

II.1 Introduction :

Depuis la fin du XIXe siècle, ils ont inventé en électrotechnique, des machines utilisant les propriétés du magnétisme, et plus particulièrement du ferromagnétisme pour réaliser les diverses conversions possibles des formes d'énergie électriques.

Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique, on peut remplacer les "machines" par des **convertisseurs statiques** utilisant des composants électroniques en commutation. Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux :

- contrôle et même régulation électronique possible du transfert de puissance.
- système moins lourd et moins encombrant.
- excellent rendement.
- facilité de mise en oeuvre grâce à l'automatisation.
- protections de plus en plus efficaces.
- coût relatif en baisse, grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants. [6]

Dans ce chapitre, nous allons donner des généralités et des différents types de convertisseurs de puissance (Redresseur, onduleur, gradateur et hacheur).

II.2 Définition :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance (monophasée ou triphasée), on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques.[7]

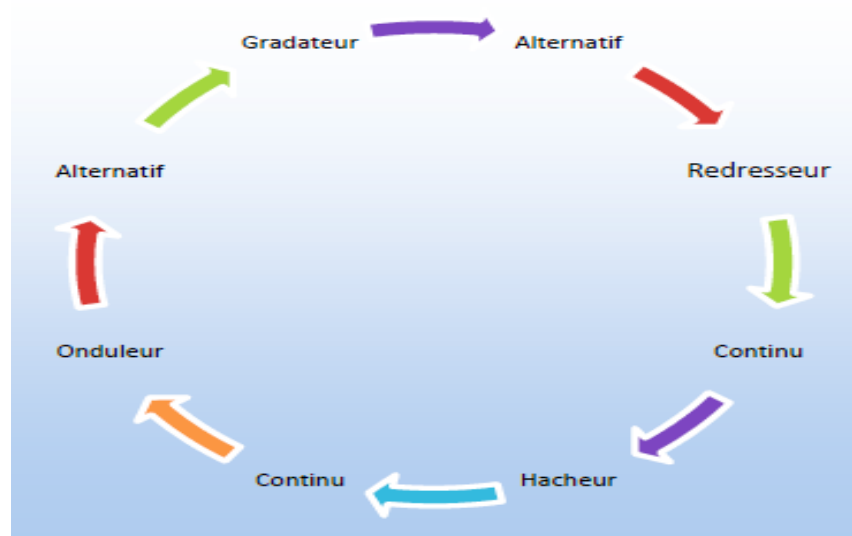


Figure (II.1) : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

II.3 Les redresseurs (AC-DC) :

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, s'ils sont commandés, la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable.

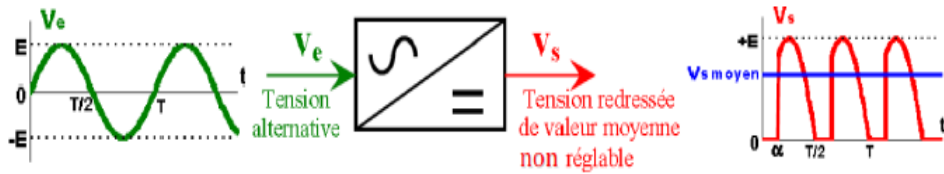


Figure (II.2) : Principe de base du redresseur.

Dans ce type de convertisseur, on peut les classer en deux classes : les redresseurs non contrôlé et les redresseurs contrôlés.

II.3.1 Le redresseur commande :

Dans les redresseurs commandés, les diodes sont remplacées par des thyristors pour commander la puissance voulue aux bornes du récepteur.

II.3.1.1 Principe de fonctionnement :

Comme pour le hacheur, le redresseur permet de faire varier la tension moyenne du moteur. On fait varier la tension de moteur en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors. L'avantage du redresseur est qu'il transforme directement la tension alternative en tension continue variable ce qui représente un cout moins important par rapport au hacheur. [9]

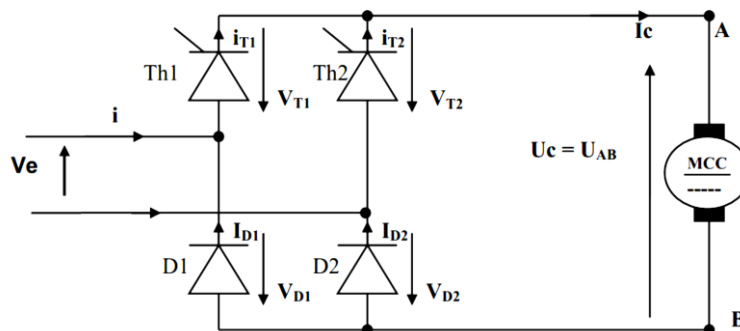


Figure (II.3) : Redresseur commandé pont mixte symétrique.

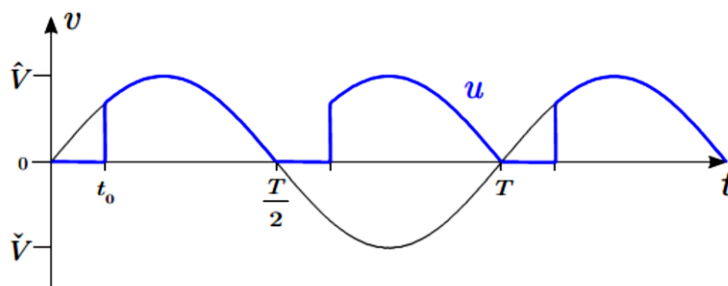


Figure (II.4) : La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande.

➤ Valeur moyenne de la tension redressée:

$$U_{Cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) d(t) = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} U \sin \theta d\theta = \frac{U}{\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi}$$

$$U_{Cmoy} = \frac{U}{\pi} (1 + \cos \delta) \quad (\text{II.1})$$

δ : L'angle d'amorçage.

Le pont mixte alimente un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante, son fém. s'exprime en fonction de la vitesse de rotation par la relation :

$$E = K \cdot n \quad (\text{II.2})$$

n : vitesse de rotation (en tr/s).

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

$$E = U_c - R \cdot i - L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.3})$$

En valeur moyenne :

$$E = \langle U_c \rangle - R \cdot \langle i \rangle = K \cdot n \quad (\text{II.4})$$

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

$$n = \frac{1}{K} \left[\frac{U}{\pi} (1 + \cos \delta) - R \cdot \langle i \rangle \right] \quad (\text{II.5})$$

II.4 Les onduleurs (DC-AC) :

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.[9]

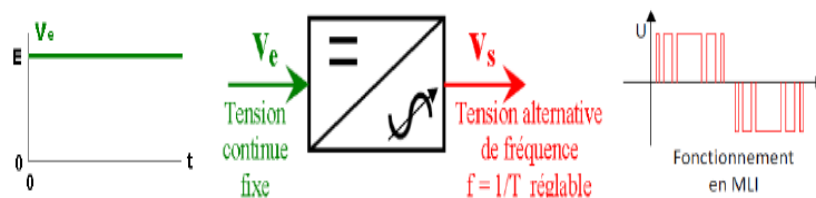


Figure (II-5) : Principe de base de l'onduleur.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue: source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

La charge alternative peut être de plusieurs types. Si elle peut aussi délivrer de la puissance et présente des forces électromotrices (réseau de distribution électrique, machine synchrone, alternateur,...), l'onduleur pourra avoir une structure identique à celle d'un

redresseur. C'est le fonctionnement réversible d'un même convertisseur. On parle alors "**d'onduleur assisté**" (ou "non-autonome").

Si la charge est constituée par un circuit oscillant, on pourra utiliser les propriétés de ce dernier pour adapter la structure de l'onduleur. Il prend alors le nom "**d'onduleur à résonance**".

Dans tous les autres cas, on emploie un "**onduleur autonome**" qui ne suppose aucune caractéristique particulière de la charge.

Remarque: il ne faut pas confondre le terme onduleur, employé ici pour désigner un convertisseur continu-alternatif, et le terme onduleur employé pour le dispositif de sauvegarde informatique qu'on devrait appeler ASI (Alimentation Sans Interruption) ou UPS (Uninterruptible Power Supply).

II.5 Les Gradateurs (AC-AC) :

Le gradateur est un montage qui permet de contrôler la puissance absorbée par un récepteur en régime alternatif sans changer la fréquence de l'onde alternative de la source.

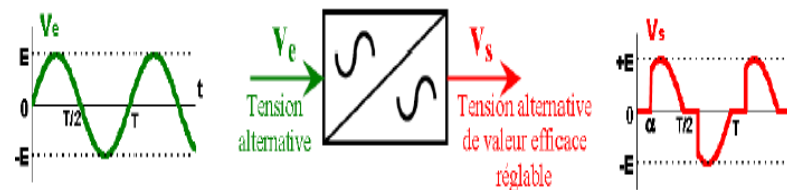


Figure (II-6) : Principe de base du gradateur.

La structure de base repose sur un interrupteur électronique capable de conduire dans les deux sens à l'état passant et de supporter une tension également dans les deux sens à l'état bloqué. Cet interrupteur peut être alors réalisé :

- soit avec un seul composant: le triac
- soit en assemblant deux thyristors tête-bêche

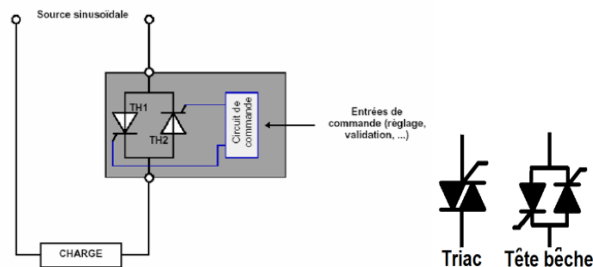


Figure (II-7) : La structure d'un gradateur monophasé.

En groupant 3 montages élémentaires monophasés, on constitue un gradateur triphasé. Dans ce type de convertisseur on distingue deux types de commande :

- gradateur à angle de phase.

- gradateur à train d'onde.

II.6. Les hacheurs (DC-DC) :

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).

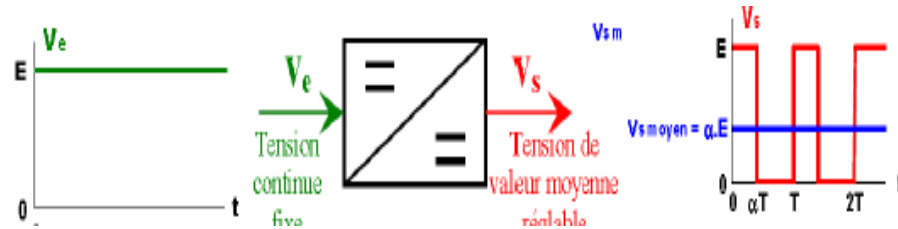


Figure (II-8) : Principe de base d'un hacheur.

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.

II.6.1 Principe de fonctionnement :

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide d'un interrupteur électronique. [10]

II.6.2 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).

$$\alpha = \frac{t_f}{T} \quad (\text{II.6})$$

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

II.7 Différents types d'hacheurs :

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- abaisseur de tension "Buck".
- élévateur de tension "Boost".

II.7.1 Convertisseur Buck :

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type Buck. L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur peut être remplacé par un

transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

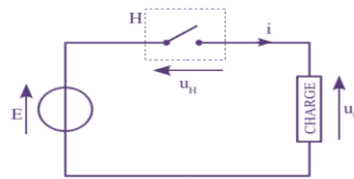


Figure (II.9) : Le fonctionnement d'un hacheur BUCK.

II7.1.1 Principe de Fonctionnement :

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ($T = \frac{1}{f}$), comporte deux étapes. Lors de la première étape, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de ($0 \leq t \leq \alpha T$), Lors de la seconde étape on bloque le transistor, la diode devient passante, cette phase dure de ($\alpha T \leq t \leq T$).

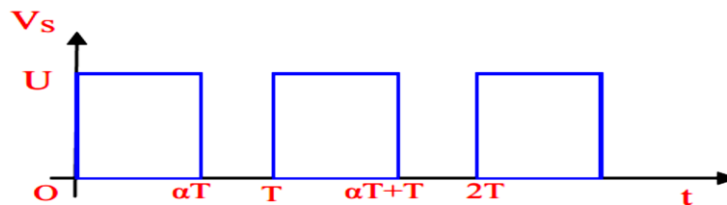


Figure (II.10) : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série.

Valeur moyenne de la tension :

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0. d(t)$$

$$V_{Smoy} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha U \quad (II.7)$$

La valeur moyenne de la tension V_{Smoy} peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α . Quand on fait varier α de 0 à 1, V_{Smoy} varie linéairement de 0 à U.

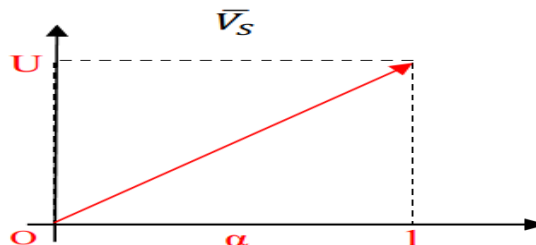


Figure (II.11) : La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α).

Intérêt d'utiliser un hacheur série :

Le hacheur série permet de faire varier la vitesse de rotation des moteurs à courant continu. On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

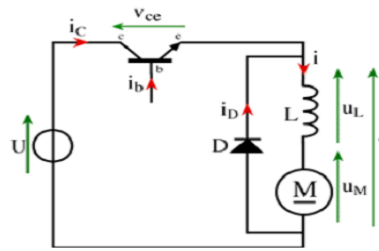


Figure (II.12) : Hacheur série commande un moteur à courant continu.

Pour un bon fonctionnement du moteur, il est préférable que le courant soit le plus régulier possible, où la présence d'une bobine de lissage. Si son inductance est suffisamment grande, on pourra considérer le courant comme constant ($\Delta i \approx 0$). [10]

Loi des mailles :

$$V_S = U_m + U_l \quad (\text{II.8})$$

On passe aux valeurs moyennes :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle + \langle U_L \rangle$$

Comme pour un signal périodique : $\langle U_L \rangle = 0$

nous obtenons pour le moteur :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle = E$$

$$\langle V_S \rangle = E = \alpha U \quad (\text{II.9})$$

$$E = K \cdot \phi \cdot \Omega = \alpha U \quad (\text{II.10})$$

Ω : La vitesse de rotation du moteur.

ϕ : Le flux d'inducteur (égale à constant pour le moteur à excitation séparée).

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

$$E = K' \cdot \Omega = \alpha U$$

$$\Omega = K'' \cdot \alpha \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Avec : } K'' = \frac{U}{K'}$$

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

II.7.2 Convertisseur Boost :

Ces convertisseurs s'appellent aussi: Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type Boost. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu et la charge de sortie est de type tension continue l'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [9]

II.8 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.

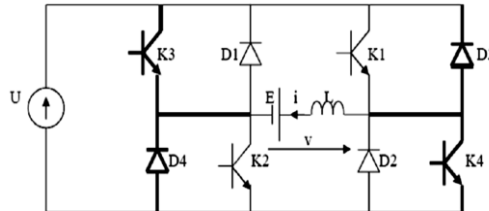


Figure (II.13) : Hacheur à quatre quadrants.

On procède ainsi :

A chaque période T :

On commande la fermeture de K₁ et K₂ pendant (0 ≤ t ≤ αT) et on commande la fermeture de K₃ et K₄ pendant (αT ≤ t ≤ T).

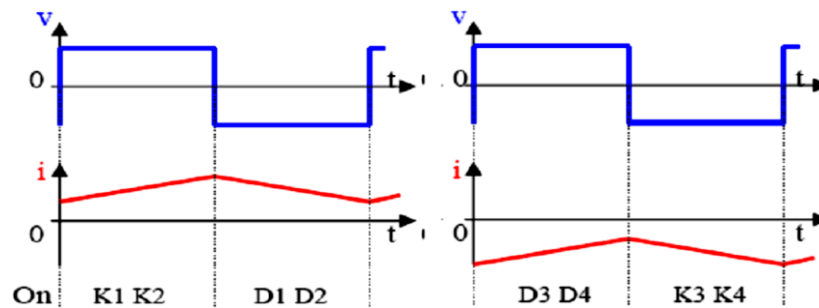


Figure (II.14) : La tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants.

➤ Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U dt$$

$$V_{Smoy} = U(2\alpha - 1) \tag{II.12}$$

Maintenant on peut avoir ($V_{Smoy} < 0$) (formule précédente), le courant pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation négatif. Quand (α) varie de (0 à 1), la tension moyenne varie de (-U à +U).

On dispose de 4 quadrants modes de fonctionnement :

V > 0 et I > 0, Rotation dans le premier sens.

V < 0 et I > 0, Phase de freinage (récupération de l'énergie).

V < 0 et I < 0, Rotation dans le deuxième sens.

V > 0 et I < 0, Phase de freinage (récupération de l'énergie).

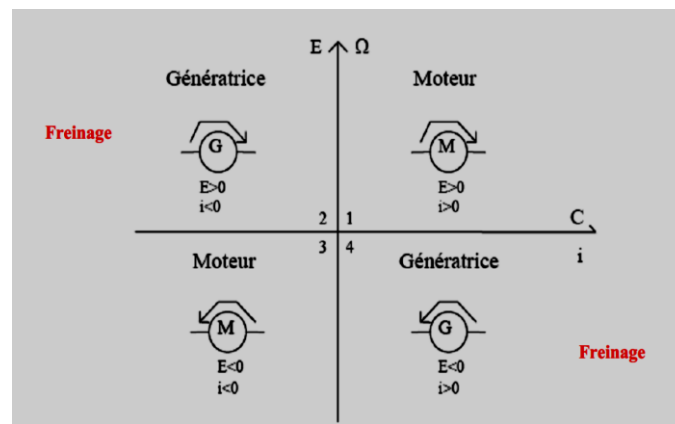


Figure (II.15) : Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants.

II.9 Technique de commande MLI :

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend largement de la technique de commande utilisée pour commander les interrupteurs de ce hacheur. Il existe plusieurs techniques de commande et le choix d'une technique parmi toutes les possibilités dépend essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné. La technique la plus utilisée dans les variateurs de vitesse pour MCC est la commande par modulation de la largeur d'impulsion MLI. Les techniques de modulation de largeur d'impulsions sont multiples. Cependant, 04 catégories de MLI ont été développées :

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général, triangulaire.
- Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre.
- Les modulations post-calculées encore appelées MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.
- Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité représentant la loi de commande.

Le développement considérable de la technique de modulation en largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs.

II.9.1 Principe de la commande MLI :

Le Principe de base de la Modulation de la largeur d'impulsion MLI est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la production d'un signal MLI est de comparer entre deux signaux.

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continue qui varie entre deux seuils définis en fonction de notre application.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

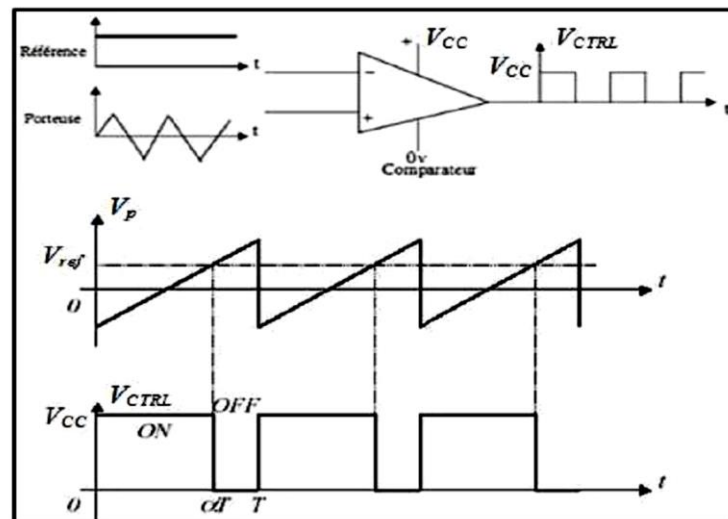


Figure (II.16) : Réalisation du signal MLI.

L'intersection de la référence avec la porteuse, en sens croissant, commande l'ouverture du transistor (T), son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande la fermeture de (T). Le principe se fait par comparaison entre les deux signaux utilisant un amplificateur opérationnel. [11]

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur les différents convertisseurs statiques (**gradateur, redresseur, onduleur et hacheur**). On a fait un balayage sur les stratégies de commande d'une MCC utilisant les convertisseurs DC-DC. Les différentes méthodes et hacheurs utilisés pour commander la vitesse de la machine à courant continu (MCC) ont été développés ainsi que la technique MLI associée.