Machine asynchrone triphasée : pilotage à vitesse variable

« Les mouvements des corps célestes sont devenus plus prévisibles ; mais toujours incalculables pour les peuples sont les mouvements de leurs souverains. »

Paroles de Galileo Galilei in « *La vie de Galilée* » de Bertolt Becht

Résumé

L'exploitation industrielle de la machine asynchrone nécessite la mise en place des moyens de variation de la vitesse de rotation dans le but d'entraîner la charge à vitesse variable. Cette application est fondée sur une bonne connaissance du modèle de la machine et de l'expression du couple électromécanique dépendant des paramètres électriques.

Le document débute par le rappel de l'expression du couple électromagnétique établie dans le document « Machine asynchrone triphasée : modélisation ». C'est l'occasion de recenser les moyens de déplacer le point de fonctionnement : par action sur la tension statorique, par modification de la résistance rotorique (sur machine à rotor bobiné exclusivement) ou par variation de la pulsation des tensions statoriques du réseau d'alimentation.

Le détail aborde en premier lieu le moyen de changer le sens de rotation rotorique. Les deux procédés suivants rappellent la modification de la tension statorique et de la résistance rotorique. Ils sont cependant limités à des phases transitoires en raison de rendements énergétique médiocres. Le dernier mode agit sur la fréquence du réseau d'alimentation . C'est le plus employé industriellement en raison de sa souplesse et qui procure les meilleures fonctionnalités à la MAS. En effet, les modifications de la caractéristique de couple permettent d'assurer l'ajustement optimal du point de fonctionnement afin d'assurer le meilleur comportement dynamique de la machine. Cette qualité est d'autant mieux obtenue que le rapport tension efficace–fréquence statorique est maintenu constant.

C'est alors l'occasion de mettre en œuvre les convertisseurs d'énergie pour assurer le meilleur pilotage de la MAS : un onduleur triphasé, assurant de surcroît une optimisation spectrale des tensions statoriques ayant recours à la modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.).

Sommaire

I. Introduction 2
II. Rappel du modèle et de la loi de couple de la MAS 2
III. Variation de vitesse de la machine asynchrone 2
III.1. Inversion du sens de rotation 2
III.2. Action sur la tension simple du réseau d'alimentation 2
III.3. Action sur la résistance rotorique 3
III.4. Action sur la fréquence d'alimentation 3
III.4.1. Contrainte imposée par la variation de la vitesse de synchronisme 4
III.4.2. Intérêt d'une telle action 4
III.5. Linéarisation de la caractéristique de couple 4
III.5.1. Mise en place de la linéarisation 4
III.5.2. Expression simplifiée de $C_{em}(\Omega_r)$ 5
III.5.3. Tracés de $C_{em}(\Omega_r)$, lorsque f varie (avec V_s/f = cste) 5
III.5.4. Conclusions 5
IV. Variateurs de vitesse pour MAS 5
IV.1. Une structure de principe 5
IV.2. Chronogrammes des tensions 6
IV.3. Pour une meilleure qualité harmonique : modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.) 6
IV.4. Exemple de schéma fonctionnel (d'après document Télémécanique) 7
V. Conclusion 8
VI. Bibliographie 8

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

I. Introduction

Les deux étapes précédentes ont permis de mettre en place la machine asynchrone au travers de la création d'un champ tournant sinusoïdal pour modéliser l'actionneur par un schéma équivalent électrique. Cette démarche a permis d'établir la loi d'évolution du couple de la MAS en fonction du paramètre glissement (g).

Sur cette base, il est désormais envisageable de mettre en place les moyens nécessaires au contrôle et à la variation de vitesse de cette machine.

II. Rappel du modèle et de la loi de couple de la MAS

La modélisation finale, établie dans le document « Machine asynchrone triphasée : modélisation » laissait apparaître un schéma équivalent électrique ne comportant qu'une seule fréquence, celle du réseau triphasé d'alimentation et rendant compte de toutes les puissances, tant électriques qu'électromécaniques.

Le couple s'exprime alors en fonction du glissement par la relation :

$$C_{em} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s} \cdot \frac{\frac{R_2'}{g}}{\left(\frac{R_2'}{g}\right)^2 + \left(L_2' \cdot \omega\right)^2} \quad \text{avec } R_2' = \frac{R_2}{m^2} \text{ et } L_2' = \frac{L_2}{m^2}$$

On note les grandeurs essentielles :

- V_S est la tension efficace d'alimentation statorique par phase ;
- ω est la: pulsation des grandeurs électriques du réseau d'alimentation ;
- Ω_S est la pulsation de synchronisme ($\Omega_S = \omega/p$) ;
- Ω_r est la pulsation de rotation de l'arbre de la machine ;
- R_2 est la résistance des phases rotoriques et L_2 l'inductance cyclique de fuite du rotor ; ramenées au stator, elles deviennent R'_2 et L'_2 ;
- m est le rapport du nombre de spires au rotor sur celui au stator $m = \frac{N_r}{N_s}$.

L'étude de cette fonction a permis le tracé de la caractéristique de couple afin de la confronter à celle de la charge : c'est le **point de fonctionnement.**

C'est alors l'occasion de préciser que la vitesse de rotation de la MAS peut être modifiée :

- par action sur la tension simple statorique V_S ;
- par action sur la résistance rotorique R_2 (et par voie de conséquence R'_2) ;
- par variation de la pulsation de synchronisme au travers de la fréquence du réseau d'alimentation.

III. Variation de vitesse de la machine asynchrone

III.1. Inversion du sens de rotation

Avant d'entamer l'étude des procédés qui permettent la variation de vitesse, on peut s'arrêter sur le moyen de changer le sens de rotation de la MAS. Le rotor suit le sens du champ tournant. Pour inverser la rotation, il suffit de changer le signe de ce champ en inversant deux phases statoriques. C'est ce procédé qui est utilisé industriellement.

III.2. Action sur la tension simple du réseau d'alimentation

Ce moyen permet une certaine modification de la vitesse, mais la plage des variations reste faible. De plus, le réseau est perturbé par les harmoniques de courant dues au découpage par le gradateur.

C'est donc un procédé à ne mettre en œuvre que dans des phases transitoires, un démarrage par exemple, mais à éviter de manière permanente pour la variation de vitesse. Développée dans le document « MAS : modélisation », ce procédé n'est pas traité à nouveau.

III.3. Action sur la résistance rotorique

Ce procédé a, lui aussi, été présenté lors de la modélisation.

Cette fois, la modification de la vitesse est plus performante puisque la plage de variation s'étend d'une vitesse nulle à celle de synchronisme.

Cependant, les résistances ne peuvent être insérées ou supprimées que si le rotor est accessible. Il faut donc que la machine dispose d'un rotor bobiné : elle demeure moins répandue. D'autre part, la puissance dissipée dans les résistances altère le rendement de l'entraînement.

En conséquence, à l'instar du mode précédent, en basse puissance, ce procédé de variation de vitesse est aujourd'hui abandonné.

Remarque :

Dans le passé et pour les machines de forte de puissance, le soutirage rotorique permettait la variation de vitesse en redressant la tension rotorique pour la réinjecter sur le réseau au travers d'un onduleur.

III.4. Action sur la fréquence d'alimentation

Dernier paramètre, la pulsation de synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ influence le couple au travers des termes $\frac{3V_s^2}{\Omega_s}$, $g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$ et ω.

On exprime le couple en fonction de Ω_S :

$$C_{em} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s} \cdot \frac{\frac{R_2'}{g}}{\left(\frac{R_2'}{g}\right)^2 + \left(L_2' \cdot \omega\right)^2} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s} \cdot \frac{R_2' \cdot g}{R_2'^2 + \left(L_2' \cdot \omega \cdot g\right)^2} = 3 \cdot \left(\frac{V_s}{\Omega_s}\right)^2 \cdot \frac{R_2' \cdot (\Omega_s - \Omega_r)}{R_2'^2 + \left(L_2' \cdot p \cdot (\Omega_s - \Omega_r)\right)^2}$$

Cette loi d'évolution du couple met en évidence son augmentation lorsque la pulsation de synchronisme diminue et permet de tracer les caractéristiques de la Figure 1.

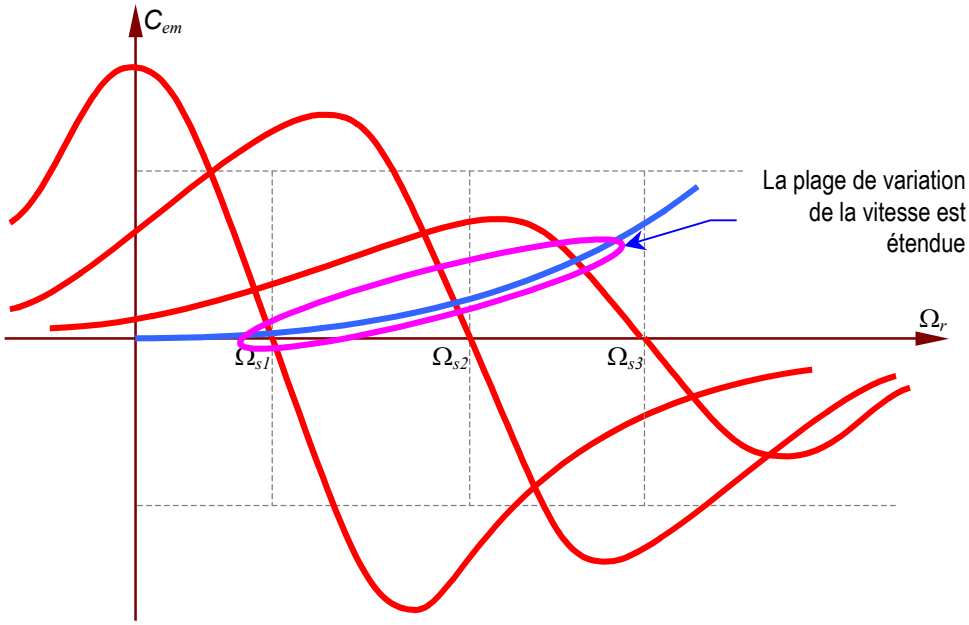


Figure 1 : Influence de la vitesse de synchronisme.

On observe clairement une modification du point de fonctionnement, donc de la vitesse de rotation de la MAS. La plage de variation est très étendue : elle peut couvrir pratiquement toute la caractéristique de la charge entraînée.

La modification du terme $3\left(\frac{V_s}{\Omega_s}\right)^2$ dans l'expression du couple a une incidence sur les grandeurs magnétiques internes de la machine : elle va être établie dans le paragraphe suivant.

III.4.1. Contrainte imposée par la variation de la vitesse de synchronisme

On s'appuie sur l'expression de la tension efficace statorique V_S issue de la modélisation :

$$V_s = 2\sqrt{2}\pi \cdot N_s \cdot B_m \cdot R \cdot l \cdot \frac{f}{p} = \sqrt{2}\pi \cdot N_s \cdot \Phi_m \cdot \frac{f}{p}$$

Or, le flux maximal Φ_m est limité par la saturation du matériau magnétique : $\Phi_m \leq \Phi_{sat}$

En conséquence, on extrait le rapport $\frac{V_s}{f}$: $\frac{V_s}{f} \leq \frac{\sqrt{2}\pi}{p} N_s \cdot \Phi_{sat}$.

Or, le terme du second membre, lié à la construction de la machine est constant. On peut donc considérer que la quantité $\frac{V_s}{f}$ doit demeurer constante pour éviter la saturation des matériaux magnétiques de la machine.

On en tire un mode industriel courant de pilotage de la MAS : travailler à *U/f* constant.

III.4.2. Intérêt d'une telle action

L'action sur la fréquence *f*, tout en conservant le rapport V_S/f constant, permet :

- de translater les courbes de couple par action sur Ω_S,
- de maintenir la valeur du couple à sa valeur maximale, $C_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{p \cdot L_2^{'}} \left(\frac{V_s}{\Omega_s}\right)^2$, ce qui est très appréciable en phase de démarrage (fort couple accélérateur).

Cette action permet donc de modifier la vitesse de rotation en charge de la machine tout en plaçant le point de fonctionnement là où le couple d'entraînement est le plus satisfaisant pour mouvoir la charge.

III.5. Linéarisation de la caractéristique de couple

Le régime de fonctionnement nominal est obtenu pour un glissement proche de zéro. La caractéristique de couple en fonction de la vitesse y présente une *pente négative* : c'est là qu'il y a stabilité du point de fonctionnement.

III.5.1. Mise en place de la linéarisation

Dans cette zone, le couple s'exprime par :

$$C_{em} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s} \cdot \frac{\frac{R_2^{'}}{g}}{\left(\frac{R_2^{'}}{g}\right)^2 + \left(L_2^{'} \cdot \omega\right)^2} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s} \cdot \frac{R_2^{'} \cdot g}{R_2^{'2} + \left(L_2^{'} \cdot \omega \cdot g\right)^2}$$

Un développement limité au voisinage de $g = 0$ fournit :

$$C_{em}(g) \approx \frac{3}{R_2^{'}} \cdot \frac{V_s^2}{\Omega_s} g$$

Dans cette zone, la caractéristique de couple en fonction du glissement est linéaire.

Ceci permet de préciser localement un comportement couple-vitesse de la MAS linéaire.

Un autre moyen, plus « visuel », serait de dire que g_{max} est proche de zéro, c'est-à-dire que la résistance rotorique est faible. La caractéristique de couple s'identifie alors à sa tangente : une linéarisation du couple de la MAS dans la zone des glissements faibles est donc justifié.

III.5.2. Expression simplifiée de $C_{em}(\Omega_r)$

En effectuant le changement de variable $g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$, on obtient l'expression en fonction de Ω_r :

$$C_{em}(\Omega_r) \approx \frac{3}{R_2'} \cdot \left(\frac{V_s}{\Omega_s}\right)^2 (\Omega_s - \Omega_r)$$

De surcroît, si la condition V_S/f est vérifiée, le couple est un réseau de droites parallèles passant en (Ω_S , 0) et de pente $-\frac{3}{R_2'} \cdot \left(\frac{V_s}{\Omega_s}\right)^2$.

III.5.3. Tracés de $C_{em}(\Omega_r)$, lorsque *f* varie (avec V_s/f = cste)

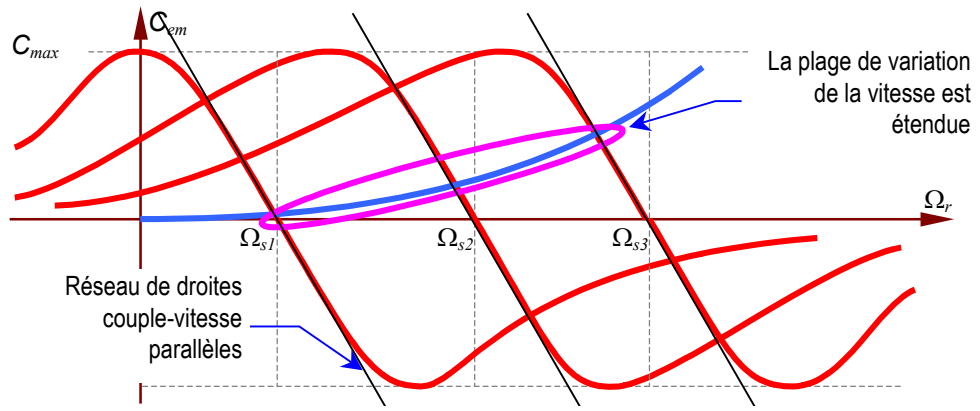


Figure 2 : Avec les caractéristiques linéarisées de couple.

III.5.4. Conclusions

Le réseau de courbes linéarisées est semblable à celui obtenu lors du tracé des caractéristiques de couple de la MCC par action sur la tension moyenne d'induit.

Il y a donc analogie entre les deux machines du point de vue de leur comportement externe, la fréquence jouant, pour une MAS, le même rôle que la tension d'induit pour une MCC.

IV. Variateurs de vitesse pour MAS

Parmi les solutions permettant d'obtenir la variation de la vitesse de rotation d'une MAS, la plus performante consiste à modifier la fréquence du réseau d'alimentation tout en maintenant le rapport de la tension efficace sur la fréquence d'alimentation statorique constante.

Le dispositif moderne, issu de l'électronique de puissance, remplissant ce rôle est l'**onduleur autonome triphasé**. C'est un convertisseur continu-alternatif (sinusoïdal).

IV.1. Une structure de principe

Le schéma de principe d'un tel système est présenté à la Figure 3.

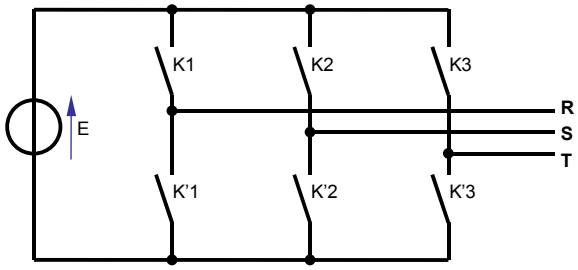


Figure 3 : Schéma de principe d'un onduleur autonome.

Les commutateurs sont des transistors (associées à leur diode tête-bêche pour permettre la réversibilité en courant) bipolaires, MOSFET ou IGBT voire des thyristors (associées à leurs ensembles d'extinction et d'inversion) pour les puissances contrôlées les plus élevées. Ils sont commandés suivant une stratégie de commande qui permette la synthèse des tensions triphasées.

La source de tension constante *E* peut être obtenue industriellement par un redresseur monophasé ou triphasé fixe suivi d'un filtre. Il n'est pas nécessaire, en effet, de faire varier le réseau continu, la commande n'est donc pas nécessaire.

IV.2. Chronogrammes des tensions

Les formes d'ondes issues de la stratégie de commande associée pour cette onduleur sont donnés à la Figure 4. Dans la stratégie de commande des commutateurs, un rectangle indique le commutateur en position fermée. A chaque instant, trois sont ouverts et trois sont fermés.

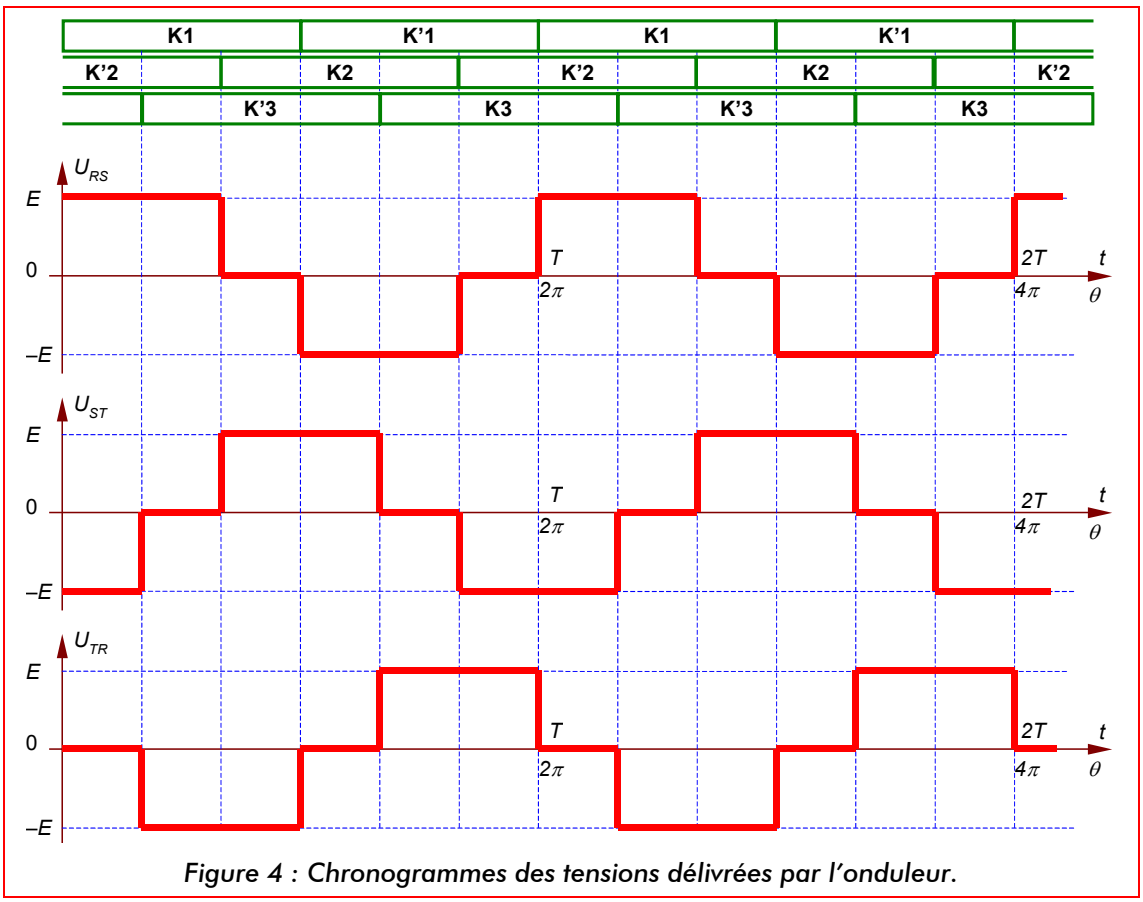


Figure 4 : Chronogrammes des tensions délivrées par l'onduleur.

IV.3. Pour une meilleure qualité harmonique : modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.)

Les tensions précédentes obtenues par découpage d'une tension constante ont des formes en créneaux dont la richesse spectrale les éloigne des sinusoïdes souhaitées pour alimenter le stator des MAS.

Pour obtenir des formes d'onde plus satisfaisantes, la tension *E* est découpée suivant des motifs rectangulaires dont le rapport cyclique suit une loi sinusoïdale du temps. On dit alors que l'on a affaire à une **modulation de largeur d'impulsions**, abrégée par **M.L.I**.

Remarque : en anglo-américain on dit *Pulse Width Modulation* ou P.W.M.

Pour s'assurer d'une évolution de la tension de sortie la plus « lisse » possible, le découpage est réalisé à une fréquence de l'ordre de 10 à 20 kHz bien supérieure à celle du réseau d'alimentation réalisé.

En résumé, à chaque instant, la « valeur moyenne » de la tension obtenue est sinusoïdale.

La Figure 5 présente les deux modes de réalisation d'une tension sinusoïdale par MLI : unipolaire ou bipolaire et le courant proche du sinusoïdal.

Chronogrammes typiques dans une alimentation MLI

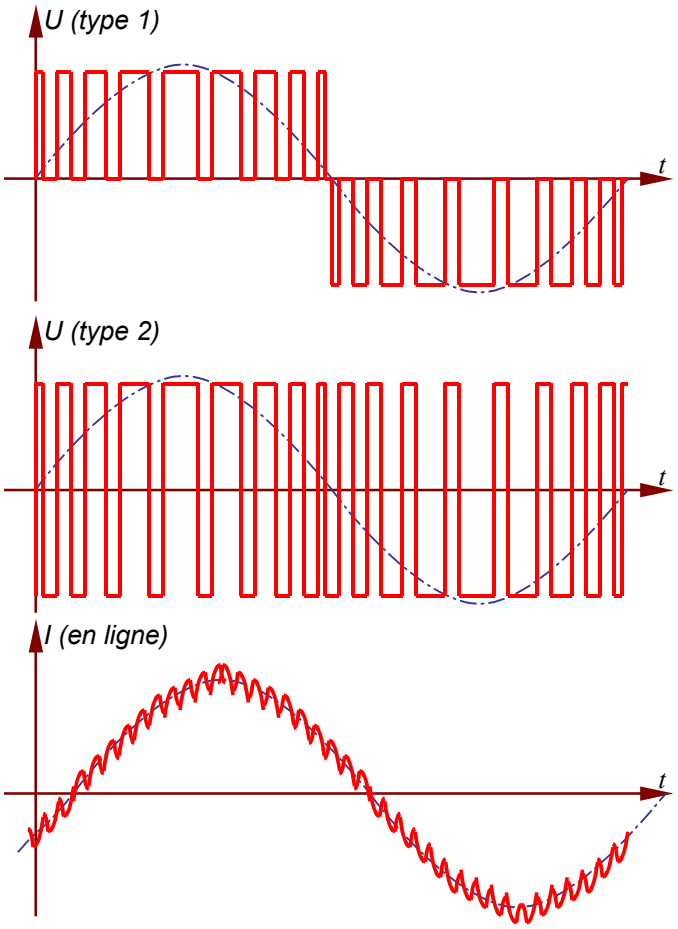


Figure 5 : Tension composée et courant de ligne issues d'un générateur MLI.

IV.4. Exemple de schéma fonctionnel (d'après document Télémécanique)

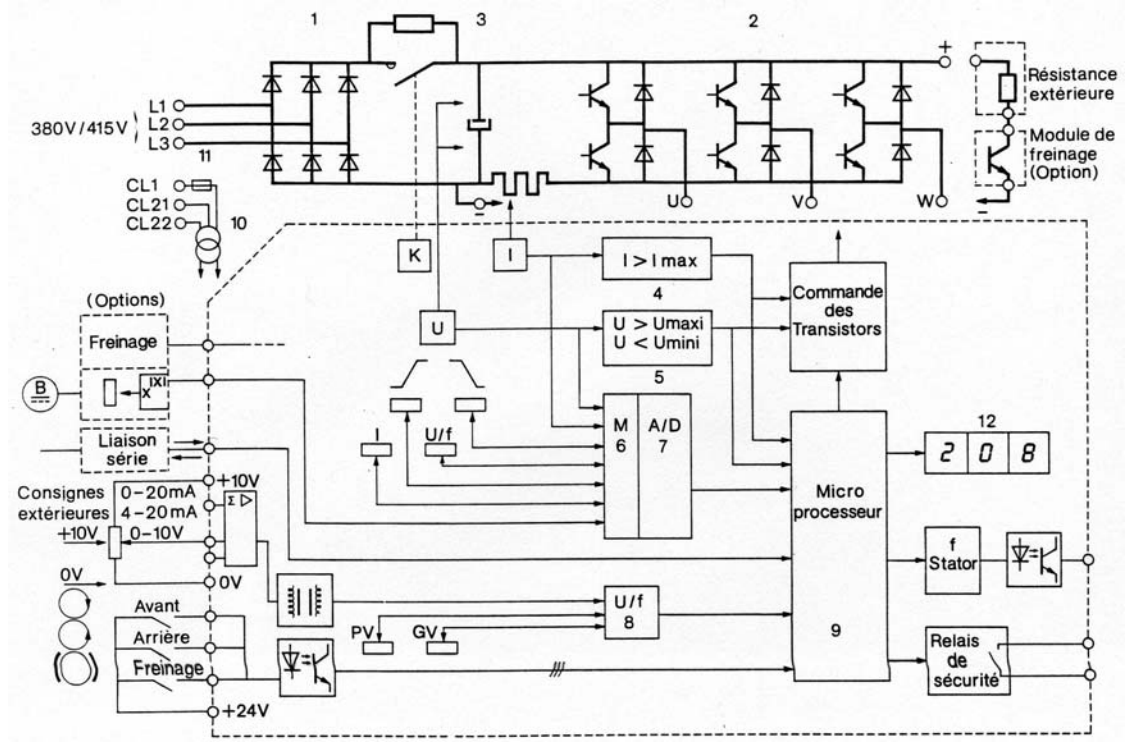


Figure 6 : Schéma fonctionnel d'un onduleur triphasé industriel (exemple).

Distinction des éléments importants

- Réseau d'alimentation et redresseur (1) : monophasé ou triphasé (le cas ici), l'association réseau-redresseur n'utilise qu'un convertisseur non commandé car le contrôle s'opère sur un autre élément de la chaîne.
- Filtre (3) : le condensateur permet la diminution du taux d'harmonique pour disposer d'une source la plus continue possible.
- Onduleur triphasé (2) : la structure, ici à transistors bipolaires, reprend le principe précédent.
- Limitation du courant de charge : la résistance série peut être mise en service par l'interrupteur pour contrôler le courant issu du redresseur (commande par K).
- Contrôle courant maxi (4) : la mesure du courant dans le redresseur est obtenu par le capteur I pour être comparée au seuil maximal et agir en conséquence sur la commande de l'onduleur.
- Contrôle tension maxi (5) : la tension est mesurée aux bornes du condensateur de filtrage et l'ondulation est déterminée par croisement des seuils mini et maxi.
- Acquisition capteurs et conversion A/N : le multiplexeur (6) concentre les différentes informations analogiques en une seule convertie en numérique (7) pour être traitée par le calculateur (9).
- Convertisseur tension-fréquence (8) : les signaux analogiques extérieurs sont convertis en grandeurs numériques pour être compatibles avec le calculateur.
- Alimentation des circuits de contrôle (10) : elle est intégrée au variateur.
- Calculateur (9) : assure la gestion des différentes informations pour établir la stratégie de commande des transistors.

Interfaçage industriel

Des contacts extérieurs permettent de choisir le sens de rotation (avec isolement galvanique). Un module de freinage permet d'injecter un courant continu dans un enroulement du stator pour créer un champ fixe remplaçant le champ tournant et freinant la machine (transistor et résistance extérieurs).

La consigne de vitesse peut être fixée au travers d'une interface 4-20 mA, 0-20 mA ou 0-10 V (signaux industriels traduisant des variations de 0 à 100%) ou par 2 consignes préréglées « petite vitesse PV » ou « grande vitesse GV ».

Le calculateur délivre aussi des informations particulières : défaut, pour utilisation dans une commande câblée à contacteurs, affichage de la fréquence statorique et fournir l'information « fréquence atteinte » isolée galvaniquement.

Une liaison série vers un automate programmable industriel (A.P.I.) est disponible si besoin.

V. Conclusion

Voici franchie la dernière étape de présentation de la MAS. C'est la machine que l'on pourrait qualifier « de base » qui fut décrite. Qu'elle soit à rotor à cage ou bobiné, les lois de fonctionnement générales ont été décrites.

Il existe cependant des machines dérivées qui mettent en œuvre des procédés favorisant tel ou tel paramètre pour améliorer les performances au démarrage (rotor à encoches profondes ou à double cage), en charge ou en termes de variation de vitesse (variation du nombre de paires de pôles) : il ne font pas partie des développements de ce document.

Sur le plan du pilotage, c'est là aussi le variateur « standard » qui a été décrit. De nombreuses applications de variation de vitesse utilisent des associations de machines, tant alternatives que continues, pour améliorer les performances des groupes en vitesse variable (soutirage rotorique, cascade hyposynchrone). Mais elles ne sont retenues que sur des machines de très forte puissance.

Enfin, une théorie plus complète de la MAS existe sous l'appellation de **modèle vectoriel** qui fait appel à une écriture temporelle complète des grandeurs électriques et magnétiques.

VI. Bibliographie

- [1] **Jean Bonal**. Entraînements électriques à vitesse variable. Prométhée — Groupe Schneider. Tec et doc (Lavoisier). 1982.
- [2] **Gilles Feld**. Modélisation d'une machine asynchrone. Revue 3EI numéro 1. Société des Électriciens et des Électroniciens (SEE).