الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° :……/2026

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE : ÉLECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : COMMANDE ÉLECTRIQUE

Thème

Étude détaillée d'un pont roulant 90/22.5 tonnes de la centrale à cycle combiné -Bellara_el Milia-Jijel-

Présenté Par : BOUADJEL Karim

DRIS Salah eddine

Date de soutenance : 27 / 06 / 2026

Jury de Soutenance

Président : N. BOUDJERDA	**Grade : Professeur**	**Univ MSB Jijel**
Encadreur : B. MAKHLOUF	**Grade : Maître de conférence**	**Univ MSB Jijel**
Examinateur : D. LALILI	**Grade : Professeur**	**Univ MSB Jijel**

Promotion : 2025 /2026

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nous adressons ensuite nos sincères remerciements à Monsieur ***B. Makhlouf****, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, et son encadrement précieux tout au long de ce projet.*

Nous adressons nos plus sincères remerciements à nos encadreurs de stage, ***Bouchafer fares*** *et* ***Baadache sadam****, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et leur accompagnement.*

Nous remerciements vont également à l'honorable jury pour le temps qu'il a consacré à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques constructives et enrichissantes.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants de la filière Électrotechnique, pour leur engagement pédagogique et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire.

Sommaire

Introduction générale… … … …

III.4/ Commande VVC+ … **52**

Conclusion… … **59**

Conclusion générale… … **61**

Références bibliographiques… … **62**

Introduction générale

L'essor de l'industrie moderne exige des moyens de manutention performants capables d'assurer le déplacement rapide, précis et sécurisé des charges lourdes au sein des ateliers de production, des entrepôts, des chantiers et des installations industrielles. Parmi les équipements de levage les plus utilisés, le pont roulant. Ce dernier occupe une place essentielle grâce à sa capacité à transporter des charges importantes sur de grandes surfaces tout en optimisant les opérations de manutention [Seker_75], [Boutalbi_14].

Le pont roulant est un appareil de levage constitué principalement d'une poutre ou de plusieurs poutres se déplaçant sur un chemin de roulement fixé à la structure du bâtiment. Il permet d'assurer trois mouvements fondamentaux : le levage de la charge, la translation du chariot et la translation du pont. Cette configuration lui confère une grande flexibilité d'exploitation et en fait un équipement indispensable dans de nombreux secteurs industriels tels que la sidérurgie, la métallurgie, les industries mécaniques et les centrales énergétiques [1].

La centrale électrique à cycle combiné de Bellara est équipée de douze ponts roulants de capacités différentes, allant de cinq à quatre-vingt-dix tonnes, afin d'assurer l'entretien des équipements. Durant notre stage au sein de la centrale et dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés au pont roulant le plus puissant, d'une capacité de 90/22,5 tonnes, installé à l'intérieur du bâtiment de la turbine à gaz. Son rôle principal est d'assurer des opérations de manutention de haute précision lors de l'installation et de la maintenance de la turbine à gaz (rotor et enveloppe), de l'alternateur ainsi que des composants périphériques. Il permet d'atteindre une vitesse minimale de levage de 0.5 cm/s, indispensable pour aligner avec précision les paliers du rotor sur leurs supports.

Pour une meilleure présentation de notre travail, le mémoire a été organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des différentes parties de la centrale, en mettant l'accent sur son principe de fonctionnement, ses mécanismes énergétiques ainsi que ses principaux équipements, notamment le pont roulant.

Une description détaillée et approfondie du pont roulant de 90/22.5 tonnes fait l'objet du deuxième chapitre. Dans la première partie, nous aborderons des généralités sur les ponts roulants, fournissant ainsi un cadre théorique et fonctionnel essentiel pour comprendre leur principe de fonctionnement et leurs exigences opérationnelles. Ensuite, nous présenterons le variateur de vitesse *Danfoss VLT® Automation Drive FC 302*, associé aux divers mécanismes du pont roulant : levage principal et auxiliaire, déplacement du chariot et translation du pont. Le système de contrôle central qui pilote le variateur repose sur la technologie *VVC+* (Voltage Vector Control Plus), fruit de plusieurs années de recherche, de développement et d'optimisation brevetée par Danfoss. Il représente une évolution technologique majeure

du contrôle des moteurs électriques, fondée sur des techniques numériques exclusives [Ouzeddam_17].

Le troisième chapitre traite principalement de l'application de la commande *VVC+* pour la commande du moteur asynchrone (MAS) du mécanisme de levage auxiliaire. Nous présenterons tout d'abord le modèle mathématique triphasé du MAS ainsi que sa transformation triphasée-biphasée en utilisant la transformation de Park. Par la suite, une brève présentation de la structure de l'onduleur de tension triphasé, commandé par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale et vectorielle, sera effectuée. Puis, nous détaillerons la commande *VVC+*. Il faut noter que la principale difficulté rencontrée lors de la modélisation de cette commande réside dans le caractère propriétaire et opaque de la technologie Danfoss. Les manuels commerciaux et la littérature disponible sur le Web ne fournissent que les principes généraux de l'algorithme, omettant les équations exactes et les structures internes. Face à cette absence de données constructeur explicites, le travail de modélisation a exigé un effort d'adaptation, de tâtonnement et d'approximation approfondi pour atteindre les résultats souhaités. Enfin, la validation par simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink a été effectuée afin de présenter les performances de la commande VVC+.

Nous terminons par une conclusion générale qui évaluera l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I

Présentation de la centrale électrique à cycle combiné de Bellara

Introduction

La centrale électrique à cycle combiné de Bellara est une infrastructure énergétique majeure située à Jijel, en Algérie, conçue pour répondre aux besoins croissants en électricité du pays. Cette centrale utilise une technologie de cycle combiné, destinée à la production d'électricité à partir d'une turbine à gaz associée à une turbine à vapeur via une chaudière de récupération, afin d'optimiser l'efficacité énergétique et de réduire l'empreinte environnementale.

Grâce à cette combinaison, la centrale atteint un rendement élevé en récupérant la chaleur des gaz d'échappement pour produire de la vapeur et alimenter une seconde turbine. Elle est constituée de quatre turbines à gaz et de deux turbines à vapeur.

I.1/ Localisation de la centrale électrique

La centrale est située à 57 km à l'est de wilaya de Jijel et à 5.4 km du centre de la commune d'El-Milia (Zone industrielle de Bellara) avec une superficie de 55 hectares.



Figure. I.1 : Localisation de la centrale électrique de Bellara

I.2/Historique de centrale

La capacité de production est d'environ 1400 MW, il occupe la première place en termes de production de l'électricité avec l'utilisation de gaz naturel comme combustible primaire et le gasoil comme combustible de secours.

2012 : lancement du projet de construction.

2015 : début de la construction avec la collaboration des entreprises nationales et internationales.

2018 : achèvement de la construction des unités de production, incluant des turbines à gaz modernes.

2019 : les unités de production commencent d'une façonne progressive pour produire de l'électricité et pour le réseau national.

2020 : la centrale atteint sa pleine capacité de production, contribuant ainsi de manière significative à l'approvisionnement en électricité de la région et à la stabilisation du réseau électrique national.

Le couplage TG (Turbine à gaz) des groupes sur le réseau est une étape principale ce qui signifie l'entrée en phase de la production. Les couplages sont effectués avec succès :

- Date du 1er couplage TG#11 le 26/12/2020
- Date du 1er couplage TG#12 le 31/12/2020
- Date du 1er couplage TV#10 le 13/01/2022
- Date du 1er couplage TG#21 le 12/01/2021
- Date du 1er couplage TG#22 le 21/01/2021
- Date du 1er couplage TV#20 le 06/05/2022

I.3/ Disposition générale de la centrale

Le plan de disposition générale de la centrale a été marqué afin d'identifier les zones et systèmes principaux :



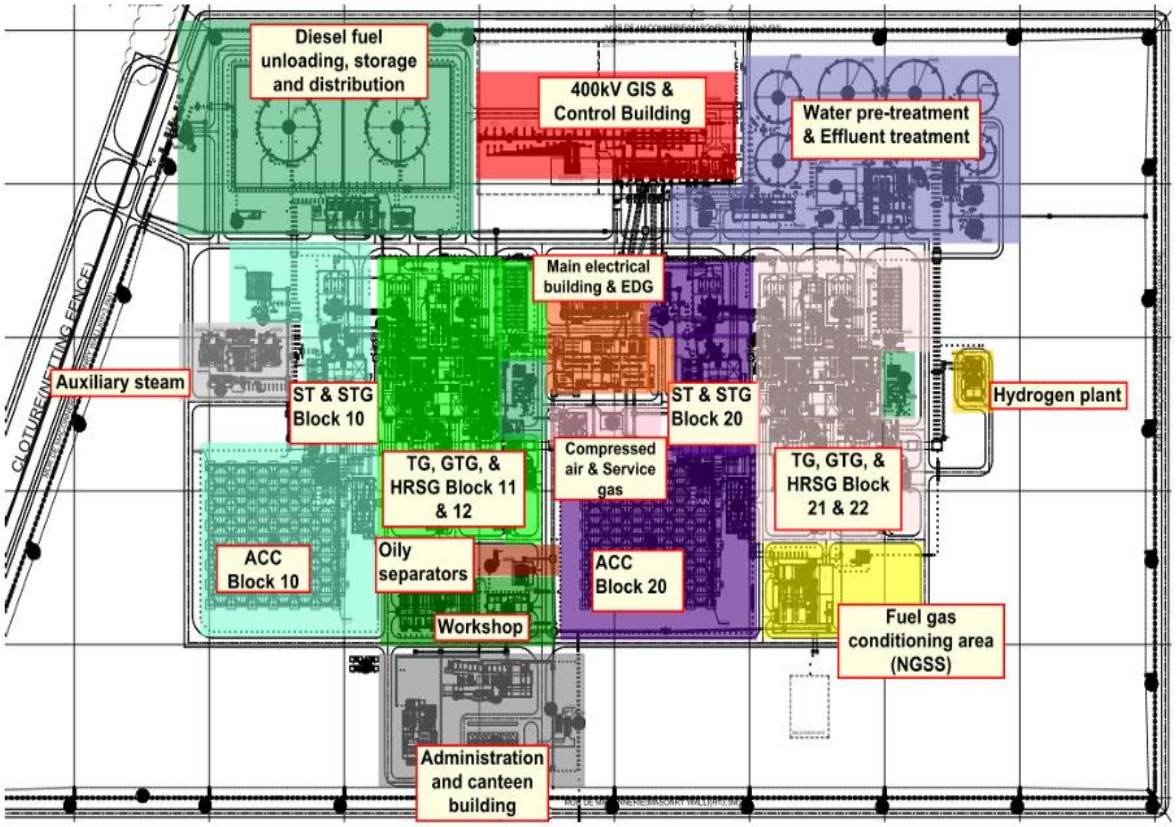


Figure. I.2 : Disposition générale de la centrale

I.4/ Fonctionnement de la centrale

La centrale comprend quatre turbines à gaz capables de fonctionner en cycle simple ou en cycle combiné, quatre générateurs de vapeur à récupération de chaleur (GVRC) et deux turbines à vapeur, en plus des installations auxiliaires nécessaires au fonctionnement de la centrale.

Il est important de souligner que cette configuration comprend également une cheminée de dérivation équipée d'un registre de déviation entre la turbine à gaz (TG) et le GVRC. Ces équipements constituent les principaux éléments permettant de basculer entre le cycle simple et le cycle combiné.

En fonctionnement normal, la centrale utilise le gaz naturel comme combustible principal pour les turbines à gaz, tandis que le diesel est employé en cas d'urgence. La configuration de l'installation est basée sur deux blocs, chacun composé de deux turbines à gaz, deux chaudières de récupération, une turbine à vapeur et un aérocondenseur, ainsi que d'un ensemble de systèmes auxiliaires tels que :

¤ Système de déchargement, stockage et distribution de combustible diesel

¤ Système de conditionnement de gaz combustible

¤ Systèmes de prétraitement de l'eau

¤ Système de traitement d'effluents

¤ Système de dosage chimique

¤ Système production d'hydrogène
¤ Système de vapeur auxiliaire.
¤ Système d'air comprimé
¤ Système anti-incendie
¤ Système électrique moyenne tension et basse tension
¤ Générateurs diesel d'urgence et black start (BSDG)
¤ Systèmes de contrôle et instrumentation globaux (DCS)

La figure. I.3 illustre de manière synoptique le principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné, mettant en évidence le couplage entre la turbine à gaz et le cycle de récupération de vapeur.

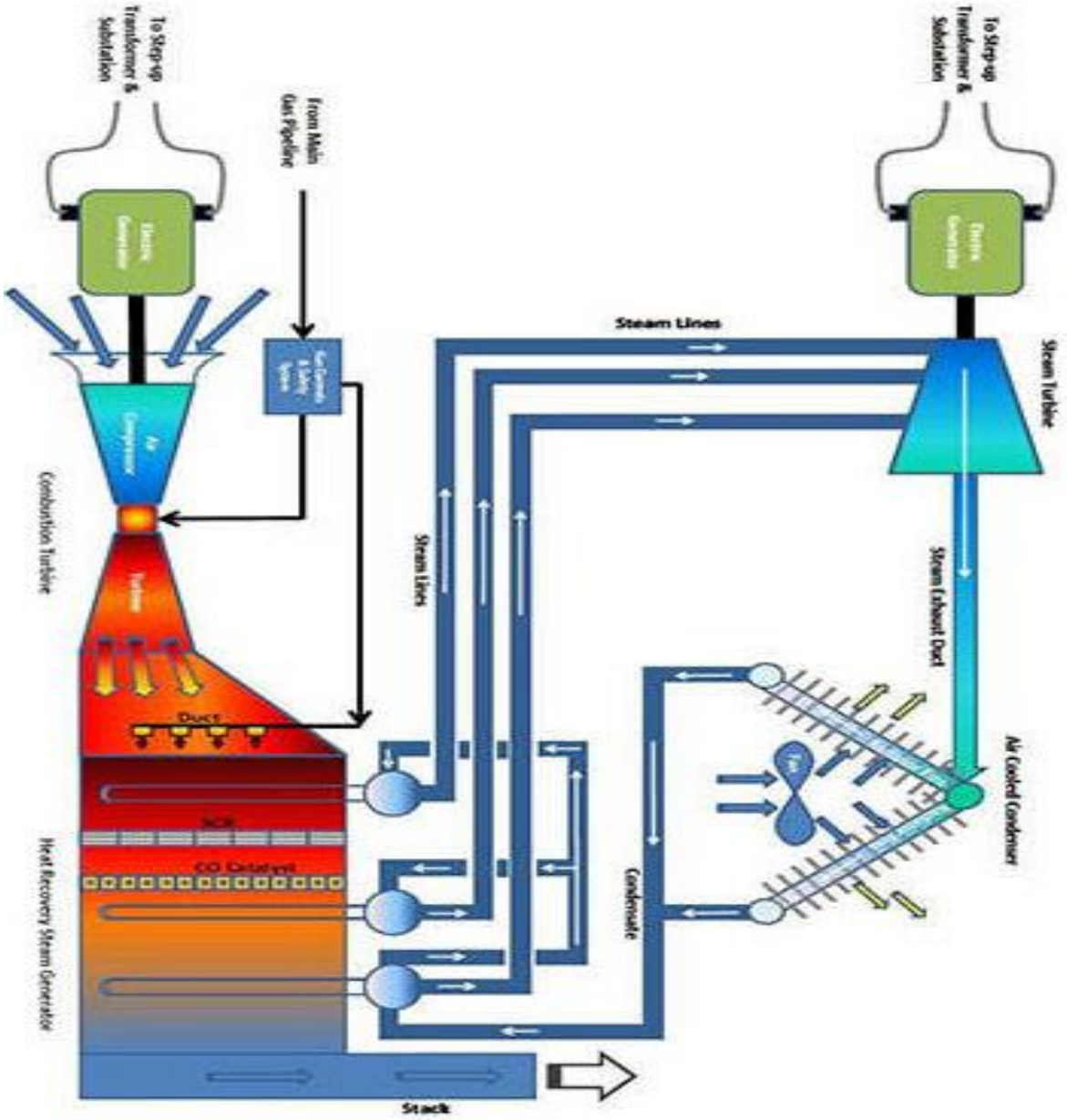


Figure. I.3 : Schéma synoptique du principe de fonctionnement d'une centrale à gaz à cycle combiné

I.5/ Principaux systèmes/équipements mécaniques

- ***Système d'alimentation en gaz naturel***

Le système d'approvisionnement en gaz naturel est conçu pour conditionner et fournir le gaz naturel aux turbines dans les conditions requises.
Le système se compose d'une station de régulation et de mesure du gaz commune située à l'abri du système d'alimentation en gaz et de quatre skids individuels finaux de gaz naturel (NGFS) pour chaque turbine à gaz.

Le gaz naturel entre dans la centrale à une plage de 10°C à 60°C. Le gaz est chauffé au NGSS et au skid final jusqu'à 185ºC. La pression du gaz est adaptée aux exigences de la TG par le poste de réduction de pression NGSS.

- ***Système d'alimentation en fuel***

Le système d'alimentation en fuel est conçu pour décharger, stocker, transférer et fournir le fuel aux turbines à gaz dans les conditions requises. Le fuel est le combustible d'appoint de la centrale. Il existe un seul système de fuel pour toute la centrale. Le système est distribué en :
- Système de déchargement de combustible.
- Système de stockage de fuel**.**
- Zone de transfert de fuel.
- Zone de retour de fuel, qui récupère le fuel non utilisé de la turbine à gaz.

- ***Turbine à gaz et générateur***

La centrale est équipée de quatre turbines de General Electric (GE) de référence PG9351FA et quatre générateurs. Les turbines se composent d'un compresseur axial à plusieurs étages, d'un système de combustion pour la combustion du gaz et d'une turbine axiale à plusieurs étages.

La puissance mécanique produite par la turbine, sous l'effet de la détente des gaz de combustion est utilisée pour entraîner à la fois le générateur et le compresseur d'air.
La puissance électrique produite par le générateur est acheminée vers le réseau via un transformateur et des barres bus. Par ailleurs, les gaz d'échappement de chaque turbine à gaz (TG) sont dirigés vers un générateur de vapeur à récupération de chaleur.

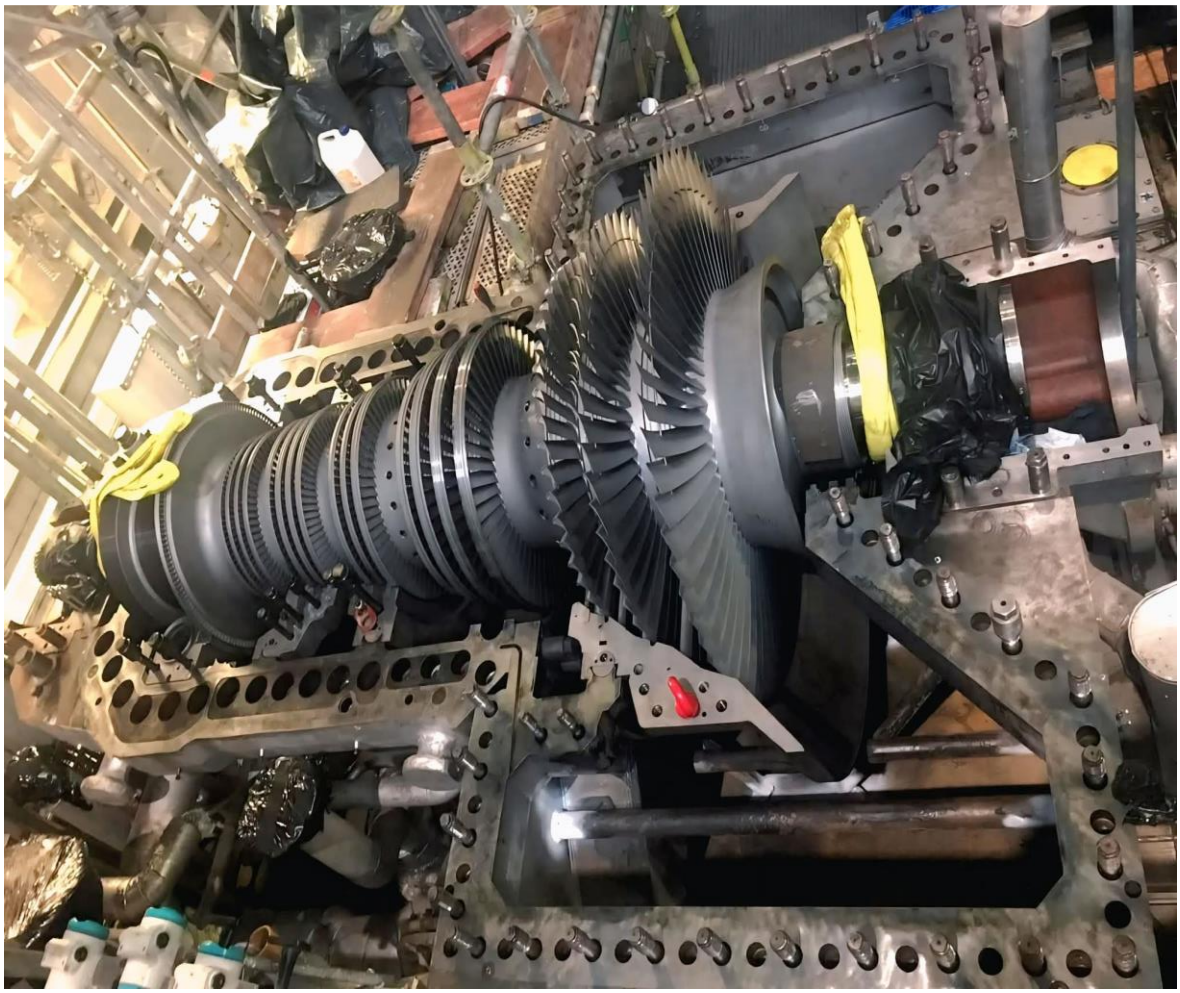


Figure. I.4 : Photo de la turbine à gaz

- ***Cheminé de dérivation avec dérivateur de déviation***

Chaque sortie des TG est équipée d'une cheminée de dérivation qui est chargée de dévier les gaz de sortie de la TG directement vers l'atmosphère au lieu de les acheminer à travers le GVRC correspondant.

- ***Générateur de vapeur à récupération de chaleur***

La centrale est équipée de quatre (4) générateurs de vapeur à récupération de chaleur de type horizontal, qui sont chargés de produire de la vapeur triple pression au moyen de l'énergie d'échappement TG. La vapeur générée dans chaque bloc GVRC est collectée et acheminée vers le bloc de la turbine à vapeur. Le système de condensation de la centrale alimente le ballon/dégazeur basse pression (BP) au moyen d'un préchauffeur de condensat.
Une partie de l'eau du ballon BP s'écoule vers l'évaporateur, et la vapeur saturée s'écoule vers la surchauffeur GVRC BP où elle est chauffée à la température de sortie de la vapeur BP.

La vapeur BP générée est acheminée vers la connexion depuis la sortie de l'intermédiaire jusqu'à la section de basse pression de la TV où le débit de vapeur entier est complètement détendu à la pression du condenseur.

Les ballons intermédiaire pression (IP) et haute pression (HP) du GRVC sont alimentés par des pompes à eau d'alimentation de la centrale, qui aspirent l'eau du ballon BP du GRVC. Les pompes à eau d'alimentation HP et IP déchargent l'eau acheminée par les économiseurs GRVC HP et IP, avant d'alimenter les ballons correspondants.

L'eau s'écoule du ballon IP vers l'évaporateur à circulation naturelle, où une partie est évaporée. La vapeur IP saturée séparée est introduite dans la surchauffeur IP et est ensuite chauffée à la température de vapeur IP. La vapeur IP surchauffée est mélangée à la vapeur du réchauffeur et est surchauffée davantage dans le réchauffeur, puis envoyée à la section de pression intermédiaire de la turbine à vapeur.
L'eau s'écoule depuis le ballon HP vers l'évaporateur à circulation naturelle, où une partie est évaporée. La vapeur HP saturée séparée est introduite dans la surchauffeur HP et est ensuite chauffée à la température de la vapeur HP.

La vapeur HP circule à travers le système de tuyauterie de vapeur HP vers la turbine à vapeur HP. La vapeur s'étend et est réinjectée dans le système de réchauffage à froid. Là, elle est mélangée à la vapeur IP, et surchauffée davantage dans le réchauffeur. Puis elle s'écoule à travers le système de réchauffage chaud vers la section de turbine à vapeur IP.

- ***Turbine à vapeur et générateur***

La centrale est équipée de deux turbines à vapeur plus deux générateurs. Les turbines se composent d'un cylindre HP à fût unique et d'un cylindre IP/BP à passage direct évacuant axialement dans le condenseur refroidi par air. La vapeur HP s'écoule vers la section de turbine HP. La vapeur d'échappement HP expansée est acheminée vers la ligne de réchauffage froide, renvoyée depuis le HRSG à travers la ligne de réchauffage chaude et ensuite ajoutée à la section de la turbine IP. L'expansion supplémentaire est réalisée en même temps que la vapeur BP dans la turbine BP. L'échappement de la turbine BP s'écoule vers le condenseur où il est condensé.

Pendant le démarrage/arrêt du GRVC et le fonctionnement de dérivation de la TV, le réchauffage à chaud et la vapeur BP sont directement alimentés (refroidis par l'eau d'injection) vers le condenseur à l'aide des stations de dérivation IP et BP. La vapeur HP s'écoule vers la ligne de réchauffage à froid à travers la station de dérivation HP où elle est dépressurisée et refroidie par injection d'eau d'alimentation. La vapeur de réchauffage à froid est utilisée pour empêcher le réchauffeur et la ligne de réchauffage à chaud de surchauffer et d'avoir un choc thermique pendant le démarrage et l'arrêt.



Figure. I.5 : Turbin à vapeur

- ***Aérocondenseur (ACC)***

La centrale est équipée de deux ACC, un par bloc d'alimentation. L'ACC est chargé de condenser la vapeur d'échappement de la turbine à vapeur, de produire et de maintenir le vide requis dans le système. La vapeur condensée sera collectée dans le réservoir de collecte des condensats, puis elle sera pompée vers les GVRC par les pompes d'extraction des condensats. L'équipement principal de de l'ensemble ACC est composé d'un conduit ACC, des ventilateurs et des tubes, d'un réservoir de collecte de condensats, d'une boîte de décompression, de pompes, des pots de drainage des conduits, de pompes de nettoyage ACC et d'éjecteurs de vapeur.

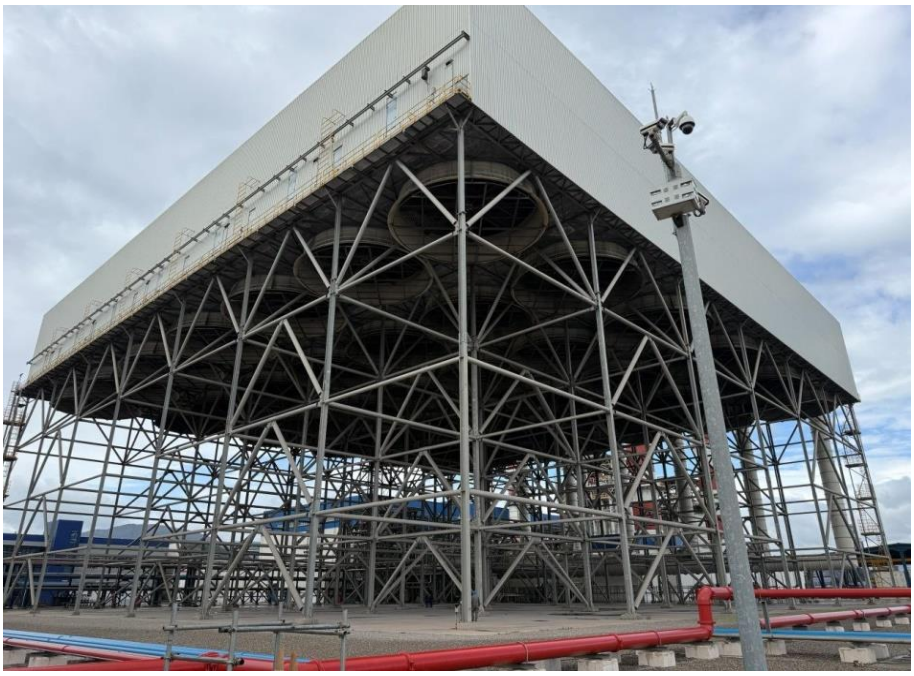


Figure. I.6 : Aérocondenseur

Il est composé de 42 modules de ventilation, subdivisés en 7 rues de 6 modules chacune. Les dimensions de chaque module ACC sont d'environ 97 m x 93 m. Le débit de vapeur nominal est de 721,45 tonnes/heure, et il fonctionne à environ 163,7 mbar de pression à la sortie de la turbine à vapeur.

➢ ***Station de traitement des eaux***

La centrale comprend une usine de traitement de l'eau, qui est équipée de différents équipements pour traiter, stocker et fournir de l'eau brute, de l'eau de service, de l'eau anti-incendie, de l'eau déminéralisée et de l'eau potable.

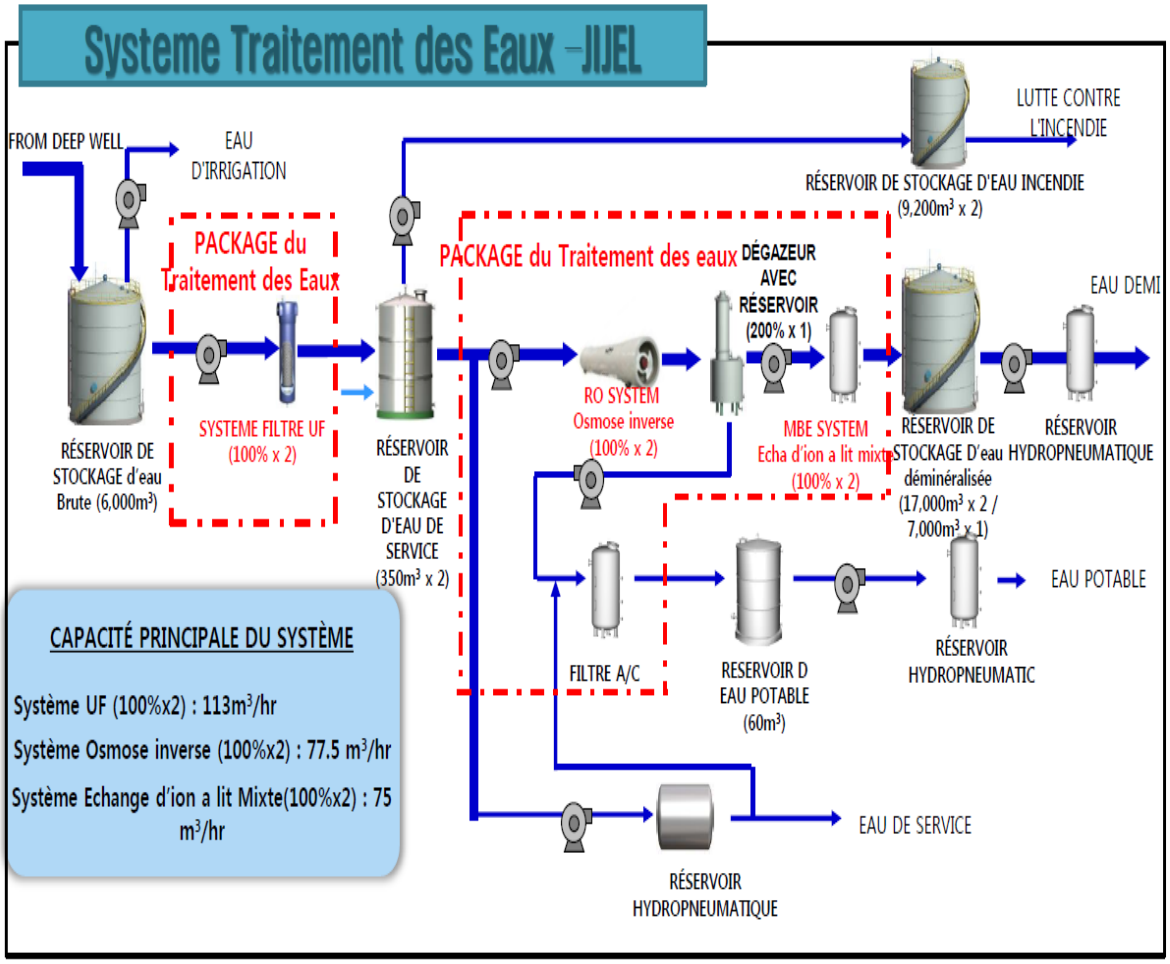


Figure. I.7 : Schéma d'architecture des réseaux de traitement des eaux

La centrale est équipée des principaux équipements suivants pour chaque système d'eau :

- Système d'eau brute **:**

* Deux pompes pour puits profonds
* Un réservoir de stockage d'eau brute
* Deux pompes d'irrigation
* Deux pompes de transfert d'eau de refroidissement des purges de la chaudière.

***- Système d'eau de service* :**
* Deux unités de filtration ultra
* Un réservoir d'eau filtrée
* Premier osmose inverse
* Deux réservoirs de stockage d'eau de service
* Trois pompes de transfert d'eau de service
* Une pompe de remplissage d'eau anti-incendie

***- Système d'eau déminéralisée* (*démi*) :**
* Unité d'échange d'ions à lit mixte
* Trois réservoirs de stockage d'eau démi
* Deux pompes de transfert d'eau démi
* Cinq pompes d'appoint d'eau démi pour injection à la TG

- Système d'eau potable
* deux pompes d'alimentation à filtres à charbon actif
* deux filtres à charbon actif
* Un réservoir de stockage d'eau potable

Les équipements listés ci-dessus sont répartis dans trois bâtiments différents, à l'exception des réservoirs de stockage situés à l'extérieur. Les bâtiments sont situés dans la zone de traitement d'eau et sont nommés comme suit :
*/ Bâtiment de l'usine de traitement des eaux
*/ Bâtiment de la pompe à eau de service
*/ Bâtiment de la pompe à eau démi

- ***Ponts roulants***

Le pont roulant est un équipement essentiel dans toutes les centrales à cycle. Il permet la manutention des charges lourdes comme les turbines, alternateurs et transformateurs
- Deux ponts roulants électriques (90/22,5 tonnes) / bâtiment TG
- Un pont roulant électrique (5 tonnes) / bâtiment BSDG
- Un pont roulant électrique (5 tonnes) / bâtiment sous station
- Un pont roulant électrique (10 tonnes) / bâtiment de l'atelier
- Un pont roulant électrique (10 tonnes) / Entrepôt de pièces lourdes et légères



Figure. I.8 : Opération de levage par un pont roulant lors des opérations de maintenance

- ***Réseaux souterrains***

La centrale comprend des réseaux souterrains qui acheminent les différents drainages vers les stations de traitement et d'élimination requises. Les réseaux souterrains existants sont les suivants :

- Réseau de systèmes de drainage pluvial
- Réseau de systèmes de drainage d'eaux usées, qui est divisé en réseaux d'eaux usées chimiques et huileuses
- Réseau de systèmes de drainage sanitaire

I.6/ Principaux systèmes/équipements électriques

Les principaux équipements électriques de l'installation comprennent les générateurs et leurs auxiliaires associés, tels que les dispositifs de démarrage et les systèmes d'excitation. La connexion entre le générateur et le transformateur principal est assurée par des jeux de barres à phase isolée (IPB), qui garantissent une transmission sécurisée et performante du courant. Un disjoncteur de générateur (GCB) est intégré pour protéger l'ensemble et permettre la synchronisation avec le réseau. Le transformateur auxiliaire d'unité (TS) alimente les services internes de la centrale, tandis que le transformateur principal (TP) élève la tension pour l'injection sur le réseau. Enfin, un système haute tension de type GIS (Appareillage de commutation à gaz) assure la distribution et l'interconnexion avec le réseau électrique externe.

- ***Système de distribution d'énergie auxiliaire MT***

Composé de :

* Générateurs diesel à démarrage autonome
* Jeux de barres 6.6 kV
* Appareillage MT

- ***Système de distribution d'énergie auxiliaire BT***

Composé de :

* Transformateurs MT/BT
* Centres de puissance BT
* Centres de contrôle moteurs
* Système CC (Batterie-Redresseur)
* Système ASI (Onduleur)
* Système d'éclairage

Conclusion

La centrale à cycle combiné de Bellara constitue un projet stratégique majeur pour le secteur énergétique en Algérie. Cette centrale illustre l'orientation de l'Algérie vers des solutions énergétiques plus performantes et relativement plus respectueuses de l'environnement, en exploitant principalement le gaz naturel comme combustible et exploite l'association de turbines à gaz et de turbines à vapeur pour optimiser l'efficacité globale. Au-delà du fonctionnement thermodynamique global de la centrale, l'inventaire de ses installations a mis en évidence l'omniprésence d'équipements de levage critiques, indispensables aux opérations de maintenance lourde au sein des différents bâtiments.

Chapitre II

Description du pont roulant 90/22.5 T

Introduction

Les différents mécanismes que l'on rencontre dans l'industrie ont connu une longue évolution avant d'aboutir aux machines modernes actuelles. Une installation industrielle moderne est constituée d'un grand nombre de pièces, de machines et d'équipements destinés à assurer des fonctions variées. Tout mécanisme se compose généralement de trois parties essentielles : le moteur, la transmission et la machine opératrice.

Parmi ces mécanismes figure le pont roulant, dont le rôle principal est d'assurer le levage et le déplacement des charges vers une position déterminée par les coordonnées x, y et z, indépendamment de leur nature. Le pont roulant constitue ainsi un équipement indispensable dans les installations industrielles. Il s'agit d'un appareil de levage permettant de déplacer des charges lourdes avec précision. Généralement installé en hauteur, il se déplace sur des rails afin de couvrir une large zone de travail [Seker_75], [Makhlouf_21].

Dans les centrales électriques, le pont roulant joue un rôle crucial lors des opérations de montage, de maintenance et de démontage des composants majeurs tels que le rotor, le stator et les modules de combustion. Grâce à sa capacité à manipuler des pièces volumineuses et lourdes avec précision et en toute sécurité, il facilite les interventions techniques tout en réduisant les risques liés à la manutention. Il contribue également à améliorer l'efficacité des opérations en limitant les temps d'arrêt des équipements et en optimisant les travaux de maintenance [1].



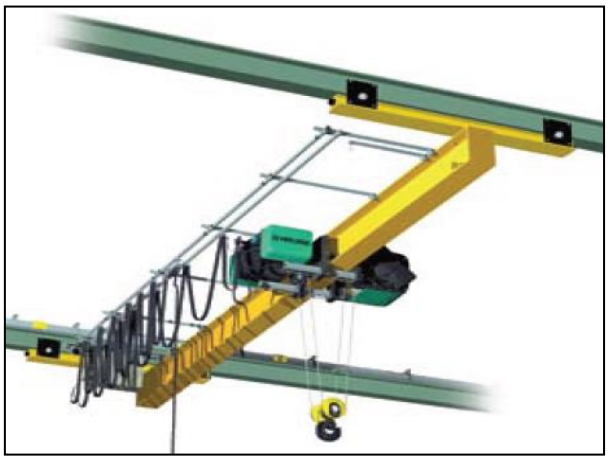


Figure. II.1 : Photos du pont roulant vue de plusieurs côtés

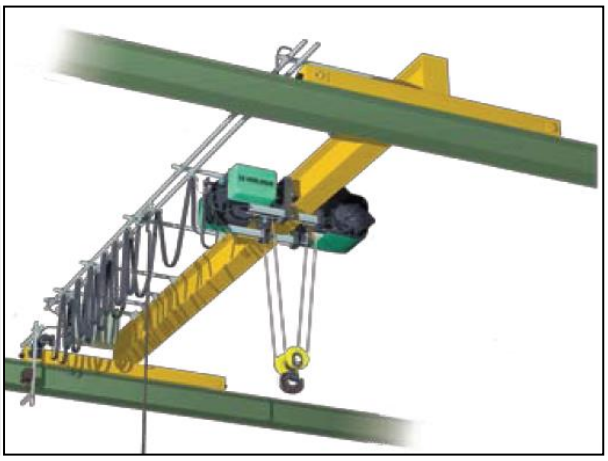
II.1/ Informations générales sur les ponts roulant

II.1.1/ Types et éléments

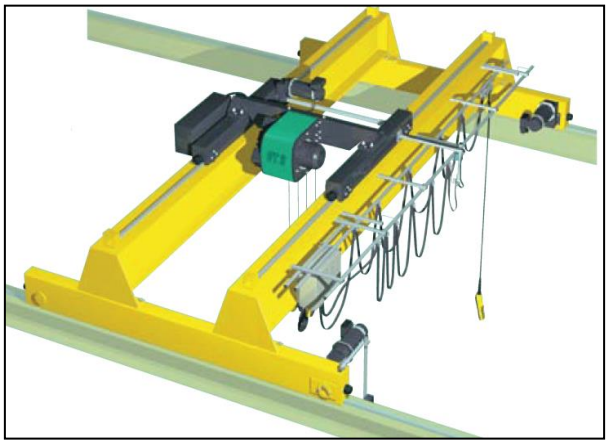
On distingue trois types de ponts roulants [2] :

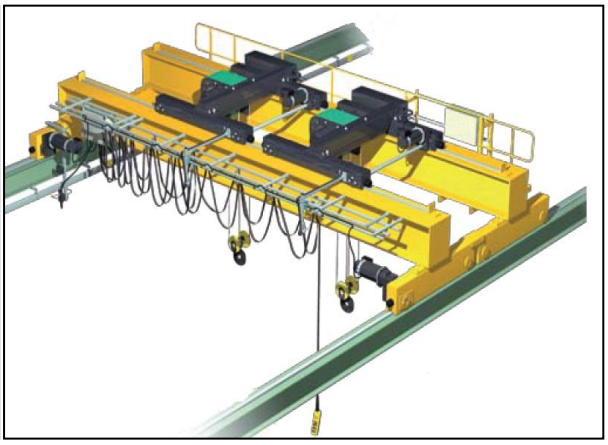


Pont mono-poutre suspendu



Pont mono-poutre posé

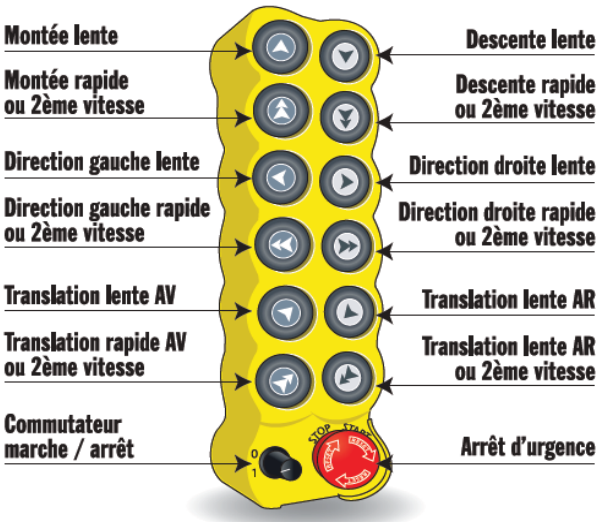




Pont bipoutre posé

Figure. II.2 : Différents types de ponts roulants

La majorité des ponts roulants sont constitués des éléments principaux montrés dans la figure. II.3 [Makhlouf_21].





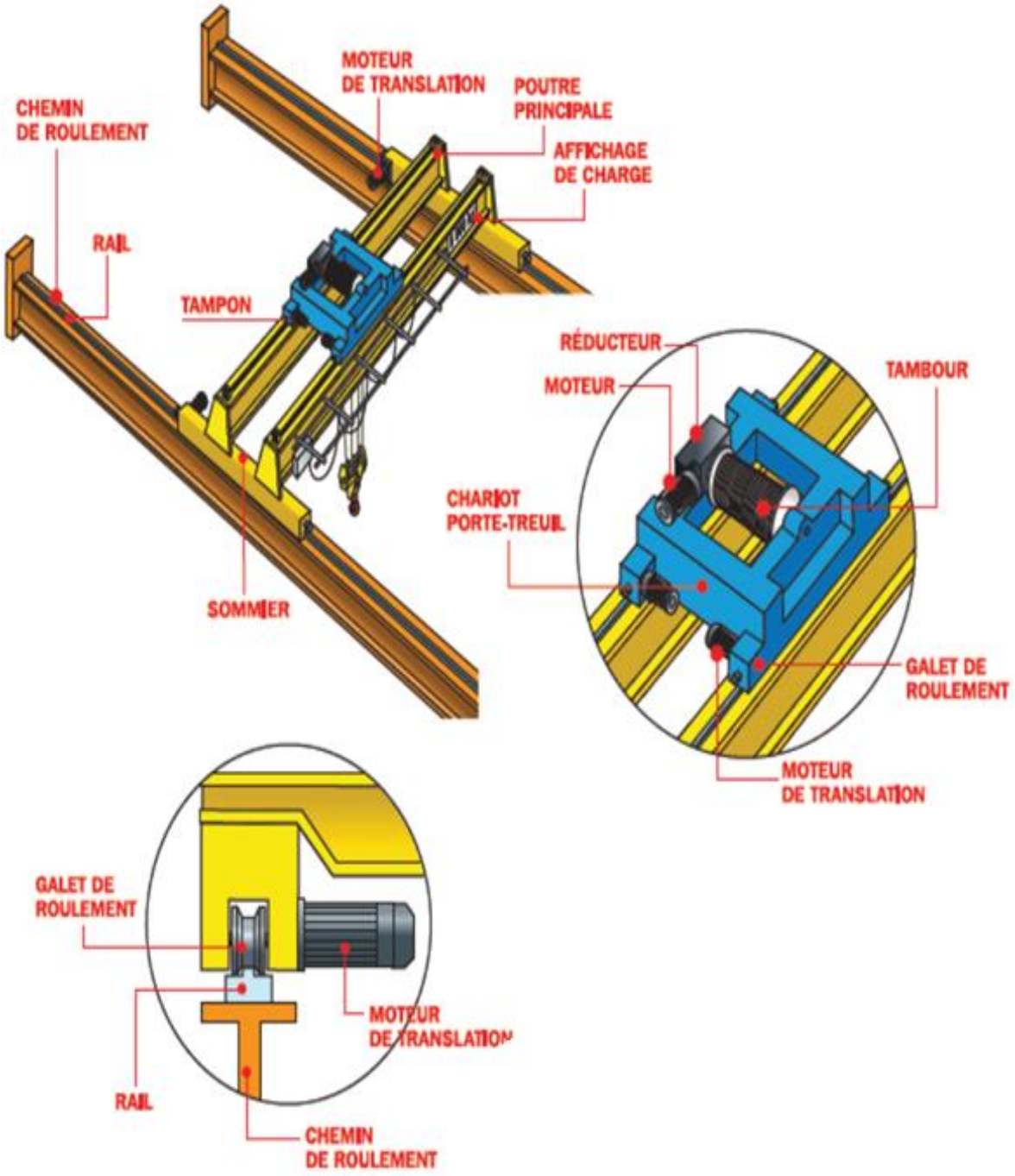


Figure. II.3 : Types et éléments principaux d'un pont roulant

II.1.2/ Différents axes de mouvements

Afin de caractériser la zone d'action et l'espace de travail couverts par le pont roulant, il convient de définir ses trois mouvements fondamentaux (Figure. II.4), qui s'effectuent selon trois axes indépendants [Boutalbi_14] :

Hauteur de levage : distance verticale de levage ou descente de la charge.

***Direction* (*Portée*)** : axe transversal, c'est la distance de déplacement du chariot.

***Translation* (*Course*)** : distance de roulement du pont c.à.d. axe des voies de roulement donc la plus grande distance.

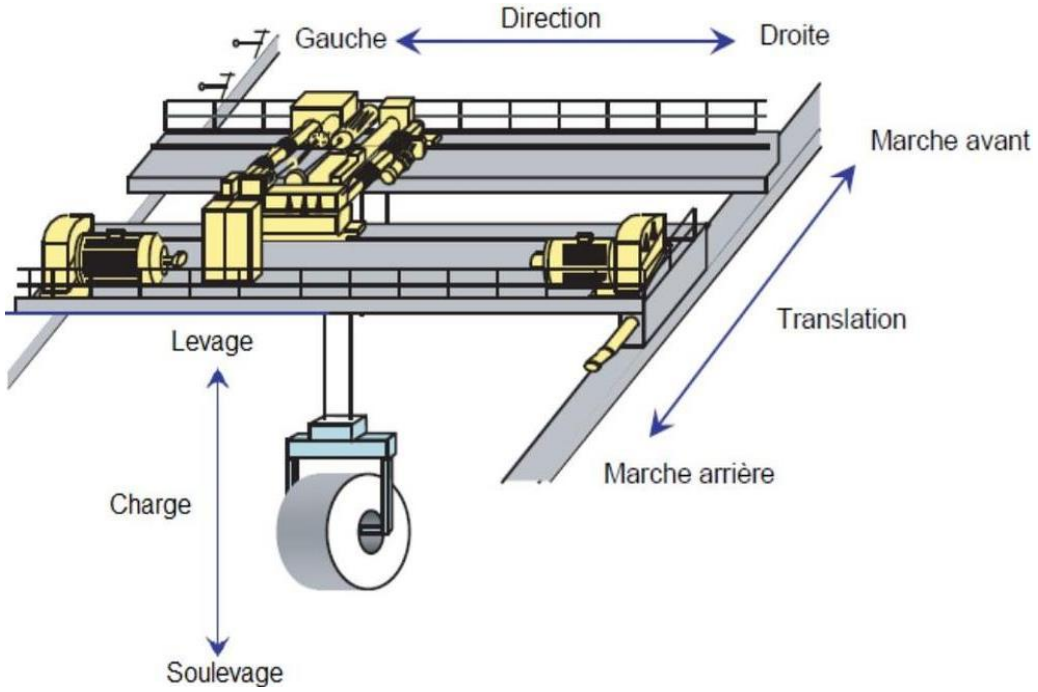


Figure. II.4 : Mouvements d'un pont roulant

II.2/ Caractéristiques mécaniques et électriques

Nous présentons en tableau. II.1 l'ensemble des informations (Spécification) essentielles du pont roulant situé à l'intérieur du bâtiment de turbine à gaz.

	Principale	***Auxiliaire***	
Capacité de levage	90 tonnes	22.5 tonnes	
Hauteur de levage	22.42 mètres	23.66 mètres	
Câble de levage	Ø20 x 12 chutes	Ø18 x 6 chutes	
Direction (Portée)	22.4 mètres		
Translation (Course)	90.6 mètres		
	Vitesse	***Moteur***	
Levage principale	0.3 ~ 1.2 m/min	MAS à cage d'écureuil	30 kW/1480 trs/min
Levage auxiliaire	0.8 ~ 3.2 m/min		23 kW/970 trs/min
Translation (Course)	3.75 ~ 15 m/min		7.5 kW/1400 trs/min
Direction (Portée)	6.25 ~ 25 m/min		2.2 kW/940 trs/min
Alimentation électrique	400 V, 50 Hz, 3 Phases		

Tableau. II.1 : Données techniques générales du pont roulant

II.3/ Présentation des différents MAS du pont

Afin de caractériser l'ensemble des actionneurs électriques constituant le pont roulant, les paramètres techniques des différents MAS sont résumés aux tableau. II.2, 3, 4 et 5.

Désignation	***Valeur***
Puissance nominale	30 kW
Tension/fréquence	400 V triphasé / 50 Hz.
Courant nominal	59,4 A.
Vitesse nominale	1480 trs/min
Nombre de pôles	4
Rendement	92,3 %
Facteur de puissance	0,79
Couple de démarrage	386 Nm
Couple maximum	502Nm
Courant de démarrage	487,1 A
Indice de protection	IP55
Classe d'isolation	F
niveau sonore	82 dB

Tableau. II.2 : Fiche technique du MAS du mécanisme de levage principal

Désignation	***Valeur***
Puissance nominale	23 kW
Tension/fréquence	400 V triphasé / 50 Hz.
Courant nominal	46 A.
Vitesse nominale	970 trs/min
Nombre de pôles	6
Rendement	92,3 %
Facteur de puissance	0,84
Couple de démarrage	469 Nm
Couple maximum	558Nm
Courant de démarrage	322 A
Indice de protection	IP55
Classe d'isolation	F
niveau sonore	75 dB

Tableau. II.3 : Fiche technique du MAS du mécanisme de levage Auxiliaire

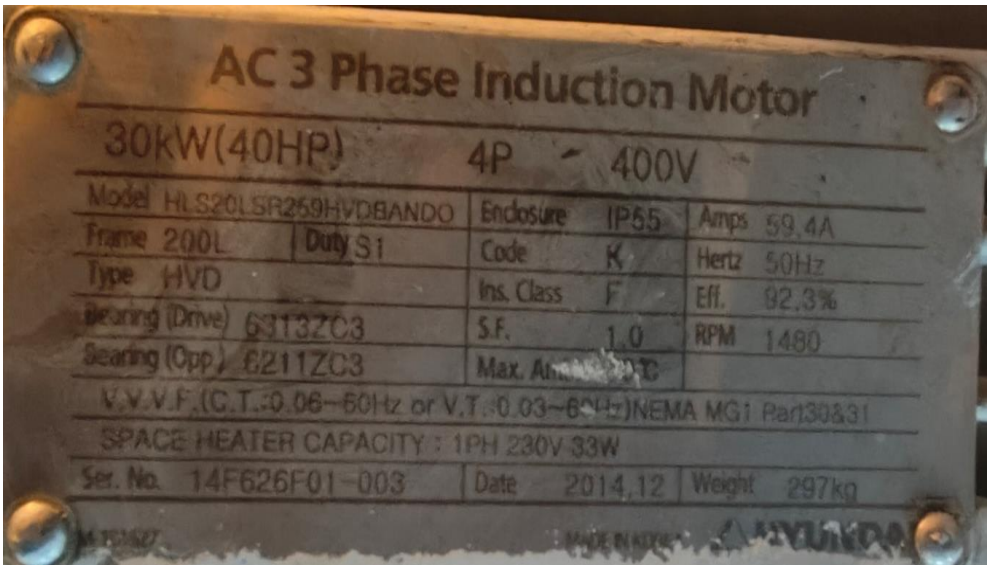
Désignation	***Valeur***
Puissance nominale	7.5 kW
Tension/fréquence	400 V triphasé / 50 Hz.
Courant nominal	16.5 A.
Vitesse nominale	1460 trs/min
Nombre de pôles	2
Rendement	0.85 %
Facteur de puissance	0.75
Couple de démarrage	102.6 Nm
Couple maximum	165.9 Nm
Courant de démarrage	110 A
Indice de protection	IP55
Classe d'isolation	F
niveau sonore	70 dB

Tableau. II.4 : Fiche technique du MAS du mécanisme de translation

Désignation	***Valeur***
Puissance nominale	2.2 kW
Tension/fréquence	400 V triphasé / 50 Hz.
Courant nominal	6.5 A
Vitesse nominale	940 trs/min
Nombre de pôles	3
Rendement	0.75 %
Facteur de puissance	0.65
Couple de démarrage	44 Nm
Couple maximum	55 Nm
Courant de démarrage	456 A
Indice de protection	IP55
Classe d'isolation	F

Tableau. II.5 : Fiche technique du MAS de direction

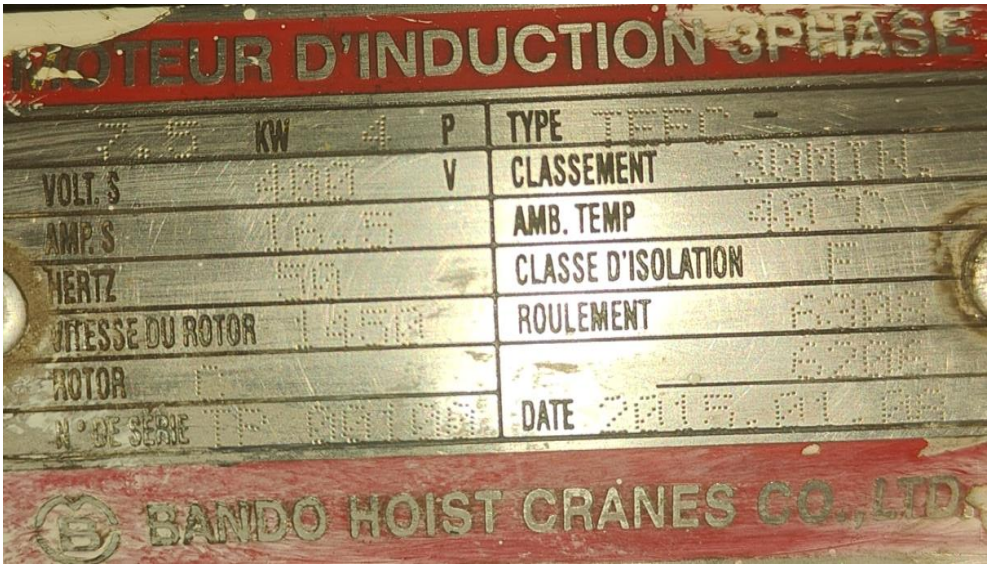
La figure. II.5 présente les plaques signalétiques des moteurs du pont roulant (Sauf le moteur de direction). Ces plaques fournissent les caractéristiques techniques essentielles de chaque moteur (puissance, vitesse, tension, courant, etc.), indispensables pour l'exploitation et la maintenance de l'équipement.



Moteur de levage principal



Moteur de levage auxiliaire



Moteur de translation

Figure. II.5 : Différentes plaque signalétique des Moteurs du pont roulant

II.4/ Variateurs de vitesse

L'actionnement des différents moteurs du pont roulant est assuré via quatre variateur de vitesse *Danfoss VLT® Automation Drive FC 302*. Ce type de variateur est un convertisseur de fréquence indirect (Altérateur-Redresseur-Onduleur), le schéma synoptique générale est montré à la figure. II.6.

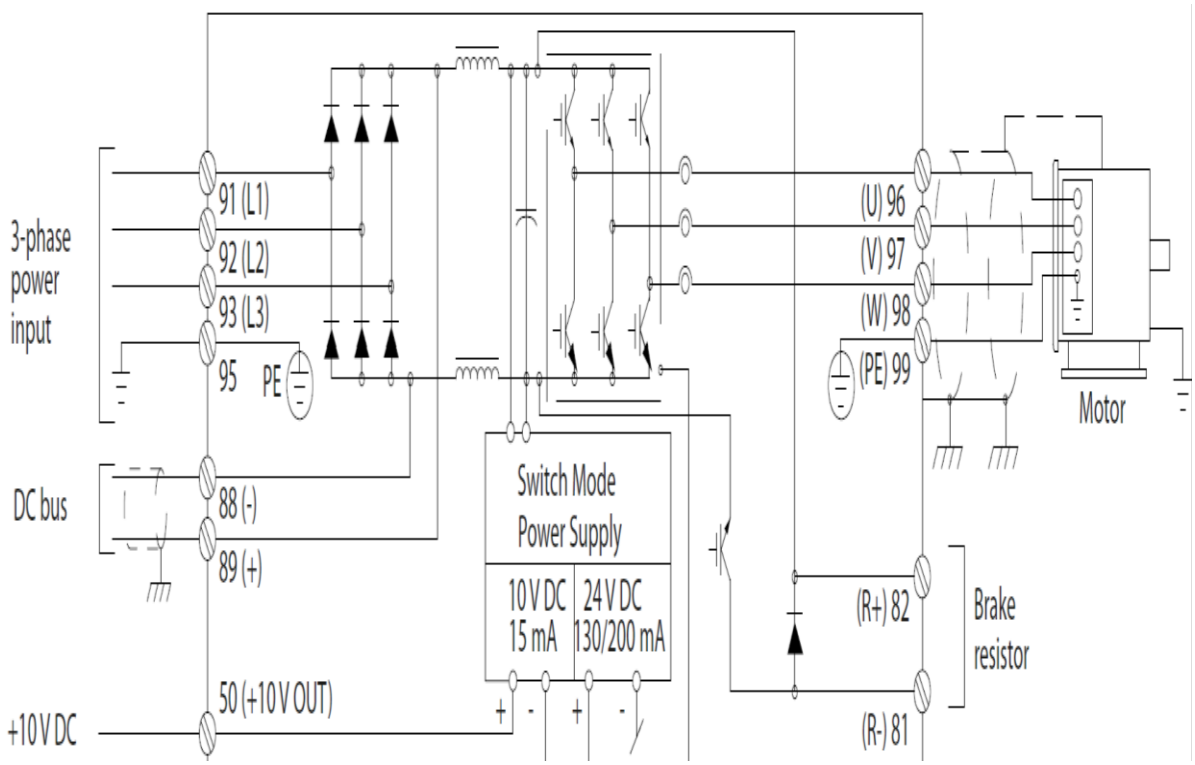


Figure. II.6 : Schéma universel du variateur de vitesse Danfoss

- ***Bloc d'entré et redressement***

- Redresseur : composé de 6 diodes montées en pont de Graetz triphasé, il convertit la tension alternative (AC) du réseau en une tension continue (DC) pulsée.
- Bornes 91 (L1), 92 (L2), 93 (L3) : Entrée de l'alimentation triphasée
- Borne 95 (PE) : Connexion de protection à la terre (Mise à la terre de l'équipement).

- ***Bus continu et filtrage***

- Le bus continu sert de zone tampon intermédiaire entre le redresseur et l'onduleur.
- Inductances de lissage : placées sur la ligne positive (+) et négative (-) juste après le redresseur, elles protègent le variateur contre les pics du courant.
- Condensateur du Bus DC : placé en parallèle, il lisse la tension continue pour fournir une tension stable.
- Bornes 88 (-) et 89 (+) : bornes d'accès direct au bus continu. Elles permettent de connecter plusieurs variateurs sur un bus DC commun ou d'intégrer des modules d'alimentation externes.

- ***Hacheur de freinage***

Essentiel pour les applications de levage où la charge devient motrice lors de la descente, il est constitué d'un IGBT, une résistance et une diode de roue libre.

Lorsque le moteur passe en mode générateur, la tension du bus DC augmente, l'IGBT s'amorce pour dissiper l'excédent d'énergie à travers la résistance et convertit l'énergie électrique récupérée en chaleur.

- ***Onduleur***

C'est le cœur du variateur, constitué de six transistors de puissance de type IGBT montés en pont triphasé, couplés avec des diodes anti-parallèles. Ils commutent à une fréquence élevée pour reconstituer un système de tensions alternatives triphasées de fréquence et d'amplitude variables.

- Bornes 96 (U), 97 (V), 98 (W) : bornes de sortie de puissance connectées directement aux phases du moteur.

- ***Alimentation interne* (*Switch Mode Power Supply*)**

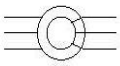
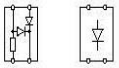
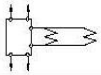
Alimentée directement depuis le bus continu à tension élevée et le convertit en basses tensions isolées et stabilisées, pour assure l'alimentation des cartes électroniques de commande en basse tension

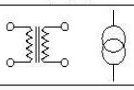
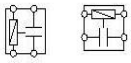
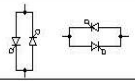
Chaque mécanisme est associé à un variateur dont les caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau II.6.

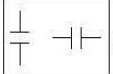
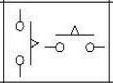
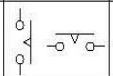
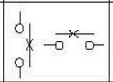
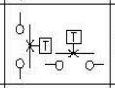
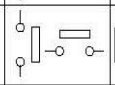
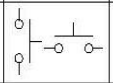
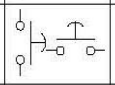
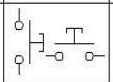
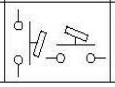
	Nombre de Moteurs	***Variateur***	
Mécanismes		***Modèle***	***Puissance (kW)***
Levage Principal	1	FC-302P37T5	37
Levage Auxiliaire	1	FC-302P30K	30
Direction du Chariot	2	FC-302P22K	22
Translation du Pont	2	FC-302P7.5K	7.5

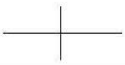
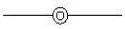
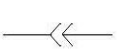
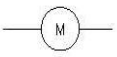
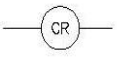
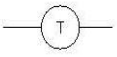
Tableau. II.6 : Modèles et puissances des variateurs

Le schéma électrique de puissance et de commande de chaque moteur du pont roulant avec le variateur Danfoss est présenté dans la figure. II.7. Le tableau. II.7 donne la signification des symboles pour faciliter la lecture des schémas de puissance et de commande.

DESCRIPTION	SYMBOLS
3 PHASE SQUIRREL CAGE ROTOR INDUCTION MOTOR	
3 PHASE WOUND ROTOR INDUCTION MOTOR	
DC. MAG. BRAKE DISK TYPE	
THRUSTOR BRAKE	
AC–DC MAG. BRAKE	
SC BRAKE	
EC BRAKE	
RECTIFIER	
LOAD LIMITER ELECTRICAL TYPE	
ELECTRONIC OVER CURRENT RELAY	

DESCRIPTION	SYMBOLS
NO FUSE BREAKER 2 PHASE	
NO FUSE BREAKER 3 PHASE	
EARTH LEAKAGE BREAKER 2 PHASE	
EARTH LEAKAGE BREAKER 3 PHASE	
TRANSFORMER	
CURRENT TRANSFORMER	
POTENTIAL TRANSFORMER	
FUSE	
FUSE WITH CONTACTOR	
THYRISTOR UNIT	

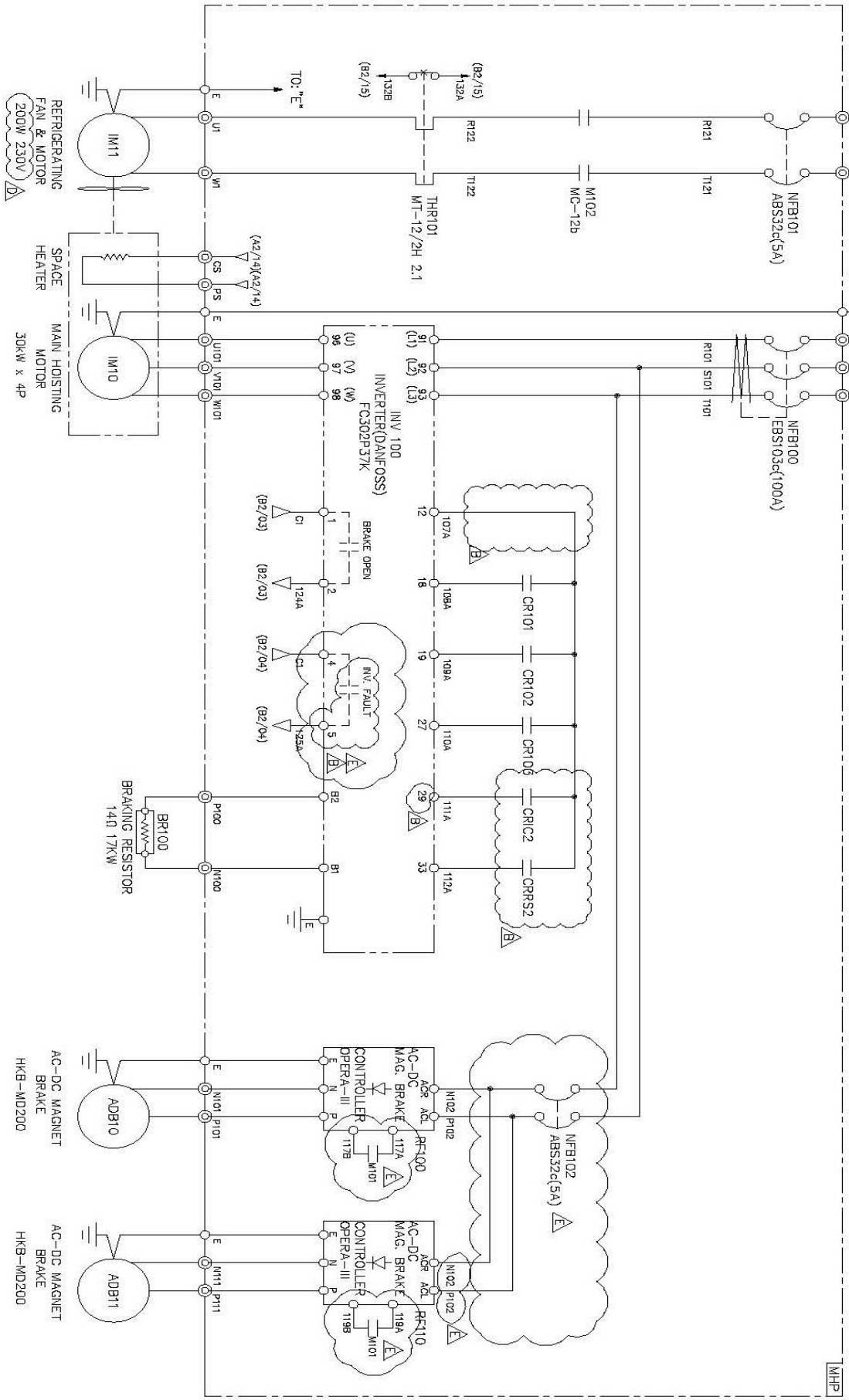
DESCRIPTION	SYMBOLS	
	MAKE	BREAK
MAGNETIC & RELAY CONTACTOR		
ON DELAY TIME CONTACTOR		
OFF DELAY TIME CONTACTOR		
EOCR OR THERMAL RELAY CONTACTOR		
THERMOSTAT		
LIMIT SWITCH		
PUSHBUTTON SWITCH		
EMERGENCY PUSHBUTTON SWITCH		
KEY SWITCH		
FOOT SWITCH		

DESCRIPTION	SYMBOLS
WIRE INTERNAL TO ENCLOSURE	
WIRE EXTERNAL TO ENCLOSURE	
WIRE NOT CONNECTED	
WIRE CONNECTED	
TERMINAL	
GROUND (EARTH)	
PLUG & RECEPTACLE	
MAGNETIC CONTACTOR COIL	
AUX. RELAY COIL	
TIMER COIL	

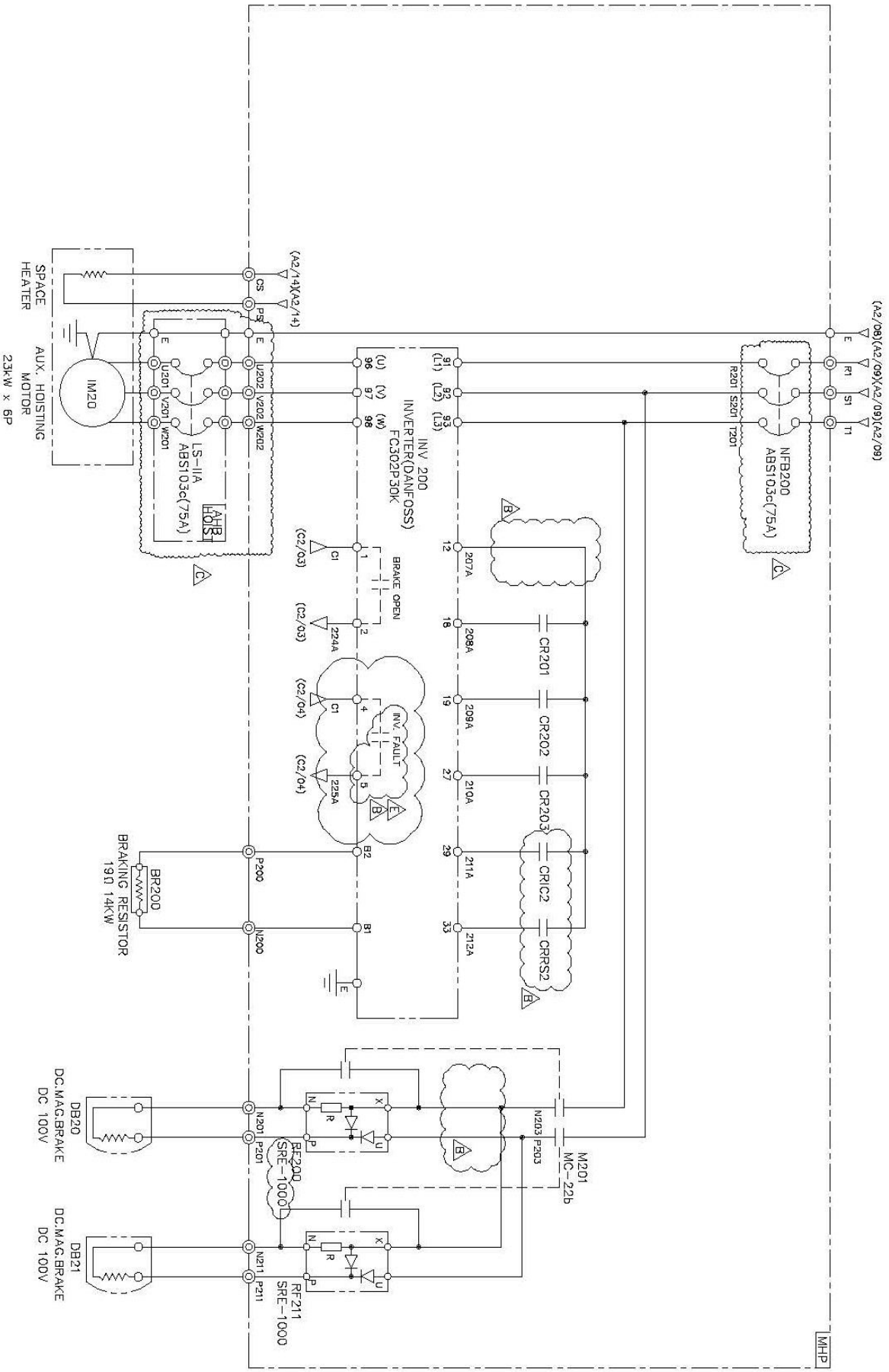
DESCRIPTION	SYMBOLS
CONTROLLER OR REMOTE CONTROLLER CONTACTOR	
UPPER LIMIT SWITCH (LS–II)	
THERMAL RELAY	
PILOT(SIGNAL) LAMP	
ROTARY LAMP	
WARING SIREN	
BUZZER	
AMMETER	
VOLT METER	
FLUORENCE LAMP	

DESCRIPTION	SYMBOLS
SOLENOID COIL	
RESISTER	
VARIABLE RESISTOR	
SLIP RING	
CABLE REEL	
SPACE HEATER	
SURGE ABSORBER	
LOAD CELL	
BALLAST WITH RECEPTACLE	
FAN	

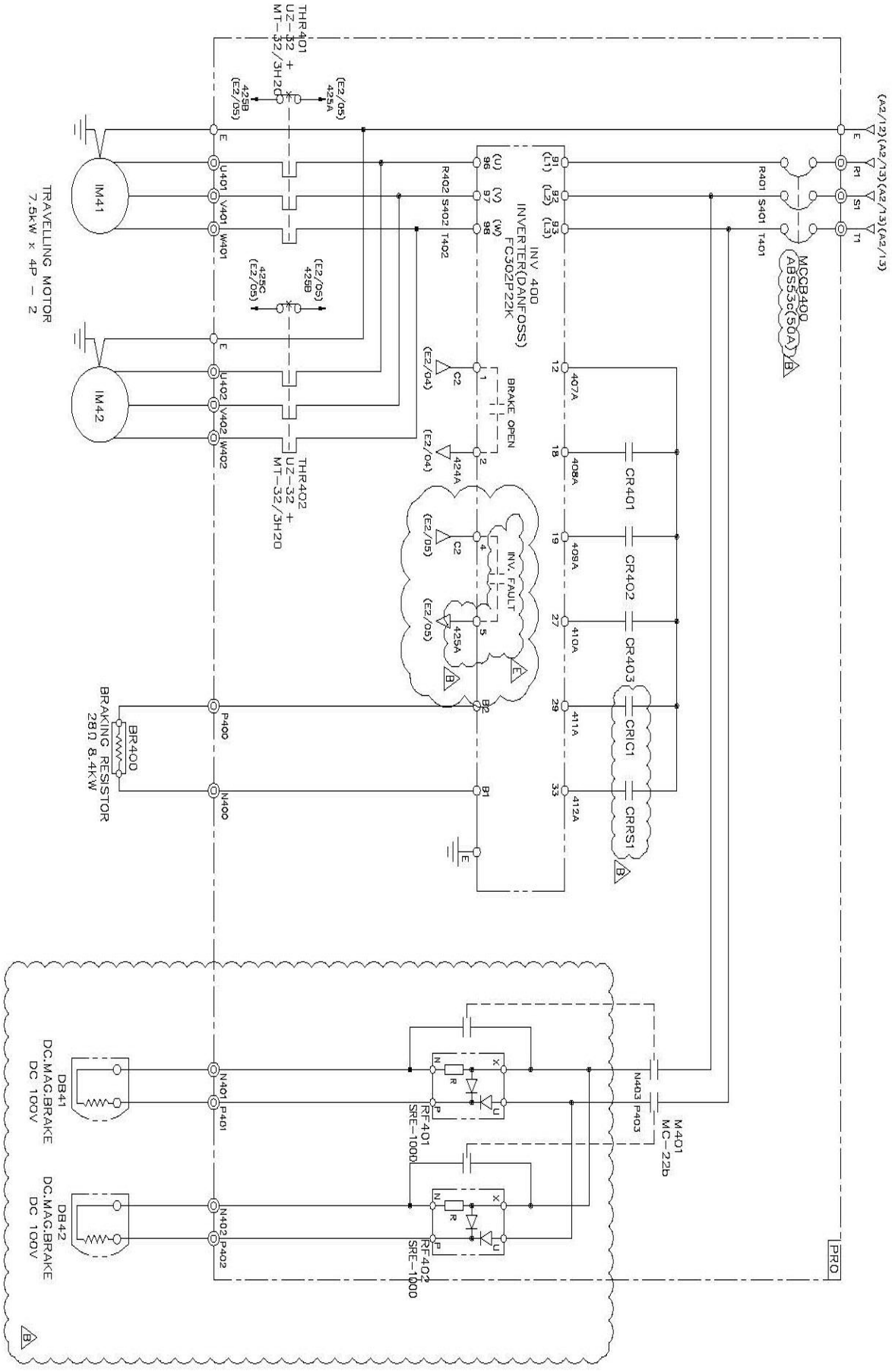
Tableau. II.7 : Nomenclature et symbolisation électrique normalisée du pont roulant



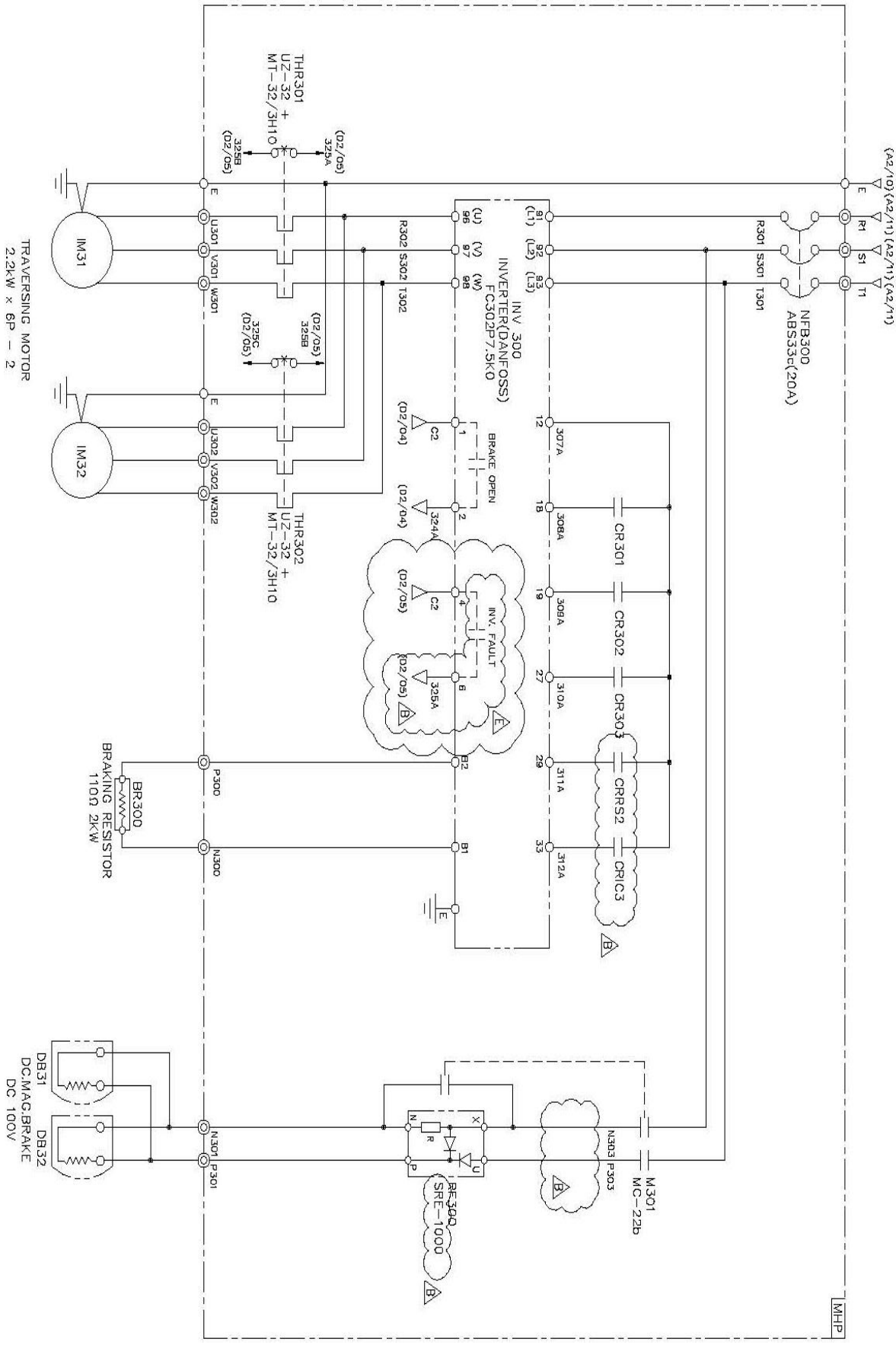
(a) : Moteur de levage principale



(b) : Moteur de levage auxiliaire



(c) : Moteurs de direction du chariot



(d) : Moteurs de translation du pont

Figure. II.7 : Architecture de connexion des différents moteurs du pont roulant

L'analyse des schémas de puissance des mécanismes de levage principal et auxiliaire (Figure. II.7.a et b) met en évidence la présence d'équipements périphériques indispensables au maintien de l'intégrité physique des moteurs : le réchauffeur anti-condensation (Space Heater) et le système de ventilation forcée (Moto ventilateur). Ces accessoires, bien que distincts du circuit de commande principal, jouent un rôle crucial dans la longévité et la sécurité opérationnelle de l'installation sous des conditions industrielles sévères :

Réchauffeur anti-condensation : est constitué de résistances chauffantes(30W/230) insérées directement au cœur du bobinage statorique intervient exclusivement lorsque le moteur est à l'arrêt. Car en milieu industriel, les variations de température ambiante combinées à l'humidité de l'air provoquent un phénomène de point de rosée, entraînant la formation de condensation sur les bobinages froids. Cette accumulation d'eau dégrade l'isolement diélectrique et peut causer des courts-circuits lors de la remise sous tension. Le réchauffeur maintient une température interne légèrement supérieure à celle de l'air ambiant, chassant l'humidité et garantissant une résistance d'isolement optimale. Sa coupure est automatiquement synchronisée avec le démarrage du moteur, et sa réactivation se fait dès l'arrêt de ce dernier.

Système de ventilation forcée : contrairement aux moteurs standards dits auto-ventilés où le ventilateur est solidaire de l'arbre moteur, les moteurs de levage connectés à des variateurs de vitesse nécessitent une ventilation indépendante c.à.d. alimenté par son propre alimentation. En phase de levage lourd ou d'approche précise, le moteur tourne à de très basses vitesses tout en développant un couple maximal, ce qui génère de fortes pertes par effet Joule. Si le ventilateur dépendait de la vitesse de l'arbre, le flux d'air de refroidissement serait quasi nul, provoquant un échauffement thermique critique. Pour cela le moto-ventilateur tourne à vitesse constante indépendamment de la vitesse du rotor du moteur, assurant une dissipation thermique continue et efficace, même à l'arrêt ou à très basse fréquence.





Figure. II.8 : Photos d'une armoire de connexion avec le variateur

II.5/ Algorithmes de contrôle Avancé

La commande *VVC+* (Voltage Vector Control Plus), développée par Danfoss représente une évolution majeure avec des performances dynamiques élevées par rapport aux techniques contrôles existantes et surtout pour les équipements de levage comme les ponts roulants. La commande *VVC+* repose sur un modèle mathématique du MAS qui exploite les mesures en temps réel des courants statoriques et grâce à l'identification automatique des paramètres du moteur à l'arrêt avec la fonction AMA (Automatic Motor Adaptation), l'algorithme estime avec précision le couple sur l'arbre et adapte instantanément l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie

II.6/ Technologies de système de freinage

II.6.1/ Freins CA-CC à aimant

Le maintien sécurisé de la charge de 90 tonnes à l'arrêt, ainsi que l'absorption de l'inertie cinétique résiduelle lors des phases de décélération du levage principal, sont assurés par un système redondant appelé double frein à l'action. Ce dispositif de sécurité critique repose sur l'utilisation de deux freins à actionnement électromagnétique CA-CC.

D'un point de vue électrique, l'électroaimant (Bobine de commande) de chaque frein est alimenté par le réseau c.à.d. en courant alternatif (CA), lequel est immédiatement redressé en courant continu (CC) de manière interne au bloc de freinage.

D'un point de vue mécanique, ces actionneurs fonctionnent selon le principe de sécurité positive (Freins normalement fermés). En l'absence de tension électrique (que ce soit lors d'un arrêt normal ou suite à une panne de courant accidentelle), l'excitation magnétique s'annule et des ressorts mécaniques internes libèrent instantanément leur force pour serrer les sabots de frein. À l'inverse, l'ouverture (ou le relâchement) du frein nécessite l'application d'une force électromagnétique générée par la bobine pour vaincre la poussée de ces ressorts.

Ce comportement mécanique est directement asservi à la logique de contrôle du variateur. Grâce à l'ajustement des paramètres dédiés, le variateur applique une tension d'alimentation à la bobine CA-CC pour ouvrir le frein uniquement lorsque le moteur a établi un flux magnétique et un courant statorique de pré-magnétisation suffisants pour supporter le poids de la charge sans provoquer de glissement. Lors de l'arrêt, la coupure de l'alimentation de l'électroaimant intervient dès que la vitesse descend sous un seuil de sécurité, verrouillant mécaniquement l'arbre moteur à vitesse quasi-nulle, ce qui préserve les garnitures de friction d'une usure thermique prématurée.

II.6.2/ Freins CC à disque magnétique

Contrairement au mécanisme de levage principal qui met en œuvre une structure hybride CA-CC redondante, les mouvements secondaires du pont roulant à savoir le levage auxiliaire, la translation du pont et la direction du chariot, intègrent des systèmes de freinage basés sur des freins à disque alimentés directement en courant continu (100 V).

Bien que manipulant des charges plus modérées (Levage auxiliaire), la sécurité anti-chute reste une priorité absolue. Pour cette raison, il y a deux freins à disque magnétiques CC, garantissant une redondance mécanique complète à l'arrêt. L'excitation de la bobine en courant continu permet une libération quasi instantanée du disque dès que le variateur valide le couple de pré-magnétisation statorique, évitant ainsi tout micro-glissement de la charge au décollage.

Pour les mouvements horizontaux (Translation et direction), les contraintes thermiques et cinétiques diffèrent du levage. Le rôle principal des freins à disque CC est d'assurer le maintien en position de repos (Verrouillage contre les forces d'inertie ou les courants d'air dans l'atelier) et de servir de freinage d'urgence. Durant les cycles normaux de fonctionnement, le ralentissement et l'arrêt complet du pont et du chariot sont entièrement pris en charge électriquement par les rampes de décélération gérées par les variateurs de vitesse. Les freins à disque CC ne se ferment mécaniquement que lorsque la vitesse angulaire des moteurs est quasi nulle, éliminant ainsi toute usure abrasive prématurée des garnitures de friction.

Le tableau. II.8 présente une comparaison entre le frein CA-CC à aimant le frein CC à disque magnétique, cette comparaison met en évidence leurs différences en termes d'alimentation électrique, de traitement du signal, d'interface mécanique, de temps de réponse. Elle permet ainsi de mieux comprendre le choix de chaque technologie en fonction des exigences opérationnelles et des performances recherchées.

Critères de comparaison	***Frein CA-CC à Aimant***	***Frein CC à Disque Magnétique***
Type d'alimentation externe	Courant Alternatif	Courant Continu direct de commande
Traitement interne du signal	Redressement interne (structure hybride).	
Interface mécanique	À mâchoires avec haute capacité thermique	À disque frictionnel direct en bout d'arbre du moteur
Temps de réponse	Moyen	Très rapide / Quasi instantané

Tableau. II.8 : Critères de comparaison entre les technologies des systèmes de freinage

II.7/ Système de détection de charge

Le contrôle sécurisé du pont roulant 90/22.5 tonnes repose sur un système dédié de pesage et de détection de charge en temps réel. Ce dispositif remplit une double fonction critique : d'une part, il assure la protection structurelle et mécanique contre les surcharges ; d'autre part, il fournit une mesure précise indispensable à la logique de contrôle du variateur pour anticiper l'effort requis avant le relâchement des freins.

L'architecture de mesure et de traitement de la charge est segmentée en trois niveaux technologiques (Figure. II.9) :

***Capteurs de force* (*Load Cells*)** : installés directement sur chaque crochet, le système intègre un capteur de 90 tonnes pour le mécanisme de levage principal et un second capteur de 22,5 tonnes dédié au levage auxiliaire.

***Boîtiers amplificateurs* (*AMP BOX*)** : ces modules reçoivent les signaux analogiques bruts issus des capteurs via un câblage blindé à quatre fils. Ils convertissent ces grandeurs en un signal standardisé de courant 4-20 mA, hautement immunisé contre les perturbations électromagnétiques environnantes.

***Limiteur de charge centralisé* (*DACE-M PL-950*) :** Cette unité centrale, centralise et traite les signaux 4-20 mA. Son écran numérique permet la visualisation simultanée de la masse suspendue aux crochets principal (A) et auxiliaire (B).

Le limiteur PL-950 gère de manière autonome la sécurité de l'installation grâce à des seuils programmés. Si la charge mesurée franchit le seuil critique de 110 % de la capacité nominale, l'unité bascule ses contacts de sortie et active des relais d'alarme (CRLT, CRLA, CRLM) raccordés aux sirènes et voyants en cabine, et coupe instantanément la ligne de commande du mouvement de montée.

En parallèle, ce signal de pesée est exploité par le variateur Danfoss afin d'adapter dynamiquement son couple de pré-magnétisation au démarrage. Pour transformer la masse mesurée par le système PL-950 en une grandeur d'entrée physique exploitable, il est nécessaire de ramener l'effort linéaire de la charge suspendue sous forme d'un couple de rotation appliqué sur l'arbre du moteur.
En se basant sur le principe de conservation des puissances à travers la chaîne cinématique de levage (moufle, câbles, tambour et réducteur de vitesse), l'expression du couple résistant équivalent ramené sur l'arbre moteur en N.m est définie par la formule suivante :

$$C_r = \frac{M.g.D}{2.i.\eta} \qquad \text{(II.1)}$$

Où :
M : masse de la charge détectée par le limiteur PL-950 (en kg)
g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s^2)
D : diamètre primitif du tambour d'enroulement des câbles (en m)
i : rapport de transmission du réducteur mécanique
η : rendement global de la transmission mécanique

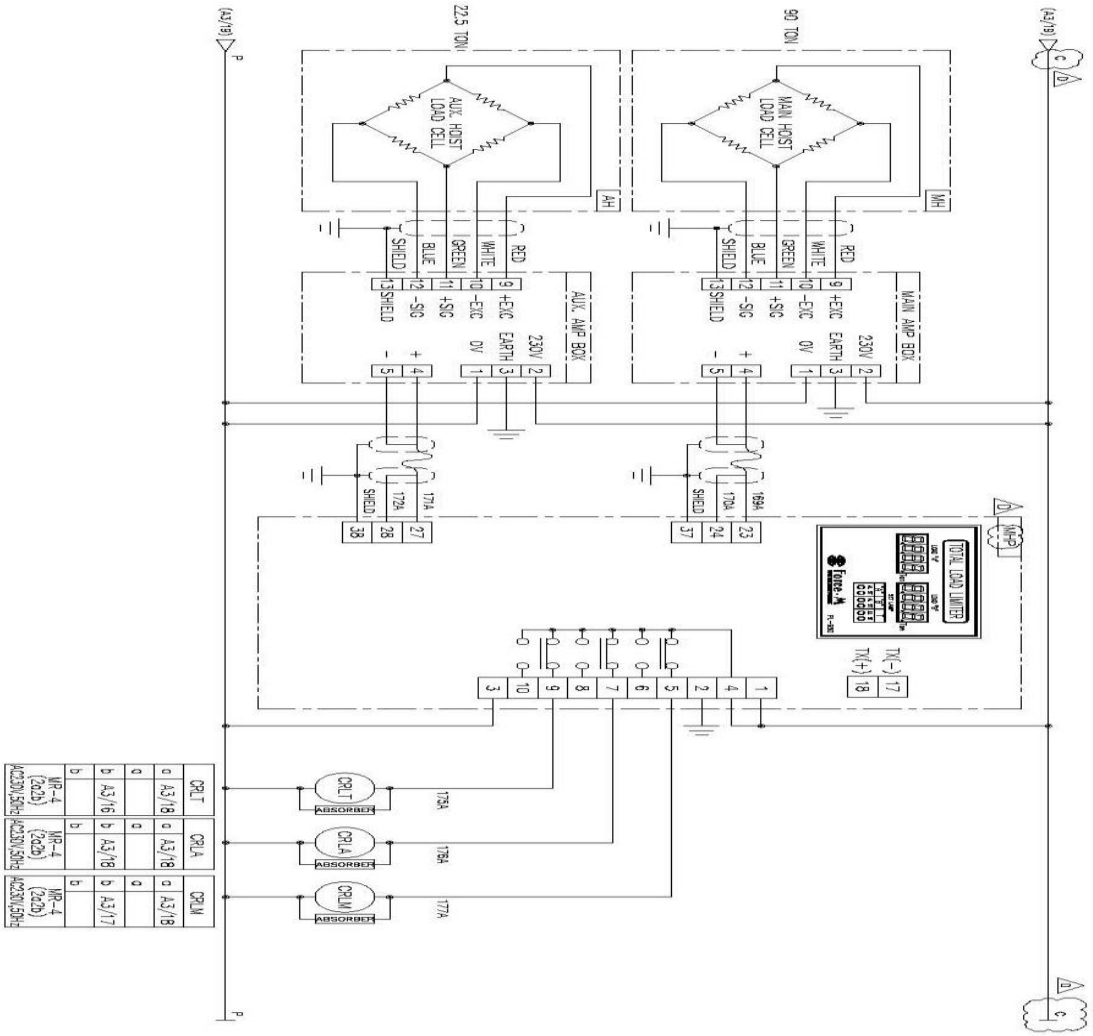


Figure. II.9 : Schéma synoptique du système de pesage et de limitation de charge

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière détaillée l'étude descriptive et technologique approfondie d'un pont roulant industriel d'une capacité de levage de 90/22,5 tonnes. Nous avons commencé par une vue d'ensemble des différents types de ponts roulants, de leurs éléments constitutifs ainsi que de leurs différents axes de mouvement.

L'analyse s'est ensuite orientée vers la caractérisation électrique et mécanique des différents actionneurs, à travers l'exploitation des données issues de leurs plaques signalétiques, permettant ainsi de distinguer les exigences spécifiques du levage principal, du levage auxiliaire, de la translation et de la direction.

L'étude des variateurs de vitesse de la gamme *Danfoss VLT® Automation Drive FC 302* a mis en évidence l'importance d'une gestion dynamique moderne, notamment grâce aux performances de la commande avancée *VVC+*, essentielle pour répondre aux exigences élevées de couple, de précision et de fiabilité imposées par les applications de levage industriel.

Par ailleurs, une attention particulière a été accordée aux organes de sécurité critiques. D'une part, l'analyse comparative des différentes technologies de freinage a permis de justifier l'utilisation de freins de sécurité CA-CC à aimant pour les opérations de levage de charges lourdes, en raison de leurs performances élevées en matière de sécurité et de fiabilité, tandis que les freins CC à disque magnétique sont privilégiés pour les mouvements secondaires. D'autre part, l'intégration du système centralisé de détection de charge a fait l'objet d'une étude approfondie, mettant en évidence son rôle dans la protection contre les surcharges ainsi que son interfaçage avec le système de commande du pont roulant.

Chapitre III

Application de la commande VVC+ sur le mécanisme de levage auxiliaire

Introduction

La technologie moderne des systèmes d'entraînement exige un contrôle de plus en plus précis et continu de la position, de la vitesse et du couple, tout en garantissant une grande rapidité de réponse. Aujourd'hui, les MAS sont largement privilégiés dans l'industrie en raison de leur robustesse, de leur faible coût et de leur facilité d'entretien [Mesbahi_04].

L'absence de découplage naturel entre les différentes variables d'entrée et de sortie confère au moteur asynchrone un comportement fortement non linéaire, ce qui rend sa commande particulièrement complexe [Chekima_14]. Cette difficulté a conduit au développement de stratégies de commande avancées destinées aux applications industrielles exigeantes, parmi lesquelles figure la technologie *VVC+* développée par Danfoss.

III.1/ Modélisation du MAS

Le MAS se compose de deux parties principales séparées par un espace d'air appelé entrefer [Bouchareb_20] :

Une partie fixe (Stator) : également appelée inducteur, elle est reliée à la source d'alimentation électrique et est constituée de trois enroulements triphasés.

Une partie mobile (Rotor) : également appelée induit, elle est montée sur un arbre en rotation et assure l'entraînement de la charge mécanique. On distingue principalement deux types de rotors : le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil.

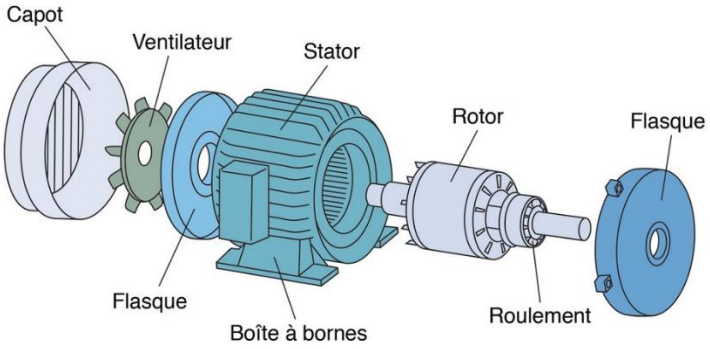


Figure. III.1 : Constitution d'un MAS [3]

Le fonctionnement du MAS repose sur l'interaction électromagnétique entre deux éléments principaux :

- Le champ tournant créé par le courant triphasé dans l'enroulement du stator,
- Les courants induits dans l'enroulement du rotor lorsque ses conducteurs sont traversés par ce champ.

Le moteur est représentée par ses six enroulements dans l'espace électrique ; l'angle θ repère l'axe de la phase rotorique $\overrightarrow{R_a}$ de référence par rapport à l'axe fixe de la phase statorique de référence $\overrightarrow{S_a}$.

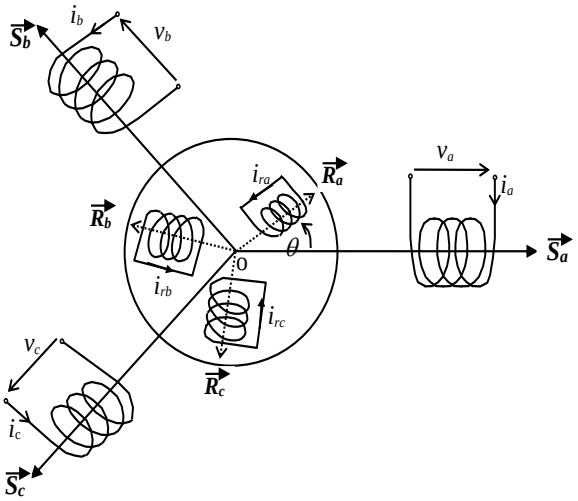


Figure. III.2 : Représentation schématique d'un MAS

III.1.1/ Hypothèses simplificatrices

À cause de la constitution compliquée du MAS, plusieurs hypothèses simplificatrices sont considérées [Nechma_19] :

- Le moteur présente une symétrie parfaite de construction.
- Le circuit magnétique fonctionne en régime non saturé.
- Les variations des résistances des enroulements dues à la température sont négligées.
- L'entrefer est supposé constant.
- Les inductances propres et mutuelles ne dépendent pas de l'intensité des courants.
- Les pertes fer, ainsi que celles dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault, sont considérées nulles.
- La distribution de la force magnétomotrice et du flux dans l'entrefer est supposée sinusoïdale.

III.1.2/ Équations générales du MAS

Le modèle mathématique permet principalement d'observer les différentes évolutions des grandeurs électromécaniques. Il sert également à prévoir les actions de commande nécessaires pour faire face aux problèmes liés aux variations de charge, de vitesse, etc. Le modèle du MAS est décrit par trois type d'équations principales [Boudjerda_25], [Irzil_18] :

- ***Équations électriques***

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques s'écrivent comme suit :

$$[V_s] = [R_s].[I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad \text{(III.1)}$$

$$[0] = [R_r].[I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad \text{(III.2)}$$

Telle que :

$$V_s = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \qquad R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \qquad R_s = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$I_s = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \qquad I_r = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \qquad \varphi_s = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \qquad \varphi_r = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

- ***Équation magnétiques***

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$[\varphi_s] = [L_{ss}].[I_s]+[M_{sr}].[I_r]$ (III.3)

$[\varphi_r] = [L_{rr}].[I_r]+[M_{rs}].[I_s]$ (III.4)

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \qquad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

L_{ss} L_{rr} : inductance propre du stator et rotor respectivement.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

M_{sr} : inductance mutuelle entre stator et rotor.

En mettre les équations sous la forme matricielle on trouve :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$$

De (III.1) ….. (III.4) :

$$[V_s] = [R_s].[I_s] + [L_{ss}].\frac{d}{dt}[I_s] + [M_{sr}].\frac{d}{dt}[I_r] \quad \text{(III.5)}$$

$$[0] = [R_r].[I_r] + [L_{rr}].\frac{d}{dt}[I_r] + [M_{rs}].\frac{d}{dt}[I_s] \quad \text{(III.6)}$$

L_m : inductance mutuelle entre phase rotorique et statorique.

L_s , L_r : inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s , M_r: inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

θ : angle de rotation du rotor par rapport au stator.

➢ ***Équation mécanique***

$$J\frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r - K_f\Omega \quad \text{(III.7)}$$

J : moment d'inertie.

C_{em} : couple électromagnétique.

C_r : couple résistant.

Ω : vitesse angulaire de rotation du moteur.

K_f : coefficient de frottement.

III.1.3/ Transformation triphasée biphasée

La transformation triphasée biphasée permet de transformer le système triphasé (a, b, c) a un système biphase (α, β ou d, q). Il existe trois transformations [Latar_20] :

➢ ***Transformation de Concordia et de Clarke***

Cette transformation permet de convertir les grandeurs triphasées définies dans le repère réel (a, b, c) vers un repère orthogonal fixe (α, β).

Le passage du système triphasé au système biphasé est donné par :

$$[X_\alpha\ X_\beta\ X_o]^{\mathrm{T}} = [C].[X_a\ X_b\ X_c]^{\mathrm{T}}$$

La transformation inverse s'écrit :

$$[X_a\ X_b\ X_c]^T = [C]^{-1}.[X_\alpha\ X_\beta\ X_o]^T$$

Le vecteur X représente la tension, le courant ou le flux, et $[C]$ est la matrice de transformation.

$$[C] = K\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$; avec : $[C]^{-1}=[C]^{\mathrm{T}}$

Cette transformation conserve la puissance et les amplitudes, pour cela ; le coefficient K prend deux valeurs :

$K = 2/3$: permet de garder l'amplitude inchangée.

$K = \sqrt{2/3}$: permet de garder la puissance inchangée.

➢ ***Transformation de Park***

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé en un système biphasé équivalent. Ainsi, les trois enroulements (a, b, c) du stator ou du rotor sont remplacés par deux axes orthogonaux : l'axe direct (d) et l'axe en quadrature (q). Cette représentation simplifie l'étude et la modélisation des machines électriques (Figure. III.3).

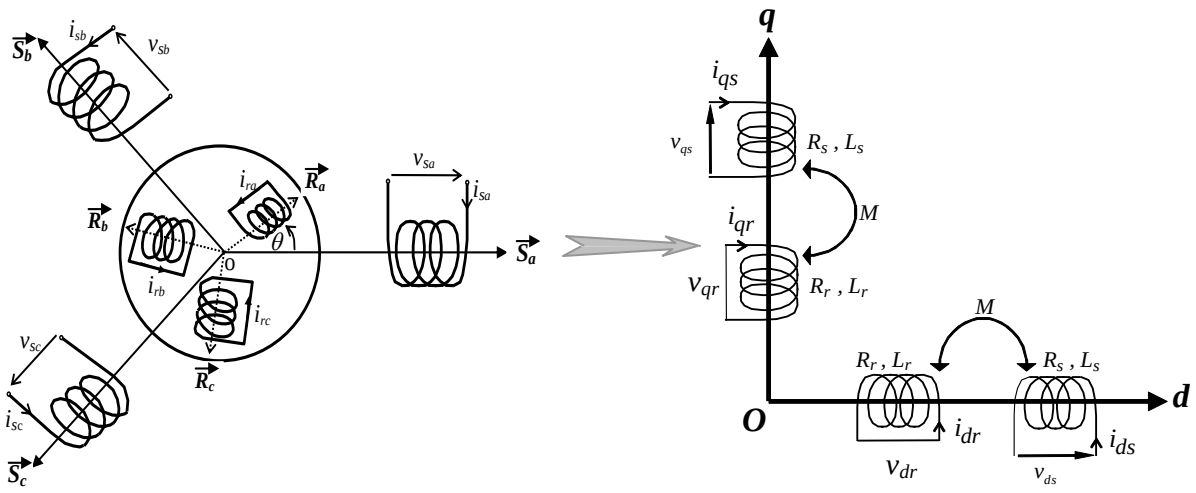


Figure. III.3 : Représentation du MAS dans le repère de Park

La matrice du Park est définie par :

$$[P(\theta)] = K.\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } [P(\theta)]^{-1}=[P(\theta)]^{T}$$

La transformer de Park est :

$[X_d\ X_q\ X_o]^{T}= [P(\theta)].[X_a\ X_b\ X_c]^{T}$

et la transformation inverse s'écrit :

$[X_a\ X_b\ X_c]^{T} = [P(\theta)]^{-1}.[X_d\ X_q\ X_o]^{T}$

III.1.4/ Application de la transformation de Park au MAS

En appliquant la transformation de Park aux tensions, courants ou flux du système triphasé, on obtient [Nechma_19] :

Les équations de la tension :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s.\varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s.i_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s.\varphi_{ds} \end{cases} \qquad \begin{cases} 0 = R_r.i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_{s-}\omega).\varphi_{qr} \\ 0 = R_s.i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_{s-}\omega).\varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

Les équations du flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s.i_{ds} + L_m.i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s.i_{qs} + L_m.i_{qr} \end{cases} \qquad \begin{cases} \varphi_{dr} = L_r.i_{dr} + L_m.i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r.i_{qr} + L_m.i_{qs} \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

L'équation du couple :

$$C_{em} = p.\frac{L_m}{L_r}.(\varphi_{dr}.i_{qs} - \varphi_{qr}.i_{ds}) \quad \text{(III.10)}$$

Avec :

$L_s = L_s - M_s$

$L_r = L_r - M_r$

$L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$

ω_s : vitesse angulaire des axes dq par rapport au stator.

ω_r : vitesse angulaire des axes dq par rapport au rotor.

III.2/ Simulation du MAS

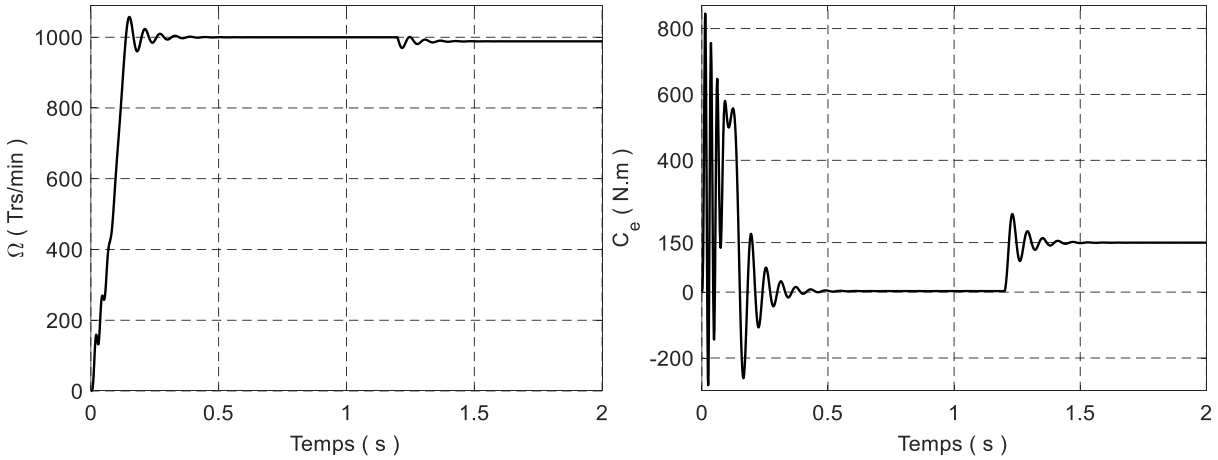
La simulation du modèle du moteur asynchrone (MAS) a été réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink. Dans cette simulation, le MAS est alimenté par un système de tensions triphasées sinusoïdales et soumis à un couple de charge appliqué à partir de la première seconde de fonctionnement. Les résultats obtenus sont présentés à la figure III.5.

Le réseau d'alimentation est défini par :

$$\begin{cases} v_1 = 220\sqrt{2}sin(2.\pi.f.t) \\ v_2 = 220\sqrt{2}sin(2.\pi.f.t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3 = 220\sqrt{2}sin(2.\pi.f.t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} , f = 50Hz$$

Parmi les quatre MAS du pont roulant en choisissant comme exemple pour simulation le MAS du mécanisme de levage auxiliaire :

Paramètres	***R_s***	***R_r***	***L_s***	***L_r***	***L_m***	***J***	***P***
MAS	**0.2141 *Ω***	**0.1062 *Ω***	***0.0316 H***	***0.0316 H***	***0.0305 H***	***0.5 Kg.m²***	***3***



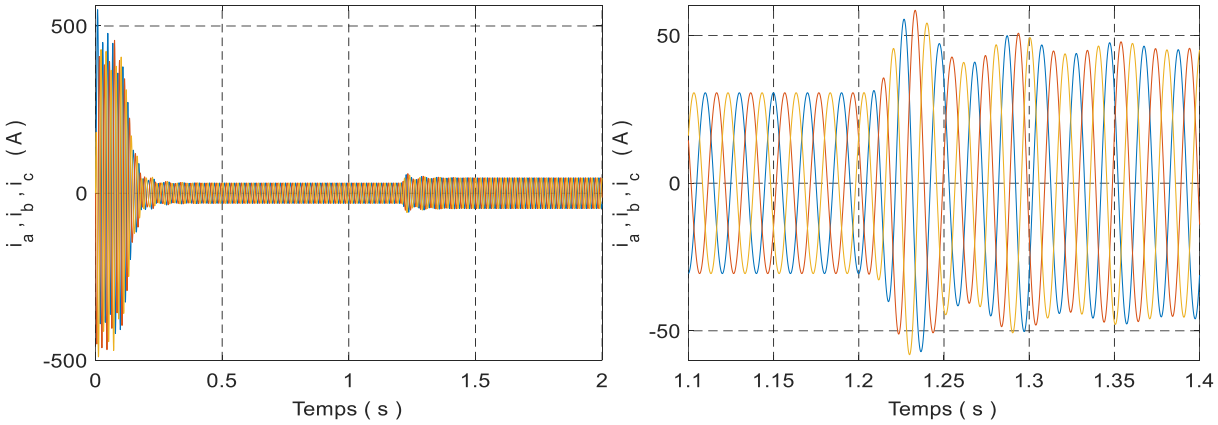


Figure. III.4: Résultats de simulation du MAS connecté directement au réseau

D'après la figure III.4, la vitesse augmente de manière quasi linéaire et atteint 997 tr/min, soit une valeur très proche de la vitesse de synchronisme (1000 tr/min), à t = 0,4 s, correspondant au début du régime permanent. Au démarrage, le couple électromagnétique atteint une valeur maximale d'environ 800 N·m et présente des oscillations transitoires qui s'atténuent progressivement pour disparaître après 0,4 s. Il se stabilise ensuite autour de 5 N·m, valeur correspondant essentiellement au couple nécessaire pour compenser les frottements.

Les courants statoriques présentent initialement des pics importants, atteignant environ 500 A. Ces surintensités transitoires diminuent progressivement au cours des premières alternances avant d'évoluer vers des courants sinusoïdaux stabilisés, d'amplitude constante voisine de 30 A.

En appliquant une charge C_r = 150 N·m à partir de l'instant t = 1,2 s, on constate que la vitesse diminue puis se stabilise à 988 tr/min. Par ailleurs, une augmentation est observée au niveau du couple électromagnétique ainsi que des courants statoriques, qui se stabilisent respectivement à 155 N·m (légèrement supérieur au couple de charge appliqué) et à 46 A.

III.3/ Onduleur triphasé

L'onduleur de tension triphasé (Figure. III.5) est constitué de trois bras, chaque bras comporte deux interrupteurs bidirectionnels en série, qui fonctionnent d'une manière complémentaire pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit, d'autre part pour éviter le circuit ouvert de la charge. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montés en tête bêche [Lalili_09], [Alioua_24].

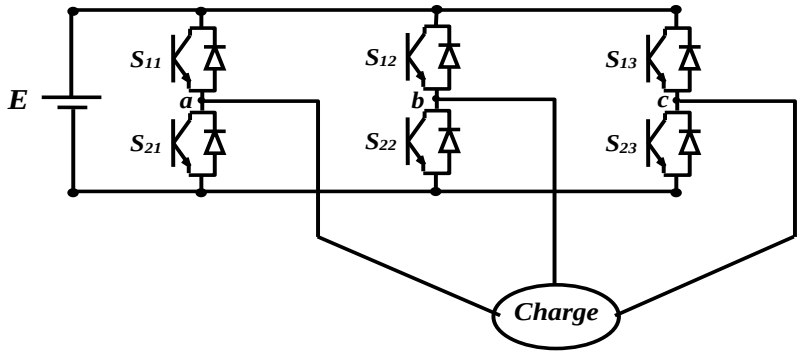


Figure. III.5 : Structure de l'onduleur

Pour chaque interrupteur S_{ij} (i =1,2, j =1,2,3), on définit une fonction de commutation F_{ij} :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 \; si \; S_{ij} \; est \; fermé \\ 0 \; si \; S_{ij} est \; ouvert \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

La complémentarité entre les deux interrupteurs de chaque bras impose l'équation suivante :

$$F_{2j} = 1 - F_{1j} \rightarrow j = 1 - 3 \quad \text{(III.12)}$$

De nombreuses stratégies de commande ont été développées, la MLI triangulo-sinusoïdale et la MLI vectorielle sont les techniques les plus reconnues industriellement :

- ***MLI triangulo-sinusoïdale***

Le principe de cette technique consiste à comparer deux signaux. Le premier est un signal sinusoïdal de référence, ayant une amplitude variable et une fréquence qui détermine celle de la tension de sortie. Le second est un signal triangulaire, appelé porteuse, caractérisé par une amplitude constante et une fréquence élevée. Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par les points d'intersection entre le signal de référence et la porteuse (Figure. III.5).

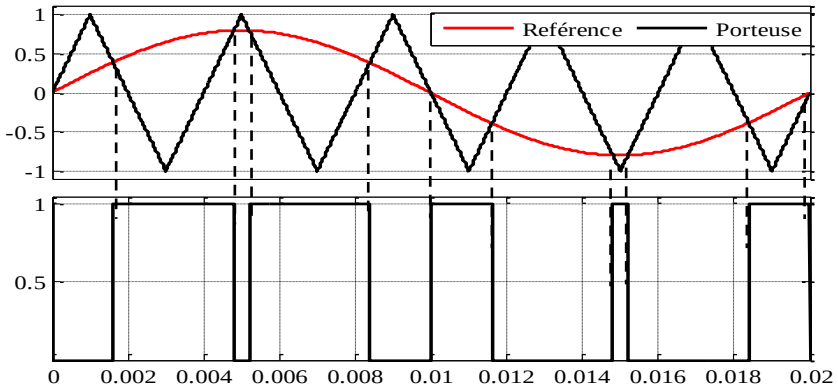


Figure. III.6 : Signaux de MLI triangulo-sinusoïdale

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation m : qui correspond au rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_m de la tension de référence : $m = \frac{f_p}{f_m}$

- Le taux de modulation ($\boldsymbol{r}$) ou coefficient de réglage de tension est donné par ($r \in [0\ 1]$) :

$r = \frac{2.V_m}{E}$

V_m : tension maximale désirée à la sortie de l'onduleur, E : tension du bus continu

Les tensions de référence sinusoïdales sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{refa} = r.\sin(2.\pi.f.t) \\ V_{refb} = r.\sin\left(2.\pi.f.t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{refc} = r.\sin\left(2.\pi.f.t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

Les paramètres de simulations sont donnés dans le tableau suivant :

Tension du bus continu (E)	**530 *V***
Fréquence de la tension de référence (f)	**50 *Hz***
Fréquence de la porteuse (f_p)	**5 *kHz***
Taux de modulation (r)	**0.7**

Tableau. I.1 : Paramètres de simulation

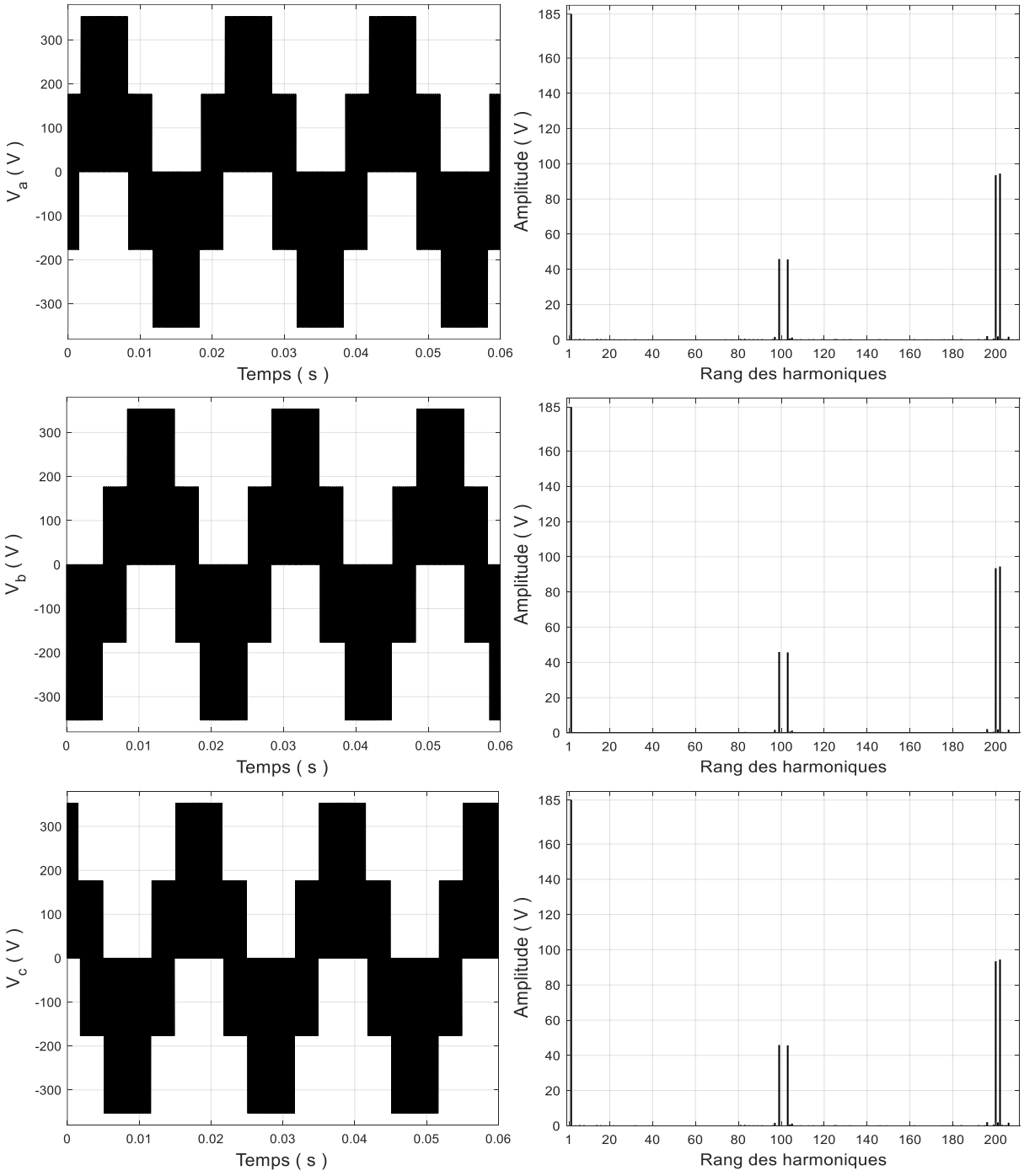
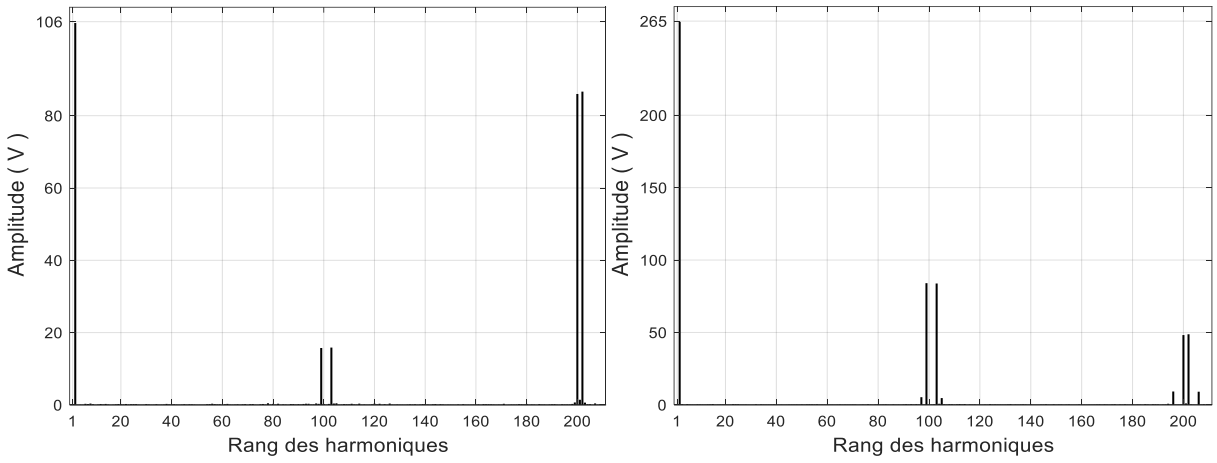


Figure. III.7 : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques



r = 0.4 *r = 1*

Figure. III.8 : Spectres d'harmoniques pour différentes valeurs de r

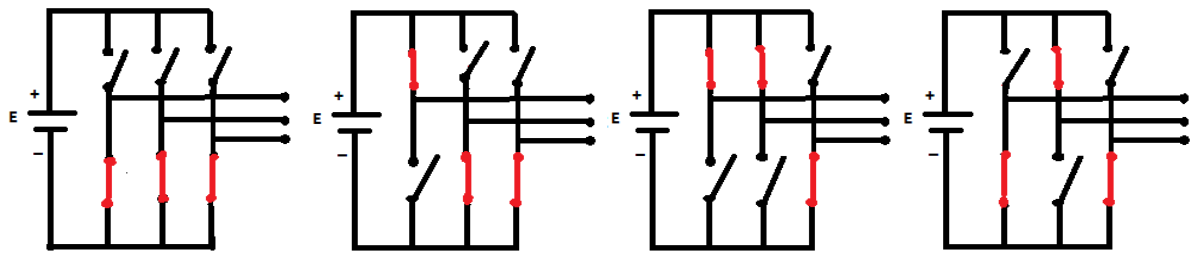
L'analyse des spectres d'harmoniques présentés sur les figures III.7 et III.8 permet de mettre en évidence deux propriétés fondamentales de la MLI appliquée à l'onduleur triphasé : L'amplitude de la composante fondamentale de la tension de sortie s'avère directement proportionnelle au taux de modulation, et elle est rigoureusement définie par la relation *r*.*E*/2. L'évolution des spectres pour différentes valeurs de *r* (*r* = 0.4 et 1) valide cette linéarité du gain en tension de l'onduleur.

L'analyse spectrale montre aussi, que les composantes harmoniques ne sont pas dispersées de manière aléatoire, mais se regroupent par familles distinctes. Ces dernières sont systématiquement centrées autour des fréquences multiples de la porteuse (Autour des rangs 100 et 200).

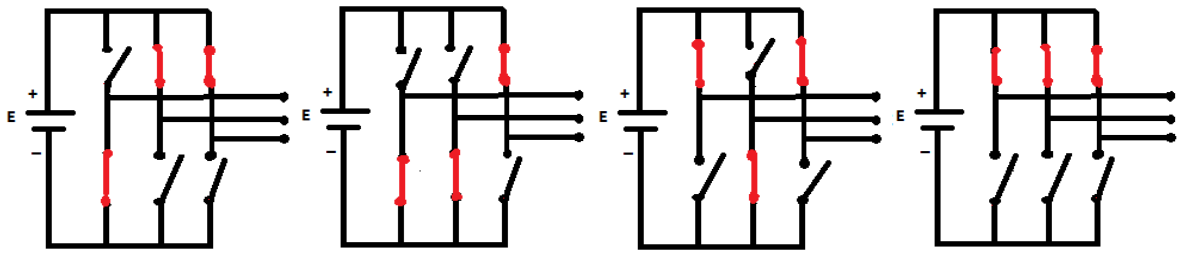
- ***MLI vectorielle***

Le principe repose sur la notion du vecteur de tension de référence V_{ref} obtenu à partir des tensions de référence ($V_{refa}, V_{refb}, V_{refc}$).

Comme l'onduleur comporte trois bras, et que chaque bras peut adopter deux états possibles, il en résulte $2^3 = 8$ états de configurations de commutation : 111, 110, 100, 101, 000, 001, 011 et 010 [Alioua_24]. Chacun de ces états correspond à une configuration particulière des interrupteurs des bras de l'onduleur, comme représenté sur la figure. III.9.



000 ***100*** ***110*** ***010***



011 ***001*** ***101*** ***111***

Figure. III.9 : Huit états de l'onduleur

Chaque état de l'onduleur correspond à une combinaison spécifique des tensions V_a, V_b et V_c obtenue en remplaçant F_{11}, F_{12} et F_{13} par leurs valeurs correspondantes.

$$\begin{cases} V_a = \left(\frac{2}{3}F_{11} - \frac{1}{3}F_{12} - \frac{1}{3}F_{13}\right).E \\ V_b = \left(-\frac{1}{3}F_{11} + \frac{2}{3}F_{12} - \frac{1}{3}F_{13}\right).E \\ V_c = \left(-\frac{1}{3}F_{11} - \frac{1}{3}F_{12} + \frac{2}{3}F_{13}\right).E \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur dépendent de la position du vecteur de référence V_{ref} dans le repère dq ainsi que du secteur dans lequel il se situe.
Le vecteur V_{ref} possède huit positions discrètes, issues des huit états possibles de l'onduleur, et correspondant aux différentes tensions de sortie.

Ces huit positions sont obtenues en substituant les tensions V_a, V_b et V_c par leurs expressions dans la relation suivante :

$$V_{ref} = \frac{2}{3}(V_1 + \alpha.V_2 + \alpha^2.V_3)\ ,\ \alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = cos\frac{2\pi}{3} + jsin\frac{2\pi}{3} = \frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{(III.15)}$$

Le tableau présente les tensions de sortie associées aux huit états de l'onduleur, ainsi que le vecteur de référence correspondant :

États des interrupteurs	V_a	V_b	V_c	θ	*Secteur*	*Vecteur de référence*
000	0	0	0	0	***0***	$\vec{V}_0$
100	$\frac{2}{3}E$	$-\frac{1}{3}E$	$-\frac{1}{3}E$	$0 \le \theta < \pi/3$	***I***	$\vec{V}_1$
110	$\frac{1}{3}E$	$\frac{1}{3}E$	$-\frac{2}{3}E$	$\pi/3 \le \theta < 2.\pi/3$	***II***	$\vec{V}_2$
010	$-\frac{1}{3}E$	$\frac{2}{3}E$	$-\frac{1}{3}E$	$2.\pi/3 \le \theta < \pi$	***III***	$\vec{V}_3$
011	$-\frac{2}{3}E$	$\frac{1}{3}E$	$\frac{1}{3}E$	$\pi \le \theta < 4.\pi/3$	***IV***	$\vec{V}_4$
001	$-\frac{1}{3}E$	$-\frac{1}{3}E$	$\frac{2}{3}E$	$4.\pi/3 \le \theta < 5.\pi/3$	***V***	$\vec{V}_5$
101	$\frac{1}{3}E$	$-\frac{2}{3}E$	$\frac{2}{3}E$	$5.\pi/3 \le \theta < 2.\pi$	***VI***	$\vec{V}_6$
111	0	0	0	0	***0***	$\vec{V}_7$

Tableau. III.2 : Tensions de sortie correspondantes aux états de l'onduleur

Le diagramme de la figure. III.10 illustre la position des huit vecteurs dans le plan *dq*. Ce dernier est divisé en six secteurs triangulaires (*I*, *II*, *III*, *IV*, *V*, *VI*) de même largeur 60° par les six vecteurs non nuls (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6) qui ont le même module, et leurs extrémités définissent les sommets d'un hexagone. Les deux vecteurs nuls (V_0 et V_7) sont positionnés à l'origine de cet hexagone.

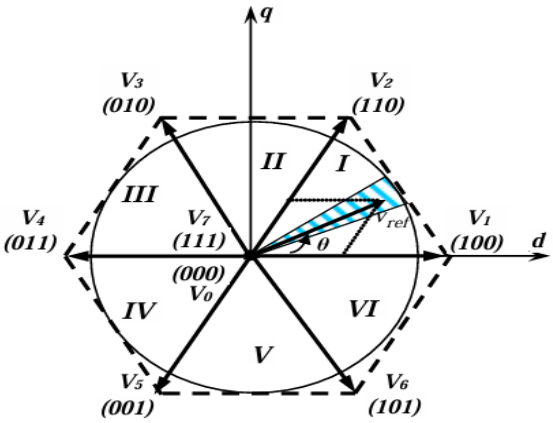


Figure. III.10 : Diagramme vectoriel

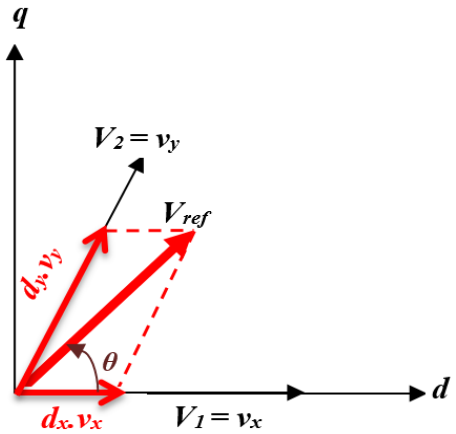


Figure. III.11 : Tension de référence dans le secteur I

Le vecteur V_{ref} est obtenu en combinant les deux vecteurs v_x , v_y qui restreignent le secteur à cet intervalle (Figure. III.11), ainsi qu'un vecteur à tension nulle v_z **:**

$$V_{ref} = d_x.v_x + d_y.v_y + d_z.v_z \quad , \quad d_x = \frac{T_1}{T_s} \quad , d_y = \frac{T_2}{T_s} \quad , d_z = \frac{T_0}{T_s} \tag{III.16}$$

Avec :

T_s : période d'échantillonnage

T_1, T_2, T_0 durées d'application des vecteurs v_x, v_y, v_z respectivement

$T_s = T_1 + T_2 + T_0$

Les rapports d_x, d_y et d_z sont donnés par les relations suivantes :

$d_x = r.\sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$

$d_y = r.\sin(\theta)$

$d_z = 1 - d_x - d_y$

La période d'échantillonnage constitue une fraction très faible de la période des tensions de référence. Sur le diagramme vectoriel, elle correspond à un intervalle angulaire de largeur $(T_s/T).2\pi$ appelé intervalle d'échantillonnage (Zone hachurée de la figure. III.10).

Afin de réduire le nombre de commutations par période et d'améliorer la qualité de la tension de sortie, une séquence spécifique des vecteurs est adoptée à chaque période d'échantillonnage [Lalili_09] :

- ✓ Les trois états sont appliqués dans un ordre donné pendant la première moitié de la période, puis dans l'ordre inverse pendant la seconde moitié ;
- ✓ Le même état est utilisé au début et à la fin de la période d'échantillonnage ;

✓ L'ordre des états X et Y est inversé alternativement d'un secteur à l'autre

La séquence des états permet de déduire les signaux logiques associés à chaque interrupteur. Leur évolution au cours d'une période d'échantillonnage est illustrée dans la figure suivante :

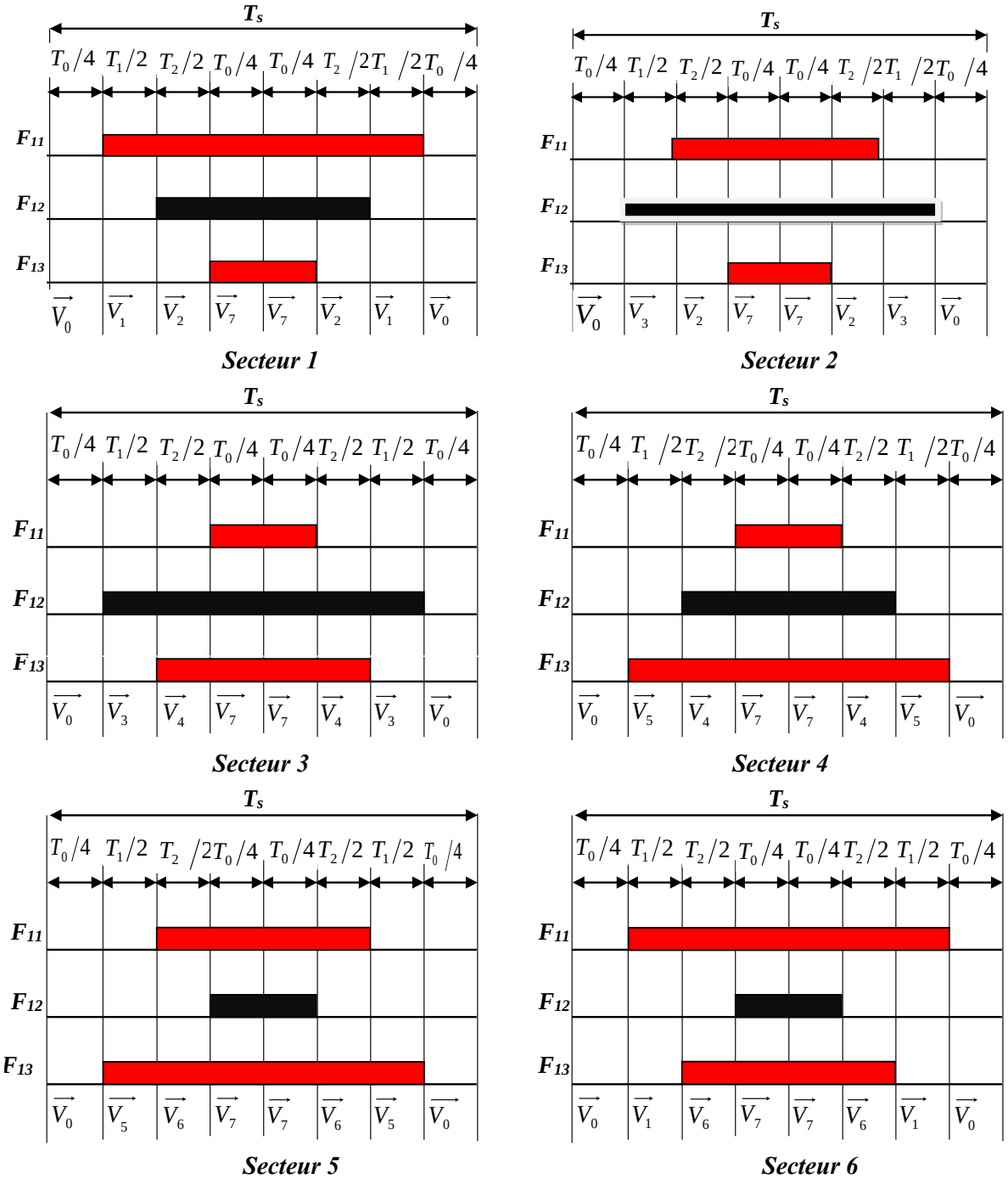


Figure. III.12: Forme des fonctions logiques F_{ij} pour les six secteurs

Pour les simulations effectuées par la suite, on utilise les mêmes valeurs indiquées dans le tableau. III.1, sauf en remplace f_p par T_s. La période d'échantillonnage est égale à 2.10^{-4} s, ce qui correspond à une fréquence d'échantillonnage de 5 kHz. La période

des tensions de sortie étant 0.02 s, on déduit que le nombre d'intervalles d'échantillonnage par période est 100 intervalles.

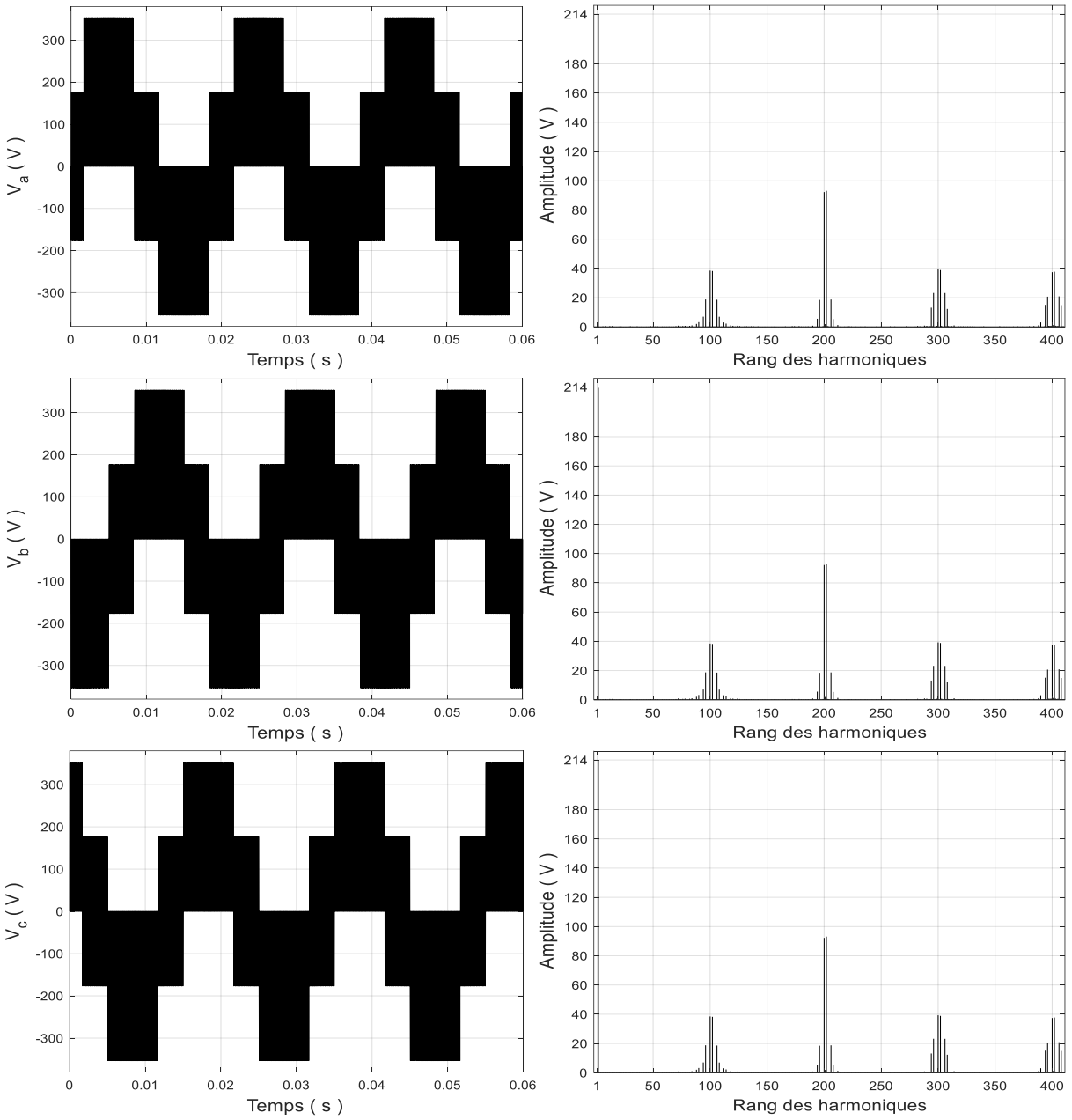
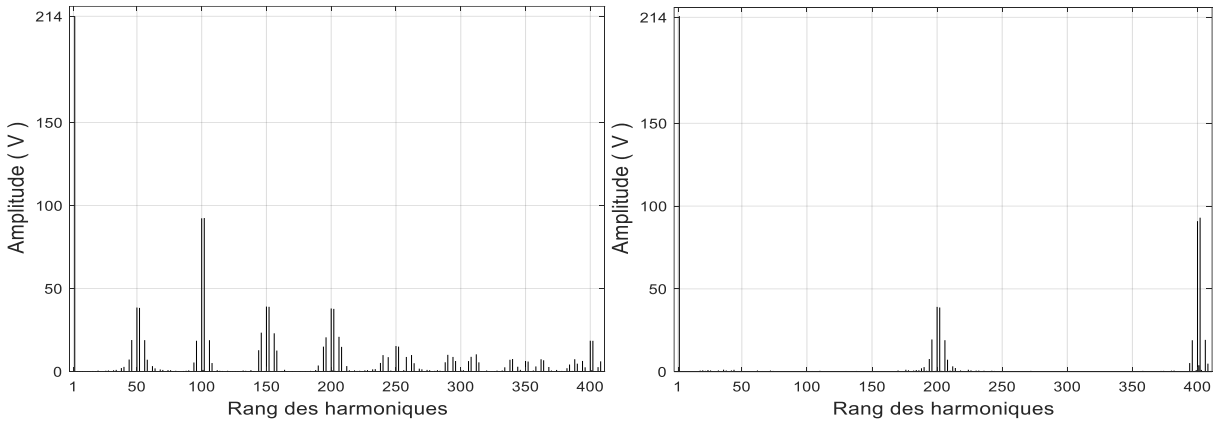


Figure. III.13 : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques



N = 50 *N = 200*

Figure. III.14 : Spectres d'harmoniques pour différentes valeurs de N

Les spectres d'harmoniques, montrent que l'amplitude du fondamental est proportionnelle au taux de modulation, et coïncide avec la relation $r.E/\sqrt{3}$. Pour la même valeur *r*, la variation de *N* n'a pas d'impact sur l'amplitude du fondamental de la tension. Les harmoniques sont rangés sous forme de familles centrées autour des fréquences multiples du rapport *N*. Plus ce dernier est grand, plus les harmoniques sont poussés vers des ordres élevés (Figure. I.13 et 14).

III.4/ Commande VVC+

Cette partie présente une analyse détaillée de la technique de commande *VVC+* (Voltage Vector Control Plus) développée par Danfoss pour ses variateurs de vitesse. L'objectif est de comprendre le fonctionnement, de modéliser la commande et de simuler son comportement sous Matlab/Simulink.

La commande VVC+ est une commande vectorielle de tension permettant le contrôle du moteur asynchrone (MAS). Il s'agit d'un contrôleur à structure fixe, optimisé pour répondre aux exigences de robustesse des applications industrielles.

Elle se caractérise par plusieurs points essentiels :

- Une architecture relativement simple, basée sur un modèle paramétré du moteur ;
- Une adaptation automatique des paramètres moteur lors de la première mise en service via la procédure AMA (Automatic Motor Adaptation) ;
- Un algorithme issu de plusieurs années d'optimisation et de développement breveté par Danfoss, fonctionnant sans capteur de vitesse et utilisant une loi *V/f* constant associée à une MLI vectorielle ;
- Une compensation du glissement permettant d'améliorer la précision en charge et d'éviter le décrochage du moteur sous forte sollicitation ;
- La capacité de fournir jusqu'à 160 % du couple nominal à basse vitesse, ce qui est particulièrement avantageux pour les démarrages en charge ;
- Une précision de régulation de vitesse de l'ordre de ± 8 tr/min, adaptée à la majorité des applications industrielles.

Selon les manuels techniques de Danfoss, le traitement de la consigne de vitesse est basé sur une architecture structurée en blocs fonctionnels en cascade (Figure III.15).

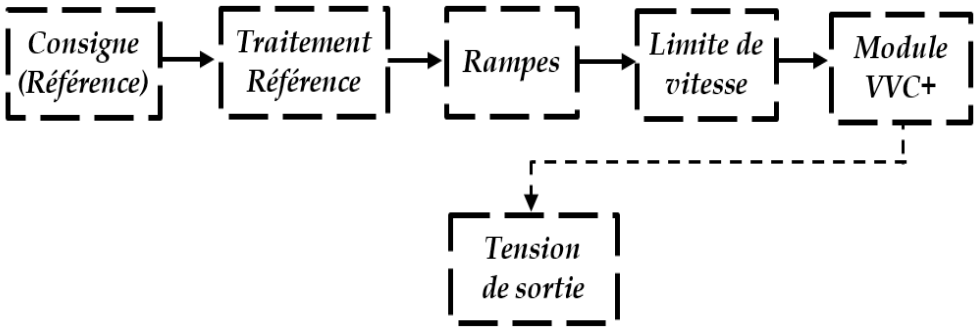


Figure. III.15 : Schéma synoptique de la chaîne de traitement de la consigne de vitesse

Nous détaillons par la suite le rôle de chaque bloc fonctionnel :

- ***Étape 1 : Gestion des Références***

La première étape consiste à traiter la consigne entrante. Le variateur accepte plusieurs sources de référence (en tours par minute (trs/min) ou hertz (Hz)). Parmi les traitements effectués, l'application des limites : bornes minimum référence et maximum référence.

- ***Étape 2 : Traitement des Rampes (Accélération/Décélération)***

La référence passe ensuite dans un générateur de rampe qui contrôle la dynamique d'accélération et de décélération. Le générateur supporte deux formes des rampes : rampe linéaire et rampe en S.

- ***Étape 3 : Limitation de la consigne***

Avant d'envoyer la référence au contrôleur, le système applique des limites de sécurité : limite de la vitesse haute (Basse) en trs/min ou Hz. Ces limites sont critiques pour protéger le moteur et le mécanisme entraîné.

En résumé, *VVC+* repose sur un principe simple : pas de boucles de courant, pas d'estimateur de vitesse, mais une table de *V/f* constant, calcul direct de la vitesse avec compensations de glissement. Il s'agit d'une architecture qui privilégie la robustesse ainsi que la facilité d'implémentation.

Dans le cadre du *VVC+*, la détermination de la pulsation synchrone (ω_s) est l'étape la plus cruciale, car elle remplace l'estimateur de vitesse utilisé dans les commandes vectorielles classiques.

Le calcul de ω_s se fait à partir de la vitesse de référence (Après traitement des rampes) et la pulsation de glissement (ω_g).

$$\omega_s = P.\Omega_{ref} + \omega_g \qquad \text{(III.17)}$$

Le contrôle vectoriel (Flux rotorique orienté) consiste à choisir un système d'axes et un type de commande (Directe ou indirecte) permettant de découpler le couple et le flux analogue à un moteur à courant continu [Baghli_99], c'est-à-dire de contrôler indépendamment le courant i_{ds} assurant le flux et le courant i_{qs} assurant le couple. Donc le courant absorbé par le moteur se décompose en deux composantes : la composante magnétisante i_{ds} et la composante responsable de la production du couple i_{qs}.

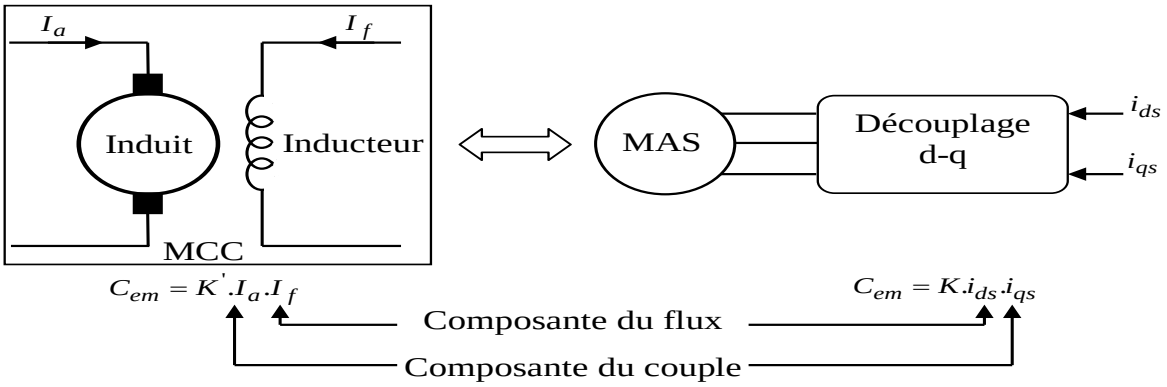


Figure. III.16 : Analogie entre le MCC et le MAS

La commande *VVC+* n'utilise pas directement la transformation de Park, mais repose sur un modèle interne du moteur qui combine plusieurs calculs en temps réel afin de déterminer en continu la tension optimale à appliquer, point par point, pour obtenir le couple et la vitesse souhaités.

Pour cette raison, le courant i_{ds} est pratiquement constant et est assimilé au courant absorbé par le moteur à vide (i_0). Il correspond au courant circulant dans la branche magnétisante du moteur.

L'équation du couple issue de la commande vectorielle à flux rotorique orienté [Latar_20] est donnée par :

$$C_e = \frac{P.L_m.\varphi_r.i_{qs}}{L_r} \quad \text{(III.18)}$$

À partir de l'équation (III.8), nous pouvons calculer i_{qs} pour chaque valeur du couple. Sachant que la valeur instantanée du couple est donnée par l'unité de mesure de la charge.

$$\omega_g = \frac{i_{qs}}{i_{ds}.\tau_r} \quad \text{(III.19)}$$

On distingue deux termes de compensation de tension :

Le premier est ajouter à la tension de référence à chaque instant :

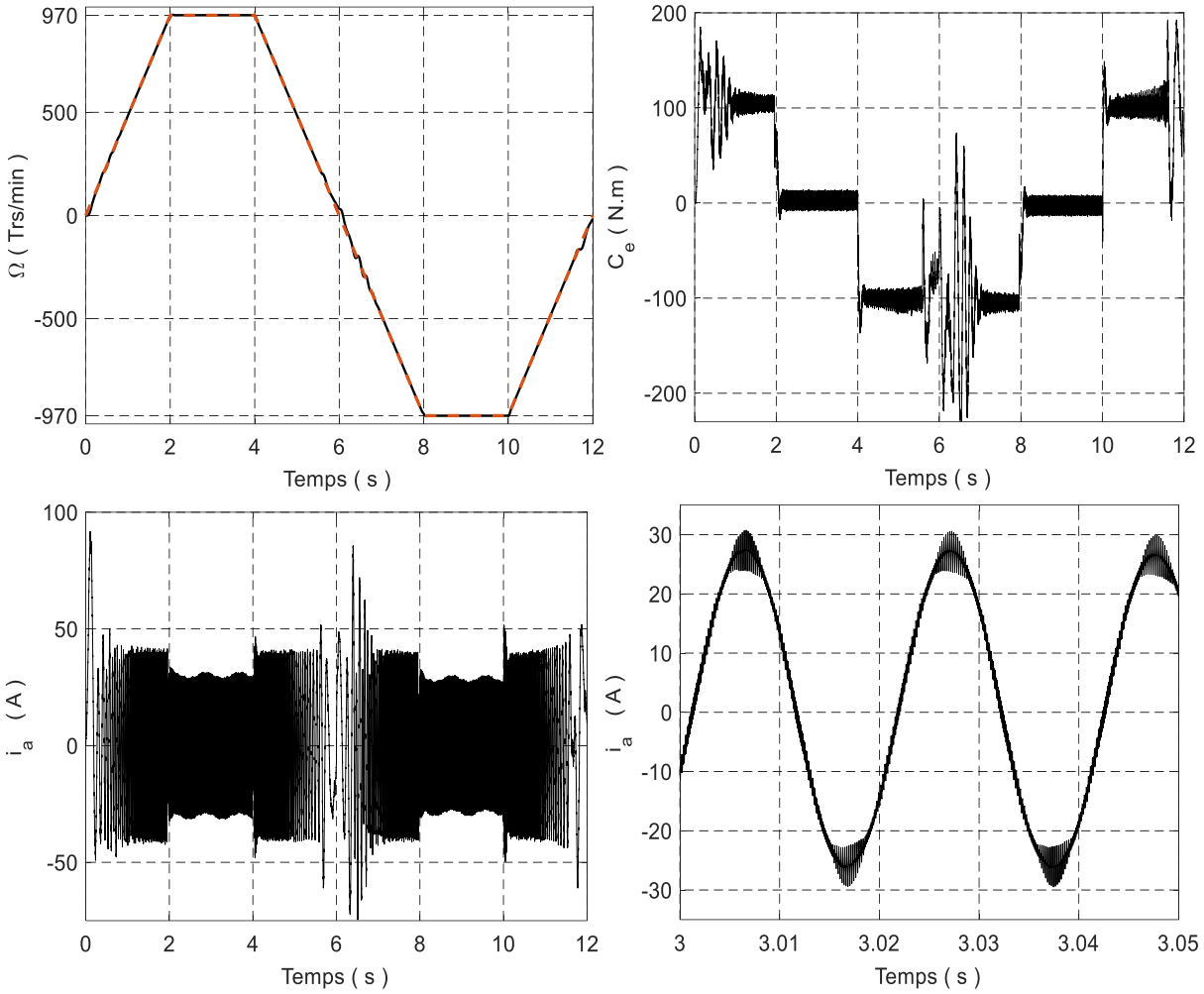
$$U_{01} = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}.i_0 \quad \text{(III.20)}$$

L'autre terme son rôle est d'assurer le démarrage et tend vers zéro quand la vitesse sera proche au régime permanent (950 trs/min) :

$U_{02} = C.2.\pi$ (III.21)

C : représente la constante de la loi *V/f*

Pour les simulations réalisées par la suite, les paramètres du MAS sont fournis dans la section III.2, on ajoute des données supplémentaires : $i_0 \approx 30\ A$, $X_s = 0.3455\ ohm$



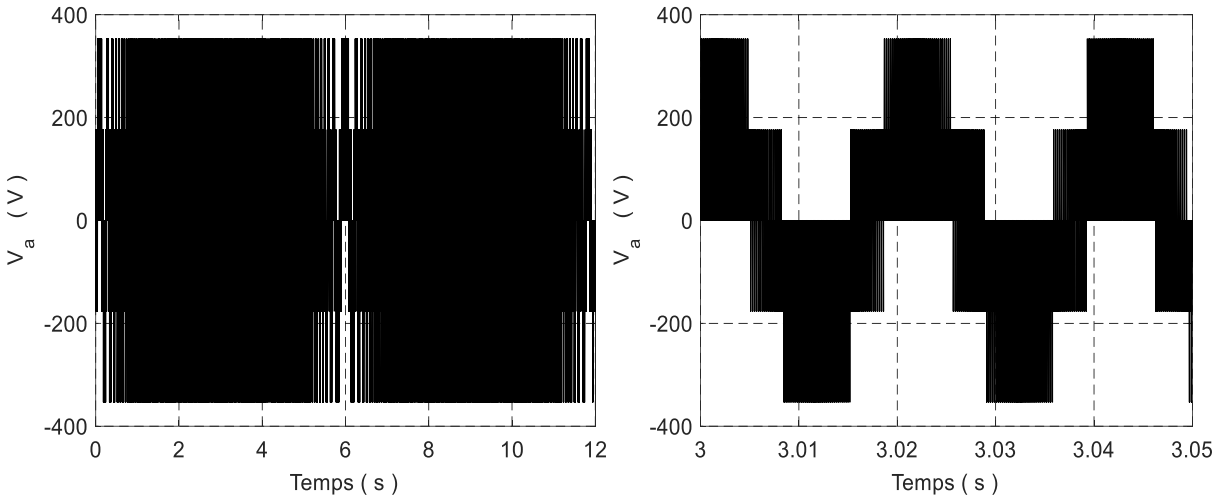


Figure. III.17 : Évolution des différentes grandeurs mécaniques et électriques

_Cr = 0_

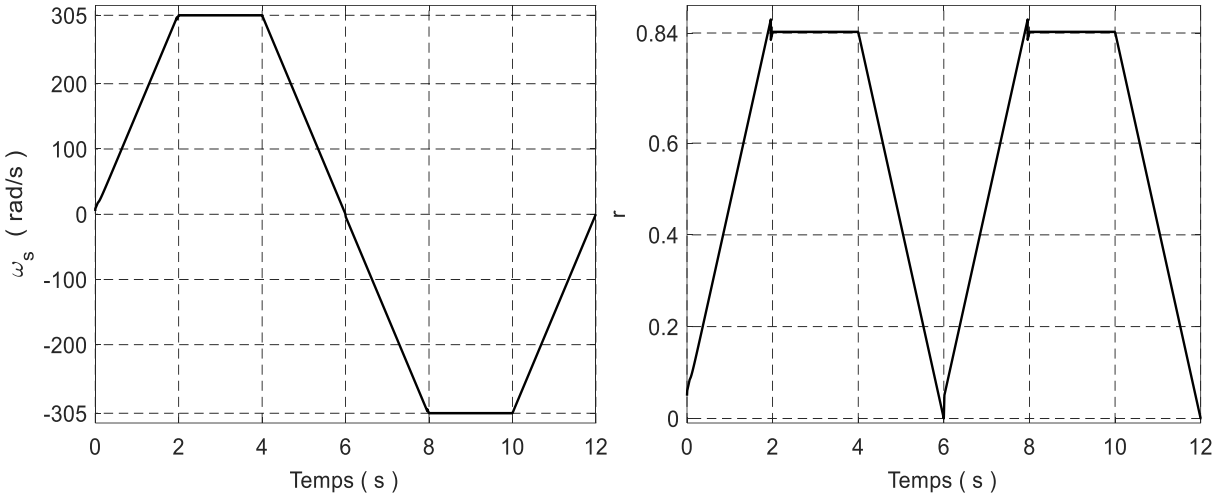
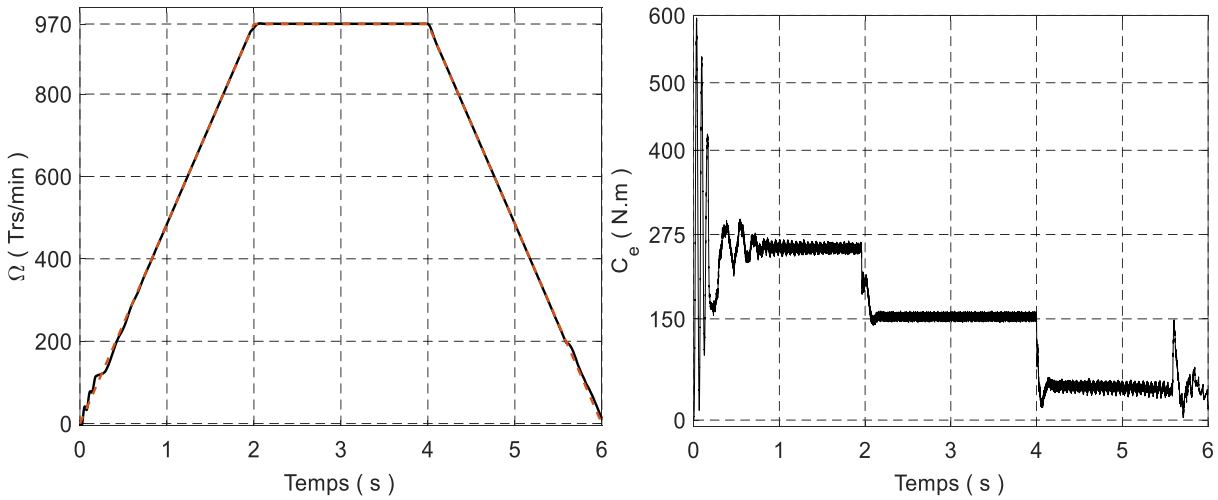


Figure. III.18. Évolution des différentes grandeurs de commande

_Cr = 0_



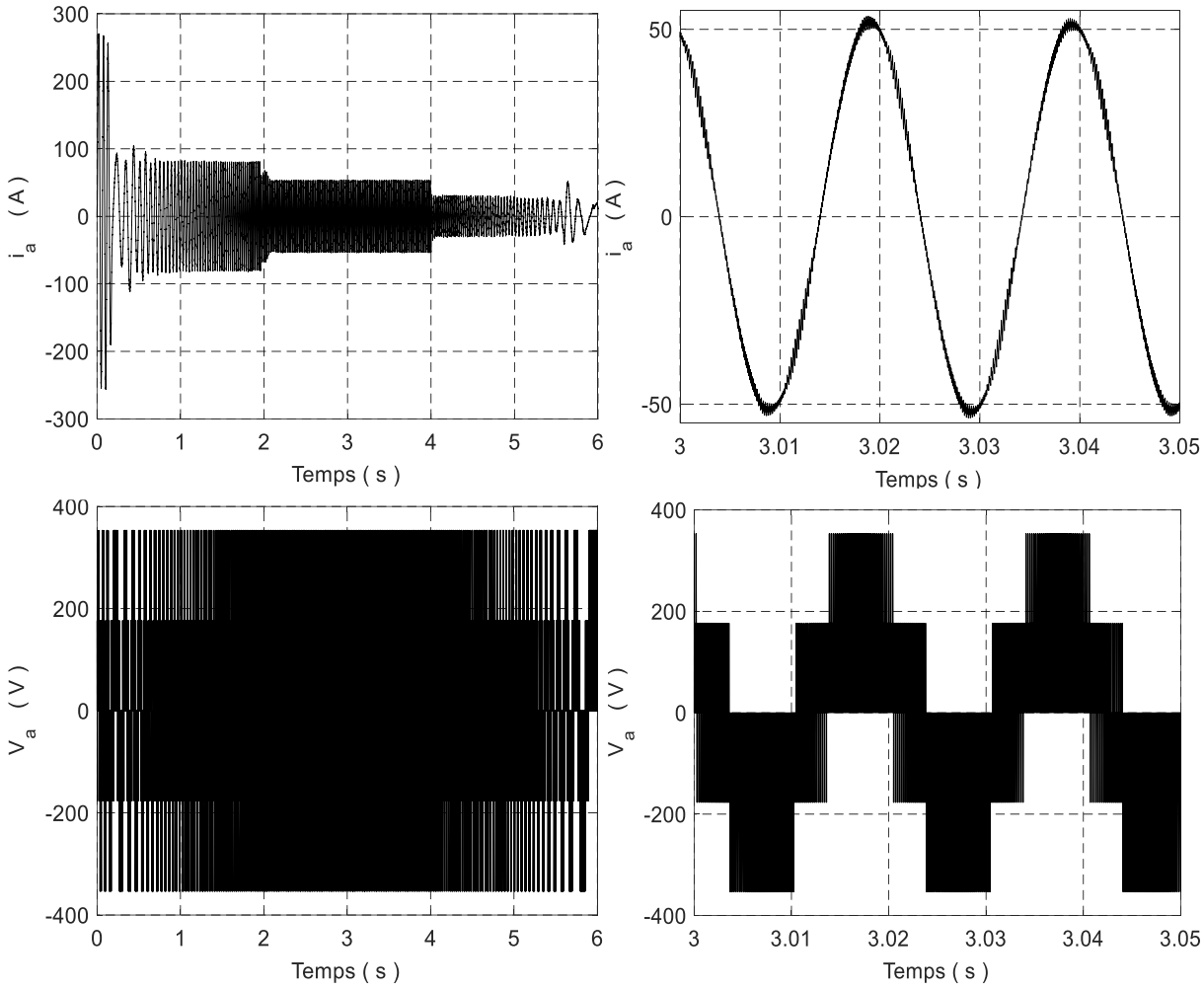


Figure. III.19. Évolution des différentes grandeurs mécaniques et électriques _Cr = 150 N.m_

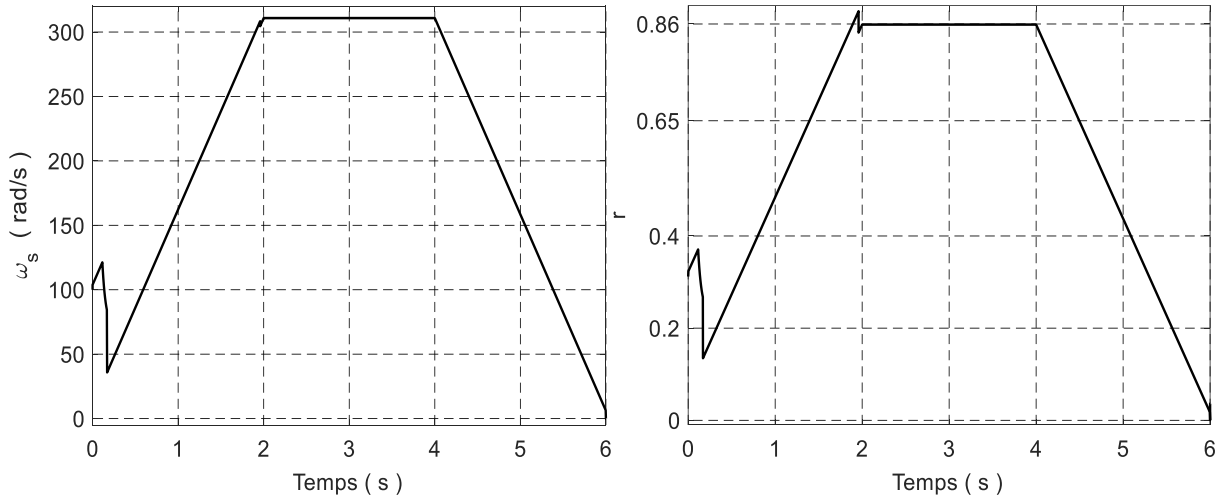
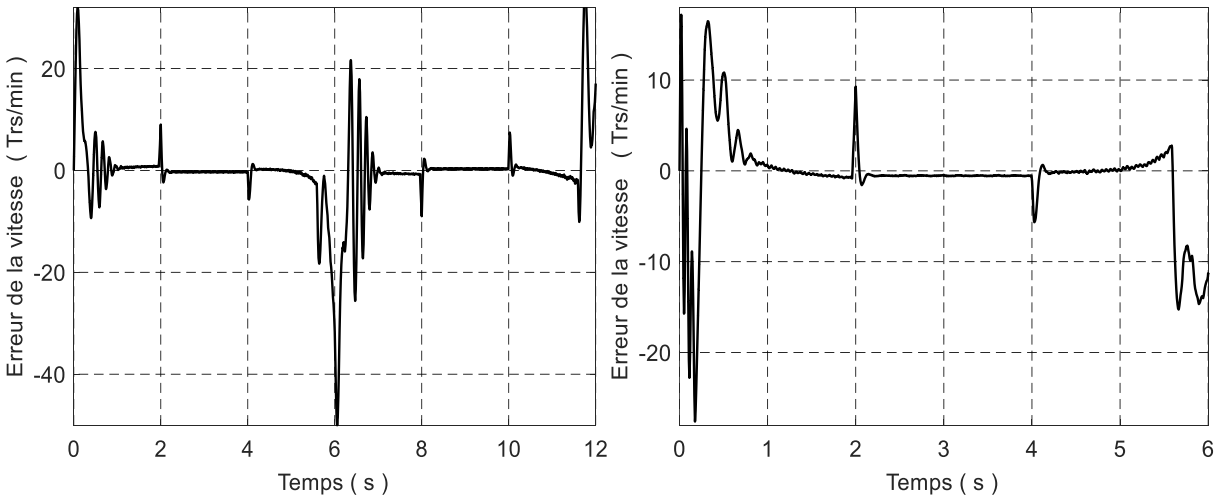
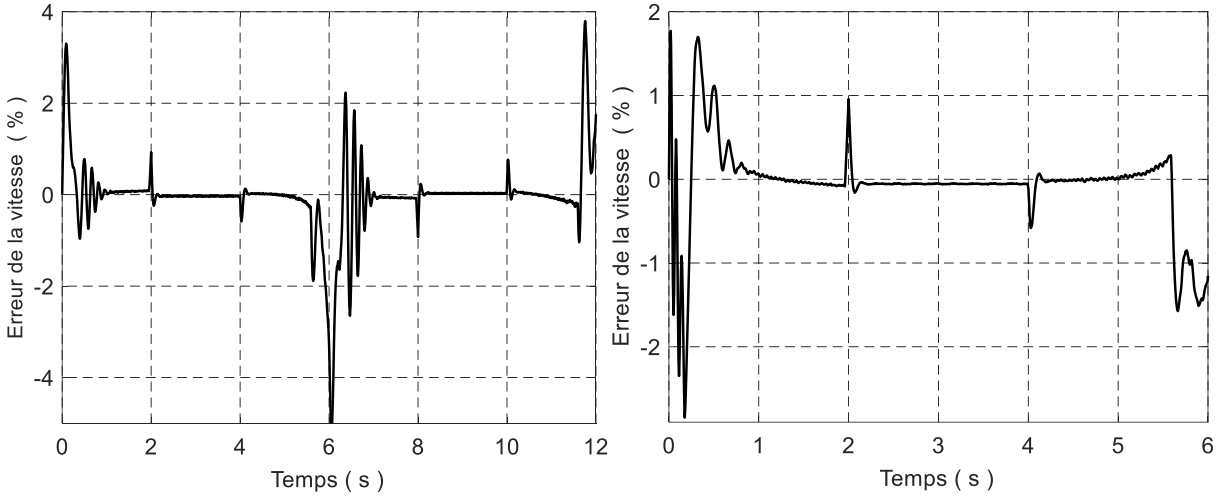


Figure. III.20 : Évolution des différentes grandeurs de commande _Cr = 150 N.m_



(a) : Cr = 0 ***(b) : Cr = 150 N.m***



(a) : Cr = 0 ***(b) : Cr = 150 N.m***

Figure. III.21 : Dynamique de l'erreur de vitesse

Les simulations présentées dans les figures III.17 et 19 montrent l'évolution des principales grandeurs électriques et mécaniques du MAS de levage auxiliaire commandé par *VVC+*. Deux cas de charge ont été étudiés, l'objectif est d'évaluer les performances dynamiques et statiques de la commande : rapidité de réponse, qualité des courants et capacité à supporter une charge. Les profils de consigne de vitesse imposent un cycle complet : d'accélération, de régime permanent, de décélération et d'inversion du sens de rotation.

La vitesse réelle du (Courbe noir) suite parfaitement la consigne en rampe (Courbe rouge) pour atteindre son régime nominal de 970 trs/min. L'erreur statique en régime permanent est quasi-nulle. Cependant, lors de la phase de décélération (Entre t = 4 s à 6 s), on observe un léger écart statique transitoire où la vitesse réelle reste supérieure à la consigne. Cela traduit les limites de la compensation de glissement en mode décélération.

Lors des phases d'accélération le couple développé atteint une valeur maximale transitoire d'environ 180 N.m pour vaincre l'inertie. En régime établi à vitesse constante le couple chute à zéro (Oscille autour), mais un petit couple est maintenu pour compenser les pertes mécaniques.
Lors de l'inversion à t = 6 s, le couple subit de fortes oscillations qui dépasse les 200 N.m avant de se stabiliser, ce qui confirme les perturbations observées sur l'allure de la vitesse.

Le zoom sur le courant de la première phase du MAS montre une forme d'onde quasi sinusoïdale de bonne qualité, très satisfaisante avec un faible contenu harmonique. L'allure de la tension simple met en évidence la forme d'ondes typiques générée par un onduleur de tension commandé en MLI.

Maintenant, le mécanisme de levage auxiliaire est soumis à un couple de charge sévère dès le démarrage, ce qui est représentatif des contraintes d'une application de levage. Le couple développé présente un pic transitoire important d'environs 600 N.m permettant de vaincre le couple résistant et d'assurer l'accélération de la charge.

Pendant le fonctionnement à vitesse constante, le couple se stabilise parfaitement à la valeur de la charge de 150 N.m. Malgré l'application directe d'une charge de 150 N.m (Presque 70% de la valeur nominale), la commande *VVC+* démontre une excellente robustesse et la vitesse rejoint sa consigne nominale de 970 trs/min en 2 s (Temps d'accélération).
L'impact de l'application de la charge se traduit par :
- Une augmentation du courant qui est proportionnelle au couple demandé ;
- Une erreur statique au niveau de la vitesse qui est extrêmement faible en régime permanent, n'excédant pas un trs/min, ce qui valide l'efficacité de l'algorithme de compensation de glissement en charge.
- Même sous forte charge, la forme (qualité) des courants est meilleure.

La pulsation statorique ($\boldsymbol{\omega_s}$) suit parfaitement la forme trapézoïdale de la vitesse, mais présente une dynamique transitoire au démarrage et à l'inversion du sens de rotation pour générer le surcroît de tension nécessaire. Concernant le taux de modulation (***r*),** a la même forme que la pulsation statorique mais en valeur absolue. L'ajustement simultané de ω_s et r par l'algorithme *VVC+* garantissant le couple nécessaire au MAS de levage auxiliaire tout en minimisant l'impact des chutes de tension au démarrage.

La figure. III.21 montre l'erreur de vitesse sous deux formats : en valeur absolue (Ω_{ref} - Ω) et en pourcentage ((Ω_{ref} - Ω) / Ω_{ref}), cela permet de quantifier la précision de la commande. On observe de fortes oscillations et un pic d'erreur important lors du démarrage, l'inversion du sens de rotation et à la fin du cycle. Des pics d'erreur aussi

nets apparaissent uniquement à des instants précis à t = 2 et 4 s (8 et 10 s). En dehors des instants de changement de consigne ou d'application du couple de charge l'erreur de vitesse converge vers zéro.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande *VVC+* appliquée au MAS du levage auxiliaire. Après avoir rappelé la constitution du MAS, son principe de fonctionnement ainsi que sa modélisation dans le repère triphasé puis dans le repère de Park, en tenant compte des hypothèses simplificatrices, nous avons présenté les résultats de simulation du MAS alimenté directement par le réseau. La mise en œuvre de la commande *VVC+* nécessite l'association du MAS avec un onduleur triphasé. Les techniques MLI triangulo-sinusoïdale et vectorielle permettent de contrôler à la fois l'amplitude de la fondamentale ainsi que le contenu harmonique de la tension de sortie.

L'étude de la commande VVC+ a permis de mettre en évidence son principe, fondé sur une combinaison entre une commande scalaire et une compensation du glissement ainsi que de la chute de tension statorique, sans recours à un capteur ni à un estimateur de vitesse. Les résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink ont montré que la commande *VVC+* assure une bonne poursuite de la consigne de vitesse, aussi bien à vide qu'en charge.

Conclusion générale

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, réalisé au sein de la centrale électrique à cycle combiné de Bellara, nous avons eu l'opportunité d'effectuer un stage enrichissant qui nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises au cours de notre formation dans le domaine des mécanismes industriels. Ce projet a porté sur une étude approfondie du pont roulant du bâtiment de la turbine à gaz, d'une capacité de levage de 90/22,5 tonnes.

Notre intégration au sein de la centrale de Bellara, l'un des projets énergétiques stratégiques majeurs en Algérie, nous a permis de mieux appréhender les enjeux liés à l'optimisation des performances industrielles. À cette occasion, nous avons pu constater l'importance cruciale des équipements de levage dans la réalisation des opérations de maintenance lourde, en garantissant à la fois la sécurité des intervenants, la protection des équipements et la fiabilité des installations.

Dans un second temps, notre travail s'est concentré sur une analyse descriptive et technologique approfondie de ce pont roulant de grande capacité. Cette étude a permis de caractériser les aspects mécaniques et électriques de ses différents mécanismes d'entraînement, à savoir le levage principal, le levage auxiliaire, la translation et la direction. Afin de répondre aux exigences élevées en matière de couple et de précision imposées par ces mouvements, nous avons mis en évidence l'intérêt des variateurs de vitesse de la gamme Danfoss *VLT® Automation Drive FC 302*. Par ailleurs, l'analyse des organes de sécurité critiques, notamment l'utilisation de freins CA-CC à aimant pour les opérations de levage lourd ainsi que l'intégration d'un système centralisé de détection de surcharge, a permis de confirmer la pertinence des solutions technologiques mises en œuvre pour garantir la sécurité et la fiabilité de l'installation.

Enfin, la dernière partie de notre étude a été consacrée à la modélisation et à la simulation de la motorisation du mécanisme de levage. Après avoir modélisé le moteur asynchrone dans le repère de Park et analysé son comportement lorsqu'il est alimenté directement par le réseau, nous avons étudié en détail la commande avancée *VVC+* développée par Danfoss. Cette stratégie de commande associe la simplicité d'une approche scalaire à des mécanismes de compensation dynamique du glissement et de la chute de tension statorique, tout en s'affranchissant de l'utilisation de capteurs de vitesse ou d'estimateurs complexes.

Les résultats de simulation obtenus sous l'environnement MATLAB/Simulink ont confirmé les performances et la robustesse de cette commande, en démontrant sa capacité à assurer une poursuite précise de la consigne de vitesse aussi bien à vide qu'en charge.

Références Bibliographiques

[1] : https://fr.weihuacraneglobal.com/product/Overhead-Crane-for-Power-Plants.html
[2] : https://www.europont.fr/site/
[3] : https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=119299&demande=desc

[Alioua_24]
Alioua. K, « Modélisation et commande d'un convertisseur double triphasé à Z-source », Mémoire de master, université Mohamed Seddik Benyahia Jijel, 2024.

[Baghli_15]
Baghli. L, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Notes de cours, 2015.

[Bouchareb_20]
Bouchareb. K, Chelghoum. A, « Etude, modélisation et simulation d'une machine asynchrone », Mémoire de master, université Kasdi Merbah Ouargla,2020.

[Boudjerda_25]
Boudjerda. M, Bouladjouidja. M, « Modélisation et commande de la cascade : onduleur à structure mixte _ MAS », Mémoire de master, université Mohamed Seddik Benyahia Jijel, 2025.

[Boutalbi_14]
Boutalbi. O, « Commande par mode glissant du second ordre d'un portique à trois dimensions », Mémoire de magister, université Ferhat Abbas Setif-1-, 2014.

[Chekima_14]
Chekima. Dj, « Commande d'un moteur asynchrone par logique floue », Mémoire de master, université d'El-oued, 2014.

[Irzil_18]
Irzil. B, Yennek. M, « Pilotage de deux moteurs asynchrones par un convertisseur à neuf cellules », Mémoire de master, Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.

[Lalili_09]
Lalili. D, « MLI vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multi niveaux. Application à la conduite de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, ENP, Alger 2009.

[Latar_20]
Latar. N, « Commande et modélisation de l'association onduleur à cinq bras – deux moteurs asynchrones », Mémoire de master, université Mohamed Seddik Benyahia Jijel, 2020.

[Makhlouf_21]
Makhlouf. B, « Commande des systèmes électriques », Cours master 2 électrotechnique industrielle.

[Mesbahi_04]
Mesbahi. N, « Étude comparative de la commande vectorielle directe et indirecte d'une machine asynchrone », Mémoire de magister, université Badji Mokhtar Annaba, 2007.

[Nechma_19]
Nechma. M, « Modélisation, commande et simulation, d'un moteur asynchrone à cage », Mémoire master, université Badji Mokhtar Annaba, 2019

[Ouzeddam_17]
Ouzeddam. H, Babouri. R, « Étude de deux moteurs asynchrones commandés par un seul variateur de vitesse dans la machine Robopack au sein de l'entreprise SARL Ayris, Akbou », Mémoire master, université A. Mira Bejaia, 2018

[Seker_75]
Seker. M, Koridet. S, « Commande électrique d'un pont roulant dans une fonderie », Projet de fin d'études, ENP, Alger 1975

Résumé

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude pratique approfondie du pont roulant de 90/22,5 tonnes installé à l'intérieur du bâtiment de la turbine à gaz de la centrale électrique à cycle combiné de Bellara. Cet équipement assure les opérations de manutention lourde lors des phases d'installation et de maintenance de la turbine à gaz (rotor et enveloppe), de l'alternateur ainsi que des différents équipements auxiliaires. Il se distingue par sa capacité à garantir une vitesse de levage extrêmement faible, de l'ordre de 0,5 cm/s, indispensable pour réaliser un alignement précis des paliers du rotor sur leurs supports.

Afin de répondre à ces exigences de précision et de fiabilité, l'ensemble des mécanismes du pont roulant est commandé par le variateur de vitesse Danfoss VLT® Automation Drive FC 302. Le système de commande repose sur la technologie VVC+ (Voltage Vector Control Plus), développée et brevetée par Danfoss, qui constitue une évolution significative des stratégies de commande des moteurs asynchrones. Cette approche associe la simplicité de la commande scalaire à des mécanismes avancés de compensation dynamique du glissement et de la chute de tension statorique, tout en supprimant le recours aux capteurs de vitesse et aux estimateurs complexes.

Une modélisation du moteur asynchrone et de la stratégie de commande VVC+ a été réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink afin d'évaluer les performances du système. Les résultats de simulation obtenus ont confirmé l'efficacité et la robustesse de cette commande, en mettant en évidence un excellent suivi de la consigne de vitesse aussi bien en fonctionnement à vide qu'en charge, ainsi qu'une réponse dynamique satisfaisante et une bonne stabilité du système. Ces résultats démontrent que la stratégie VVC+ constitue une solution performante et fiable pour les applications industrielles nécessitant une commande précise des mécanismes de levage.

Mots clés : *Centrale à cycle combiné, Pont roulant, MAS, Danfoss VLT® FC 302, VVC+.*

Abstract

This master's thesis presents an in-depth practical study of the 90/22.5-tonne overhead bridge crane installed within the gas turbine building at the Bellara combined-cycle power plant. This equipment carries out heavy lifting operations during the installation and maintenance phases of the gas turbine (rotor and casing), the alternator, and various auxiliary components. It is distinguished by its capability to ensure an extremely low hoisting speed, in the order of 0.5 cm/s, which is essential for achieving precise alignment of the rotor bearings on their supports.

To meet these stringent precision and reliability requirements, all crane mechanisms are controlled by the Danfoss VLT® Automation Drive FC 302 variable speed drive. The control system is based on the VVC+ (Voltage Vector Control Plus) technology, developed and patented by Danfoss, which represents a significant advancement in asynchronous motor control strategies. This approach combines the simplicity of scalar control with advanced dynamic compensation mechanisms for slip and stator voltage drop, while eliminating the need for speed sensors and complex estimators.

A model of the asynchronous motor and the VVC+ control strategy was developed using the MATLAB/Simulink environment to assess system performance. The simulation results confirmed the effectiveness and robustness of this control method, highlighting excellent speed reference tracking both under no-load and loaded conditions, as well as satisfactory dynamic response and good overall system stability. These findings demonstrate that the VVC+ strategy constitutes a high-performance and reliable solution for industrial applications requiring precise control of lifting mechanisms.

Keywords : *Combined-cycle power plant, Overhead bridge crane, IM, Danfoss VLT® FC 302, VVC+.*