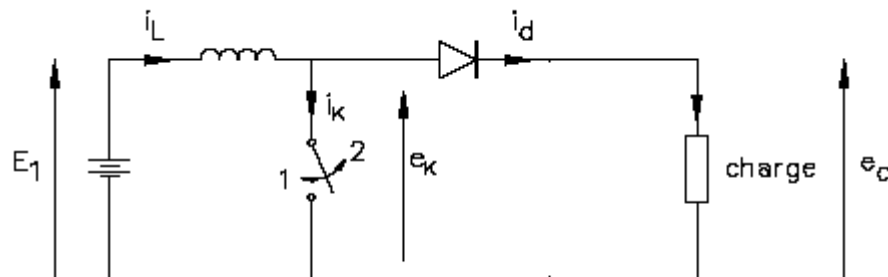
- Quel est l'état de la diode D lorsque H est fermé ?
- Comment évolue le courant $i_s(t)$ durant cette phase ? On supposera connue la valeur du courant à l'instant $t_0=0$: $i_s(t=0)=I_{min}=12A$.
- Lorsque l'interrupteur H est ouvert, que vaut la tension u_H ? Représenter les allures de u_H et de $i_s(t)$ pour l'intervalle t_1 à t_2 .

- 4) Exprimer la valeur moyenne de la tension aux bornes de H , et en déduire la valeur de E_c .
- 5) Calculer l'ondulation de i_s . Quelle est sa valeur maximum ?

EXERCICE 2 :

Un hacheur élévateur, comme celui présenté à la figure ci-dessous, est utilisé pour alimenter un transmetteur radio portatif, à partir d'une batterie dont la tension nominale fait $E_1 = 6 \text{ V}$. La charge équivalente de ce transmetteur représente 18 W . Une boucle d'asservissement maintient la tension de sortie réglée à $E_o = 12 \text{ V}$. La fréquence d'activation du commutateur statique est $f = 65 \text{ kHz}$. Supposez un fonctionnement idéal du hacheur et une opération en régime établi.

- a)- Démontrez que le gain du hacheur est égal à $1/(1 - \alpha)$.
- b)- Déterminez une valeur réaliste pour l'inductance du hacheur afin que l'ondulation de courant dans celle-ci ne dépasse pas $0,5 \text{ A}$.
- c)- Pour les conditions d'opération énoncées précédemment, tracez l'allure des formes d'onde suivantes:
- tension aux bornes du commutateur statique (e_k)
 - courant dans l'inductance (i_L)
 - courant dans le commutateur statique (i_k)
 - courant dans la diode de retour (i_d)



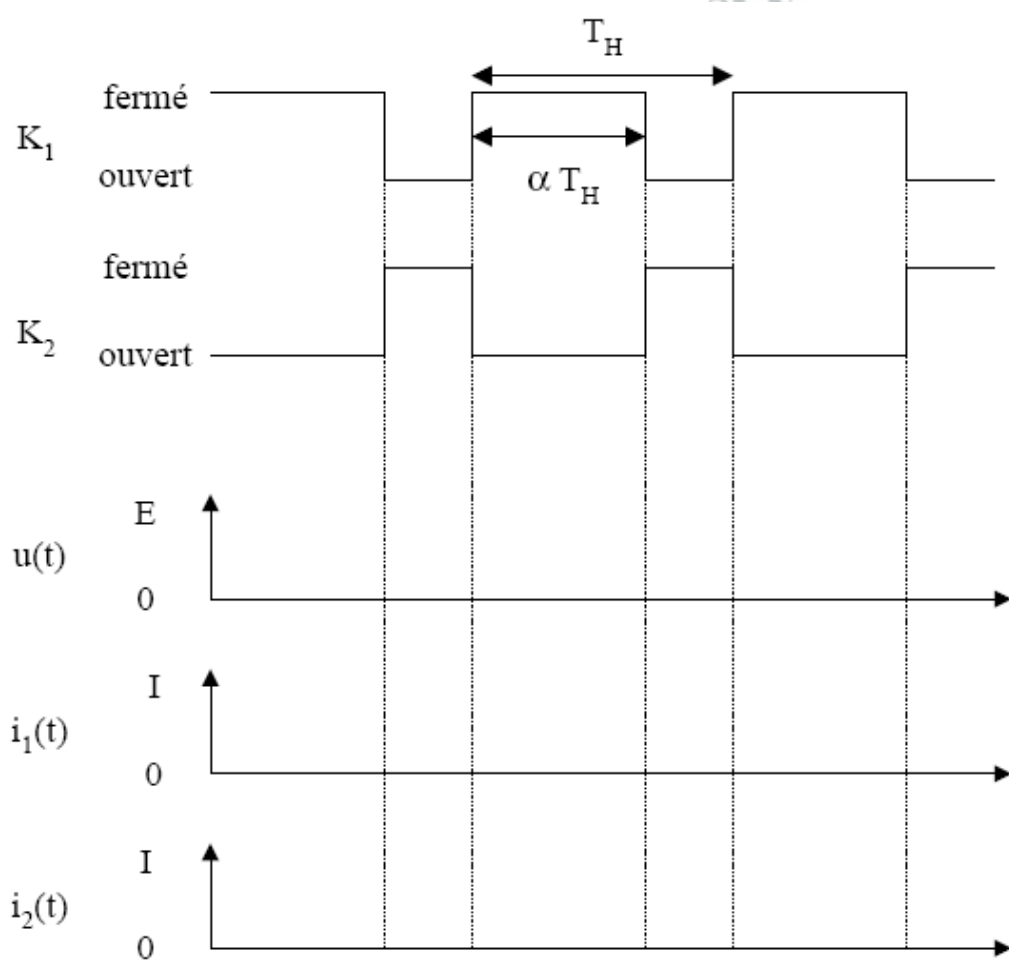
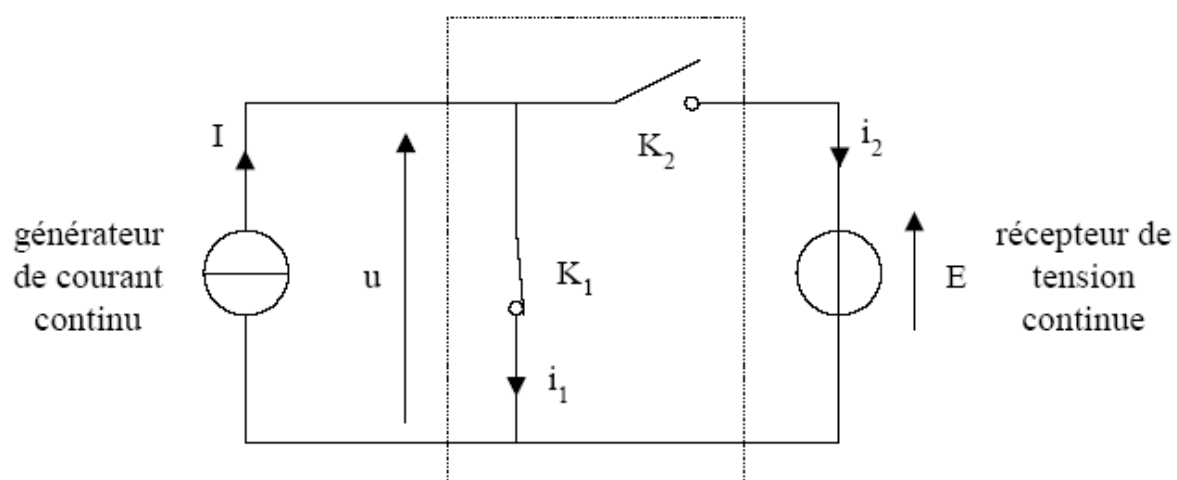
EXERCICE 3 :

Les deux interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

- 1- On donne les séquences de conduction de K_1 et K_2 .

Compléter les chronogrammes :

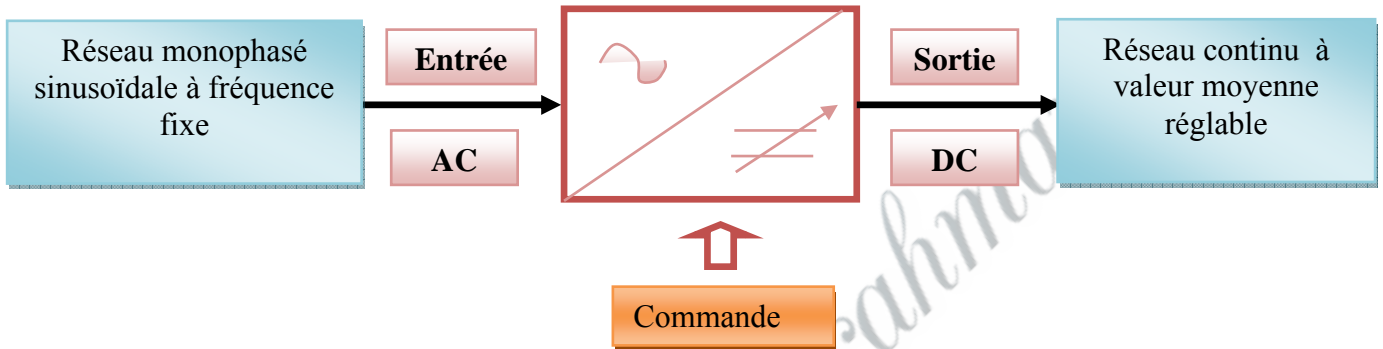
- 2- Donner la relation entre $\langle u \rangle$, α et E .



Le redressement commandé

I-Le redressement monophasé commandé

1-Définition : Le redressement commandé est la conversion d'une tension alternative en une tension continue de **valeur moyenne réglable**. 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.



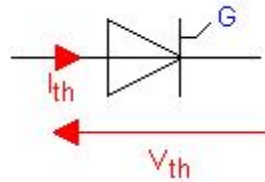
1.1-Le thyristor : En électrotechnique le thyristor est équivalent à un interrupteur unidirectionnel à fermeture commandée et à ouverture naturelle.

Symbole :

A : anode

K : cathode

G : gâchette (commande)



Remarque : L'intérêt du redressement commandé est qu'il permette de faire varier la tension moyenne en sortie du pont et donc de faire varier par exemple la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu.

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

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

1.2-Fonctionnement du thyristor :

***Pour amorcer le thyristor**

Il faut :

- que la tension v_{AK} soit positive ;
- une impulsion de courant sur la gâchette.

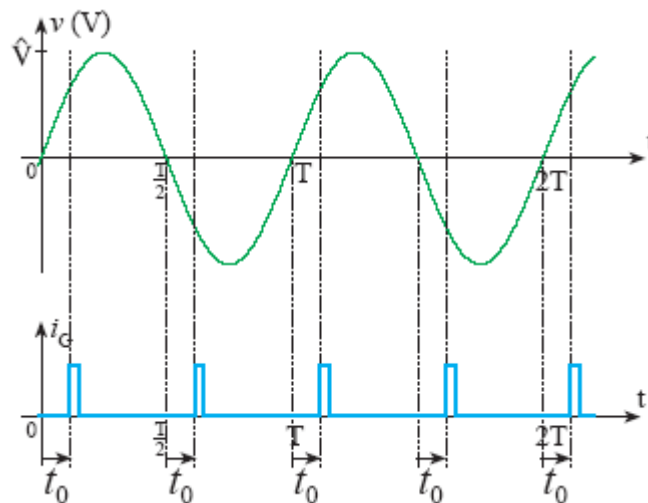
***Pour bloquer le thyristor**

Il faut :

- que le courant i_{AK} s'annule (blocage naturel).
- Appliquant une tension v_{AK} négative (blocage forcé).

Angle de retard à l'amorçage

L'instant où l'on envoie l'impulsion de gâchette par rapport au début de chaque demi-période s'appelle le retard à l'amorçage. Ce retard peut-être réglé, ce qui permet de faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie.



2-Redressement commandé mono-alternance :

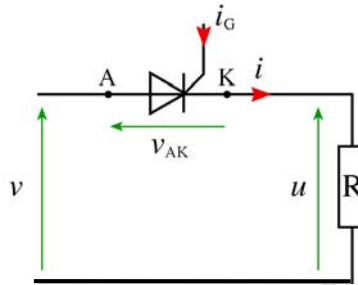
2.1-Débit sur charge résistive :

On considère le thyristor T_H parfait.

$$v(t) = \hat{V} \sin \omega t$$

δ est appelé angle de retard à l'amorçage.

Le thyristor est passant qu'à partir du moment où l'on envoie le signal de gâchette et à la condition que la tension v_{AK} soit positive



2.2- Analyse du fonctionnement :

Quelque soit l'état de T_H on a :

$$v = v_{AK} + u$$

$$v(t) > 0 \rightarrow v_{AK} > 0$$

Le thyristor peut être amorcé.

-Si $i_G = 0$

T_H reste bloqué donc :

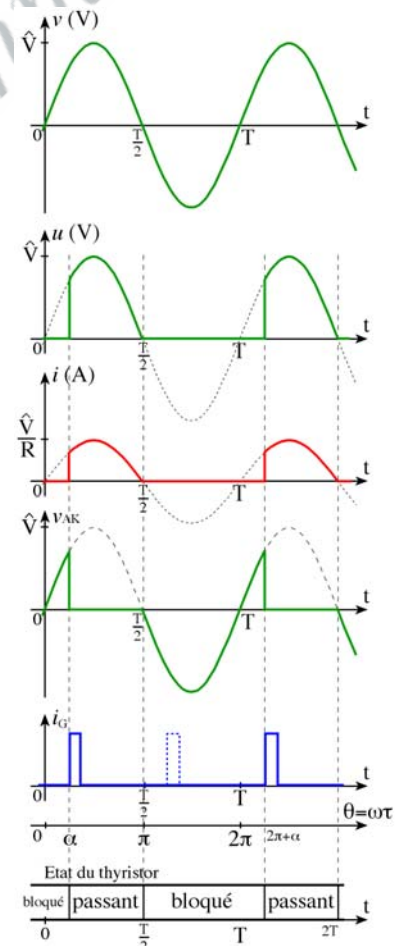
$$i = 0, u = 0 \text{ et } v_{AK} = v$$

- Si une impulsion de courant i_G suffisante apparaît sur sa gâchette alors T_H devient passant.

$$v_{AK} = 0, u = v, i = u/R$$

Si $v(t) = 0 \rightarrow i = 0$: le thyristor se bloque naturellement.

$v(t) < 0 \rightarrow v_{AK} < 0$: le thyristor ne peut pas être amorcé. Il reste bloqué même si une impulsion apparaît sur sa gâchette.



2.3-Valeur moyenne de la tension redressée :

Calculons la valeur moyenne \bar{u} de $u(t)$:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{\delta}^{\pi} \hat{u} \sin \theta d\theta = \frac{\hat{u}}{2\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi}$$

$$\bar{u} = \frac{\hat{u}}{2\pi} (1 + \cos \delta)$$

Remarque 1: la valeur moyenne de la tension peut être ajustée en fonction de la valeur de l'angle de retard à l'amorçage.

2.4-Valeur du courant moyen :

L'écriture de la relation instantanée :

$$u = R \cdot i$$

On en déduit l'expression du courant moyen :

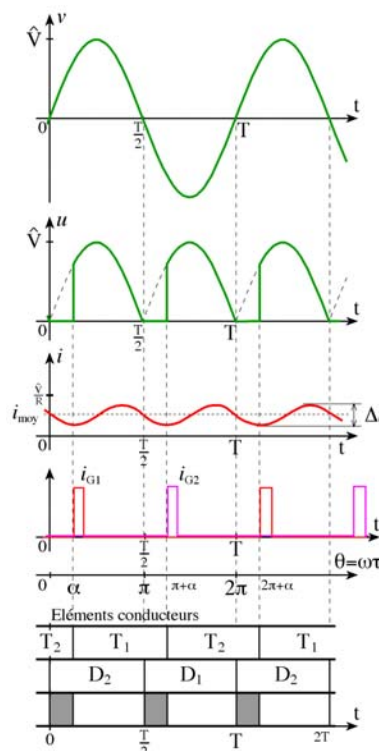
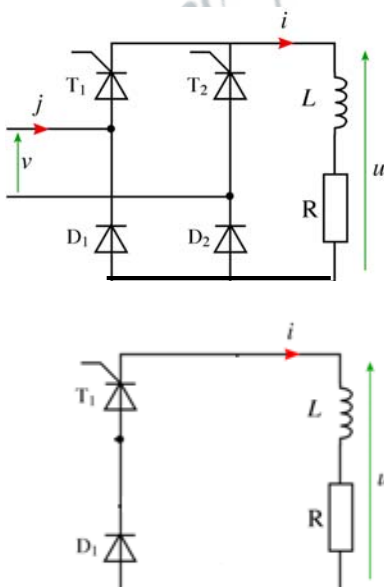
$$\bar{i} = \bar{u}/R$$

Remarque 2: Le courant de gâchette est généré par un circuit électronique de commande qui va permettre de faire varier l'angle de retard à l'amorçage et par conséquent la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge.

3-Redressement commandé double-alternance

3.1-Pont mixte :

3.1.1-Débit sur charge inductive :



La tension de sortie u s'annule lorsque v devient négatif. Cela est dû à la présence des diodes.

Durant les instants où la tension est nulle, la charge fonctionne en roue libre.

a)-Analyse du fonctionnement.

Pour l'intervalle $\delta \leq \theta < \pi + \delta$:

- à $\theta = \delta$, on amorce T_{H1} , alors :
- $v_{TH1} = 0$; $v_{D2} = 0$ car D_2 polarisée en directe donc passante ;
- $u = v > 0$;
- $i_{TH1} = i_{D2} = i$;
- $j = i > 0$;
- $v_{TH2} = v_{D1} = -v < 0$;
- $i_{TH2} = i_{D1} = 0$ car D_1 polarisée en inverse donc bloquée.
- pour $\theta = \pi$: $v = 0$ or $i = i_{TH1} \neq 0 \Rightarrow T_{H1}$ 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 $\pi < \theta < \pi + \delta$: $v(t) < 0$:

$v_{TH2} = -v > 0 \Rightarrow T_{H2}$ peut être amorcé mais on ne le fait pas.

\Rightarrow tant que $\pi \leq \theta < \pi + \delta$, T_{H1} continue d'assurer la conduction avec D_1 puisque $i > 0$, la charge est court-circuitée : **phase de roue libre.**

b)-Valeur moyenne de la tension redressée :

Calculons la valeur moyenne \bar{u} de $u(t)$:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} \hat{u} \sin \theta d\theta = \frac{\hat{u}}{\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi}$$

$$\bar{u} = \frac{\hat{u}}{\pi} (1 + \cos \delta)$$

Remarque 1: la valeur moyenne de la tension est doublée par rapport au mono alternance.

c)-Valeur du courant moyen :

L'écriture de la relation instantanée :

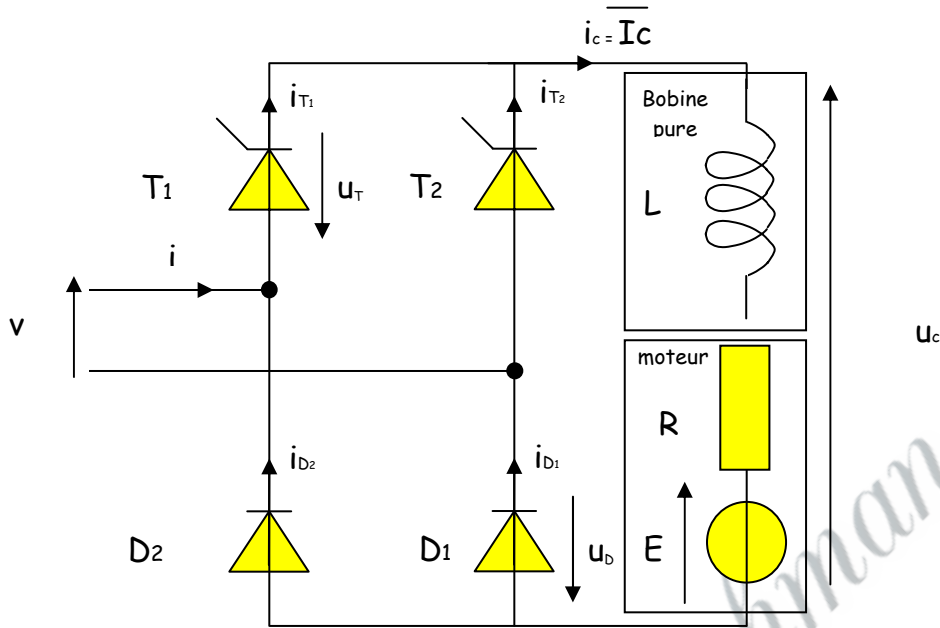
$$u = R \cdot i + l \frac{di}{dt}$$

On en déduit l'expression du courant moyen :

$$\bar{i} = \frac{\bar{u}}{R} \qquad \overline{i_{th1}} = \overline{i_{th2}} = \frac{\bar{i}}{2}$$

Chaque composant conduit durant une demi-période du réseau. Le courant moyen maximum est la moitié de ceux dans la charge.

3.1.2-Débit sur charge (R –L-E) moteur à courant continu :



Valeur moyenne de la tension redressée :

Calculons la valeur moyenne \bar{u} de $u(t)$:

$$\bar{u}_c = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} \hat{u}_c \sin \theta d\theta = \frac{\hat{u}_c}{\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi}$$

$$\bar{u}_c = \frac{\hat{u}_c}{\pi} (1 + \cos \delta)$$

Valeur du courant moyen :

L'écriture de la relation instantanée :

$$u_c = R \cdot i_c + l \frac{di}{dt} + E$$

On en déduit l'expression du courant moyen :

$$\bar{i}_c = \frac{\bar{u}_c}{R} - \frac{E}{R}$$

Application : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu. Le pont mixte alimente un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante, sa fem s'exprime en fonction de la vitesse de rotation par la relation :

$$E = K \cdot n \quad (\text{avec } n \text{ en tr/s})$$

La tension u_c s'exprime en fonction des éléments de la charge par la relation :

$$E = u_c - R \cdot i - l \frac{di}{dt}$$

En valeur moyenne :

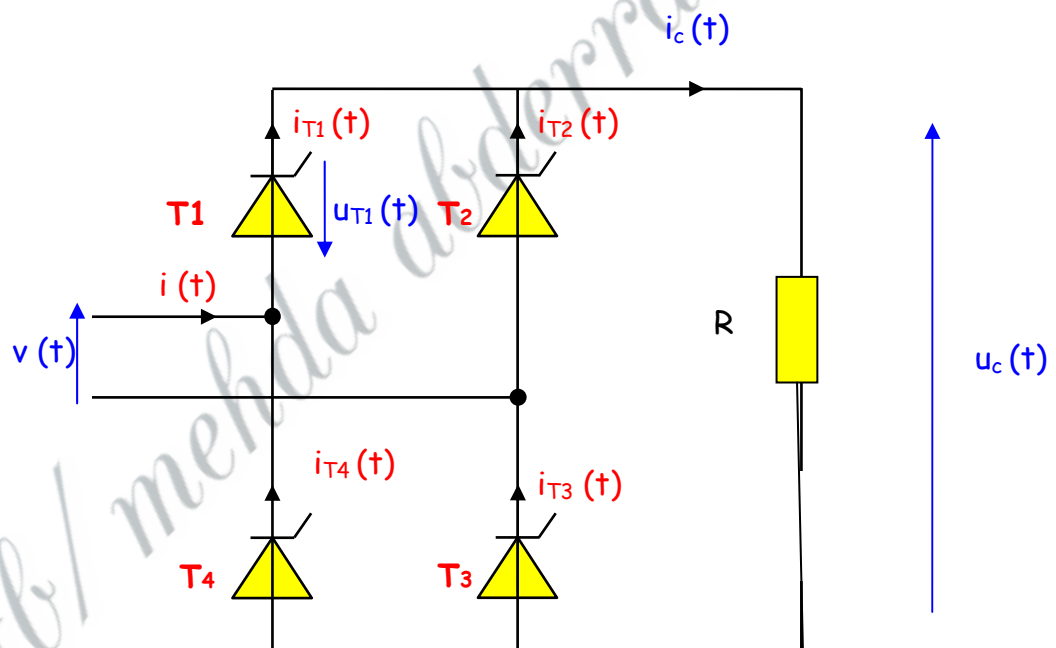
$$E = \overline{u_c} - R \cdot \bar{i} = K \cdot n$$

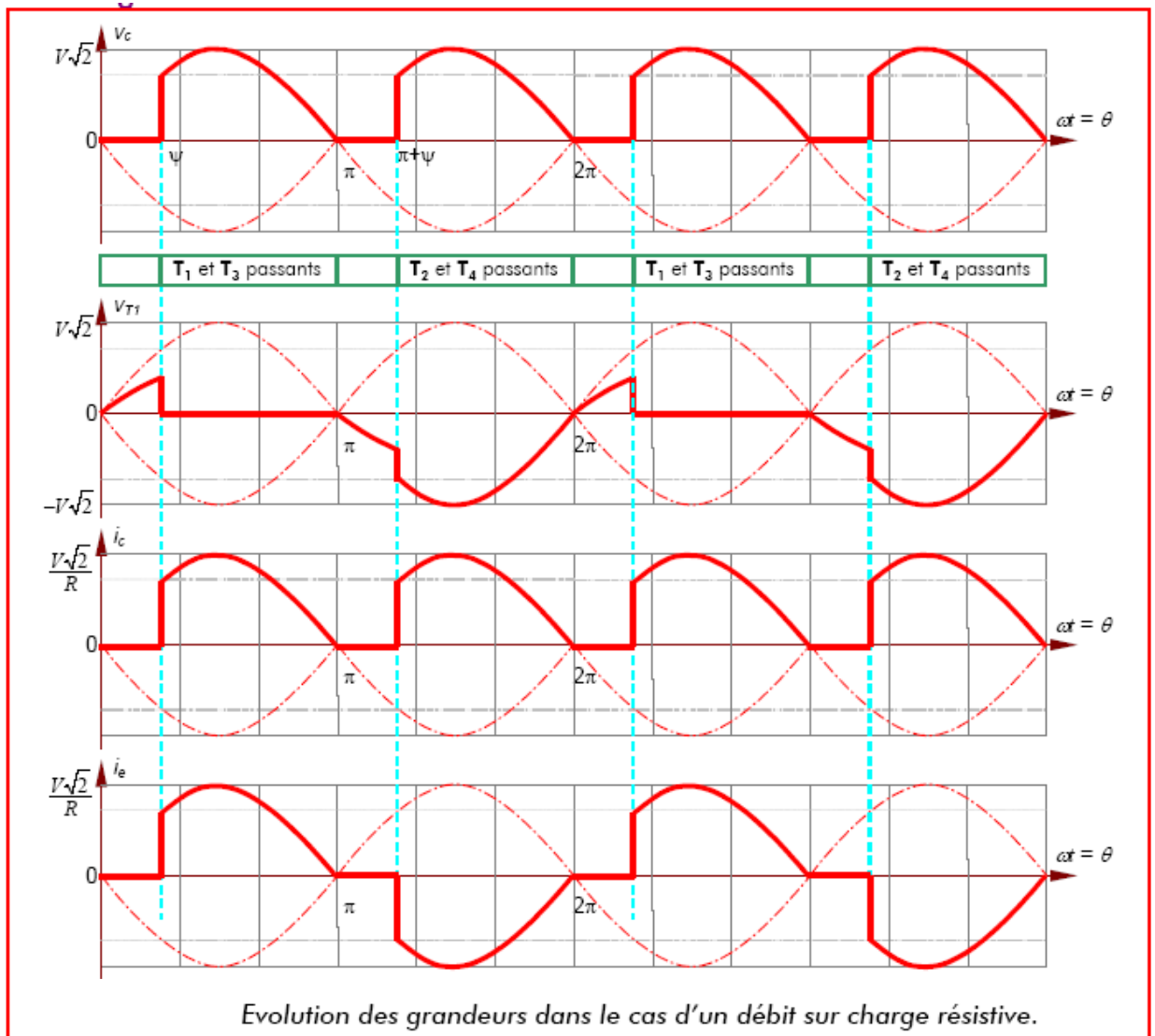
La vitesse de rotation du moteur s'exprime en fonction de l'angle δ :

$$n = \frac{1}{K} \left[\frac{\widehat{u_c}}{\pi} (1 + \cos \delta) - R \cdot \bar{i} \right]$$

3.2-Pont tout thyristors

3.2.1-Débit sur charge résistive (R) :





a/Valeur moyenne de la tension redressée :

Calculons la valeur moyenne \bar{u} de $u(t)$:

$$\bar{u}_c = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} \widehat{u}_c \sin \theta d\theta = \frac{\widehat{u}_c}{\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi}$$

$$\bar{u}_c = \frac{\widehat{u}_c}{\pi} (1 + \cos \delta)$$

b/Valeur du courant moyen :

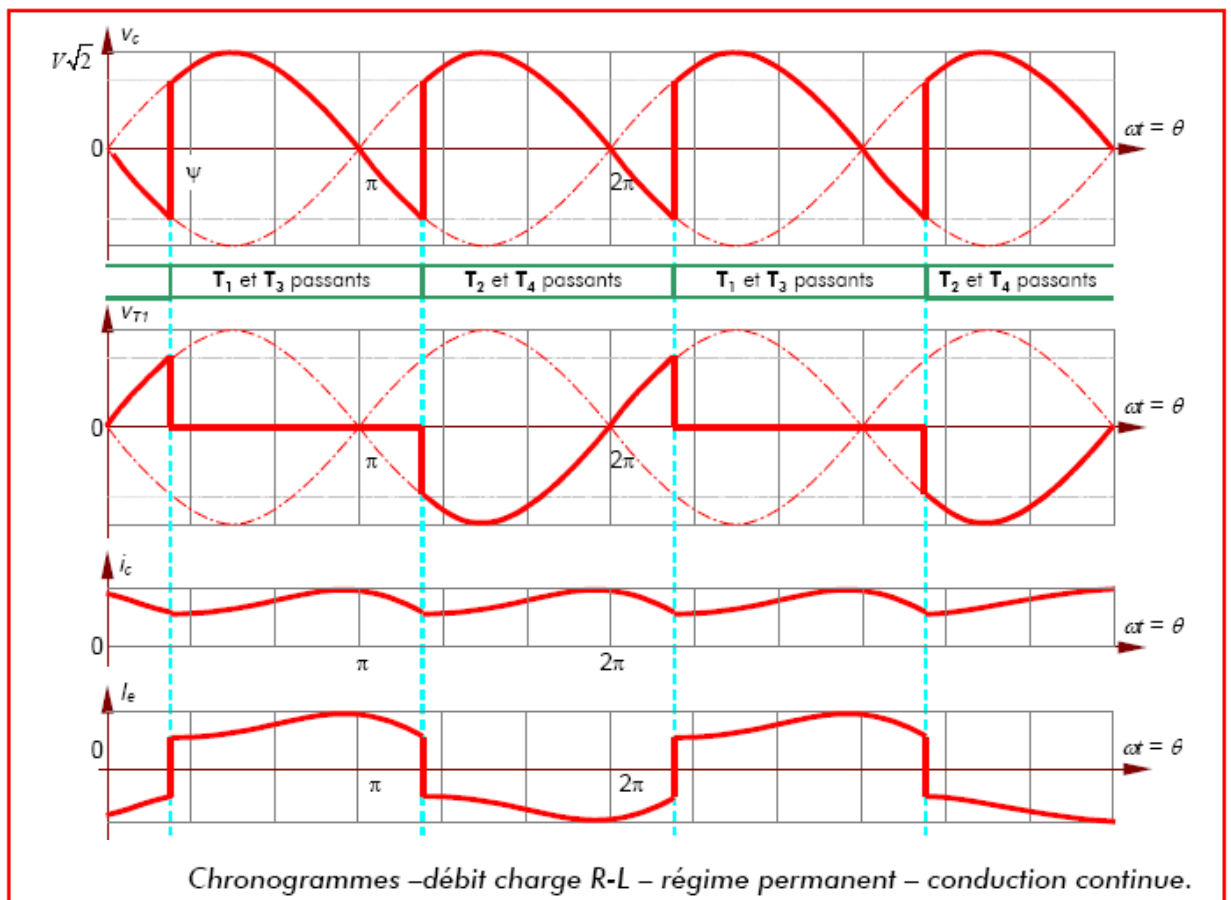
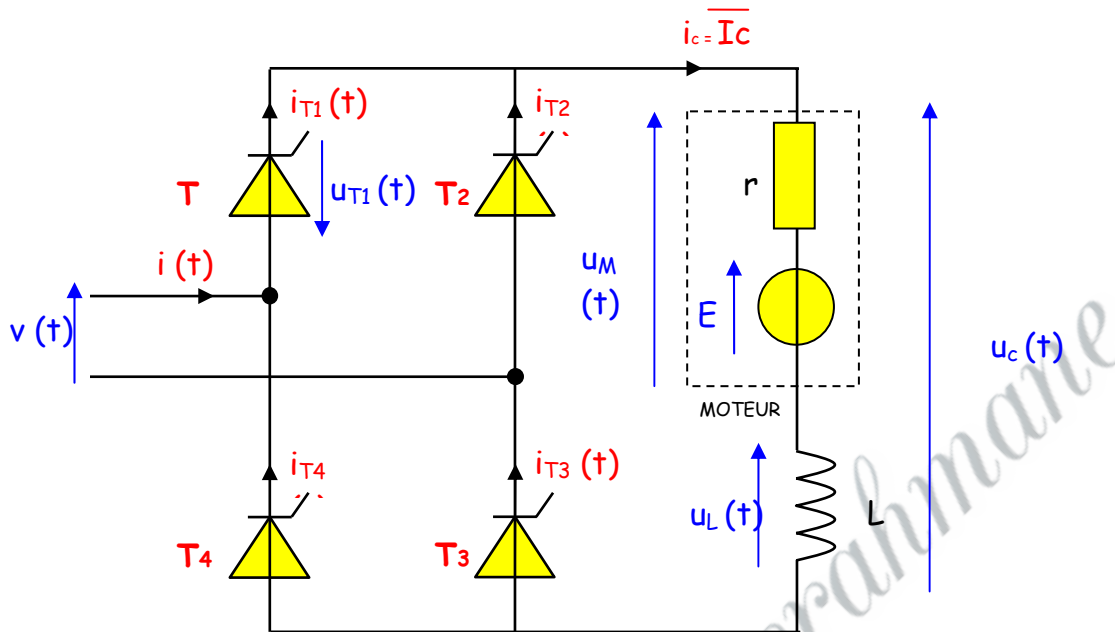
L'écriture de la relation instantanée :

$$u_c = R \cdot i_c$$

On en déduit l'expression du courant moyen :

$$\bar{i}_c = \frac{\bar{u}_c}{R}$$

3.2.2-Débit sur charge (R-L-E) moteur à courant continu :



a/Valeur moyenne de la tension redressée :

Calculons la valeur moyenne \bar{u} de $u(t)$:

$$\bar{u}_c = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi+\delta} \widehat{u}_c \sin \theta d\theta = \frac{\widehat{u}_c}{\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi+\delta}$$

$$\bar{u}_c = 2 \frac{\widehat{u}_c}{\pi} \cos \delta$$

b/Valeur du courant moyen :

L'écriture de la relation instantanée :

$$u_c = R \cdot i_c + l \frac{di}{dt} + E$$

On en déduit l'expression du courant moyen :

$$\bar{i}_c = \frac{\bar{u}_c}{R} - \frac{E}{R}$$

c/Analyse énergétique :

La puissance active reçue par la charge :

$$P = u_{cmoy} * i_{cmoy}$$

La puissance apparente fournie par le réseau :

$$S = V * i_{cmoy}$$

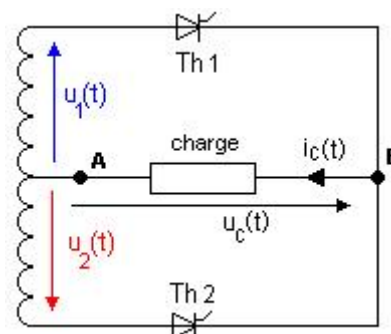
Remarque : Si on considère que le convertisseur est parfait, la puissance fournie par le réseau est identique à la puissance de la charge.

d/Facteur de puissance (F_p) :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{u_{cmoy}}{V}$$

3.3-Transformateur à point milieu avec deux thyristors

Avec ce montage, on obtient le même résultat trouvé avec l'utilisation d'un pont tout thyristors, mais la tension redressée représente la moitié de l'enroulement secondaire.



II-Le redressement triphasé commandé

1-Redressement triphasé commandé simple alternance :

Le montage redresseur P3 à thyristors est constitué de trois thyristors, connecté chacun à une phase du secondaire d'un transformateur triphasé, dont les enroulements secondaires sont groupés en étoile.

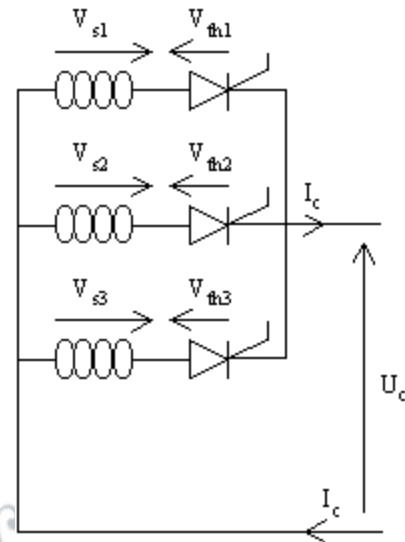
Etude du fonctionnement

A partir du réseau triphasé, on obtient au secondaire du transformateur un système triphasé équilibré de tensions (V_1, V_2, V_3) , qu'on notera

$$V_1 = V_m \sin \omega t$$

$$V_2 = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$V_3 = V_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$$



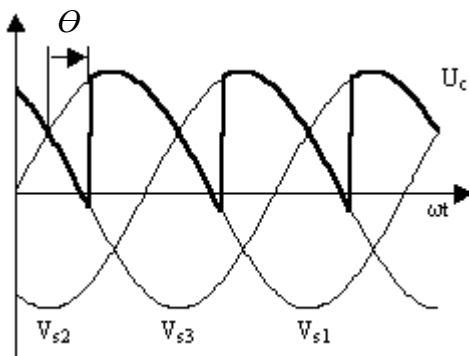
Le transformateur d'alimentation n'est pas nécessaire en principe au fonctionnement, mais il sera en général présent pour assurer une tension convenable à l'entrée du montage. Les enroulements primaires ne sont pas représentés sur le schéma.

Les thyristors sont débloqués avec un retard en angle de α , c'est à dire que des impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles :

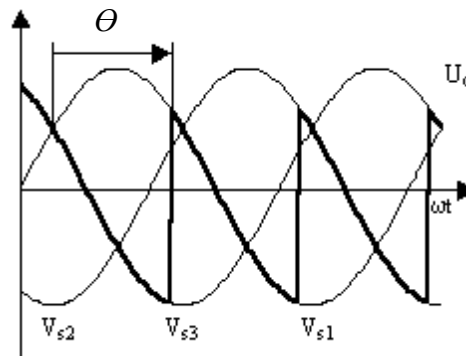
pour th1: $\omega t = \left(\frac{\pi}{6} + \theta\right) + 2k\pi$

pour th2: $\omega t = \left(\frac{5\pi}{6} + \theta\right) + 2k\pi$

pour th3: $\omega t = \left(\frac{3\pi}{2} + \theta\right) + 2k\pi$



$$\theta \leq \pi/2$$



$$\theta \geq \pi/2$$

Valeur moyenne de la tension redressée

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

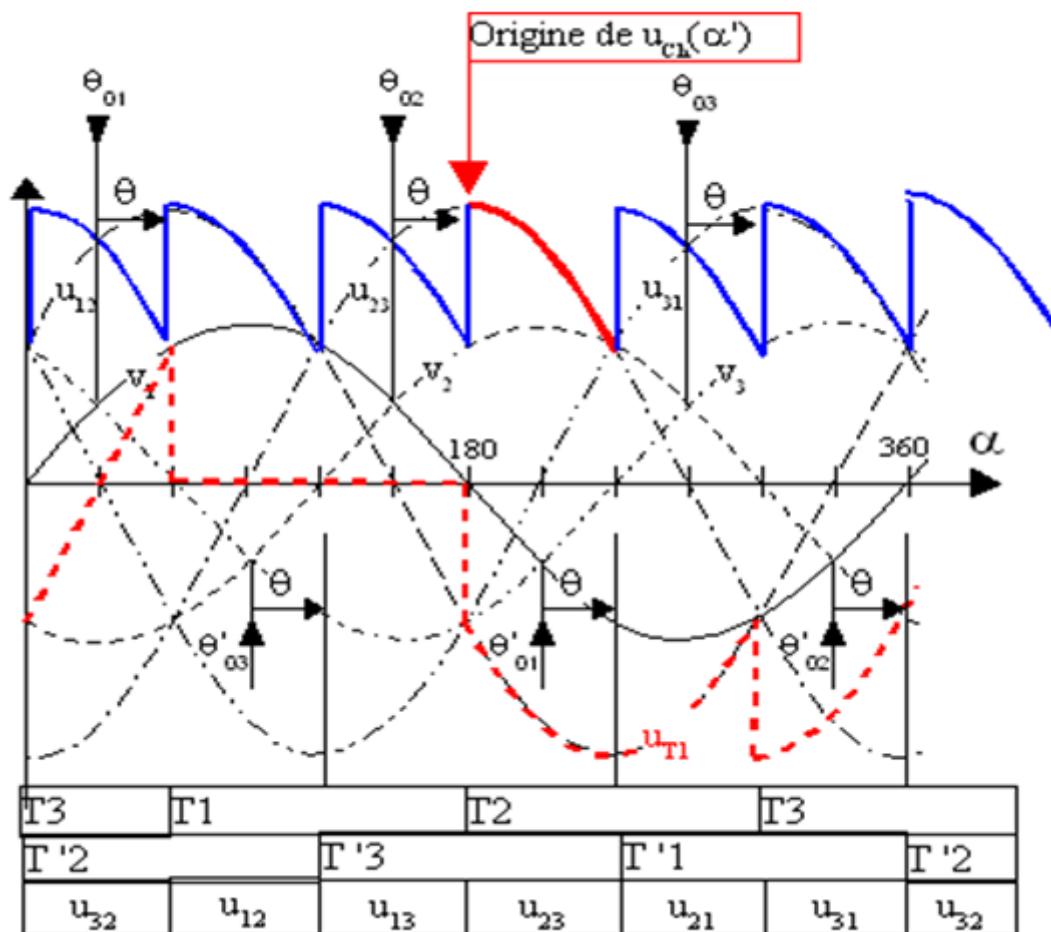
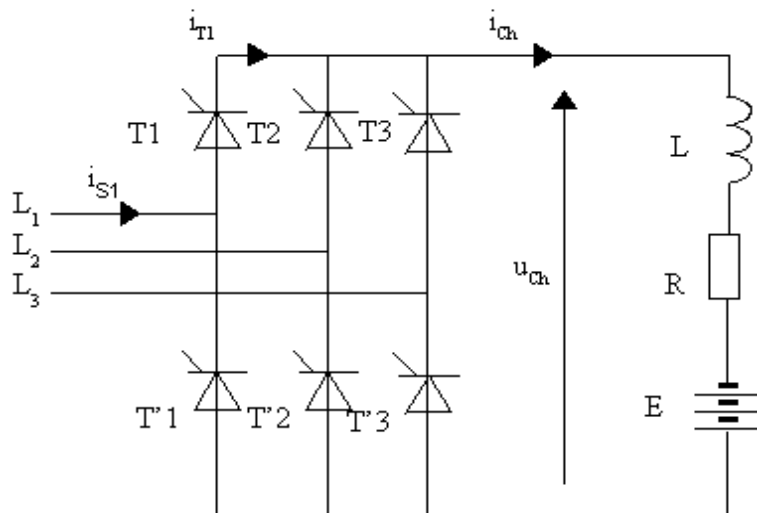
$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int U_c(t) d(t) = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\theta}^{\frac{5\pi}{6}+\theta} V_m \sin(\alpha) d(\alpha)$$

$$U_{cmoy} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos(\theta)$$

- Pour $\theta \leq \pi/2$, la valeur moyenne de la tension redressée est positive, il en est donc de même pour la puissance active fournie par le réseau au récepteur ($P = U_{cmoy} \cdot I_c$); le transfert de puissance se fait du coté alternatif vers le coté continu, le système fonctionne en redresseur.

-Pour $\theta \geq \pi/2$, la valeur moyenne de la tension redressée est négative ainsi donc que la puissance active; le transfert de puissance se fait du coté continu vers le coté alternatif, le système fonctionne en onduleur ou redresseur inversé.

2-Pont triphasé tout thyristors



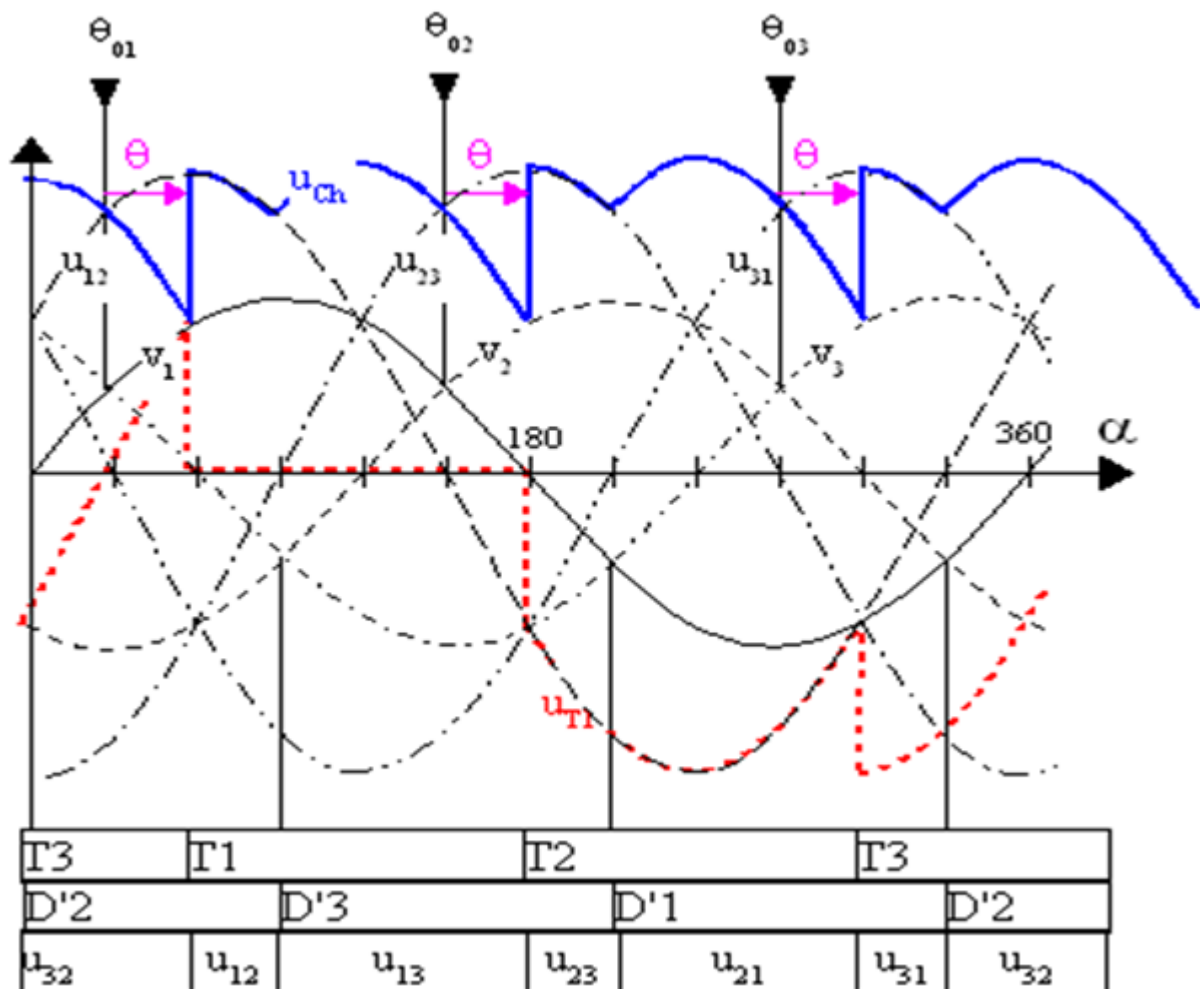
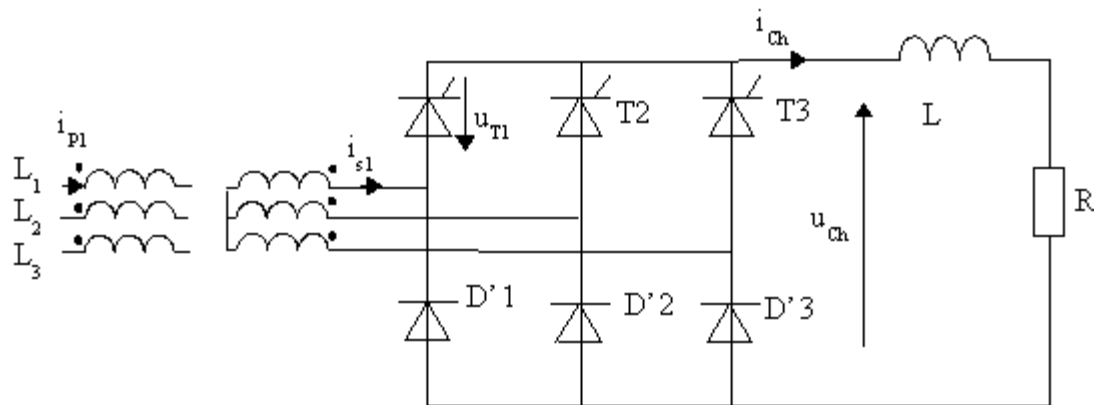
Valeur moyenne de la tension redressée

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int U_c(t) d(t) = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\theta}^{\pi-\frac{\pi}{3}+\theta} u_m \sin(\alpha) d(\alpha) = \frac{3}{\pi} U_m \cdot \cos(\theta)$$

3-Pont triphasé mixte

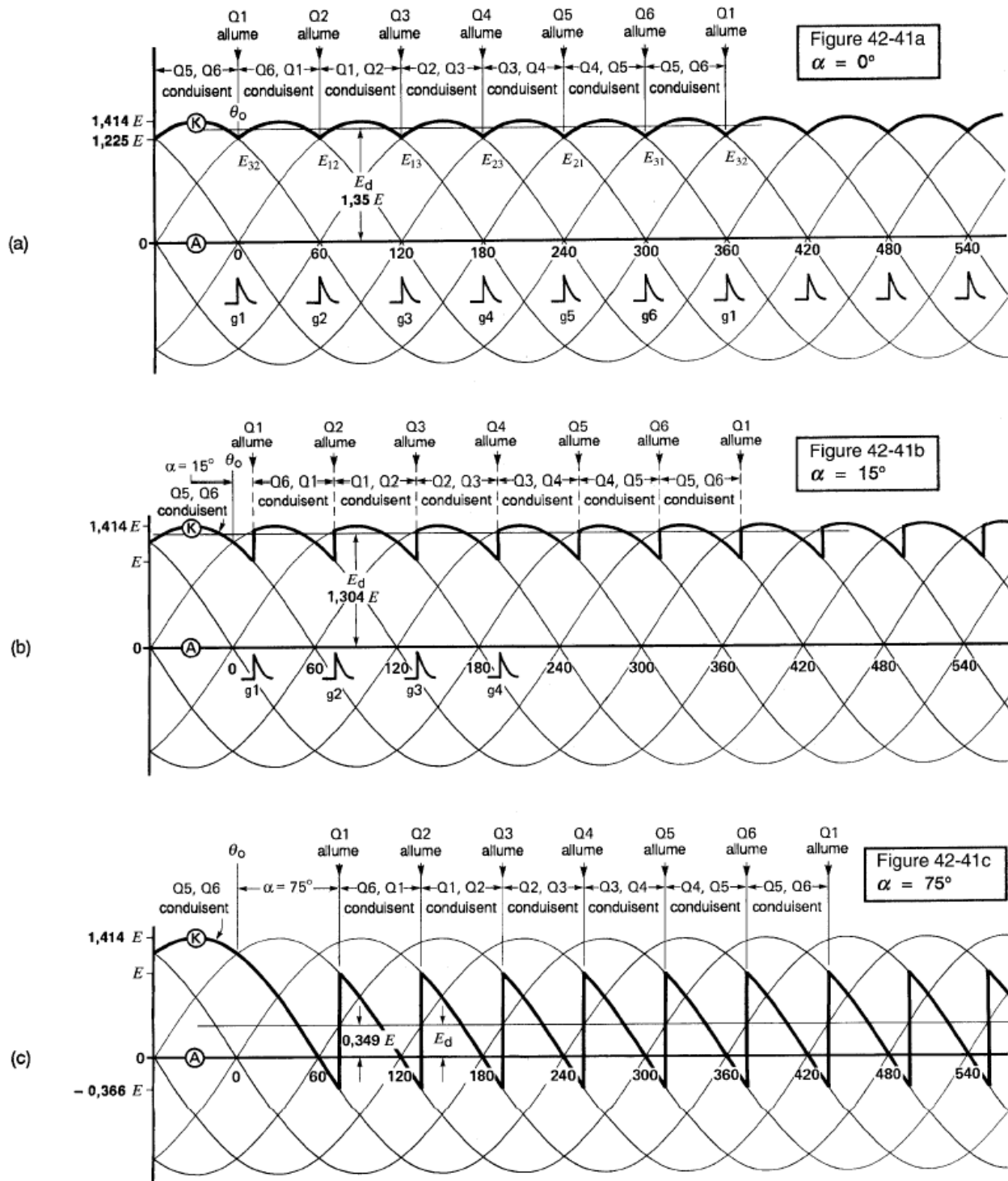
Dans ce montage, on trouve 3 thyristors et 3 diodes.



Valeur moyenne de la tension redressée

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$U_{cmoy} = \frac{3U_m}{\pi} \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right)$$



Propriétés : Quels que soient les angles α et β on a :

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) + \cos(\alpha) \sin(\beta)$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) - \cos(\alpha) \sin(\beta)$$

Exercices sur Le redressement monophasé commandé

EXERCICE 1 :

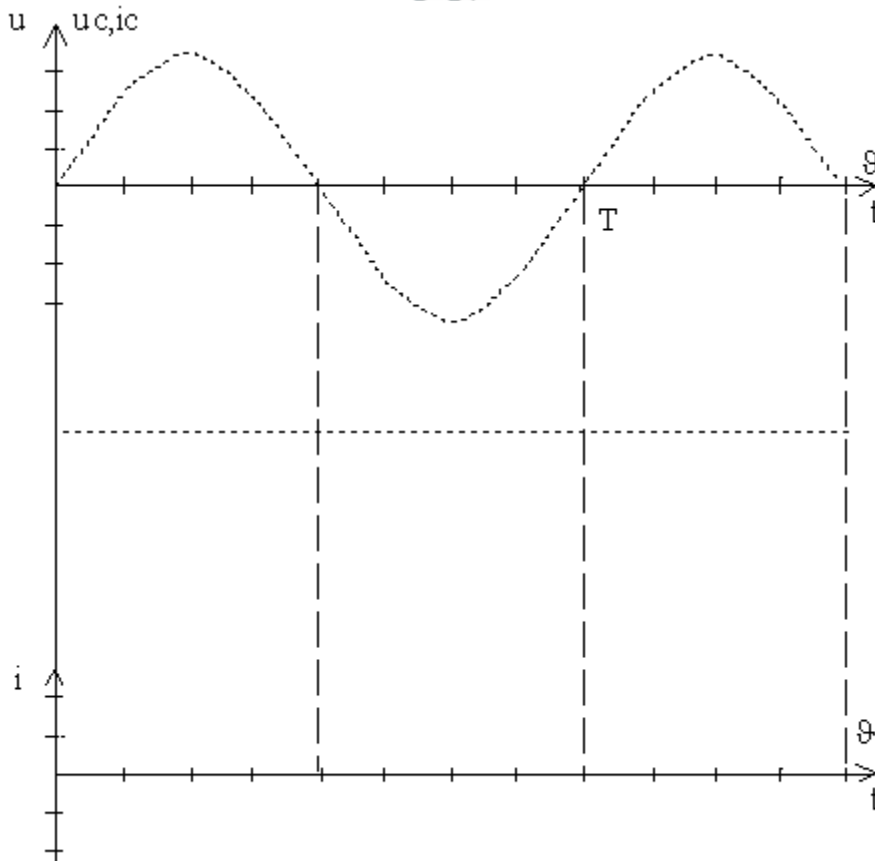
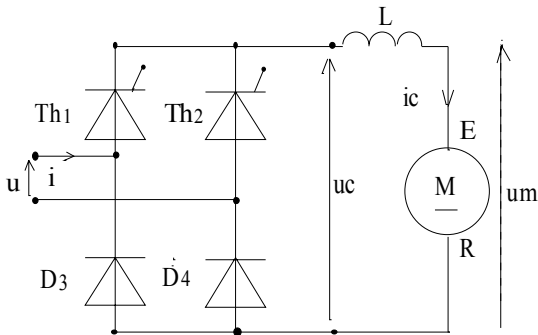
Le pont alimente un moteur à courant continu à excitation indépendante qui présente les caractéristiques suivantes : Résistance $R = 1 \, \Omega$, Fem $E = 0,1n$ (E en V et n en tr/min). Le courant induit est lissé par la bobine $i_c(t) = \text{cste} = \langle i_c \rangle = 10 \, \text{A}$. Le pont redresseur est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 240 \, \text{V}$ et de fréquence $f = 50 \, \text{Hz}$.

1.1 - Tracer $u_c(t)$. Indiquer sous le graphe les éléments conducteurs pour chaque phase de fonctionnement, $\delta = \pi/4$.

1.2 - Calculer $\langle u_c \rangle$.

1.2 - Tracer $i(t)$ [courant en ligne].

1.4 – Etablir la relation n en fonction δ .



EXERCICE 2 :

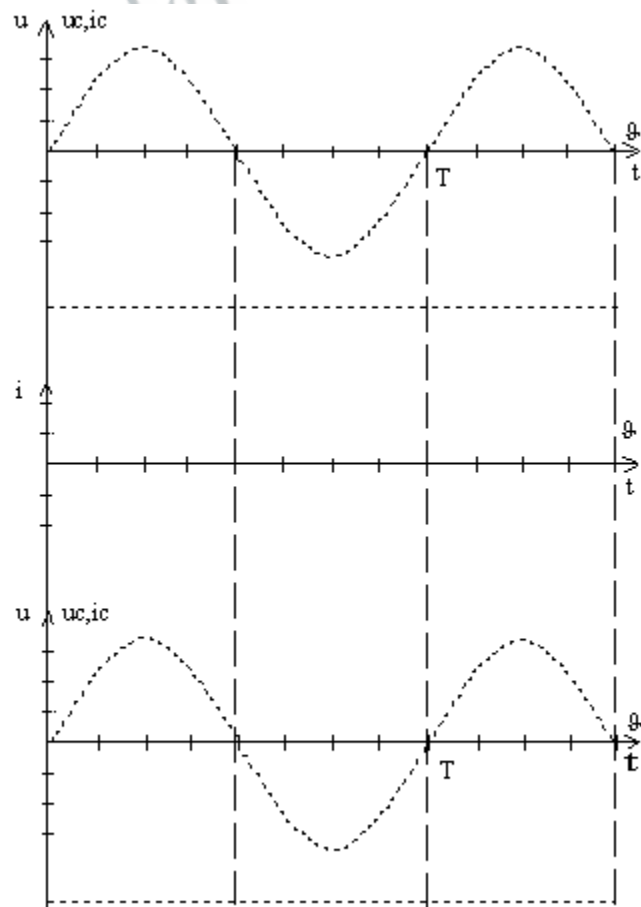
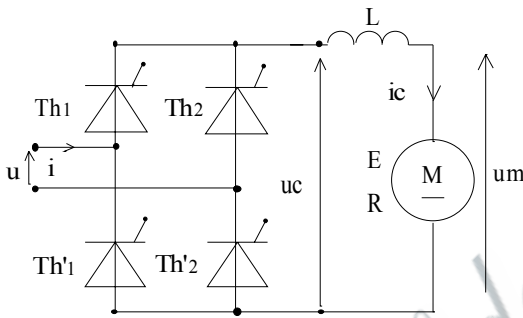
Le pont alimente un moteur à courant continu à aimant permanent qui présente les caractéristiques suivantes : résistance $R = 2 \, \Omega$, Fem $E = n/60$ (E en V et n en tr/min), Intensité du courant induit lissé par la bobine $i_c(t) = \text{cste} = \langle i_c \rangle = 2 \, \text{A}$.

Le pont redresseur est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 24 \, \text{V}$ et de fréquence $f = 50 \, \text{Hz}$.

2.1. Pour $\delta = \pi/4$

- Tracer $u_c(t)$ et $i_c(t)$. Indiquer dessous les éléments conducteurs pour chaque phase de fonctionnement.
- Tracer $i(t)$ [courant en ligne].
- Calculer $\langle u_c \rangle$, E . Calculer les puissance active et apparente fournies par le réseau et en déduire le facteur de puissance.

2.2. Pour $\delta = 3\pi/4$ Tracer $u_c(t)$ et $i_c(t)$. Indiquer dessous les éléments conducteurs pour chaque phase de fonctionnement. Calculer $\langle u_c \rangle$. Préciser son signe. Calculer le fem.



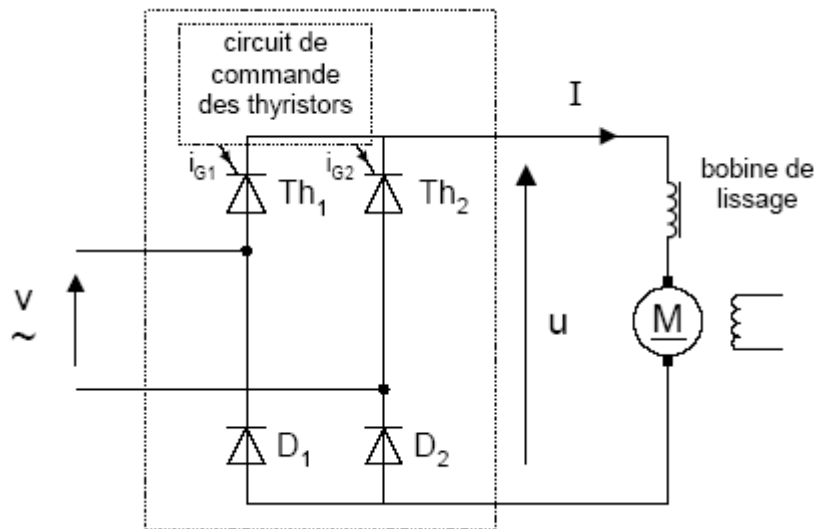
EXERCICE 3 :

Un pont mixte monophasé alimente un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante.

Il délivre une tension u de valeur moyenne $\langle u \rangle = 169 \text{ V}$, l'angle α de retard à l'amorçage des thyristors étant réglé à 45° .

Le courant dans le moteur est parfaitement lissé par une bobine de résistance interne $r = 0,1 \Omega$.
Son intensité I est égale à 25 A .

La vitesse de rotation du moteur est de 1800 tours par minute.



1- Le pont est alimenté avec une tension sinusoïdale v de fréquence 50 Hz .

Représenter en concordance de temps la tension $u(t)$ et la tension $v(t)$.

Préciser les intervalles de conduction de chaque thyristor et de chaque diode sur une période.

2- Calculer la valeur efficace de la tension $u(t)$.

3- La résistance de l'induit du moteur est $R = 0,4 \Omega$.

Calculer la f.e.m. du moteur.

4- Calculer la puissance absorbée par l'induit du moteur.

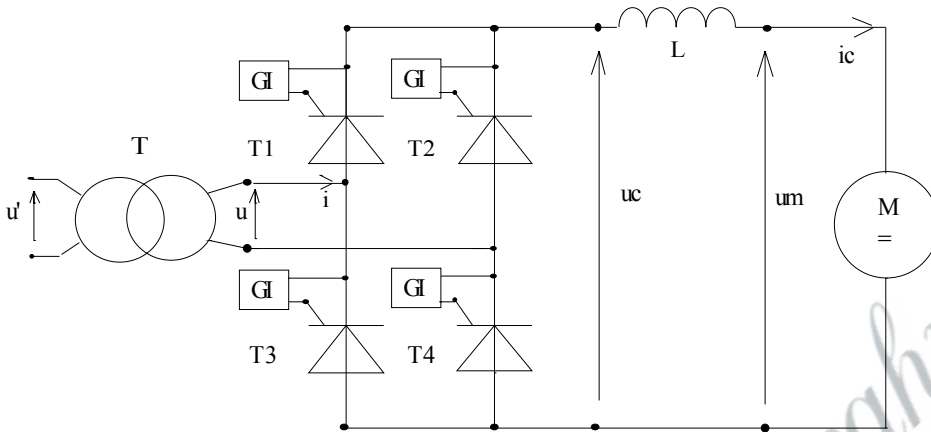
5- La charge du moteur variant, le moment T_{em} de son couple électromagnétique est doublé.

Que devient la f.e.m. du moteur ?

En déduire la vitesse de rotation.

EXERCICE 4 :

Le montage alimente une machine à courant continu à excitation indépendante de fém. $E=0.08n$ et de résistance $R=0,8\Omega$. Le redresseur est alimenté par un transformateur 400V/240V. Le courant d'excitation du moteur reste constant. Le courant dans le moteur est parfaitement continu grâce à une self de lissage de résistance nulle: $i_c(t)=cte=\langle i_c \rangle=25A$.



$$u=U\sqrt{2}\sin\omega t \text{ avec } U=240V \text{ } f=50Hz.$$

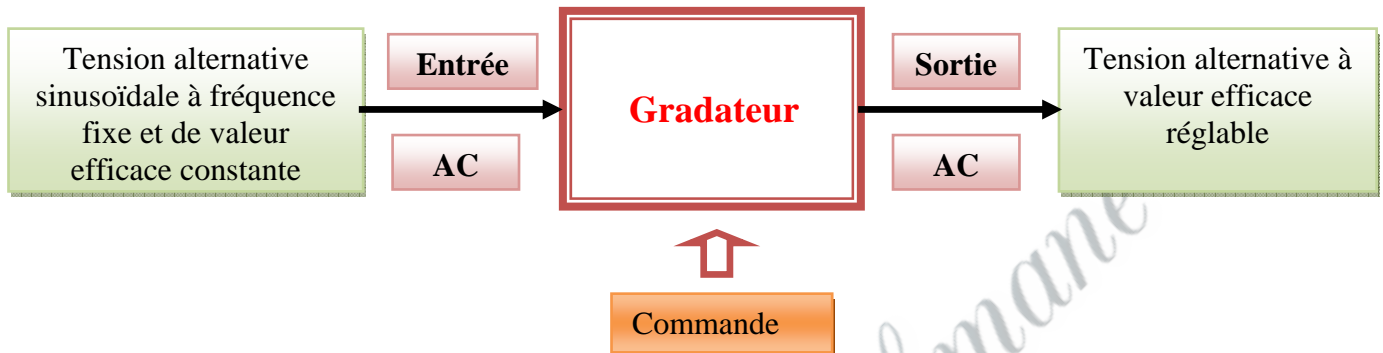
T1 et T4 sont amorcés à l'instant $t_o = T/6$, $\alpha = \pi/3$.

T2 et T3 sont amorcés à l'instant $t'o : t'o = t_o + T/2$

1. Tracer $u_c(t)$, i_{T1} , i_{T3} , et $i(t)$. Indiquer les éléments conducteurs pour chaque phase de fonctionnement.
2. Calculer $\langle u_c \rangle$ et préciser son signe. En déduire la valeur de la f.é.m. E et la vitesse.
3. Visualiser simultanément $i_c(t)$ et la tension $\langle u_c \rangle$ aux bornes de cette charge.
4. Calculer S (Puissance apparente) et P puissance active. En déduire le facteur de puissance du montage.

Le gradateur monophasé

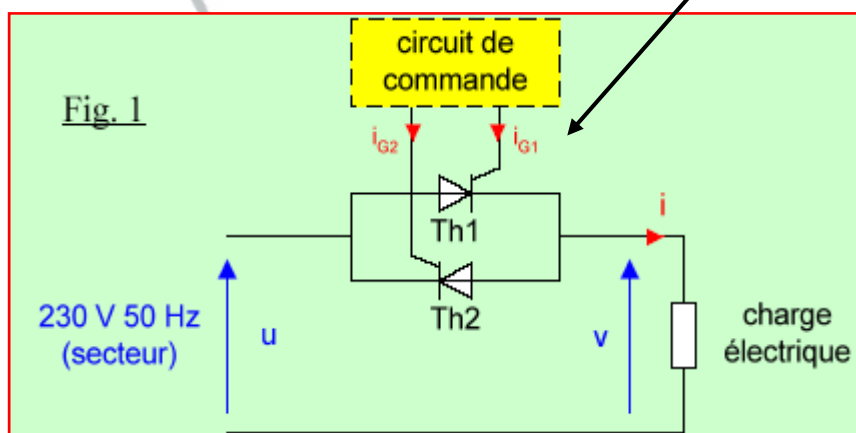
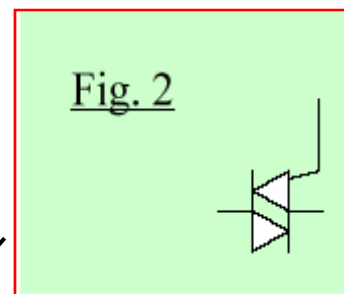
1-Définition : Le gradateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de **valeur efficace réglable**.



2-Constitution d'un gradateur :

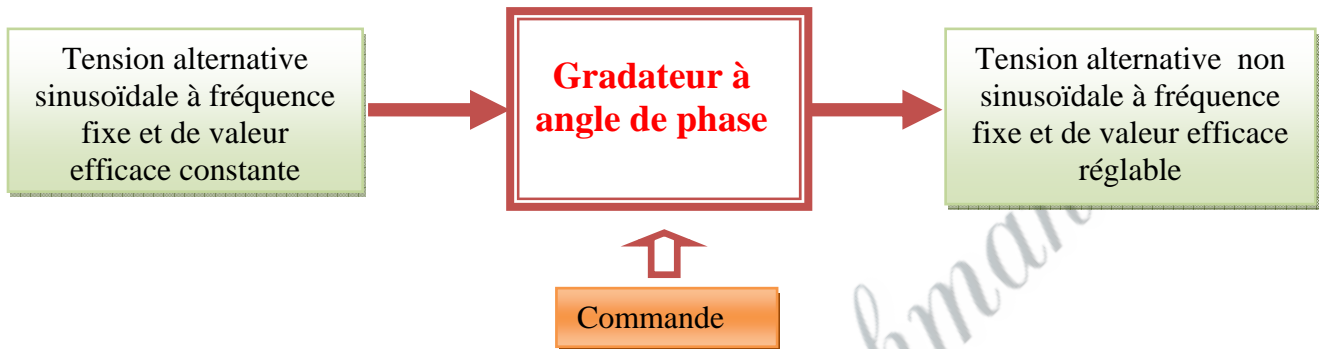
Le gradateur est constitué de deux parties suivantes :

- La partie puissance est constituée de deux thyristors montés « tête-bêche » pour les fortes puissances ($> 10 \text{ kW}$) ou d'un triac pour les puissances inférieures.
- La partie commande est constituée de divers circuits électroniques permettant d'élaborer les signaux de commande des thyristors à partir d'un ordre de commande extérieur.

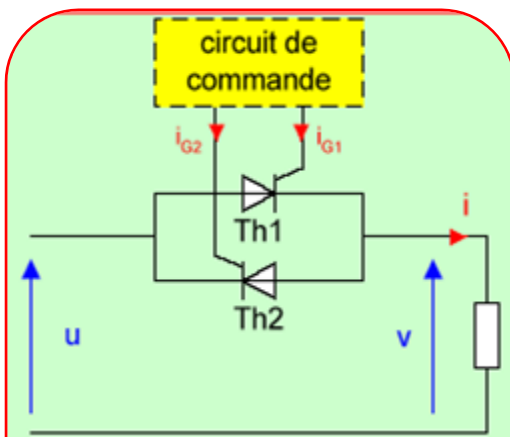


3-Types de gradateurs : La tension aux bornes de la charge évolue suivant la séquence de commande, ainsi on différenciera deux types de gradateurs :

3.1-Gradateur à angle de phase :

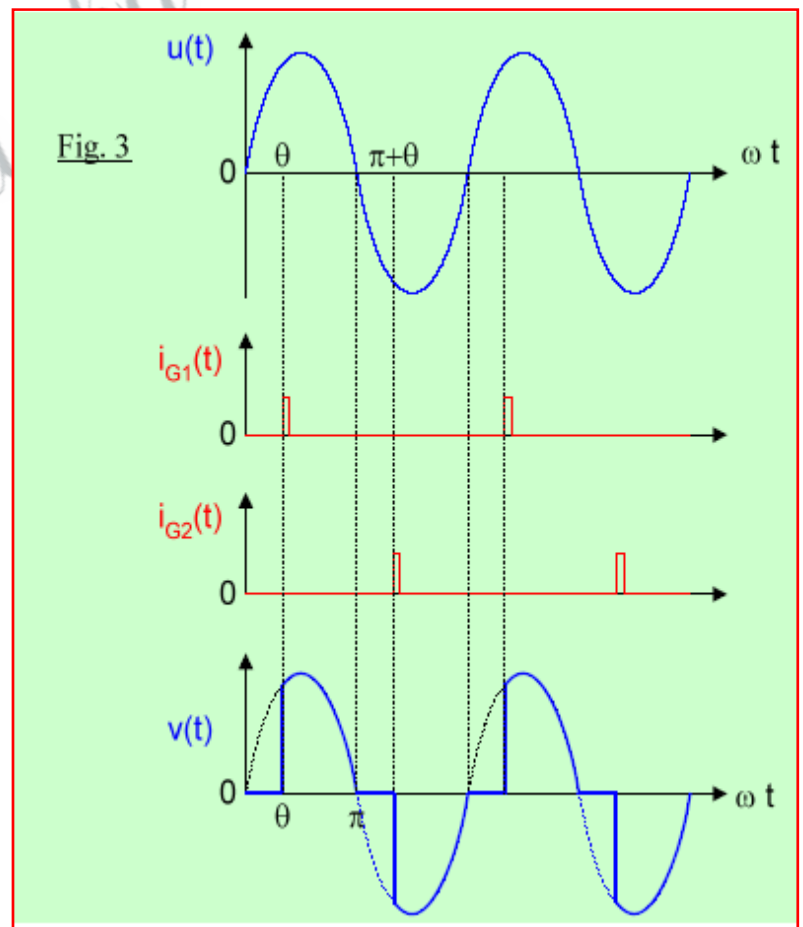


Principe de fonctionnement :



Dans ce type de gradateur, Le thyristor Th1 est amorcé durant l'alternance positive avec un angle de retard θ par rapport au passage par zéro de la tension secteur. Le thyristor Th2 est amorcé durant l'alternance négative avec le même angle de retard.

On obtient alors aux bornes de la charge la forme de tension suivante :



Domaine d'utilisation :

- Chauffage
- éclairage
- variation de vitesse des moteurs alternatifs de faible puissance (perceuse, aspirateurs de quelques centaines de Watts)

Principales relations :

Calcul de La valeur efficace de tension aux bornes de la charge :

$$V_{eff} = \sqrt{\langle u(t)^2 \rangle}$$

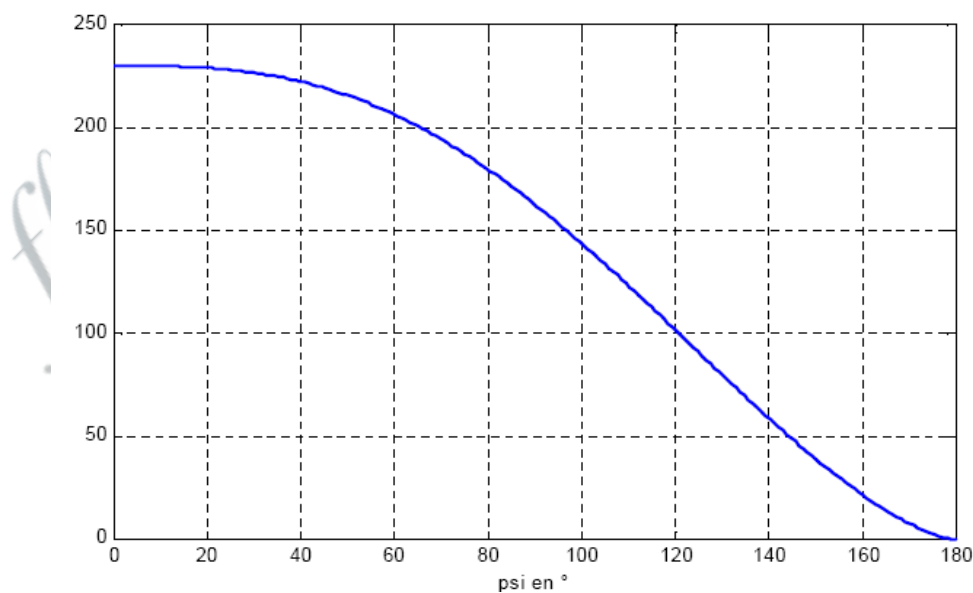
$$\langle u(t)^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt = \frac{2}{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} u_m^2 \sin^2(\alpha) d\alpha$$

$$\sin^2(\alpha) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\alpha)]$$

$$\langle u(t)^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt = \frac{u_m^2}{2\pi} \int_{\theta}^{\pi} [1 - \cos(2\alpha)] d\alpha$$

$$V_{eff} = U_{eff} \sqrt{1 - \frac{\theta}{\pi} + \frac{\sin 2\theta}{2\pi}}$$

θ : L'angle de retard à l'amorçage en degré.



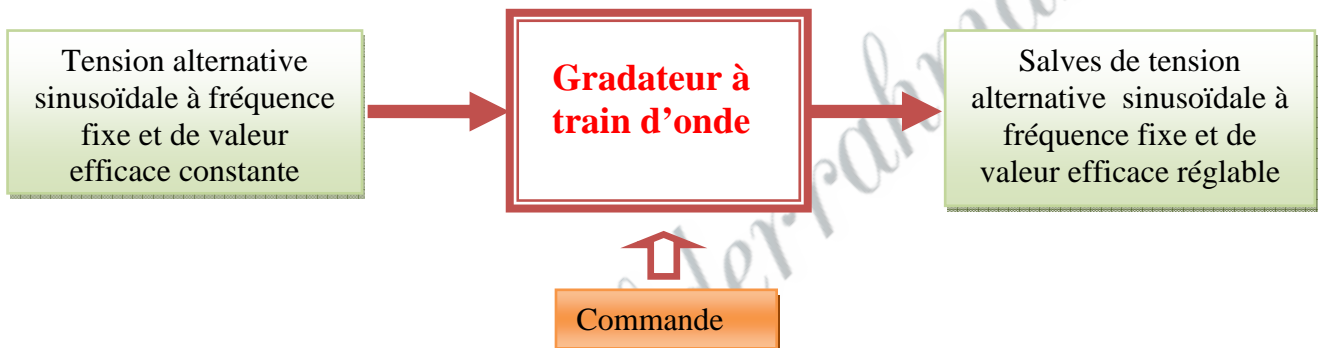
« La valeur efficace de tension en fonction de l'angle de retard à l'amorçage »

Puissance dissipée dans la charge :

$$P = \frac{V_{eff}^2}{R} = \frac{U_{eff}^2}{R} \left[1 - \frac{\theta}{\pi} + \frac{\sin 2\theta}{2\pi} \right]$$

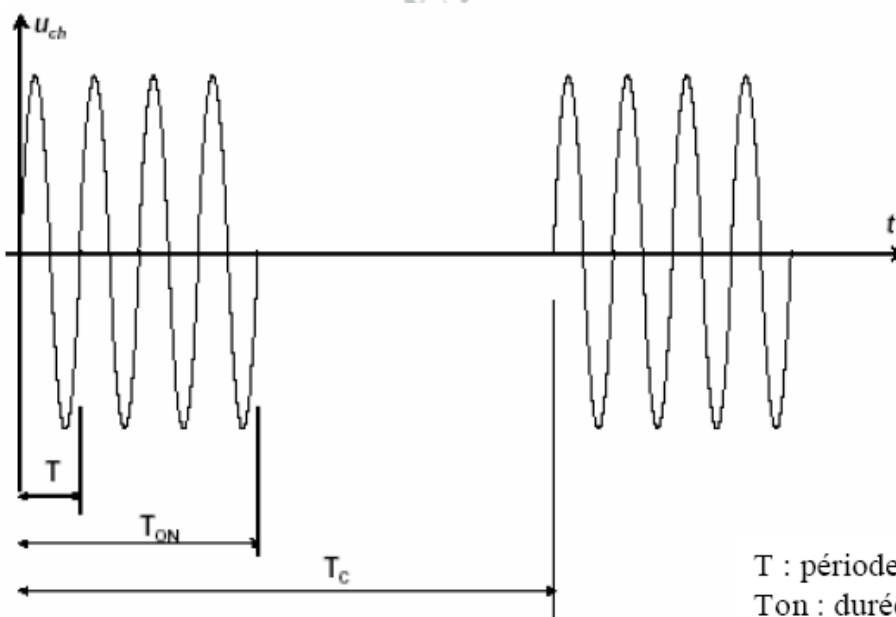
Avec R : valeur de la résistance de charge

3.2-Gradateur à train d'onde :



Principe de fonctionnement :

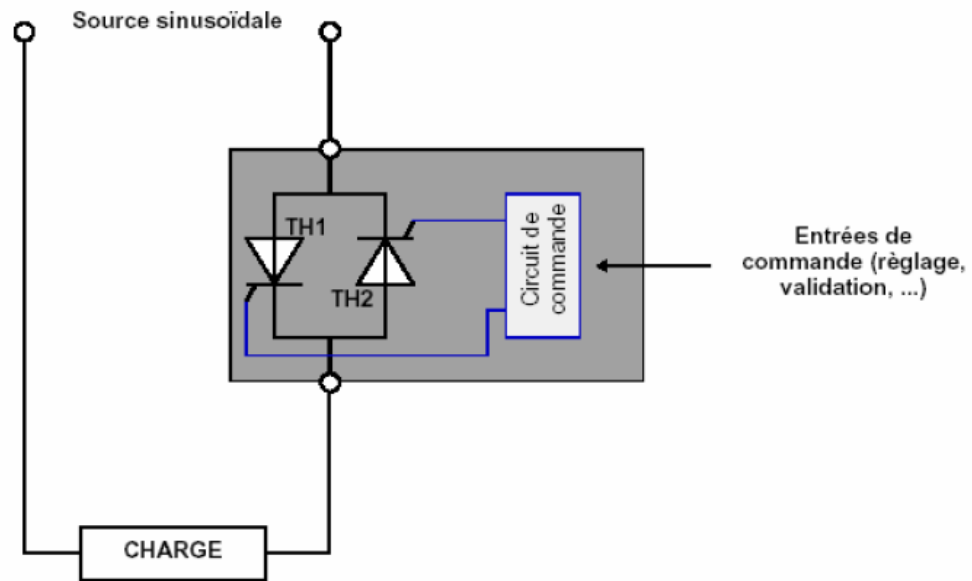
Dans ce type de gradateur, Le thyristor Th1 et le thyristor Th2 sont amorcés de manière continue pendant le temps T_{on} (période de conduction) et ils sont ensuite bloqués jusqu'à la fin de la période de modulation. On obtient alors aux bornes de la charge la tension suivante :



T : période de la tension source (secteur)

T_{on} : durée du train d'onde (salve)

T_c : période de modulation



Principales relations :

Calcul de La valeur efficace de tension aux bornes de la charge :

$$V_{eff} = \sqrt{\langle u(t)^2 \rangle}$$

$$\langle u(t)^2 \rangle = \frac{1}{T_c} \int_0^{\beta T_c} u(t)^2 dt = \frac{1}{T_c} \int_0^{\beta T_c} u_m^2 \sin^2(\alpha) d\alpha$$

Avec : $\beta = \frac{T_{ON}}{T_c}$, (β : Le rapport cyclique)

$$\cos(2\alpha) = 1 - 2\sin^2(\alpha)$$

$$\sin^2(\alpha) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\alpha)]$$

$$U_{ch} = U_{source} \sqrt{\beta}$$

Puissance dissipée dans la charge :

$$P = \frac{U_{ch}^2}{R} = \frac{U_{source}^2}{R} \beta$$

$$P = \beta \times P_{max}$$

Domaine d'utilisation :

- Chauffage
- Utilisés sur des systèmes présentant une inertie thermique importante

4-Exercices sur Le gradateur monophasé

EXERCICE 1 :

Un gradateur monophasé alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace 230V, débite sur une résistance chauffante de caractéristiques 230V/529W. L'angle d'amorçage est de $\pi/2$

1.1 - Tracer la courbe du courant qui traverse la charge.

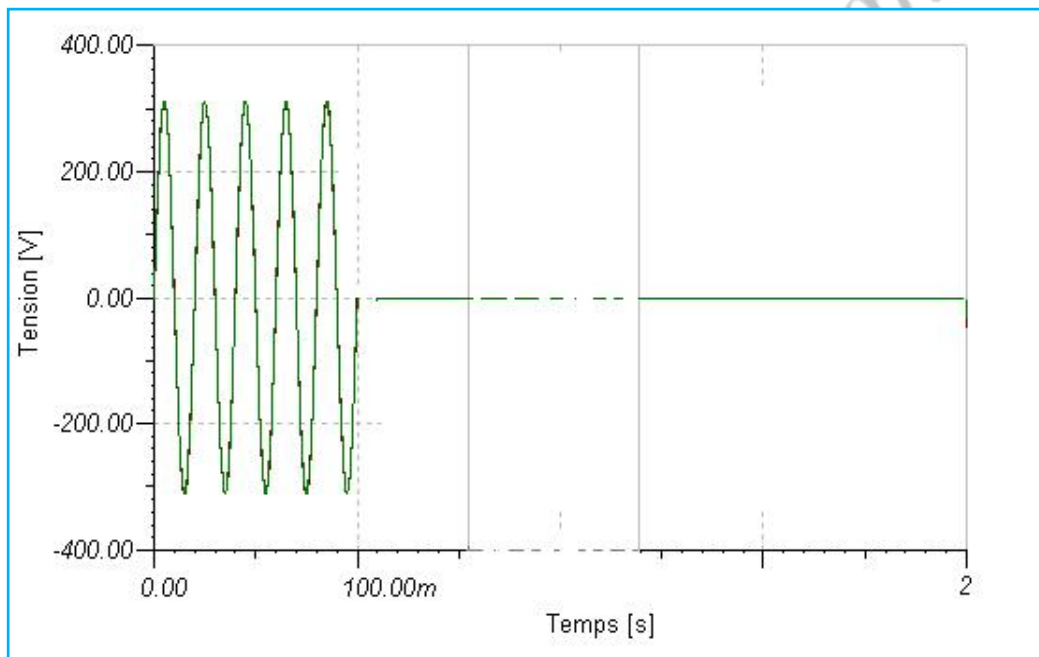
1.2 - Le courant maximum débité par la source.

1.3 - Calculer la valeur efficace du courant.

1.4 - Calculer la puissance délivrée à la charge.

EXERCICE 2 :

Le gradateur à train d'onde pilote une résistance de four de 5KW/230V par la commande suivante :



2.1 - Donner le nombre d'ondes transmises pour l'exemple ci-dessus.

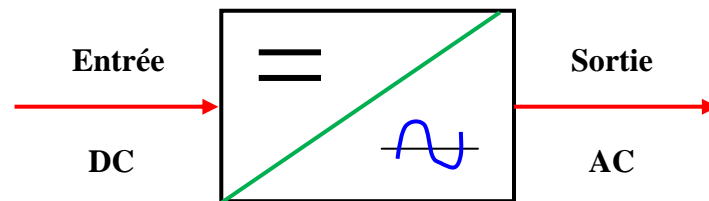
2.2 – Exprimer la puissance transmise en fonction de la puissance maximale.

2.3 - Calculer la puissance transmise au four.

2.4 - Calculer le nombre de périodes pour une puissance de 3kw.

Les onduleurs

1-Définition : Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.



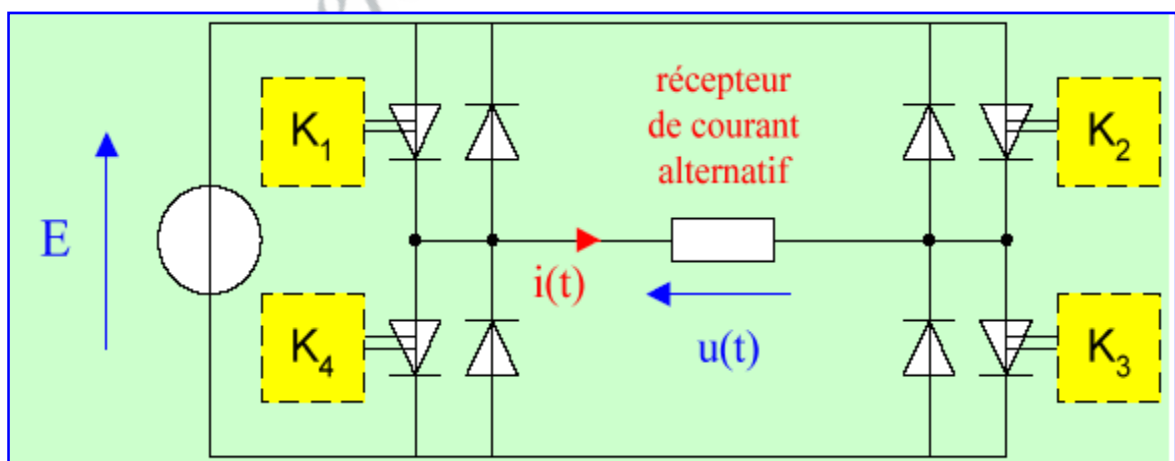
Applications des onduleurs

Nous citons quelques domaines d'application :

- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs.
- Alimentation de dispositif de chauffage par induction.
- Alimenter des moteurs synchrones ou asynchrones, dont on désire faire varier la vitesse en gardant $U/f = \text{Cste}$.

2-L'ondeur à quatre interrupteurs (pont) :

Soit le montage suivant :



Remarque : Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

3-Principe général de fonctionnement

Il a été dit précédemment que le but de cette commande est de créer aux bornes de la charge une tension alternative. Pour cela, il suffit de commander les interrupteurs deux à deux. Nous verrons les types de commandes suivants:

- **Commande symétrique.**
- **Commande décalée.**
- **Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion)**

3.1-La commande symétrique

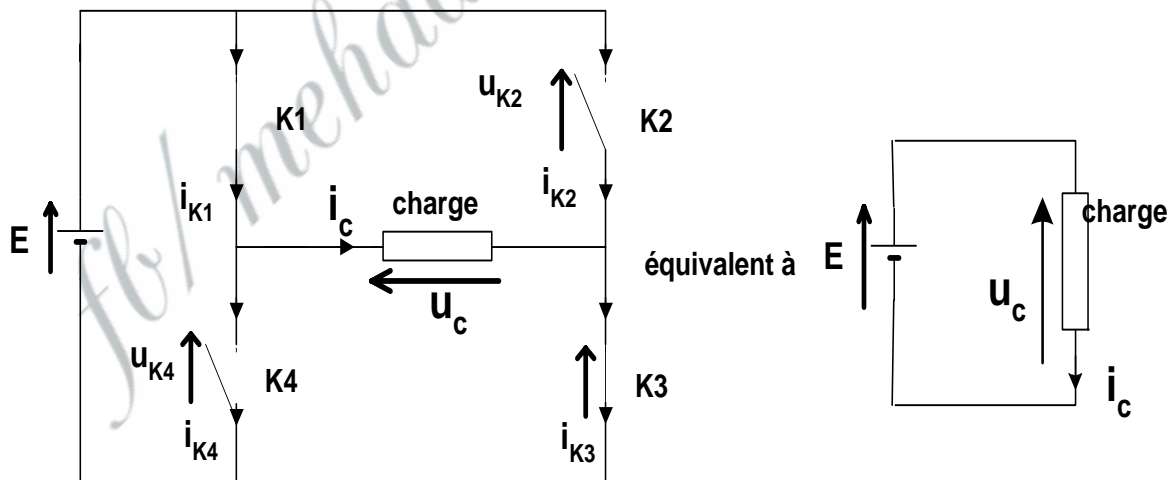
Cette commande se résume à commander les interrupteurs K1 et K3 à la fermeture pendant une demi-période puis de commander K2 et K4 durant la deuxième demi-période. (Nous sous-entendons que les interrupteurs non commandés à la fermeture sont en fait commandés à l'ouverture).

Stratégie de commande :

A chaque période T : $\alpha = 0.5$

- 1^{ère} phase : pour $0 < t < T/2$

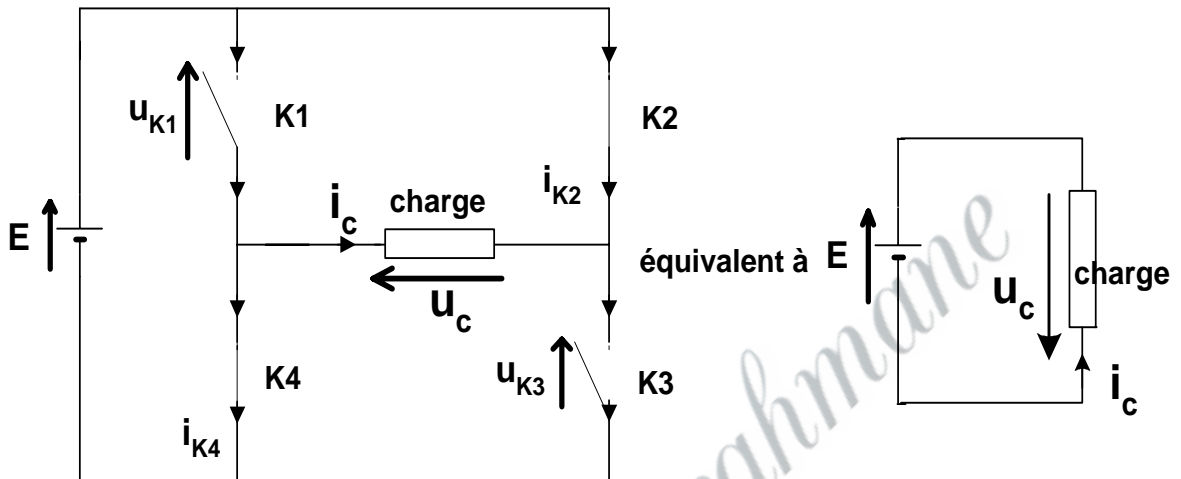
On commande la fermeture de K₁ et K₃, durant cette durée K₂ et K₄ sont ouverts. Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant :



La tension aux bornes de la charge aura donc la valeur $u_c = E$.

- 2^{ème} phase : pour $T/2 < t < T$

On commande la fermeture de K_2 et K_4 , durant cette durée K_1 et K_3 sont ouverts. Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant :



La tension aux bornes de la charge durant cette phase $u_c = -E$

Grandeurs caractéristiques :

Période: Elle est imposée par la commande des interrupteurs.

La tension u est alternative :

La fréquence : $f = 1/T$

-La valeur efficace de la tension u .

$$\langle u^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt$$

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\langle U^2 \rangle}$$

-La valeur moyenne du courant

$$\langle i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

-La puissance fournie par le générateur

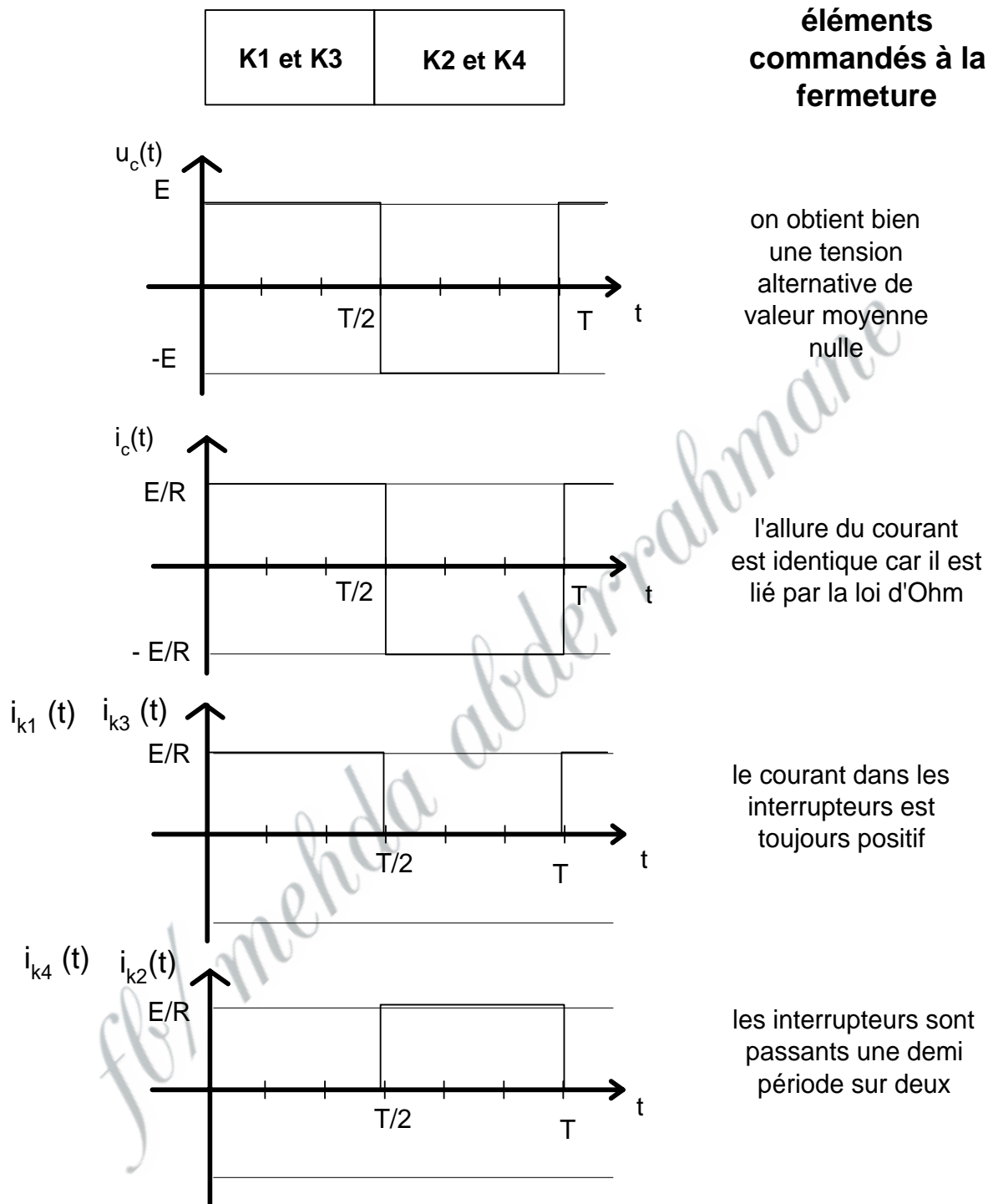
$$P_G = E * \langle i \rangle$$

-La puissance reçue par la charge.

$$P_{\text{ch}} = U_{\text{eff}} * I_{\text{eff}}$$

Il suffit donc de dessiner des oscillogrammes suivant la charge choisie:

a) charge résistive R :



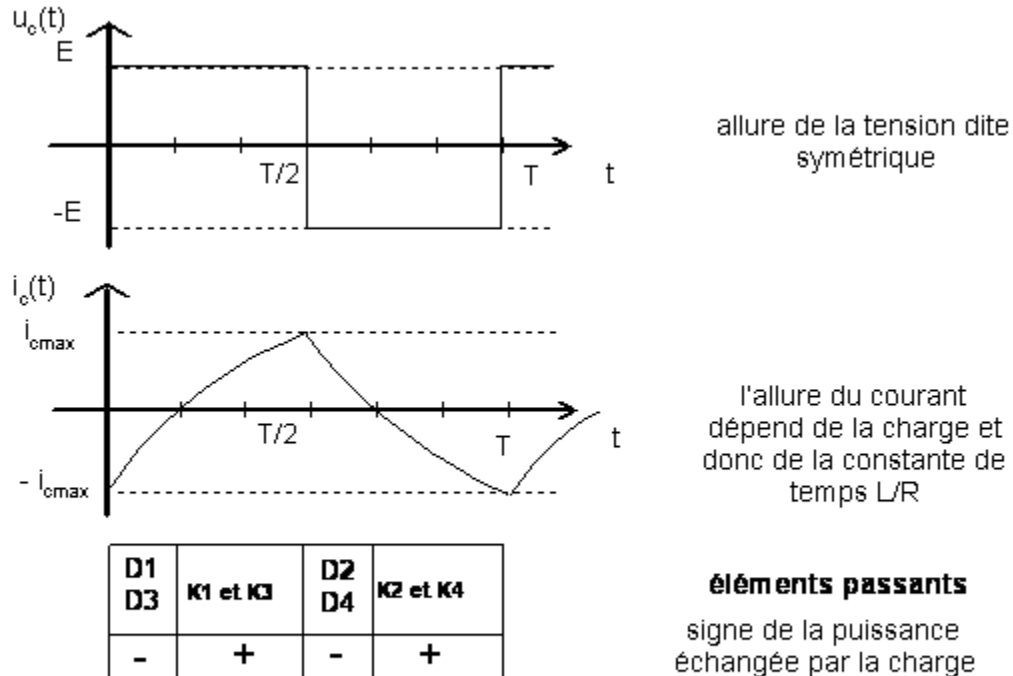
-La valeur efficace de la tension aux bornes de la charge est fixée par la tension d'alimentation.
Nous obtenons donc les valeurs suivantes :

$$U_{\text{eff}} = E$$

Remarque : dans l'utilisation sur une charge résistive pure, nous voyons que les diodes sont inutiles.

b) charge inductive RL :

La charge inductive simule un moteur alternatif. Nous nous apercevons que pour cette charge, seule l'allure des courants change.



Remarque :

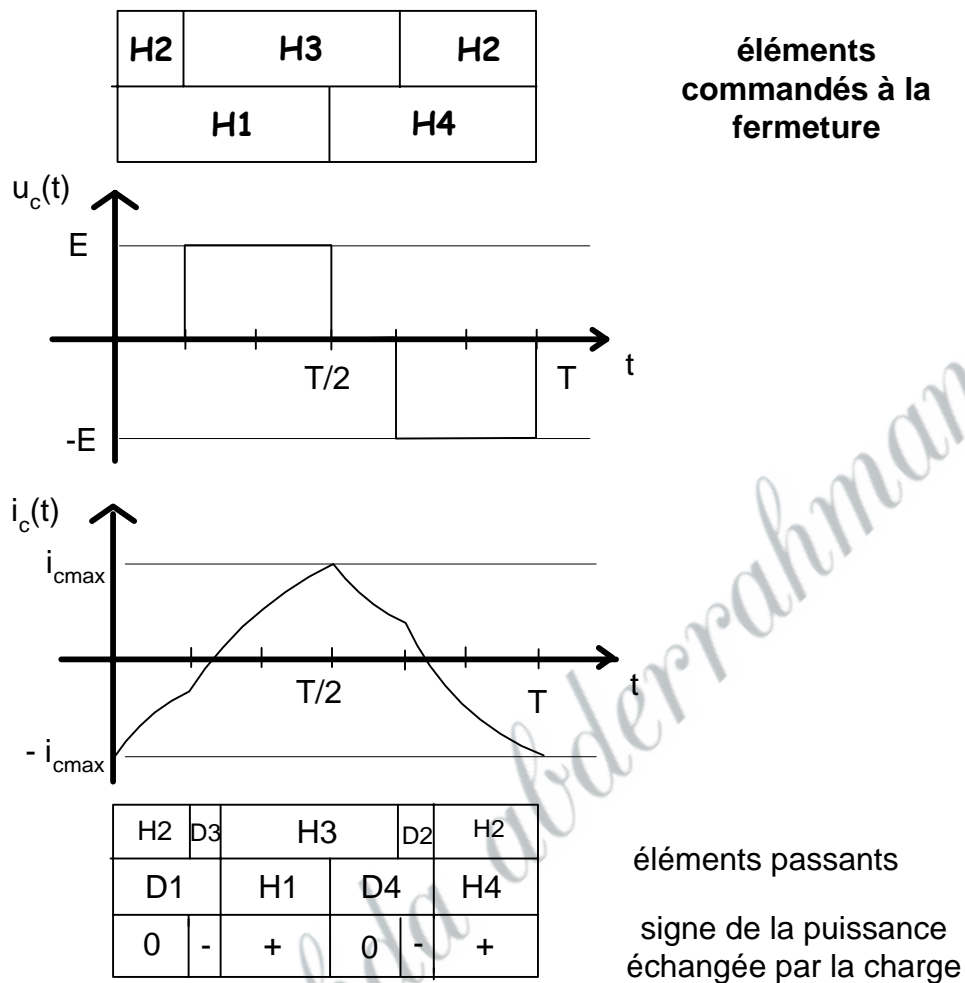
En régime permanent, $i_c(t)$ est forcément périodique de période T . La charge étant inductive, le courant $i_c(t)$ sera en retard sur la tension $u_c(t)$, ce retard étant compris entre $t=0$ (charge R pure) et $t = \frac{T}{4}$ (charge L pure). Donc en régime permanent le courant $i_c(t)$ passera d'une valeur négative à une valeur positive à $t = t_1$ s'annule. Dans les deux cas, le courant « suit » l'allure de la tension $u_c(t)$ avec un retard t_1 .

3.2-Commande décalée

Cette commande, plus sophistiquée dans sa conception, est une première étape vers l'obtention d'un courant sinusoïdale. Si nous nous attachons à une analyse spectrale, nous verrions dans la commande précédente que la tension, ainsi que le courant, sont riches en [harmoniques](#) ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, couples pulsatoires ...).

La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques et améliore donc le convertisseur. D'ailleurs l'allure du courant s'en ressent.

Au niveau de la commande, il suffit de décaler la fermeture des différents interrupteurs dans un ordre précis (ordre donné ci-dessous). Nous traçons à nouveau les oscillogrammes.



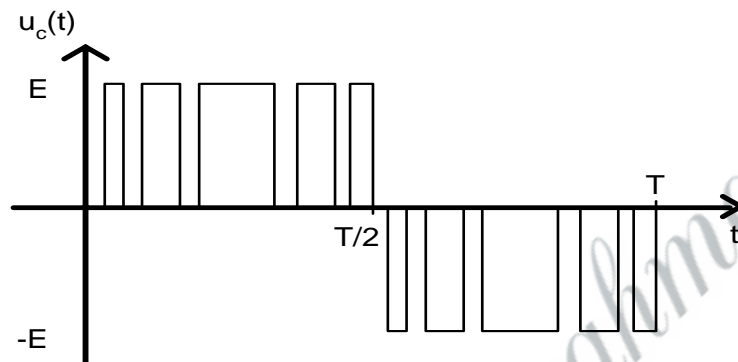
La puissance échangée par la charge comporte une phase de plus avec la commande décalée. Pendant deux intervalles de temps, elle est nulle : il s'agit de phase de roue libre. Au cours de ces intervalles, l'énergie emmagasinée par la bobine est cédée à la résistance car la tension aux bornes de la charge est nulle. De plus, nous retrouvons les phases de récupération.

La valeur efficace de la tension u aux bornes de la charge.

$$U_{\text{eff}} = E \sqrt{1 - \frac{2\tau}{T}}$$

3.3-Modulation de largeur d'impulsion : MLI

Cette commande s'agit de l'étape supérieure pour obtenir un courant quasi sinusoïdal. La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tension (négative et positive). Cette fragmentation permet si elle est savamment calculée d'éliminer les harmoniques gênants. L'allure de la tension MLI permet de se rendre compte du principe de cette commande.



4-Les harmoniques

Analyse harmonique d'un signal :

Le signal élémentaire en physique est **le signal sinusoïdal** :

$$x(t) = a_0 \sin(\omega_0 t + \phi) = a_0 \sin(2 \pi N_0 t + \phi_0)$$

a_0 , N_0 et ϕ_0 étant respectivement l'amplitude, fréquence et phase à l'origine.

C'est le seul signal mono fréquence ; il ne contient **que** la fréquence N_0 . En pratique, tout **signal périodique ininterrompu** $x(t)$ de fréquence N_0 n'est pas autre chose qu'une **somme discrète, infinie**, de **signaux sinusoïdaux élémentaires** de fréquences N_0 , appelé **fondamental**, $(2N_0)$ appelé **deuxième harmonique**, $(3N_0)$ appelé **troisième harmonique** etc... $x(t)$ peut s'exprimer sous la forme d'une décomposition en séries de Fourier :

$$x(t) = \langle x(t) \rangle + a_n \sin(2\pi [(n+1)N_0]t + \phi_n)$$

Avec $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

$\langle x(t) \rangle$ représente la valeur moyenne ou **composante continue du signal** (correspondant à la fréquence $N = 0$). Les différents coefficients de cette série se déterminent mathématiquement. La plupart des signaux ne sont **pas périodiques** ou ont **une durée limitée** : ils représentent alors une somme continue de signaux sinusoïdaux (toutes les fréquences sont possibles).

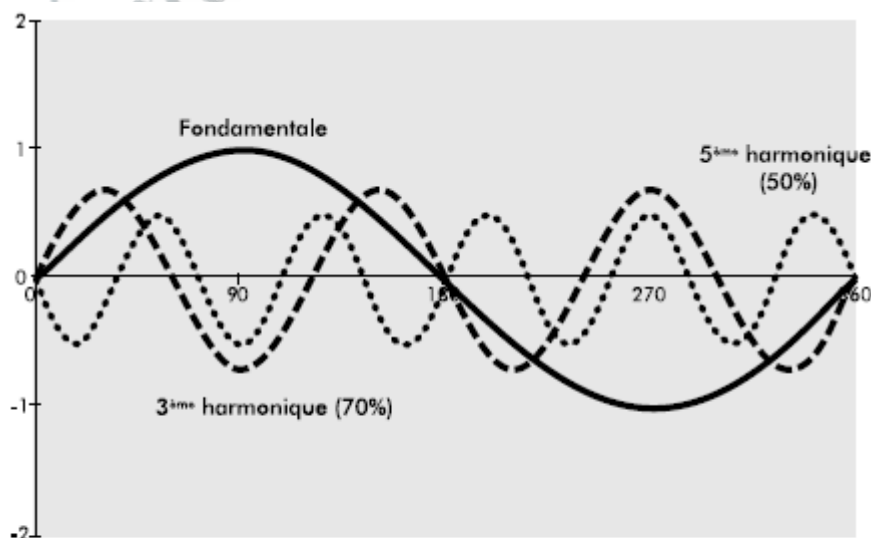
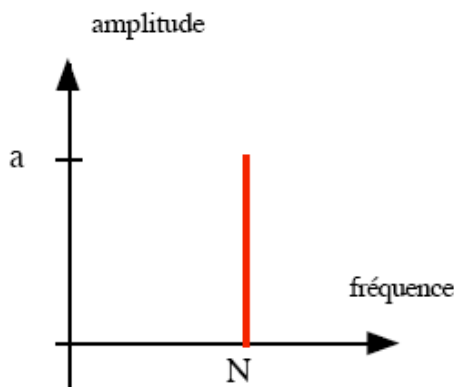


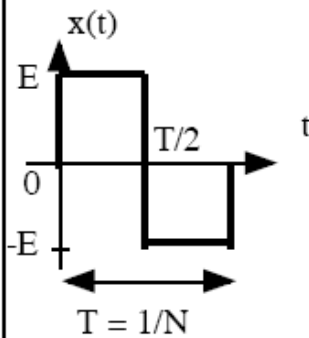
Figure 1 - Onde fondamentale avec les troisièmes et cinquièmes harmoniques

Spectre de fréquences d'un signal sinusoïdal ininterrompu



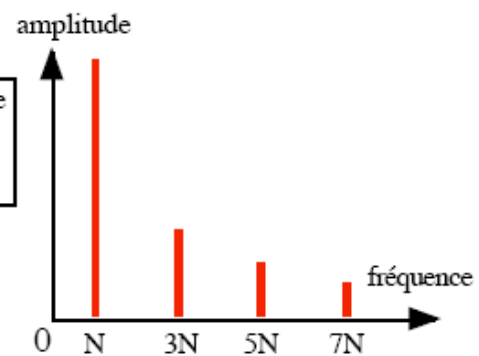
$$x(t) = a \sin(2\pi Nt + \phi)$$

Décomposition de Fourier et spectre de fréquences d'un signal "carré" périodique ininterrompu

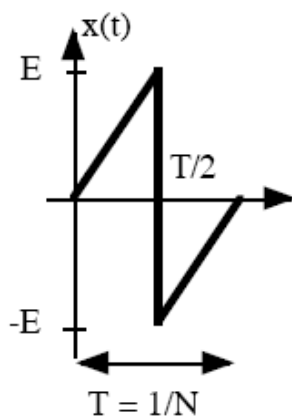


$$x(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\sin[2\pi Nt] + \frac{\sin[2\pi(3N)t]}{3} + \frac{\sin[2\pi(5N)t]}{5} + \dots \right]$$

Spectre amplitude - fréquence
(sur le dessin, on se limite à l'harmonique 7N)

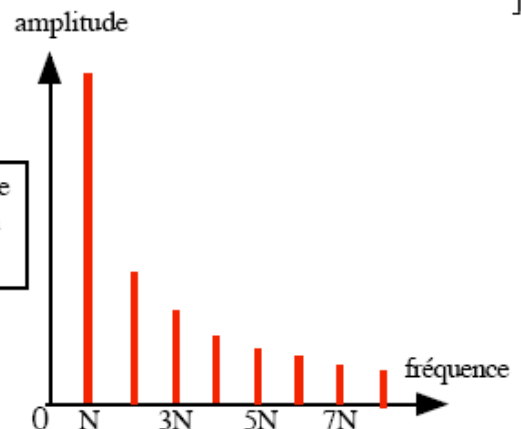


Décomposition de Fourier et spectre de fréquences d'un signal périodique en "dents de scie" ininterrompu



$$x(t) = \frac{2E}{\pi} \left[\sin[2\pi Nt] - \frac{\sin[2\pi(2N)t]}{2} + \frac{\sin[2\pi(3N)t]}{3} + \dots \right]$$

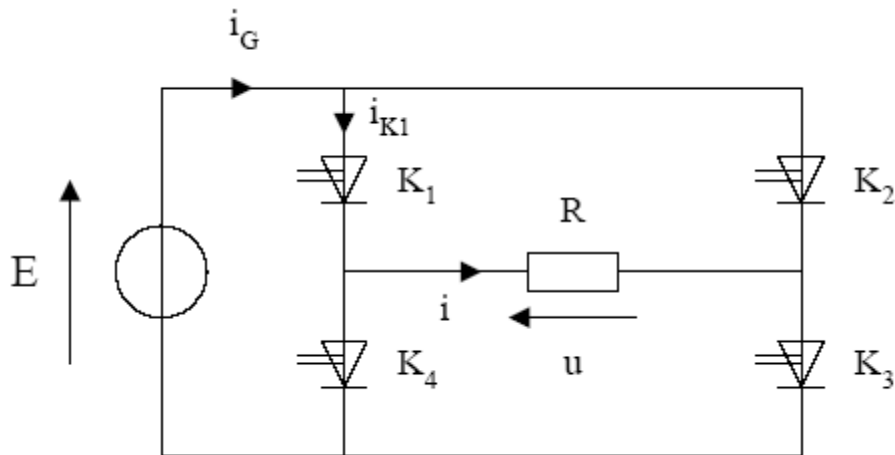
Spectre amplitude - fréquence
(sur le dessin, on se limite à l'harmonique 8N)



5-Exercices sur l'onduleur monophasé

EXERCICE 1 :

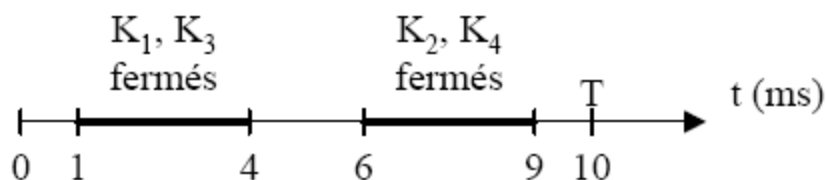
On réalise le montage suivant en utilisant quatre interrupteurs électroniques, fonctionnant deux par deux :



Le générateur de tension continue a une f.e.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.

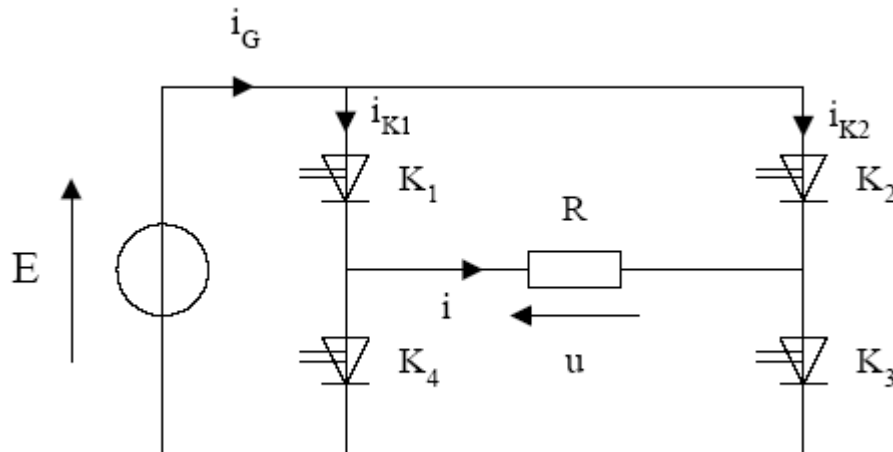
Commentaire ?

EXERCICE 2 :

L'onduleur suivant est constitué de quatre interrupteurs électroniques commandés (K_1 à K_4) 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 ?

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 .

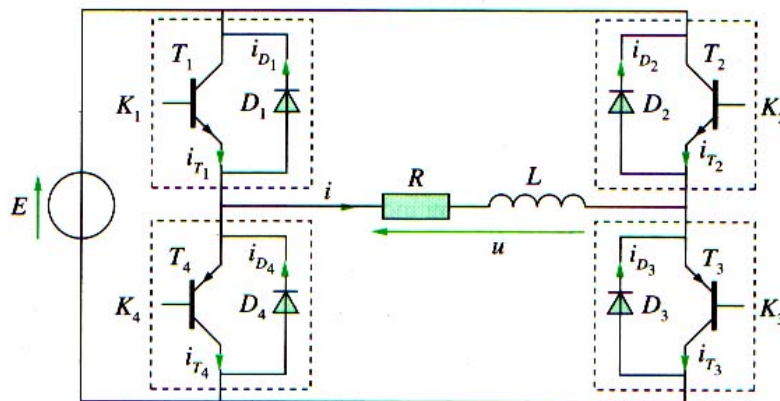
6- Exprimer les valeurs moyennes des courants i_{K1} , i_{K2} et i_G en fonction de E , R et α .

Faire l'application numérique.

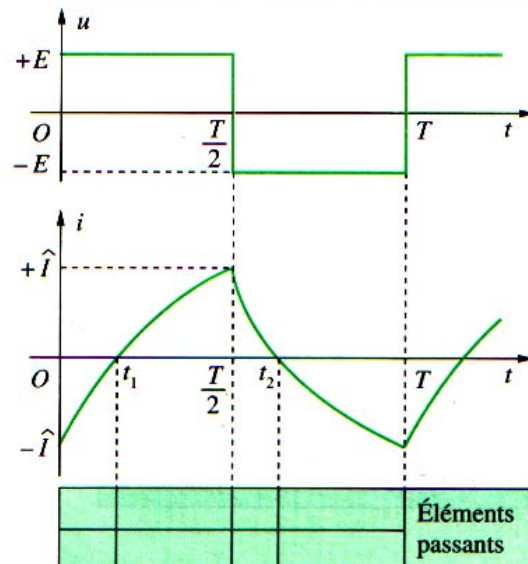
7- En déduire la valeur moyenne de la puissance fournie par la source E .

EXERCICE 3 :

La figure ci-dessous représente un pont en H :



K_1	K_3	K_2	K_4	Fermés	Interrupteurs
K_2	K_4	K_1	K_3	Ouverts	



				Éléments passants

On étudie le convertisseur représenté par le schéma ci-dessus. K_1 , K_2 , K_3 , K_4 sont des interrupteurs électroniques parfaits. E est une source de tension

1°) à partir des oscillogrammes de u et de i , faire l'analyse du montage : donner les éléments passants parmi les diodes et les transistors, en expliquant la méthode pour un cas.

2°) expliquer pour chaque phase le sens de transfert de l'énergie.

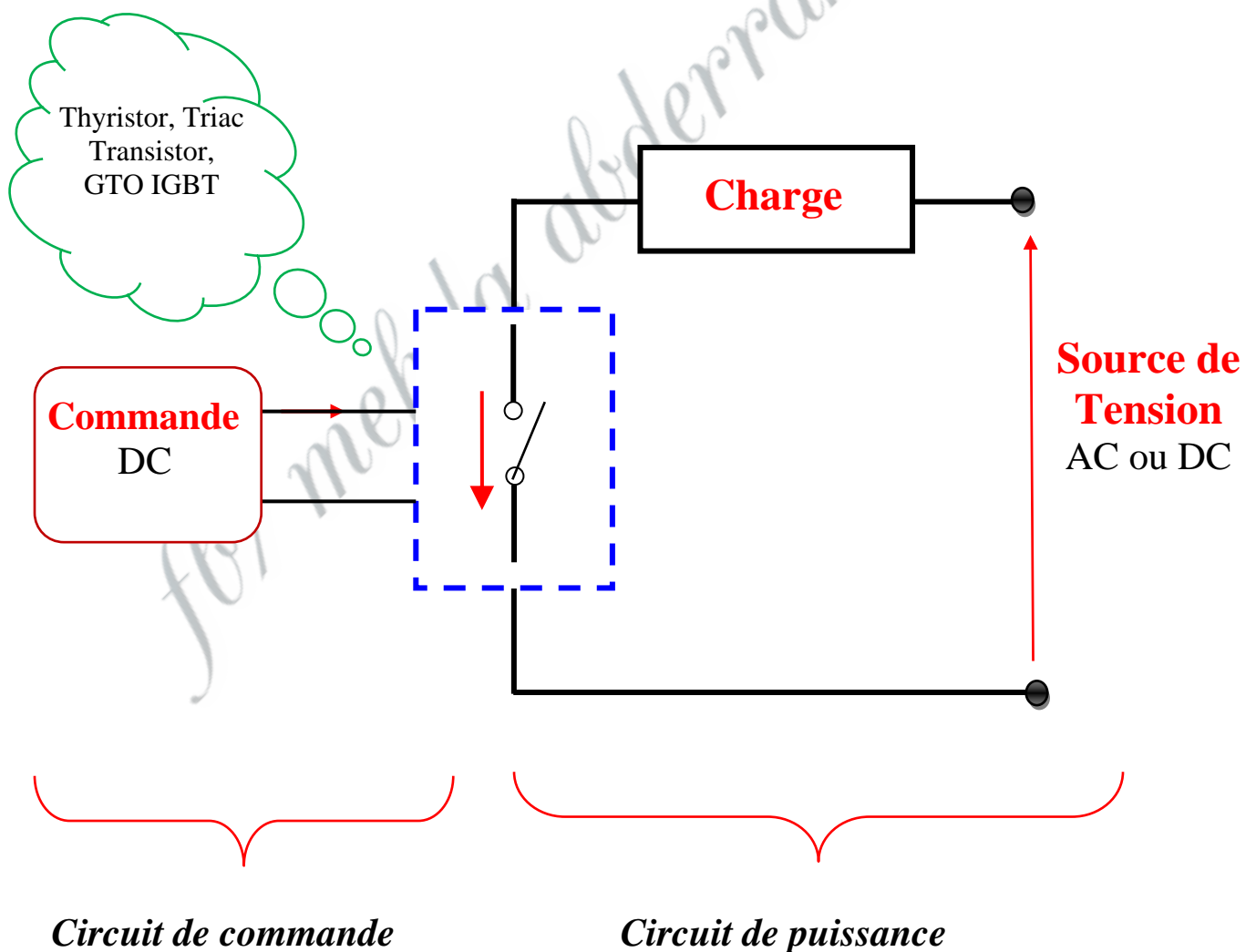
Circuit de commande et de puissance

1-Introduction :

L'électronique de puissance a pour but de modifier la présentation de l'énergie électrique avec un rendement maximum. Modifier la présentation de l'énergie électrique veut dire que :

- on transforme l'alternatif en continu : montages redresseurs,
- on transforme le continu en alternatif : montages onduleurs,
- on modifie la valeur efficace d'une tension alternative : montages gradateurs,
- on modifie la valeur moyenne d'une tension continue : montages hacheurs,

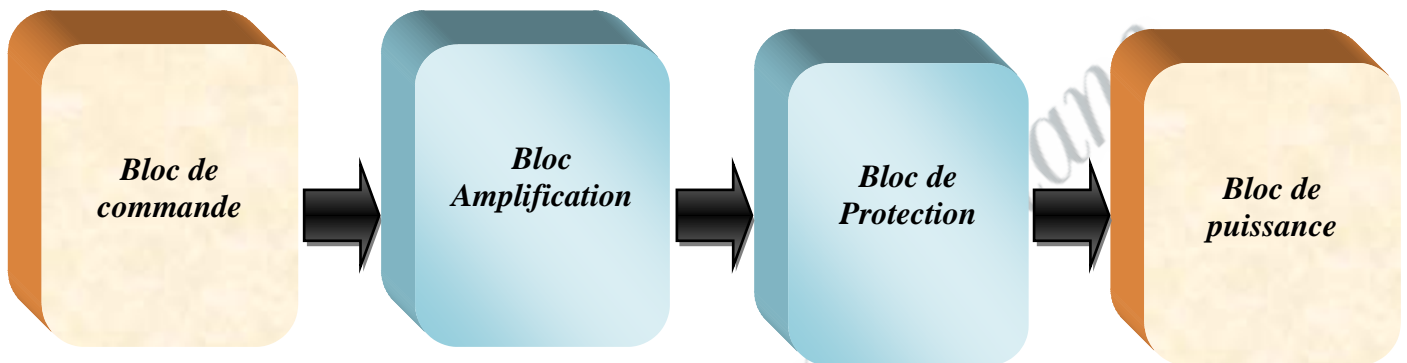
- Schéma synoptique du circuit de commande et de puissance



2- DESCRIPTION GENERALE DU MONTAGE D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE:

Le montage est représenté par un schéma synoptique constitué de quatre blocs de base, figure suivante :

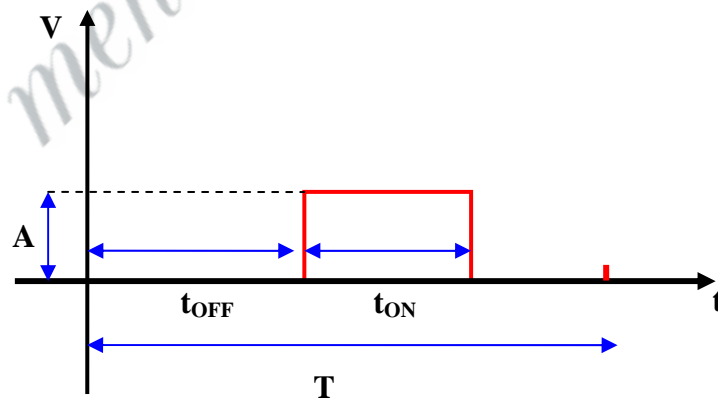
1. Bloc de commande.
2. Bloc d'amplification.
3. Bloc de protection
3. Bloc de puissance.



« Schéma bloc du montage d'électronique de puissance »

2.1- Le bloc de commande : permet d'adapter et varier la tension d'alimentation aux bornes de la charge.

Générateur d'impulsion :



A : Amplitude d'impulsion.

t_{ON} : L'arceure d'impulsion.

t_{OFF} : Angle de phase.

T : Période de modulation

Circuits de commandes :

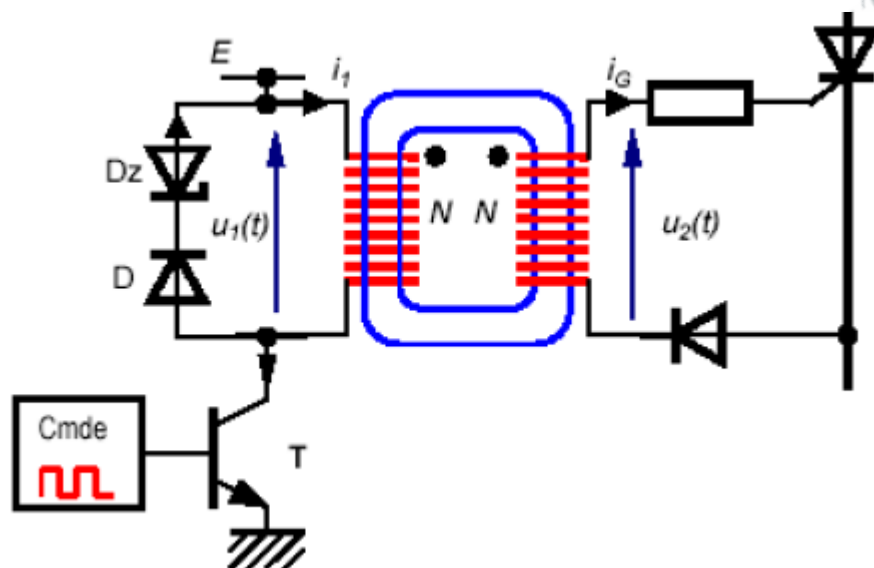
- Commande des transistors.
- Commande des thyristors et triacs.

2.2- Le bloc d'amplification : Ce bloc est utilisé pour le but d'amplifier le signal généré par le bloc de commande transmise vers la base ou la gâchette des interrupteurs électroniques.

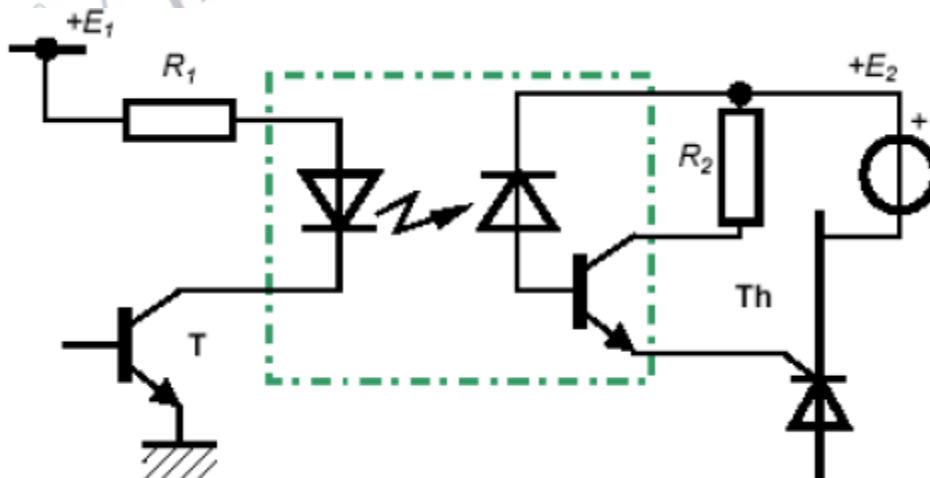
2.3- Le bloc de protection : assure l'isolation galvanique (optocoupleur-transformateur d'impulsion) entre la partie puissance et la partie commande (faible puissance).

Fonctionnement d'un optocoupleur :

Un optocoupleur est un composant qui permet d'isoler « galvaniquement » 2 circuits. Le transfert d'information entre le circuit de commande et le circuit de puissance se fait par transfert d'intensité lumineuse. Il peut donc protéger un circuit de commande d'un circuit de puissance d'éventuels courts-circuits sur la partie puissance.



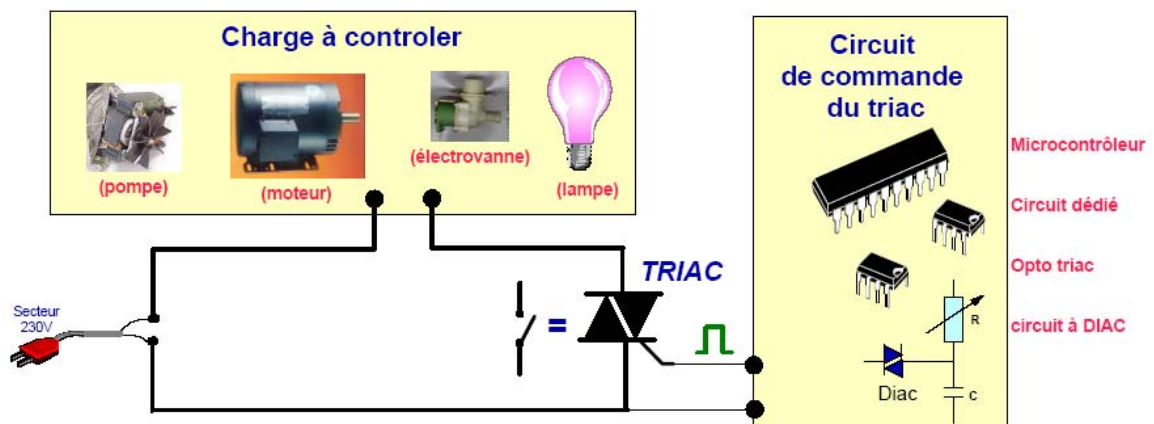
« Transformateur d'impulsion »



« Optocoupleur »

2.4- Le bloc de puissance : assure le transfert et la conversion de la puissance entre la source et la charge.

Montage avec différents types de commande



- *Circuit à diac*
- *Circuit à transistor UJT*
- *Circuit intègre TCA 785*
- *Circuit intègre NE555*
- *Microcontrôleur*