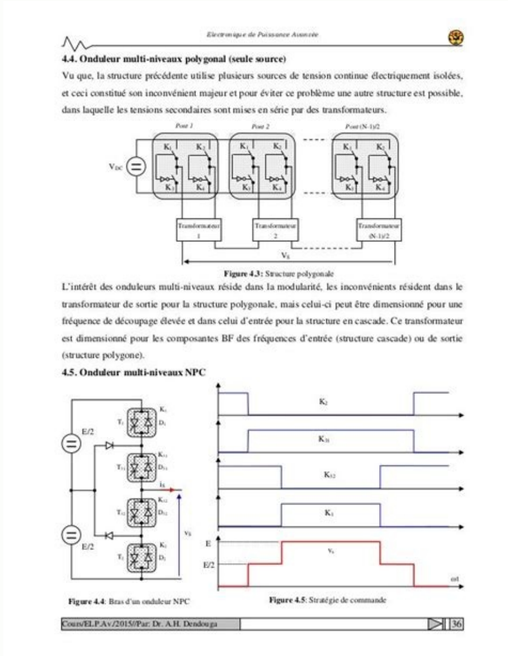
I'm not robot
reCAPTCHA
Continue

Cours complet d'électronique de puissance pdf

Academia.edu uses cookies to personalize content, tailor ads and improve the user experience. By using our site, you agree to our collection of information through the use of cookies. To learn more, view our Privacy Policy. Accueil Cours électronique Exercices électronique Contact Cours gratuits » Cours électronique » Cours électronique de puissance Participez au vote ☆☆☆☆☆★★★★★ UNIVERSITE MOHAMED KHIDER DE BISKRA FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE Module: Electronique de puissance avancée Niveau: 1ère Année MasterSupport de cours: ELECTRONIQUE DE PUISSANCE AVANCEERéalisé par: Dr. Abdelhakim DENDOUGA Maitre de conférences à l'université de Biskra E- Année Universitaire: 2014/2015

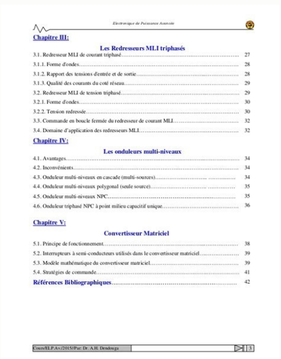
Electronique de Puissance Avancée Sommaire Intorduction ..... 4 Chapitre I Introduction à l'électronique de puissance avancée1.1 Les lois de base d'électronique de puissance..... 5 1.2 Structures..... 5 1.2.1 Convertisseurs directs ..... 5 1.2.2 Convertisseurs indirects ..... 6 1.3 Interrupteurs à semi-conducteurs..... 7 1.4 Critères de choix des interrupteurs à semi-conducteurs ..... 8 1.5 Electronique de commande ..... 8 1.6 Structure de la commande ..... 9 1.7 Commande rapprochée par comparaison d'ondes..... 9 1.7.1 Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés à la fermeture.. ..... 10 1.7.2 Convertisseurs utilisant des interrupteurs totalement commandable ..... 12 1.8 Commande MLI ..... 14 1.9.1 Onduleur monophasé MLI en demi-pont de tension..... 14 1.9.2 Caractérisation de l'onde de modulation ..... 15 1.9.3 Tension de sortie..... 16 1.9.4 Harmoniques .... 18 Chapitre II: Les onduleurs MLI triphasés2.1 Onduleur triphasé de tension..... 20 2.1.1 Analyse et fonctionnement..... 20 2.1.2. Fonctionnement en pleine onde..... 21 2.1.3. Fonctionnement en MLI..... 22 2.



..... 8 1.5 Electronique de commande ..... 8 1.6 Structure de la commande ..... 9 1.7 Commande rapprochée par comparaison d'ondes..... 9 1.7.1 Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés à la fermeture.. ..... 10 1.7.2 Convertisseurs utilisant des interrupteurs totalement commandable ..... 12 1.8 Commande MLI ..... 14 1.9.1 Onduleur monophasé MLI en demi-pont de tension..... 14 1.9.2 Caractérisation de l'onde de modulation ..... 15 1.9.3 Tension de sortie..... 16 1.9.4 Harmoniques .... 18 Chapitre II: Les onduleurs MLI triphasés2.1 Onduleur triphasé de tension..... 20 2.1.1 Analyse et fonctionnement..... 20 2.1.2. Fonctionnement en pleine onde..... 21 2.1.3. Fonctionnement en MLI..... 22 2. 2. Onduleur triphasé de courant..... 23 2.2.1. Analyse et fonctionnement..... 23 2.2.2. Fonctionnement en pleine onde..... 24 2.2.3. Fonctionnement en MLI..... ..... 25 ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 2 Electronique de Puissance Avancée Chapitre III:Les Redresseurs MLI triphasés3.1. Redresseur MLI de courant triphasé..... 27 3.1.1. Forme d'ondes..... 28 3.1.2. Rapport des tensions d'entrée et de sortie..... 28 Rapport des tensions d'entrée et de sortie..... 28 3.1.3. Qualité des courants du coté réseau.....29 3.2. Redresseur MLI de tension triphasé..... 29 3.2.1. Forme d'ondes..... 30 redressée.....30 3.3. Commande en boucle fermée du redresseur de courant MLI..... 32 3.4. Domaine d'application des redresseurs MLI..... 32 Chapitre IV: Les onduleurs multi-niveaux4.1. Avantages..... 34 4.2. Inconvénients..... 34 4.3. Onduleur multi-niveaux en cascade (multi-sources)..... 34 4.4. Onduleur multi-niveaux polygonal (seule source)..... 35 4.5. Onduleur multi-niveaux NPC..... 35 4.6. Onduleur triphasé de tension..... 36 4.6. Onduleur triphasé NPC à point milieu capacitif unique.....36 Chapitre V: Convertisseur Matriciel5.1. Principe de fonctionnement..... 38 5.2. Interrupteurs à semi-conducteurs utilisés dans le convertisseur matriciel..... 38 5.2. Interrupteurs à semi-conducteurs utilisés dans le convertisseur matriciel..... 39 5.3. Modèle mathématique du convertisseur matriciel..... 39 5.3. Modèle mathématique du convertisseur matriciel..... 39 5.4. Stratégies de commande..... 41 5.4. Stratégies de commande.....41 Références Bibliographiques..... 42 Références Bibliographiques.....

Accueil Cours électronique Exercices électronique Contact Cours gratuits » Cours électronique » Cours électronique de puissance Participez au vote ☆☆☆☆☆★★★★★ UNIVERSITE MOHAMED KHIDER DE BISKRA FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE Module: Electronique de puissance avancée Niveau: 1ère Année MasterSupport de cours: ELECTRONIQUE DE PUISSANCE AVANCEERéalisé par: Dr. Abdelhakim DENDOUGA Maitre de conférences à l'université de Biskra E- Année Universitaire: 2014/2015

Electronique de Puissance Avancée Sommaire Intorduction ..... 4 Chapitre I Introduction à l'électronique de puissance avancée1.1 Les lois de base d'électronique de puissance..... 5 1.2 Structures..... 5 1.2.1 Convertisseurs directs ..... 5 1.2.2 Convertisseurs indirects ..... 6 1.3 Interrupteurs à semi-conducteurs..... 7 1.4 Critères de choix des interrupteurs à semi-conducteurs ..... 8 1.5 Electronique de commande ..... 8 1.6 Structure de la commande ..... 9 1.7 Commande rapprochée par comparaison d'ondes..... 9 1.7.1 Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés à la fermeture.. ..... 10 1.7.2 Convertisseurs utilisant des interrupteurs totalement commandable ..... 12 1.8 Commande MLI ..... 14 1.9.1 Onduleur monophasé MLI en demi-pont de tension..... 14 1.9.2 Caractérisation de l'onde de modulation ..... 15 1.9.3 Tension de sortie..... 16 1.9.4 Harmoniques .... 18 Chapitre II: Les onduleurs MLI triphasés2.1 Onduleur triphasé de tension..... 20 2.1.1 Analyse et fonctionnement..... 20 2.1.2. Fonctionnement en pleine onde..... 21 2.1.3. Fonctionnement en MLI..... 22 2. 2. Onduleur triphasé de courant..... 23 2.2.1. Analyse et fonctionnement..... 23 2.2.2. Fonctionnement en pleine onde..... 24 2.2.3. Fonctionnement en MLI..... ..... 25 ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 2 Electronique de Puissance Avancée Introductionl'électronique de puissance ou électronique de commutation concerne le traitement et la maitrisedu transfert de l'énergie électrique entre une source et un récepteur. Elle permet de convertir cette énergie disponible sous une forme donnée (continue, alternative, basse ou haute tension, etc..) en une autre. Dans ce contexte, une forte spécificité de ce domaine réside dans les rendements de conversion recherchés, ils doivent être typiquement très proches de 100. Cela impose donc l'usage d'une électronique de commutation pour laquelle les interrupteurs doivent présenter des pertes minimales en commutation et dans leurs états passants ou bloqués. L'amélioration continuelle de leurs performances est une cible importante de la recherche dans ce domaine, des progrès continus se font, des nouveaux matériaux sont mis en œuvre : carbure de silicium, arséniure de gallium, diamant. Les performances des convertisseurs statiques dépendent largement des propriétés physiques des composants à semi-conducteur, des matériaux les constituants. En effet, les récentes avancées dans le domaine des interrupteurs à semi-conducteur d'une part (apparaissions des nouvelles interrupteurs, totalement contrôlables: GTO, IGBT, MCT,..ect), et d'autre part dans le domaine de commande (MLI, SVM, ... ect), ainsi que dans le domaine des interfaces informatique (DSPACE, Les cartes d'acquisition,...ect), permis l'émergence des nouvelles structure des convertisseurs de puissance afin de répondre aux exigences industrielles (systèmes d'entraînement, de génération photovoltaïques, éoliens, filtrage,... ect), comme les onduleurs et les redresseurs MLI, les convertisseurs multi-niveaux, les convertisseurs matriciels, les hacheurs AC/AC. Ce présent document, comprenant l'étude et l'analyse de la structure, le principe de fonctionnement, la stratégie de commande, ainsi que les points forts et faibles des nouvelles structures des convertisseurs de puissance afin d'approfondir les connaissances théoriques et servira de base pédagogique.Organisation du cours Ce cours est structuré comme suit : Chapitre 1: Introduction à l'électronique de puissance avancée. Chapitre 2: Les onduleurs MLI. Chapitre 3: Les redresseurs MLI. Chapitre 4: Les onduleurs multi niveaux. Chapitre 5: Convertisseur matriciel. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 4 Electronique de Puissance Avancée Chapitre I: Introduction à l'électronique de puissance avancée 1.1. Les lois de base d'électronique de puissance Le domaine d'électronique de puissance notamment la structure des convertisseurs et leurs stratégies de commande sont basés sur les lois suivantes: .01: On appelle source de tension, lorsque la forme d'onde, l'amplitude et la fréquence de la tension sont imposées par la source;.02: On appelle source de courant, lorsque la forme d'onde, l'amplitude et la fréquence de courant sont imposées par la source;.03: Une source de tension ne doitjamais être en court-circuit; .04: Une source de courant ne doitjamais être en circuit ouvert; .05: Les convertisseurs de puissance doivent être toujours insérés entre deux milieux énergétiques (source, charge) de natures différentes.1.2. Structures On peut classer les convertisseurs de puissance en deux catégories: - convertisseurs directs; - convertisseurs indirects. Hacheurs DC (=) DC (=) Onduleurs Redresseurs Cycloconvertisseurs AC (?) AC (?) Gradateurs Figure 1.1: Catégories des convertisseurs de puissance 1.2.1 Convertisseurs directs: Dans ce cas, la conversion de l'énergie d'une forme à autre se fait de manière directe. C'est-à-dire, on ne trouve pas une conversion intermédiaire. Les convertisseurs directs sont: - Les redresseurs (AC/DC); - les gradateurs, les cycloconvertisseurs (AC/AC); - les hacheurs (DC/DC); - les onduleurs autonomes (DC/AC). ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 5 Electronique de Puissance Avancée On peut schématiser la structure de ces convertisseurs par une matrice d'interrupteurs reliant les n bornes de sortie d'un générateur aux m bornes d'entrée d'un recéleur. 1 1 r 2 2 r euat3 3 teuérénn m écepGRFigure 1.2: Structure générale des convertisseurs Cette matrice comprend en principe n×m éléments. Toutefois pour certains convertisseurs, des interrupteurs sont supprimés ou réduits à une simple liaison galvanique. 1.2.2 Convertisseurs indirects:Certains convertisseurs ne relient pas directement le générateur au récepteur: l'énergie transite par un étage intermédiaire. Dans ce cas, on trouve une cascade de convertisseurs, l'un reliant le générateur à l'étage intermédiaire, l'autre reliant cet étage au récepteur. Etage intermédiaire Figure 1.3: Convertisseur indirectL'étage intermédiaire joue le rôle de récepteur vis-à-vis du premier convertisseur, de générateur vis-à-vis du deuxième. Il est généralement formé d'un ou de plusieurs éléments de stockage d'énergie (inductances et condensateurs). C'est le cas, par exemple des convertisseurs continu-continu (DC/ DC), à étage intermédiaire résonnant inséré dans une cascade onduleur / redresseur. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 6 Electronique de Puissance Avancée 1.3. Interrupteurs à semi-conducteurs : Dans tous les convertisseurs d'électronique de puissance, les échanges d'énergie entre le générateur et le récepteur sont contrôlés grâce à l'évolution au cours des temps des connexions que les interrupteurs du convertisseur établissent. Tout changement de connexion résulte d'un changement d'état : - fermeture (connexion de l'état OFF à l'état ON) ; - ouverture (connexion de l'état ON à l'état OFF). La commutation d'un semi-conducteur d'un état à l'autre peut être - Soit commandée: et résulter d'un signal appliqué à son accès de commande - Soit spontanée (Naturelle) : et résulter du passage par générateur de la tension à ses homes (Fermeture spontanée) ou du passage par zéro du courant qui le traverse (ouverture spontanée). Table.1 : les principaux interrupteurs à semi-conducteurs utilisés dans l'électronique de puissance. caractéristiques Interrupteur Symbole Tension courant fréquence Diode (1955)10V -10 kV 1-5000 A ---------- BJT: Bipolar junction transistor (1975) 30V-1.2 kV 0.5- 500 A 10 kHz MOSFET: Metal oxide semiconductor field 20-500V 0.5-50 A 1MHz effect transistor (1976) IGBT: Insulated gate bipolar transistor (1983) 600V- 2.5 kV 10- 600 A 20 kHz SCR: Silicon controlled rectifier (thyristor) 200V-6 kV 10 A-3.5 kA 500 Hz (1957) GTO: Gate turn-off thyristor (1962) 200V-4.5 kV 10 A-3 kA 2 kH TRIAC (1958)200-1kV. 2-100 A 500 Hz ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 7 Electronique de Puissance Avancée 1.4. Critères de choix des interrupteurs à semi-conducteurs Le choix d'un interrupteur à semi-conducteurs pour une application particulière dépend aux critères suivants: - la tension inverse; - le niveau du courant; - la fréquence de commutation; - la vitesse de commutation; - les pertes (par conduction et commutation); - le mode de la commande (naturelle, semi, et totale) 1.5. Electronique de commande: Les convertisseurs de puissance qui utilisent des semi-conducteurs de puissance commandés peuvent être soit totalement soit partiellement commandés. Un convertisseur est totalement commandé si tons les changements d'états des interrupteurs qui le composent sont fixés par les signaux de commende à la fermeture et à l'ouverture envoyés aux semi-conducteurs (l'état des interrupteurs ne dépend pas à l'évolution des tensions et des courants à des accès). iKK1 2 K3 vA iA vB iB U viC C K'1 K'2 K'3 Figure 1.4: Onduleur e tensionUn convertisseur est partiellement commandé si certains changements d'état des interrupteurs se produisent sous l'évolution des tensions et les courants à ses accès (thyristor). Pour qu'un convertisseur soit totalement commandée, il faut notamment qu'il comporte des interrupteurs à fermeture et ouverture commandée. - Exemple: les onduleurs autonomes de tension. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 8 Electronique de Puissance Avancée 1.6. Structure de la commande La commande éloignée : génère à partir des signaux de référence (xréf) et des mesures effectuées sur le générateur et le récepteur (xmes(gé, ré)), des ondes de référence (x w) qui correspondent aux tension ou aux courants qu'on veut imposer aux accès du générateur ou du récepteur. Générateur X ref ig Régulateurs Logique de Cde Cde Rapprochée X(gé, ré)mesRécepteur 1er niveau 2ème niveau 3ème niveau deC éloignée (principale)deC RapprochéeFigure 1.5: Structure de commande La commande rapprochée détermine les instants où il faut commander l'amorçage ou le blocage des interrupteurs à semi-conducteurs à partir des ondes de référence (xréf) 1.7 Commande rapprochée par comparaison d'ondes: L'électronique de commande rapprochée sert à déterminer les instants des interrupteurs de commutateur où il faut envoyer ces ordres en fonction d'ondes qui correspondent généralement aux tensions on aux courants qu'on veut imposer aux accès du récepteur. Les techniques de la commande rapprochée sont très variées. La technique qui consiste à comparer des ondes de références avec des ondes de modulation est la plus adaptée aux convertisseurs utilisant des interrupteurs totalement commandés. i j Générateur Récepteur Kij Xréf Xmes Générateur Figure 1.6: Commande raprochée par comparaison./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 9 Electronique de Puissance Avancée 1.7.1. Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés à la fermeture: A) Redresseurs tout thyristors ciT1 T2 T3 vA iA vB iB cU mV VAref V VvrefBrefCC +1iC T'1 T'2 T'3 -1Figure 1.7: Structure du redresseur tout thyristors. UcFigure 1.8: Forme d'onde. Pour déterminer les instants de commande des thyristors, on utilise une onde de modulation Vm. cette valeur correspond à la valeur moyenne Ucmoy de Uc, tel que -1?) Figure 1.10: Gradateur monophasé: structure et forme d'ondesD'après les deux figures ci-dessus, on constate que Uch ne dépend pas seulement de Uréf mais aussi de la nature de charge. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 11 Electronique de Puissance Avancée 1.7.2. Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés totalement commandable: A) Hachuers On prend comme schéma de base, pour l'étude de la commande des hacheurs directs à deux interrupteurs celui de hacheur réversible en courant. D1 i ich K1 T1 K2U T2uchD2 Figure 1.11: HacheurPrincipe de la commande Si on emploie la commande complémentaire de K1 et K2, il faux déterminer par période T de hachage, deux instants: - l'instant de commutation de K1 vers K2; - l'instant de commutation de K2 vers K1. La valeur moyenne Uchmoy de la tension uch peut être réglée entre 0 et U, on fait donc varier uuch=de 0 à 1. On doit donc prendre une onde de modulation allant de 0 à 1, par exemple une réfUonde en dents de scie. +1 ?t0 KK1 2 K1 K2 uch ?t 0 ?TT2T Figure 1.12: Principe de commandeSi ?T est la durée des intervalles de conduction de K1 à chaque période, on a: Uch=?U. U?chUU==? U = U U. (1.3) réfchréfUU./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 12 Electronique de Puissance Avancée B) Onduleurs monophasé de tension MLI La commande MLI des onduleurs monophasés de tension fonctionnant en modulation de largeur d'impulsions M.L.I (en anglo-saxon P.W.M, pulse width modulation). La principale différence apportée par cette technique de commande par rapport aux techniques précédentes, est du fait qu'en régime permanent les ondes de référence ne tendent pas vers des grandeurs constantes, mais, le plus souvent vers des ondes sinusoïdales d'amplitude et de pulsation constantes. Principe de la commande T1 K1D1 U/2 ich U/2 e g T 1'1K'D'1 aruch chFigure 1.13: Onduleur monophasé MLIDans l'onduleur en demi-pont fonctionnant en MLI, on détermine les instants de commutation en comparant: une onde de référence uréf qui représente la tension que l'on veut trouver aux bornes de la charge avec une onde de modulation M allant de -1 à +1. L'onde de modulation peut être: a) en dents de scie: On distingue deux types d'échantillonne naturel et synchrone. +1 +1 M uréf M uréf ?t ?t 0 0 -1 -1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 échantillonnage naturel échantillonnage synchrone Figure 1.14: Modulation en dents de scieb) triangulaire: +1 +1 M uréf M uréf ?t ?t 0 0 -1 -1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 échantillonnage naturel échantillonnage synchrone Figure 1.15: Modulation triangulaire./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 13 Electronique de Puissance Avancée - La modulation triangulaire permet d'obtenir un meilleur suivi de l'onde de référence. Caractéristique de la commande MLI: La commande MLI est caractérisée par: - le coefficient de réglage en tension ou en courant r (0 f; mréf?fréfréf- la phase de l'onde de référence ?. Donc, on peut écrire: u= r.cos(? .t +)? réfréfSchéma de principe de la commande MLI: K1U/2 ich U/2 e 1K'garuch chGénération r ? de Uréf?réf Comparaison et Génération mise en forme de M1.8. Commande MLI Figure 1.16: Principe de la MLILa modulation de largeur d'impulsion MLI (en anglo-saxon Pulse Width Modulation PWM), consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des gradeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension (ou courant) de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Autrement dit, la MLI consiste à déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique ou en faisant simultanément appel à ces deux techniques. L'objectif principal de la MLI est d'obtenir une tension ou un courant proche à la forme sinusoïdale à la sortie de l'onduleur. 1.8.1 Onduleur monophasé MLI en demi-pont de tensionL'onde de modulation de fréquence f' nettement supérieure à la fréquence de l'onde de référence f, est une onde triangulaire d'amplitude U/2. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 14 Electronique de Puissance Avancée +U/2 M uréf t i0 t1 t2 T' K1-U/2 U/2uch T1D1 KK'i1 1 K1 ch Uu+U/2ch U/2 T 1'D'U1 chmoy 1K't 0 t1 t2 Tm -U/2 Figure 1.17: Tension moyenne d'un onduleur en demi-pont MLICalcul de la valeur moyenne uch pendant Tm: Sachant que: - la période de l'onde de modulation Tm<<; - la variation de uréf est négligeable (?uréf?0)?uréf=cte. 1 ?UUU?U= (1.4) cmoy? .t ?.(t ? t) +.(T ? t)121m2 ?Tm ? 222?Calcul de t1: Utà t11: M= ?+ U.2.= u (ascendante)réf2Tm?UTt = um(+). (1.5) 1ref2U.2U.3tà t22: M=? U.2.= u (desceendant)réf2Tm?U.3Tt = (um?+). (1.6) 2ref2U.2On remplace t1 et t2 dans (1.4), on trouve: U= u (1.7) chmoeyrefSi la référence varie sinusoïdalement, la valeur moyenne de uch variera suivant la même loi. Donc, l'objectif de la MLI est vérifié. 1.8.2 Caractérisation de la modulation M: Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande: 1. l'indice de modulation m: c'est le rapport entre la fréquence de l'onde modulation et celle de l'onde référence (f'/f);./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 15 Electronique de Puissance Avancée 2. le coefficient de réglage r: c'est le rapport entre l'amplitude de l'onde référence et la valeur crête U/2 de l'onde de modulation.Selon l'indice de modulation on distingue deux types de modulation: - la modulation synchrone: lorsque f' est un multiple entier de f (m est un nombre entier). Dans ce cas, on obtient une tension uch vraiment périodique avec une période T=1/f; - la modulation asynchrone: lorsque f' n'est pas un multiple entier de f (m n'est pas un nombre entier). En modulation synchrone: - si m est impair, le développement en série de Fourier de uch ne comporte que les harmoniques impairs; - si m est pair, le développement en série de Fourier de uch donne une composante continue, des harmoniques pairs, et des harmoniques impairs. Par conséquent, on choisit donc des valeurs impaires de m. Calage est optimal: lorsque Mpasse par un maximum ou un minimum au milieu des alternances de l'onde de référence. Dans ce cas, les alternances de uch sont symétriques par rapport à leurs milieux. 1.8.3 Tension de sortie: - Fondamental: Dès que m est suffisament égal ou supérieur à 6, la fondamentale de la tension de sortie est 1Upratiquement égal à la tension de référence et donc a pour valeur efficace: U=.r.1ch22À une tension d'entrée donnée, la MLI permet de faire varier la valeur de la tension de sortie, ce qui ne permettant pas la commande en pleine onde. UQuand r va de 0 à 1, Uch1 va de 0 à . Par conséquant la valeur maximale de Uch1 est inférieure à 2 2sa valeur obtenue avec la commande en pleine onde, soit: 14 U2U=..=U. (1.8) ch12 ? 2?On peut conclure également: U(MLI)?1ch==.7856.0U(pleine onde)41chDonc on a un déchet de tension de 21.46% ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 16 Electronique de Puissance Avancée +U/2 M uréf ?t0 +U/2 K1 K'K'K'K'1 K'1 K1 K1 1 K1 1 K1 K1 1 K'1 K1 uch +U/2 ?t 0 +U/2 i ? ? t 0 ich ? ?t 0 iT1 ?t 0 iD1 ?t 0 uT1 ?t 0 Figure 1.18: Formes d'ondesd'un onduleur en demi-pont MLI./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 17 Electronique de Puissance Avancée 1.8.4. Harmoniques: En commande pleine onde, le développement en série de Fourier de uch de fréquence f comporte les harmoniques de fréquence 3f, 5f, 7f, Donc de rang 3, 5, 7,... En MLI synchrone, le spectre d'harmoniques de uch varie avec le coefficient de réglage r et l'indice de modulation m, comme suit: - si r=0, uch est formée de signaux rectangulaires jointifs de fréquence mf, comprend les harmoniques de rang m, 3m, 5m,...; - quand r croit, la fondamentale Uch1 augmente, les harmoniques de rang m, 3m, 5m, ... diminuent mais il en apparaît d'autres. Ceux-ci peuvent se diviser en 3 familles: 1ère Famille:est concentrée sur la fréquence mf et comprend, outre le terme de rang m, la paire d'harmoniques de rang m-2 et m+2, la paire de rang m-4 et m+4,... 2ème Famille:est concentrée sur la fréquence 2mf et comprend la paire d'harmoniques de rang 2m-1 et 2m+1, la paire de rang 2m-3 et 2m+3,... 3ème Famille:est concentrée sur la fréquence 3mf et comprend les harmoniques de rang 3m, 3m-2 et 3m+2, 3m-4 et 3m+4,... Remarques: - si m est grand, les termes des premières familles tout ou moins n'interfèrent pas. D'autre part, les harmoniques de la même paire ont la même valeur; - lorsque l'indice de modulation est multiple de 3, le principal harmonique de rang m et les harmoniques de rang 2m-3, 2m+3 de la 2ème famille sont disparus; 2Ur- la MLI ne reduit pas le taux d'harmoniques: ? =1 ?, ?nn est independant de m; mais elle 22permet de décaler les harmoniques vers les fréquences les plus élevées, ce qui facilite leur filtrage. Exemple: m=15, r=0.8 2Pour chaque terme de fréquence nf on a indiqué sa valeur efficace Uchn rapportée à U (valeur du ?fondamental en pleine onde). ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 18 Electronique de Puissance Avancée U chn(2.U / ?)10 20 30 n Figure 1.19: Spectre d'harmoniques1ère Famille: 15, 13, 17, 11, 19, ... 2ème Famille: 29, 31, 27, 33,... Sur le spectre on a tracé en trais interrompus les harmoniques qui disparaissent. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 19 Electronique de Puissance Avancée Chapitre II: Les onduleurs MLI triphasés 2.1 Onduleur triphasé de tension 2.1.1 Analyse et fonctionnement - K1 et K'1, K2 et K'2, K3 et K'3 doivent être complémentaires. Ainsi que, les interrupteurs sont réversibles en courant. i vK1 T1 K1 DK2 K3 1 vchA iK1 ichA A U/2 vchB iiK2 chB U B vchC ichC CU/2 iK3 K'1 K'2 K'3 Figure 2.1: Onduleur triphasé de tensionAvec: ?U : K esF;t ??12v ? v = (2.1) A?0?? U : 'K esF.t ?? 21?U :K esF;t ??22v ? v = (2.2) B?0?? U : 'K esF.t ?? 22?U : K esF;t ??32v ? v = (2.3) C?0?? U : 'K esF.t ?? 23N.B: on désigne par 'F' lorsque l'interrupteur est fermé, et par 'O' lorsque celui-ci est ouvert. On peut exprimer également les tensions composées aux bornes de charge comme suit: ?U :K es t F, K es t ;O? 120? : K et K s ont ;Fv ? v = v= (v ? v) ? (v ? v) = (2.4) ABABAB?1200?U : K es t O, K esF;t ?120? : K et K sO.ont ?12De même, on peut déduire les expressions de vet v. BCCA./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 20 Electronique de Puissance Avancée D'autre part, pour une charge triphasée équilibrée, on a: v+ v + v = 0ABC (2.5) En utilisant les expressions précédentes, et on déduit les tensions simples comme suit: 1211v A = [(v ? v) ?(v ? vABCA]) =(v? v) ? (v ? v) ? (v ? v)A0B0C0 (2.6) 33331121vB = [(v ? v) ?(v ? vBCAB]) = ?(v? v) + (v ? v) ? (v ? v)A0B0C0 (2.7) 33331112vC = [(v ? v) ? (v ? vCABC]) = ?(v? v) ? (v ? v) + (v ? v)A0B0C0 (2.8)3333Le courant délivré par la source est donné par: i = i+ i + i (2.9) k1k 2ik 3Le fonctionnement de l'onduleur triphasé de tension est projeté dans un tableau résumé, suivant: K1 K2 K3 vA- v0 vB- v0 vC- v0 vcA vcB vcC iK1 iK2 iK3 i F F F U/2 U/2 U/2 0 0 0 icA icB icC 0 F F O U/2 U/2 -U/2 U/3 U/3 -2U/3 icA icB 0 - icC F O F U/2 -U/2 U/2 U/3 -2U/3 U/3 icA 0 icC - icB F O O U/2 - U/2 - U/2 2U/3 -U/3 -U/3 icA 0 0 icA O F F -U/2 U/2 U/2 -2U/3 U/3 U/3 0 icB icC - icA O F O - U/2 U/2 -U/2 -U/3 2U/3 - U/3 0 icB 0 icB O O F - U/2 -U/2 U/2 U/3- -U/3 2U/3 0 0 icC icC O O O - U/2 - U/2 - U/2 0 0 0 0 0 0 0 2.1.2. Fonctionnement en pleine onde La commande en pleine onde consiste à fermer chaque interrupteur pendant une demi-période (T/2) des tensions de sortie, comme suit: ?,?K pour 0< ?t < ? et K pour ?< ?t < 2?;1?1?2??2??2??K pour < ? t < ? +,et K pour ?+< ?t < 2? +;2 (2.10) ?33233?4?4?4?4??K pour < ?t < ? +,et K pour ?+< ?t < 2? +.? 333333D'après le tableau résumé, on peut tracer les formes d'ondes. Les tensions de sortie vchA, vchB et vchC ont pour valeur efficace de leur fondamental est: V= 2 U (2.11) ch1?./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 21 Electronique de Puissance Avancée K1 ?t K2 ?t K3 ?t vchA ?t vA-v0 ichB ichA ichC ?ti?t iK1 ?t D1 T1 D'1 T'1 T'2 D2 T2 D'2 T3 D'3 T'3 D3 Figure 2.2: Forme d'ondes en pleine onde 2.1.3. Fonctionnement en MLI . K1 ?t K2 ?t K3 ?t vA-v0 ?t vchA ?t ichB ichA ichC ?t i ?tiK1 ?t Figure 2.3: Forme d'ondes en MLI./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 22 Electronique de Puissance Avancée Si la modulation est synchrone, on choisit un indice de modulation multiple de 3, soit m=6. Les formes d'ondes sont déduites à l'aide du tableau résumé en utilisant le chronomètre de fermeture des interrupteurs K1, K2 et K3 2. 2. Onduleur triphasé de courant 2.2.1. Analyse et fonctionnement ? L'onduleur de courant triphasé est placé entre une source de courant continu supposée parfaite; donc débutant un courant constant, et une source de tension alternative triphasée supposée parfaite; donc présentant des tensions vchA, vchB, vchC formant un système triphasé sinusoïdale équilibré. ? Les interrupteurs K1, K2, K3 d'une part, et K'1, K'2, K'3 d'autre part doivent être complémentaires, pour que la source du courant ne soit jamais en circuit ouvert et la source de tension ne soit jamais mise en court-circuit. Ainsi que, les interrupteurs sont réversibles en tension. I vchA vK1 K1 K2 K3 iichA K1 AvchB iichBK2 u B vchC ichC iK3 C K'1 K'K'2 3 Figure 2.4: Onduleur triphasé de courantfermés icA icB icC vK1 vK2 vK3 vK1' vK2' vK3' u K1 K '1 0 0 0 0 vcA- vcB vcA- vcC 0 vcB- vcA vcC- vcA 0 K1 K '2 I - I 0 0 vcA- vcB vcA- vcC vcA- vcB 0 vcC- vcB vcA- vcB K1 K '3 I 0 -I 0 vcA- vcB vcA- vcC vcA- vcC vcB- vcC 0 vcA- vcC K2 K '1 -I I 0 vcB- vcA 0 vcB- vcC 0 vcB- vcA vcC- vcA vcB- vcA K2 K '2 0 0 0 vcB- vcA 0 vcB- vcC vcA- vcB 0 vcC- vcB 0 K2 K '3 0 I -I vcB- vcA 0 vcB- vcC vcA- vcC vcB- vcC 0 vcB- vcC K3 K '1 - I 0 I vcC- vcA vcC- vcB 0 0 vcB- vcA vcC- vcA vcC- vcA K3 K '2 0 -I I vcC- vcA vcC- vcB 0 vcA- vcB 0 vcC- vcB vcC- vcB K3 K '3 0 0 0 vcC- vcA vcC- vcB 0 vcA- vcC vcB- vcC 0 0 ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 23 Electronique de Puissance Avancée K , KK,123 ?? :aircomplémentes ? il y a 9 configurations possibles. K' , K'K',123 ? L'ensemble des relations est regroupé dans un tableau résumé. Pour résumé, on a indiqué que les 2 interrupteurs fermés, alors les autres étant ouverts. 2.2.2. Fonctionnement en pleine onde La commande en pleine onde consiste à fermer chaque interrupteur pendant un tiers de période (T) des courants de sortie, comme suit: ??2,??K pour 0< ?t



Rapport des tensions d'entrée et de sortie..... ..... 28 3.1.3. Qualité des courants du coté réseau.....29 3.2. Redresseur MLI de tension triphasé..... ..... 29 3.2.1. Forme d'ondes..... 30 3.2.2. Tension redressée.....30 3.3. Commande en boucle fermée du redresseur de courant MLI..... 32 3.4. Domaine d'application des redresseurs MLI..... 32 Chapitre IV: Les onduleurs multi-niveaux4.1. Avantages..... 34 4.2. Inconvénients..... 34 4.3. Onduleur multi-niveaux en cascade (multi-sources)..... ..... 34 4.4. Onduleur multi-niveaux polygonal (seule source)..... ..... 35 4.5. Onduleur multi-niveaux NPC..... 35 4.6. Onduleur triphasé NPC à point milieu capacitif unique.....36 Chapitre V: Convertisseur Matriciel5.1. Principe de fonctionnement..... ..... 38 5.2. Interrupteurs à semi-conducteurs utilisés dans le convertisseur matriciel..... 39 5.3. Modèle mathématique du convertisseur matriciel..... 39 5.4. Stratégies de commande.....41 Références Bibliographiques.....
..... 42 ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 3 Electronique de Puissance Avancée IntroductionL'électronique de puissance ou électronique de commutation concerne le traitement et la maitrisedu transfert de l'énergie électrique entre une source et un récepteur. Elle permet de convertir cette énergie disponible sous une forme donnée (continue, alternative, basse ou haute tension, etc..) en une autre. Dans ce contexte, une forte spécificité de ce domaine réside dans les rendements de conversion recherchés, ils doivent être typiquement très proches de 100. Cela impose donc l'usage d'une électronique de commutation pour laquelle les interrupteurs doivent présenter des pertes minimales en commutation et dans leurs états passants ou bloqués. L'amélioration continuelle de leurs performances est une cible importante de la recherche dans ce domaine, des progrès continus se font, des nouveaux matériaux sont mis en œuvre : carbure de silicium, arséniure de gallium, diamant. Les performances des convertisseurs statiques dépendent largement des propriétés physiques des composants à semi-conducteur, des matériaux les constituants. En effet, les récentes avancées dans le domaine des interrupteurs à semi-conducteur d'une part (apparaissions des nouvelles interrupteurs, totalement contrôlables: GTO, IGBT, MCT,..ect), et d'autre part dans le domaine de commande (MLI, SVM, ...
ect), ainsi que dans le domaine des interfaces informatique (DSPACE, Les cartes d'acquisition,…ect), permis l'émergence des nouvelles structure des convertisseurs de puissance afin de répondre aux exigences industrielles (systèmes d'entraînement, de génération photovoltaïques, éoliens, filtrage,…
ect), comme les onduleurs et les redresseurs MLI, les convertisseurs multi-niveaux, les convertisseurs matriciels, les hacheurs AC/AC. Ce présent document, comprenant l'étude et l'analyse de la structure,
le principe de fonctionnement, la stratégie de commande, ainsi que les points forts et faibles des nouvelles structures des convertisseurs de puissance afin d'approfondir les connaissances théoriques et servira de base pédagogique.Organisation du cours Ce cours est structuré comme suit : Chapitre 1: Introduction à l'électronique de puissance avancée. Chapitre 2: Les onduleurs MLI. Chapitre 3: Les redresseurs MLI. Chapitre 4: Les onduleurs multi niveaux. Chapitre 5: Convertisseur matriciel. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 4 Electronique de Puissance Avancée Chapitre I: Introduction à l'électronique de puissance avancée 1.1.
Les lois de base d'électronique de puissance Le domaine d'électronique de puissance notamment la structure des convertisseurs et leurs stratégies de commande sont basés sur les lois suivantes: .01: On appelle source de tension, lorsque la forme d'onde, l'amplitude et la fréquence de la tension sont imposées par la source;.02: On appelle source de courant, lorsque la forme d'onde, l'amplitude et la fréquence de courant sont imposées par la source;.03: Une source de tension ne doitjamais être en court-circuit; .04: Une source de courant ne doitjamais être en circuit ouvert; .05: Les convertisseurs de puissance doivent être toujours insérés entre deux milieux énergétiques (source, charge) de natures différentes.1.2. Structures On peut classer les convertisseurs de puissance en deux catégories: - convertisseurs directs; - convertisseurs indirects. Hacheurs DC (=) DC (=) Onduleurs Redresseurs Cycloconvertisseurs AC (?) AC (?) Gradateurs Figure 1.1: Catégories des convertisseurs de puissance 1.2.1 Convertisseurs directs: Dans ce cas, la conversion de l'énergie d'une forme à autre se fait de manière directe. C'est-à-dire,
on ne trouve pas une conversion intermédiaire. Les convertisseurs directs sont: - Les redresseurs (AC/DC); - les gradateurs, les cycloconvertisseurs (AC/AC); - les hacheurs (DC/DC); - les onduleurs autonomes (DC/AC). ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 5 Electronique de Puissance Avancée On peut schématiser la structure de ces convertisseurs par une matrice d'interrupteurs reliant les n bornes de sortie d'un générateur aux m bornes d'entrée d'un recéleur.

Électronique de puissance

Structures, commandes, applications

10e édition

Cours et exercices corrigés
Master
Écoles d'ingénieurs

DUNOD

Dans ce contexte, une forte spécificité de ce domaine réside dans les rendements de conversion recherchés, ils doivent être typiquement très proches de 100. Cela impose donc l'usage d'une électronique de commutation pour laquelle les interrupteurs doivent présenter des pertes minimales en commutation et dans leurs états passants ou bloqués. L'amélioration continuelle de leurs performances est une cible importante de la recherche dans ce domaine, des progrès continus se font, des nouveaux matériaux sont mis en œuvre : carbure de silicium, arséniure de gallium, diamant. Les performances des convertisseurs statiques dépendent largement des propriétés physiques des composants à semi-conducteur, des matériaux les constituants. En effet, les récentes avancées dans le domaine des interrupteurs à semi-conducteur d'une part (apparaissions des nouvelles interrupteurs, totalement contrôlables: GTO, IGBT, MCT,..ect), et d'autre part dans le domaine de commande (MLI, SVM, ...
ect), ainsi que dans le domaine des interfaces informatique (DSPACE, Les cartes d'acquisition,…ect), permis l'émergence des nouvelles structure des convertisseurs de puissance afin de répondre aux exigences industrielles (systèmes d'entraînement, de génération photovoltaïques, éoliens, filtrage,…
ect), comme les onduleurs et les redresseurs MLI, les convertisseurs multi-niveaux, les convertisseurs matriciels, les hacheurs AC/AC. Ce présent document, comprenant l'étude et l'analyse de la structure,
le principe de fonctionnement, la stratégie de commande, ainsi que les points forts et faibles des nouvelles structures des convertisseurs de puissance afin d'approfondir les connaissances théoriques et servira de base pédagogique.Organisation du cours Ce cours est structuré comme suit : Chapitre 1: Introduction à l'électronique de puissance avancée. Chapitre 2: Les onduleurs MLI. Chapitre 3: Les redresseurs MLI. Chapitre 4: Les onduleurs multi niveaux. Chapitre 5: Convertisseur matriciel. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 4 Electronique de Puissance Avancée Chapitre I: Introduction à l'électronique de puissance avancée 1.1.
Les lois de base d'électronique de puissance Le domaine d'électronique de puissance notamment la structure des convertisseurs et leurs stratégies de commande sont basés sur les lois suivantes: .01: On appelle source de tension, lorsque la forme d'onde, l'amplitude et la fréquence de la tension sont imposées par la source;.02: On appelle source de courant, lorsque la forme d'onde, l'amplitude et la fréquence de courant sont imposées par la source;.03: Une source de tension ne doitjamais être en court-circuit; .04: Une source de courant ne doitjamais être en circuit ouvert; .05: Les convertisseurs de puissance doivent être toujours insérés entre deux milieux énergétiques (source, charge) de natures différentes.1.2. Structures On peut classer les convertisseurs de puissance en deux catégories: - convertisseurs directs; - convertisseurs indirects. Hacheurs DC (=) DC (=) Onduleurs Redresseurs Cycloconvertisseurs AC (?) AC (?) Gradateurs Figure 1.1: Catégories des convertisseurs de puissance 1.2.1 Convertisseurs directs: Dans ce cas, la conversion de l'énergie d'une forme à autre se fait de manière directe. C'est-à-dire,
on ne trouve pas une conversion intermédiaire. Les convertisseurs directs sont: - Les redresseurs (AC/DC); - les gradateurs, les cycloconvertisseurs (AC/AC); - les hacheurs (DC/DC); - les onduleurs autonomes (DC/AC). ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 5 Electronique de Puissance Avancée On peut schématiser la structure de ces convertisseurs par une matrice d'interrupteurs reliant les n bornes de sortie d'un générateur aux m bornes d'entrée d'un recéleur. 1 1 r 2 2 r euat3 3 teuérénn m écepGRFigure 1.2: Structure générale des convertisseurs Cette matrice comprend en principe n×m éléments. Toutefois pour certains convertisseurs,
des interrupteurs sont supprimés ou réduits à une simple liaison galvanique. 1.2.2 Convertisseurs indirects:Certains convertisseurs ne relient pas directement le générateur au récepteur: l'énergie transite par un étage intermédiaire. Dans ce cas, on trouve une cascade de convertisseurs, l'un reliant le générateur à l'étage intermédiaire, l'autre reliant cet étage au récepteur. Etage intermédiaire Figure 1.3: Convertisseur indirectL'étage intermédiaire joue le rôle de récepteur vis-à-vis du premier convertisseur, de générateur vis-à-vis du deuxième. Il est généralement formé d'un ou de plusieurs éléments de stockage d'énergie (inductances et condensateurs). C'est le cas, par exemple des convertisseurs continu-continu (DC/ DC), à étage intermédiaire résonnant inséré dans une cascade onduleur / redresseur. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 6 Electronique de Puissance Avancée 1.3. Interrupteurs à semi-conducteurs : Dans tous les convertisseurs d'électronique de puissance, les échanges d'énergie entre le générateur et le récepteur sont contrôlés grâce à l'évolution au cours des temps des connexions que les interrupteurs du convertisseur établissent. Tout changement de connexion résulte d'un changement d'état : - fermeture (connexion de l'état OFF à l'état ON) ; - ouverture (connexion de l'état ON à l'état OFF). La commutation d'un semi-conducteur d'un état à l'autre peut être - Soit commandée: et résulter d'un signal appliqué à son accès de commande - Soit spontanée (Naturelle) : et résulter du passage par générateur de la tension à ses homes (Fermeture spontanée) ou du passage par zéro du courant qui le traverse (ouverture spontanée). Table.1
: les principaux interrupteurs à semi-conducteurs utilisés dans l'électronique de puissance. caractéristiques Interrupteur Symbole Tension courant fréquence Diode (1955)10V -10 kV 1-5000 A ---------- BJT: Bipolar junction transistor (1975) 30V-1.2 kV 0.5- 500 A 10 kHz MOSFET: Metal oxide semiconductor field 20-500V 0.5-50 A 1MHz effect transistor (1976) IGBT: Insulated gate bipolar transistor (1983) 600V- 2.5 kV 10- 600 A 20 kHz SCR: Silicon controlled rectifier (thyristor) 200V-6 kV 10 A-3.5 kA 500 Hz (1957) GTO: Gate turn-off thyristor (1962) 200V-4.5 kV 10 A-3 kA 2 kH TRIAC (1958)200-1kV. 2-100 A 500 Hz ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 7 Electronique de Puissance Avancée 1.4. Critères de choix des interrupteurs à semi-conducteurs Le choix d'un interrupteur à semi-conducteurs pour une application particulière dépend aux critères suivants: - la tension inverse; - le niveau du courant; - la fréquence de commutation; - la vitesse de commutation; - les pertes (par conduction et commutation); - le mode de la commande (naturelle, semi, et totale) 1.5. Electronique de commande: Les convertisseurs de puissance qui utilisent des semi-conducteurs de puissance commandés peuvent être soit totalement soit partiellement commandés. Un convertisseur est totalement commandé si tons les changements d'états des interrupteurs qui le composent sont fixés par les signaux de commende à la fermeture et à l'ouverture envoyés aux semi-conducteurs (l'état des interrupteurs ne dépend pas à l'évolution des tensions et des courants à des accès). iKK1 2 K3 vA iA vB iB U viC C K'1 K'2 K'3 Figure 1.4: Onduleur e tensionUn convertisseur est partiellement commandé si certains changements d'état des interrupteurs se produisent sous l'évolution des tensions et les courants à ses accès (thyristor). Pour qu'un convertisseur soit totalement commandée, il faut notamment qu'il comporte des interrupteurs à fermeture et ouverture commandée. - Exemple: les onduleurs autonomes de tension. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 8 Electronique de Puissance Avancée 1.6. Structure de la commande La commande éloignée : génère à partir des signaux de référence (xréf) et des mesures effectuées sur le générateur et le récepteur (xmes(gé, ré)), des ondes de référence (x w) qui correspondent aux tension ou aux courants qu'on veut imposer aux accès du générateur ou du récepteur. Générateur X ref ig Régulateurs Logique de Cde Cde Rapprochée X(gé, ré)mesRécepteur 1er niveau 2ème niveau 3ème niveau deC éloignée (principale)deC RapprochéeFigure 1.5: Structure de commande La commande rapprochée détermine les instants où il faut commander l'amorçage ou le blocage des interrupteurs à semi-conducteurs à partir des ondes de référence (xréf) 1.7 Commande rapprochée par comparaison d'ondes: L'électronique de commande rapprochée sert à déterminer les instants des interrupteurs de commutateur où il faut envoyer ces ordres en fonction d'ondes qui correspondent généralement aux tensions on aux courants qu'on veut imposer aux accès du récepteur. Les techniques de la commande rapprochée sont très variées. La technique qui consiste à comparer des ondes de références avec des ondes de modulation est la plus adaptée aux convertisseurs utilisant des interrupteurs totalement commandés. i j Générateur Récepteur Kij Xréf Xmes Générateur Figure 1.6: Commande raprochée par comparaison./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 9 Electronique de Puissance Avancée 1.7.1. Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés à la fermeture: A) Redresseurs tout thyristors ciT1 T2 T3 vA iA vB iB cU mV VAref V VvrefBrefCC +1iC T'1 T'2 T'3 -1Figure 1.7: Structure du redresseur tout thyristors. UcFigure 1.8: Forme d'onde. Pour déterminer les instants de commande des thyristors, on utilise une onde de modulation Vm. cette valeur correspond à la valeur moyenne Ucmoy de Uc, tel que -1?) Figure 1.10: Gradateur monophasé: structure et forme d'ondesD'après les deux figures ci-dessus, on constate que Uch ne dépend pas seulement de Uréf mais aussi de la nature de charge. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 11 Electronique de Puissance Avancée 1.7.2. Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés totalement commandable: A) Hachuers On prend comme schéma de base, pour l'étude de la commande des hacheurs directs à deux interrupteurs celui de hacheur réversible en courant. D1 i ich K1 T1 K2U T2uchD2 Figure 1.11: HacheurPrincipe de la commande Si on emploie la commande complémentaire de K1 et K2, il faux déterminer par période T de hachage, deux instants: - l'instant de commutation de K1 vers K2; - l'instant de commutation de K2 vers K1. La valeur moyenne Uchmoy de la tension uch peut être réglée entre 0 et U, on fait donc varier uuch=de 0 à 1. On doit donc prendre une onde de modulation allant de 0 à 1, par exemple une réfUonde en dents de scie. +1 ?t0 KK1 2 K1 K2 uch ?t 0 ?TT2T Figure 1.12: Principe de commandeSi ?T est la durée des intervalles de conduction de K1 à chaque période, on a: Uch=?U. U?chUU==? U = U U.
(1.3) réfchréfUU./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 12 Electronique de Puissance Avancée B) Onduleurs monophasé de tension MLI La commande MLI des onduleurs monophasés de tension fonctionnant en modulation de largeur d'impulsions M.L.I (en anglo-saxon P.W.M, pulse width modulation). La principale différence apportée par cette technique de commande par rapport aux techniques précédentes, est du fait qu'en régime permanent les ondes de référence ne tendent pas vers des grandeurs constantes, mais, le plus souvent vers des ondes sinusoïdales d'amplitude et de pulsation constantes. Principe de la commande T1 K1D1 U/2 ich U/2 e g T 1'1K'D'1 aruch chFigure 1.13: Onduleur monophasé MLIDans l'onduleur en demi-pont fonctionnant en MLI, on détermine les instants de commutation en comparant: une onde de référence uréf qui représente la tension que l'on veut trouver aux bornes de la charge avec une onde de modulation M allant de -1 à +1. L'onde de modulation peut être: a) en dents de scie: On distingue deux types d'échantillonne naturel et synchrone. +1 +1 M uréf M uréf ?t ?t 0 0 -1 -1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 échantillonnage naturel échantillonnage synchrone Figure 1.14: Modulation en dents de scieb) triangulaire: +1 +1 M uréf M uréf ?t ?t 0 0 -1 -1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 échantillonnage naturel échantillonnage synchrone Figure 1.15: Modulation triangulaire./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 13 Electronique de Puissance Avancée - La modulation triangulaire permet d'obtenir un meilleur suivi de l'onde de référence. Caractéristique de la commande MLI: La commande MLI est caractérisée par: - le coefficient de réglage en tension ou en courant r (0 f; méf?fréfréf- la phase de l'onde de référence ?. Donc, on peut écrire: u= r.cos(? .t +)? réfréfSchéma de principe de la commande MLI: K1U/2 ich U/2 e 1K'garuch chGénération r ? de Uréf?réf Comparaison et Génération mise en forme de M1.8. Commande MLI Figure 1.16: Principe de la MLILa modulation de largeur d'impulsion MLI (en anglo-saxon Pulse Width Modulation PWM), consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des gradeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension (ou courant) de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Autrement dit, la MLI consiste à déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique ou en faisant simultanément appel à ces deux techniques. L'objectif principal de la MLI est d'obtenir une tension ou un courant proche à la forme sinusoïdale à la sortie de l'onduleur. 1.8.1 Onduleur monophasé MLI en demi-pont de tensionL'onde de modulation de fréquence f' nettement supérieure à la fréquence de l'onde de référence f, est une onde triangulaire d'amplitude U/2. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 14 Electronique de Puissance Avancée +U/2 M uréf t i0 t1 t2 T' K1-U/2 U/2uch T1D1 KK'i1 1 K1 ch Uu+U/2ch U/2 T 1'D'U1 chmoy 1K't 0 t1 t2 Tm -U/2 Figure 1.17: Tension moyenne d'un onduleur en demi-pont MLICalcul de la valeur moyenne uch pendant Tm: Sachant que: - la période de l'onde de modulation Tm<<; - la variation de uréf est négligeable (?uréf?0)?uréf=cte. 1 ?UUU?U= (1.4) cmoy? .t ?.(t ? t) +.(T ? t)121m2 ?Tm ? 222?Calcul de t1: Utà t11: M= ?+ U.2.= u (ascendante)réf2Tm?UTt = um(+).
(1.5) 1ref2U.2U.3tà t22: M=? U.2.= u (desceendant)réf2Tm?U.3Tt = (um?+). (1.6) 2ref2U.2On remplace t1 et t2 dans (1.4), on trouve: U= u (1.7) chmoeyrefSi la référence varie sinusoïdalement, la valeur moyenne de uch variera suivant la même loi. Donc, l'objectif de la MLI est vérifié. 1.8.2 Caractérisation de la modulation M: Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande: 1. l'indice de modulation m: c'est le rapport entre la fréquence de l'onde modulation et celle de l'onde référence (f'/f);./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 15 Electronique de Puissance Avancée 2. le coefficient de réglage r: c'est le rapport entre l'amplitude de l'onde référence et la valeur crête U/2 de l'onde de modulation.Selon l'indice de modulation on distingue deux types de modulation: - la modulation synchrone: lorsque f' est un multiple entier de f (m est un nombre entier). Dans ce cas, on obtient une tension uch vraiment périodique avec une période T=1/f; - la modulation asynchrone: lorsque f' n'est pas un multiple entier de f (m n'est pas un nombre entier). En modulation synchrone: - si m est impair, le développement en série de Fourier de uch ne comporte que les harmoniques impairs; - si m est pair, le développement en série de Fourier de uch donne une composante continue, des harmoniques pairs, et des harmoniques impairs. Par conséquent, on choisit donc des valeurs impaires de m. Calage est optimal: lorsque Mpasse par un maximum ou un minimum au milieu des alternances de l'onde de référence. Dans ce cas, les alternances de uch sont symétriques par rapport à leurs milieux. 1.8.3 Tension de sortie: - Fondamental: Dès que m est suffisament égal ou supérieur à 6, la fondamentale de la tension de sortie est 1Upratiquement égal à la tension de référence et donc a pour valeur efficace: U=.r.1ch22À une tension d'entrée donnée, la MLI permet de faire varier la valeur de la tension de sortie, ce qui ne permettant pas la commande en pleine onde. UQuand r va de 0 à 1, Uch1 va de 0 à . Par conséquant la valeur maximale de Uch1 est inférieure à 2 2sa valeur obtenue avec la commande en pleine onde, soit: 14 U2U=..=U. (1.8) ch12 ? 2?On peut conclure également: U(MLI)?1ch==.7856.0U(pleine onde)41chDonc on a un déchet de tension de 21.46% ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 16 Electronique de Puissance Avancée +U/2 M uréf ?t0 +U/2 K1 K'K'K'K'1 K'1 K1 K1 1 K1 1 K1 K1 1 K'1 K1 uch +U/2 ?t 0 +U/2 i ? ? t 0 ich ? ?t 0 iT1 ?t 0 iD1 ?t 0 uT1 ?t 0 Figure 1.18: Formes d'ondesd'un onduleur en demi-pont MLI./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 17 Electronique de Puissance Avancée 1.8.4. Harmoniques: En commande pleine onde, le développement en série de Fourier de uch de fréquence f comporte les harmoniques de fréquence 3f, 5f, 7f, Donc de rang 3, 5, 7,… En MLI synchrone, le spectre d'harmoniques de uch varie avec le coefficient de réglage r et l'indice de modulation m, comme suit: - si r=0, uch est formée de signaux rectangulaires jointifs de fréquence mf, comprend les harmoniques de rang m, 3m, 5m,…; - quand r croit, la fondamentale Uch1 augmente, les harmoniques de rang m, 3m, 5m, … diminuent mais il en apparaît d'autres. Ceux-ci peuvent se diviser en 3 familles: 1ère Famille:est concentrée sur la fréquence mf et comprend, outre le terme de rang m, la paire d'harmoniques de rang m-2 et m+2, la paire de rang m-4 et m+4,… 2ème Famille:est concentrée sur la fréquence 2mf et comprend la paire d'harmoniques de rang 2m-1 et 2m+1, la paire de rang 2m-3 et 2m+3,… 3ème Famille:est concentrée sur la fréquence 3mf et comprend les harmoniques de rang 3m, 3m-2 et 3m+2, 3m-4 et 3m+4,… Remarques: - si m est grand, les termes des premières familles tout ou moins n'interfèrent pas. D'autre part, les harmoniques de la même paire ont la même valeur; - lorsque l'indice de modulation est multiple de 3, le principal harmonique de rang m et les harmoniques de rang 2m-3, 2m+3 de la 2ème famille sont disparus; 2Ur- la MLI ne reduit pas le taux d'harmoniques: ? =1 ?, ?nn est independant de m; mais elle 22permet de décaler les harmoniques vers les fréquences les plus élevées, ce qui facilite leur filtrage. Exemple: m=15, r=0.8 2Pour chaque terme de fréquence nf on a indiqué sa valeur efficace Uchn rapportée à U (valeur du ?fondamental en pleine onde). ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 18 Electronique de Puissance Avancée U chn(2.U / ?)10 20 30 n Figure 1.19: Spectre d'harmoniques1ère Famille: 15, 13, 17, 11, 19, … 2ème Famille: 29, 31, 27, 33,… Sur le spectre on a tracé en trais interrompus les harmoniques qui disparaissent. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 19 Electronique de Puissance Avancée Chapitre II: Les onduleurs MLI triphasés 2.1 Onduleur triphasé de tension 2.1.1 Analyse et fonctionnement - K1 et K'1, K2 et K'2, K3 et K'3 doivent être complémentaires. Ainsi que, les interrupteurs sont réversibles en courant. i vK1 T1 K1 DK2 K3 1 vchA iK1 ichA A U/2 vchB iiK2 chB U B vchC ichC CU/2 iK3 K'1 K'2 K'3 Figure 2.1: Onduleur triphasé de tensionAvec: ?U : K esF;t ??12v ? v = (2.1) A?0?? U : 'K esF.t ?? 21?U :K esF;t ?22v ? v = (2.2) B?0?? U : 'K esF.t ?? 22?U : K esF;t ??32v ? v = (2.3) C?0?? U : 'K esF.t ?? 23N.B: on désigne par 'F' lorsque l'interrupteur est fermé, et par 'O' lorsque celui-ci est ouvert. On peut exprimer également les tensions composées aux bornes de charge comme suit: ?U :K es t F, K es t ;O? 120? : K et K s ont ;Fv ? v = v= (v ? v) ? (v ? v) = (2.4) ABABAB?1200?U : K es t O, K esF;t ?120? : K et K sO.ont ?12De même, on peut déduire les expressions de vet v. BCCA./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 20 Electronique de Puissance Avancée D'autre part, pour une charge triphasée équilibrée, on a: v+ v + v = 0ABC (2.5) En utilisant les expressions précédentes, et on déduit les tensions simples comme suit: 1211v A = [(v ? v) ?(v ? vABCA]) =(v? v) ? (v ? v) ? (v ? v)A0B0C0 (2.6) 33331121vB = [(v ? v) ?(v ? vBCAB]) = ?(v? v) + (v ? v) ? (v ? v)A0B0C0 (2.7) 33331112vC = [(v ? v) ? (v ? vCABC]) = ?(v? v) ? (v ? v) + (v ? v)A0B0C0 (2.8)3333Le courant délivré par la source est donné par: i = i+ i + i (2.9) k1k 2ik 3Le fonctionnement de l'onduleur triphasé de tension est projeté dans un tableau résumé, suivant: K1 K2 K3 vA- v0 vB- v0 vC- v0 vcA vcB vcC iK1 iK2 iK3 i F F F U/2 U/2 U/2 0 0 0 icA icB icC 0 F F O U/2 U/2 -U/2 U/3 U/3 -2U/3 icA icB 0 - icC F O F U/2 -U/2 U/2 U/3 -2U/3 U/3 icA 0 icC - icB F O O U/2 - U/2 - U/2 2U/3 -U/3 -U/3 icA 0 0 icA O F F -U/2 U/2 U/2 -2U/3 U/3 U/3 0 icB icC - icA O F O - U/2 U/2 -U/2 -U/3 2U/3 - U/3 0 icB 0 icB O O F - U/2 -U/2 U/2 U/3- -U/3 2U/3 0 0 icC icC O O O - U/2 - U/2 - U/2 0 0 0 0 0 0 0 2.1.2. Fonctionnement en pleine onde La commande en pleine onde consiste à fermer chaque interrupteur pendant une demi-période (T/2) des tensions de sortie, comme suit: ?,?K pour 0< ?t < ? et K pour ?< ?t < 2?;1?1?2?2?2?2??K pour < ? t < ? +,et K pour ?+< ?t < 2? +;2 (2.10) ?33233?4?4?4?4??K pour < ?t < ? +,et K pour ?+< ?t < 2? +.? 333333D'après le tableau résumé, on peut tracer les formes d'ondes. Les tensions de sortie vchA, vchB et vchC ont pour valeur efficace de leur fondamental est: V= 2 U (2.11) ch1?./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 21 Electronique de Puissance Avancée K1 ?t K2 ?t K3 ?t vchA ?t vA-v0 ichB ichA ichC ?ti?t iK1 ?t D1 T1 D'1 T'1 T'2 D2 T2 D'2 T3 D'3 T'3 D3 Figure 2.2: Forme d'ondes en pleine onde 2.1.3. Fonctionnement en MLI . K1 ?t K2 ?t K3 ?t vA-v0 ?t vchA ?t ichB ichA ichC ?t i ?tiK1 ?t Figure 2.3: Forme d'ondes en MLI./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 22 Electronique de Puissance Avancée Si la modulation est synchrone, on choisit un indice de modulation multiple de 3, soit m=6. Les formes d'ondes sont déduites à l'aide du tableau résumé en utilisant le chronomètre de fermeture des interrupteurs K1, K2 et K3 2. 2. Onduleur triphasé de courant 2.2.1. Analyse et fonctionnement ? L'onduleur de courant triphasé est placé entre une source de courant continu supposée parfaite; donc débutant un courant constant, et une source de tension alternative triphasée supposée parfaite; donc présentant des tensions vchA, vchB, vchC formant un système triphasé sinusoïdale équilibré. ? Les interrupteurs K1, K2, K3 d'une part, et K'1, K'2, K'3 d'autre part doivent être complémentaires, pour que la source du courant ne soit jamais en circuit ouvert et la source de tension ne soit jamais mise en court-circuit. Ainsi que, les interrupteurs sont réversibles en tension. I vchA vK1 K1 K2 K3 iichA K1 AvchB iichBK2 u B vchC ichC iK3 C K'1 K'K'2 3 Figure 2.4: Onduleur triphasé de courantfermés icA icB icC vK1 vK2 vK3 vK1' vK2' vK3' u K1 K '1 0 0 0 0 vcA- vcB vcA- vcC 0 vcB- vcA vcC- vcA 0 K1 K '2 I -

I 0 0 vcA- vcB vcA- vcC vcA- vcB 0 vcC- vcB vcA- vcB K1 K '3 I 0 -I 0 vcA- vcB vcA- vcC vcA- vcC vcB- vcC 0 vcA- vcC K2 K '1 -I I 0 vcB- vcA 0 vcB- vcC 0 vcB- vcA vcC- vcA vcB- vcA K2 K '2 0 0 0 vcB- vcA 0 vcB- vcC vcA- vcB 0 vcC- vcB 0 K2 K '3 0 I -I vcB- vcA 0 vcB- vcC vcA- vcC vcB- vcC 0 vcB- vcC K3 K '1 -
I 0 I vcC- vcA vcC- vcB 0 0 vcB- vcA vcC- vcA vcC- vcA K3 K '2 0 -I I vcC- vcA vcC- vcB 0 vcA- vcB 0 vcC- vcB vcC- vcB K3 K '3 0 0 0 vcC- vcA vcC- vcB 0 vcA- vcC vcB- vcC 0 0 ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 23 Electronique de Puissance Avancée K , KK,123 ?? :aircomplémentes ? il y a 9 configurations possibles. K' , K'K',123 ?
L'ensemble des relations est regroupé dans un tableau résumé. Pour résumé, on a indiqué que les 2 interrupteurs fermés, alors les autres étant ouverts. 2.2.2. Fonctionnement en pleine onde La commande en pleine onde consiste à fermer chaque interrupteur pendant un tiers de période (T) des courants de sortie, comme suit: ??2,??K pour 0< ?t En effet, deux simples diodes de tenue en tension E/2 permettent d'obtenir une amélioration significative de la tension découpée.E/2 E n E/2 vsA vsB vsC Figure 4.6: Onduleur triphasé NP C à point milieu capacitif unique ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 37
Electronique de Puissance Avancée Chapitre V: Convertisseur Matriciel Le convertisseur matriciel est une nouvelle génération du convertisseur direct de puissance alternatif/alternatif. Il permet d'assurer un écoulement bidirectionnel de puissance entre le réseau et le récepteur, ainsi qu'il permet de contrôler la tension de sortie en amplitude et en fréquence grâce à une matrice des interrupteurs de puissance bidirectionnels en courant et en tension reliant n phases d'entrée à m phases de sortie; cela conduit à avoir n×m interrupteurs bidirectionnels.
Par conséquent, le convertisseur matriciel du triphasée vers triphasée 3?/3? nécessite neuf interrupteurs bidirectionnels. 5.1. Principe de fonctionnement Le convertisseur matriciel triphasé/triphasé, consiste à utilisé 9 interrupteurs bidirectionnels en courant et en tension reliant les trois phases d'entrée à celles de la charge. Un filtre passe-bas doit être inséré à l'entrée du convertisseur matriciel dont l'objectif d'empêcher la propagation des courants harmoniques dans le réseau. Pour que l'échange d'énergie entre la source et la charge soit possible, il faut que la source présente un comportement différent de celui de la charge. Pour cette raison, la source présente un comportement d'une source de tension, alors que la charge présente celui d'une source de courant dans le
schéma. Convertisseur matriciel vfAN A ifA Lf Rf iA SAa SAb SAc vfBN B iLfB f Rf iB SBa SBb SBc N vfCN C ifC Lf Rf iC SCa SCb SCc vCf AN vaN a b c vbN vcN ia ib ic N Filtre LC van vbn vcn n Figure 5.1:Schéma de principe d'un convertisseur matriciel 3?/3? ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 38
Electronique de Puissance Avancée 5.2. Interrupteurs à semi-conducteurs utilisés dans le convertisseur matriciel L'utilisation d'interrupteurs réversibles en tension et en courant à blocage et amorçage commandés dans le premier et le troisième quadrant est indispensable dans le convertisseur matriciel. Dans la littérature, deux variantes des interrupteurs à semi-conducteurs fortement utilisées:(a) (b) Figure 5.2: Interrupteurs bidirectionnels à base de deux diodes et deux IGBT avec: (a) émetteur commun, (b) collect eur commun 5.3. Modèle mathématique du convertisseur matriciel ??l'si1interrupteSur estf ermé;ijS =
(5.1) ij??? l' si0interrupteSur estouvert .ijLes tensions instantanées de sortie en fonction des tensions d'entrée sont données par: ?vaN ? ?SAa SBa SCa ??vAN ??? ????v=? bN ? ?SAb SBb SCb ??vBN ? (5.2) ?v ? ?SSS??v?? cN ? ? AcBcCc ?? CN ?La relation entre les courants instantanés d'entrée et ceux de sortie est donnée par: ?iA ? ?SAaSAbSAc ??ia ?? ? ??? ?i=? B ? ?SBaSBbSBc ??ib ? (5.3) ?i ? ?SS(t)S??i ?? C ? ? CaCbCc ?? c ?Le convertisseur matriciel triphasé/triphasé possède théoriquement 512 (29) combinaisons possibles. Sachant que l'entrée du convertisseur se comporte comme une source de tension, alors que la charge se comporte comme une source de courant (figure 4.1), les interrupteurs d'une même colonne doivent être complémentaires pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit et pour que la charge ne soit jamais en circuit-ouvert.
Dans ces conditions, on a: S+ S+= 1AjCjSBj (5.4) Avec : j = {a, ,b }c Par conséquent, il y a 27 combinaisons possibles de commutation. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 39 Electronique de Puissance Avancée Si on suppose t (t)ijla durée de conduction de l'interrupteur S , définie par: ijt++=Ajt Bj tCjsT eq
(5.5) Avec Tseq la période de commutation du convertisseur matriciel. Dans ce cas: 0 < t K. Bose, "Power electronics and motor drives: advances and trends", Academic Press is an imprint of Élsevier, 2006, U. S. A. 8. F. Costa," Les onduleurs de tension en commutation commandée",
Cours électronique de puissance avancée, Module MR2. 9. J-S. Mariéthoz, " Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multi-niveaux asymétriques: topologies, modulation et commande ", thèse de doctorat, Lausanne, EPFL, France, 2005. 10. D. Casadei, G.
Serra et A. Tani , "Matrix converter modulation strategies: a new general approach based on space-vector representation of the switch state", IEEE Trans.

1 1 r 2 2 r euat3 3 teuérénn m écepGRFigure 1.2: Structure générale des convertisseurs Cette matrice comprend en principe n×m éléments. Toutefois pour certains convertisseurs, des interrupteurs sont supprimés ou réduits à une simple liaison galvanique. 1.2.2 Convertisseurs indirects:Certains convertisseurs ne relient pas directement le générateur au récepteur: l'énergie transite par un étage intermédiaire. Dans ce cas, on trouve une cascade de convertisseurs, l'un reliant le générateur à l'étage intermédiaire, l'autre reliant cet étage au récepteur. Etage intermédiaire Figure 1.3: Convertisseur indirectL'étage intermédiaire joue le rôle de récepteur vis-à-vis du premier convertisseur, de générateur vis-à-vis du deuxième. Il est généralement formé d'un ou de plusieurs éléments de stockage d'énergie (inductances et condensateurs). C'est le cas, par exemple des convertisseurs continu-continu (DC/ DC), à étage intermédiaire résonnant inséré dans une cascade onduleur / redresseur. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 6 Electronique de Puissance Avancée 1.3. Interrupteurs à semi-conducteurs : Dans tous les convertisseurs d'électronique de puissance, les échanges d'énergie entre le générateur et le récepteur sont contrôlés grâce à l'évolution au cours des temps des connexions que les interrupteurs du convertisseur établissent. Tout changement de connexion résulte d'un changement d'état : - fermeture (connexion de l'état OFF à l'état ON) ; - ouverture (connexion de l'état ON à l'état OFF). La commutation d'un semi-conducteur d'un état à l'autre peut être - Soit commandée: et résulter d'un signal appliqué à son accès de commande - Soit spontanée (Naturelle) : et résulter du passage par générateur de la tension à ses homes (Fermeture spontanée) ou du passage par zéro du courant qui le traverse (ouverture spontanée). Table.1 : les principaux interrupteurs à semi-conducteurs utilisés dans l'électronique de puissance. caractéristiques Interrupteur Symbole Tension courant fréquence Diode (1955)10V -10 kV 1-5000 A ---------- BJT: Bipolar junction transistor (1975) 30V-1.2 kV 0.5- 500 A 10 kHz MOSFET: Metal oxide semiconductor field 20-500V 0.5-50 A 1MHz effect transistor (1976) IGBT: Insulated gate bipolar transistor (1983) 600V- 2.5 kV 10- 600 A 20 kHz SCR: Silicon controlled rectifier (thyristor) 200V-6 kV 10 A-3.5 kA 500 Hz (1957) GTO: Gate turn-off thyristor (1962) 200V-4.5 kV 10 A-3 kA 2 kH TRIAC (1958)200-1kV. 2-100 A 500 Hz ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 7
Electronique de Puissance Avancée 1.4. Critères de choix des interrupteurs à semi-conducteurs Le choix d'un interrupteur à semi-conducteurs pour une application particulière dépend aux critères suivants: - la tension inverse; - le niveau du courant; - la fréquence de commutation; - la vitesse de commutation; - les pertes (par conduction et commutation); - le mode de la commande (naturelle, semi, et totale) 1.5. Electronique de commande: Les convertisseurs de puissance qui utilisent des semi-conducteurs de puissance commandés peuvent être soit totalement soit partiellement commandés. Un convertisseur est totalement commandé si tons les changements d'états des interrupteurs qui le composent sont fixés par les signaux de commende à la fermeture et à l'ouverture envoyés aux semi-conducteurs (l'état des interrupteurs ne dépend pas à l'évolution des tensions et des courants à des accès). iKK1 2 K3 vA iA vB iB U viC C K'1 K'2 K'3 Figure 1.4: Onduleur e tensionUn convertisseur est partiellement commandé si certains changements d'état des interrupteurs se produisent sous l'évolution des tensions et les courants à ses accès (thyristor). Pour qu'un convertisseur soit totalement commandée, il faut notamment qu'il comporte des interrupteurs à fermeture et ouverture commandée. - Exemple: les onduleurs autonomes de tension. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 8 Electronique de Puissance Avancée 1.6. Structure de la commande La commande éloignée : génère à partir des signaux de référence (xréf) et des mesures effectuées sur le générateur et le récepteur (xmes(gé, ré)), des ondes de référence (x w) qui correspondent aux tension ou aux courants qu'on veut imposer aux accès du générateur ou du récepteur. Générateur X ref ig Régulateurs Logique de Cde Cde Rapprochée X(gé, ré)mesRécepteur 1er niveau 2ème niveau 3ème niveau deC éloignée (principale)deC RapprochéeFigure 1.5: Structure de commande La commande rapprochée détermine les instants où il faut commander l'amorçage ou le blocage des interrupteurs à semi-conducteurs à partir des ondes de référence (xréf) 1.7 Commande rapprochée par comparaison d'ondes: L'électronique de commande rapprochée sert à déterminer les instants des interrupteurs de commutateur où il faut envoyer ces ordres en fonction d'ondes qui correspondent généralement aux tensions on aux courants qu'on veut imposer aux accès du récepteur. Les techniques de la commande rapprochée sont très variées. La technique qui consiste à comparer des ondes de références avec des ondes de modulation est la plus adaptée aux convertisseurs utilisant des interrupteurs totalement commandés. i j Générateur Récepteur Kij Xréf Xmes Générateur Figure 1.6: Commande raprochée par comparaison./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 9 Electronique de Puissance Avancée 1.7.1. Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés à la fermeture: A) Redresseurs tout thyristors ciT1 T2 T3 vA iA vB iB cU mV VAref V VvrefBrefCC +1iC T'1 T'2 T'3 -1Figure 1.7: Structure du redresseur tout thyristors. UcFigure 1.8: Forme d'onde. Pour déterminer les instants de commande des thyristors, on utilise une onde de modulation Vm. cette valeur correspond à la valeur moyenne Ucmoy de Uc, tel que -1?) Figure 1.10: Gradateur monophasé: structure et forme d'ondesD'après les deux figures ci-dessus, on constate que Uch ne dépend pas seulement de Uréf mais aussi de la nature de charge. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 11
Electronique de Puissance Avancée 1.7.2. Convertisseurs utilisant des interrupteurs commandés totalement commandable: A) Hachuers On prend comme schéma de base, pour l'étude de la commande des hacheurs directs à deux interrupteurs celui de hacheur réversible en courant. D1 i ich K1 T1 K2U T2uchD2 Figure 1.11: HacheurPrincipe de la commande Si on emploie la commande complémentaire de K1 et K2, il faux déterminer par période T de hachage, deux instants: - l'instant de commutation de K1 vers K2; - l'instant de commutation de K2 vers K1. La valeur moyenne Uchmoy de la tension uch peut être réglée entre 0 et U, on fait donc varier uuch=de 0 à 1. On doit donc prendre une onde de modulation allant de 0 à 1, par exemple une réfUonde en dents de scie. +1 ?t0 KK1 2 K1 K2 uch ?t 0 ?TT2T Figure 1.12: Principe de commandeSi ?T est la durée des intervalles de conduction de K1 à chaque période, on a: Uch=?U. U?chUU==? U = U U.
(1.3) réfchréfUU./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 12 Electronique de Puissance Avancée B) Onduleurs monophasé de tension MLI La commande MLI des onduleurs monophasés de tension fonctionnant en modulation de largeur d'impulsions M.L.I (en anglo-saxon P.W.M, pulse width modulation). La principale différence apportée par cette technique de commande par rapport aux techniques précédentes, est du fait qu'en régime permanent les ondes de référence ne tendent pas vers des grandeurs constantes, mais, le plus souvent vers des ondes sinusoïdales d'amplitude et de pulsation constantes. Principe de la commande T1 K1D1 U/2 ich U/2 e g T 1'1K'D'1 aruch chFigure 1.13: Onduleur monophasé MLIDans l'onduleur en demi-pont fonctionnant en MLI, on détermine les instants de commutation en comparant: une onde de référence uréf qui représente la tension que l'on veut trouver aux bornes de la charge avec une onde de modulation M allant de -1 à +1. L'onde de modulation peut être: a) en dents de scie: On distingue deux types d'échantillonne naturel et synchrone. +1 +1 M uréf M uréf ?t ?t 0 0 -1 -1 K1 K'1 échantillonnage naturel échantillonnage synchrone Figure 1.14: Modulation en dents de scieb) triangulaire: +1 +1 M uréf M uréf ?t ?t 0 0 -1 -1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 K'1 K1 échantillonnage naturel échantillonnage synchrone Figure 1.15: Modulation triangulaire./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 13 Electronique de Puissance Avancée - La modulation triangulaire permet d'obtenir un meilleur suivi de l'onde de référence. Caractéristique de la commande MLI: La commande MLI est caractérisée par: - le coefficient de réglage en tension ou en courant r (0 f; mréf?fréfréf- la phase de l'onde de référence ?. Donc, on peut écrire: u= r.cos(? .t +)? réfréfSchéma de principe de la commande MLI: K1U/2 ich U/2 e 1K'garuch chGénération r ? de Uréf?réf Comparaison et Génération mise en forme de M1.8. Commande MLI Figure 1.16: Principe de la MLILa modulation de largeur d'impulsion MLI (en anglo-saxon Pulse Width Modulation PWM), consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des gradeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension (ou courant) de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Autrement dit, la MLI consiste à déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique ou en faisant simultanément appel à ces deux techniques. L'objectif principal de la MLI est d'obtenir une tension ou un courant proche à la forme sinusoïdale à la sortie de l'onduleur. 1.8.1 Onduleur monophasé MLI en demi-pont de tensionL'onde de modulation de fréquence f' nettement supérieure à la fréquence de l'onde de référence f, est une onde triangulaire d'amplitude U/2. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 14 Electronique de Puissance Avancée +U/2 M uréf t i0 t1 t2 T' K1-U/2 U/2uch T1D1 KK'i1 1 K1 ch Uu+U/2ch U/2 T 1'D'U1 chmoy 1K't 0 t1 t2 Tm -U/2 Figure 1.17: Tension moyenne d'un onduleur en demi-pont MLICalcul de la valeur moyenne uch pendant Tm: Sachant que: - la période de l'onde de modulation Tm<<; - la variation de uréf est négligeable (?uréf?0)?uréf=cte. 1 ?UUU?U= (1.4) cmoy? .t ?.(t ? t) +.(T ? t)121m2 ?Tm ? 222?Calcul de t1: Utà t11: M= ?+ U.2.= u (ascendante)réf2Tm?UTt = um(+).
(1.5) 1ref2U.2U.3tà t22: M=? U.2.= u (descecendant)réf2Tm?U.3Tt = (um?+). (1.6) 2ref2U.2On remplace t1 et t2 dans (1.4), on trouve: U= u (1.7) chmoeyrefSi la référence varie sinusoïdalement, la valeur moyenne de uch variera suivant la même loi. Donc, l'objectif de la MLI est vérifié. 1.8.2 Caractérisation de la modulation M: Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande: 1. l'indice de modulation m: c'est le rapport entre la fréquence de l'onde modulation et celle de l'onde référence (f'/f);./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 15
Electronique de Puissance Avancée 2. le coefficient de réglage r: c'est le rapport entre l'amplitude de l'onde référence et la valeur crête U/2 de l'onde de modulation.Selon l'indice de modulation on distingue deux types de modulation: - la modulation synchrone: lorsque f' est un multiple entier de f (m est un nombre entier). Dans ce cas, on obtient une tension uch vraiment périodique avec une période T=1/f; - la modulation asynchrone: lorsque f' n'est pas un multiple entier de f (m n'est pas un nombre entier). En modulation synchrone: - si m est impair, le développement en série de Fourier de uch ne comporte que les harmoniques impairs; - si m est pair, le développement en série de Fourier de uch donne une composante continue, des harmoniques pairs, et des harmoniques impairs. Par conséquent, on choisit donc des valeurs impaires de m. Calage est optimal: lorsque Mpasse par un maximum ou un minimum au milieu des alternances de l'onde de référence. Dans ce cas, les alternances de uch sont symétriques par rapport à leurs milieux. 1.8.3 Tension de sortie: - Fondamental: Dès que m est suffisament égal ou supérieur à 6, la fondamentale de la tension de sortie est 1Upratiquement égal à la tension de référence et donc a pour valeur efficace: U=.r.1ch22À une tension d'entrée donnée, la MLI permet de faire varier la valeur de la tension de sortie, ce qui ne permettant pas la commande en pleine onde. UQuand r va de 0 à 1, Uch1 va de 0 à . Par conséquant la valeur maximale de Uch1 est inférieure à 2 2sa valeur obtenue avec la commande en pleine onde, soit: 14 U2U=..=U. (1.8) ch12 ? 2?On peut conclure également: U(MLI)?1ch==.7856.0U(pleine onde)41chDonc on a un déchet de tension de 21.46% ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 16 Electronique de Puissance Avancée +U/2 M uréf ?t0 +U/2 K1 K'K'K'K'1 K'1 K1 K1 1 K1 1 K1 K1 1 K'1 K1 uch +U/2 ?t 0 +U/2 i ? ? t 0 ich ? ?t 0 iT1 ?t 0 iD1 ?t 0 uT1 ?t 0 Figure 1.18: Formes d'ondesd'un onduleur en demi-pont MLI./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 17 Electronique de Puissance Avancée 1.8.4. Harmoniques: En commande pleine onde, le développement en série de Fourier de uch de fréquence f comporte les harmoniques de fréquence 3f, 5f, 7f, Donc de rang 3, 5, 7,... En MLI synchrone, le spectre d'harmoniques de uch varie avec le coefficient de réglage r et l'indice de modulation m, comme suit: - si r=0, uch est formée de signaux rectangulaires jointifs de fréquence mf, comprend les harmoniques de rang m, 3m, 5m,...; - quand r croit, la fondamentale Uch1 augmente, les harmoniques de rang m, 3m, 5m, ... diminuent mais il en apparaît d'autres. Ceux-ci peuvent se diviser en 3 familles: 1ère Famille:est concentrée sur la fréquence mf et comprend, outre le terme de rang m, la paire d'harmoniques de rang m-2 et m+2, la paire de rang m-4 et m+4,... 2ème Famille:est concentrée sur la fréquence 2mf et comprend la paire d'harmoniques de rang 2m-1 et 2m+1, la paire de rang 2m-3 et 2m+3,... 3ème Famille:est concentrée sur la fréquence 3mf et comprend les harmoniques de rang 3m, 3m-2 et 3m+2, 3m-4 et 3m+4,... Remarques: - si m est grand, les termes des premières familles tout ou moins n'interfèrent pas. D'autre part, les harmoniques de la même paire ont la même valeur; - lorsque l'indice de modulation est multiple de 3, le principal harmonique de rang m et les harmoniques de rang 2m-3, 2m+3 de la 2ème famille sont disparus; 2Ur- la MLI ne reduit pas le taux d'harmoniques: ? =1 ?, ?nn est independant de m; mais elle 22permet de décaler les harmoniques vers les fréquences les plus élevées, ce qui facilite leur filtrage. Exemple: m=15, r=0.8 2Pour chaque terme de fréquence nf on a indiqué sa valeur efficace Uchn rapportée à U (valeur du ?fondamental en pleine onde). ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 18 Electronique de Puissance Avancée U chn(2.U / ?)10 20 30 n Figure 1.19: Spectre d'harmoniques1ère Famille: 15, 13, 17, 11, 19, ... 2ème Famille: 29, 31, 27, 33,... Sur le spectre on a tracé en trais interrompus les harmoniques qui disparaissent. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 19 Electronique de Puissance Avancée Chapitre II: Les onduleurs MLI triphasés 2.1 Onduleur triphasé de tension 2.1.1 Analyse et fonctionnement - K1 et K'1, K2 et K'2, K3 et K'3 doivent être complémentaires. Ainsi que, les interrupteurs sont réversibles en courant. i vK1 T1 K1 DK2 K3 1 vchA iK1 ichA A U/2 vchB iiK2 chB U B vchC ichC CU/2 iK3 K'1 K'2 K'3 Figure 2.1: Onduleur triphasé de tensionAvec: ?U : K esF;t ??12v ? v = (2.1) A?0?? U : 'K esF.t ?? 21?U :K esF;t ??22v ? v =
(2.2) B?0?? U : 'K esF.t ?? 22?U : K esF;t ??32v ? v = (2.3) C?0?? U : 'K esF.t ?? 23N.B: on désigne par 'F' lorsque l'interrupteur est fermé, et par 'O' lorsque celui-ci est ouvert. On peut exprimer également les tensions composées aux bornes de charge comme suit: ?U :K es t F, K es t ;O?
120? : K et K s ont ;Fv ? v = v= (v ? v) ? (v ? v) = (2.4) ABABAB?1200?U : K es t O, K esF;t ?120? : K et K sO.ont ?12De même, on peut déduire les expressions de vet v. BCCA./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 20 Electronique de Puissance Avancée D'autre part, pour une charge triphasée équilibrée, on a: v+ v + v = 0ABC
(2.5) En utilisant les expressions précédentes, et on déduit les tensions simples comme suit: 1211v A = [(v ? v) ?(v ? vABCA]) =(v? v) ? (v ? v) ? (v ? v)A0B0C0 (2.6) 33331121vB = [(v ? v) ?(v ? vBCAB]) = ?(v? v) + (v ? v) ? (v ? v)A0B0C0 (2.7) 33331112vC = [(v ? v) ?
(v ? vCABC]) = ?(v? v) ? (v ? v) + (v ? v)A0B0C0 (2.8)3333Le courant délivré par la source est donné par: i = i+ i + i (2.9) k1k 2ik 3Le fonctionnement de l'onduleur triphasé de tension est projeté dans un tableau résumé, suivant: K1 K2 K3 vA- v0 vB- v0 vC- v0 vcA vcB vcC iK1 iK2 iK3 i F F F U/2 U/2 U/2 0 0 0 icA icB icC 0 F F O U/2 U/2 -U/2 U/3 U/3 -2U/3 icA icB 0 - icC F O F U/2 -U/2 U/2 U/3 -2U/3 U/3 icA 0 icC - icB F O O U/2 - U/2 - U/2 2U/3 -U/3 -U/3 icA 0 0 icA O F F -U/2 U/2 U/2 -2U/3 U/3 U/3 0 icB icC - icA O F O - U/2 U/2 -U/2 -U/3 2U/3 - U/3 0 icB 0 icB O O F - U/2 -U/2 U/2 U/3- -U/3 2U/3 0 0 icC icC O O O - U/2 - U/2 - U/2 0 0 0 0 0 0 0 2.1.2. Fonctionnement en pleine onde La commande en pleine onde consiste à fermer chaque interrupteur pendant une demi-période (T/2) des tensions de sortie, comme suit: ?,?K pour 0< ?t < ? et K pour ?< ?t < ?2?;1?1?2?2?2?2?K pour < ? t < ? +,et K pour ?+< ?t < 2? +;2 (2.10) ?33233?4?4?4?4??K pour < ?t < ? +,et K pour ?+< ?t < 2? +.? 333333D'après le tableau résumé, on peut tracer les formes d'ondes. Les tensions de sortie vchA, vchB et vchC ont pour valeur efficace de leur fondamental est: V= 2 U
(2.11) ch1?./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 21 Electronique de Puissance Avancée K1 ?t K2 ?t K3 ?t vchA ?t vA-v0 ichB ichA ichC ?ti?t iK1 ?t D1 T1 D'1 T'1 T'2 D2 T2 D'2 T3 D'3 T'3 D3 Figure 2.2: Forme d'ondes en pleine onde 2.1.3. Fonctionnement en MLI . K1 ?t K2 ?t K3 ?t vA-v0 ?t vchA ?t ichB ichA ichC ?t i ?tiK1 ?t Figure 2.3: Forme d'ondes en MLI./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 22 Electronique de Puissance Avancée Si la modulation est synchrone, on choisit un indice de modulation multiple de 3, soit m=6. Les formes d'ondes sont déduites à l'aide du tableau résumé en utilisant le chronomètre de fermeture des interrupteurs K1, K2 et K3 2. 2. Onduleur triphasé de courant 2.2.1. Analyse et fonctionnement ? L'onduleur de courant triphasé est placé entre une source de courant continu supposée parfaite; donc débutant un courant constant, et une source de tension alternative triphasée supposée parfaite; donc présentant des tensions vchA, vchB, vchC formant un système triphasé sinusoïdale équilibré. ? Les interrupteurs K1, K2, K3 d'une part, et K'1, K'2, K'3 d'autre part doivent être complémentaires, pour que la source du courant ne soit jamais en circuit ouvert et la source de tension ne soit jamais mise en court-circuit. Ainsi que, les interrupteurs sont réversibles en tension. I vchA vK1 K1 K2 K3 iichA K1 AvchB iichBK2 u B vchC ichC iK3 C K'1 K'K'2 3 Figure 2.4: Onduleur triphasé de courantfermés icA icB icC vK1 vK2 vK3 vK1' vK2' vK3' u K1 K '1 0 0 0 0 vcA- vcB vcA- vcC 0 vcB- vcA vcC- vcA 0 K1 K '2 I -
I 0 0 vcA- vcB vcA- vcC vcA- vcB 0 vcC- vcB vcA- vcB K1 K '3 I 0 -I 0 vcA- vcB vcA- vcC vcA- vcC vcB- vcC 0 vcA- vcC K2 K '1 -I I 0 vcB- vcA 0 vcB- vcC 0 vcB- vcA vcC- vcA vcB- vcA K2 K '2 0 0 0 vcB- vcA 0 vcB- vcC vcA- vcB 0 vcC- vcB 0 K2 K '3 0 I -I vcB- vcA 0 vcB- vcC vcA- vcC vcB- vcC 0 vcB- vcC K3 K '1 -
I 0 I vcC- vcA vcC- vcB 0 0 vcB- vcA vcC- vcA vcC- vcA K3 K '2 0 -I I vcC- vcA vcC- vcB 0 vcA- vcB 0 vcC- vcB vcC- vcB K3 K '3 0 0 0 vcC- vcA vcC- vcB 0 vcA- vcC vcB- vcC 0 0 ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 23 Electronique de Puissance Avancée K , KK,123 ?? :aircomplémentes ? il y a 9 configurations possibles. K' , K'K',123 ?
L'ensemble des relations est regroupé dans un tableau résumé. Pour résumé, on a indiqué que les 2 interrupteurs fermés, alors les autres étant ouverts. 2.2.2. Fonctionnement en pleine onde La commande en pleine onde consiste à fermer chaque interrupteur pendant un tiers de période (T) des courants de sortie, comme suit: ??2,??K pour 0< ?t La fondamentale des courants de sortie a pour valeur: II= r.1ch (2.15) 26La comparaison de cette valeur avec celle obtenue par la commande en pleine onde I., montre ?qu'on a un déchet de courant de 9.3 %. Dans ce cas, les courants de sortie contiennent tous les harmoniques impairs sauf ceux de rang 3 et multiple de 3. ces harmoniques se regroupent en familles suivantes: - 1ère famille: les harmoniques de rang m-2 et m+2, m-4 et m+4,...ect. - 2ème famille: ceux de rang 2m-1 et 2m+1, 2m-3 et 2m+3,...ect. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 25 Electronique de Puissance Avancée M1 M2 ichA ichB ichC vchA vchB vchC u ?t Figure 2.6: Forme d'ondes en MLI./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 26 Electronique de Puissance Avancée Chapitre III:Les Redresseurs MLI triphasés Les redresseurs MLI sont finalement des onduleurs (même structure, même techniques e commandes adoptées) utilisés "à l'envers" qui permettent de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif (comme un redresseur à diode muni d'un filtre) mais en absorbant sur le dit réseau des courants sinusoïdaux, à facteur de puissance unitaire. Ils sont entièrement réversibles. La contrainte de commande sera donc d'imposer que Q et les harmoniques de courants absorbées par l'onduleur soient nuls. Par conséquent, le réseau impose la fréquence de référence d'une part et d'autre part la fréquence de modulation doit être multiple de 3 de la fréquence de référence, comme nous l'avons déjà souligné. Ainsi que, on rend le facteur de puissance du fundamental (cos?=1) égal à l'unité, par le calage de la référence. En outre, on déplace les harmoniques des courants d'entrée vers les hautes fréquences par la modulation. 3.1. Redresseur MLI de courant triphasé: ich KK1 2 K3 vA A iA eA vB B rgeuch iB haCeB vC ?? ?? ??C iC eC K'1 K'2 K'3 Figure 3.7: Redresseur triphasé de courantUn redresseur MLI de courant alimenté par une source triphasée de courants sinusoïdaux, débitant sur une source de tension continue, a la même structure et la même technique de commande qu'un onduleur de tension triphasé. On ajoute une inductance supplémentaire à celle de réseau, afin d'assurer le comportement d'une source de courant à l'entrée du redresseur d'une part, et d'autre part on délivre une capacité entre les bornes de sortie afin d'assurer le comportement d'une source de tension dans la sortie (?u?0). On utilise comme cellule de commutation dans le redresseurs MLI, le GTO asymétrique ou l'IGBT avec une diode parallèle inverse. ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 27 Electronique de Puissance Avancée 3.1.1. Forme d'ondes Pour m=9, et en tenant compte les hypothèses simplificatrices suivantes: - la source de courants est parfaite (iA, iB, iC sont sinusoïdaux); - la charge comporte comme une source de tension parfaite (?uc?0); - les courants d'entrés sont en phase avec les du réseau; - les interrupteurs sont idéaux. D'après les intervalles de fermeture des interrupteurs, on déduit la forme d'onde de la tension vA et le courant de sortie ic en utilisant le tableau résumé obtenu pour l'onduleur de tension. 10 -11K1 01K2 01K3 0vA ?t 00 ich ?t 0 0 Figure 3.8: Forme d'ondes 3.1.2. Rapport des tensions d'entrée et de sortie - Si on néglige l'ondulation de la tension de sortie, uc=Uc;- Si l'indice de modulation est suffisant m?6, le fondamental des tensions alternatives a une amplitude pratiquement égale à celle de la référence. Donc, la valeur efficace V1 du fondamental des tensions vA, vB, vC a pour valeur:12 2=?=1Vr.UU.Ucc1 (3.1) 2 2rAvec: 0 ? r ? 1 Par conséquent: U c ? 1V , ce qui implique que le redresseur MLI de courant se comporte comme un élévateur de tension continu ./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 28 Electronique de Puissance Avancée 3.1.3. Qualité des courants du coté réseauLes formes d'ondes et les harmoniques des tensions vA, vB, vC sont les mêmes que ceux obtenus dans le cas de l'onduleur MLI de tension. D'après le schéma de principe indiqué auparavant et quant tenant la phase A, on peut écrire: di AL= e ? vAA (3.2) dt Donc, les harmoniques des courant du coté réseau sont directement liés à ceux es tensions vA, vB, vC. Autrement dit l'harmonique de rang n des courants a pour valeur efficace: VI=nn (3.3) .L n ?.Par conséquent, pour réduire les harmoniques des courants, il faut adopter un indice de modulation m suffisamment grand afin de repousser les premiers harmoniques des tensions ayant des valeurs notable vers des fréquences suffisamment élevée. D'autre part, il faux insérer une inductance L d'entrée d'une valeur suffisante. 3.2. Redresseur MLI de tension triphasé Un redresseur MLI de tension, est alimenté par une source triphasé de tensions sinusoïdales et débitant sur une charge se comporte comme une source de courant continue. Il a une structure et une technique de commande identique qu'un onduleur de courant. - On délivre entre les ces bornes d'entrée, des condensateurs de manière à retrouver le caractère d'une source de tension. - D'autre part, on ajoute une inductance de lissage (?ic?0). ich K1 K2 K3 vA i ' AA ii '' A AeA vB i ' BB rgeuch i '' iB haBCeB vC i ' C?? ?? ??C i '' iC CK'1 eC K'2 K'3 Figure 3.9: Onduleur triphasé de courant./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 29 Electronique de Puissance Avancée 3.2.1. Forme d'ondes On suppose que: - Le convertisseur est placé entre deux sources parfaites; - La tension Ic=Cte (?ic?0); - Les tensions à l'entrée du convertisseur vA, vB, vC sont sinusoïdales; Dans ces conditions, on utilise la technique adoptée pour l'onduleur de courant et le tableau résume de son fonctionnement afin de déduire les intervalles de fermeture des intercepteurs et pour tracer les formes d'ondes. 1 0101K1 01K2 01K3 01K'1 01K'2 01K'3 0iA ?t 00 uc ?t 0 Figure 3.10: Forme d'ondes3.2.2. Tension redresséeOn considère que les valeurs efficaces des fondamentaux des grandeurs du coté alternatif. E =+?1VjL I1''
(3.4) I=+=1' 'I1 I1 et ' 1Ij.C. 1V./2015//Par: Dr. A.H. Dendouga 30 Electronique de Puissance Avancée I ' 1I ''1 ?1E ? j.L?I ''1 I1 Figure 3.11: Diagramme vectoriel1V D'après (3.4), on a: 1I "=(I '+ jC?E)11 (3.5) 12? LC?D'après le diagramme vectoriel, on deduit: ?I "? =1cosI cos ???112?1 ? LC?
(3.6) ?I "? =1sin(C?E ? I sin ??)? 111 ? LC?2Si l'indice de modulation est suffisant grand, on peut écrire: II = r. ch1 (3.7) 2L'expression (3.6), devient: ?IchI "? =1cosr.cos ???12?1 ? LC?2 (3.8) ?IchI "? =1sin(C?E ? r.sin ?)? 1?1 ? LC?22 1Si en tenant compte la conservation de la puissance, on a: UI= 3EI "cos?ch ch1 (3.9) En tenant compte (3.9) et (3.8), donc on peut déduire: = 3EU.r.c