

Bureau d'Etudes Electronique de Puissance : E2I4

Commande d'un Onduleur par Modulation de Largeur d'Impulsion

Du fait de la complexité croissante des techniques modernes, le processus de développement et de contrôle des produits devient lui aussi de plus en plus complexe : les outils de simulation sont alors indispensables lors de leur conception.

Les outils Pspice, déjà utilisés dans le domaine de l'électronique analogique, peuvent également être utilisés dans les domaines de l'électronique de puissance; cependant il existe un logiciel dédié à l'électronique de puissance qui est PSIM (société PowerSim) très facile à mettre en œuvre ; le corollaire est une maîtrise limitée de certains éléments du logiciel...

Nous proposons donc l'utilisation du logiciel PSIM pour simuler le fonctionnement d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsions (MLI).

La charge de cet onduleur sera un simple circuit R, L suffisant pour représenter l'ensemble des phénomènes que l'on cherchera à illustrer.

A. Préambule – prise en main de l'outil

Un accord étant convenu avec la société PowerSim, les travaux de simulations peuvent être réalisés aussi bien en salle, que chez vous sur votre propre ordinateur, en installant le logiciel sur votre machine.

Une étape importante porte sur la bonne compréhension des structures vues en TD. Ainsi, il vous est demandé de reprendre les sujets de TD afin de vous assurer de la bonne compréhension des modes de fonctionnement et des formes de signaux obtenus.

Une première étape portera naturellement sur le redresseur mono alternance. Ceci en commutation naturelle puis commandée avec Charge R, RC puis RL (L très grand).

Avant de vouloir étudier une structure assez étoffée comme celle d'un onduleur, l'Etude de quelques montages élémentaires semble indispensable. Ces schémas simples permettent de prendre en main les composants et les circuits de commande élémentaires.

Ainsi il est fortement conseillé de commencer par

- Redressement simple alternance à diode.
 - Sans DRL
 - Avec DRL

- Redressement simple alternance à interrupteur commandé (par exemple thyristor).
 - Sans DRL
 - Avec DRL

Figure 1 : Redressement simple alternance à diode

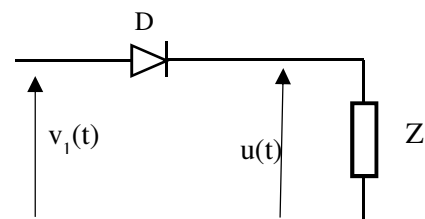
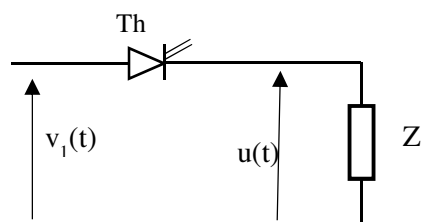
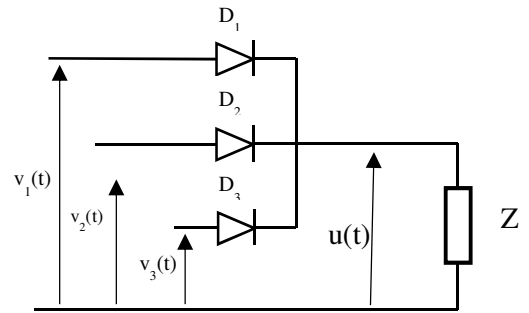


Figure 2 : Redressement simple alternance à interrupteur commandé



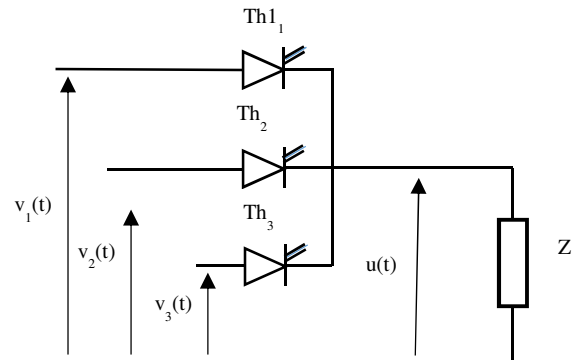
- Redressement triphasé à Diode à Cathode Commune.
 - Sans DRL
 - Avec DRL

Figure 3 : Redressement triphasé à Diode à Cathode Commune.



- Redressement triphasé à Cathode Commune à interrupteur commandé (par exemple thyristor).
 - Sans DRL
 - Avec DRL

Figure 4 : Redressement triphasé à Cathode Commune à interrupteur commandé.



Pour chacun de ces montages il est judicieux de mettre en œuvre des moyens pour suivre les signaux de courant, tension et commande

Pour chacun de ces circuits la charge à étudier serait une charge purement résistive (R) ou purement inductive (L avec R très faible)

B. Préparation à l'étude de l'onduleur

On cherche à générer un signal (par exemple sinusoïdal $f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$) à l'aide du nombre restreint de niveaux de tension (+E, 0 et -E) offerts par un onduleur. Pour cela, on découpe à haute fréquence F_H . Sur chacun des intervalles obtenus, on discrétise la sinusoïde et on cherche à générer à l'aide des niveaux de tension disponibles les mêmes valeurs moyennes sur cette période haute fréquence. On donne $A = 230\sqrt{2}$

I. Principe de commande

On discrétise en 8 intervalles. Pour simplifier les calculs, on calculera la valeur moyenne sur un intervalle de discrétisation comme étant la valeur instantanée au milieu des instants d'échantillonnage (d'autres solutions sont possibles : calcul d'intégrale, linéarisation entre les points d'échantillonnage...).

- Calculer et représenter sur la figure ci-dessous les valeurs discrétisées de la sinusoïde.
- Compte tenu des symétries pour le nombre d'échantillons choisi, combien y en a-t-il de différentes ?

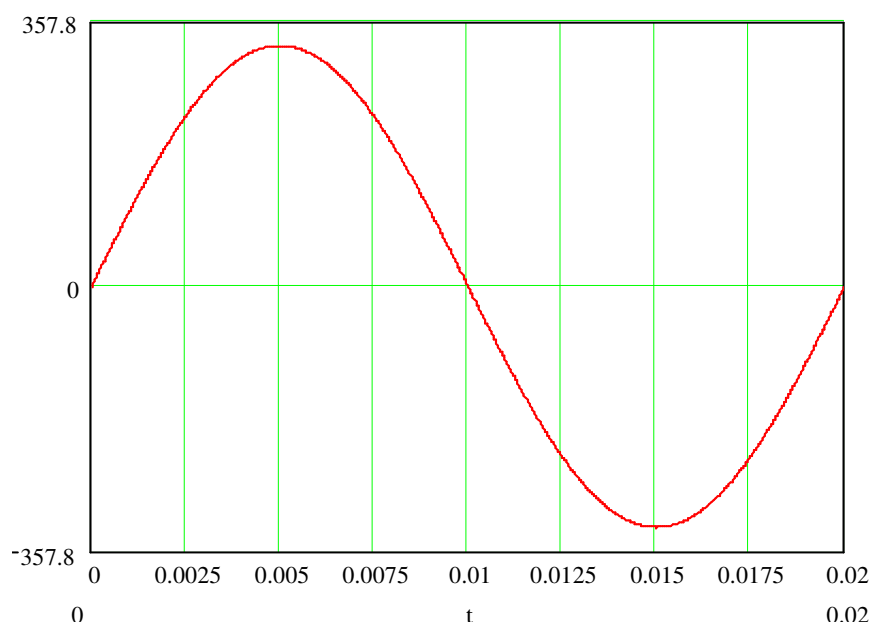


Figure 5 : Discrétisation du sinus

II. Application à un onduleur

On dispose d'un onduleur en pont complet alimenté sous $E = 400$ V et piloté à la fréquence F_H (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les interrupteurs T1 et T3 sont commandés en même temps, de manière complémentaire à T2 et T4. On appelle $\alpha \cdot T_H$ le temps de conduction de T1 et T3.

- Quels sont les niveaux de tension disponibles avec ce type de commande ?
- Quelle est la valeur moyenne de la tension appliquée à la charge sur la période de découpage T_H ?
- En déduire les valeurs des 8 rapports cycliques nécessaires à l'obtention des 8 valeurs discrètes de la question 1-a.
- Tracer sur la figure ci-dessus la tension U_{ch} appliquée à la charge.

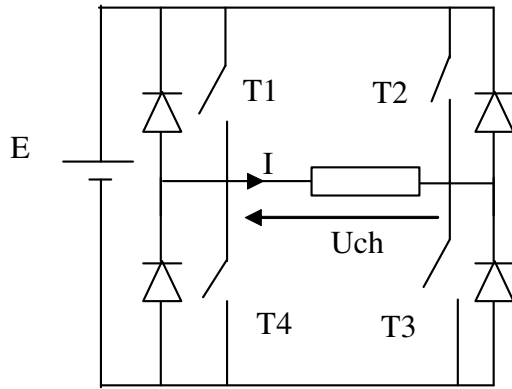


Figure 6 : Onduleur en Pont complet

III. Généralisation

On choisit de découper à une fréquence F_H égale à m fois la fréquence F de la sinusoïde que l'on cherche à générer (m est appelé **indice de modulation**). Exprimer le niveau de tension puis la valeur du rapport cyclique $\alpha(n)$ à la $n^{\text{ième}}$ discrétisation.

IV. Réalisation analogique

On compare la sinusoïde image que l'on cherche à générer (amplitude crête A) avec un signal en dent de scie de valeur crête B . On commande les interrupteurs T1 et T3 quand la dent de scie est inférieure à la sinusoïde.

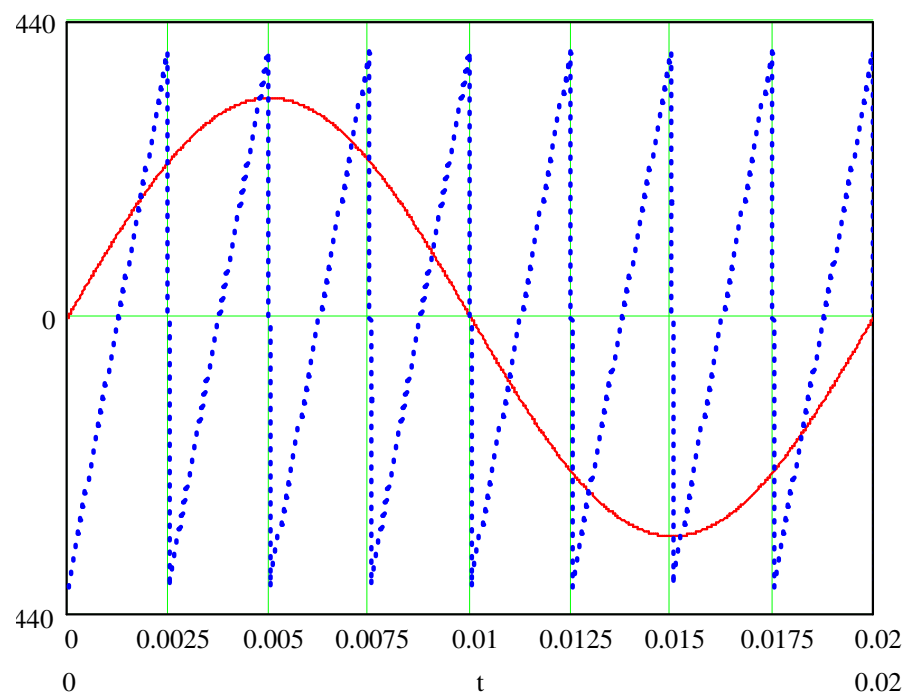


Figure 7 : Comparaison de la sinusoïde image à générer avec un signal en dent de scie.

- 1) Dessiner sur le diagramme ci-dessus la tension appliquée à la charge pour un indice de modulation $m = 8$.
- 2) On peut trouver numériquement les 8 rapports cycliques :

Intervalle	0	1	2	3	4	5	6	7
α	0.717	0.905	0.824	0.620	0.380	0.176	0.095	0.283

3) Comparer avec les résultats de la question 2. Commenter.

V. Etude fréquentielle

1) Pour $m = 20$ (un peu plus réaliste que $m = 8$) et une fréquence basse de 50 Hz, on trace le spectre de la tension ainsi générée. Conclure.

a) Allure temporelle courant-tension (charge R, L)

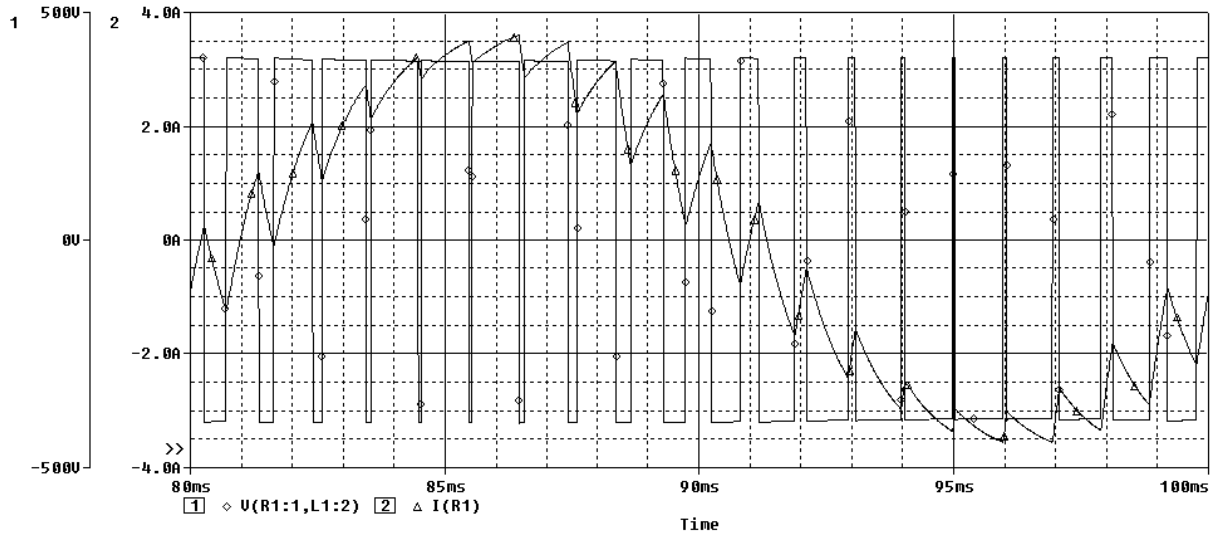


Figure 8 : Allure temporelle du courant

b) Spectre de la tension

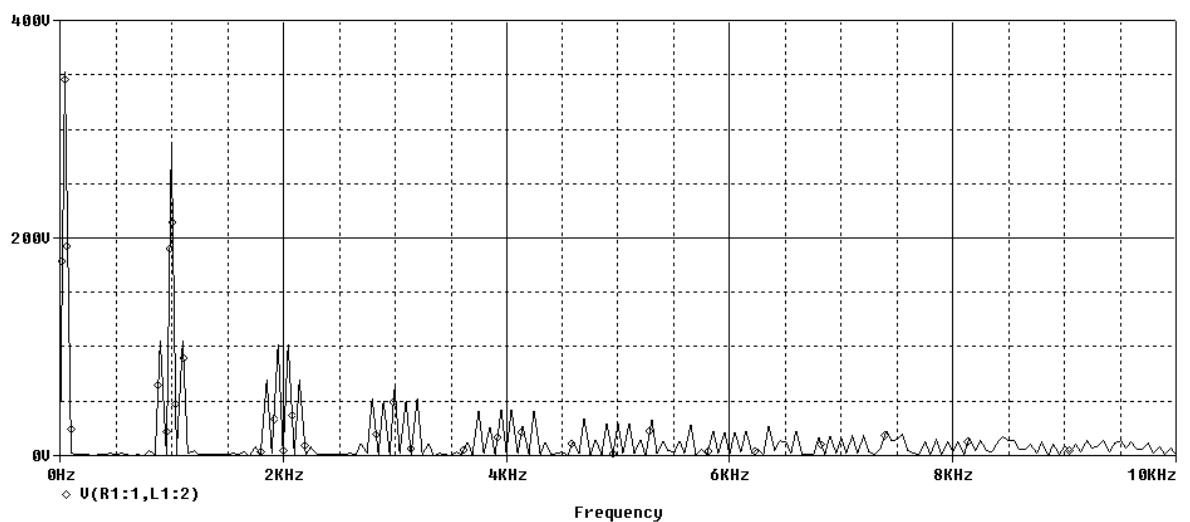


Figure 9 : Spectre de la tension

2) Comparer qualitativement avec une commande pleine onde (créneau simple à la fréquence F))

VI. Autre stratégie de commande

Au lieu de commander T1 et T3 (et T2 – T4) en même temps, on décale leurs commandes de $T_H/2$.

- 1) Dessiner pour $m = 8$ les formes d'ondes en tension ainsi obtenues pour un courant en retard vis à vis du fondamental de la tension.

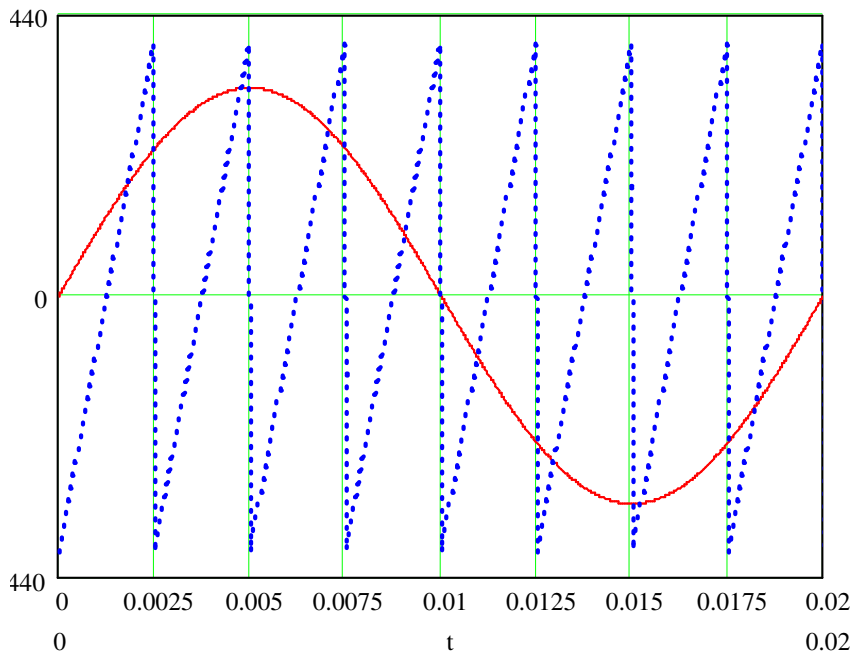


Figure 10 : Commande des interrupteurs décalé de $T_H/2$

- 2) Pour $m = 20$ et une fréquence basse de 50 Hz, on trace le spectre de la tension ainsi générée.

- a) Allure temporelle courant-tension (charge R, L)

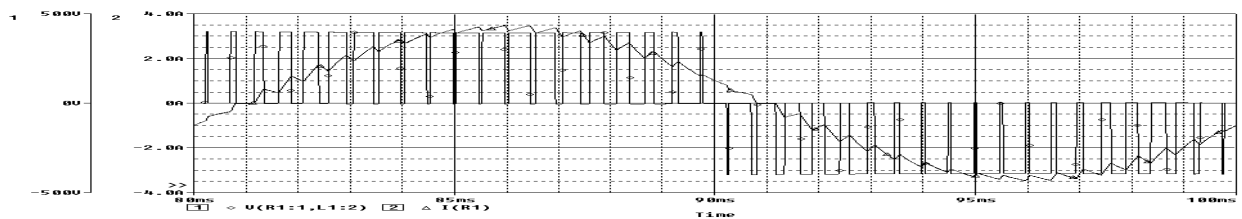


Figure 11 : Allure temporelle courant & tension sur charge RL avec $m=20$

- b) Spectre de la tension

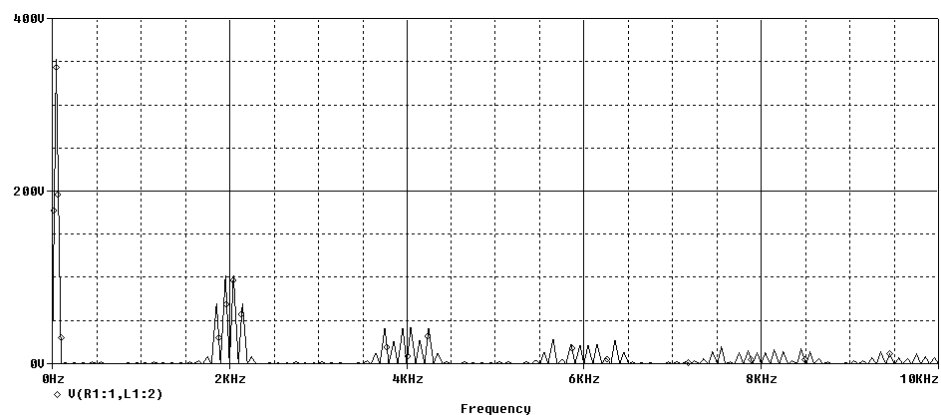


Figure 12 : Spectre de la tension sur charge RL avec $m=20$

- 3) D'après les questions a) et b), Conclure sur l'intérêt de cette commande.

C. TRAVAIL EN SALLE

I. Construction du schéma d'un onduleur monophasé

Un didacticiel simplifié de PSIM (auteur : JY Renou) est disponible en salle ainsi qu'une présentation de ce logiciel (annexe).

Construire le schéma de puissance conformément à celui donné en figure 3 à l'aide des composants MOSFET, R, L et V_{DC} . On prendra une tension d'entrée de 400 V, la charge sera composée d'une résistance de $10\ \Omega$ en série avec une inductance de 10 mH.

Le simulateur a besoin d'une référence de potentiel unique pour tout le circuit : Ground. En connecter une sur le circuit de puissance. Les entrées des composants MOSFET sont complètement isolées de la partie puissance ; ne pas oublier de paramétrer la simulation à l'aide d'une commande "Simulation control" préalablement placée sur le schéma.

Pour clarifier le schéma et permettre une modification aisée des commandes, on utilise le composant "LABEL" qui permet de connecter deux parties de circuit en les appelant par le même nom.

1) Construction de la commande

Prévoir une commande "pleine onde" à l'aide de commandes "Gating Block" (Consulter l'aide intégrée si nécessaire) et vérifier le bon fonctionnement du montage. On testera par exemple sur une fréquence de 1 kHz. Il n'y a pas de notion de niveau de tension sur ces blocs de commande... Si l'on veut un MOS réaliste, il faut remplacer les composants MOSFET fournis par le schéma situé à droite sur la figure 1 intitulé "Model MOS".

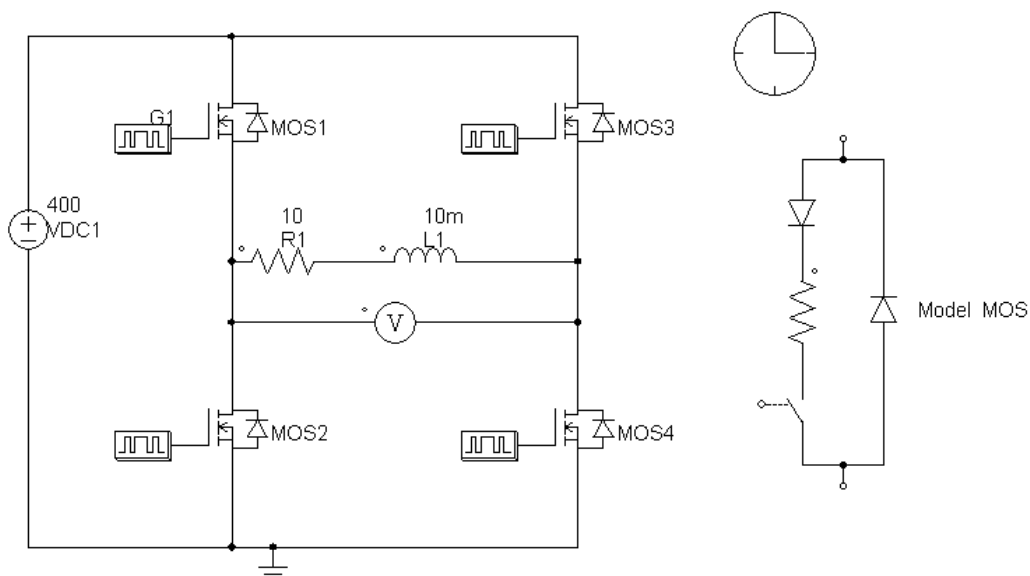


Fig. 1 : Onduleur monophasé : partie puissance et modèle de Mos réel

- Justifier les formes d'ondes obtenues.
- Faire l'analyse de Fourier (bouton FFT) de la tension et du courant sur la charge R-L et commenter.
- Conclure sur la "qualité" de l'onde appliquée à la charge.
- Influence des temps de garde.

Pour éviter le recouvrement des commandes et le court-circuit de bras, insérer dans les commandes un temps de garde : on ne ferme les interrupteurs (ON) que $10\mu s$ **APRES** que les autres se soient ouverts (OFF).

- Après simulation, indiquer quels sont les semi-conducteurs qui conduisent pendant que tous les interrupteurs sont ouverts. La tension appliquée à la charge est-elle modifiée par l'insertion de ces temps de garde ?

Dans la suite du TP, on ne tiendra plus compte de ces temps de garde, mais ils sont indispensables dans la réalité. Leur valeur dépend des technologies de semi-conducteurs utilisés, et de la fréquence de découpage. Leur influence se manifeste surtout par une distorsion des formes d'ondes en MLI. Cette étude dépasse le cadre de ce TP.

II. Commande MLI bipolaire

1) Création de la commande

On utilise la comparaison d'une sinusoïde et d'un triangle pour générer le signal de commande MLI. On choisira une amplitude de 0.9 pour la sinusoïde (fréquence :1 kHz), et de 1 pour le triangle (fréquence :10 kHz). On utilisera les composants SIN pour la sinusoïde (modulante), TRIANGULAR pour générer le triangle (porteuse), et un COMPARATOR puis un "On-Off Controller" pour interfacer la commande et le MOSFET.

Générer deux signaux en opposition de phase pour commander les couples d'interrupteurs 1-2 et 3-4.

2) Formes d'ondes

Observer et commenter en régime permanent (penser à paramétrer "print time") les courbes obtenues, et notamment :

- Courant et tension sur la charge
- Courant dans la source continue

3) Puissance

- Calculer la puissance débitée par la source (on peut utiliser la fonction AVG()).
- Calculer également la puissance reçue par la charge ($R \cdot I_{eff}^2$, soit $R \cdot \text{AVG}(I(R) \cdot I(R))$)
- Comparer et commenter.

4) Analyse spectrale

- Observer la FFT de la tension appliquée à la charge. Que constatez-vous ?
- Relever l'amplitude du premier harmonique de la tension appliquée à la charge (utiliser les curseurs).
- A l'aide de l'approximation du premier harmonique, calculer l'amplitude du courant dans la charge.
- Vérifier sur la simulation temporelle et conclure.

5) Variation de la grandeur de commande

- Vérifier que la modification de l'amplitude de la modulante sinusoïdale permet bien de faire varier l'amplitude du fondamental de la tension appliquée à la charge.
- Discuter de l'allure de cette tension dans le domaine fréquentiel pour une amplitude de 0,1 V de la modulante sinusoïdale.

III. Commande MLI unipolaire

1) Création de la commande

On utilise toujours la comparaison d'une sinusoïde et d'un triangle pour générer le signal de commande MLI. On commande les interrupteurs d'un même bras de manière complémentaire (1-2 et 3-4). On déphase ensuite la commande de 1 et 4 de 180° .

- Réaliser cette commande.

2) Analyse des résultats

- Observer et justifier les courbes obtenues, et notamment le courant et la tension sur la charge, dans les domaines temporel et fréquentiel.
- Comparer avec la solution précédente, et justifier les avantages de cette structure.

IV. Onduleur MLI triphasé

On adjoint à la structure précédente un troisième bras. La charge R, L triphasée est connectée en étoile. La commande est réalisée en pilotant les interrupteurs de chaque bras de façon complémentaire. Les signaux de commande de chaque bras sont générés en comparant la même porteuse à trois modulantes déphasées de 120° .

- 1) Réaliser le schéma, simuler et vérifier le bon fonctionnement de la MLI.
- 2) Retrouver les différents niveaux de tension sur la tension phase neutre de la charge.
- 3) Vérifier le bilan des puissances comme en II.3) (mais en triphasé cette fois ci).

ANNEXES

A. Intérêt de la simulation

Pour l'industriel, il est capital de pouvoir tester avant réalisation des cartes électroniques, des lois de commandes, des structures d'électronique de puissance... sans nécessairement passer par l'étape prototype, longue et coûteuse.

Pour l'étudiant, une simulation permet d'observer facilement et sans risque tous les signaux électriques, afin de bien comprendre le fonctionnement du montage.

Un logiciel de simulation permet en outre de sortir de la phase "scolaire" d'étude d'un montage telle qu'on peut la faire "à la main". On peut par exemple regarder l'influence d'une résistance parasite sur une inductance ou un condensateur, chose difficile (voire parfois impossible) analytiquement. On peut aussi tester différentes valeurs pour un montage donné (fréquence, valeur d'un composant...).

ATTENTION : cette phase d'étude de sensibilité ne peut être correctement menée qu'APRES avoir BIEN COMPRIS le fonctionnement du montage.

B. Avertissements

La simulation est un outil très pratique mais qui peut s'avérer très dangereux pour les étudiants... Quelques recommandations semblent indispensables.

Un logiciel de simulation ne se "trompe" pas : il simule ce qu'on lui demande, avec les informations qu'il a. MAIS ces informations peuvent être erronées (problème de pas de temps, d'erreur dans le circuit défini par l'utilisateur...). NE PAS PRENDRE POUR ARGENT COMPTANT LES RESULTATS DE SIMULATION. Réfléchir, se renseigner auprès des enseignants dès qu'on a un doute...

Dans le même ordre d'idée, toujours procéder par étapes, en simulant et en comprenant d'abord les choses simples avant de compliquer le schéma.

Toujours bien réfléchir à ce qu'on demande à un logiciel : si on veut décrire 1 seconde de fonctionnement d'un convertisseur dont la période de découpage est de 10 μ s, cela fera 100000 périodes à simuler, ce qui peut représenter un temps prohibitif selon la machine dont on dispose... Bien réfléchir avant de lancer une telle simulation si le jeu en vaut véritablement la chandelle. Dans beaucoup de cas, une étude simple permet de définir des conditions initiales pas trop éloignées de celles qui seront atteintes en régime permanent.

Si vous avez à rédiger un rapport de simulation, ne tombez pas dans le piège du dossier comportant une multitude d'impressions d'écran... et rien d'autre !!! Sachez qu'une courbe non commentée en simulation n'a pas plus de valeur qu'en manipulation, et qu'elle est beaucoup plus facile à obtenir... Le TP de simulation demande beaucoup plus d'effort de synthèse car c'est l'interprétation des courbes qui compte, puisque a priori, tous les étudiants auront les mêmes résultats, au moins pour les simulations de base. En fait, les seules données réellement intéressantes sont les conditions de simulations. La courbe ne doit apparaître que si elle illustre réellement une explication.

C. PSIM Student Version 8 - Copyright (c) 2001-2006 Powersim Inc.

4) Introduction

PSIM est un logiciel de simulation sur ordinateur conçu pour l'analyse et la conception de convertisseurs et de commandes de moteur. Avec l'environnement efficace de simulation de PSIM, un large éventail de convertisseurs de puissance, de méthodes de contrôle, et de systèmes d'entraînement de moteur peuvent être facilement mis en place et analysés.

Par rapport à la version professionnelle, la version d'étudiant possède les limitations suivantes :

- Le nombre d'éléments dans le schéma est limité à 60.
- Le scripts en C, les "Power Modeling Block, Embedded Software Block, et General DLL Block", ne sont pas disponibles dans la version étudiant.
- Quelques modules spécifiques ne sont pas disponibles dans la version étudiant.