



Université Abderrahmane Mira – Bejaia

Faculté de Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de Fin d'étude

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique Industriel

Thème :

Étude et Implémentation virtuelle d'un
onduleur de tension polyphasé

Présenté par :

KOUIDMI Wissam

MEKHMOUKHEN Louize

Encadré par :

Mr : GHEDAMSI Kaci

Remerciement

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur monsieur GHADAMSI Kaci qui est un excellent professeur et encadreur pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et surtout car il n'a pas cessé de nous encourager et nous pousser à travailler. Merci pour vos conseils. Nous tenons aussi à remercier l'entreprise GENERAL EMBALLAGE pour leur accueil et leur suivi.

Mais aussi à monsieur AZIB Ahmed qui nous a été d'une grande aide scientifique et morale.

À monsieur Bouzelmaden Cherif ingénieur d'état en maintenance qui nous guidé tout au long de notre travail.

À monsieur Nadjim qu'on remercie pour son aide précieuse et sa patience à notre mémoire.

Dédicace

À mes très chers parents qui se sont sacrifiés depuis mon enfance pour m'offrir toute une vie, qui m'ont toujours soutenu et encouragé à aller toujours plus loin afin de réaliser mes rêves, je vous dédie ce modeste travail pour vous exprimer ma gratitude. Maman papa je vous aime

À mon grand frère Syphax qui m'as toujours épaulé.

À mon petit frère Kamel qui est toujours là pour moi.

À mon unique petite Sœur, notre petite terreur qui a un cœur en or.

À une personne très cher à mon cœur qui a su m'encourager mais surtout qui m'as beaucoup aidé dans mes recherches, Cherif

À ma très chère copine et binôme Wiwi (Wissam) qui a su absorber mon stress et me remettre les pieds sur terre.

Louize

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de mon parcours.

Que Dieu vous garde et vous bénisse, Merci d'être toujours là pour moi, je vous aime trop.

À ma petite sœur Kahina qui joue sur mes nerfs, mais je t'aime.

*À mon petit frère Alilou, à partir d'aujourd'hui je ne te quitterai plus
jamais.*

À mes chers grand-parents maternels, je vous souhaite une longue vie.

*À ma très chère binôme et copine non-non (Louïze) que j'apprécie
beaucoup.*

*À mes chères copines et sœurs : Kathia, Siham, Sabrina, Yasmina,
Fifi, wissam, Mely, Nadjet.*

À mon ami intime Lounis.

*À la mémoire de mes grand-parents paternels, mon oncle BEKKOU
Ali et tonton Hamou (MALOUM Hamou).*

*À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin, à mes communautés
fraternelles d'Akhenak, tizi-ouzou, Taghalt et le REC.*

Wissam

Sommaire

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Présentation de la SPA Général emballage

I.1 La présentation.....	3
I.2 Implantation géographique	3
I.3 Historique.....	4
I.4 Évolution des effectifs	5
I.5 Les valeurs de l'entreprise	6
I.5.1 Leadership	6
I.5.2 Proximité	6
I.5.3 Citoyenneté	6
I.5.4 Développement durable	6
I.6 Nature des produits fabriqués	7
I.7 Organisation de l'entreprise.....	7
I.7.1 La direction générale.....	7
I.7.2 La direction technique.....	7
I.7.3 La direction administration générale.....	7
I.7.4 La direction comptabilité et finance.....	7
I.8 Organisation de la direction technique	7
I.8.1 Département de production	7
I.8.2 Département d'approvisionnement	8
I.8.3 Département de maintenance	8
I.9 Choix de l'entreprise.....	8
I.10 Déroulement du stage	8
I.11 Objectifs du stage.....	8

Chapitre II : Étude et dimensionnement du convertisseur statique.

Introduction	9
II.1 Variateur de vitesse	9

II.2 Principe de fonctionnement d'un variateur de vitesse.....	9
II.2.1 Redresseur.....	10
II.2.2 Circuit intermédiaire (filtre).....	10
II.2.3 Onduleur	11
II.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	11
II.2.3.2 Domaine d'utilisation d'un onduleur.....	12
II.2.4 Module de freinage	13
II.3. Fonction des variateurs de vitesse	14
II.4 Exemples d'utilisation.....	14
II.5 Avantage d'utilisation de variateur de vitesse.....	14
II.6 Inconvénient de variateur de vitesse.....	14
II.7 Fonctionnement en multiphasé.....	15
II.8 Critère du choix d'un variateur de vitesse	16
II.9 Les caractéristiques de la charge entraînée par le variateur.....	16
II.10 Étude du variateur choisi	17
II.10.1 Généralités sur ALTIVAR31HU55N4	17
II.10.2 Les principales fonctions de l'ALTIVAR31	18
II.10.3 Le schéma d'un variateur de la vitesse ALTIVAR31.....	18
II.10.4 Le schéma de branchement ALTIVAR31	20
II.10.5 Constitution de variateur ALTIVAR31	20
II.10.6 Choix du type de loi de commande	20
II.10.7 Encombrement	23
II.10.8 Principales protections et sécurités du variateur.....	24
Conclusion.....	25

Chapitre III : Stratégies de commande des convertisseurs DC/AC

Introduction	26
III.1 Paramètres de performance	26
III.1.1 Définition de la notion harmonique.....	26
III.1.2 Expression de la grandeur déformée	26
III.1.2.1 Tensions et courants harmonique	27
III.1.3 Taux de distorsion harmonique THD (%)	27
III.1.3.1 Taux global de distorsion	27

III.1.4 Facteur de puissance.....	27
III.2 Modèle de l'onduleur triphasé.....	27
III.3. Commande 120°.....	29
III.4 Commande pleine onde 180°.....	31
III.5 Commande pleine onde d'un onduleur penta-phasé.....	33
III.6 Commande pleine onde d'un onduleur hepta-phasé.....	36
III.7 Commande MLI triangulo-sinusoïdale d'un onduleur.....	39
III.7.1 Un onduleur triphasé.....	40
III.7.2 Un onduleur penta-phasé.....	48
III.7.3 Un onduleur hepta-phasé.....	56
III.8 Le rapport entre tension composée et la tension simple.....	67
Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	71
Annexe	
Bibliographie	

Liste des figures :

Figure I.1 : Vue de la SPA Général Emballage.....	3
Figure II.1 : Schéma général d'un convertisseur statique.	9
Figure II.2 : Allure des tensions d'entrée V_1, V_2, V_3 et de sortie V_{P1}	10
Figure II.3 : Principe de fonctionnement d'un onduleur	11
Figure II.4 : Schéma d'un onduleur triphasé	12
Figure II.5 : Allure de la tension simple V_{AN}	12
Figure II.6 : Allure de la tension composée u_{AB}	12
Figure II.7 : Allure du courant I_A	12
Figure II.8 : Dissipations de l'énergie dans un variateur pendant le freinage	13
Figure II.9 : Altivar 31	18
Figure II.10 : les différents boutons de l'interface d'ALTIVAR31	19
Figure II.11 : Les composantes principales du variateur de fréquence	20
Figure II.12 : Courbe des tensions en fonction de la fréquence selon les différentes lois	21
Figure II.13 : Dimensions réelles de l'Altivar.....	23
Figure II.14 : l'encombrement de l'ancien système et du nouveau système.....	23
Figure III.1 : Onduleur triphasé.....	28
Figure III.2 : Commande décalée pour un onduleur triphasé.....	29
Figure III.3 : Forme d'onde de la tension V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasés.....	30
Figure III.4 : Forme d'onde de la tension triphasés u_{AB}	30
Figure III.5 : Spectre d'harmonique de la tension triphasés V_{AN}	30
Figure III.6 : Spectre d'harmonique du courant triphasés i_A	30
Figure III.7 : Commande pleine onde pour un onduleur triphasé	31
Figure III.8 : Forme d'onde de la tension V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasés	31
Figure III.9 : Forme d'onde de la tension triphasés u_{AB}	31
Figure III.10 : Spectre d'harmonique de la tension triphasés V_{AN}	32
Figure III.11 : Spectre d'harmonique du courant triphasés i_A	32
Figure III.12 : Commandé pleine onde d'un onduleur penta-phasé	33
Figure III.13 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) penta-phasé.....	34
Figure III.14 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB}	35
Figure III.15 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A	35
Figure III.16 : Spectre d'harmonique de la tension penta-phasé V_{AN}	35
Figure III.17 : Commandé pleine onde d'un onduleur hepta-phasé	36

Figure III.18 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) hepta-phasé.....	38
Figure III.19 : Forme d'onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB}	38
Figure III.20 : Spectre d'harmonique de la tension hepta-phasé V_{AN}	39
Figure III.21 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A	39
Figure III.22 : Onduleur triphasé commandé par la MLI sinus-triangle	40
Figure III.23 : Forme d'onde du signal de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} triphasé	40
Figure III.24 : Forme d'onde du signal triphasé de commande des IGBT	41
Figure III.25 : : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasé.	41
Figure III.26 : Forme d'onde de la tension composée triphasé u_{AB}	41
Figure III.27 : : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN}	41
Figure III.28 : Spectre harmonique du courant triphasé i_A	41
Figure III.29 : Forme d'onde du signal triphasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .	42
Figure III.30 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasé	42
Figure III.31 : Forme d'onde de la tension composée triphasé u_{AB}	42
Figure III.32 : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN}	43
Figure III.33 : Spectre harmonique du courant triphasé i_A	43
Figure III.34 : Forme d'onde du signal triphasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .	43
Figure III.35 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasés.....	44
Figure III.36 : Forme d'onde de la tension composée triphasé u_{AB}	44
Figure III.37 : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN}	44
Figure III.38 : Spectre harmonique du courant triphasé ($i_A * 10$).....	44
Figure III.39 : Forme d'onde du signal triphasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .	45
Figure III.40 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasé	45
Figure III.41 : Forme d'onde de la tension composée triphasé u_{AB}	45
Figure III.42 : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN}	45
Figure III.43 : Spectre harmonique du courant triphasé ($i_A * 10$).....	46
Figure III.44 : Courbe du taux d'harmoniques THD_{i_A} en fonction du facteur de modulation en triphasé	46
Figure III.45 : Courbe des valeurs efficaces triphasé $V_{AN(eff)}$ en fonction du facteur de r	47
Figure III.46 : Courbe des valeurs efficaces triphasé $u_{AB(eff)}$ en fonction du facteur de r.	47
Figure III.47 : Onduleur penta-phasé commandé par la MLI sinus-triangle.....	48
Figure III.48 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	48
Figure III.49 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant i_A penta-phasé.....	48

Figure III.50 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB}	49
Figure III.51 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN}	49
Figure III.52 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A	49
Figure III.53 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	50
Figure III.54 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) penta-phasé.....	50
Figure III.55 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB}	50
Figure III.56 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN}	50
Figure III.57 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A	51
Figure III.58 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	51
Figure III.59 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) penta-phasé.....	51
Figure III.60 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB}	52
Figure III.61 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN}	52
Figure III.62: Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A	52
Figure III.63 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	53
Figure III.64 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) penta-phasé.....	53
Figure III.65 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB}	53
Figure III.66 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN}	53
Figure III.67 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A	54
Figure III.68 : Courbe du taux d'harmoniques THD_{i_A} en fonction du facteur de modulation en penta-phasé.....	55
Figure III.69 : Courbe de des valeurs efficaces penta-phasé $V_{AN(eff)}$ en fonction du facteur de r.....	55
Figure III.70 : Courbe de des valeurs efficaces penta-phasé $u_{AB(eff)}$ en fonction du facteur de r.....	56
Figure III.71 : Onduleur hepta-phasé commandé par la MLI sinus-triangle.....	57
Figure III.72: Forme d'onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	57
Figure III.73 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) hepta-phasé	57
Figure III.74 : Forme d'onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB}	58
Figure III.75 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN}	58
Figure III.76 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A	58

Figure III.77 : Forme d'onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	59
Figure III.78 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) hepta-phasé	59
Figure III.79 : Forme d'onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB}	59
Figure III.80 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN}	59
Figure III.81 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A	60
Figure III.82 : Forme d'onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	60
Figure III.83 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) hepta-phasé	60
Figure III.84 : Forme d'onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB}	61
Figure III.85 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN}	61
Figure III.86 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A	61
Figure III.87 : Forme d'onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port}	62
Figure III.88 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) hepta-phasé.	62
Figure III.89 : Forme d'onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB}	62
Figure III.90 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN}	62
Figure III.91 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A	63
Figure III.92 : : Courbe du taux d'harmoniques THD_{i_A} en fonction du facteur de modulation en hepta-phasé	63
Figure III.93 : Courbe de des valeurs efficaces hepta-phasé $V_{AN(eff)}$ en fonction du facteur de r.....	64
Figure III.94 : Courbe de des valeurs efficaces hepta-phasé $u_{AB(eff)}$ en fonction du facteur de r.....	64
Figure III.95 : Courbes des tensions simples V_{AN} en fonction du facteur r.....	65
Figure III.96 : Courbes des taux de distorsion d'harmoniques en fonction du facteur de forme m.....	65
Figure III.97 : Courbes des tensions simples u_{AB} en fonction du facteur r.....	66
Figure III.98 : Représentation graphique des trois phases.	67
Figure III.99 : Représentation graphique des cinq phases	67
Figure III.100 : Représentation graphique des sept phases.....	68

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Historique de l'évolution de l'entreprise	5
Tableau I.2 : Évolution de l'effectif de chaque unité.....	6
Tableau II.1 :: Différents types d'ALTIVAR31	17
Tableau II.2 : Lois de commande	21
Tableau II.3 : Spécification de toutes les bornes de puissance et de contrôle.....	22
Tableau II.4 : Dimension de l'ALTIVAR	24
Tableau III. 1 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande 120°..	31
Tableau III.2 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande 180°....	32
Tableau III.3 : THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pleine onde d'un onduleur penta-phasé.....	35
Tableau III.4 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande pleine onde d'un onduleur hepta-phasé.	39
Tableau III.5 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	42
Tableau III.6 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	43
Tableau III.7 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	45
Tableau III.8 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	46
Tableau III.9 : Valeurs du $THD_{i_A}(\%)$ en fonction de m	46
Tableau III.10 : La tension $V_{AN(eff)}$, $u_{AB(eff)}$ (V) en fonction de r.....	47
Tableau III.11 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	49
Tableau III.12 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	51
Tableau III.13 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	52
Tableau III.14 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	54
Tableau III.15 : La valeur du $THD_{i_A}(\%)$ en fonction de m.	54

Tableau III.16 : La tension $V_{AN(\text{eff})}$ et $u_{AB(\text{eff})}$ en fonction de r	55
Tableau III.17 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	58
Tableau III.18 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	60
Tableau III.19 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	61
Tableau III.20 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.....	63
Tableau III.21 : La valeur $\text{THD}_{i_A}(\%)$ en fonction de m	63
Tableau III.22 : La tension $V_{AN(\text{eff})}$ et $u_{AB(\text{eff})}$ en fonction de r	64

Introduction générale

Le fonctionnement des moteurs électriques, dans un environnement industriel, à vitesse variable est devenu incontournable grâce aux divers avantages qu'il procure. Néanmoins, ce dernier nécessite une alimentation par un variateur de fréquence et/ou de vitesse [1].

Un variateur de vitesse est un dispositif d'électronique de puissance destiné à commander la vitesse d'un moteur électrique ; dont le rôle consiste à moduler l'énergie électrique fournie au moteur et cela se fait avec son onduleur intégré. Cet onduleur est un convertisseur statique composé de semi-conducteurs qui assure la conversion de l'énergie électrique du continu à l'alternatif mais cette conversion entraîne des perturbations.

L'effet de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les machines tournantes, et les équipements de puissance et de communication a aussi été étudié dans plusieurs ouvrages dont [2], [3]. Afin de contrer l'accroissement du problème, des organismes de normalisation, comme IEEE-519 aux États Unis [4] et IEC en Europe [5], ont proposé des limites sur les niveaux admissibles des émissions harmoniques. Ces limites servent de guide à tous les professionnels dans le domaine sans toutefois avoir force de loi dans la plupart des pays.

Le comportement non linéaire des convertisseurs statiques (dû au fonctionnement en commutation des composants de puissance) génère des harmoniques. La prolifération de ses derniers affecte grandement la qualité de l'énergie électrique et peut être néfaste sur les charges et le réseau d'alimentation. Il est donc nécessaire d'étudier et de maîtriser les harmoniques à générer dans les structures de puissance. [6]

De ce fait plusieurs stratégies de commutation ont été développées dans les laboratoires de recherche et parmi les plus pertinentes les techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ces stratégies jouent un rôle important dans la réduction des harmoniques et des pertes par commutation dans les convertisseurs, ainsi que la réduction des échauffements des machines électriques.

De nos jours, les exigences industrielles en termes de puissance (couple) et de fiabilité, les machines polyphasées commencent à prendre part dans le milieu industriel. L'alimentation de ses machines polyphasées nécessite des convertisseurs polyphasés.[7]

Notre travail consiste à l'étude, l'identification, la modélisation et la commande d'un variateur de vitesse à nombre de phases supérieur à trois.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la SPA général emballage, un leader international, dans le carton ondulé de notre chère région.

Une étude de cas, d'un variateur industriel type, à fait l'objet du second chapitre. En effet, durant notre stage, l'ALTIVAR 31 installé sur la machine VEGA plieuse-colleuse à été mis à notre disposition pour sa configuration et son identification.

Le dernier chapitre est voué aux stratégies de commutation de la partie DC/AC du variateur. Trois topologies sont étudiées) à savoir : la structure triphasée, la penta-phasées et hexa-phasées. Deux stratégies de commutation sont considérées : la pleine onde et la triangulo-sinusoidale.

Chapitre I
Présentation de la SPA
Général Emballage

I.1 La présentation

Général Emballage est leader en Algérie de l'industrie du carton ondulé.

Cette entreprise fabrique à la commande, des plaques double- face (cannelures B, C, E et F) et double-double (BC et BE), des emballages et des displays.

Elle réalise des post-impressions en haute résolution jusqu'à 6 couleurs avec vernis intégral ou sélectif.

Ses équipes maîtrisent l'ensemble des tâches de production : études, prototypage, réalisations de formes de découpe et de films d'impression, fabrication des emballages et des displays, livraison.

Entrée en exploitation en 2002, Général Emballage est une société de capitaux avec un capital social de 2.000.000.000 DZD opérant sur 3 sites industriels (Akbou, Oran et Sétif) avec un chiffre d'affaires de 6 milliards DZD. Général Emballage est une entreprise certifiée ISO 9001 :2008.

I.2 Implantation géographique

Son siège social est à la zone industriel Taharacht, Akbou, dans la wilaya de Bejaïa.

RC N° : 00 B 0183268 du 05/08/2009

NIF : 000006018326879

Article d'imposition : 06256000300

NIS : 099806250344426

La société est d'une superficie de 10 446 m², elle est composée de deux unités distantes d'environ 2 km. L'unité de production est d'une superficie de 8963m².



Figure I. 1 : Vue de la SPA Général Emballage. [8]

I.3 Historique

L'entreprise a connu une énorme évolution (capital, effectif, ...) au fil des années, le Tableau I.1 résume cette évolution.

Tableau I. 1 : Historique de l'évolution de l'entreprise.

2000	<ul style="list-style-type: none"> 1er Août Création de la SARL Général Emballage avec un capital de 32 millions de dinars dans la Zone d'activités de Taharacht (Akbou.W. de Béjaïa) (décision APSI N°13051 du 06 juin 1998).
2002	Entrée en production de l'usine d'Akbou avec un effectif de 83 employés.
2006	<ul style="list-style-type: none"> Le capital est porté à 150 millions de dinars. Effectif : 318 employés.
2007	<ul style="list-style-type: none"> Le capital est porté à 1,23 milliards de dinars. Entrée en production de l'usine de Sétif. Effectif : 425 employés. Trophée de la Production (Euro-Développement PME).
2008	<ul style="list-style-type: none"> Début d'exportation vers la Tunisie. Entrée en exploitation de l'unité d'Oran.
2009	<ul style="list-style-type: none"> 03 Juin : Augmentation du capital à 2 milliards de DA et entrée de MAGHREB PRIVATE EQUITY FUND II « CyprusII » (MPEF II) avec une participation de 40%. Général Emballage devient une société de capitaux (Société par actions). Effectif : 597 employés.
2010	<ul style="list-style-type: none"> Effectif : 630 employés.
2011	<ul style="list-style-type: none"> Effectif : 699 employés. Novembre : Cotation COFACE « @@@ ».
2012	<ul style="list-style-type: none"> Mars : Les capacités de production sont portées à 130.000 tonnes. Juin : L'usine d'Oran est transférée à la ZI Hassi-Ameur. Juin : Production des premiers ouvrages en Haute résolution. Juillet 02 : Signature d'une Convention cadre de partenariat avec l'Université de Bejaïa. Décembre 17 : Notation COFACE « @@@ ». Effectif : 830 employés.
2013	<ul style="list-style-type: none"> Effectif : 960. Janvier 23 : Certification ISO 9001 :2008. Octobre 8 : Démarrage de la 1ère promotion de Licence en Emballage & Qualité à l'Université de Bejaïa.
2014	<ul style="list-style-type: none"> Effectif : 1005.

	<ul style="list-style-type: none"> • Février 22 : Signature d'un protocole d'accord de recrutement avec l'Agence Nationale de l'Emploi (ANEM). • Octobre 30 : Début des exportations vers la Libye.
2015	<ul style="list-style-type: none"> • Effectif : 1100. • Avril : Entrée en production de la nouvelle usine de Sétif à ZI Ain Sfiha. • Juin 02 : Prix d'encouragement du Trophée Export 2014 (World Trade Center (WTCA)).
2016	<ul style="list-style-type: none"> • Février : 1ere exportation en Espagne. • Août : Sortie de Maghreb PrivateEquityFund et entrée de Development Partners International (DPI) et de la Deutsche Dation Investitions und EntwicklungsgesellschaftmbH (DEG) à hauteur de 49% du capital social. • Septembre : 1ere exportation en Mauritanie. • Effectif : 1170.
2017	<ul style="list-style-type: none"> • Effectif : 1200. • Avril 19 : Notation COFACE @@@.
2018	<ul style="list-style-type: none"> • Effectif : 1200. • Avril 09 : Certification ISO 9001 Version 2015. • Juillet 29 : Notation COFACE @@@.
2019	<ul style="list-style-type: none"> • Effectif : 1201 • Janvier 16 : Distinguée comme entreprise « inspirante » pour l'Afrique dans le Rapport « Compagnies to inspire Africa 2019 » du London Stock Exchange Group (Bourse de Londres). • Avril 21 : Première expédition sur la Belgique • Juin 13 : Prix spécial du jury du Trophée Export 2018 (World Trade Center (WTCA)) • Juin 19 : Première exportation sur la France • Juillet 25 : Notation COFACE @@@
2020	<ul style="list-style-type: none"> • Effectif : 1222. • Janvier 25 : Certifications ISO 14001 :2015 et ISO 45001 :2018. • Juillet 23 : Notation COFACE @@@.

I.4 Évolution des effectifs

L'effectif de l'entreprise est en constant changement, le Tableau I.2 nous montre l'évolution de l'effectif de chaque unité.

Tableau I. 2 : Évolution de l'effectif de chaque unité.

ANNEE	Unité AKBOU	Unité SETIF	Unité ORAN	Unité ALGER	TOTAL GE
2002	83	/	/	/	83
2003	165	/	/	/	165
2004	176	/	/	/	176
2005	185	/	/	/	185
2006	318	/	/	/	318
2007	439	/	/	/	439
2008	479	/	/	/	479
2009	489	56	40	/	585
2010	528	59	43	/	630
2011	589	54	56	/	699
2012	697	75	56	/	828
2013	812	87	61	/	960
2014	819	115	76	/	1010
2015	802	290	87	/	1179
2016	777	331	84	/	1192
2017	774	323	90	/	1187
2018	774	334	93	/	1201
2019	772	332	118	/	1222
2020	771	348	135	25	1 279

I.5 Les valeurs de l'entreprise

I.5.1 Leadership :

Ses politiques d'investissement, de recrutement et de formation reposent sur deux principes fondamentaux : satisfaire la demande et anticiper sur les besoins futurs du marché. Il en découle une mise à niveau continue des compétences humaines et des processus technologiques.

I.5.2 Proximité :

Elle entretient le rapprochement avec ses clients pour une meilleure compréhension de leurs besoins et pour réduire les coûts et les délais d'acheminement de ses produits et garantir le meilleur rapport qualité/prix.

I.5.3 Citoyenneté :

Général Emballage est une entreprise citoyenne qui inscrit son intérêt dans celui de la société et de l'humanité en général.

I.5.4 Développement durable

Général Emballage s'engage à :

- Recycler l'ensemble de ses déchets de production et de ses rejets industriels.

- À ne se fournir qu'auprès d'industries respectant les principes du développement durable et à apporter sa contribution aux efforts visant la préservation de l'environnement et notamment aux actions de reforestation.

I.6 Nature des produits fabriqués

Parmi les produits fabriqués, on trouve :

- Plaque du carton ondulé.
- Caisse à fond automatique.
- Caisse télescopique.
- Barquettes à découpe spéciale.

I.7 Organisation de l'entreprise

I.7.1 La direction générale

- Service ordonnancement.
- Service réalisation.
- Service utilité

I.7.2 La direction technique

- Le département maintenance.
- Le département production.
- Le département d'approvisionnement.

I.7.3 La direction administration générale

- Service ressource humaine.
- Service moyen général.
- Service informatique.

I.7.4 La direction comptabilité et finance

- Service des finances.
- Service comptabilité général.

I.8 Organisation de la direction technique

Elle est structurée comme suit :

I.8.1 Département de production

- Ligne onduleuse.
- Ligne transformation.
- Département de colle.

I.8.2 Département d'approvisionnement

- Achat.
- Gestion des stocks.

I.8.3 Département de maintenance

- Service ordonnancement : Établir les plannings d'intervention, répartir le personnel en fonction des travaux et du délai, calcul du temps d'intervention, suis l'avancement des travaux.
- Service réalisation des travaux : L'installation des machines et du matériels et forme le personnel sur l'utilisation de l'équipement, la remise en marche après chaque intervention, établir un diagnostic de défaillance.
- Service utilité : il s'occupe de la gestion des énergies telle que : L'électricité, le gaz, la vapeur, l'air comprimé, fuel.

I.9 Choix de l'entreprise

- On a choisi la Spa General Emballage car c'est le leader numéro 1 en Algérie de l'industrie du carton, mais aussi car c'est une entreprise qui ouvre ses portes aux jeunes étudiants et qui avec leurs équipes professionnels les aides à atteindre leurs objectifs académiques.

I.10 Déroulement du stage

- Notre séjour était fructueux, on a pu visiter les deux unités d'Akbou et voir leurs équipements électriques mais aussi nous familiariser avec leurs équipes de la maintenance qui nous ont montrés mais aussi appris énormément sur les variateurs industriels.

I.11 Objectifs du stage

- Acquérir une expérience professionnelle.
- Enrichir nos connaissances sur les variateurs industriels.
- Nous familiariser avec l'environnement professionnel.
- Mettre en avant nos connaissances sur le terrain.

Chapitre II
Étude et dimensionnement du
convertisseur statique

Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier les différentes parties d'un variateur de vitesse, en commençant par le redresseur, le circuit intermédiaire et en fin l'onduleur.

II.1 Variateur de vitesse

Un convertisseur de fréquence assure la commande de vitesse des différents types de moteurs triphasés.

Le variateur de vitesse est un convertisseur statique de fréquence qui convertit une tension alternative de valeur efficace ainsi que la fréquence constante du réseau d'alimentation en une tension alternative de valeur efficace et de fréquence réglables (figure II.1).

II.2 Principe de fonctionnement d'un variateur de vitesse

Dans le 1^{er} étage il redresse la tension de la source en une tension continue (Redresseur) (Figure II.1). A partir de cette tension il génère un nouveau réseau triphasé de tension et de fréquence variable (onduleur) la tension de sortie V_{P1} (Figure II.2) qui alimente directement le moteur triphasé. Au cours de cette action le convertisseur ne prélève presque pas de puissance réactive. La puissance réactive nécessaire au fonctionnement du moteur est fournie par le circuit intermédiaire (les condensateurs) à tension continue, il est donc inutile de faire appel à des dispositifs de compensation du facteur de puissance côté réseau. [8].

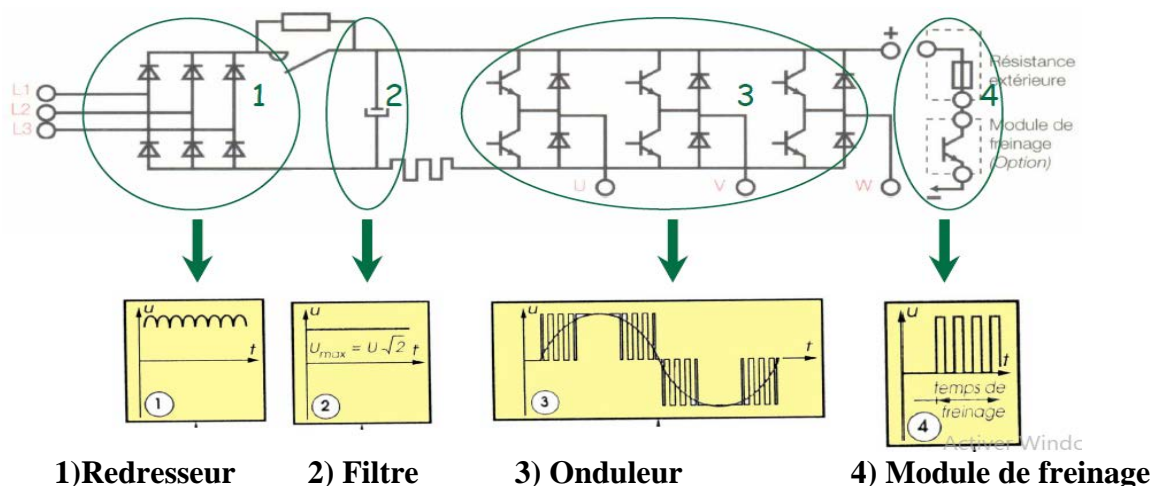


Figure II. 1 : Schéma général d'un convertisseur statique. [9]

En effet le variateur de vitesse comporte :

- Un redresseur à diodes.
- Circuit intermédiaire.
- Un onduleur à 6 transistors IGBT et 6 diodes en antiparallèle.

- Un circuit de commande des transistors IGBT.
- Des capteurs pour la mesure du courant du moteur, la tension continue aux bornes du redresseur ainsi qu'aux bornes du condensateur.

II.2.1 Redresseur

On utilise un redresseur à 6 diodes pour transformer et lisser la tension alternative en tension pseudo-continue. En effet la tension continue obtenue n'est pas parfaite elle comporte des ondulations résiduelles (des harmoniques).

Dans l'industrie on utilise généralement un redresseur en pont de Grätz triphasé.

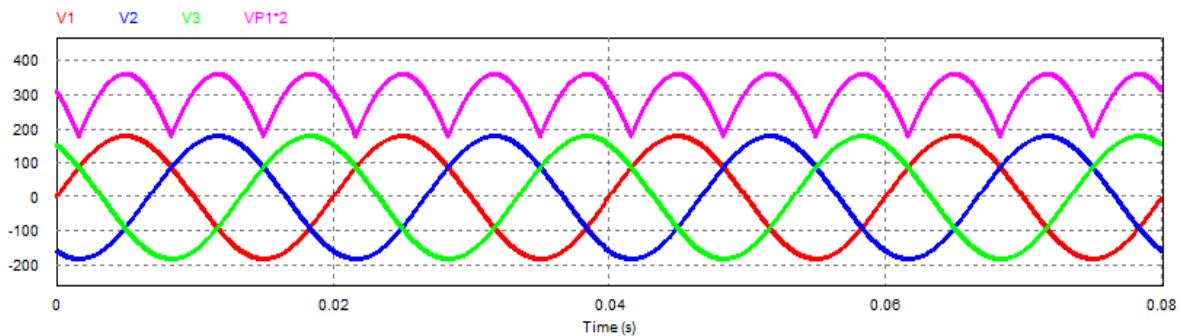


Figure II. 2 : Allure des tensions d'entrée V_1 , V_2 , V_3 et de sortie V_{P1} .

II.2.2 Circuit intermédiaire (filtre)

Le circuit intermédiaire joue le rôle d'un circuit de transition entre le redresseur et l'onduleur, sa fonction est essentiellement de lisser les caractéristiques électriques à la sortie du redresseur. Pour sa conception, trois principes différents sont possibles en fonction du redresseur et de l'onduleur utilisé [10] :

- Circuit intermédiaire à courant continu variable : Il est utilisé uniquement avec le redresseur commandé, constitué d'une bobine qui transforme la tension variable en courant continu variable.
- Circuit intermédiaire à tension variable : Il est utilisé avec les deux types de redresseurs, constitué d'une bobine et un condensateur. Dans un redresseur commandé, la tension constante à une fréquence donnée, alimente l'onduleur en tension continue pure d'amplitude variable.
- Circuit intermédiaire à tension variable : C'est le même circuit décrit précédemment, mais avec un hacheur avant le filtre, le hacheur comprend un transistor ouvrant et fermant en alternance le passage de la tension redressée. La tension continue devient ainsi variable et peut être exprimée comme suit .

$$U_v = U \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Avec :

t_{on} : temps de conduction du transistor en S.

t_{off} : temps de fermeture du transistor en S.

U : tension sortie du redresseur en V.

U_v : tension variable à la sortie du filtre en V.

II.2.3 Onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative (Figure II.3) constituée de cellules de commutation à transistors IGBT ou à thyristors GTO pour les grandes puissances, il permet d'imposer à la machine une tension à amplitude et fréquence variables à partir de la tension continue filtrée. [11]

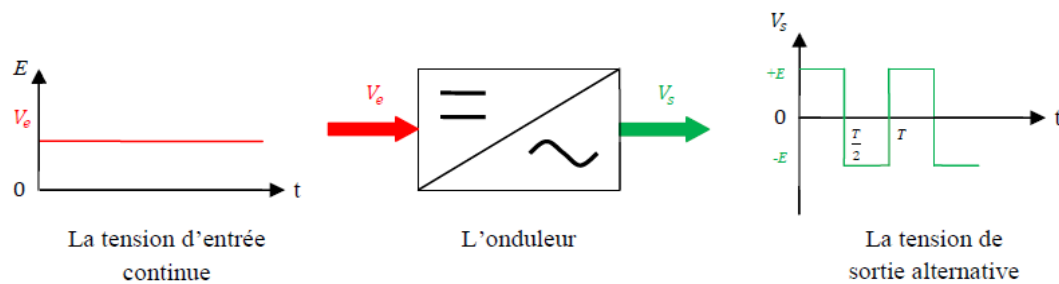


Figure II. 3 : Principe de fonctionnement d'un onduleur [10]

II.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Les onduleurs sont des structures en pont constituées, le plus souvent, d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, des transistors de puissance ou thyristors (Figure II.4). Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [11].

L'onduleur génère une tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre les figures II.5 et II.6:

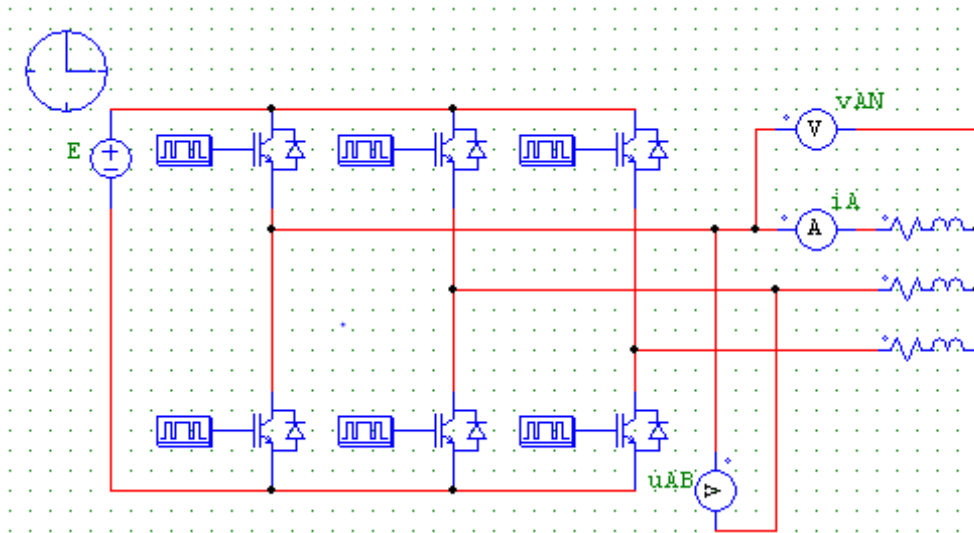


Figure II. 4 : Schéma d'un onduleur triphasé.

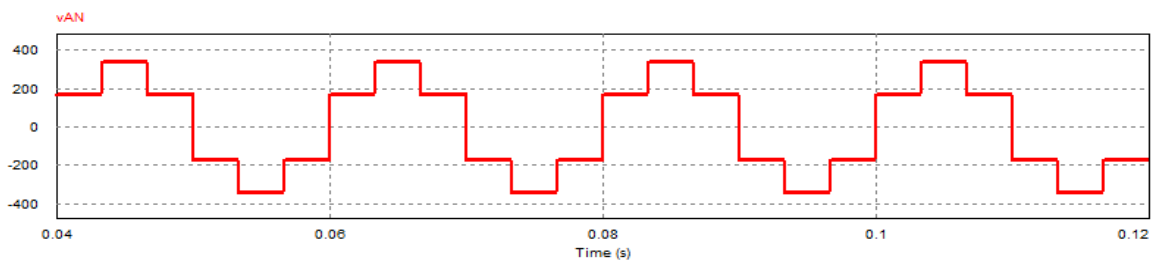


Figure II. 5 : Allure de la tension simple V_{AN} .

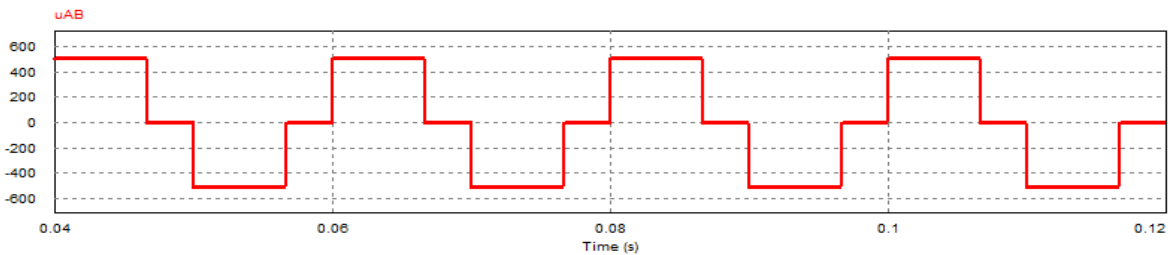


Figure II. 6 : Allure de la tension composée u_{AB} .

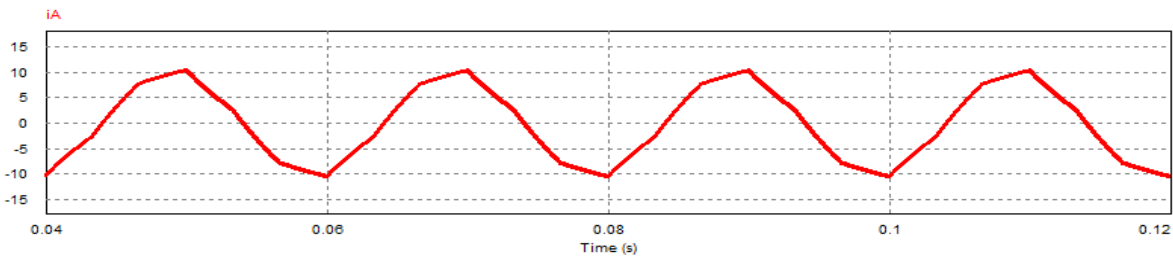


Figure II. 7 : Allure du courant I_A .

II.2.3.2 Domaine d'utilisation d'un onduleur

Les onduleurs sont utilisés en électrotechnique, pour : [11] [12]

- Fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitude variables : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse constante ;

- Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes : En particulier, les alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple : l'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau ;

La plupart des applications des onduleurs triphasés de tension à MLI, se résument aux commandes des moteurs alternatifs, filtres actifs et les systèmes d'Alimentations Sans Interruption (ASI) utilisés, par exemple, pour réaliser des alimentations de sécurité.

Un onduleur dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer en respectant la règle de connexion des sources :

- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continu ;
- Les onduleurs de tension alimentés par une source de tension continue et alimentant un récepteur de courant alternatif (exemple machine asynchrone).

II.2.4 Module de freinage :

Sa fonction est de limiter la tension aux bornes du condensateur lors d'une phase restitution de l'énergie (freinage). (Figure II.8)

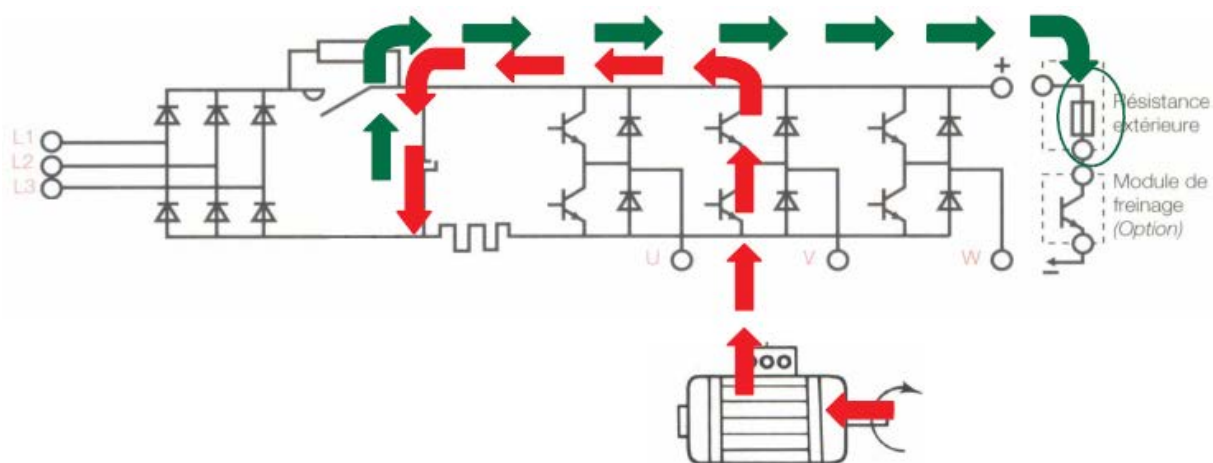


Figure II. 8 : Dissipations de l'énergie dans un variateur pendant le freinage. [9]

Pendant la phase de freinage, le moteur restitue l'énergie non consommée au condensateur de filtrage qui l'emmagasine.

Le condensateur se décharge, il fournit de l'énergie au module de freinage. Cette énergie est consommée par la résistance extérieure qui d'un modèle sous boîtier IP 20 conçue pour être conforme à la norme CEM et protégée par un thermo-contact ou par un relais thermique.

Ce modèle permet d'avoir un couple maximal de freinage transitoire.

II.3. Fonction des variateurs de vitesse

- L'accélération contrôlée.

- La décélération contrôlée.
- La variation et la régulation de vitesse.
- L'inversion du sens de marche.
- Le freinage d'arrêt.

II.4 Exemples d'utilisation

- Réglage du débit d'une pompe ou d'un ventilateur.
- Réglage de la vitesse de défilement d'une chaîne de fabrication.
- Réglage de la vitesse de défilement d'un train de papeterie ou d'aciérie.
- Réglage de la vitesse de coupe ou d'avance des machines-outils.
- Réglage de la vitesse des systèmes de transport des personnes (train, téléphérique, ...).

II.5 Avantage d'utilisation de variateur de vitesse

- Économie d'énergie : -Pompage : jusqu'à 50 % d'économie.
-Ventilation : jusqu'à 70 % d'économie
- Entraînement : récupération d'énergie électrique au freinage.
- Amélioration du facteur de puissance.
- Démarrage progressif des moteurs réduisant les chutes de tension dans le réseau et limitant les courants de démarrage.
- Prolongement de la durée de service du matériel entraîné.
- Diminution de pénalités (factures électricité) et possibilités de commande à distance.
- Précision accrue de la régulation de vitesse.
- Confort d'utilisation : Réduction de la maintenance, fonctionnement souple réduction cycles marche/arrêt, moindre sollicitation des transformateurs, Grande souplesse de pilotage, diminution des nuisances sonores, surveillance de processus pilotée courant - couple – fréquence.

II.6 Inconvénient de variateur de vitesse

- Une chute et une perturbation de la tension engendrée par les dispositifs de communication (diode, thyristor ...).
- Interférence de fréquence.
- Génération d'harmonique.

II.7 Fonctionnement en multiphasé

Les machines polyphasées peuvent être décomposées en plusieurs machines monophasées équivalentes ou bien en machines déphasées, elles sont utilisées dans les domaines de grandes puissances tels que l'avionique, le marine et l'automobile. Ce type de machine nous permet :

- La répartition de la puissance totale sur un nombre plus élevé de bras permet d'obtenir des fréquences de commutation plus élevées par conséquent des ondulations de courant et de couple atténués.
- Une Redondance parallèle de la structure qui permet d'accroître sa sûreté de Fonctionnement. [6]
- Segmentation de la puissance (diminution du stress des composants de puissance). [6]
- Grande qualité de couple électromagnétique (réduction des vibrations). [6]

Il est souvent nécessaire de segmenter la puissance, pour cela, on peut agir au niveau du convertisseur, grâce à des techniques multiniveaux ou à la mise en parallèle des convertisseurs [13]. Une autre solution consiste à appliquer la segmentation au niveau de l'ensemble convertisseur-machine, en utilisant des machines multiphasées (machine dont le nombre de phases est supérieur à trois) [14], [15]. [16], [17], le choix d'un nombre de phases impair contribue à limiter les harmoniques d'espace, diminuant par la même l'amplitude des ondulations de couple électromagnétique [18].

II.8 Critère du choix d'un variateur de vitesse

Les critères du choix du variateur de vitesse à installer pour les moteurs asynchrones sont nombreux : [19]

- ✚ La tension du réseau d'alimentation.
- ✚ La puissance et la vitesse nominale.
- ✚ Le régime d'utilisation (régime permanent ou intermittent).
- ✚ La plage de variation de la vitesse.
- ✚ Type de variation de la vitesse (progressive ou échelonnée).
- ✚ Le type du couple résistant de la charge entraînée.
- ✚ La précision de contrôle de couple et de la vitesse.
- ✚ Les contraintes d'installation (place disponible, degrés de protection).
- ✚ Le coût total d'investissement (le coût du variateur et son installation).

II.9 Les caractéristiques de la charge entraînée par le variateur [20]

Notre étude se base sur le dimensionnement d'un variateur qui entraîne un moteur asynchrone **LS 132 M** de 5,5 KW

Le moteur LS 132 M a les caractéristiques suivantes :

Puissance nominale	$P_n=5.5 \text{ KW}$
Vitesse nominale	$N_n=970 \text{ tr.m}^{-1}$
Couple nominal	$C_n=54.2 \text{ N.m}$
Courant nominal à 400V	$I_n=12.9\text{A}$
Courant à vide	$I_0=7.5\text{A}$
Facteur de puissance	$\cos \varphi =0.75$
Rendement	$\eta=82\%$
Courant de démarrage	$I_d=6.9 I_n$
Couple de démarrage	$C_d=3.1C_n$
Couple maximal (décrochage)	$C_{\max}=C_{\text{d}\acute{e}\text{c}\text{r}}=3C_n$
Moment d'inertie	$J_m=0.0595 \text{ kg.m}^2$
Masse	$M_m=59.4 \text{ kg}$
Nombre de pôles	$2p=6 \text{ pôles}$
Couples d'accrochage	$C_{\text{acro}}=2.14 C_n$
Couple de freinage	$C_{f.\text{mot}}=80 \text{ N.m}$
Courbe de couple	N°6
Degré de protection	IP55

Caractéristiques calculées du moteur :

Glissement	$g=3\%$
Fréquence rotorique	$f_r=1.5$ Hz
$C_d=168.02$ N.m,	$C_r=52.91$ N.m
Couple d'accélération du moteur	$C_{acc.mot}=77$ N.m
Couple d'accélération de la charge	$C_{acc.ch}=52.94$ N.m
Puissance équivalente exigé par la charge	$P_{\acute{e}q.exti}=5.17$ kW

II.10 Étude du variateur choisi

Le dimensionnement du variateur se fera avec les caractéristiques précédentes du moteur.

D'où les paramètres exigés pour choisir un ALTIVAR31 dans notre étude sont la puissance nominale (5.5kW), le réseau triphasé, la tension d'alimentation (400V), la fréquence d'alimentation (50Hz).

Tableau II. 1 : Différents types d'ALTIVAR31. [21]

Moteur		Réseau (entrée)					Variateur (sortie)		Référence
		Courant de ligne max. (2)		Puissance apparente	Courant d'appel max. (3)	Puissance dissipée à courant nominal	Courant nominal (1)	Courant transitoire max. (1) (4)	
kW	CV	à 380 V	à 500 V						kVA
0.37	0.5	2.2	1.7	1.5	10	32	1.5	2.3	ATV312H037N4(5)
0.55	0.75	2.8	2.2	1.8	10	37	1.9	2.9	ATV312H055N4(5)
0.75	1	3.6	2.7	2.4	10	41	2.3	3.5	ATV312H075N4(5)
1.1	1.5	4.9	3.7	3.2	10	48	3.0	4.5	ATV312HU11N4(5)
1.5	2	6.4	4.8	4.2	10	61	4.1	6.2	ATV312HU15N4(5)
2.2	3	8.9	6.7	5.9	10	79	5.5	8.3	ATV312HU22N4(5)
3	3	10.9	8.3	7.1	10	125	7.1	10.7	ATV312HU30N4(5)
4	5	13.9	10.6	9.2	10	150	9.5	14.3	ATV312HU40N4(5)
5.5	7.5	21.9	16.5	15.0	30	232	14.3	21.5	ATV312HU55N4(5)
7.5	10	27.7	21.0	18.0	30	269	17.0	25.5	ATV312HU75N4(5)
11	15	37.2	28.4	25.0	97	397	27.7	41.6	ATV312HD11N4(5)
15	20	48.2	36.8	32.0	97	492	33.0	49.5	ATV312HD15N4(5)

II.10.1 Généralités sur ALTIVAR31HU55N4

Le variateur ATV31HU55N4 est un convertisseur de fréquence pour moteur asynchrone triphasé à cage, ce variateur est proposé pour la puissance moteur de 5, 5 kW. Il est robuste, peu encombrant, facile à mettre en œuvre. Il est conforme aux normes CEI, ses domaines d'utilisation sont : [21]

- Manutention (petits convoyeurs, palans...).
- Machines d'emballage.

- Machines spécialisées (mélangeur, malaxeur, machine textile...).
- Pompe, compresseur, ventilateur.

II.10.2 Les principales fonctions de l'ALTIVAR31

Le variateur ATV31HU55N4 dispose de six entrées logiques, de trois entrées analogiques, d'une sortie logique/analogique et de deux sorties à relais.

Les principales fonctions intégrées sont les suivantes : [21]

- Protections moteur et variateur.
- Rampes d'accélération et de décélération, linéaires, en S, en U et personnalisées.
- Plus vite/moins vite.
- 16 vitesses présélectionnées.
- Consignes et régulateur PI.
- Commande 2 fils/3 fils.
- Logique de frein.
- Configuration des défauts et des types d'arrêts.
- Sauvegarde de la configuration dans le variateur.
- Rattrapage automatique avec recherche de vitesse et redémarrage automatique.

II.10.3 Le schéma d'un variateur de la vitesse ALTIVAR31



Figure II. 9 : Altivar 31.



Figure II. 10 : les différents boutons de l'interface d'ALTIVAR31. [22]

L'ALTIVAR31 possède les composantes suivantes : [21]

- 1 → L'affichage est fait sous forme de codes ou de valeurs par l'intermédiaire de 4 afficheurs "7 segments".
- 2 → Touches de défilement dans les menus ou de modification des valeurs.
- 3 → "ENT" : Touche de validation pour entrer dans un menu ou valider la nouvelle valeur choisie.
- 4 → "ESC" : Touche de sortie des menus (pas d'action de validation).
- 5 → Deux DEL de diagnostic pour le bus CANopen.
- 6 → Potentiomètre de consigne vitesse.
- 7 → "RUN" : Commande locale de marche du moteur.
- 8 → "STOP/RESET" : Commande locale d'arrêt du moteur ainsi que la remise à zéro des défauts.

II.10.4 Le schéma de branchement ALTIVAR31

Le variateur de vitesse est branché en amont de système de protection et on aval du moteur, [21]

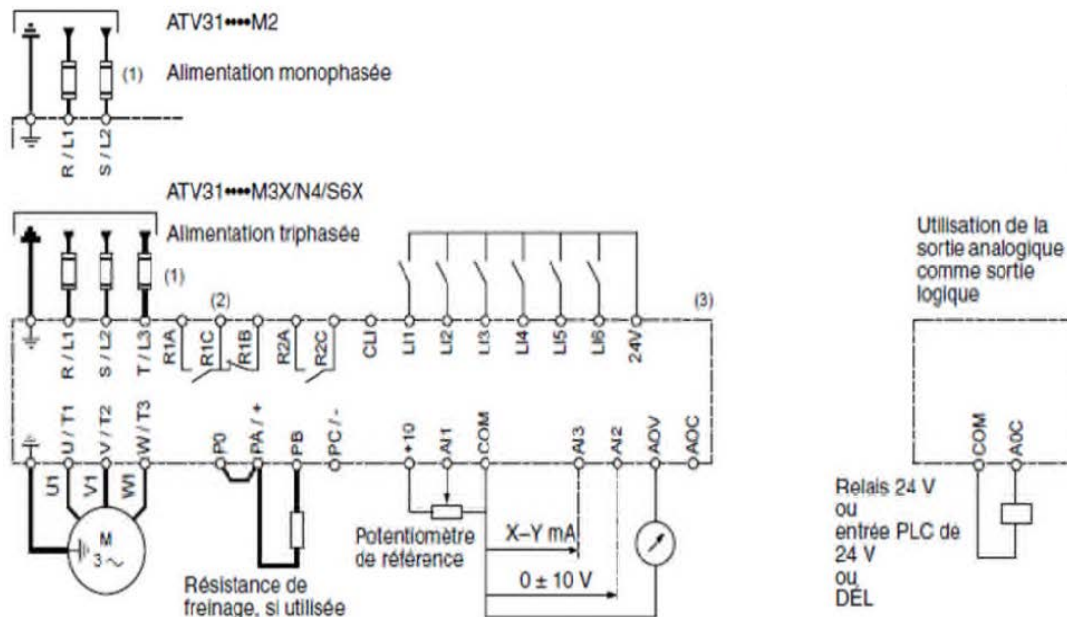


Figure II. 11 : Les composants principaux du variateur de fréquence. [21]

- (1) Se reporter à la plaque signalétique du variateur de vitesse pour connaître les fusibles recommandés. Des fusibles à action rapide ou à retard de classe J peuvent être utilisés.
- (2) Contacts du relais de défaut pour signaler à distance l'état du variateur de vitesse.
- (3) Interne +24 V. En cas d'utilisation d'une source externe (30 V, max.), relier le 0 V de la source à la borne COM, et ne pas utiliser la borne +24 V du variateur.

II.10.5 Constitution de variateur ALTIVAR31

ALTIVAR31 est constitué de deux parties, l'une de puissance et l'autre de commande ; [21]

- La partie de puissance se compose de redresseur et un circuit intermédiaire et un onduleur (cité déjà auparavant).
- Les parties de commande actuelle se composent de microprocesseur qui permet une augmentation importante de la vitesse de fonctionnement, l'incorporation de nombreuses fonctionnalités utilisées pour les applications ainsi qu'une optimisation de l'alimentation du moteur pour chaque état de son fonctionnement.

II.10.6 Choix du type de loi de commande

Le tableau II.2 ci-dessous résume la différence entre les trois types de contrôle et indique les applications les plus courantes accessibles par chaque type de contrôle.

Tableau II. 2 : Lois de commande. [21]

Loi de commande	Gammes de Vitesse %	Précision de Vitesse	Couple à l'arrêt	Applications
Convertisseur de fréquence	10 à 100 10 à 200	$\pm 1 \%$	Non	-Ventilateur -Compresseur -convoyeur -Transporteur à bande
Contrôle vectoriel de flux sans capteur	1 à 100	$\pm 1 \%$	Non	-Pompe doseuse /levage / Manutention -Machine d'emballage et de conditionnement
Contrôle vectoriel de flux avec capteur	1 à 100	$\pm 1 \%$	Oui	-Levage lourd -aménagement de presse

L'ALTIVAR31 contient trois types de commande, et qui sont programmables à partir de la console de contrôle et elles sont schématisées dans la figure II.13 : [21]

Le choix de type de commande permet l'adaptation de la loi tension/fréquence à l'application de façon à optimiser les performances, pour les applications suivantes :

- ❖ Application à couple constant (machines moyennement chargées à basse vitesse) avec moteurs en parallèle ou moteurs spéciaux : loi L
- ❖ Application à couple variable (pompes, ventilateurs) : loi P
- ❖ Machines fortement chargées à basse vitesse, machines à cycles rapides, avec contrôle vectoriel de flux (sans capteur) : loi n

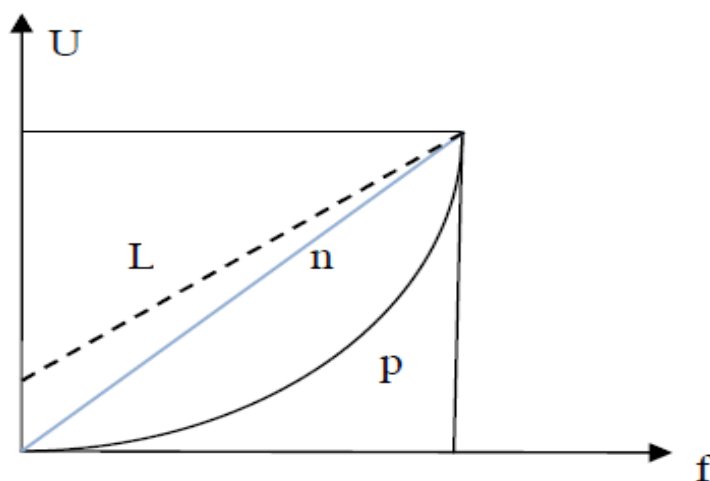


Figure II. 12 : Courbe des tensions en fonction de la fréquence selon les différentes lois. [21]

Les caractéristiques des bornes de contrôle et de puissance sont citées dans le tableau II.3 :

Tableau II. 3 : Spécification de toutes les bornes de puissance et de contrôle. [21]

Borne	Fonction
Masse	Borne de mise à la terre
R/L1, S/L2, T/L3	Alimentation
PO	Bus courant continu, polarité +
PA/+	Sortie vers résistance de freinage (polarité +)
PB	Sortie vers résistance de freinage
PC/-	Bus courant continu, polarité -
U/T1 V/T2 W/T3	Sorties vers le moteur
R1A R1B R1C	R1A est un contact N.O. R1B est un contact N.F. R1C est le commun. R1 est un relais programmable, réglé à l'usine comme relais de défaut. En tant que relais de défaut, R1A est fermé et R1B est ouvert quand le variateur est alimenté
R2A R2C	Contact N.O. du relais programmable R2
COM	Commun E/S analogique
AI1	Entrée analogique de tension
10V	Alimentation pour potentiomètre de consigne 1 à 10 K Ω
AI2	Entrée analogique de tension
AI3	Entrée analogique de courant
COM	Commun E/S analogique
24 V	Alimentation des entrées logiques
LI1, LI2, LI3, LI4, LI5, LI6	Entrées logiques

II.10.7 Encombrement

Encombrements et masses : les dimensions d'encombrement sont illustrées sur la figure II.14 et dans le tableau II.4.

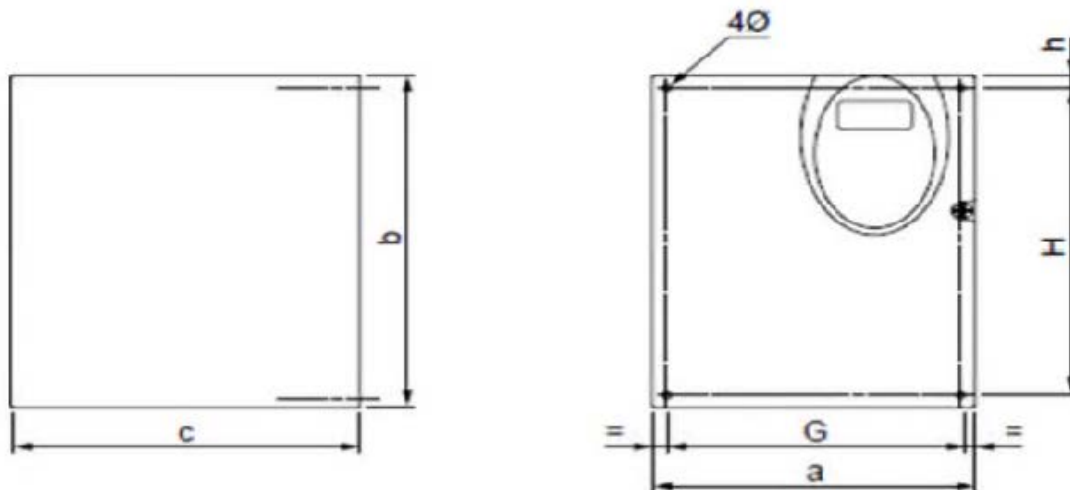


Figure II. 13 : Dimensions réelles de l' Altivar .[21]

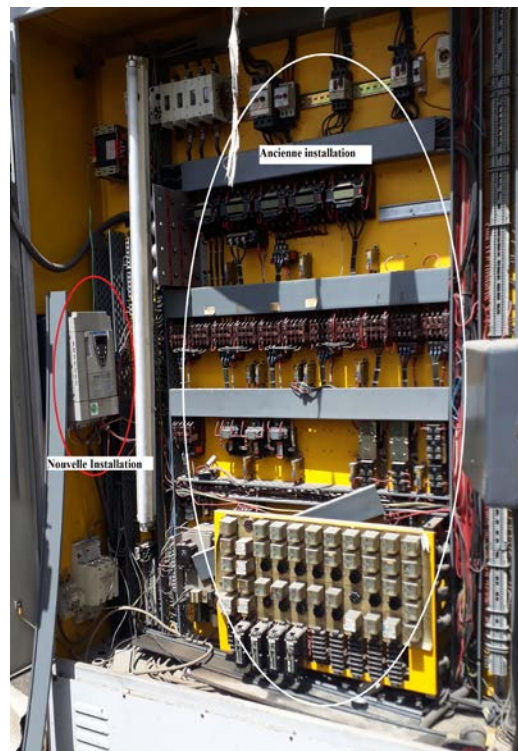


Figure II. 14 : l'encombrement de l'ancien système et du nouveau système.

Tableau II. 4 : Dimension de l'ALTIVAR.

ATV31..... ^[1]	Taille de châssis	a mm (po)	b mm (po)	c ^[2] mm (po)	G ^[3] mm (po)	h mm (po)	H ^[3] mm (po)	Ø mm (po)	Poids kg (lb)
HU22M2, HU30M3X, HU40M3X, HU22N4, HU30N4, HU40N4, HU22S6X, HU40S6X	7	140 (5,51)	184 (7,24)	150 (5,91)	126 (4,96)	6,5 (0,26)	157 (6,18)	4 x 5 (0,20)	2,35 (5,19)
HU55M3X, HU75M3X, HU55N4, HU75N4, HU55S6X, HU75S6X	8	180 (7,09)	232 (9,13)	170 (6,69)	160 (6,30)	5 (0,20)	210 (8,27)	4 x 5 (0,20)	4,70 (10,39)
HD11M3X, HD15M3X, HD11N4, HD15N4, HD11S6X, HD15S6X	9	245 (9,65)	330 (13,0)	190 (7,48)	225 (8,86)	7 (1,93)	295 (11,61)	4 x 6 (0,24)	9,0 (19,89)

II.10.8 Principales protections et sécurités du variateur

L'ALTIVAR31 est équipé de plusieurs dispositifs qui assurent sa protection et même celle du moteur asynchrone. Ces protections sont les suivantes : [21]

- Protection thermique contre les échauffements excessifs (par sonde CTP fixée sur le radiateur).
- Protection contre les courts-circuits entre les phases du moteur.
- Protection contre les coupures de phases d'entrée.
- Protection contre les coupures de phases du moteur.
- Protection contre les surintensités entre les phases de sortie et la terre.
- Sécurités de surtension et de sous-tension du réseau.
- Sécurité d'absence de phase réseau, en triphasé.
- Mise à la terre.

Les principaux éléments de protection sont :

- Sectionneur porte fusible.
- Contacteur.
- Relais.
- Fusible.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons en premier lieu donné les notions et les définitions d'un variateur et ses composants. Ensuite, on a étudié le dimensionnement du variateur qui entraîne un moteur asynchrone, ses critères de choix et son principe de fonctionnement.

De nos jours, l'utilisation des variateurs de vitesse s'accroît dans l'industrie et leur développement assure le bon fonctionnement de l'installation. D'autre part leur utilisation fait appel à protéger les installations existantes contre les perturbations électriques.

Les moyens pour assurer l'immunité sont plus accessibles et plus performants. Lors de l'acquisition de nouveaux variateurs de vitesse, il est fortement recommandé de les immuniser suffisamment pour maintenir le bon fonctionnement des équipements en cas de perturbations électriques.

Chapitre III
Stratégies de commande des
convertisseurs DC/AC

Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire l'étude de différentes commandes et structures d'un onduleur triphasé, penta-phasé et hepta-phasé pour principalement pouvoir faire la régulation de la fréquence et de l'amplitude de la tension ou du courant généré par un convertisseur statique mais aussi pour améliorer la qualité de ces grandeurs en réduisant au maximum le taux d'harmoniques.

Nous allons utiliser le logiciel PSIM pour étudier les différents résultats de la commande MLI naturelle, MLI décalée 120° ainsi que la triangulo-sinusoïdale pour différentes valeurs de V_m cela pour les types d'onduleurs cité au début.

III.1 Paramètres de performance

III.1.1 Définition de la notion harmonique

C'est une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamentale [23].

Lorsqu'elles sont combinées à la tension ou au courant fondamental sinusoïdal, les harmoniques provoquent la distorsion de la forme d'onde de la tension ou du courant (figure III.1).

Les harmoniques sont généralement nommées H_k , où k est le rang de l'harmonique [24].

- I_{HK} ou U_{HK} indique le type d'harmonique (tension ou courant).
- I_{H1} ou U_{H1} désigne la tension ou le courant sinusoïdal à 50 ou 60 Hz lorsqu'il n'y a pas d'harmoniques (tension ou courant fondamental). C'est donc le 1^{er} harmonique.

III.1.2 Expression de la grandeur déformée

La décomposition en série de Fourier d'un signal périodique de fréquence f est la somme de :

- La composante continue qui est le terme constant.
- L'harmonique de rang 1 appelé fondamental qui est le terme sinusoïdal de fréquence f .
- La somme des harmoniques de rang n qui sont les termes sinusoïdaux de fréquences $n \times f$ multiples du fondamental.

$$\begin{cases} i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n>2} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \\ v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n>2} V_n \sin(n\omega t + \theta_n) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

III.1.2.1 Tensions et courants harmonique

$$\text{Par définition : } \begin{cases} I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^T i(t)^2 dt} \\ V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^T v(t)^2 dt} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{On montre que : } \begin{cases} I_{\text{eff}} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \sum_{n>2} I_n^2} \\ V_{\text{eff}} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + \sum_{n>2} V_n^2} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec : I_{eff} : le courant efficace en A.

V_{eff} : la tension efficace en V.

III.1.3 Taux de distorsion harmonique THD (%)

III.1.3.1 Taux global de distorsion

La notion la plus couramment usitée est le taux global de distorsion harmonique THD (Total Harmonic Distorsion) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique [25]. C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul (norme IEC 61000-2-2) :

$$\text{THD}_Y = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} (\%) \quad (\text{III.4})$$

III.1.4 Facteur de puissance

En la présence d'harmoniques dans un signal sinusoïdal son facteur de puissance ne répond plus à la formule puissance active (P) sur puissance réactive (Q) car il y a une puissance supplémentaire qui apparait, la puissance déformante (D).

$$D = 3V \sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2} = 3V \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2} \quad (\text{III.5})$$

Avec I_c la valeur efficace du courant de la charge

Ce qui nous amène à la nouvelle formule du facteur de puissance :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{III.6})$$

Vu que les appareils électrique et électronique sont soumis à ces perturbations (harmoniques) qui diminuent leurs capacités, nous allons dans ce qui suit faire une étude sur les différentes techniques de commandes pour ainsi les éliminer.

III.2 Modèle de l'onduleur triphasé

Les paires d'interrupteurs (K_{11} et K_{12}), (K_{21} et K_{22}) et (K_{31} et K_{32}) sont commandés avec une manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source et pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge.

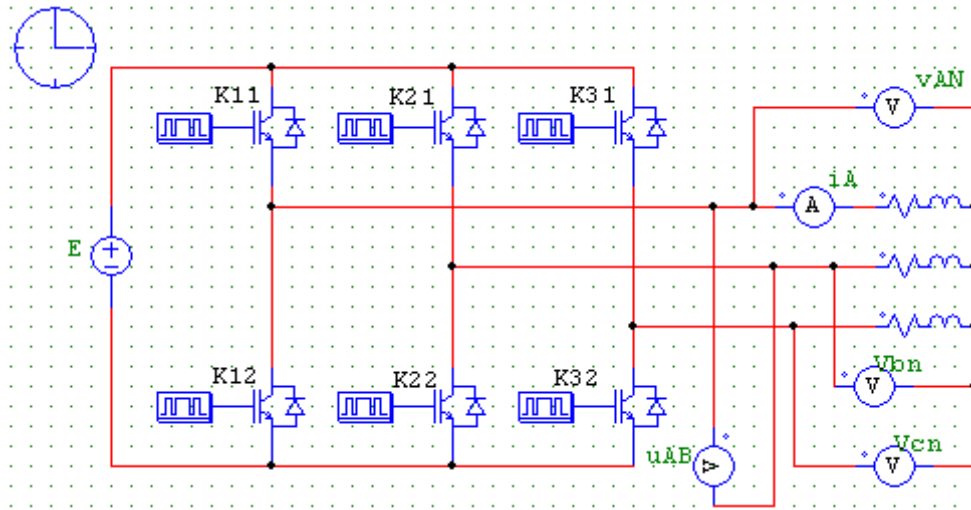


Figure III. 1 : Onduleur triphasé .

D’après la figure III.1, avec les conditions et la fonction de connexion ci-dessous on peut simplifier l’étude.

$$\text{Conditions : } \begin{cases} K_{11} + K_{12} = 1 \\ K_{11} = \overline{K_{12}} \end{cases}$$

$$\text{Fonction de connexion } K_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{AM} = \frac{E}{2}(K_{11} - K_{12}) \\ V_{BM} = \frac{E}{2}(K_{21} - K_{22}) \\ V_{CM} = \frac{E}{2}(K_{31} - K_{32}) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

M est un point milieu. C’est la référence des tensions d’entrée V_{AM} , V_{BM} , V_{CM}

N est le neutre.

On écrit les relations de Charles comme suit :

$$\begin{cases} V_{MN} + V_{AM} = V_{AN} \\ V_{MN} + V_{BM} = V_{BN} \\ V_{MN} + V_{CM} = V_{CN} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Le système est équilibré d’où } V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (\text{III.9})$$

De la somme des équations de (III.8) on aboutit :

$$3V_{MN} + V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = 0 \quad (\text{III.10})$$

$$V_{MN} = -\frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (\text{III.11})$$

(III.8) dans (III.11) on obtient :

$$V_{AN} - V_{AM} = -\frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (\text{III.12})$$

$$V_{AN} = V_{AM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (\text{III.13})$$

$$V_{AN} = \frac{2}{3}V_{AM} - \frac{1}{3}V_{BM} - \frac{1}{3}V_{CM} \tag{III.14}$$

On remplace (III.7) dans (III.14) on arrive à :

$$V_{AN} = \frac{E}{6}(2(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32})) \tag{III.15}$$

Avec la même méthode on trouvera V_{BN} et V_{CN} et on obtiendra ce qui suit :

$$V_{BN} = \frac{E}{6}(-(K_{11} - K_{12}) + 2(K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32})) \tag{III.16}$$

$$V_{CN} = \frac{E}{6}(-(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) + 2(K_{31} - K_{32})) \tag{III.17}$$

Enfin

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11} - K_{12} \\ K_{21} - K_{22} \\ K_{31} - K_{32} \end{bmatrix} \tag{III.18}$$

$$\text{Et } I_S = K_{11}i_1 + K_{21}i_2 + K_{31}i_3 \tag{III.19}$$

- I_S : le courant de source en A.
- i_1 : le courant qui passe par le premier bras en A.
- i_2 : le courant qui passe par le deuxième bras en A.
- i_3 : le courant qui passe par le troisième bras en A.

III.3. Commande 120°

Dans cette commande les interrupteurs conduisent pendant 120° avec un décalage de 60° entre un interrupteur et son complément. Le schéma ainsi ses résultats sont présentés ci-dessous.

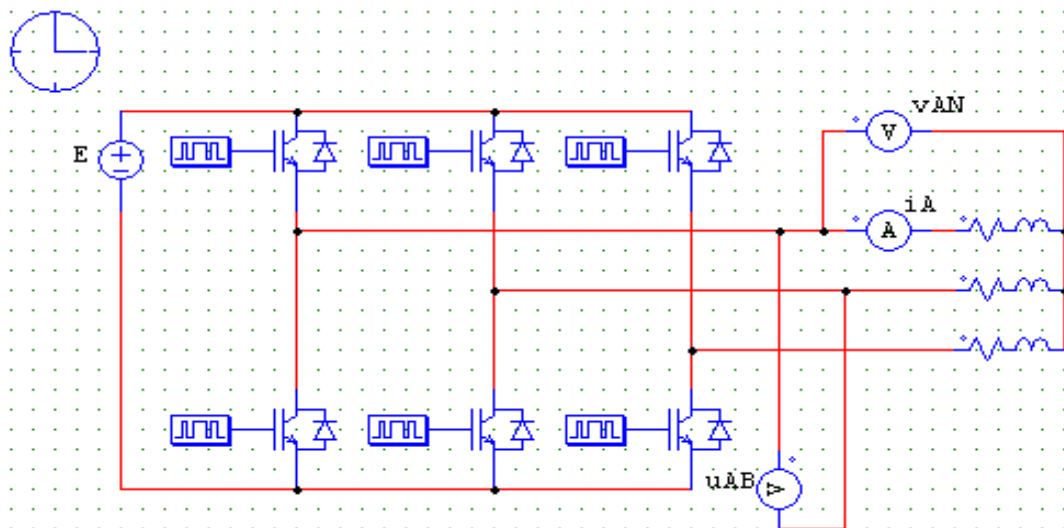


Figure III. 2 : Commande décalée pour un onduleur triphasé.

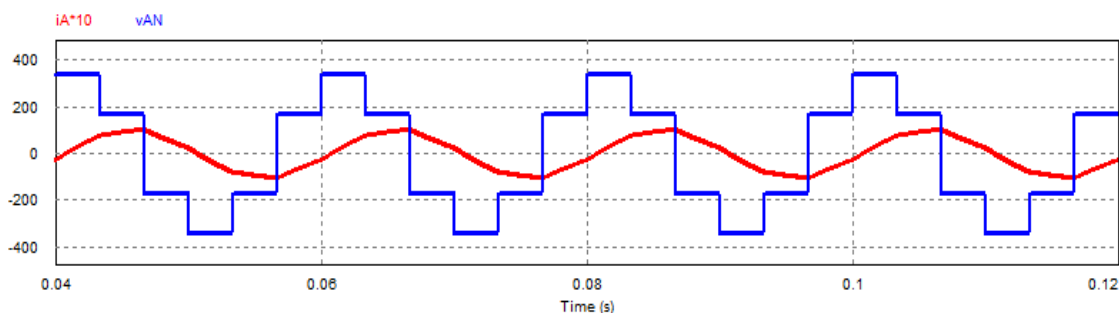


Figure III. 3 : Forme d’onde de la tension (V_{AN}) et du courant (i_A*10) triphasés.

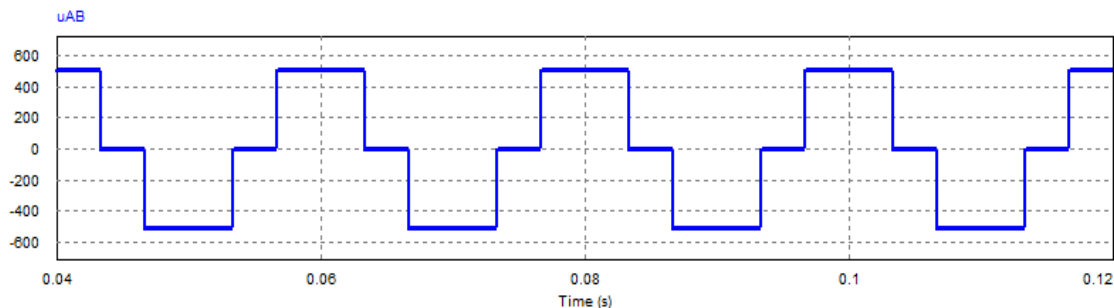


Figure III. 4 : Forme d’onde de la tension triphasés (u_{AB}) .

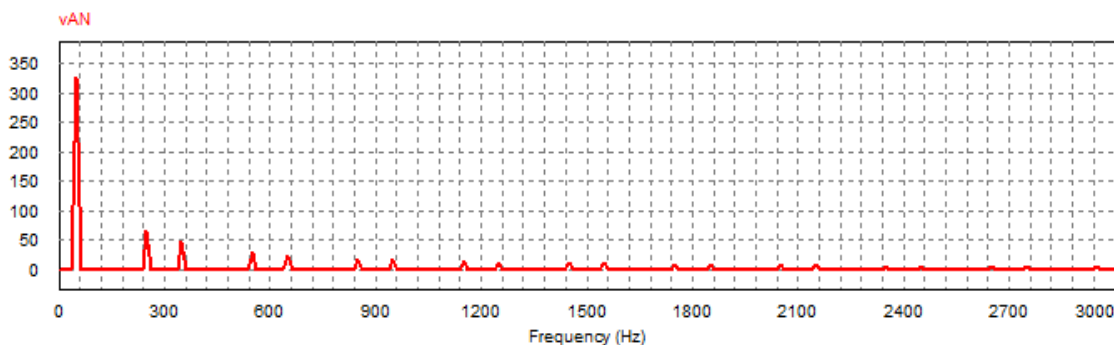


Figure III. 5 : Spectre d’harmonique de la tension triphasés (V_{AN}) .

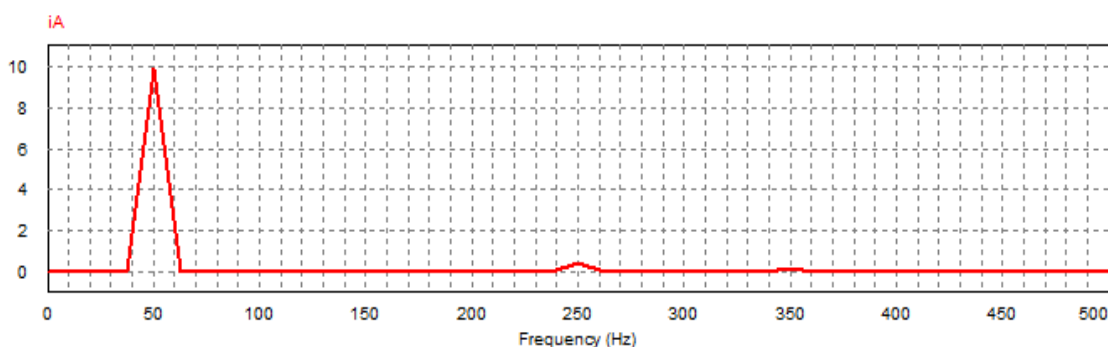


Figure III. 6 : Spectre d’harmonique du courant triphasés (i_A) .

Interprétation des résultats

On remarque que la tension V_{AN} est déformée et a la forme d’un escalier, cela est dû à la présence de familles d’harmoniques multiples de 3, contrairement au courant i_A qui a une forme proche de la sinusoïde car il contient les harmoniques 5 et 7.

Le tableau (III.1) contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 2 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande 120° .

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	4.86	7.02
V_{AN} (V)	31.10	242.24
u_{AB} (V)	31.06	419.78

III.4 Commande pleine onde 180°

C'est la transformation d'un signal de commande sinusoïdal à un signal carré.

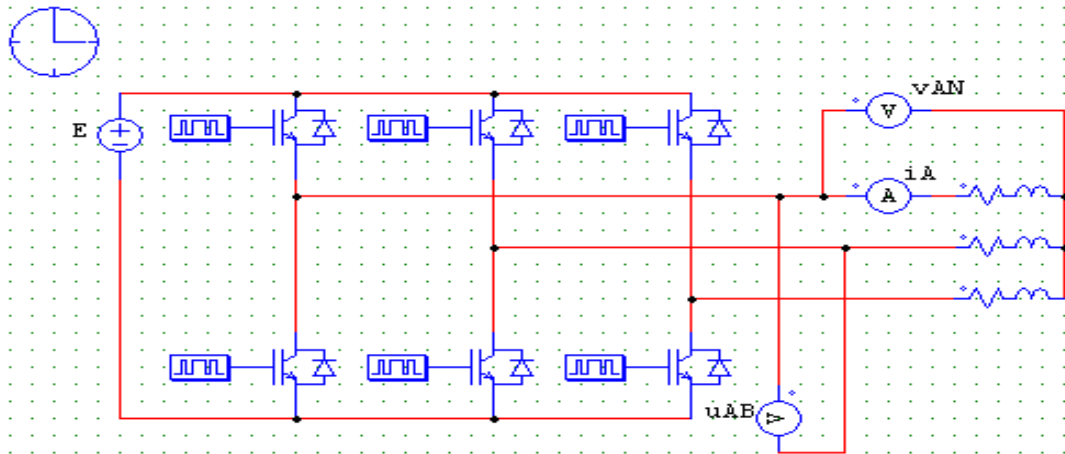


Figure III. 7 :Commande pleine onde pour un onduleur triphasé .

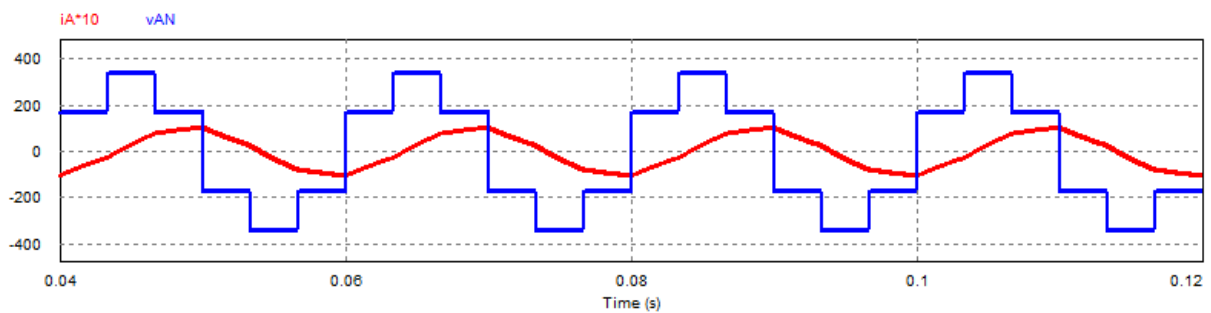


Figure III. 8 : Forme d'onde de la tension (V_{AN}) et du courant (i_A*10) triphasés.

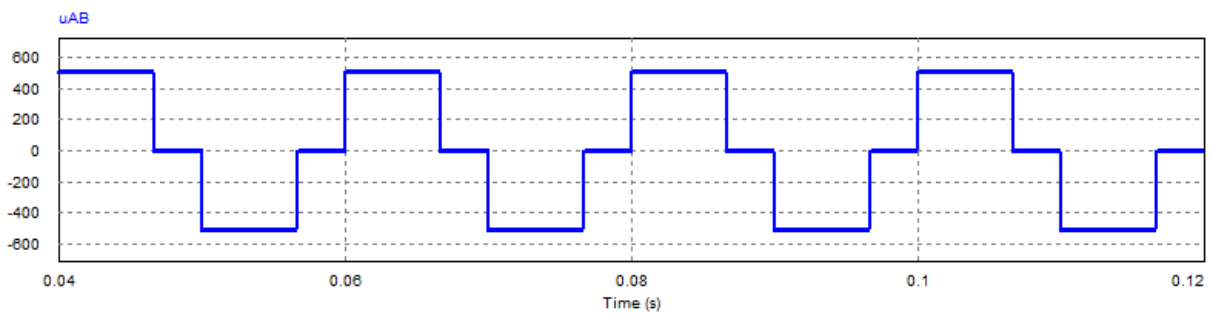


Figure III. 9 : Forme d'onde de la tension triphasés u_{AB} .

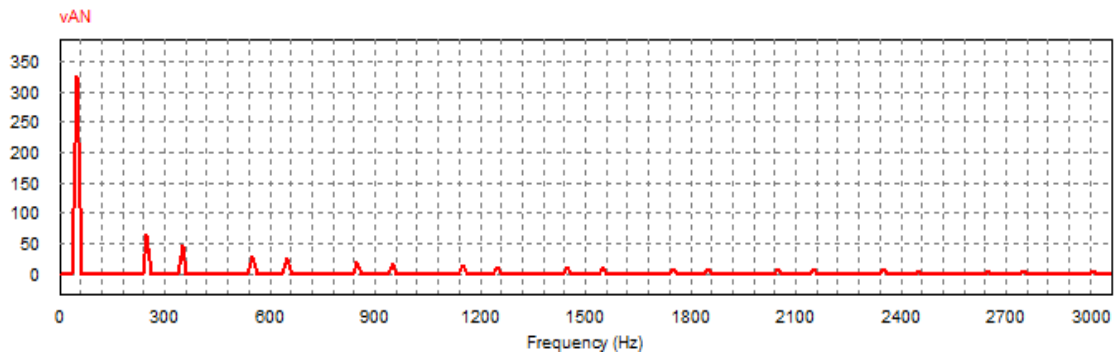


Figure III. 10 : Spectre d'harmonique de la tension triphasés (V_{AN}) .

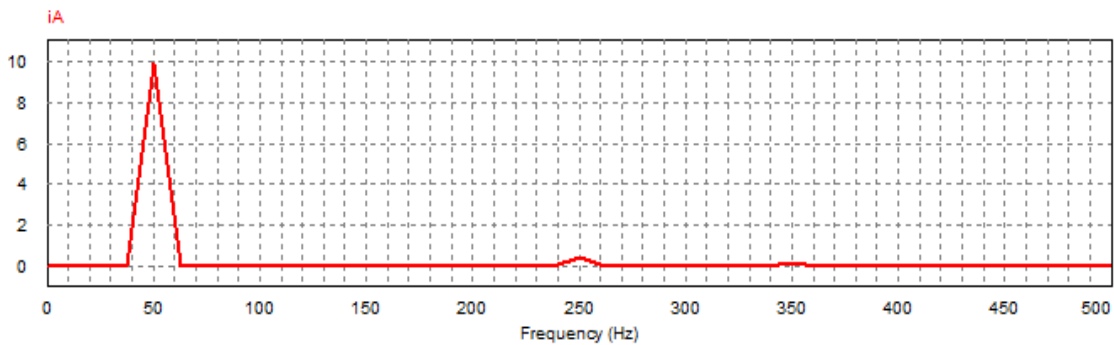


Figure III. 11 : Spectre d'harmonique du courant triphasés (i_A) .

Interprétation des résultats

On remarque dans cette simulation que l'onde de la tension V_{AN} est sous forme d'escalier et cela est dû à la présence d'harmoniques multiples de 3 (6,12,18,24), par contre le courant i_A est proche de la forme sinusoïdale car on y trouve uniquement les harmoniques 5 et 7.

Le tableau III.2 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 3 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande 180° .

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	5.02	7.03
V_{AN} (V)	31.10	242.24
u_{AB} (V)	31.12	419.47

En comparant entre la commande 120° et la commande 180° on trouve qu'il y a une légère différence dans leurs THD du courant (celui de la commande 120° est inférieur à celui de la 180°).

III.5 Commande pleine onde d'un onduleur penta-phasé

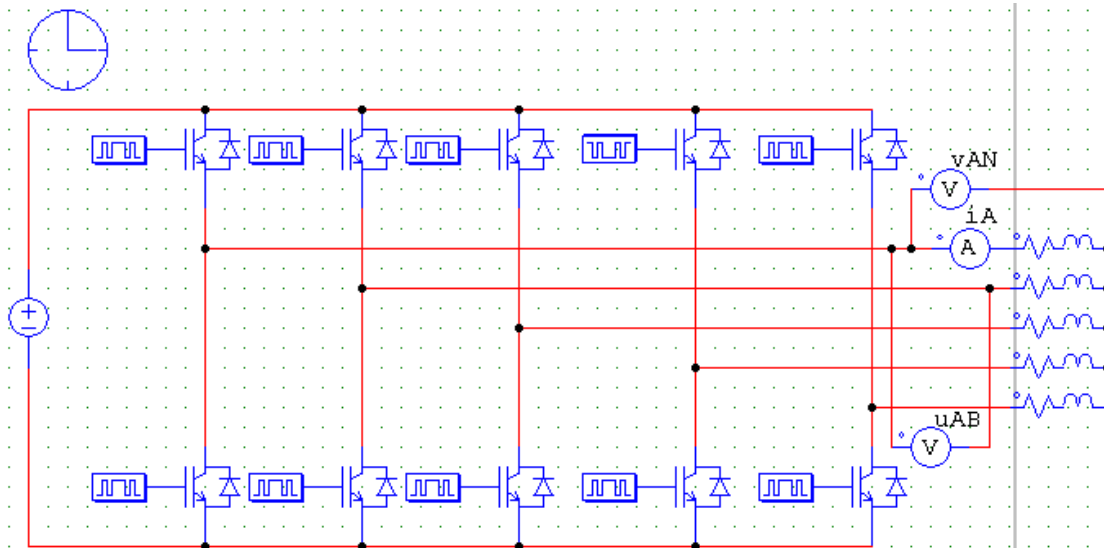


Figure III. 12 : Commandé pleine onde d'un onduleur penta-phasé .

On peut simplifier l'étude.

$$\text{Conditions : } \begin{cases} K_{11} + K_{12} = 1 \\ K_{11} = \overline{K_{12}} \end{cases}$$

$$\text{Fonction de connexion } K_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{AM} = \frac{E}{2} (K_{11} - K_{12}) \\ V_{BM} = \frac{E}{2} (K_{21} - K_{22}) \\ V_{CM} = \frac{E}{2} (K_{31} - K_{32}) \\ V_{DM} = \frac{E}{2} (K_{41} - K_{42}) \\ V_{EM} = \frac{E}{2} (K_{51} - K_{52}) \end{cases} \tag{III.20}$$

M est un point milieu. C'est la référence des tensions d'entrée $V_{AM}, V_{BM}, V_{CM}, V_{DM}, V_{EM}$

N est le neutre.

On écrit les relations de Charles comme suit :

$$\begin{cases} V_{MN} + V_{AM} = V_{AN} \\ V_{MN} + V_{BM} = V_{BN} \\ V_{MN} + V_{CM} = V_{CN} \\ V_{MN} + V_{DM} = V_{DN} \\ V_{MN} + V_{EM} = V_{EN} \end{cases} \tag{III.21}$$

Le système est équilibré d'où

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} + V_{DN} + V_{EN} = 0 \tag{III.22}$$

De la somme des équations de (III.21) on aboutit :

$$5V_{MN} + V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM} = 0 \tag{III.23}$$

$$V_{MN} = -\frac{1}{5}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM}) \quad (III.24)$$

(III.21) dans (III.24) on obtient :

$$V_{AN} - V_{AM} = -\frac{1}{5}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM}) \quad (III.25)$$

$$V_{AN} = V_{AM} - \frac{1}{5}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM}) \quad (III.26)$$

$$V_{AN} = \frac{4}{5}V_{AM} - \frac{1}{5}V_{BM} - \frac{1}{5}V_{CM} - \frac{1}{5}V_{DM} - \frac{1}{5}V_{EM} \quad (III.27)$$

On remplace (III.20) dans (III.27) on arrive à :

$$V_{AN} = \frac{E}{10}(4(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52})) \quad (III.28)$$

Avec la même méthode on trouvera V_{BN} , V_{CN} , V_{DN} et V_{EN} et on obtiendra ce qui suit :

$$V_{BN} = \frac{E}{10}(-(K_{11} - K_{12}) + 4(K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52})) \quad (III.29)$$

$$V_{CN} = \frac{E}{10}(-(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) + 4(K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52})) \quad (III.30)$$

$$V_{DN} = \frac{E}{10}(-(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) + 4(K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52})) \quad (III.31)$$

$$V_{EN} = \frac{E}{10}(-(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) + 4(K_{51} - K_{52})) \quad (III.32)$$

Enfin

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \\ V_{DN} \\ V_{EN} \end{bmatrix} = \frac{E}{10} \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11} - K_{12} \\ K_{21} - K_{22} \\ K_{31} - K_{32} \\ K_{41} - K_{42} \\ K_{51} - K_{52} \end{bmatrix} \quad (III.33)$$

Et

$$I_S = K_{11}i_1 + K_{21}i_2 + K_{31}i_3 + K_{41}i_4 + K_{51}i_5 \quad (III.34)$$

- I_S : le courant de source en A.
- i_1 : le courant qui passe par le premier bras en A.
- i_2 : le courant qui passe par le deuxième bras en A.
- i_3 : le courant qui passe par le troisième bras en A.
- i_4 : le courant qui passe par le quatrième bras en A.
- i_5 : le courant qui passe par le cinquième bras en A.

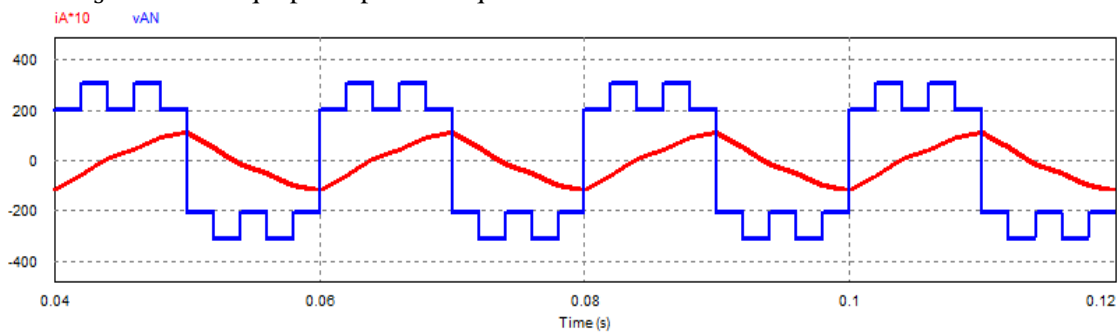


Figure III. 13 : Forme d'onde de la tension simple (V_{AN}) et du courant (i_A*10) penta-phasé

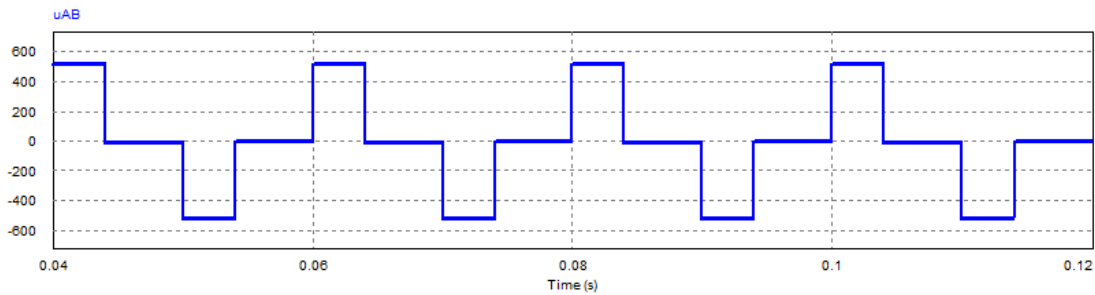


Figure III. 14 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB} .

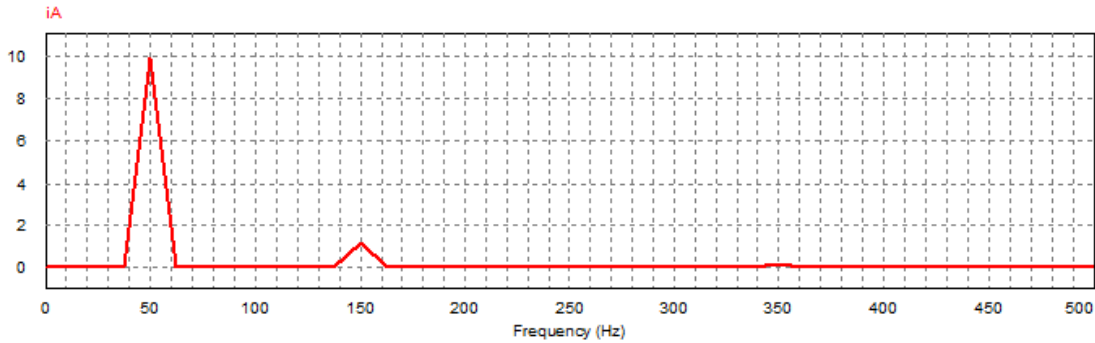


Figure III. 15 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A .

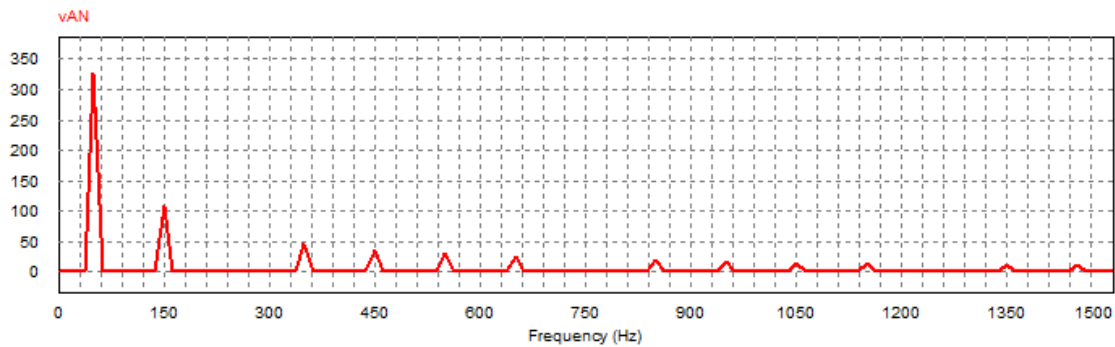


Figure III. 16 : Spectre d'harmonique de la tension penta-phasé V_{AN} .

Interprétation des résultats

On remarque que la tension V_{AN} est sous forme d'escalier contrairement au courant i_A qui est proche de la sinusoïde et cela est dû à la présence d'harmoniques impairs (3 et 7). Inversement à la tension V_{AN} qui contient une harmonique de rang 3 créée par la famille d'harmonique de rang 9 qui se trouve à proximité du fondamental ainsi qu'une autre famille de rang 21.

Le tableau (III.3) contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB}

Tableau III. 4 : THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pleine onde d'un onduleur penta-phasé.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	12	7.07
V_{AN} (V)	42.93	325.08
u_{AB} (V)	65.47	251.81

III.6 Commande pleine onde d'un onduleur hepta-phasé

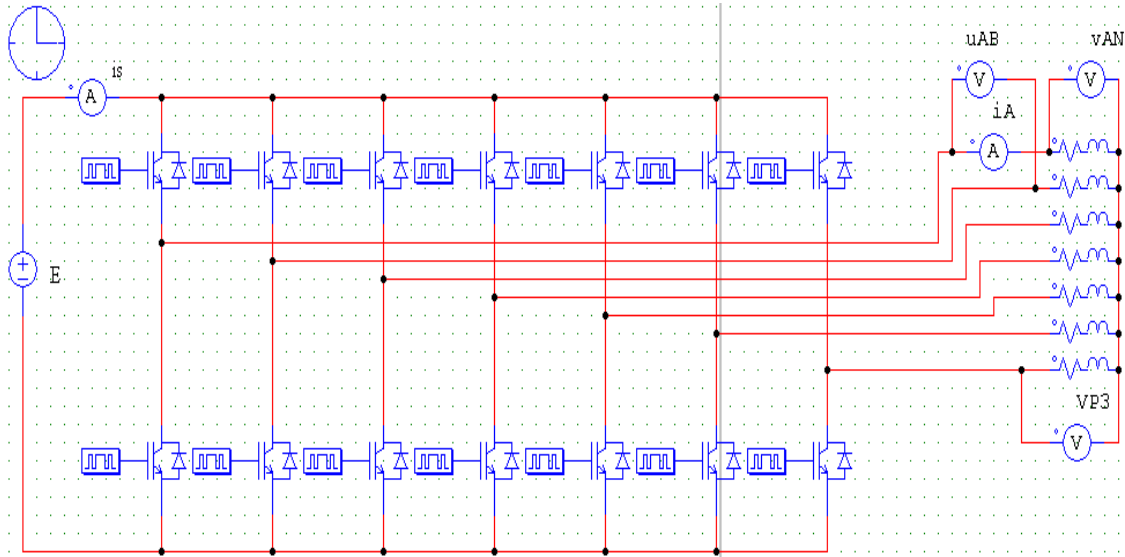


Figure III. 17 : Commandé pleine onde d'un onduleur hepta-phasé .

On peut simplifier l'étude.

$$\text{Conditions : } \begin{cases} K_{11} + K_{12} = 1 \\ K_{11} = \overline{K_{12}} \end{cases}$$

$$\text{Fonction de connexion } K_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{AM} = \frac{E}{2}(K_{11} - K_{12}) \\ V_{BM} = \frac{E}{2}(K_{21} - K_{22}) \\ V_{CM} = \frac{E}{2}(K_{31} - K_{32}) \\ V_{DM} = \frac{E}{2}(K_{41} - K_{42}) \\ V_{EM} = \frac{E}{2}(K_{51} - K_{52}) \\ V_{FM} = \frac{E}{2}(K_{61} - K_{62}) \\ V_{GM} = \frac{E}{2}(K_{71} - K_{72}) \end{cases} \quad \text{(III.35)}$$

M est un point milieu. C'est la référence des tensions d'entrée $V_{AM}, V_{BM}, V_{CM}, V_{DM}, V_{EM}, V_{FM}, V_{GM}$

N est le neutre.

On écrit les relations de Charles comme suit :

$$\begin{cases} V_{MN} + V_{AM} = V_{AN} \\ V_{MN} + V_{BM} = V_{BN} \\ V_{MN} + V_{CM} = V_{CN} \\ V_{MN} + V_{DM} = V_{DN} \\ V_{MN} + V_{EM} = V_{EN} \\ V_{MN} + V_{FM} = V_{FN} \\ V_{MN} + V_{GM} = V_{GN} \end{cases} \quad (III.36)$$

Le système est équilibré d'où

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} + V_{DN} + V_{EN} + V_{FN} + V_{GN} = 0 \quad (III.37)$$

De la somme des équations de (III.36) on aboutit :

$$7V_{MN} + V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM} + V_{FM} + V_{GM} = 0 \quad (III.38)$$

$$V_{MN} = -\frac{1}{7}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM} + V_{FM} + V_{GM}) \quad (III.39)$$

(III.36) dans (III.39) on obtient :

$$V_{AN} - V_{AM} = -\frac{1}{7}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM} + V_{FM} + V_{GM}) \quad (III.40)$$

$$V_{AN} = V_{AM} - \frac{1}{7}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} + V_{DM} + V_{EM} + V_{FM} + V_{GM}) \quad (III.41)$$

$$V_{AN} = \frac{6}{7}V_{AM} - \frac{1}{7}V_{BM} - \frac{1}{7}V_{CM} - \frac{1}{7}V_{DM} - \frac{1}{7}V_{EM} - \frac{1}{7}V_{FM} - \frac{1}{7}V_{GM} \quad (III.42)$$

On remplace (III.35) dans (III.42) on arrive à :

$$V_{AN} = \frac{E}{14}(6(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52}) - (K_{61} - K_{62}) - (K_{71} - K_{72})) \quad (III.43)$$

Avec la même méthode on trouvera $V_{BN}, V_{CN}, V_{DN}, V_{EN}, V_{FN}$ et V_{GN} et on obtiendra ce qui suit :

$$V_{BN} = \frac{E}{14}(- (K_{11} - K_{12}) + 6(K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52}) - (K_{61} - K_{62}) - (K_{71} - K_{72})) \quad (III.44)$$

$$V_{CN} = \frac{E}{14}(- (K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) + 6(K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52}) - (K_{61} - K_{62}) - (K_{71} - K_{72})) \quad (III.45)$$

$$V_{DN} = \frac{E}{14}(- (K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) + 6(K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52}) - (K_{61} - K_{62}) - (K_{71} - K_{72})) \quad (III.46)$$

$$V_{EN} = \frac{E}{14}(- (K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) + 6(K_{51} - K_{52}) - (K_{61} - K_{62}) - (K_{71} - K_{72})) \quad (III.47)$$

$$V_{FN} = \frac{E}{14}(- (K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52}) + 6(K_{61} - K_{62}) - (K_{71} - K_{72})) \quad (III.48)$$

$$V_{GN} = \frac{E}{14} (-(K_{11} - K_{12}) - (K_{21} - K_{22}) - (K_{31} - K_{32}) - (K_{41} - K_{42}) - (K_{51} - K_{52}) - (K_{61} - K_{62}) + 6(K_{71} - K_{72})) \quad (III.49)$$

$$\text{Enfin} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \\ V_{DN} \\ V_{EN} \\ V_{FN} \\ V_{GN} \end{bmatrix} = \frac{E}{14} \begin{bmatrix} 6 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 6 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 6 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 6 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 6 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 6 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11} - K_{12} \\ K_{21} - K_{22} \\ K_{31} - K_{32} \\ K_{41} - K_{42} \\ K_{51} - K_{52} \\ K_{61} - K_{62} \\ K_{71} - K_{72} \end{bmatrix} \quad (III.50)$$

Et

$$I_S = K_{11}i_1 + K_{21}i_2 + K_{31}i_3 + K_{41}i_4 + K_{51}i_5 + K_{61}i_6 + K_{71}i_7 \quad (III.51)$$

- I_S : le courant de source en A.
- i_1 : le courant qui passe par le premier bras en A.
- i_2 : le courant qui passe par le deuxième bras en A.
- i_3 : le courant qui passe par le troisième bras en A.
- i_4 : le courant qui passe par le quatrième bras en A.
- i_5 : le courant qui passe par le cinquième bras en A.
- i_6 : le courant qui passe par le sixième bras en A.
- i_7 : le courant qui passe par le septième bras en A.

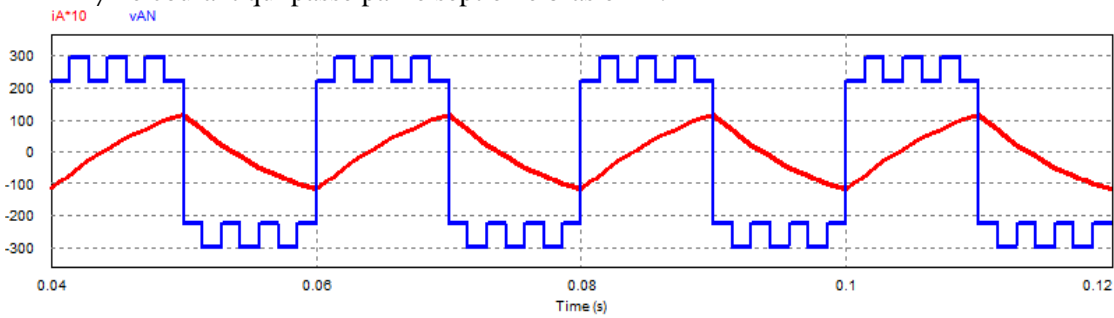


Figure III. 18 : Forme d’onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) hepta-phasé.

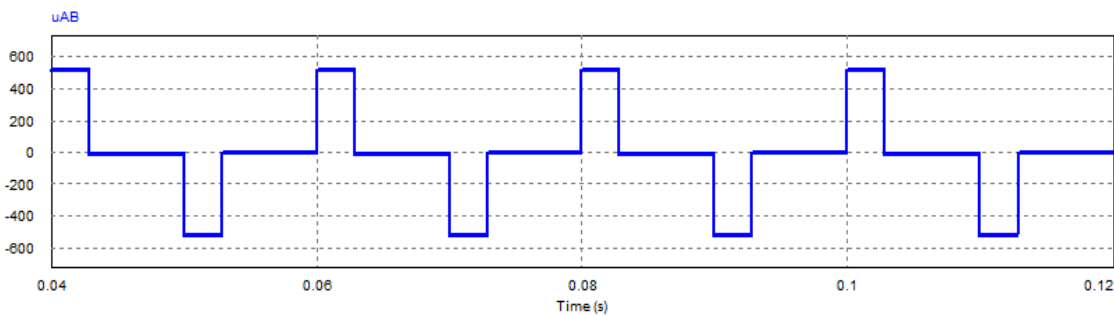


Figure III. 19 : Forme d’onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB} .

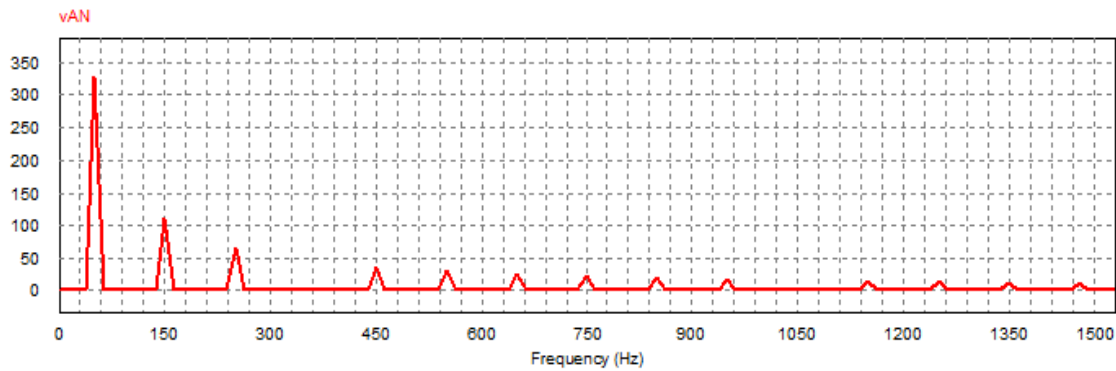


Figure III. 20 : Spectre d'harmonique de la tension hepta-phasé (V_{AN}) .

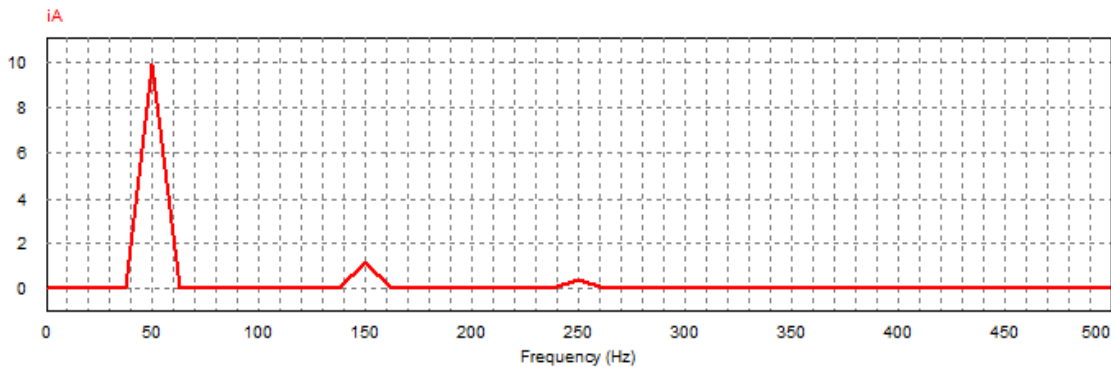


Figure III. 21 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé (i_A) .

Interprétation des résultats

On remarque que la tension V_{AN} est sous forme d'escalier, sa déformation est causée par les harmoniques 3, 9 on remarque que les harmoniques multiples de 7 sont éliminés ce qui provoque la repousse des autres harmoniques, contrairement au courant i_A qui a une forme proche de la sinusoïde et cela est dû à la présence d'harmoniques 3,5.

Le tableau III.4 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 5 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande pleine onde d'un onduleur hepta-phasé.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	12.54	7.08
V_{AN} (V)	45.6	254.47
u_{AB} (V)	93.62	274.4

En comparant entre les 3 onduleurs (triphase, penta-phasé et hepta-phasé), on trouve que l'onduleur penta-phasé nous offre une meilleure tension simple mais que l'onduleur triphasé nous procure une plus grande valeur de la tension composée. L'onduleur hepta-phasé est plus pollué d'harmoniques.

III.7 Commande MLI triangulo-sinusoidale d'un onduleur

C'est une commande analogique qui consiste à faire la comparaison entre la modulatrice sinusoïdale de fréquence f_m et d'amplitude variable V_m avec une porteuse d'amplitude V_{port} variable et de fréquence f_{port} plus élevé que celle de la modulatrice. En faisant l'intersection des deux signaux on obtient les instants de commutation des interrupteurs.

La modulation sinus-triangle nous permet de régler le fondamental de la tension de sortie de l'onduleur par action sur le paramètre r , et de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées ce qui facilite le filtrage, mais cette technique nous ne permet d'exploiter que 78.54% de la tension continue, qui alimente l'onduleur. [26].

Cette stratégie de commande est caractérisée par : [27]

- L'indice de modulation m (rapport de fréquence) : $m = \frac{f_{port}}{f_m}$
- Le coefficient de réglage en tension r (rapport d'amplitudes) : $r = \frac{V_m}{V_p}$

f_{port} : fréquence de la porteuse.

f_m : fréquence de la modulante.

V_m : tension de la modulante.

V_p : tension de la porteuse.

III.7.1 Un onduleur triphasé

On a utilisé les paramètres suivants :

$E=540V$ $R=10\Omega$ $L=100mH$ $f_m=50HZ$

Pour $f_{port}=9*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

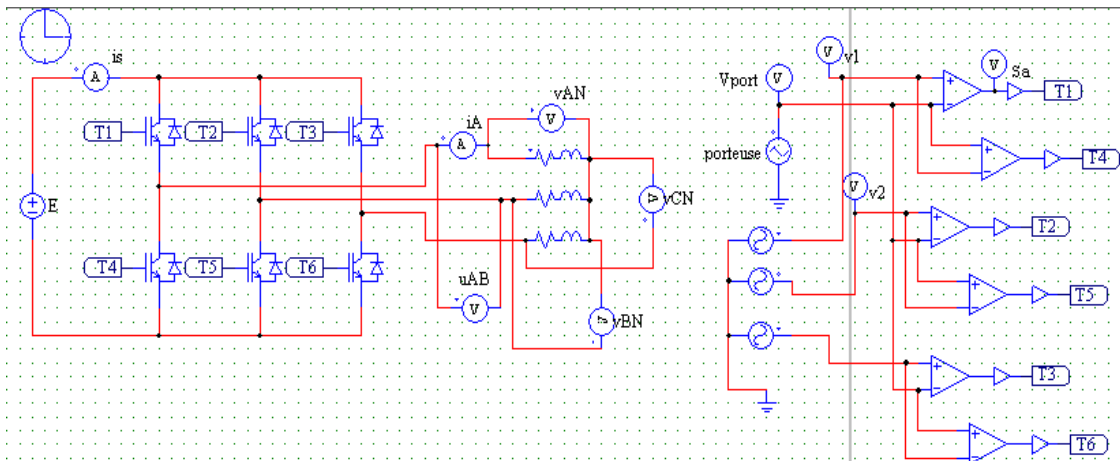


Figure III. 22 : Onduleur triphasé commandé par la MLI sinus-triangle.

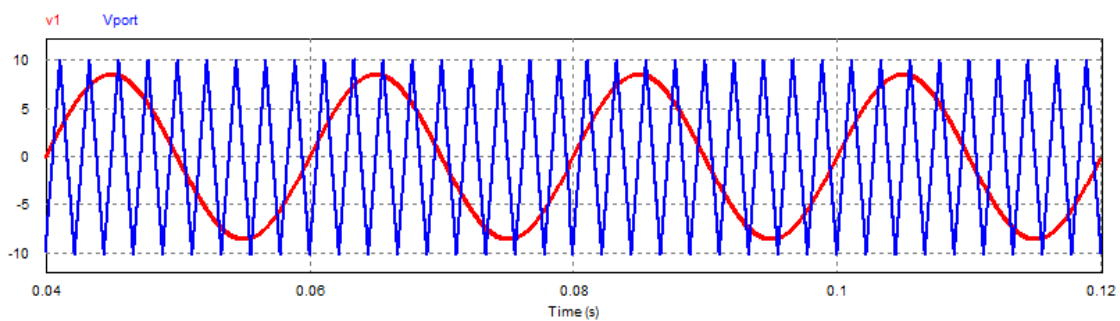


Figure III. 23 : Forme d'onde du signal de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} triphasé.

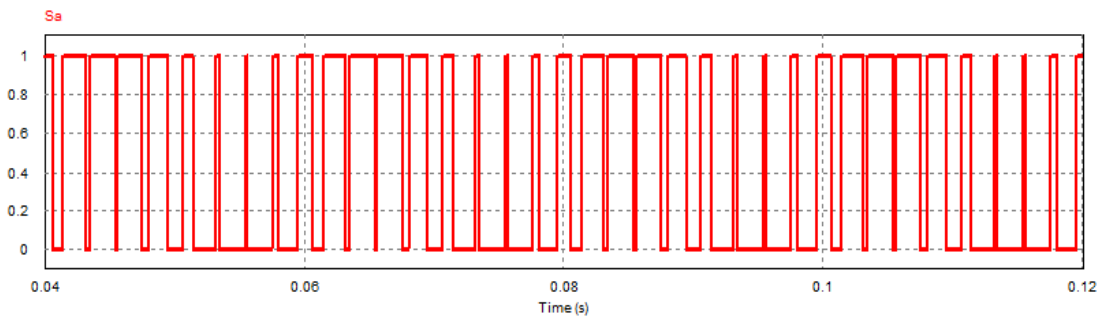


Figure III. 24 : Forme d'onde du signal triphasé de commande des IGBT.

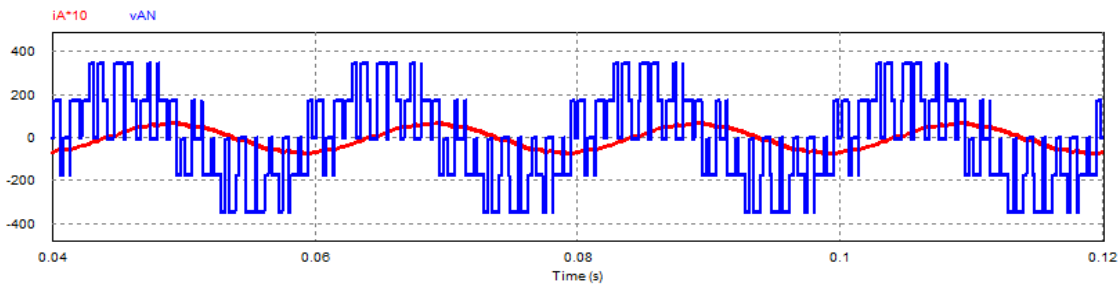


Figure III. 25 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasé.

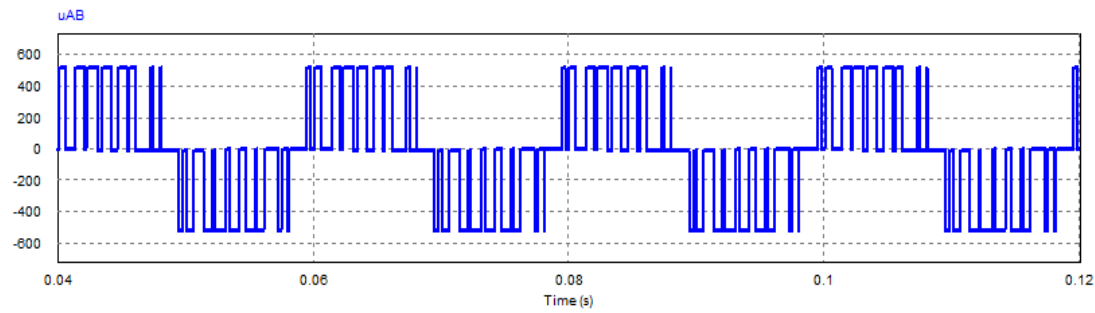


Figure III. 26 : Forme d'onde de la tension composée triphasé u_{AB} .

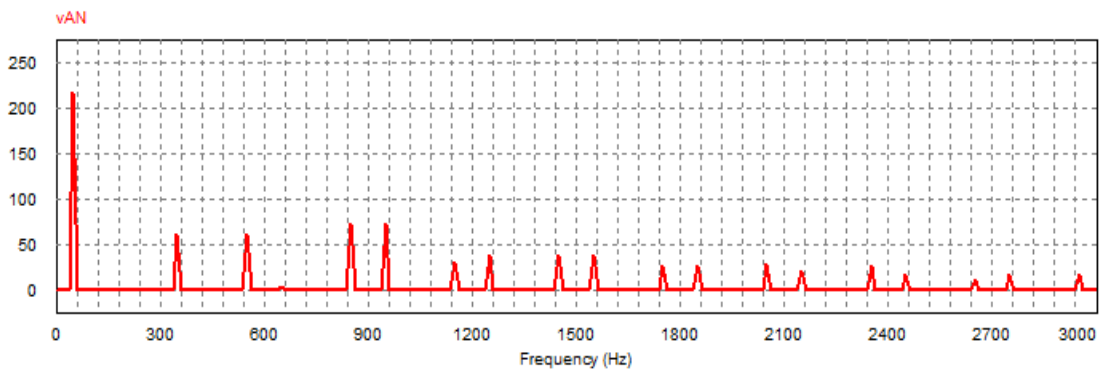


Figure III. 27 : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN} .

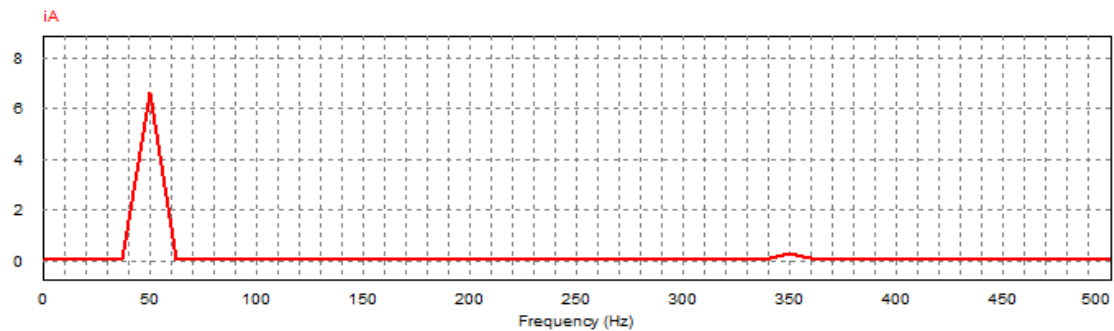


Figure III. 28 : Spectre harmonique du courant triphasé i_A .

Interprétation des résultats

On remarque que la tension V_{AN} est éculé car son spectre harmonique qui montre la présence de familles d’harmoniques multiples de 3 (6,9,24,36,39) avec des amplitudes élevées pour celles qui sont proche du fondamental et l’harmonique 3 est éliminé.

Contrairement au courant i_A qui est presque sinusoïdal il comporte uniquement l’harmonique 7.

Le tableau III.5 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 6 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	5.20	4.69
V_{AN} (V)	85.66	203.3
u_{AB} (V)	85.57	352.38

Pour $f_{port}=12*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

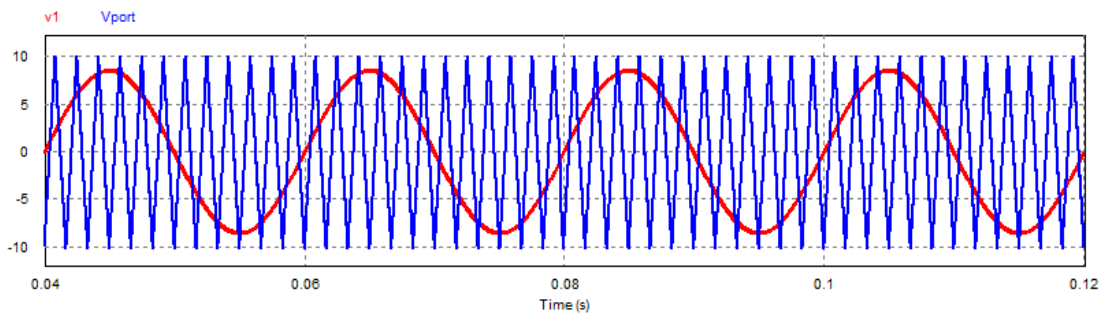


Figure III. 29 : Forme d’onde du signal triphasé de référence V_1 et celui de la porteuse

V_{port} .

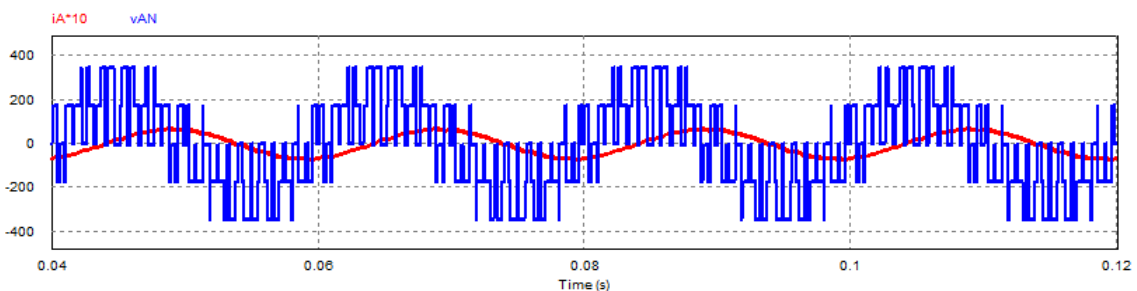


Figure III. 30 : Forme d’onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) triphasé.

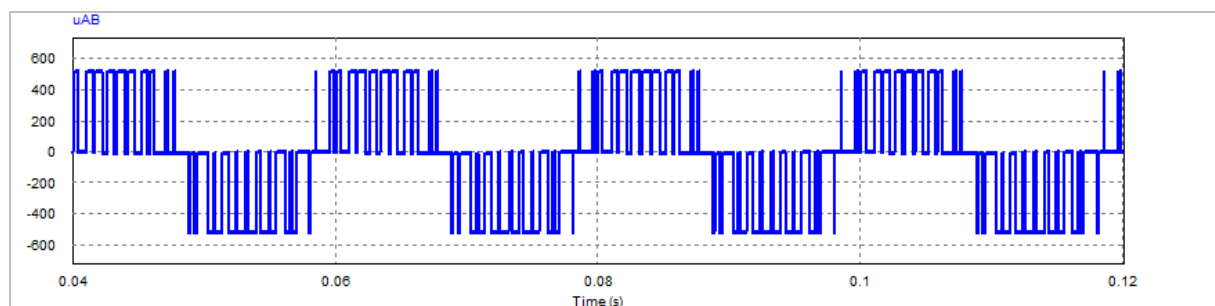


Figure III. 31 : Forme d’onde de la tension composée triphasé u_{AB} .

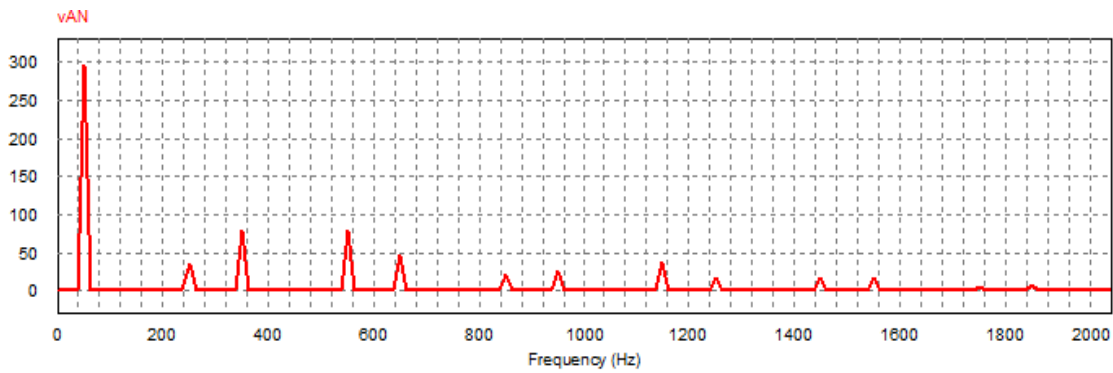


Figure III. 32 : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN} .

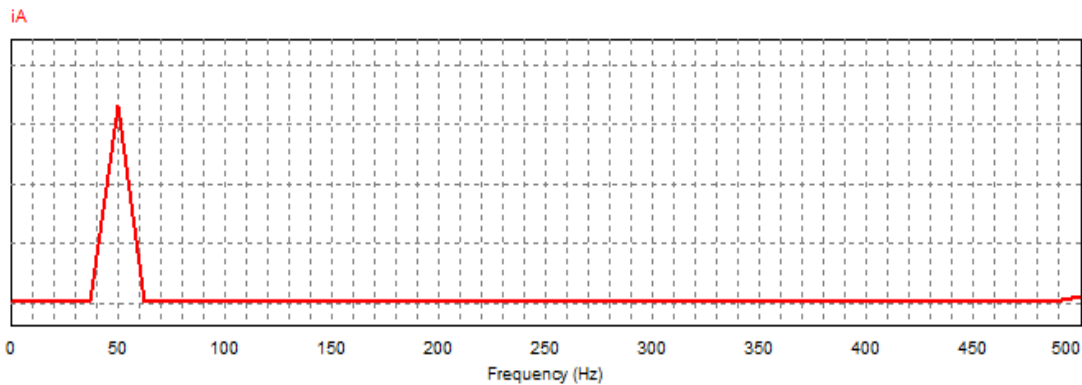


Figure III. 33 : Spectre harmonique du courant triphasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l'élimination de l'harmonique 3 et la présence de familles d'harmoniques aux multiples de 3.

Le courant i_A a presque plus d'harmoniques proches du fondamental ils ont tous été repoussés.

Le tableau III.6 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 7 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	4.61	4.69
V_{AN} (V)	85.14	203.37
u_{AB} (V)	85.34	352.19

Pour $f_{port}=15*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

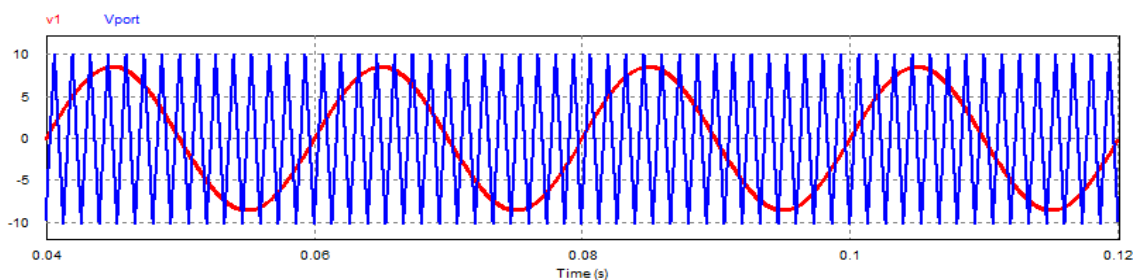


Figure III. 34 : Forme d'onde du signal triphasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

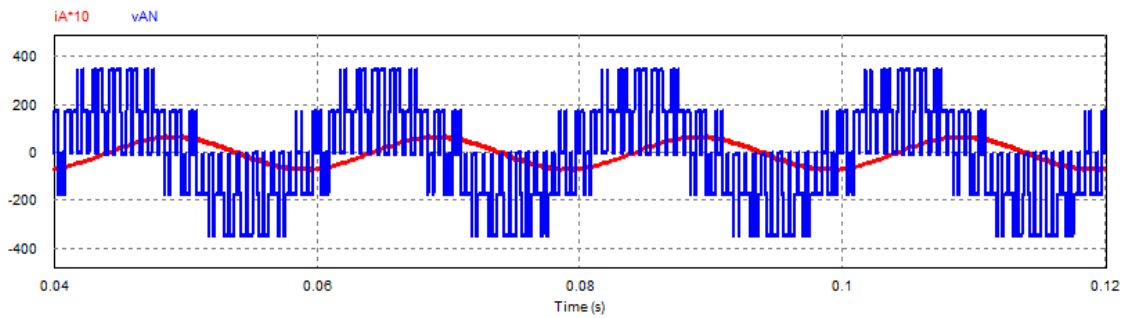


Figure III. 35 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant ($i_A * 10$) triphasé.

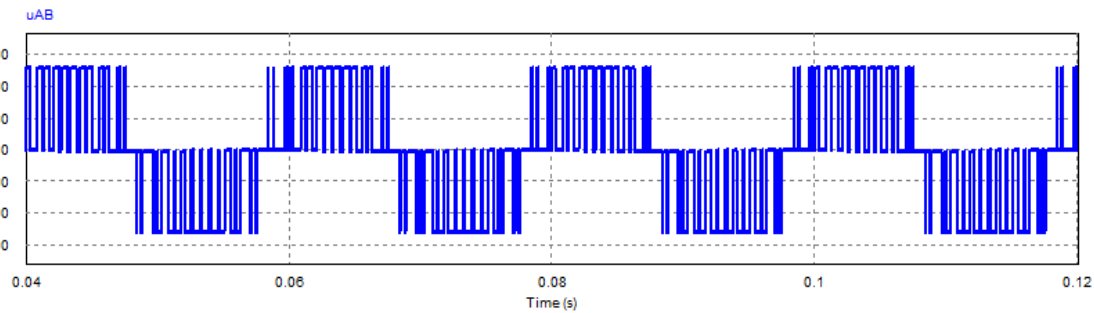


Figure III. 36 : Forme d'onde de la tension composée triphasé u_{AB} .

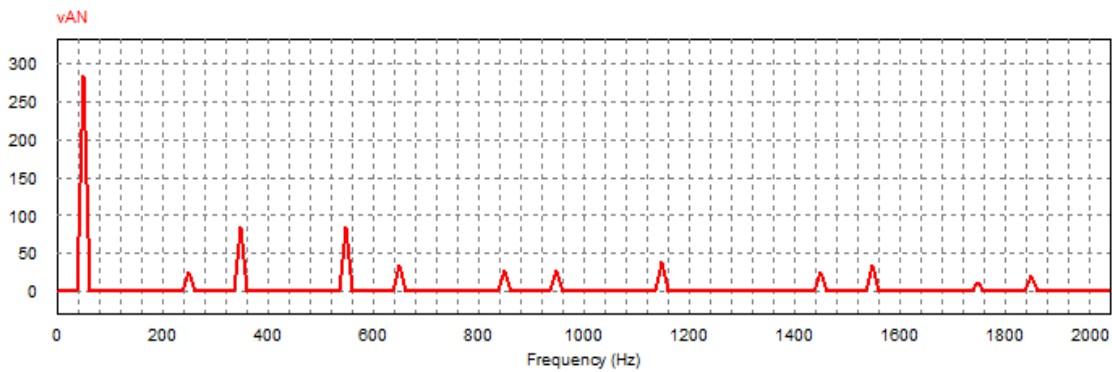


Figure III. 37 : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN} .

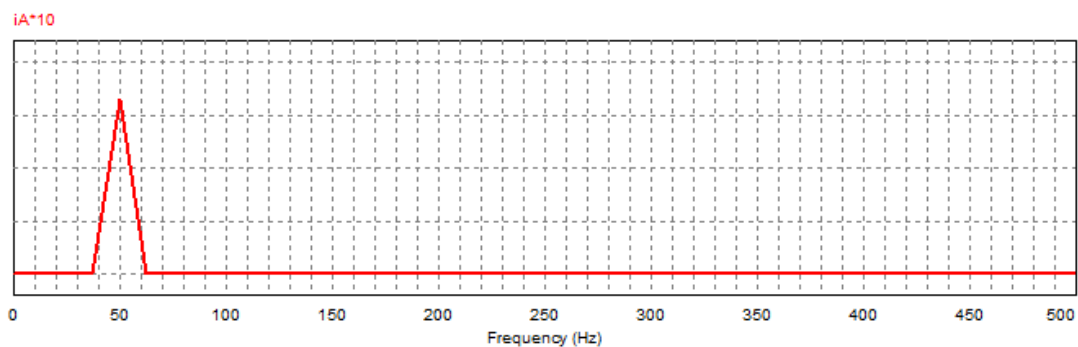


Figure III. 38 : Spectre harmonique du courant triphasé ($i_A * 10$).

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l'élimination de l'harmonique 3 et la présence de familles d'harmoniques aux multiples de 3.

Toutes les harmoniques du courant i_A ont été repoussés.

Le tableau III.7 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 8 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	3.71	4.69
V_{AN} (V)	85.34	203.09
u_{AB} (V)	85.17	351.63

Pour $f_{port}=21*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

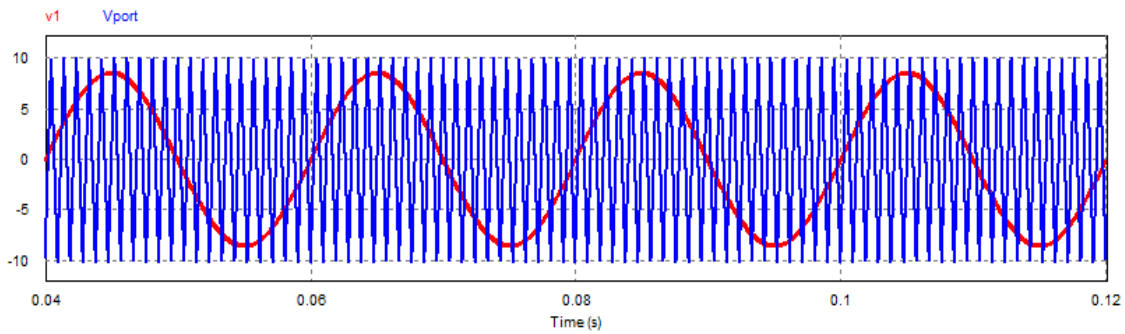


Figure III. 39 : Forme d'onde du signal triphasé de référence V_1 et celui de la porteuse

V_{port} .

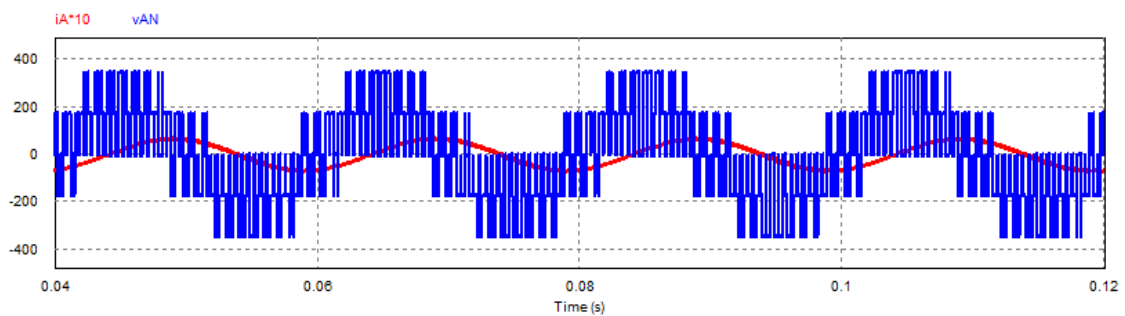


Figure III. 40 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) triphasé.

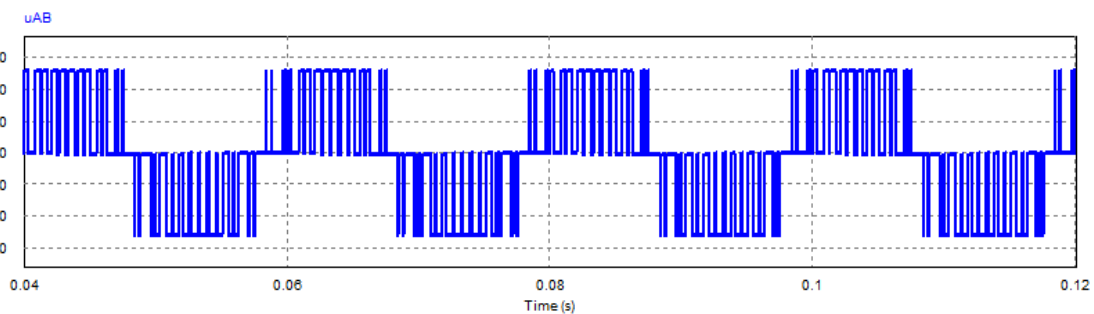


Figure III. 41 : Forme d'onde de la tension composée triphasé u_{AB} .

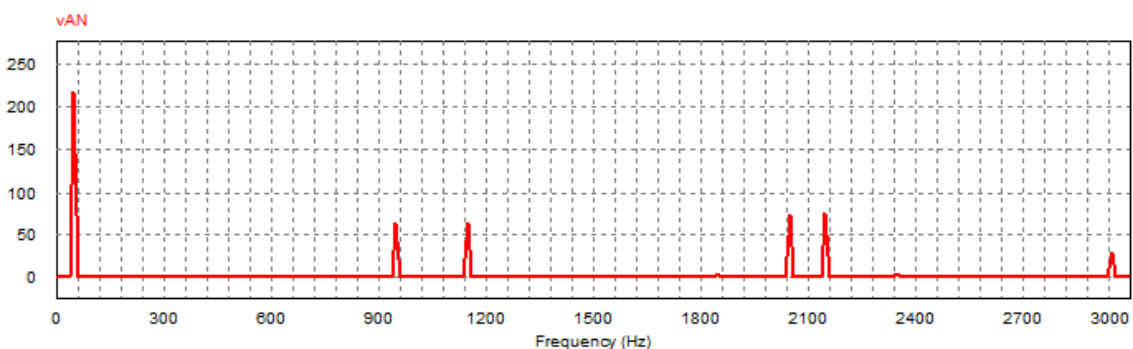


Figure III. 42 : Spectre harmonique de la tension simple triphasé V_{AN} .

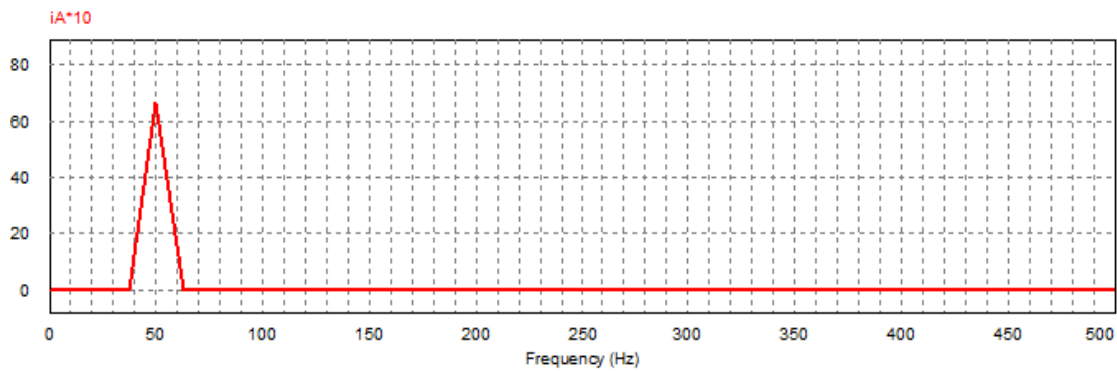


Figure III. 43 : Spectre harmonique du courant triphasé ($i_A * 10$).

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l'élimination de l'harmonique 3 et la présence de familles d'harmoniques aux multiples de 3 repoussées.

Les harmoniques du courant i_A sont tous repoussés du fondamental au-delà 500Hz.

Le tableau III.8 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 9 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	2.74	4.69
V_{AN} (V)	86.05	203.09
u_{AB} (V)	85.89	350.89

On fixe la valeur de r à 0.85 et on fait varier la valeur de m tableau (II.9) :

Tableau III. 10 : Valeurs du THD_{i_A} (%) en fonction de m .

m	9	12	15	21
THD_{i_A} (%)	6.20	4.61	3.71	2.74

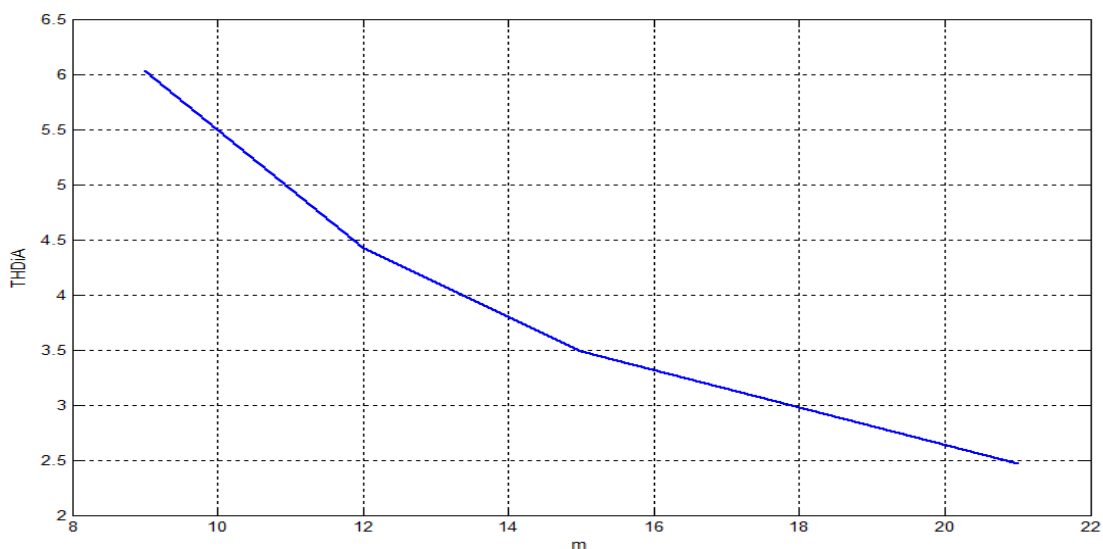


Figure III. 44 : Courbe du taux d'harmoniques THD_{i_A} en fonction du facteur de modulation en triphasé.

On fixe la valeur de m à 21 et on fait varier la valeur de r tableau (III.10) :

Tableau III. 11 : La tension $V_{AN(eff)}$, $u_{AB(eff)}$ (V) en fonction de r .

r	0.85	0.7	0.55	0.4
$V_{AN(eff)}$ (V)	203.09	183.33	164.16	138.45
$u_{AB(eff)}$ (V)	350.88	318.51	283.40	241.09

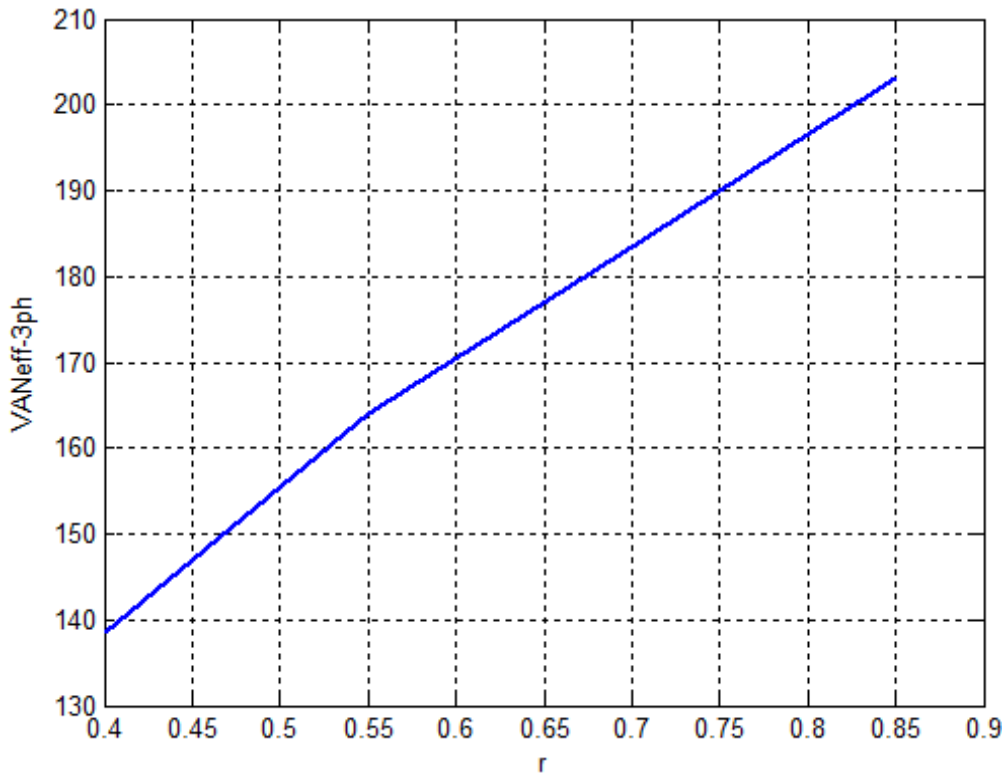


Figure III. 45 : Courbe des valeurs efficaces triphasé $V_{AN(eff)}$ en fonction du facteur de r .

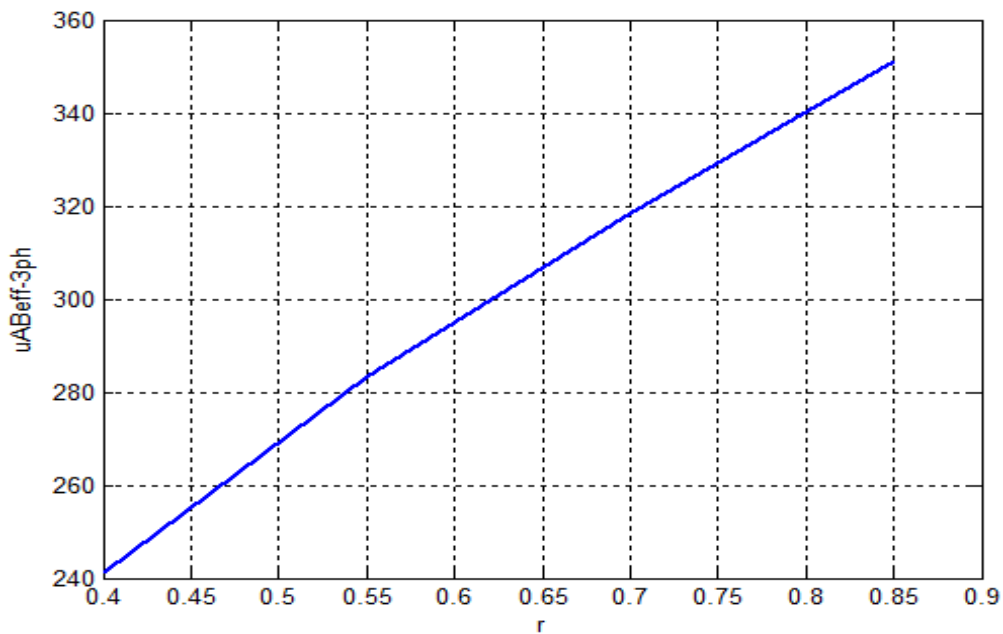


Figure III. 46 : Courbe des valeurs efficaces triphasé $u_{AB(eff)}$ en fonction du facteur de

r .

D'après la figure III.44 on constate que l'augmentation du facteur de modulation m entraîne la diminution du taux de distorsion harmoniques contrairement à la figure III.45 et III.46 qui nous montre que l'augmentation du facteur r entraîne l'augmentation de la tension efficace simple $V_{AN(eff)}$ et de la tension composée $u_{AB(eff)}$.

III.7.2 Un onduleur penta-phasé

On a utilisé les paramètres suivants :

$$E=514V \quad R=10\Omega \quad L=100mH \quad f_m=50HZ$$

Pour $f_{port}=9*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

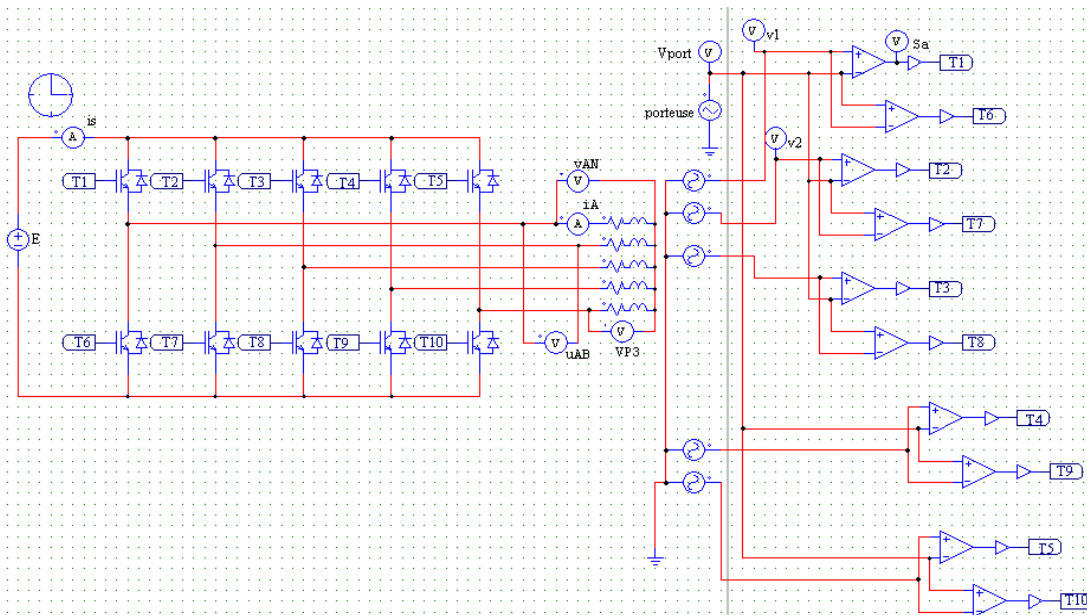


Figure III. 47 : Onduleur penta-phasé commandé par la MLI sinus-triangle.

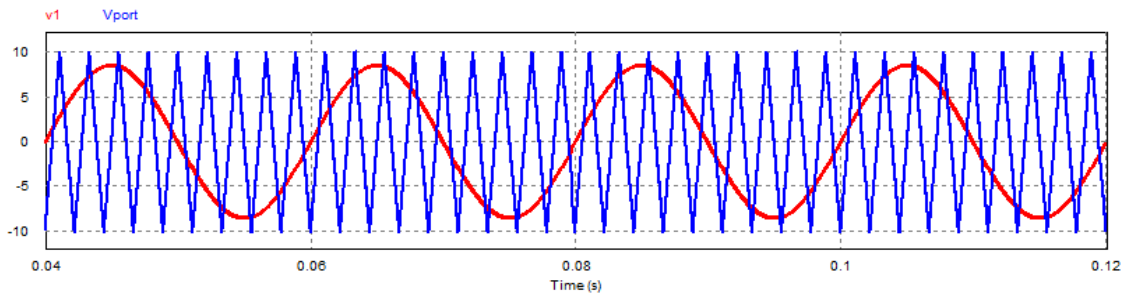


Figure III. 48 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

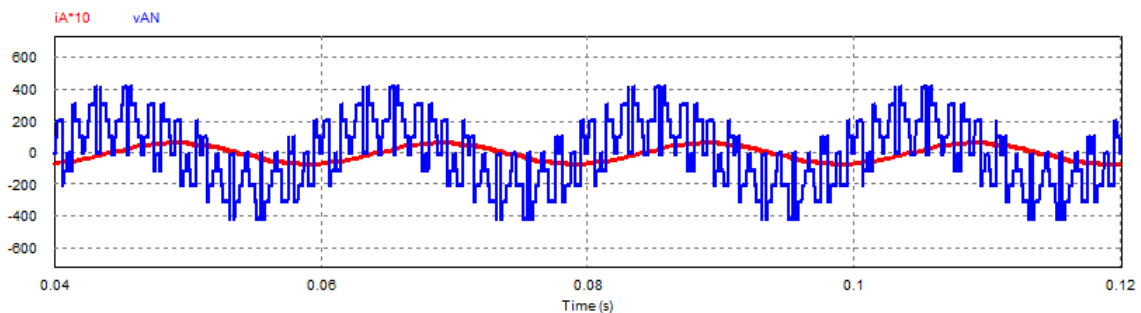


Figure III. 49 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant i_A penta-phasé.

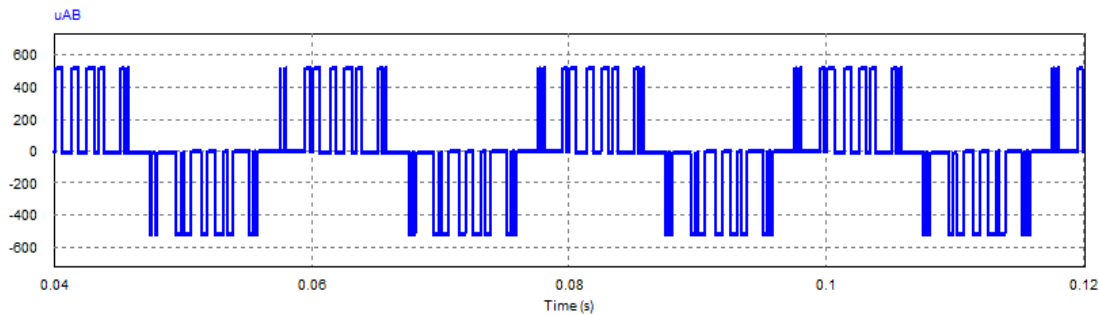


Figure III. 50 : Forme d’onde de la tension composée penta-phasé u_{AB} .

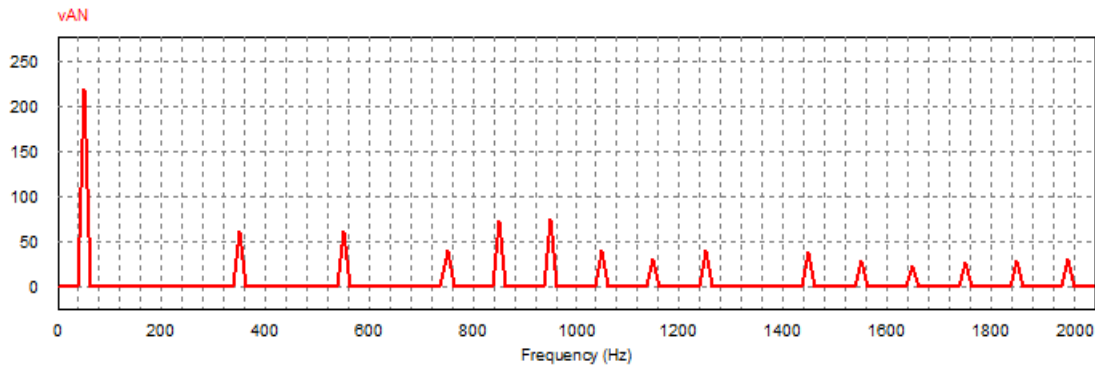


Figure III. 51 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN} .

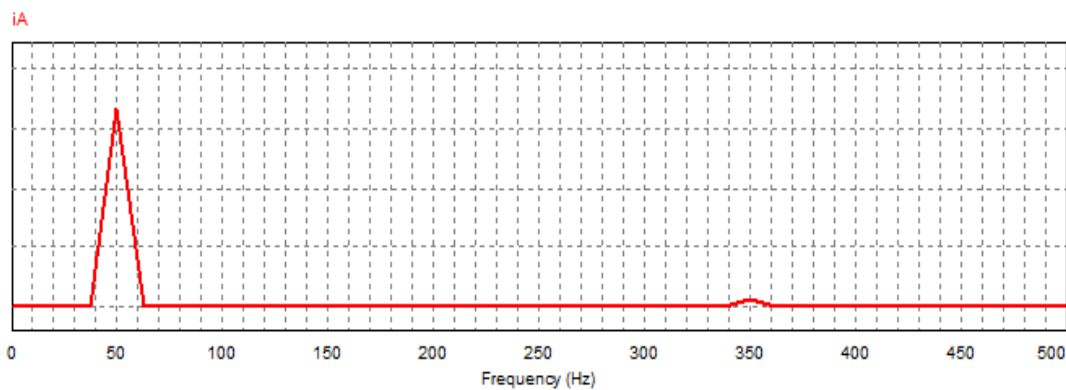


Figure III. 52 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l’élimination de l’harmonique 5 et la présence de familles d’harmoniques aux multiples de 5.

Les harmoniques du courant i_A sont tous repoussés jusqu’au 35^{ème}.

Le Tableau III.11 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 12 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	6.42	4.69
V_{AN} (V)	92.33	210.75
u_{AB} (V)	125.67	292.57

Pour $f_{port}=12*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

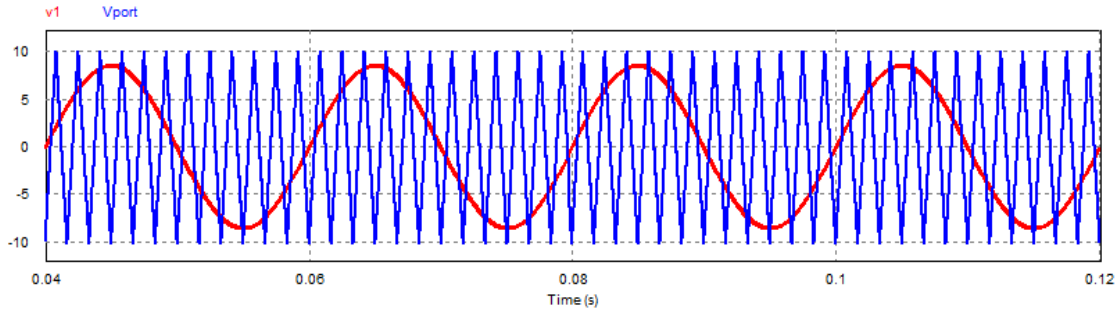


Figure III. 53 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

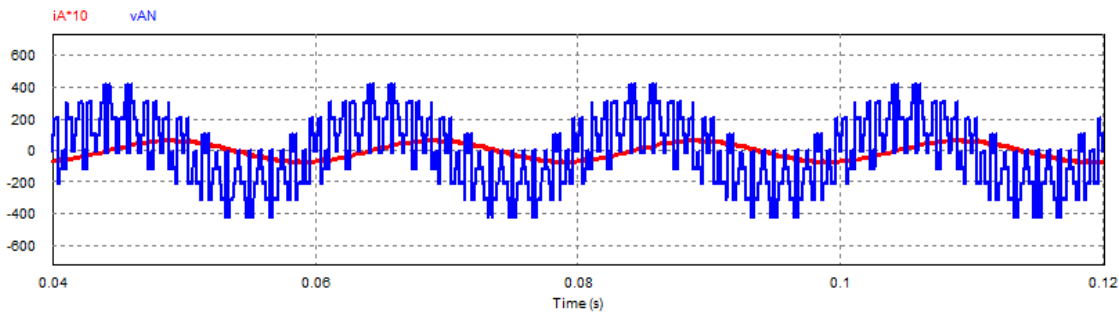


Figure III. 54 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) penta-phasé.

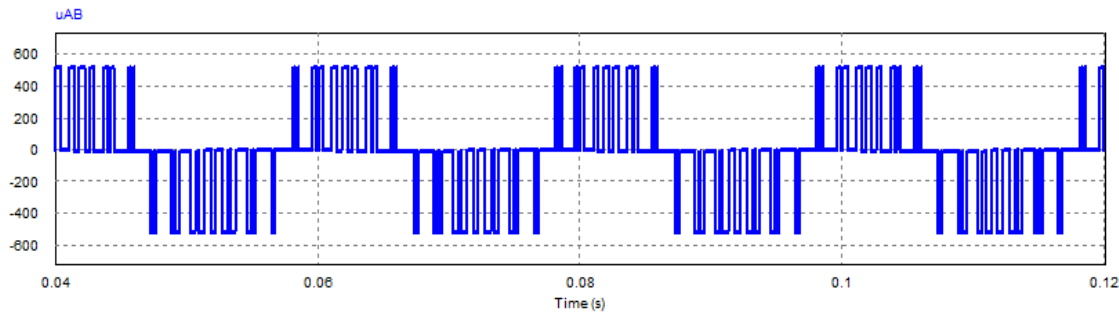


Figure III. 55 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB} .

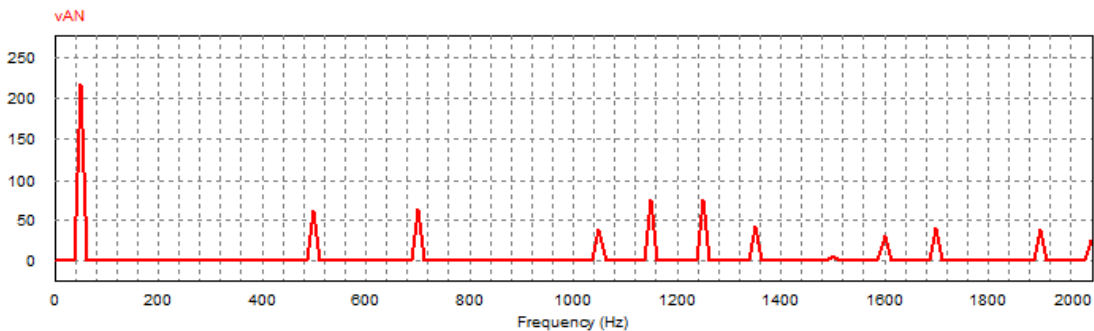


Figure III. 56 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN} .

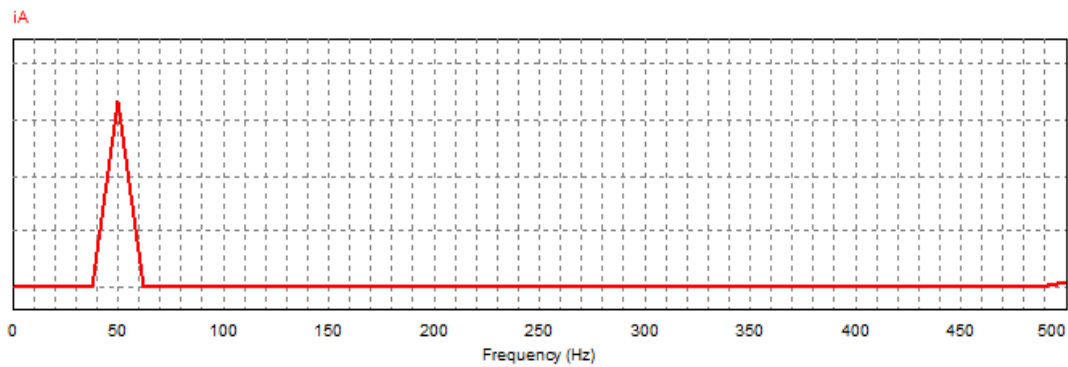


Figure III. 57 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l'élimination de l'harmonique 5 et la présence de familles d'harmoniques aux multiples de 5 repoussées.

Les harmoniques du courant i_A sont tous repoussés jusqu'au 50^{ème}.

Le tableau III.12 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 13 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	4.76	4.69
V_{AN} (V)	92.39	209.84
u_{AB} (V)	124.53	289.85

Pour $f_{port}=15*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

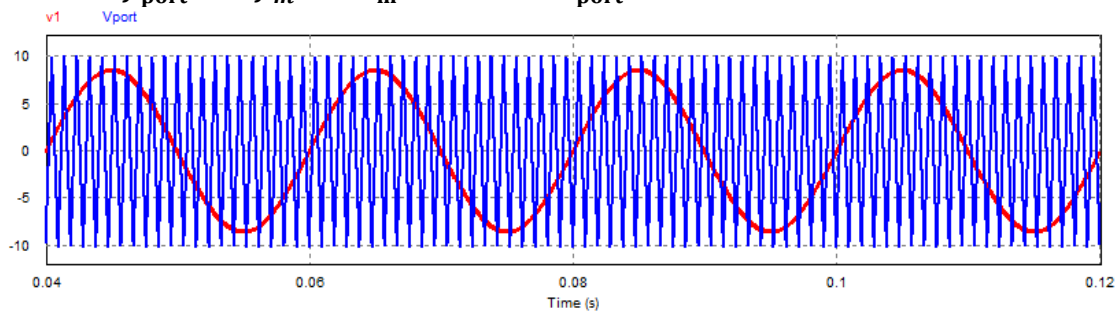


Figure III. 58 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

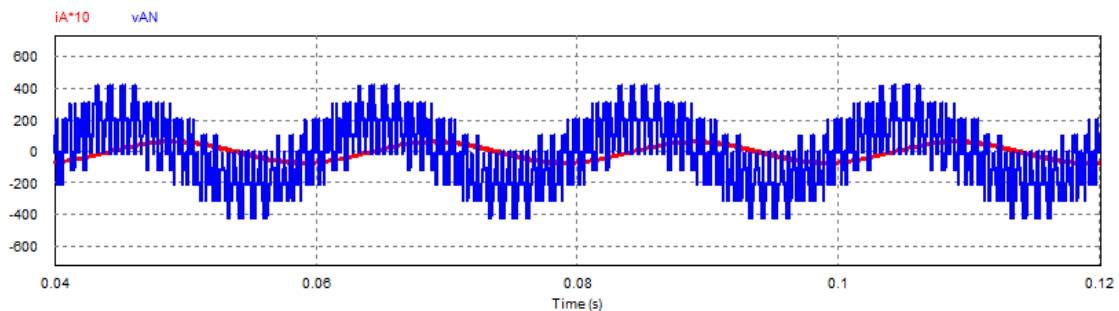


Figure III. 59 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) penta-phasé.

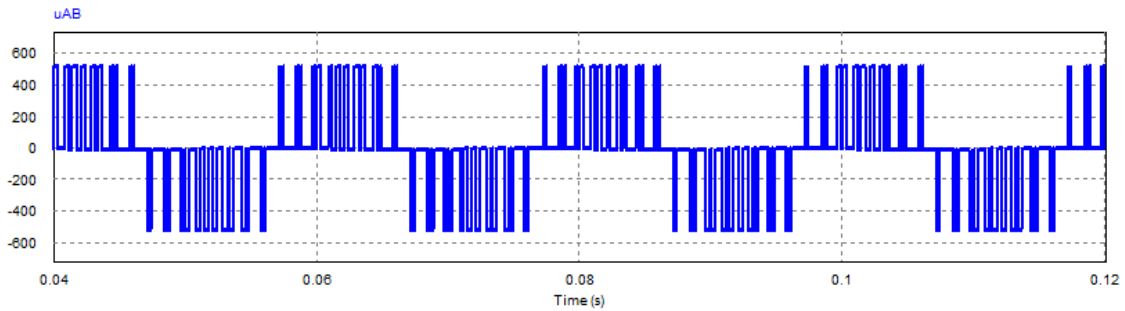


Figure III. 60 : Forme d’onde de la tension composée penta-phasé u_{AB} .

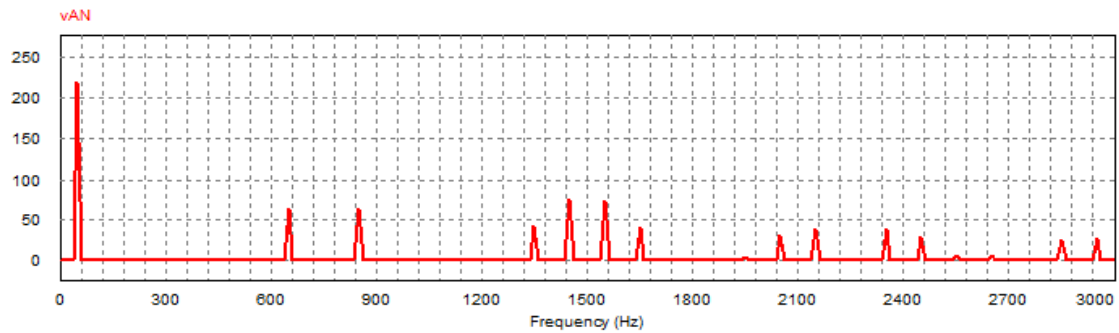


Figure III. 61 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN} .

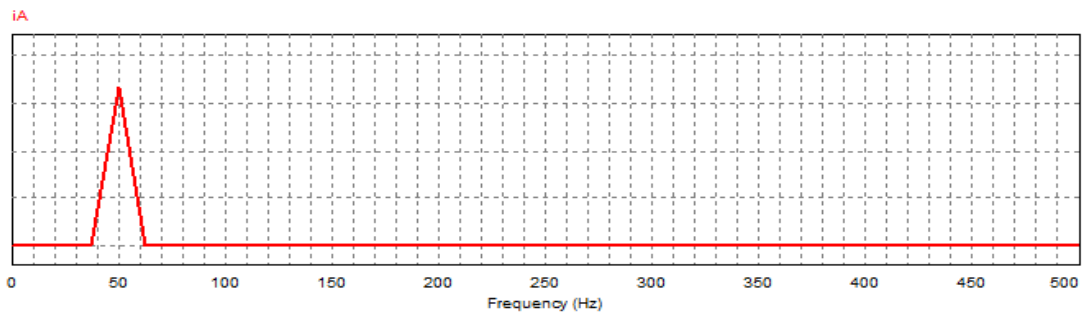


Figure III. 62 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l’élimination de l’harmonique 5 et la présence de familles d’harmoniques aux multiples de 5 repoussées.

Les harmoniques du courant i_A sont tous repoussés.

Le tableau III.13 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 14 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	3.83	4.69
V_{AN} (V)	91.72	209.92
u_{AB} (V)	124.74	290.76

Pour $f_{port}=21*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

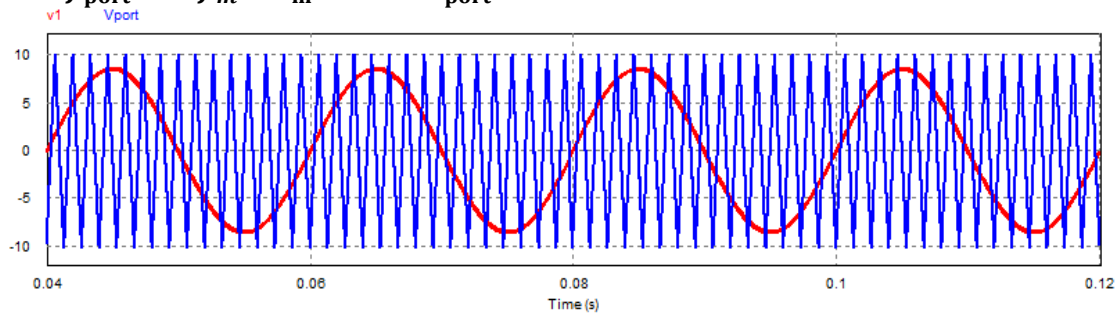


Figure III. 63 : Forme d'onde du signal penta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

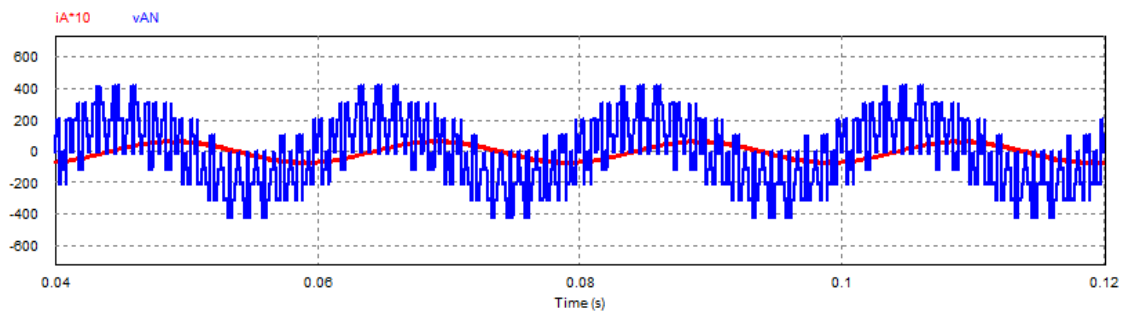


Figure III. 64 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) penta-phasé.

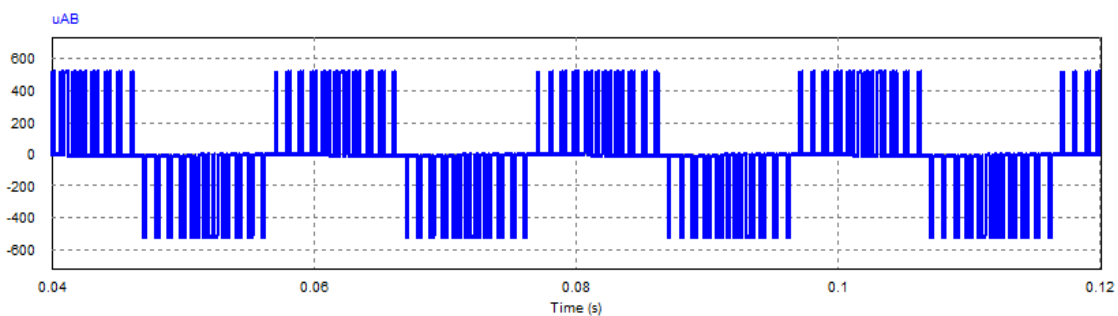


Figure III. 65 : Forme d'onde de la tension composée penta-phasé u_{AB} .

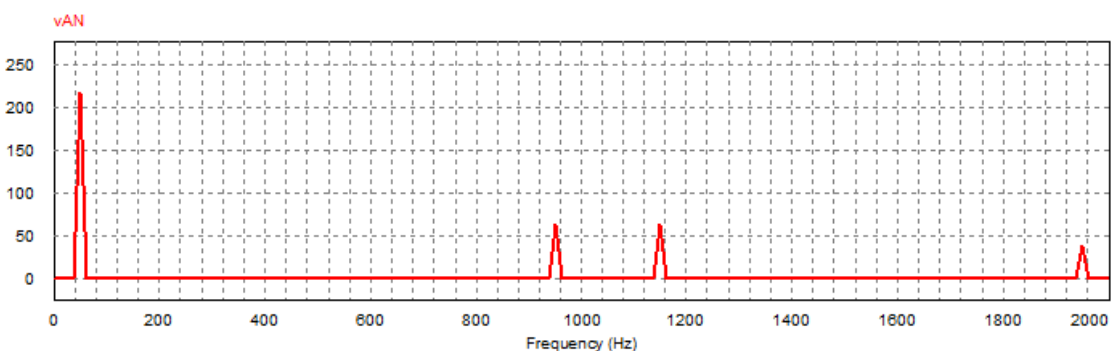


Figure III. 66 : Spectre harmonique de la tension simple penta-phasé V_{AN} .

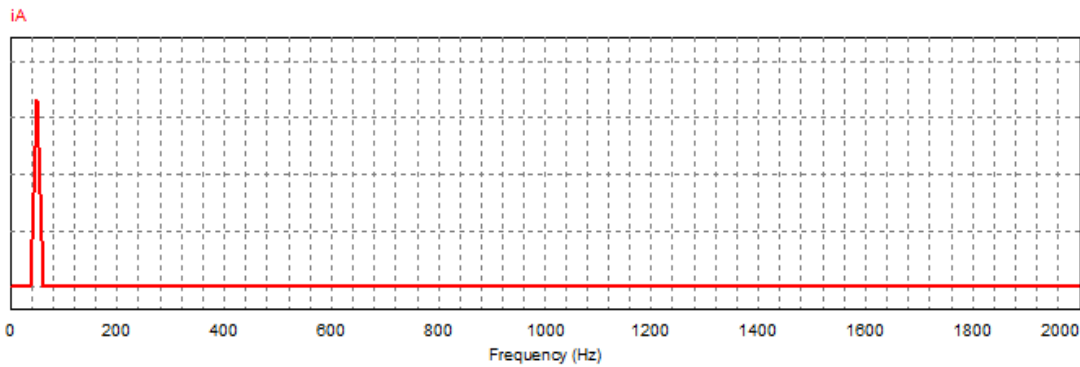


Figure III. 67 : Spectre harmonique du courant penta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l'élimination de l'harmonique 5 et la présence de familles d'harmoniques aux multiples de 5 repoussées.

Les harmoniques du courant i_A sont tous repoussés.

Le tableau III.14 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 15 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	2.83	4.69
V_{AN} (V)	92.72	209.8
u_{AB} (V)	125.04	290.31

On fixe la valeur de r à 0.85 et on fait varier la valeur de m tableau III.15 :

Tableau III. 16 : La valeur du $THD_{i_A}(\%)$ en fonction de m .

m	9	12	15	21
$THD_{i_A}(\%)$	6.42	4.76	3.83	2.83

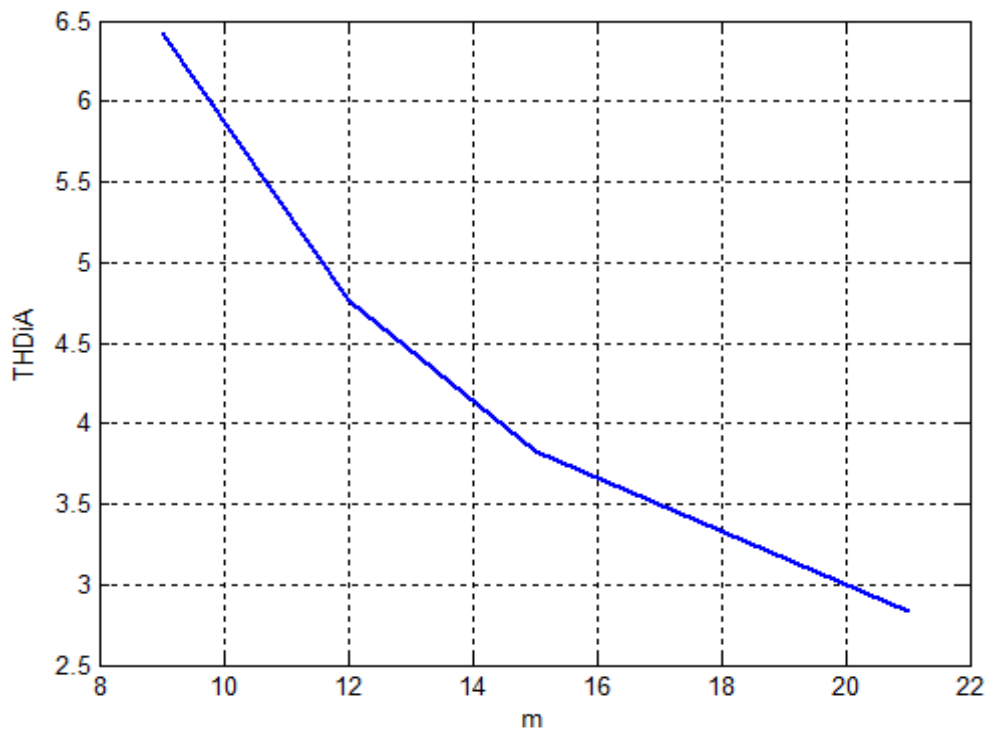


Figure III. 68 : Courbe du taux d’harmoniques THD_{i_A} en fonction du facteur de modulation en penta-phasé.

On fixe la valeur de m à 21 et on fait varier la valeur de r tableau III.16:

Tableau III. 17 : La tension $V_{AN(eff)}$ et $u_{AB(eff)}$ en fonction de r .

r	0.85	0.7	0.55	0.4
$V_{AN(eff)}$ (V)	209.8	189.5	169.1	143.6
$u_{AB(eff)}$ (V)	290.31	262.59	234.42	197.07

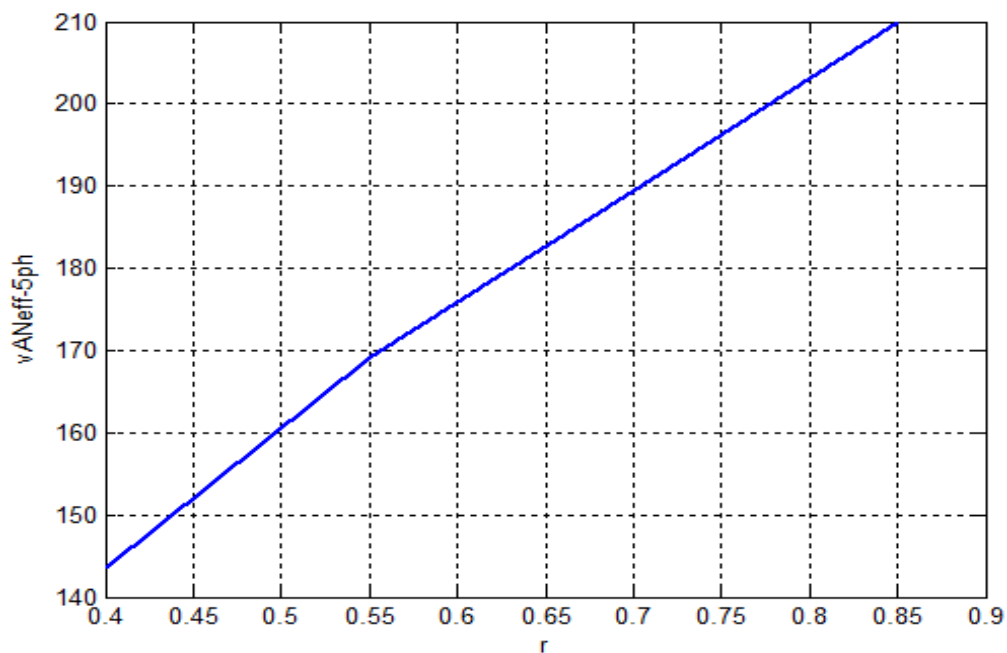


Figure III. 69 : Courbe de des valeurs efficaces penta-phasé $V_{AN(eff)}$ en fonction du facteur de r .

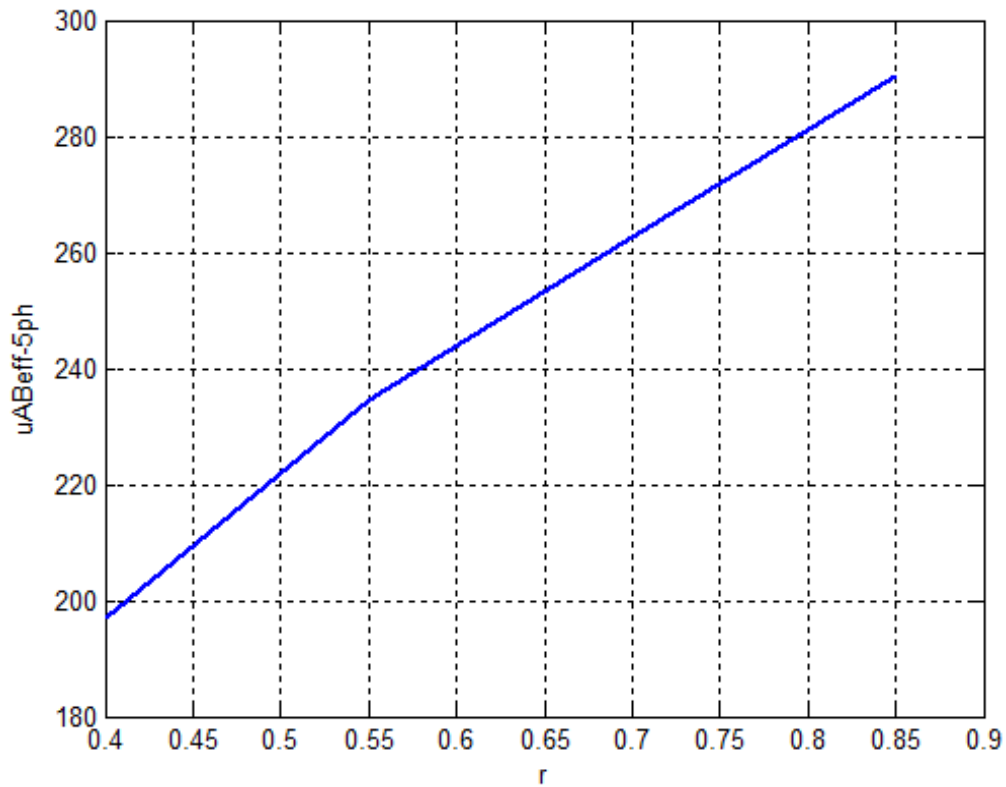


Figure III. 70 : Courbe de des valeurs efficaces penta-phasé $u_{AB_{(eff)}}$ en fonction du facteur de r .

D'après la figure III.68 on constate que l'augmentation du facteur de modulation m entraîne la diminution du taux de distorsion harmoniques contrairement à la figure III.69 et la figure III.70 qui nous montre que l'augmentation du facteur r entraîne l'augmentation de la tension efficace simple $V_{AN_{(eff)}}$ et de la tension $u_{AB_{(eff)}}$.

III.7.3 Un onduleur hepta-phasé

Pour $f_{port}=9*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

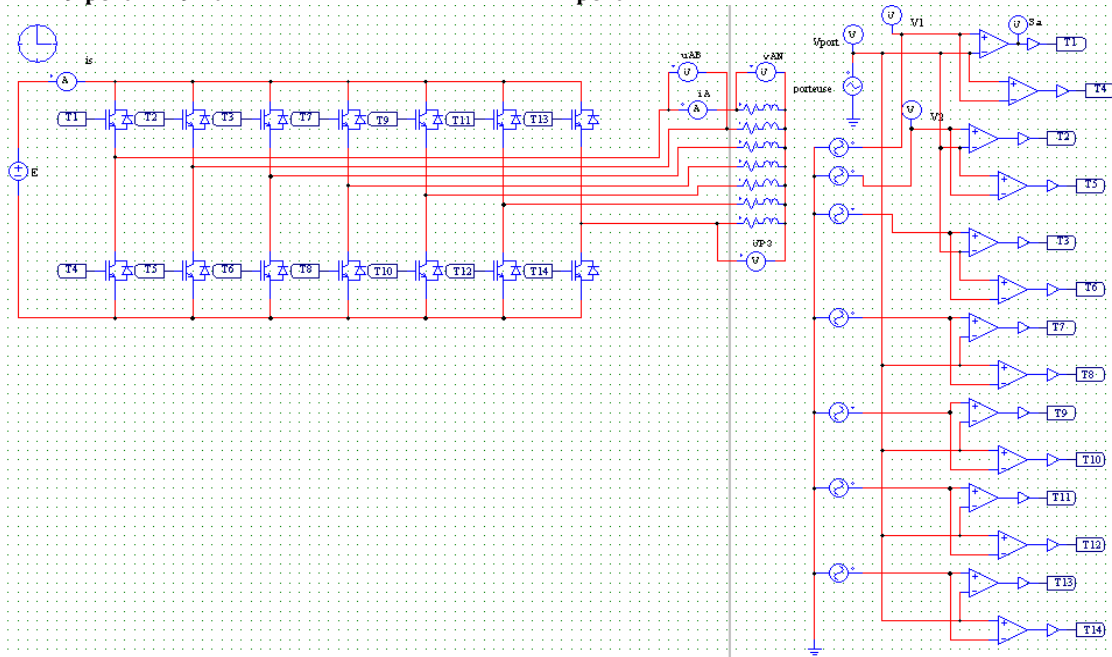


Figure III. 71 : Onduleur hepta-phasé commandé par la MLI sinus-triangle.

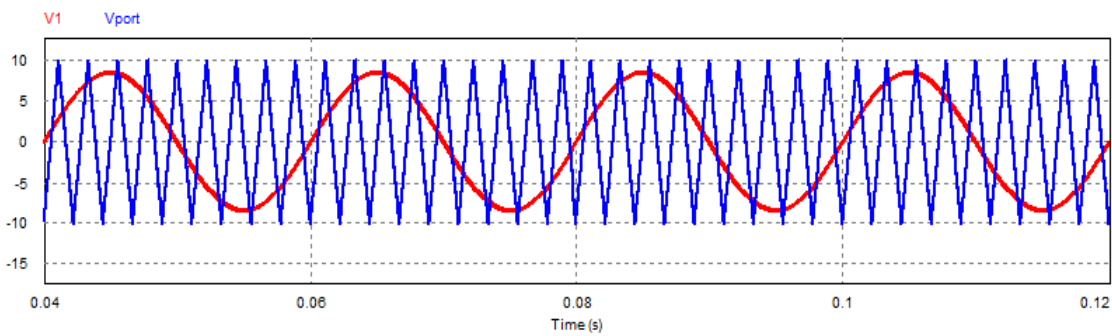


Figure III. 72 : Forme d'onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

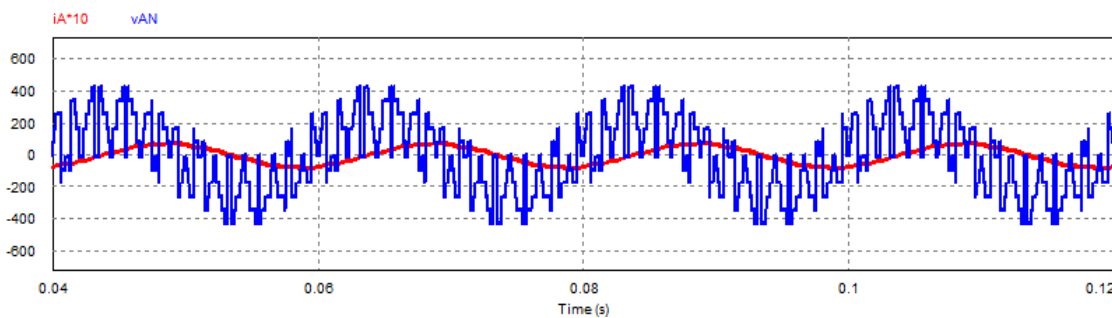


Figure III. 73 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) hepta-phasé .

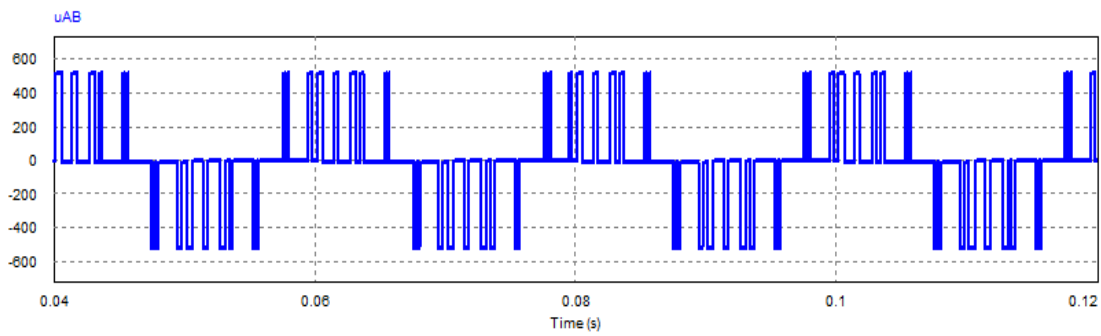


Figure III. 74 : Forme d'onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB} .

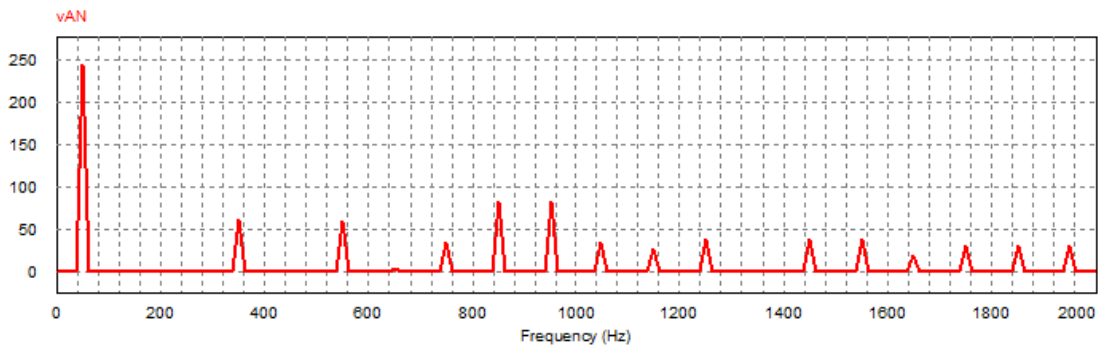


Figure III. 75 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN} .

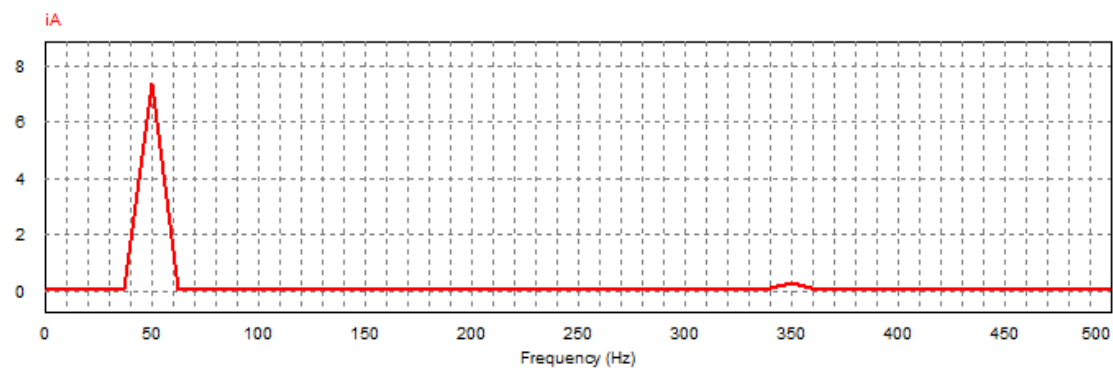


Figure III. 76 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l'élimination de l'harmonique 7 et la présence de familles d'harmoniques aux multiples de 7.

Le courant i_A contient l'harmonique 35.

Le tableau III.17 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 18 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	5.77	5.22
V_{AN} (V)	84.65	224.83
u_{AB} (V)	158.63	250.23

Pour $f_{port}=12*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

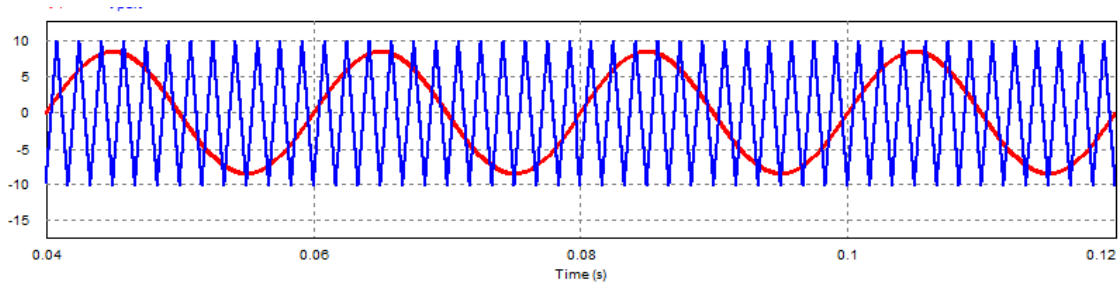


Figure III. 77 : Forme d'onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

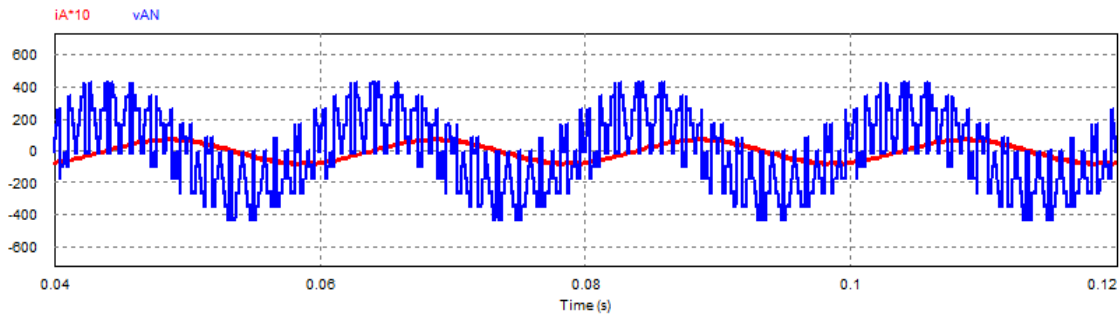


Figure III. 78 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) hepta-phasé .

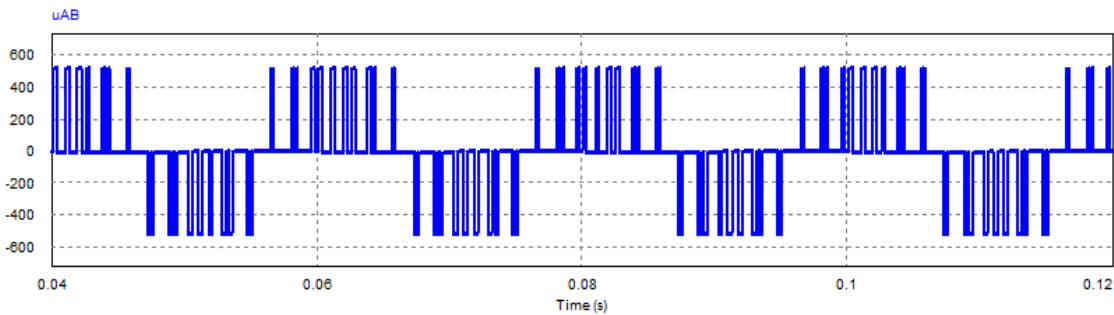


Figure III. 79 : Forme d'onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB} .

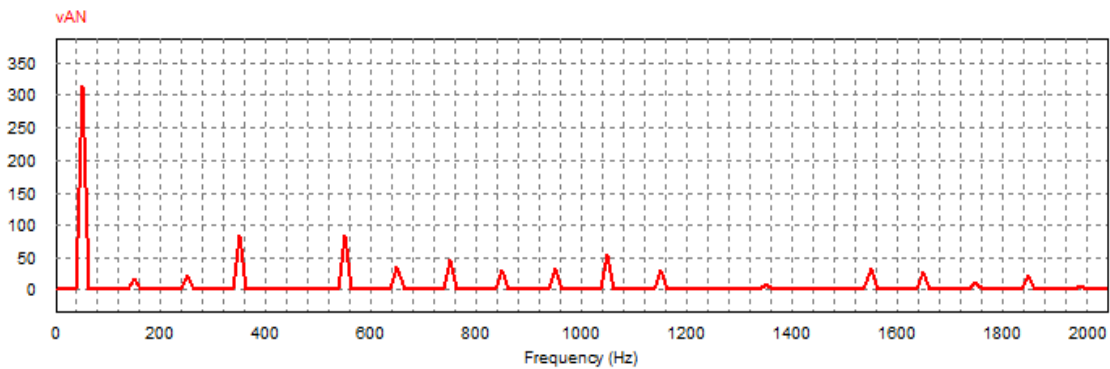


Figure III. 80 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN} .

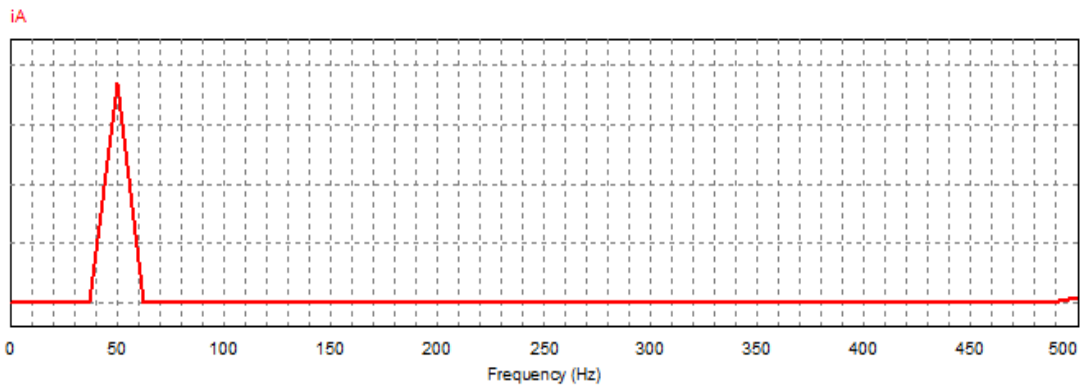


Figure III. 81 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l'élimination de l'harmonique 7 et la présence de familles d'harmoniques aux multiples de 7 repoussées.

Les harmoniques du courant i_A sont tous repoussés jusqu'au 50^{ème}.

Le tableau III.18 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 19 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	4.27	5.22
V_{AN} (V)	84.76	225.05
u_{AB} (V)	156.62	248.64

Pour $f_{port}=15*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

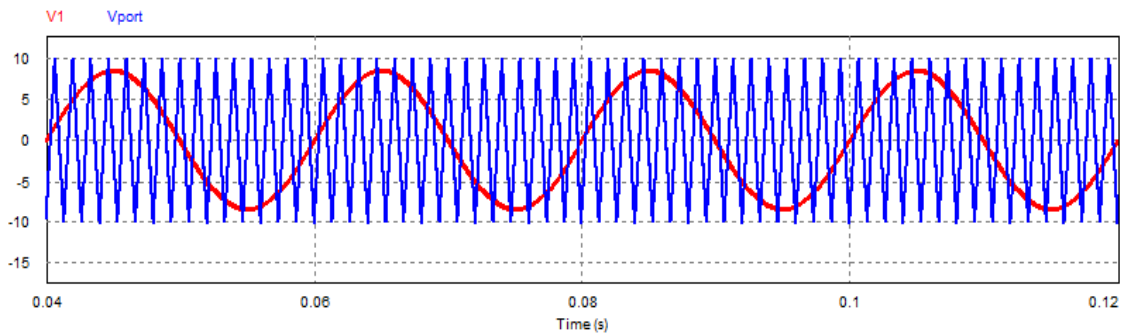


Figure III. 82 : Forme d'onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

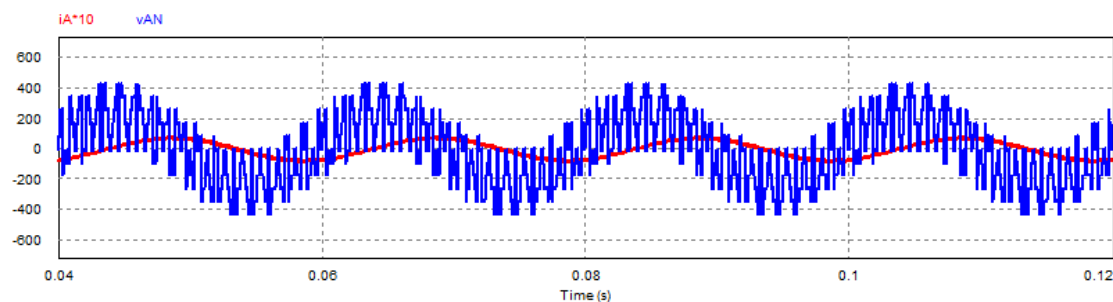


Figure III. 83 : Forme d'onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) hepta-phasé .

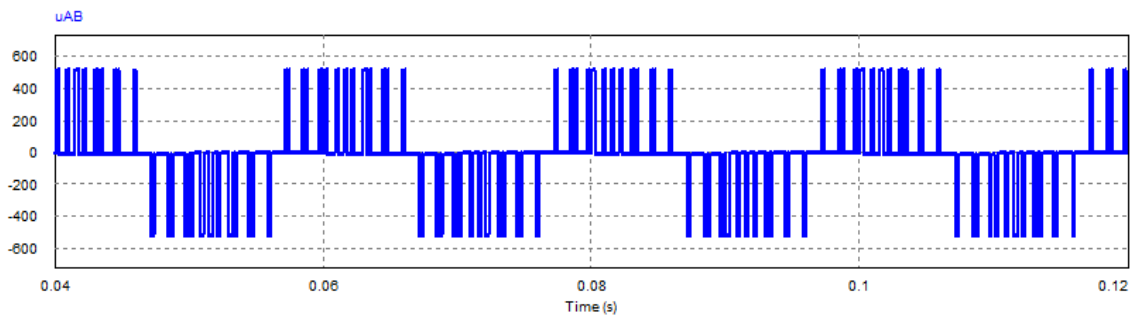


Figure III. 84 : Forme d’onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB} .

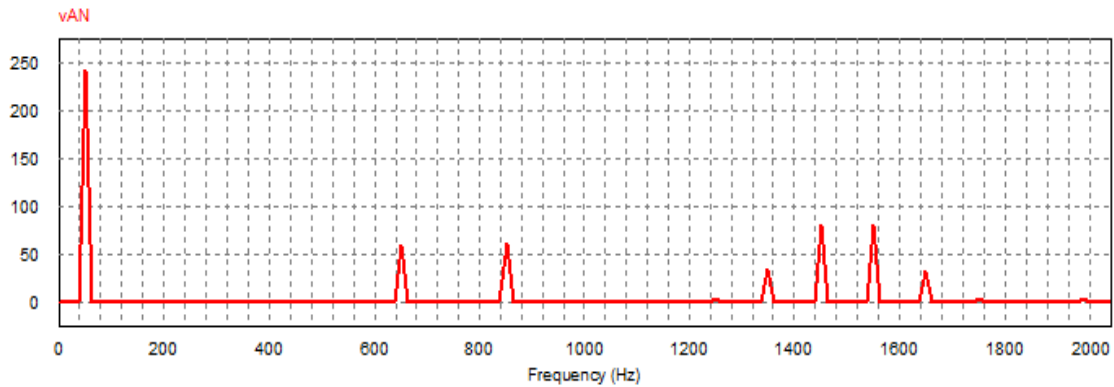


Figure III. 85 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN} .

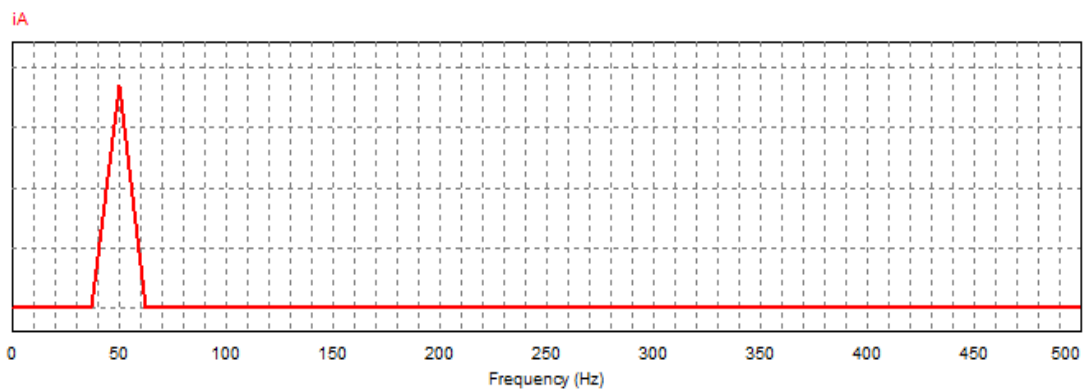


Figure III. 86 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

La tension V_{AN} est caractérisée par l’élimination de l’harmonique 7 et la présence de familles d’harmoniques aux multiples de 7 repoussées.

Les harmoniques du courant i_A sont tous repoussés.

Le tableau III.19 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 20 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle.

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
I_A (A)	3.46	5.21
V_{AN} (V)	84.76	225.15
u_{AB} (V)	156.79	250.23

Pour $f_{port}=21*f_m$ $V_m=8.5V$ $V_{port}=10V$

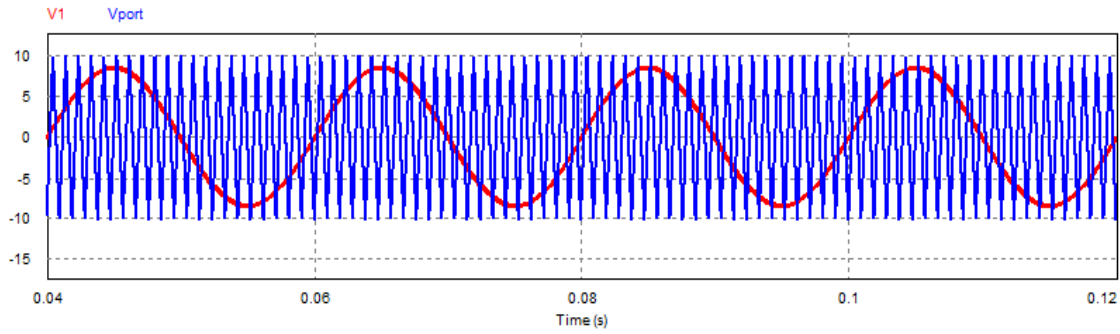


Figure III. 87 : Forme d’onde du signal hepta-phasé de référence V_1 et celui de la porteuse V_{port} .

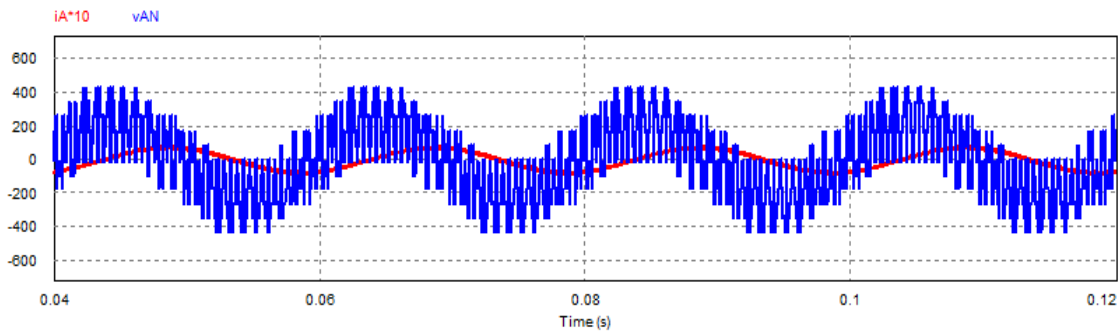


Figure III. 88 : Forme d’onde de la tension simple V_{AN} et du courant (i_A*10) hepta-phasé.

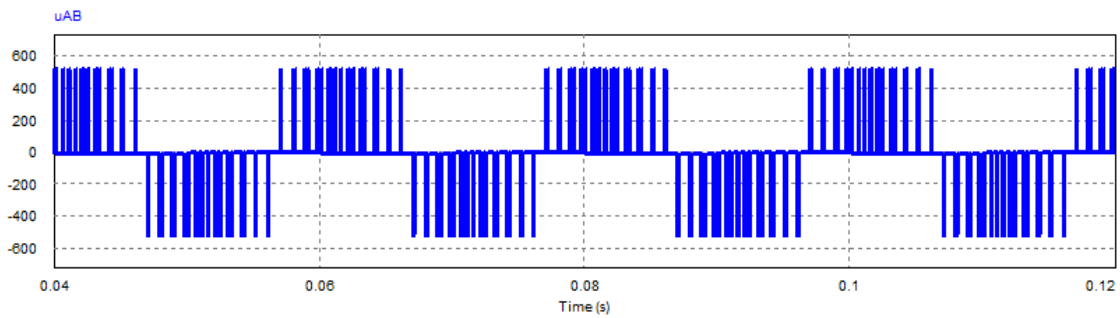


Figure III. 89 : Forme d’onde de la tension composée hepta-phasé u_{AB} .

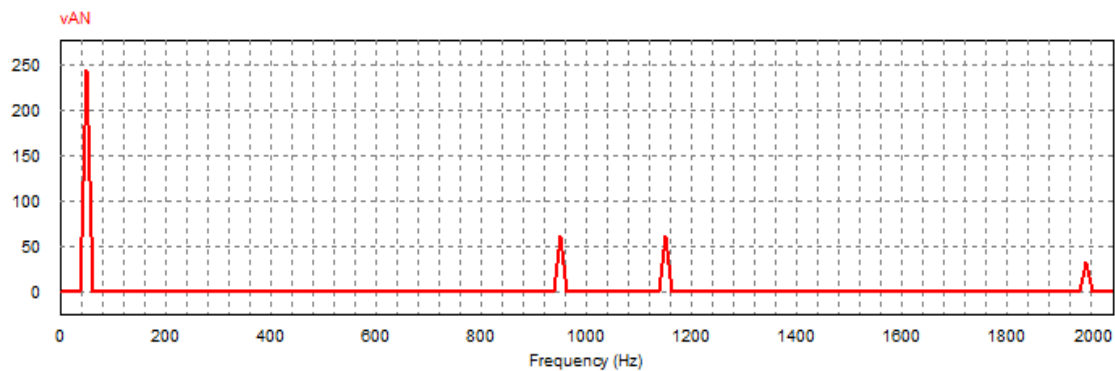


Figure III. 90 : Spectre harmonique de la tension simple hepta-phasé V_{AN} .

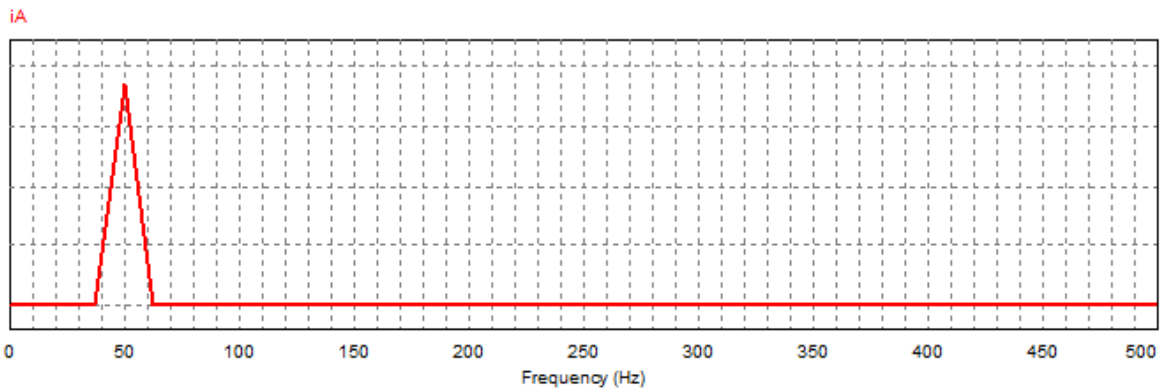


Figure III. 91 : Spectre harmonique du courant hepta-phasé i_A .

Interprétation des résultats

Le tableau III.20 contient les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} :

Tableau III. 21 : les THD et les valeurs efficaces de i_A , V_{AN} et u_{AB} pour la commande sinus-triangle

Paramètres	THD (%)	Valeur efficace
i_A (A)	2.56	5.21
V_{AN} (V)	84.76	224.65
u_{AB} (V)	158.24	248.11

On fixe la valeur de r à 0.85 et on fait varier la valeur de m :

Tableau III. 22 : La valeur THD_{i_A} (%) en fonction de m .

m	9	12	15	21
THD_{i_A} (%)	6.62	4.12	3.26	2.31

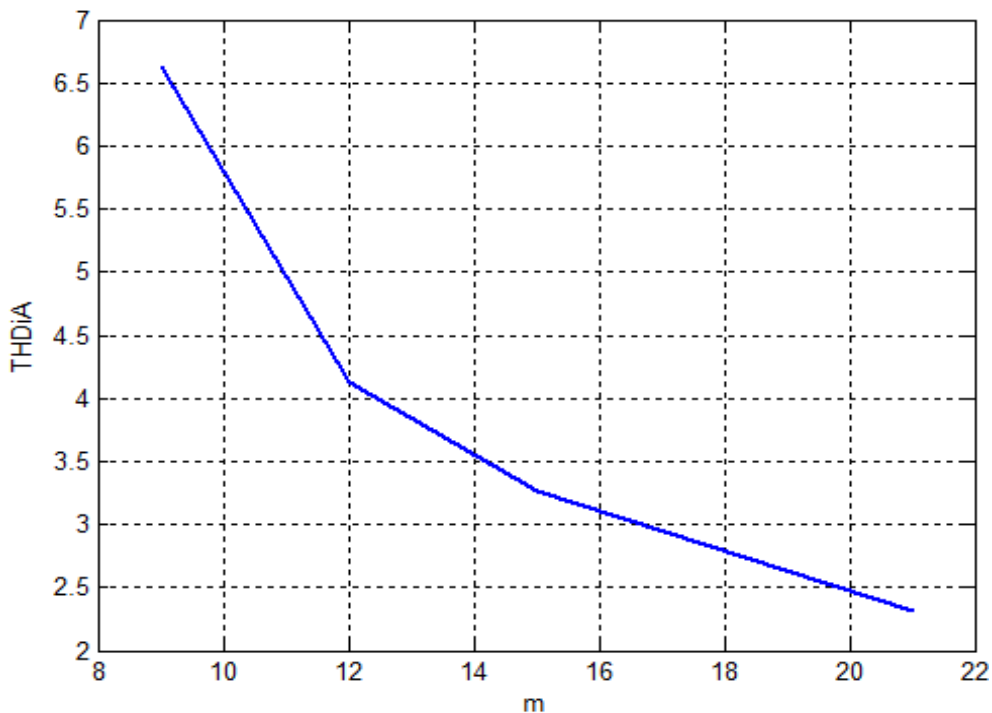


Figure III. 92 : Courbe du taux d'harmoniques THD_{i_A} en fonction du facteur de modulation en hepta-phasé .

On fixe la valeur de m à 21 et on fait varier la valeur de r tableau III.22:

Tableau III. 23 : La tension $V_{AN(eff)}$ et $u_{AB(eff)}$ en fonction de r .

r	0.85	0.7	0.55	0.4
$V_{AN(eff)}$ (V)	224.65	203.35	127.84	153.25
$u_{AB(eff)}$ (V)	248.11	226.1	201.71	168.13

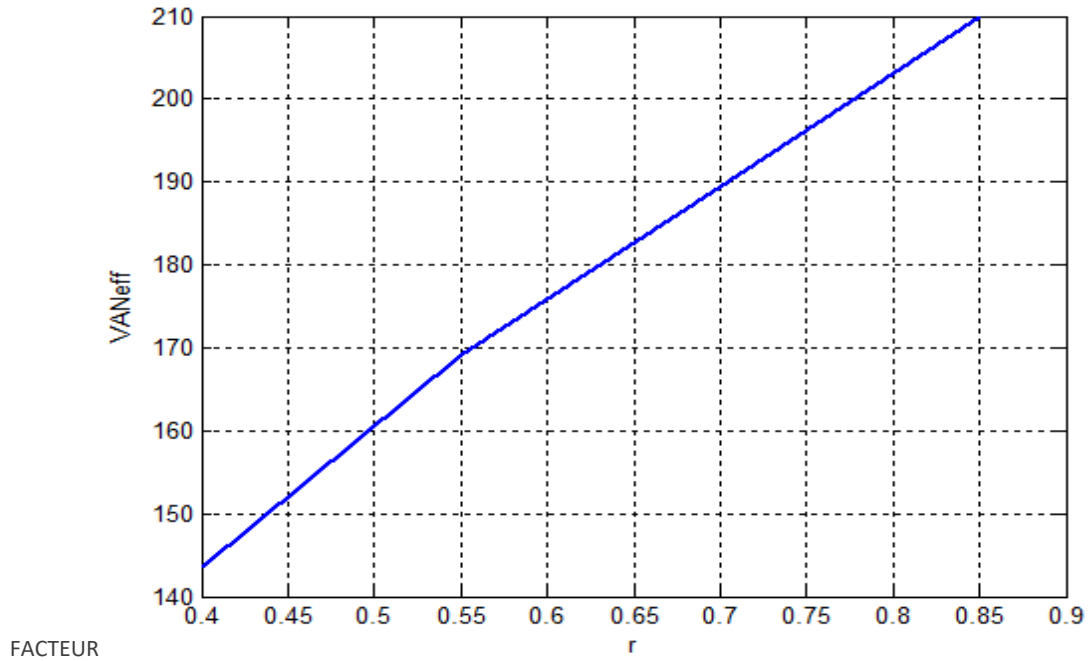


Figure III. 93 : Courbe de des valeurs efficaces hepta-phasé $V_{AN(eff)}$ en fonction du de r .

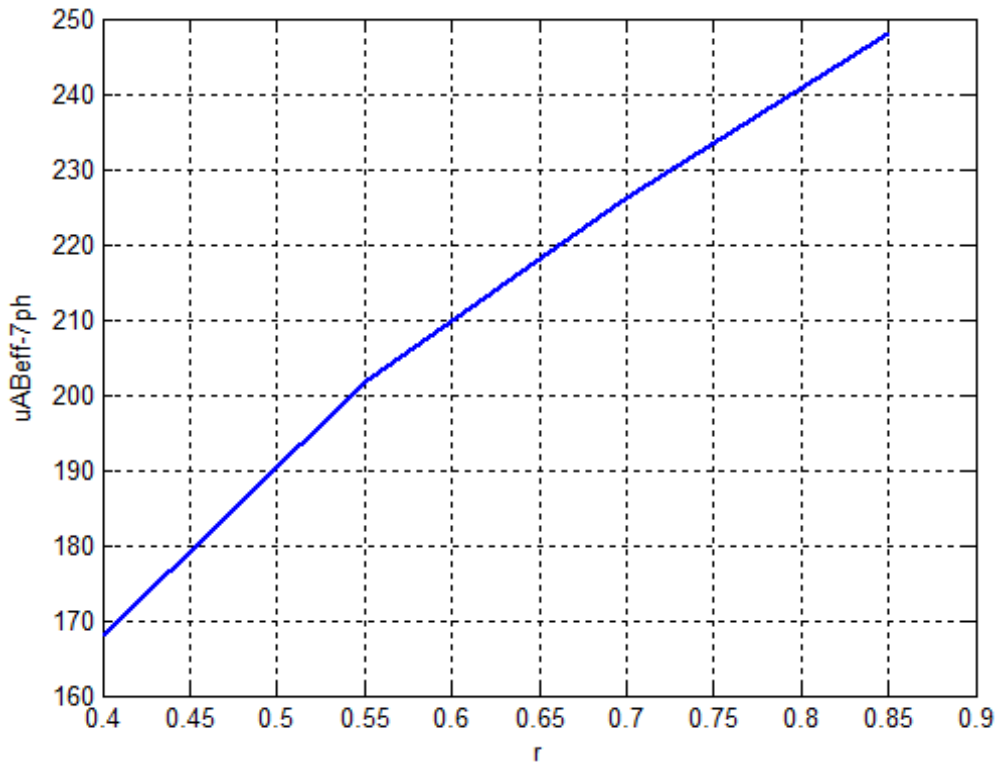


Figure III. 94 : Courbe de des valeurs efficaces hepta-phasé $u_{AB(eff)}$ en fonction du facteur de r .

D'après la figure III.92 on constate que l'augmentation du facteur de modulation m entraîne la diminution du taux de distorsion harmoniques contrairement à la figure III.93 et III.94 qui nous montrent que l'augmentation du facteur r entraîne l'augmentation de la tension efficace simple $V_{AN(eff)}$ et de la tension composée $u_{AB(eff)}$.

Pour meilleure comparaison des performances entre les trois onduleurs on s'aidera de la figure III.95, III.96 et III.97.

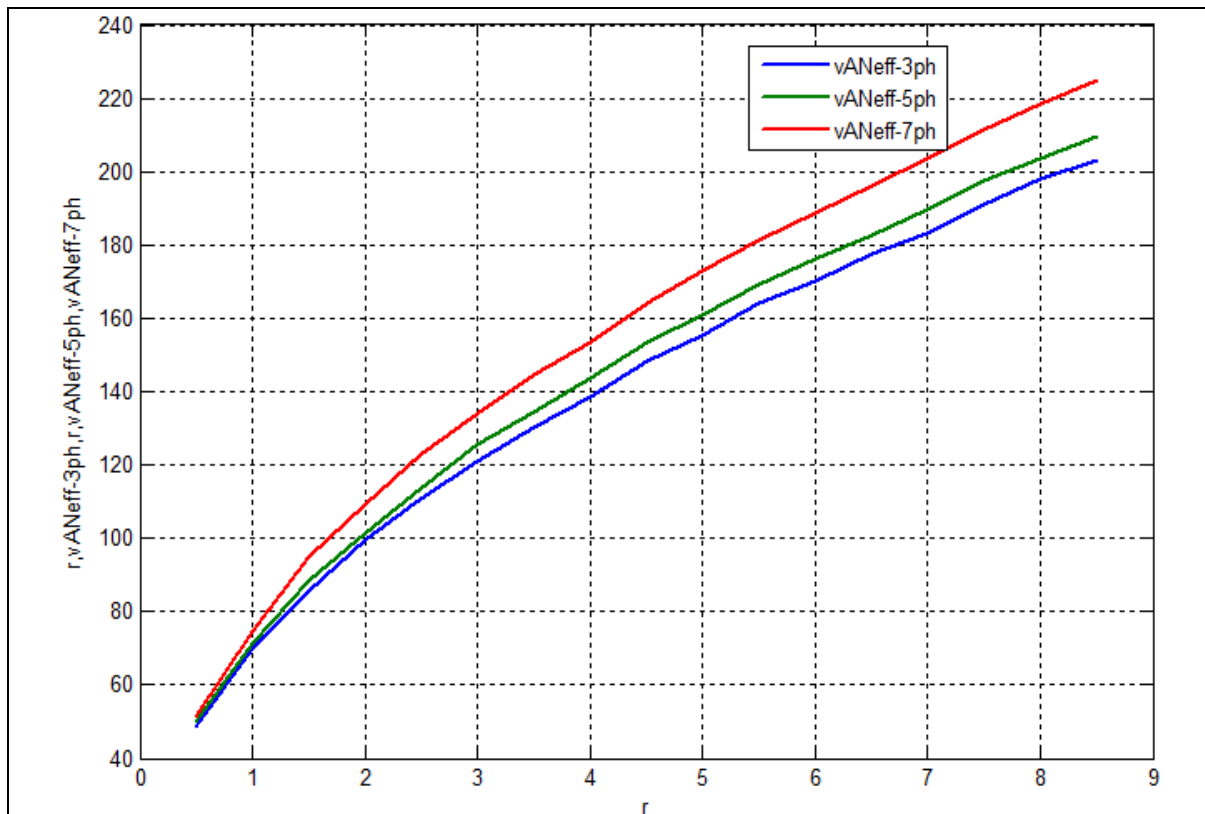


Figure III. 95 : Courbes des tensions simples V_{AN} en fonction du facteur r .

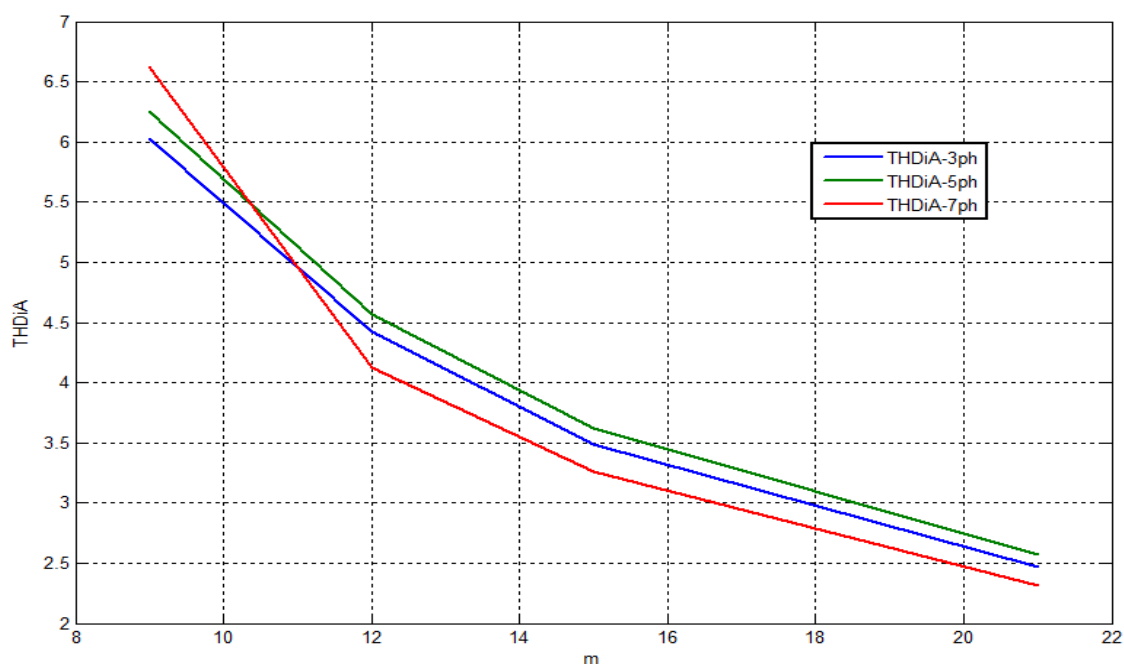


Figure III. 96 : Courbes des taux de distorsion d'harmoniques en fonction du facteur de forme m .

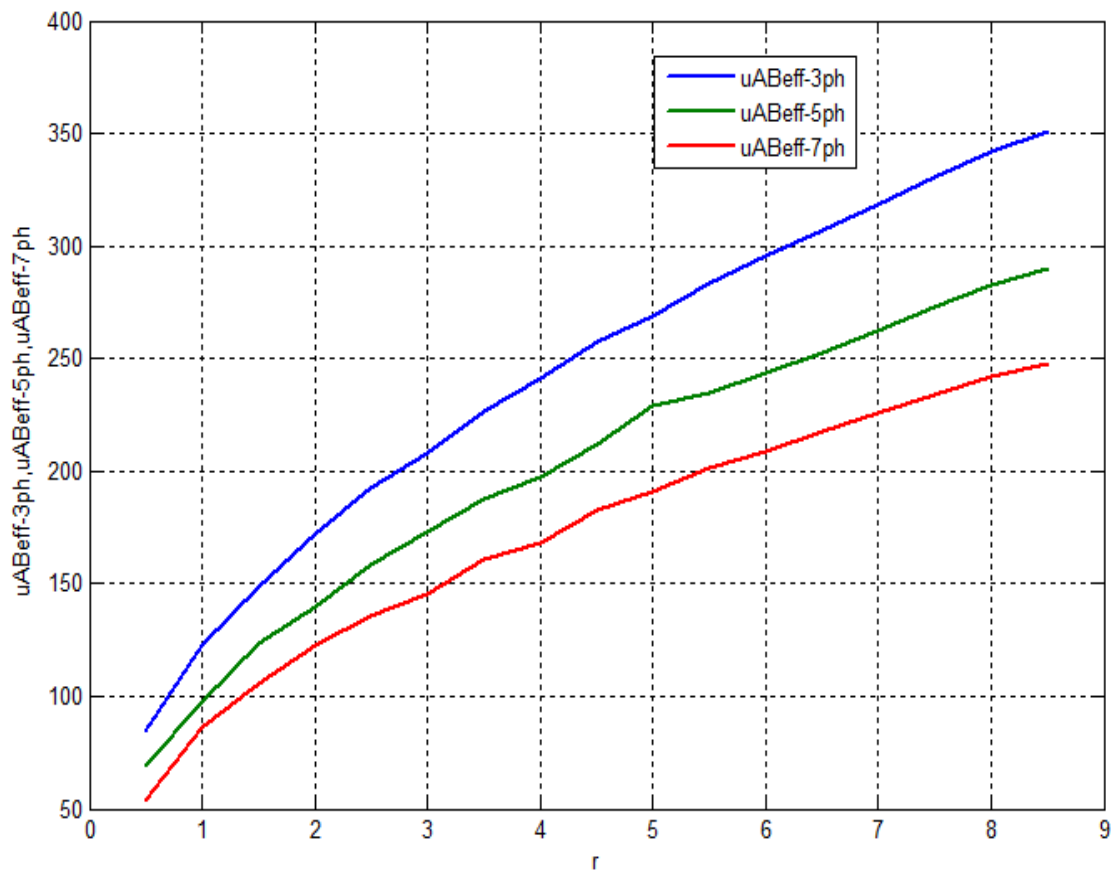


Figure III. 97 : Courbes des tensions simples u_{AB} en fonction du facteur r .

D'après les deux figures précédente (figure III.95 et figure III.96) plus on augmente le nombre de phases on remarque :

- ✓ Augmentation de la tension efficace simple avec l'augmentation du r .
- ✓ Réduction du taux d'harmoniques avec l'augmentation du facteur de modulation.

D'après la figure III.97 : la tension composée de l'onduleur triphasée est plus élevée que celles de l'onduleur penta-phasé et hexa-phasé.

III.8 Le rapport entre tension composée et la tension simple :

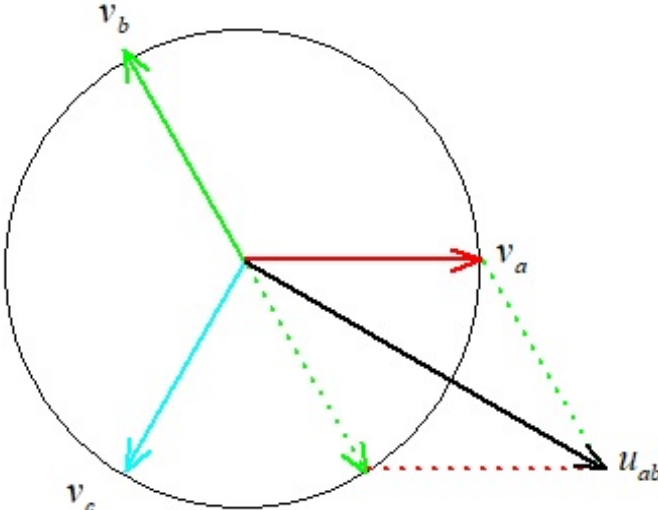


Figure III. 98 : Représentation graphique des trois phases.

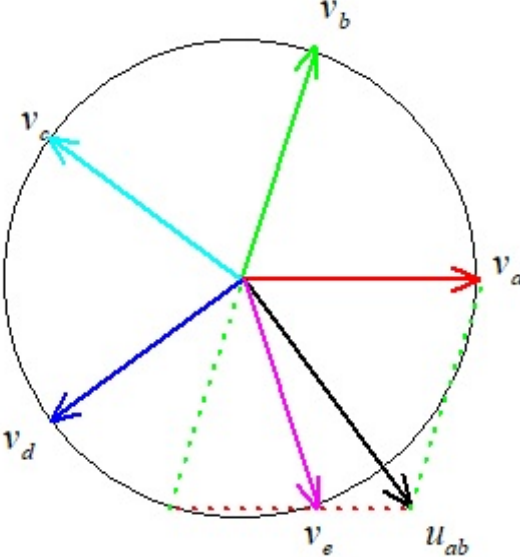


Figure III. 99 : Représentation graphique des cinq phases.

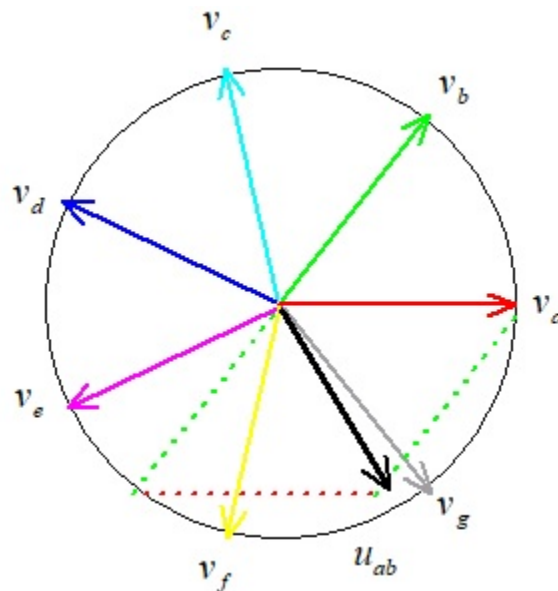


Figure III. 100 : Représentation graphique des sept phases.

On a utilisé les figures III.98, III.99 et III.100 pour la détermination du rapport tension composée et tension simple pour l'onduleur triphasé, penta-phasé et hexa-phasé et cela nous a mené à :

- Rapport $(\frac{u_{AB}}{V_{AN}})_{3ph}$ nous donne la valeur de 1.73
- Rapport $(\frac{u_{AB}}{V_{AN}})_{5ph}$ nous donne la valeur de 1.18
- Rapport $(\frac{u_{AB}}{V_{AN}})_{7ph}$ nous donne la valeur de 0.88

Contrairement aux valeurs obtenues avec les tensions de nos simulations :

1. Rapport $(\frac{u_{AB}}{V_{AN}})_{3ph}$ nous donne la valeur de 1.72
2. Rapport $(\frac{u_{AB}}{V_{AN}})_{5ph}$ nous donne la valeur de 1.38
3. Rapport $(\frac{u_{AB}}{V_{AN}})_{7ph}$ nous donne la valeur de 1.11

Pour le triphasé (voir annexe 1) :

$$\text{On a : } V_A = V_m * \sin(\omega t) \tag{III.52}$$

$$\text{et } V_B = V_m * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \tag{III.53}$$

$$\text{d'où } u_{AB} = V_A - V_B \tag{III.54}$$

$$\text{Donc } u_{AB} = 1.73 * V_m * \sin(\omega t + \frac{2\pi}{6}) \tag{III.55}$$

Pour le pentaphasé (voir annexe 2) :

$$\text{On a : } V_A = V_m * \sin(\omega t) \quad (\text{III.56})$$

$$\text{et } V_B = V_m * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{5}) \quad (\text{III.57})$$

$$\text{d'où } u_{AB} = V_A - V_B \quad (\text{III.58})$$

$$\text{Donc } u_{AB} = 1.17 * V_m * \sin(\omega t + \frac{3\pi}{10}) \quad (\text{III.59})$$

Pour le heptaphasé (voir annexe 3):

$$\text{On a : } V_A = V_m * \sin(\omega t) \quad (\text{III.60})$$

$$\text{et } V_B = V_m * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{7}) \quad (\text{III.61})$$

$$\text{d'où } u_{AB} = V_A - V_B \quad (\text{III.62})$$

$$\text{Donc } u_{AB} = 0.86 * V_m * \sin(\omega t + \frac{5\pi}{14}) \quad (\text{III.63})$$

- Cette différence entre ces rapports est dû à la présence d'harmoniques.

Conclusion

Les figures précédentes montrent les tensions simple V_{AN} , les tensions composée u_{AB} ainsi que les courants I_A d'un onduleur triphasé, penta-phasé et hexa-phasé ainsi que leurs analyses spectrales pour plusieurs valeurs de r et de m .

La valeur du fondamental augmente avec l'augmentation de la valeur de m pour le courant I_A ainsi que pour V_{AN} .

On note que la triangulo-sinusoidale n'a qu'une seule porteuse de ce fait les harmoniques se regroupent en famille centrée autour des fréquences multiples de la fréquence f_{port} tel que $f_{port}=mf_{port}$, la distance entre elles est la fréquence du fondamental ce qui veut dire que les harmoniques sont rangées en familles centrées au tour des fréquences multiples de celle du fondamental.

La première famille d'harmonique est centrée respectivement selon la valeur de m qui est 9, 12,15 et 21 pour chaque cas, ce qui nous amène à conclure qu'à chaque augmentation de la valeur de m les harmoniques sont repoussés vers un rang plus élevé et aussi que les harmoniques de tension de rang multiples de trois sont nuls.

Conclusion générale

Le fonctionnement à vitesse variable procure des avantages indéniables aux installations industrielles. Raison pour laquelle, la majorité des installations récentes sont dotées de variateurs de fréquence. Durant notre séjour au complexe SPA « Général Emballage » nous nous sommes familiarisés avec les différents variateurs du complexe, surtout avec l'apport de l'équipe d'ingénieurs sur site,

Une étude approfondie de l'ALTIVAR 31 a été réalisée. Cette partie a été muni à bien grâce à l'opération de la modification de l'installation de la machine VEGA plieuse-colleuse durant notre stage. Ceci nous a permis de configurer le variateur à plusieurs reprises car la machine a été hors production.

La partie théorique, modélisation et stratégies de commutation a été réalisée par la suite. L'implémentation virtuelle s'est faite dans l'environnement PSIM. Deux stratégies de commutation sont implémentées : la pleine onde et la triangulo-sinusoidale, sur trois structures de puissance.

Il est à noter que d'autres stratégies peuvent être implémentées et peuvent assurer le critère de minimisation des harmoniques d'une manière plus facile, mais nécessitera une implémentation numérique.

En fin, notre mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Annexe

Annexe

```
4 - Veff=1; % V
5 - Nph=3; % nombre de phases
6 - Dth=2*pi/Nph
7 - Dth_Deg=Dth*180/pi % en degré
8
9 - va=Veff*exp(i*0);
10 - vb=Veff*exp(i*Dth);
11 - vc=Veff*exp(2*i*Dth);
12
13 - Uab=va-vb;
14 - Ubc=vb-vc;
15 - Uca=vc-va;
16
17 - U=abs(Uab)
18 - Rapport_U=U/Veff
19
20 %
21 - Th_Uab=angle(Uab) % en rad
22 - Th_Uab_Deg=Th_Uab*180/pi % en degré
23 %
24 - Th_Ubc=angle(Ubc) % en rad
25 - Th_Ubc_Deg=Th_Ubc*180/pi % en degré
26 %
27 - Th_Uca=angle(Uca) % en rad
28 - Th_Uca_Deg=Th_Uca*180/pi % en degré
```

```
Dth =
      2.0944
```

```
Dth_Deg =
      120.0000
```

```
U =
      1.7321
```

```
Rapport_U =
      1.7321
```

```
Th_Uab =
     -0.5236
```

Th_Uab_Deg =

-30.0000

Th_Ubc =

1.5708

Th_Ubc_Deg =

90.0000

Th_Uca =

-2.6180

Th_Uca_Deg =

-150.0000

Annexe 1

```

4 - Veff=1; % V
5 - Nph=5; % nombre de phases
6 - Dth=2*pi/Nph
7 - Dth_Deg=Dth*180/pi % en degré
8
9 - va=Veff*exp(i*0);
10 - vb=Veff*exp(i*Dth);
11 - vc=Veff*exp(2*i*Dth);
12 - vd=Veff*exp(3*i*Dth);
13 - ve=Veff*exp(4*i*Dth);
14
15 - Uab=va-vb;
16 - Ubc=vb-vc;
17 - Ucd=vc-vd;
18 - Ude=vd-ve;
19
20 - U=abs(Uab)
21 - Rapport_U=U/Veff
22
23 %
24 - Th_Uab=angle(Uab) % en rad
25 - Th_Uab_Deg=Th_Uab*180/pi % en degré
26 %
27 - Th_Ubc=angle(Ubc) % en rad
28 - Th_Ubc_Deg=Th_Ubc*180/pi % en degré
29 %
30 - Th_Ucd=angle(Ucd) % en rad
31 - Th_Ucd_Deg=Th_Ucd*180/pi % en degré
32
33 - Th_Ude=angle(Ude) % en rad
34 - Th_Ude_Deg=Th_Ude*180/pi % en degré

```

```

Dth =
    1.2566

Dth_Deg =
    72

U =
    1.1756

Rapport_U =
    1.1756

Th_Uab =
   -0.9425

Th_Uab_Deg =
   -54

```

Th_Ubc =

0.3142

Th_Ubc_Deg =

18.0000

Th_Ucd =

1.5708

Th_Ucd_Deg =

90

Th_Ude =

2.8274

Th_Ude_Deg =

162

Annexe 2

```

4 - Veff=1; % V
5 - Nph=7; % nombre de phases
6 - Dth=2*pi/Nph
7 - Dth_Deg=Dth*180/pi % en degré
8
9 - va=Veff*exp(i*0);
10 - vb=Veff*exp(i*Dth);
11 - vc=Veff*exp(2*i*Dth);
12 - vd=Veff*exp(3*i*Dth);
13 - ve=Veff*exp(4*i*Dth);
14 - vf=Veff*exp(5*i*Dth);
15 - vg=Veff*exp(6*i*Dth);
16
17 %
18 - Uab=va-vb;
19 - Ubc=vb-vc;
20 - Ucd=vc-vd;
21 - Ude=vd-ve;
22 - Uef=ve-vf;
23 - Ufg=vf-vg;
24
25 - U=abs(Uab)
26 - Rapport_U=U/Veff

```

```

29 - Th_Uab=angle(Uab) % en rad
30 - Th_Uab_Deg=Th_Uab*180/pi % en degré
31 %
32 - Th_Ubc=angle(Ubc) % en rad
33 - Th_Ubc_Deg=Th_Ubc*180/pi % en degré
34 %
35 - Th_Ucd=angle(Ucd) % en rad
36 - Th_Ucd_Deg=Th_Ucd*180/pi % en degré
37
38 - Th_Ude=angle(Ude) % en rad
39 - Th_Ude_Deg=Th_Ude*180/pi % en degré
40
41 - Th_Uef=angle(Uef) % en rad
42 - Th_Uef_Deg=Th_Uef*180/pi % en degré
43
44 - Th_Ufg=angle(Ufg) % en rad
45 - Th_Ufg_Deg=Th_Ufg*180/pi % en degré

```


Dth =

0.8976

Dth_Deg =

51.4286

U =

0.8678

Rapport_U =

0.8678

Th_Uab =

-1.1220

Th_Uab_Deg =

-64.2857

Th_Ubc =

-0.2244

Th_Ubc_Deg =

-12.8571

Th_Ucd =

0.6732

Th_Ucd_Deg =

38.5714

Th_Ude =

1.5708

Th_Ude_Deg =

90

Th_Uef =

2.4684

Th_Uef_Deg =

141.4286

Th_Ufg =

-2.9172

Th_Ufg_Deg =

-167.1429

Annexe 3

Bibliographie

- [1] **T. M. Jahns et al.** «, Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives ». Proc. IEEE, 2002.
- [2] **J. Arrillaga, B.C. Smith, N.R. Watson, A.R. Wood.** « Power System Harmonic »Analysis, John Wiley & Sons, England, 1997.
- [3] **Y. Du, J. Bumett, Z.C. Fu. Harmonie characteristics,** « limits and design strategies for compliance in office buildings», IEEE JAS, 2313-2320, 1998.
- [4] /EEE-519. « IEEE Recommended Practices and requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems »,1992.
- [5] **K. Ghedamsi,** « Etude et réalisation de différentes stratégies MLI de commande de l'onduleur triphasé à trois niveaux », Mémoire Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2002.
- [6] **Koussaila Iffouzar.** « Etude et Contrôle des Machines Asynchrones Polyphasées en Modes Normal et Dégradé. Application dans un Système Embarqué », Thèse de doctorat, Bejaia 2016.
- [7] Journal Jeune Afrique,16/09/2016.
- [8] **Heidrum Reige.** « Automatisation et distribution d'énergie ».2006
- [9] « Tp 6 : variateur » Lycée de Paris ,2007.
- [10] **P. LE Brunk.** « Cours variation de vitesse des machines asynchrones ». Lycée Louis ARMAND, Janvier 2000.
- [11] **B. Housseini,** « Prototypage Rapide à Base de FPGA d'un Algorithme de Contrôle Avancé pour le Moteur à Induction », Mémoire présenté comme Exigence Partielle de la Maîtrise en Génie Electrique, Université du Québec à Trois-Rivières, Décembre 2010.
- [12] **A. BOUZID,** « Onduleur Triphasé Commandé par la Stratégie d'Elimination d'Harmonique SHE », Mémoire de Magister en Analyse et Commande des Machine électriques, Université des Science et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [13] **N. Moubayed, F. Meibody-Tabar, B. Davat,** « Alimentation par des onduleurs de tension d'une machine synchrone double étoile », Revue Internationale de Génie Electrique, Vol.1 – n°4,pp.457-470, 1998.
- [14] **E. Semail, A. Bouscayrol, J.P. Hautier,** « Vectorial formalism for analysis and design of polyphase synchronous machines”, European journal-Applied Physics, Vol.22 n°3,pp 207-221,2003.

- [15] **J.P. Martin, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, P. Letellier**, « Synthèse des méthodes de filtrage du couple des MSAP Polyphasées en modes normal et dégradé », Revue International de Génie Electrique, vol. 10/1-2, pp, 117-149, 2007.
- [16] **E.E. Ward, H. Harer**, « Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor », PRC, IEE, 116,(6),pp.980-984, 1969.
- [17] **K. Iffouzar, Z.Maddi, K. Ghedamsi, D. Aouzellag**, « Modeling and analysis of a dual stars induction motor fed by multi-level PWM and SVPWM inverters », International Conference on Information Processing and Electrical Engineering, ICIPEE14, pp 235-240, Algeria, 2014.
- [18] **E.A. Klingshirn**, « High phase order induction motors- Part I- Description and theoretical consideration and Part 2 – Experimental results », IEEE Transaction On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No 1, 1983.
- [19] **D. Bareille et J.P. Daunis**. « Electrotechnique : Transformateur et machines tournantes ». Édition DUNOD, Paris 2006.
- [20] **G.Tabta et A.Mensouri**. « Substitution d'une variation de vitesse mécanique par une variation vitesse électrique ». Mémoire fin d'étude master en électromécanique, Université de Bejaia 2013.
- [21] **J. L FRANCHON**. « Guide des sciences et technologies industrielles », Edition NATHAN, Paris 2001.
- [22] Catalogue_atv31_français Schneider, Schneider Electric Industries SAS, France janvier 2006.
- [23] **C. Lupin, Collombet, J. SCHONEK**, « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ». Schneider Electric, Cahier technique n°152. 1999.
- [24] **M. Bousehba**, « réalisation d'une commande MLI à choix multiple », mémoire master, université de Tlemcen, 2017.
- [25] **P. Cortes, J. Rodriguez, P. Antoniewicz, P. Kazmierkowski**. « Direct power control of an AFE using predictive control », IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 2516-2523, Sep. 2008.
- [26] **H. Quan, Z. Gang, C. Jie, Z Wu, and Z. Liu**. « Study of A Novel Over-modulation Technique Based on Space-Vector PWM » . s.l. : IEEE Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring(CDCIEM), 2011.

[27] **G. Grellet, G.Clerc** .« Actionneurs électriques-Principes Modèles Commandes »,Edition Eyrolles,Paris,2000 .