

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي - سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Automatique

Spécialité : Automatique et systèmes

Par : NEDJADI Boumediene et NEZAI Bensabih

Sujet

Analyse et automatisation d'un système d'alimentations du type diesel-électrique pour un navire marchand

Soutenue publiquement en 15/06/2023 devant le jury composé de :

Mr. MOSTEFAI Mohamed	MCA	Univ. Saida	Président
Mr. BENMAHDJOUR Mohammed Amin	MAB	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. MOSTEFAI Lotfi	MCA	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2022/2023



REMERCIEMENTS

*Premièrement, nous remercions dieu, le tout puissant,
de nous avoir donné la santé et la volonté pour faire cet humble
travail.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à
notre encadreur Dr.Mohammed Amin BENMAHDJOUR*

*pour avoir d'abord proposée ce thème,
Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont
aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous
ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de
département Dr. Amara mohamed qui a contribué à notre
formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du
jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos
amis et collègues pour le soutien moral.*

Résumé:

Le navire tout électrique initie une véritable révolution dans la Marine nationale. Il s'agit de rationaliser l'utilisation de l'électricité par une approche globale de tous les besoins en énergie, afin d'améliorer les performances et la sécurité tout en réduisant les coûts. Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire que tout au long de la chaîne conception, réalisation et exploitation, les ingénieurs disposent de moyens leur permettant de comprendre, d'analyser et de reproduire le comportement des systèmes d'énergie électrique. Cette analyse passe naturellement aujourd'hui par la modélisation puis la simulation des systèmes électriques. Pour simuler des problèmes de plus complexes et si riches en enjeux, en fait appel à des méthodes de simplification, mais ces méthodes de calcul doivent s'adapter à ces évolutions. Notre travail portera plus particulièrement sur l'étude de quelques éléments de ces réseaux embarqués, le moteur à diesel, l'alternateur synchrone, le moteur asynchrone, puis la charge embarquée.

Les mots clés:

Système d'alimentation, Alternateur, Moteur à diesel, Redresseur MLI, Régulateur automatique de la tension (AVR).

المخلص:

بدأت السفينة الكهربائية بالكامل ثورة حقيقية في البحرية الوطنية. الهدف هو ترشيد استخدام الكهرباء من خلال نهج عالمي لجميع احتياجات الطاقة، من أجل تحسين الأداء والسلامة مع تقليل التكاليف. ولتحقيق هذه الأهداف، من الضروري أن يوفر المهندسون، طوال سلسلة التصميم والتنفيذ والتشغيل، وسائل لفهم وتحليل وإعادة إنتاج سلوك أنظمة الطاقة الكهربائية. اليوم، يتضمن هذا التحليل بشكل طبيعي نمذجة ثم محاكاة الأنظمة الكهربائية. من أجل محاكاة المشاكل الأكثر تعقيدًا والغنية بالمخاطر، من الضروري استخدام طرق التبسيط، ولكن يجب أن تتكيف طرق الحساب هذه مع هذه التطورات. سيركز عملنا على دراسة بعض عناصر هذه الشبكات المضمنة، ومحرك الديزل، والمكرر المتزامن، والمحرك غير المتزامن، ثم الحمل على متن الطائرة

Table des matières

Avant-propos.....	I
Dédicace.....	
Table des matières.....	I
Table des notations et des symboles	XII
Introduction générale	1

Chapitre I : Etat de l'art sur l'évolution des besoins énergétiques dans les outils du transport

I.1. Introduction	5
I.2. Les navires	6
I.2.1. La politique des navires plus électriques.....	7
I.2.2. Développement des navires tout électriques	9
I.2.2.1. Réseau de distribution électrique	9
I.2.2.2. Stockage d'électricité	12
I.2.2.3. Les systèmes de propulsion électriques.....	14
I.2.2.4. Système de protection	15
I.2.3. Les contraintes des systèmes de puissance dans les navires tout électrique	16
I.3. Conclusion.....	17

Chapitre II : Conception et supervision du réseau électrique embarqué

II.1 Introduction	19
II.2 Conception du réseau de distribution électrique dans les navires	20
II.2.1 Production et distribution électrique d'un système d'alimentation dans les navires.....	21
II.2.2 Transport électrique d'un système d'alimentation dans les navires	23
II.2.3 Configuration du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires	24
II.2.4 L'organisation fonctionnelle du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires.....	25
II.3 Description du réseau de bord d'un navire tout électrique	26

II.4	Méthodologie de modélisation du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires	27
II.4.1	Définition et propriétés de matrice de passage.....	28
II.4.2	Principe de construction du modèle électrique globale.....	30
II.5	Modélisation des systèmes élémentaires.....	31
II.6	Simulation les modèles globaux du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires.....	32
II.6.1	Simulation d'un réseau double alternateur, ligne et charge passive « RLC»	32
II.7	Conclusion.....	38

Chapitre III : Supervision du réseau de distribution électrique dans les navires

III.1	Introduction	41
III.2	Supervision du réseau de distribution électrique dans les navires	42
III.3	Méthodes de surveillance du réseau de distribution électrique dans les navires.....	43
III.3.1	Supervision par lampes	43
III.3.2	Supervision par synchroscope	45
III.3.3	Inconvénients des systèmes de supervision manuels	46
III.4	Les Serveurs web	47
III.4.1	Définition	47
III.4.2	Principaux serveurs web et technologies actuelles.....	47
III.4.2.1	Principaux serveurs :	47
III.4.2.2	Technologies actuelles	48
III.4.3	Architecture client-serveur	48
III.4.4	Le protocole http :	49
III.5	Raspberry Pi	50
III.5.1	Définition	50
III.5.2	Fiche technique	50
III.5.3	Aspect matériel.....	51

III.5.3.1	CPU et GPU	51
III.5.3.2	Mémoire	51
III.5.3.3	Connecteurs.....	52
III.5.3.4	Aspect Logiciel	52
III.6	Conclusion.....	53

Chapitre IV : Réalisation d'un système de supervision intelligent pour un système d'alimentation du navire

IV.1	Introduction	54
IV.2	Développement d'un système de supervision intelligent	54
IV.3	Développement d'un capteur de passage par zéros	56
IV.3.1	Transformateur	58
IV.3.2	Circuit intégré «TLC556»	59
IV.3.3	Transistor « BC 547B ».....	61
IV.3.4	Circuit globale du capteur de passage par zéros.....	62
IV.3.5	Modélisation et estimation des valeurs de résistances et de condensateurs	62
IV.3.6	Résultat et discussion	65
IV.4	Développement d'un système de mesure	68
IV.5	Vérification les conditions de synchronisation.	68
IV.6	Communication entre les dispositifs de mesure	71
IV.7	Communication entre le système de supervision et l'application Smartphone.	72
IV.8	Développement d'une application de supervision.....	73
IV.9	Conclusion:	75
	Conclusion général.....	78
	Bibliographie.....	79

Dédicaces

*A mes très chers parents et
ma grande famille.*

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers frères et mes sœurs.

*A mes professeurs qui doivent voir dans
ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Boumediene



Dédicaces

*Ce travail est dédié particulièrement à
mes parents qui m'ont soutenu tout au long
de ma vie scolaire et universitaire.*

A mes très chers frères et mes très chères sœurs

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou loin pour
la réalisation de ce modeste travail.*

*A tous mes camarades de la promotion Master II
et tous les autres sans exception.*

Ben Sabih

Introduction générale

Les outils du transport sont responsables d'une grande partie de la pollution atmosphérique en produisant des émissions de gaz à effet de serre tel que le CO_2 et le N_2O , qui provoquent des maladies respiratoires et contribuent au réchauffement de la planète. Pour réduire ces émissions, les chercheurs et développeurs envisagent de développer des outils du transport « plus ou entièrement électriques », qui ne produisent aucune émission d'échappement qui aurait un impact négatif sur la santé publique dans leur environnement [Wel-17]. Dans ce contexte, les gouvernements du monde entier ont pris en charge les centres de recherches et ont encouragés à mener des études et des recherches approfondies sur l'électrification des outils de transport, surtout lors de l'augmentation du facteur de pollution et de la crise pétrolière en 1970 [McC-14]. Ces recherches ont été étudiées pour électrifier et développer les différents systèmes internes dans les outils du transport, tels que les réseaux de distribution, les systèmes de stockage, les systèmes de fonctionnement hydrauliques et pneumatiques.

Dans les quatre modes de transport connues (transport routier, transport maritime, aéronautique et transport ferroviaire), l'électrification sera introduite sur les outils du transport de façon progressive. Dans le secteur du transport routier urbain, la technique des voitures, camionnettes et les bus de voyage se rapprochent de transformer à des outils tout électriques, avant c'étaient comme des systèmes hybrides combinant les moteurs thermiques et électriques [San-11]. De plus, la dernière décennie a vu une augmentation de l'utilisation de l'électricité à bord des avions en transformant les systèmes hydrauliques et pneumatiques en systèmes électriques [Han-15]. Cette tendance connue sous le nom de terminologie des avions tout électriques. En effet, le développement des actionneurs plus électriques dans les aéronautiques a conduit à la suppression des circuits hydrauliques installés dans les avions, qu'il va entraîner une minimisation significative dans la masse des avions, même peut être réduire la consommation de carburant [Lan-05]. Pour le transport maritime, les propulsions hybrides sont de plus en plus utilisées dans les différents types et tailles de navires, qui ont été transformées des propulsions pneumatiques et hydrauliques vers des propulsions tout électriques [Han-15, McC-02]. Le transport ferroviaire a été électrifié et est devenu plus contrôlable comparant par les autres outils traditionnels du transport ferroviaire, même la vitesse de son déplacement a augmenté de façons significatives [Ais-18]. Néanmoins, il est important d'améliorer les performances énergétiques du système existant dans les outils du transport et de proposer des solutions innovantes pour réduire les émissions des gaz polluants et d'augmenter la fiabilité et l'efficacité des équipements électriques intégrés.

Grâce à l'électrification les outils du transport, les techniques d'information et de communication (TIC) peut être intégré dans leurs systèmes de fonctionnement, qui permettent une meilleure utilisation de l'outil du transport par la communication à distance entre les différents systèmes installés, et un

meilleur échange d'informations avec les centres qui l'entourent (les centres de surveillance, les bases aéronautiques, les hôpitaux...etc.) [Pri-20]. En effet, la technologie de TIC est utilisée des différents équipements de communication en fonction du processus d'échange de données entre l'émetteur et le récepteur (Internet, Radio, Bluetooth, communication serial...etc.).

Basé sur les communications par l'Internet, l'échange des informations et des données informatisées entre les objets installés dans l'outil de transport est effectuées à travers le réseau Internet et conçus à partir d'une architecture systémique lors de la transmission et de la réception des données, et cet échange est connue selon le nom « internet des objets » [Ayo-20]. Dans ce contexte, les cartes à puce où les routeurs sont utilisés pour l'échange de données entre les équipements internes ou entre les capteurs installés dans le réseau et l'application développée, constituant des nouveaux services. Ces nouveaux services dans le marché de transports s'appellent voiture communicante, maritime intelligence, et aéroport intelligent.

L'électrification et l'intégration de la technologie de TIC sont considérés comme un axe de développement majeur pour les outils du transport, pour atteindre les objectifs les plus ambitieux tels que la réduction des gaz polluants, minimisation de la consommation de carburant, et amélioration des performances dynamiques des outils du transport. Cependant, tous ces développements imposent un réseau de distribution performant et plus efficace pour satisfaire les besoins des équipements électriques installés dans l'outil du transport, et afin d'obtenir de meilleures performances de ces outils. La topologie de ce réseau de distribution doit offrir une meilleure efficacité, une continuité de fourniture d'énergie électrique, et une plus grande souplesse d'utilisation pour une moindre maintenance. Ce réseau de distribution installé dans les outils du transport de grande puissance est connue selon le nom « réseau électrique embarqué », qui est le sujet de la présente étude.

Les réseaux de distribution publique sont interconnectés, alimentés par des centrales de production, et peuvent être transportés une quantité d'énergie "infinie". Cependant, les réseaux électriques embarqués fonctionnent partiellement ou continûment de manière isolée, et peuvent être intégrés dans les différents outils du transport (véhicules, navires, aéronefs, et le transport ferroviaire). Ces réseaux sont fortement non linéaires, et sont constitués de multi turbo-alternateurs connectés en parallèle dans le jeu barre, qui produisent une quantité d'énergie "finie". Cette énergie électrique produite sera transférée au réseau de consommation à travers les lignes de transmission électriques. En effet, l'architecture du réseau électrique embarqué est du type radial, non maillée, et son flux de puissance est unidirectionnel. Dans ce contexte, la plupart des alternateurs parallèles du réseau électrique embarqué sont contrôlés de manière à fournir une tension et une fréquence stable, même lors d'un défaut électrique qui apparaît sur le réseau. Pour cette raison, quelques objectifs sont définis dans cette étude par des réglementations et des normes qui sont prises au sérieux dans le fonctionnement du réseau électrique embarqué,

Introduction générale

imposant les conditions de synchronisation nécessaires pour le raccordement des alternateurs parallèles du réseau électrique embarqué.

Etat de l'art sur l'évolution des besoins énergétiques dans les navires marchands

I.1.	Introduction	5
I.2.	Les navires.....	6
I.2.1.	La politique des navires plus électriques.....	7
I.2.2.	Développement des navires tout électriques	9
I.2.2.1.	Réseau de distribution électrique.....	9
I.2.2.2.	Stockage d'électricité	12
I.2.2.3.	Les systèmes de propulsion électriques.....	14
I.2.2.4.	Système de protection.....	15
I.2.3.	Les contraintes des systèmes de puissance dans les navires tout électrique.....	16
I.3.	Conclusion.....	17

I.1. Introduction

L'utilisation intensive des outils de transport contribue aux émissions de gaz polluants, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) provenant de la combustion des carburants dans les moteurs [Moj-17]. Cela peut entraîner des changements climatiques sur notre planète, provoquant des crises alimentaires dues aux pluies acides, la destruction des écosystèmes et la perte de régions habitables [Xia-18]. Pour réduire la consommation de matières premières lors des déplacements, les chercheurs étudient l'électrification des outils de transport [Mcc-14]. En conséquence, les systèmes mécaniques et hydrauliques ont été remplacés par des systèmes électriques, les systèmes de stockage d'énergie électrique ont été améliorés et les systèmes de distribution électrique sont devenus plus puissants.

Avec l'évolution des besoins énergétiques dans les outils de transport, le développement des composants d'électronique de puissance a ouvert la voie à un développement durable des systèmes électriques. Les systèmes de contrôle mécaniques ou manuels ont été supprimés et remplacés par des actionneurs mécaniques entièrement électriques [Leq-15]. De plus, les convertisseurs statiques sont devenus les principaux composants du réseau électrique installé dans les outils de transport pour gérer rapidement les flux énergétiques. Par exemple, un variateur de vitesse mécanique a été remplacé par un hacheur. Cela permet de combiner les systèmes électriques entre eux à l'intérieur des outils de transport pour améliorer les performances dynamiques du système installé, comme l'intégration des systèmes de compensation et photovoltaïques dans les navires [Che-19]. En raison de ces changements électriques, les outils de transport ont récemment acquis de nouvelles propriétés telles que le poids, l'efficacité et la fiabilité.

L'électrification n'est pas le seul développement qui affectera les besoins énergétiques dans les modes de transport. L'intégration des dispositifs de communication et des systèmes intelligents, tels que les assistants intelligents, influencera également la production électrique. Les systèmes de communication et d'information sont intégrés dans les outils de transport pour améliorer la fiabilité du système installé et aménager les infrastructures de transport. Ils constituent des systèmes interconnectés avec différents services urbains, tels que les hôpitaux, les centres de commande et la protection civile (Hôpital, centre de commande, protection civile...) [Beh-19]. Ainsi, l'inter-connectivité entre les objets offrira des outils de transport plus confortables avec une meilleure gestion des systèmes électriques.

La convergence de l'électrification, de l'inter-connectivité et de l'intelligence entraînera un changement radical et significatif dans la consommation énergétique. Cela provoquera un système d'alimentation plus puissant et plus accentué pour répondre aux besoins électriques des équipements installés dans les outils de transport. Pour illustrer l'évolution des besoins énergétiques dans les outils de transport, nous présenterons une vue générale de cette révolution électrique dans l'automobile,

l'aéronautique et le maritime. En effet, notre étude porte sur la distribution électrique dans les transports maritimes.

I.2. Les navires

La demande croissante en énergie dans les navires, ainsi que la pression croissante pour la conservation de l'énergie et la protection de l'environnement, ont incité à poursuivre le développement de navires plus électriques. Ce développement vise à créer un nouveau paradigme dans la production et la transmission d'énergie pour alimenter les systèmes de propulsion et fournir la puissance nécessaire aux différentes charges.

Les systèmes d'alimentation intégrés (IPS, Integrated Power Services) dans les navires plus électriques combinent les systèmes d'alimentation des charges propulsives et des services du navire pour fournir une plateforme électrique commune assurée par un ensemble de générateurs parallèles [Dah-10]. Cette nouvelle topologie comprend généralement un module de production d'électricité, un module de stockage d'énergie, des modules de conversion électrique, un module de propulsion et les charges de service du navire [Ion-15]. L'intégration de l'IPS dans les navires modernes permet une flexibilité architecturale pour transférer la puissance électrique entre la propulsion et les charges électriques selon leurs besoins. Cela peut améliorer la capacité de survie et la fiabilité du système d'alimentation à bord, ainsi que réduire les coûts de construction des systèmes de distribution en éliminant les transformateurs et en minimisant la longueur des câbles de transmission électrique. De plus, l'IPS a été identifié comme une technologie de nouvelle génération pour la plateforme de distribution électrique dans les navires et constitue une étape importante pour réaliser l'initiative des navires entièrement électriques.

Les systèmes de distribution dans les navires modernes fournissent une grande quantité d'énergie qui peut être contrôlée pour répondre aux besoins des équipements électriques. Ils permettent également une reconfiguration automatique et intelligente des dispositifs de production d'électricité en cas de dysfonctionnement ou de dommage dans l'un des distributeurs électriques, assurant ainsi la continuité de la distribution électrique pendant toute la durée du déplacement [Xiu-05]. La puissance du réseau de distribution électrique dans les navires actuels est liée au mode d'exploitation des navires, comme illustré à la Figure I.1. Elle peut être définie par la puissance des équipements électriques installés, le type de configuration du réseau électrique intégré et le nombre d'alternateurs connectés.

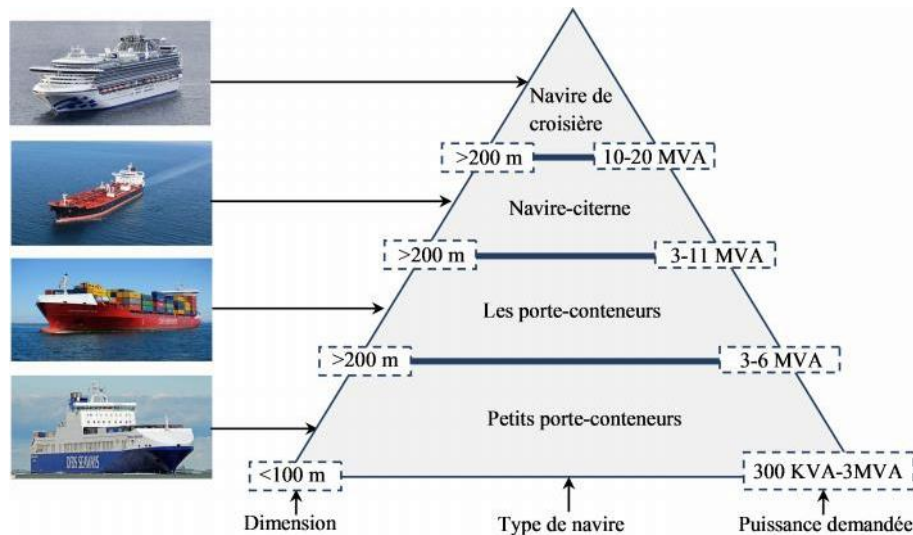


Figure I.1. Classification les navires selon la dimension et la puissance demandée [Rad-13].

I.2.1. La politique des navires plus électriques

À la fin des années 1830, l'inventeur allemand Moritz Hermann Jacoby a fait les premiers efforts pour utiliser l'électricité dans un navire en inventant un simple moteur à courant continu alimenté par une batterie [Dem-15, Dem-17]. Ce réseau d'alimentation classique a été installé dans un petit bateau, mais il a souffert de nombreuses imperfections et aucune propulsion électrique n'a été adoptée pour cette navale. La première application réussie de l'énergie électrique aux navires s'est produite dans les circuits de tir d'armes à feu dans les années 1870 [Skj-15]. Dans les années 1880, les premières réalisations de systèmes électriques à bord des navires étaient disponibles sur le marché maritime, notamment un système d'alimentation continu intégré au SS Columbia [Sul-15].

À la fin du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème}, l'invention du moteur à induction AC, du transformateur et du moteur diesel a déclenché de nouvelles activités et développements durables dans les navires [Skj-16]. Les deux développements les plus importants ont été réalisés avant la Première Guerre mondiale: le premier navire diesel-électrique (Vandal) en 1903 et le premier navire de guerre à propulsion électrique en 1912 (USS Jupiter) [Sat-17]. Pendant la Première Guerre mondiale, les navires de guerre exigeaient plus de puissance, de fiabilité et de vitesse [Cho-04]. À cette fin, les premiers cargos à turbopropulseurs électriques ont été conçus et développés aux États-Unis et au Royaume-Uni [Car-18, O'Ro-20]. De plus, le déclenchement de la Seconde Guerre mondiale a stimulé de nouveaux développements, tels que le pétrolier T2 à propulsion turbo électrique [Spy-11]. Les navires à propulsion nucléaire sont apparus à la fin des années 50 et les premiers travaux sur le courant alternatif ont été étudiés en 1960 (SS Canberra).

De 1960 à 1985, la révolution de l'électronique de puissance a déclenché une technologie innovante dans les systèmes de commande et l'électrification des équipements pneumatiques et hydrauliques dans les outils du transport maritime, et ce fut un début et une étape progressive de l'émergence des navires plus électriques. En conséquence, le navire britannique « Reine Elizabeth II » a été inauguré en 1987 avec le premier système de propulsion intégrée diesel-électrique, qui remplace sa turbine à vapeur [Skj-16]. Au cours des deux dernières décennies, la communauté maritime a assisté au développement des premiers navires utilisant le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) comme carburant. En janvier 2015, le premier navire tout électrique a été réalisé et alimenté par deux moteurs électriques de 450 kW reliés à des batteries d'une puissance globale de 1000 kWh [Kun-19]. En effet, son développement est le résultat d'une compétition lancée par le ministère des Transports et des Communications du Norvège, pour développer un service de ferry respectueux de l'environnement entre les deux villages « Lavik et Oppedal ». La Figure I.2 montre l'évolution du système d'alimentation électrique dans les navires entre la période 1830 et 2015.

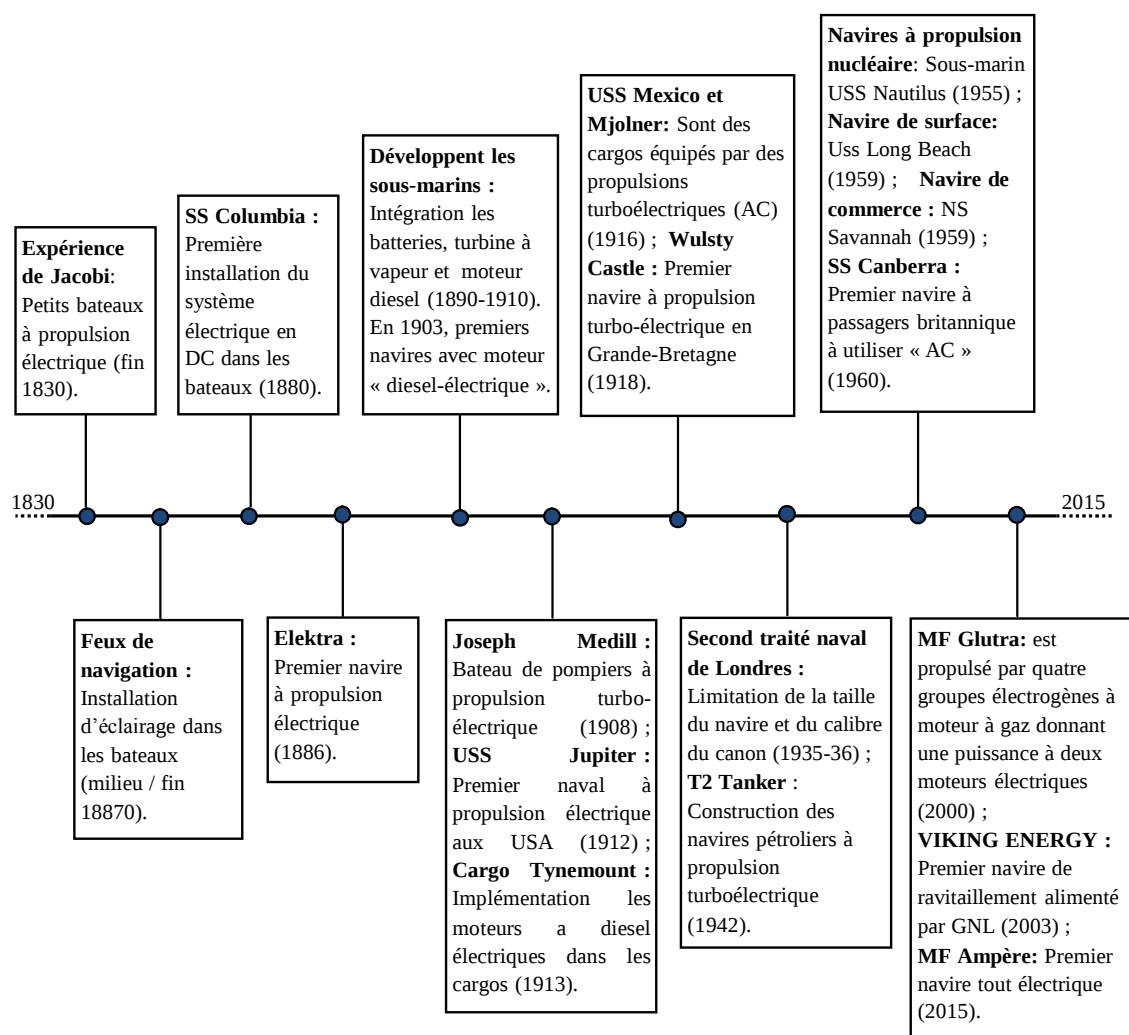


Figure I.2.Chronologiques de l'évolution les systèmes électriques intégrés dans les navires [Skj-15].

I.2.2. Développement des navires tout électriques

Récemment, des milliers de travaux et de recherches ont été étudiés liés à l'électrification des systèmes de navire pour réaliser des flottes maritimes tout électriques et construire des navires plus puissantes, fiables et non polluées. En effet, le projet Advansea, mis en œuvre par DCNS, vise un navire de longs cent vingt mètres pesant plus de quatre mille tonnes, d'une puissance électrique de 20 MW et capables d'atteindre 28 nœuds [Hos-17]. Ces nouvelles propriétés marines sont réalisées grâce au développement durable d'équipements électriques, tels que les moteurs, les transformateurs et les turboélectriques, pour construire des navires plus efficaces et plus compétents dans le transport maritime [Sha-16]. Les chercheurs du domaine de l'AES (All Electric Ships, les navires tout électriques) dans le monde entier se sont principalement intéressés à quatre axes principaux: le réseau de distribution électrique [Sha-16, Zha-19], le stockage d'électricité [Bov-18], le système de propulsion et la protection électrique [Jot-17, Cuz-17]. En effet, le réseau de distribution électrique du navire est l'axe de notre intérêt dans cette étude, et chacun de ces axes sera détaillé ci-dessous.

I.2.2.1. Réseau de distribution électrique

Actuellement, le système de puissance dans les navires utilise généralement une alimentation triphasée générée et distribuée dans une configuration non mise à la terre, qui peut maintenir l'équipement en exploitation continu en cas de défaut à la terre monophasée. À cette fin, les câbles des systèmes non mis à la terre doivent être isolés de la coque du navire. En outre, le système électrique moderne se caractérise par une distribution électrique continue, ce qui augmentera la fiabilité des équipements électriques installés dans les navires.

Dans les dernières années, la conception IPS (Integrated Power System) a été appliquée dans les navires plus électriques [Jay-17]. En effet, elle a été identifiée comme la technologie de prochaine génération pour les systèmes d'alimentation des navires à cause d'elle plus efficace et moins coûteux. De plus, son exploitation dans le transport maritime peut être considérée comme une étape essentielle afin de concrétiser les navires tout électriques. Selon son système d'exploitation, l'énergie électrique sera distribuée de manière centralisée afin que les services du navire et les charges de propulsion soient alimentés par un ensemble commun de générateurs parallèles, comme l'illustre la Figure I.3, ce qui entraîne la capacité de basculer la puissance électrique entre les équipements de propulsion et les charges électriques selon leurs besoins électriques, augmentant la flexibilité et la fiabilité du système de puissance [Kum-19]. Dans ce contexte, l'IPS est conçu pour produire des navires non-polluants, et afin de minimiser le poids et le coût de construction des navires. De plus, il est recommandé que les systèmes de distribution d'énergie à bord des navires possèdent la capacité de transférer en permanence l'énergie aux divers systèmes électriques installés pendant et après les défaillances.

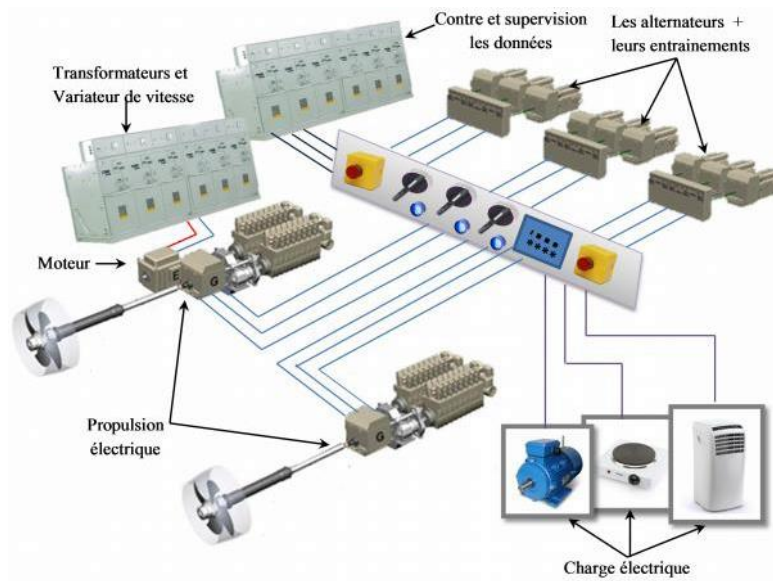


Figure I.3. Distribution d'énergie électrique dans les navires modernes [Kum-19].

Le système d'alimentation des navires modernes présente des caractéristiques différentes des systèmes d'alimentation traditionnels, en raison de la nouvelle structure du système de puissance et des caractéristiques des charges électrique intégrées. Parmi les caractéristiques les plus importants de cette alimentation:

- La gamme de fréquences plus large par rapport au système d'alimentation classique.
- Les pertes en lignes sont faibles et le taux de chutes de la tension produite dans un fonctionnement normal est plus agréable dû à l'utilisation de câbles courts dans la zone de transport électrique.
- La puissance de production de l'énergie électrique est plus élevée que les systèmes de distribution classique en raison de l'électrification les systèmes pneumatiques et hydrauliques dans les navires.
- Un grand nombre de composants électriques sont étroitement couplés dans un petit espace.
- Un grand nombre de charges électroniques, telles que des capteurs de combat, de contrôle et de communication, des radiateurs et les ordinateurs, qu'ils sont plus sensibles aux coupures de courant et à la qualité de l'alimentation.
- Une défaillance dans une partie du système de puissance peut affecter d'autres parties électriques dans le navire.
- Il existe des différents types de charges ont été installés dans la zone de consommation (linéaire, non linéaire, active, passive, tournants...etc.), qui consomment une grande quantité d'énergies électriques par rapport aux autres charges installées sur les réseaux électriques des navires classiques.

Grâce à ces caractéristiques uniques du système de puissance, certaines des solutions mathématiques utilisées dans l'analyse du réseau de distribution électrique moderne ne peuvent pas être appliquées au système d'alimentation classique tel que la construction du modèle global et unique pour tous les éléments du réseau électrique installé dans le navire (les alternateurs connectés, les lignes de transmissions et les charges électriques). Le réseau électrique installé dans les navires modernes contient des différentes charges, un bref aperçu des classifications de charges dans le système de puissance du navire tout électrique [Xiu-05]:

1. **Non-vital** : Ce sont des charges facilement transportables qui peuvent être immédiatement sécurisées, sans nuire aux opérations de transport maritime, à la capacité de l'isoler pendant leurs défaillances. Parmi les charges non vitales installées sur les navires ; système de chauffage, les équipements électriques de la cuisine; systèmes de ravitaillement, systèmes de réfrigération, et d'autres charges qui peuvent être arrêtées pendant une courte période jusqu'à ce que la capacité électrique soit rétablie.
2. **Semi-vital** : Ce sont des charges importantes pour le navire mais pouvant être arrêtées ou commutées vers une autre installation afin d'éviter une perte totale de la puissance électrique du navire. Exemples: système d'éclairage, ascenseurs, tapis roulants, pompes à eau de mer et certains systèmes radar et de communication.
3. **Vital** : Ce sont des charges non transférables qui peuvent influencer sur les performances du navire, et leurs alimentations ne doivent pas être coupées intentionnellement dans le cadre du schéma de délestage des charges. Des exemples de charges vitales sont les générateurs, les moteurs à propulsion, les armoires électriques.

Dans ce contexte, les charges classées comme charges non vitales dans les missions du navire sont connectées à une seule source d'alimentation dans le système de puissance. Cependant, les charges vitales doivent être connectées à deux sources d'alimentation indépendante dans le système de puissance, et cela se fait comme suit ;

- Si une charge est classée comme charge vitale dans une mission majeure du navire, telle qu'un système de propulsion, elle doit être connectée au système de puissance via le transfert automatique de bus (ABT). En effet, l'ABT est un appareil capable de détecter la perte de puissance d'une source d'alimentation normale. En l'absence d'alimentation normale, ABT peut automatiquement déconnecter la charge de l'alimentation normale et permuter le flux d'alimentation de la charge à partir d'une autre source d'alimentation alternative.
- Si une charge est classée comme charge vitale dans certaines missions et comme charge non vitale dans d'autres missions, telle que le système d'éclairage, la charge est connectée à son système de puissance via un transfert de bus manuel (MBT). En effet, l'MBT est un périphérique, comme un ABT, qui peut connecter des charges à une source d'alimentation

normale ou à une source d'alimentation alternative. Mais contrairement à l'ABT, l'opérateur doit déplacer manuellement le MBT lorsque celui-ci constate que la principale source d'alimentation de la charge n'est plus disponible.

I.2.2.2. Stockage d'électricité

La propulsion électrique et les charges intermittentes, telles que des armes électroniques ou des capteurs, nécessitent des impulsions de puissance de très haute amplitude et de courte durée pour leur fonctionnement ou l'entraînement, qui consomment une quantité considérable de l'énergie électrique totale produite. Par conséquent, il est nécessaire que les systèmes de stockage d'énergie renforcent l'énergie produite par les générateurs installés [Cim-05]. De plus, les systèmes de stockage d'énergie peuvent être utilisés pour compenser les pics de puissance et de réguler la puissance demandée aux générateurs principaux [Nas-16]. En outre, leur utilisation entraînera également des avantages opérationnels en matière de qualité de l'énergie et d'économie de carburant. À cette fin, les systèmes de stockage d'énergie à action rapide peuvent compenser la réponse lente des générateurs et réduire les effets négatifs sur la qualité de l'énergie. Dans ce contexte, Il existe plusieurs méthodes de stockage d'énergie, qui peuvent être classées en deux catégories principales:

1. Stockage à court terme (avec une durée moins de 10 min).
2. Stockage à long terme (avec une durée plus de 10 min).

Parmi les méthodes les plus utilisées dans le stockage d'électricité en long durée, on mentionne :

- **Stockage sous forme d'énergie potentielle de l'air comprimé :** Cette méthode a été appliquée en Allemagne à Hundorf, en 1978, et peut fournir une puissance allant jusqu'à 290 MW. Cette technologie repose généralement sur un grand réservoir pour stocker l'air comprimé, qui sera par la suite utilisé pour l'entraînement de turbine à gaz.
- **Stockage sous forme d'énergie chimique :** Ce stockage dépend du contenu chimique des batteries. Actuellement, les accumulateurs au plomb ou lithium sont les plus courants dans le marché des batteries, et les plus utilisables dans les outils de transport moderne.

Dans l'autre côté, le stockage d'électricité en court durée est basé sur des méthodes d'accumulation, on a :

- **Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs:** Cette technique est basée sur le courant qui circule dans la bobine supraconductrice, qui produira un champ magnétique emmagasiné dans l'inductance. Ce principe de stockage est utilisé dans un hacheur élévateur (Boost).
- **Stockage d'énergie électrique dans des super-condensateurs :** Il s'agit d'une technologie de stockage qui a été spécifiquement utilisée pour emmagasiner l'énergie électrique, mais sa

capacité de stockage est limitée entre 7 et 10 W. A cette fin, de nombreuses recherches et travaux sont en phase d'étude pour améliorer les performances du super-condensateur et afin d'augmenter sa puissance de stockage jusqu'à centaine de kW.

- **Stockage d'énergie cinétique dans un volant d'inertie (Fly-Wheel) :** Ce type de stockage est basé essentiellement sur un volant d'inertie rotative couplé à une machine tournante qui fonctionne comme un moteur ou générateur selon l'état du réseau électrique. Ce système est intégré dans les navires pour gérer le flux de puissance et maintenir la fréquence et la tension du réseau électrique dans les limites préférées.

Le Tableau I.1 et I.2 illustrent le bilan des différentes caractéristiques des moyens de stockage à petite et grande échelle pour les deux catégories « courte et longue durée ».

Tableau I.1. Le bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage à petite échelle [Cim-05].

Technologie	Inducteur supraconducteur	Super condensateur	Volant d'inertie	Electro-chimique	Air comprimé
Forme d'énergie	Magnétique	Electrostatique	Chimique	Mécanique	Air comprimé
Densité d'énergie	de 1 à 5 Wh/kg	de 10 à 60 Wh/kg	De 1 à 5 Wh/kg	De 20 à 120 Wh/kg	8 Wh/kg (200bars)
Constantes de temps	<1 min	<10 min	<1 h	10 min à 10 h	1 h à qq jours
Cyclabilité	de 10000 à 100000 (Fatigue mécanique)	de 10000 à 100000	de 10000 à 100000 (Fatigue mécanique)	de 100 à 1000 dégradations chimiques	de 100 à 1000 (Fatigue mécanique)
Rendement électrique	> 0.9	de 0.8 à 0.9 selon régime	de 0.8 à 0.9 selon régime	de 0.7 à 0.8 selon régime	de 0.3 à 0.5 selon régime
Remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Cout globale compétitif sur la durée de vie	Technologie mature	Rendement faible

Tableau I.2. Le bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage à grande échelle.

Technologie	Hydraulique gravitaire	Air comprimé en caverne	Batteries électrochimiques	Batteries à circulation	Thermique à turbine
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360	12 kWh/m ³ à 100 bars	Batterie (Pb) : 33 kWh Batterie (Li-ion) : 100 kWh	33 kWh/m ³	200 kWh/m ³
Capacité réalisable	de 1 à 100 GWh	de 0.1 à 10 GWh	de 0.1 à 40 MWh	de 10 à 100 MWh	de 10 à 100 GWh
Rendement électrique	De 65% à 80%	50% (avec l'apport de gaz naturel)	70% ou moins en décharge rapide	70%	60%
Maturité	Très bonne	Plusieurs expériences dans le monde	Plusieurs expériences avec des technologies matures	En développement prototypes en fonctionnement	A l'état de projet
Remarques	Sites avec dénivelés et retenus d'eau	Sites avec cavernes	Métaux lourds	Produits chimiques	Indépendant des contraintes géographiques

I.2.2.3. Les systèmes de propulsion électriques

Pendant de nombreux siècles, les flottes navales, quel que soient leurs types et leurs tailles (navire commercial, navire de guerre...etc.), ont été propulsées avec une seule force appliquée à leurs extrémités. En effet, la puissance des hommes était la seule force exercée sur les galères, tandis que les navires marchands avaient besoin d'une grande vitesse, mais ils comptaient principalement sur la force des vents pour les propulser. Cette technologie classique a été radicalement modifiée au début du XIX^e siècle avec l'apparition des machines à vapeur, qui entraîneraient les roues et les hélices des navires. Dans ce contexte, les moteurs à combustion externe consistent à transformer l'énergie thermique de la vapeur produite par une chaudière en énergie mécanique appliquée aux les arbres des hélices. En 1933, l'entreprise Alsthom de Belfort a installé à bord du Normandie un système turboélectrique, qui a été bénéficié de l'expérience des porte-avions USS Lexington et USS Saratoga afin d'installer les turboélectriques. À cette fin, le câblage électrique se substituait aux longs arbres d'hélice, ce qui permet de répartir les masses du dispositif propulsif obtenant moins de contraintes et plus de sécurité. Ainsi, les 29 chaudières Normandie ont fourni de la vapeur aux turbo-alternateurs, qui à leur tour, ont fourni aux moteurs de propulsion un courant triphasé de 5.500 volts [Col-13]. Actuellement, la propulsion navale est basée sur des réacteurs nucléaires produisant de la chaleur transformée en vapeur afin d'entraîner la turbine ou les moteurs électriques, mais la majorité des navires utilisent les moteurs à diesel pour assurer l'entraînement propulsif. En effet, le développement durable des moteurs à diesels, les turbines à gaz, les alternateurs, les systèmes d'électronique de puissance et les moteurs à induction permettent de fournir les 20 MW nécessaires aux propulsions maritimes d'un navire de 20000 tonnes pour le propulser à 20 nœuds [Col-13]. Dans les dernières années, les systèmes internes de propulsion ont été changés aux propulsions hybrides, tels que Frégate militaire [Gee (a)-17]. En effet, les systèmes de propulsion hybrides sont principalement basés sur la combinaison parallèle d'un moteur diesel et d'une turbine à gaz, ou entre deux moteurs diesel, comme l'illustre Figure I.4. À cette fin, les moteurs diesel seront connectés à un générateur pour les navires de grande puissance qui nécessitent une grande force pour les propulser. Cette technique a été appliquée sur les navires afin d'accroître la vitesse de déplacement du navire [Gee (b)-17].

De nombreuses recherches et expériences approfondies étudient les systèmes de propulsion maritime afin d'améliorer leurs performances, parmi les recherches qui ont été menées on mentionne; les propulseurs Rim- Drivent , propulsion par des forces magnéto hydro dynamiques ,turbo voiles et cerf-volant de traction .Le développement des systèmes de propulsion maritime dépend de l'un de ces principaux critères, qui sont:

- Flexibilité de fonctionnement (la vitesse, rotation, freinage...etc.)
- Réduction des gaz polluants (NOx, CO₂...etc.) avec un rendement plus élevé.
- Système de propulsions moins coûteux

- Meilleur entre compacité, endurance, performance et la modularité.
- Discrétion acoustique et vibratoire, pour les navires frégates et les navires croisière.

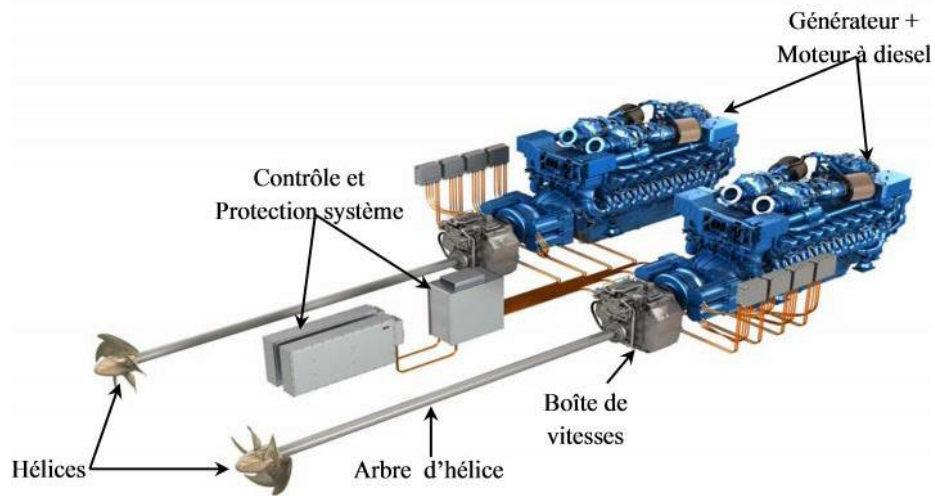


Figure I.4. Système de propulsion hybride de MTU maritime [Gee (a)-17]

I.2.2.4. Système de protection

Dans le système d'alimentation d'un navire, divers défauts électriques peuvent survenir les dispositifs électriques du réseau tel que les surtensions, les court-circuités et les déséquilibres dans les conditions de synchronisation des générateurs. À cette fin, les systèmes de protection doivent être intégrés aux systèmes de commande et au système de puissance afin de contrôler correctement le flux d'énergie dans les limites requises et d'isoler rapidement l'équipement en cas de leurs défaillances [Vic-15]. Dans ce contexte, les systèmes de protection d'alimentation sont intégrés au réseau électrique pour détecter les défaillances et les conditions indésirables et sont nécessaires pour maintenir automatiquement l'équilibre de puissance pour le reste du système, garantissant la continuité du service et minimisant les pertes de charge causées par un comportement anormal ou des dommages hostiles du système électrique [Col-13]. En effet, les dispositifs de protection hardware peuvent être trouvés dans les armoires électriques principales du réseau ou à l'intérieur de chaque dispositif électrique, et ils pourraient être comme des dispositifs tout électrique, électronique, magnétothermiques et optiques. En outre, les algorithmes de protection et de contrôle peuvent être intégrés dans les systèmes des calculs (les microprocesseurs, les automates) afin de suivi et contrôler les données mesurées et les sorties de chaque dispositif installé.

Plusieurs méthodes de contrôle des navires ont été incorporées pour superviser les diagnostics du système d'alimentation et pour améliorer la fiabilité et la robustesse du réseau électrique. Parmi les méthodologies de contrôle les plus utiles de ces dernières années, on mentionne :

1. La méthode de «feeder reconfiguration » pour les systèmes de distribution. Il s'agit d'un algorithme de reconfiguration, basé sur la théorie de réseau de neurones artificiels, et utilisé pour réduire la perte de puissance.
2. Une méthodologie basée sur la logique floue a été développée dans le but de restaurer et d'équilibrer le système de puissance en temps réel.
3. Système automatique basé sur des algorithmes de processus pour la reconfiguration du système électrique. L'objectif du processus de reconfiguration est d'alimenter les équipements de panne et d'isoler les charges après leurs défaillances.
4. Une stratégie d'auto-guérison pour reconfigurer et rétablir le service dans la distribution électrique du navire. Il s'agit d'un modèle de la disposition 3D du système de bord, utilisant un système d'informations géographiques.
5. La méthode de reconfiguration du réseau électrique à l'aide de l'algorithme génétique (GA). Dans cette méthodologie, le processus de reconfiguration peut isoler le défaut et récupérer rapidement l'alimentation de manière autonome.
6. Algorithme du réseau de neurones artificiel. Cet algorithme est utilisé pour localiser les défauts du système de distribution électrique à bord d'un navire.

I.2.3. Les contraintes des systèmes de puissance dans les navires tout électrique

Les systèmes d'alimentation des navires existent depuis plus de 100 ans, et l'histoire de leur développement a montré un niveau élevé de recherche et d'innovation, qui a commencé par apporter les premières applications de l'électricité aux navires dans les années 1880 jusqu'à la construction des systèmes de puissances plus puissants, fiables et intelligents. Cette évolution a entraîné des contraintes qui doivent être abordées afin d'augmenter les performances du navire. Parmi ces contraintes et leurs solutions, nous mentionnons:

- **Augmentation la puissance du réseau de distribution électrique:** À cause d'électrification les navires par la conversion des systèmes pneumatiques et hydrauliques en des systèmes tout électriques, la puissance des navires a augmenté de façon progressive et leur consommation électrique a atteint de 20MVA. À cet égard, les constructeurs ont tenté d'augmenter la puissance électrique distribuée dans les navires en changeant la topologie conventionnelle du réseau en un système d'alimentation unique et global pour tous les consommateurs d'électricité, en utilisant le couplage des générateurs en parallèle .Par conséquent, la puissance totale distribuée aux dispositifs électriques est liée au nombre des alternateurs parallèles.
- **Contraintes de l'alimentation des navires à quai :** Afin de construire des navires non-pollués et pour réduire la consommation d'énergie fossile dans les navires, les autorités ont fourni à disposition des armatures de recharge électrique dans les quais des navires. Cependant, la différence de fréquence d'un pays à l'autre (50 ou 60 Hz) peut poser des

problèmes dans l'alimentation électrique des navires via les réseaux locaux. À cette fin, l'entreprise ABB a décidé d'intégrer des modules de conversion de fréquence « ACS6000 » afin que les navires puissent être alimentés par tout système de distribution électrique installé sur le quai du navire.

- **La robustesse du système de puissance :** Les réseaux électriques installés dans les navires peuvent être affectés par des petites ou grandes perturbations, entraînant des dysfonctionnements dans le fonctionnement des dispositifs électriques du navire. Dans ce contexte, les développeurs ont intégré les systèmes de compensation d'énergie réactive, les systèmes de contrôles robustes, et des systèmes électriques supplémentaires afin d'assurer la continuité de la production électrique pendant leurs déplacements.
- **La synchronisation des alternateurs parallèles :** Le couplage des alternateurs en parallèle est soumis à des conditions importantes qui doivent être vérifiées afin d'assurer les meilleures performances du réseau de distribution. À cette fin, les dispositifs de synchronismes ont été intégrés dans les armoires électriques afin de vérifier ces conditions.

I.3. Conclusion

Ce chapitre introductif permet de dresser un état technique de l'évolution de l'énergie dans les moyens de transport, en mettant l'accent sur le concept de navires électriques. En effet, la technologie électrique consiste à convertir les systèmes hydrauliques et pneumatiques installés dans les moyens de transport en systèmes électriques. Cet état technique expose les avantages et les limites attendues en termes d'électrification des moyens de transport. Les avantages résident dans la réduction des émissions de gaz polluants, la réduction du poids et l'augmentation de la fiabilité des équipements embarqués. De plus, les limitations persistent principalement au niveau du système d'énergie, qui doit être amélioré pour obtenir un réseau électrique plus fiable et puissant. Dans ce but, les systèmes de stockage s'appuient sur des batteries au lithium, qui ont des propriétés de poids élevé et de densité d'énergie, et les systèmes de propulsion maritime ont été mis à niveau vers une propulsion hybride. En outre, la technologie de l'information et de la communication a été intégrée dans les systèmes électriques pour surveiller les données mesurées à distance et construire une plate-forme intelligente pour la planification urbaine. Le système énergétique des navires est devenu plus puissant ces dernières années et nécessite une précision accrue pour répondre aux besoins des équipements électriques. Dans ce contexte, le réseau de distribution traditionnel a été modifié pour s'appuyer sur l'appariement de générateurs en parallèle afin de fournir l'énergie requise pour les différents équipements électriques. À cette fin, ce mémoire se concentre particulièrement sur le réseau de distribution électrique, et nous avons choisi la topologie du réseau électrique du navire comme modèle électrique pour notre étude.

Conception et analyse d'un réseau de distribution électrique dans les navires

II.1	Introduction	19
II.2	Conception du réseau de distribution électrique dans les navires	20
II.2.1	Production et distribution électrique d'un système d'alimentation dans les navires....	21
II.2.2	Transport électrique d'un système d'alimentation dans les navires	23
II.2.3	Configuration du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires	24
II.2.4	L'organisation fonctionnelle du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires.....	25
II.3	Description du réseau de bord d'un navire tout électrique	26
II.4	Méthodologie de modélisation du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires	27
II.4.1	Définition et propriétés de matrice de passage.....	28
II.4.2	Principe de construction du modèle électrique globale.....	30
II.5	Modélisation des systèmes élémentaires.....	31
II.6	Simulation les modèles globaux du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires.....	32
II.6.1	Simulation d'un réseau double alternateur, ligne et charge passive « RLC»	32
II.7	Conclusion.....	38

II.1 Introduction

Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans notre planète, les modes de transport les plus utilisés au monde, comme les voitures, les avions et les navires, se sont orientés vers la technologie de l'électrification [Bou-18]. De plus, les accessoires électriques intelligents et confortables ont été intégrés dans les outils du transport afin d'améliorer les conditions de voyage. Dans ce contexte, les systèmes pneumatiques et hydrauliques installés dans les outils du transport ont été transformés en équipements tout électriques tels que le dispositif « RAT » [Gir-14]. En outre, les constructeurs offrent une variété de services qui sont devenus des accessoires électriques importants pour les opérateurs et les clients tels que les sièges chauffants, les vitres électriques, les systèmes de WIFI et GPS, les équipements de climatisation et les systèmes de supervision et d'assistance intelligents [Acc-19]. Pour demain, des projets sont en cours pour utiliser des câbles à fibres optiques qui transmettent les données fournies par les servo-systèmes et les capteurs électroniques aux ordinateurs de bord [Che-15]. Ainsi, on peut envisager un avenir où les commandes utilisées par le conducteur (volant, pédales, levier de vitesses...etc.) seront gérées automatiquement à l'aide des calculateurs intelligents [Zha-19]. Tout ceci sera de bon augure pour les opérateurs, les chauffeurs et les voyageurs mais demande là encore un système de distribution électrique plus puissant afin de maintenir les équipements électriques installés en bon état de fonctionnement.

Les équipements installés dans les outils du transport sont les plus grands consommateurs d'électricité. En effet, l'Airbus A330 contient plus de 700 systèmes électriques, la plupart nécessitent une quantité d'énergie élevée afin de satisfaire les besoins de leur fonctionnement, tel que, les pompes à carburant, le dégivrage du pare-brise et les calculateurs. Même les automobiles ont connu un grand développement dans leurs dispositifs électriques et sont devenues plus intelligentes, consommant une quantité d'électricité plus élevée que les automobiles conventionnelles. De plus, les navires sont devenus plus grands, de taille d'un bâtiment ou petite région, et plus consommant d'énergie électrique. À cet égard, la production d'énergie électrique dans les navires en ce moment est assurée par des alternateurs plus puissants à titre d'exemple, la Queen Mary 2 en fait 150 000 tonnes, et sa production électrique est d'environ une dizaine de mégawatts avec une navigation à 15 nœuds [Bar-05].

Le développement progressif dans les outils de transport impose une quantité d'énergie électrique plus élevée dans le système de puissance afin d'assurer une meilleure performance pour le fonctionnement des machines et des systèmes électriques intégrés. Actuellement, les outils du transport sont basés sur le fonctionnement hybride, soit pour leur entraînement tel que les systèmes de propulsions hybrides, ou pour leurs systèmes de distribution électrique qui basé sur un ou plusieurs turbo-alternateurs connectés en parallèle produisant l'énergie électrique aux différents

consommateurs électriques [Yua-20]. Ces types des réseaux sont appelés les réseaux électriques îlotés ou embarqués, et sont reposés sur des conditions doivent être vérifiés et contrôlés manuellement ou automatiquement avant le couplage des alternateurs parallèles. Dans ce chapitre, la conception et la configuration du système d'alimentation du navire seront présentées, et un système de synchronisation intelligent sera développé afin de surveiller les différentes conditions de couplage des alternateurs parallèles.

II.2 Conception du réseau de distribution électrique dans les navires

Les réseaux électriques classiques sont interconnectés et alimentés par les centrales de production (centrales nucléaires, thermiques, hydrauliques...etc.), qui peuvent transporter une quantité d'énergie infinie. En outre, il existe un autre type du réseau qui peut transporter une quantité d'énergie finie, et sont connus sous le nom du système d'alimentation du navire[Ame-10]. Ce type du réseau peut utiliser dans les régions isolées ou dans les outils de transports tels que les navires. Dernièrement, les réseaux de distribution électriques dans les modes du transport reposent sur les réseaux électriques embarqués, spécialement dans les avions et les navires modernes, cela est dû à l'augmentation de l'énergie électrique requise par les différents équipements électriques causée par l'électrification des systèmes hydrauliques et pneumatiques, et afin de renforcer les alternateurs principaux, d'améliorer les performances du réseau de distributions et d'assurer la continuité de production électrique lors de la maintenance ou dysfonctionnement des alternateurs [Ngu-08].

Les systèmes complexes qui nécessitent beaucoup de temps et d'énergie pour fonctionner seront divisés en des unités simples, à condition que ces unités fonctionnent en parallèle et en même temps, et cela sera connu sous le nom de système embarqué. Dans le domaine de l'électrotechnique, il existe des systèmes embarqués qui permettent de contrôler et de gérer des algorithmes d'optimisation comme un microcontrôleur. Dans ce contexte, un microcontrôleur s'agit comme un système embarqué car il comporte de nombreuses tâches qui peuvent être effectuées en parallèle et en même temps tels que les temporisateurs (Timer0, Timer1 et Timer2) et d'autres vecteurs d'interruptions (les interruptions analogiques et de communications).Cependant, quand on parlera du réseau électrique, le concept du système embarqué sera orienté vers les systèmes et équipements de production et de consommation électriques (turbine, générateur, moteur électrique...etc.).Selon le concept au-dessus, le système d'alimentation du navire peut être défini comme un système multi sources, multi charges, avec une topologie variable [Abd-06]. Il se compose des turbo-alternateurs connectés en parallèle au jeu de barres produisant l'électricité en même temps vers les charges électriques de natures différentes (linéaires ou non linéaires, active ou passive).La connexion entre les alternateurs et divers équipements électriques sera combinée par des lignes de transmission de longueur limitée et de caractéristiques prédéfinies.

Les systèmes d'entraînement peuvent être constitués de turbines à gaz. En général, il s'agit de turbines aéronautiques adaptées aux applications marines « résistance à la corrosion » et aux performances très intéressantes (puissance, vitesse...etc.). L'autre possibilité d'entraînement consiste à d'utiliser les moteurs diesel qui sont moins coûteux mais plus polluants et plus encombrants (Filliau3, 2000). L'énergie mécanique fournit aux alternateurs est convertie en énergie électrique puis mise à disposition aux consommateurs. Le schéma fonctionnel présenté dans la Figure II.1 montre la topologie du système d'alimentation du navire dans un navire.

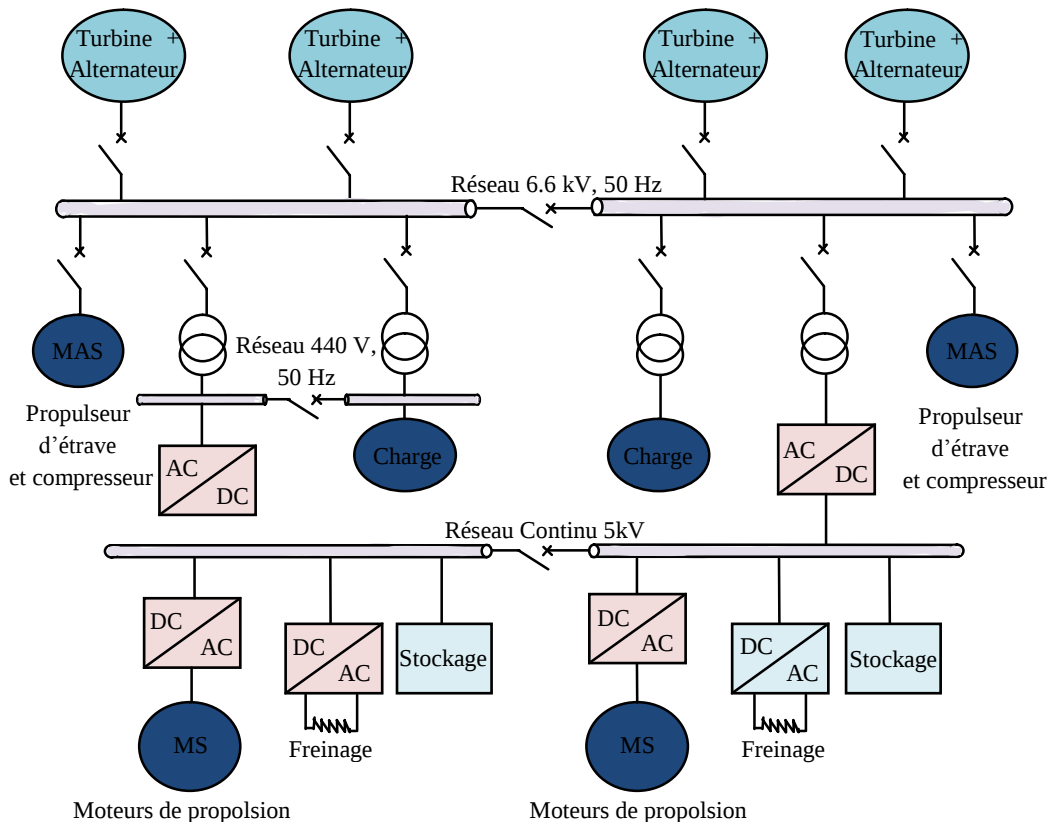


Figure II.1. Topologie du système d'alimentation dans un navire [Bar-05]

II.2.1 Production et distribution électrique d'un système d'alimentation dans les navires

L'objectif principal du système d'alimentation du navire est de fournir une quantité d'énergie électrique suffisante pour le fonctionnement des équipements électriques installés dans l'outil du transport, avec des performances élevées et à haut niveau de fiabilité. En effet, la production électrique se fait par des alternateurs couplés en parallèle dans le jeu de barres et ils sont entraînés mécaniquement par des turbines à gaz ou par des moteurs diesel. En outre, les batteries peuvent fournir aussi une quantité d'énergie limitée pour une durée bien déterminée, qui peut interférer pendant le démarrage des machines, ou en cas de dysfonctionnement dans le système de puissance. Par conséquent, les alternateurs couplés en parallèle sont la source d'alimentation principale pour les charges électriques, et les batteries sont des sources auxiliaires qui assurent la continuité

d'alimentation des systèmes qui ne devraient pas être sans alimentation, même pendant quelques secondes [Sor-00].

La tension distribuée est variée selon le type des consommateurs électriques. À titre d'exemple, les calculateurs sont alimentés par une tension nominale et continue de 24 VDC, les moteurs d'entraînement et les pompes à carburant nécessitent une tension alternative et consomment des dizaines de kW. Actuellement, les systèmes de distribution modernes remplacent les transformateurs triphasés par des systèmes d'alimentation à découpage utilisant des convertisseurs statiques (redresseur, onduleur, hacheur et gradateur). Selon la charge électrique alimentée, on distingue quatre convertisseurs principaux :

- **Convertisseur de tension AC ou HVAC en tension DC** : Dans les réseaux de distribution conventionnels, la conversion d'une tension alternative (AC) vers une tension continue (DC) est effectuée par un système de transformateur-redresseur. Cependant, dans les réseaux de distribution actuelle, la tension de sortie peut être contrôlée et est indépendante de la tension d'entrée alternative.
- **Convertisseur de tension HVAC en tension AC** : Le réseau de production fournit une haute tension alternative entre 300 et 8 kV, qui ne peut pas être distribué directement à la charge. À cette fin, des convertisseurs bidirectionnels HVAC/AC sont réalisés à l'aide des autotransformateurs afin de convertir la haute tension (HVAC) en tension moyenne (AC) adapté par l'alimentation des charges électriques.
- **Convertisseur de tension HVDC en une tension AC** : L'onduleur est un montage électrique qui repose principalement sur les composants d'électroniques de puissance tels que l'IGBT, MOSFET et diode, qui permettant de convertir une tension continue en tension alternative sinusoïdale. Il est intégré au réseau électrique embarqué, et est utilisé dans de nombreuses applications, telles que:
 1. Variateur de fréquence.
 2. La continuité d'alimentation.
 3. Fournir une tension adaptée à l'alimentation de la charge.
- **Convertisseur de tension HVDC en tension DC** : Les convertisseurs DC/DC sont intégrés au système d'alimentation du navire afin d'alimenter les charges appropriées avec les alimentations à courant continu de faible puissance tels les calculateurs, en variant le niveau de tension continue à l'aide d'un hacheur abaisseur ou élévateur . Leur schéma électrique est reposé sur une inductance afin d'emmagasiner transitoirement l'énergie électrique, un système de filtrage, composant d'électroniques de puissance (IGBT, MOSFET...etc.) et un système de commande pour gérer les impulsions MLI.

Lorsque l'énergie électrique est générée par différents convertisseurs en fonction des besoins et du type de charge, elle doit être distribuée aux consommateurs électriques, ce qui ne peut être fait que par les commandes du cœur électrique. En effet, les cœurs électriques peuvent définir comme des armoires électriques bien équipés et bien installés dans le système d'alimentation du navire contenant les jeux de barres, des contacteurs et des équipements de protection. Ces équipements sont installés dans les armoires électriques pour vérifier l'état du réseau électrique embarqué, d'isoler entre la partie de puissance et la partie de commande. De plus, les jeux de barres installés dans les armoires électrique peuvent être combinés entre les équipements de production (générateurs, batteries et convertisseurs électriques) et les équipements de consommation (les moteurs, l'éclairage, calculateurs...etc.).

II.2.2 Transport électrique d'un système d'alimentation dans les navires

Les armoires électriques sont des moyens de combinaison entre le réseau de distribution et le réseau de consommation utilisant les dispositifs de commande (relies, contacteurs, disjoncteurs...etc.). Cependant, les câbles électriques sont des outils de transmission d'énergie électrique, qui transportent l'énergie électrique du réseau de distribution au réseau de consommation. En effet, on distingue deux catégories des câbles, en termes de longueur, de masse et de quantité d'énergie qui peuvent être transmises:

- **Les câbles reliant les générateurs et les armoires électriques:** Ce sont des câbles les plus lourds dans le réseau électrique embarqué, et sont intégrés pour la combinaison entre le cœur électrique et les équipements de production. Ces types des câbles sont appelés « communément feeders ».
- **Les câbles reliant les équipements de consommation et les armoires électriques :** Ce sont des câbles de longueur et d'épaisseurs variables. En effet, les caractéristiques de ces câbles sont déterminées selon le type de charge alimentée. Le routage de ce type de câbles est disposé de manière à obtenir une séparation physique du câblage.

Généralement, les deux catégories des câbles annoncés au-dessus sont interconnectées dans les armoires électriques par des barres de cuivre, comme l'illustré la Figure II.2. Dans ce contexte, chaque charge est connectée à une seule barre. La somme des barres est constituée un jeu de barres dans le cœur électrique.



Figure II.2. À gauche, exemple d'une barre électrique - À droite, photo du bus-barre dans le cœur électrique [Gir-14].

II.2.3 Configuration du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires

La configuration du système d'alimentation du navire est effectuée par des composants électromécaniques, qui sont appelés les contacteurs. Cette configuration doit être manuelle par l'opérateur ou bien automatique par les calculateurs, pour relier les alternateurs parallèles entre eux, et afin d'alimenter les charges électriques. Pour un dysfonctionnement dans le réseau de distribution, le contacteur doit être isolé la partie endommagée par l'ouverture l'interrupteur. En pratique, la commande sera effectuée par des automates programmables à l'aide des équipements d'appareillage installés dans le tableau de bord et les systèmes de supervision [Sor-00]. Par conséquent, la configuration correcte du système d'alimentation du navire permet d'assurer un haut niveau de fiabilité, de robustesse et le plus important d'assurer la protection et la continuité de fournir l'énergie électrique aux différents équipements électriques installés dans le réseau électrique.

Dans ce contexte, la gestion de la charge doit être assurée en installant des composants de protection électriques dans le cœur électrique afin de le protéger contre les surintensités. En effet, les équipements de protection sont installés entre la charge et le jeu de barres assurant le bon fonctionnement des charges électriques et la protection des contacteurs et les calculateurs. Actuellement, il existe trois types des dispositifs de protection les plus couramment utilisés dans le réseau électrique embarqué:

1. Disjoncteur (Circuit breaker)
2. Disjoncteur intelligent (Remote Control Circuit Breaker)
3. Contrôleur de puissance (Solid State Power Controller)

Les disjoncteurs sont des composants thermiques magnétiques, leur rôle est de couper le courant et d'isoler la partie puissance de la partie commande, et ils interviennent en cas de surintensité de courant dans le système de puissance. Pour les disjoncteurs intelligent, ce sont des disjoncteurs qui

peuvent envoyer leur état au tableau de bord à distant, sans aucun câble supplémentaire. Cependant, les contrôleurs de puissance ce sont des composants de protection qui peuvent réagir avec une surintensité de courant moins élevé par rapport les disjoncteurs. En fait, leurs fonctionnements sont effectués à l'aide d'un composant d'électronique de puissance « MOSFET », qui assure une isolation galvanique entre la charge et la commande.

II.2.4 L'organisation fonctionnelle du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires

La description globale du réseau électrique embaqué peut être présentée par un diagramme global, décrivant chaque partie dans le réseau et les éléments nécessaires pour son fonctionnement, comme le montre la Figure II.3. Il existe quatre fonctions principales dans le réseau électrique embarqué, chaque fonction a été expliquée au-dessus :

- Génère la puissance électrique.
- Adapter les niveaux de tension par les convertisseurs statiques.
- Distribution de puissance électrique.
- Gestion de la charge.

Dans ce contexte, la connexion entre le jeu de barres et les sources d'énergie électrique est assuré par l'intermédiaire des contacteurs et des feeders. Cependant, la connexion entre les équipements de consommation et les barres se font par l'intermédiaire des câbles et des équipements de protection.

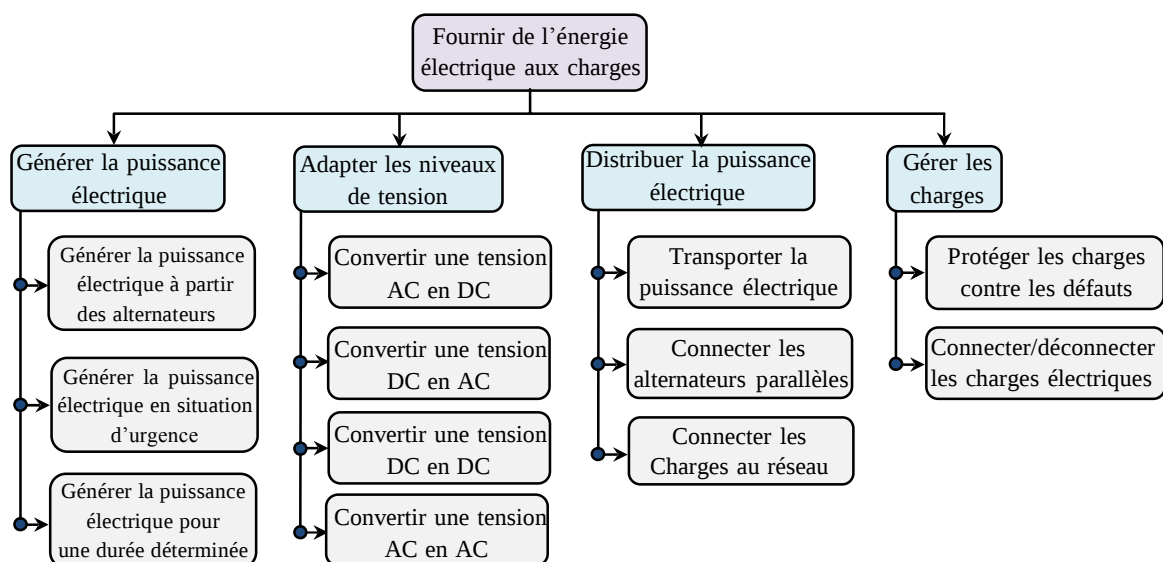


Figure II.3. Diagramme fonctionnelle du système d'alimentation du navire[Gir-14].

II.3 Description du réseau de bord d'un navire tout électrique

Actuellement, la distribution d'énergie électrique dans les navires repose sur le couplage parallèle des alternateurs afin d'assurer la fiabilité des navires et répondre aux besoins électriques des équipements installés. En effet, ce type du réseau est constitué de « n » générateurs et « m » charges connectés entre eux à travers des lignes, ces générateurs se connectent en parallèle sans intégrant des transformateurs entre les alternateurs et le jeu de barres. Quant aux charges, ils sont des natures diverses linéaires ou non linéaires, de constantes de temps différentes et de paramètres souvent mal connu.

Généralement, le réseau du bord d'un navire tout électrique contient une zone de distribution permettant de transférer l'énergie électrique des centres de production vers diverses charges, une zone de transport combinant entre la zone de production et les consommateurs électriques et une zone de consommation présentant les différentes charges électriques. La structure du réseau de bord d'un navire tout électrique peut représenter dans la Figure II.4

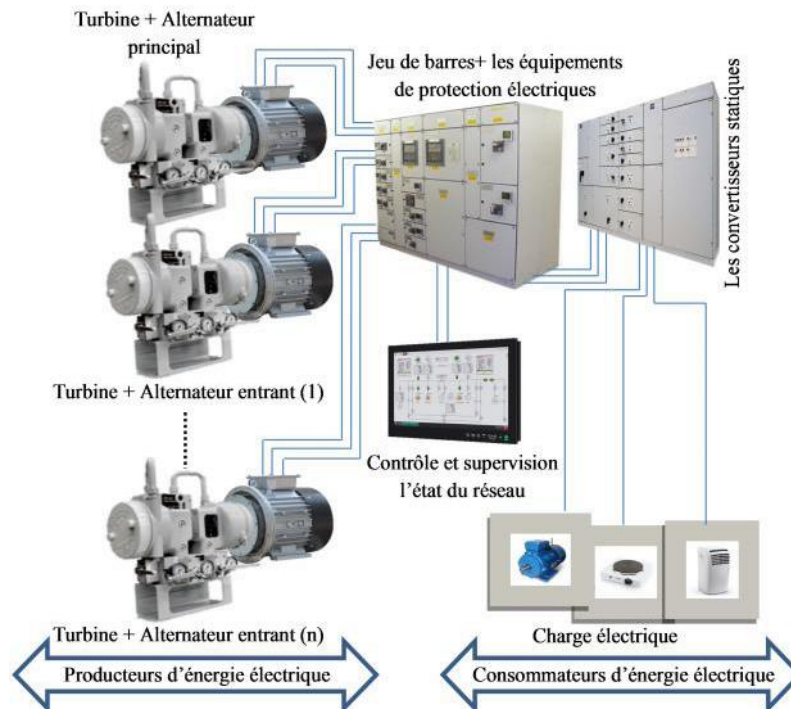


Figure II.4. Structure du réseau électrique de bord d'un navire.

Les alternateurs parallèles seront entraînés par des turbines à gaz ou des moteurs à diesel. Aujourd'hui, les turbines à gaz sont l'un des techniques de production d'électricité les plus utilisées, sa l'utilisation remonte à 1939. Elles sont des moteurs à combustion interne (IC) dans lequel la combustion d'un mélange d'air et du carburant produit des gaz chauds qui font tourner la turbine pour produire de l'électricité. En général, il s'agit des turbines d'aéronautiques adaptées à des applications marines (résistance à l'usure, etc.) et ayant des performances très intéressantes

(résistance, vitesse, etc.). En revanche, les moteurs à diesels peuvent être utilisés dans les systèmes d'entraînements à moindre coût mais ils sont plus polluants et plus carburants.

La puissance mécanique fournie aux alternateurs est convertie en puissance électrique puis mise en disposition aux consommateurs par des lignes de transport. Il est important de noter que dans le réseau électrique embarqué, toute variation dans la charge ou dans la topologie du réseau a un impact significatif sur les estimations du réseau tel que la tension, la fréquence et la puissance transportée. Par conséquent, la visualisation de l'impact des défauts électriques sur le système d'alimentation du navire et de l'effet des régulateurs sur les défauts appliqués conduit à trouver une méthode de modélisation plus fiable qui assure la construction d'un modèle globale proche de la réalité et l'obtention des paramètres de régulation plus précis.

II.4 Méthodologie de modélisation du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires

L'étude et le concept de fonctionnement du système d'alimentation du navire sur un navire nécessitent la connaissance du modèle global de ce réseau qui représente son comportement dynamique. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour s'écarter de la réalité physique, ni trop complexe pour simplifier l'analyse et la synthèse des structures de contrôle. Dans cette modélisation, le repère de l'alternateur principal est choisi comme un repère de référence, et que les paramètres capacitifs des lignes de transport sont négligés.

La méthodologie de modélisation du système d'alimentation du navire [Dem-75] consiste à mettre les équations mécaniques des machines tournantes et des entraînements dans un bloc indépendant et en cascade avec les équations électriques du réseau embarqué. Les deux blocs sont combinés entre eux par une chaîne direct « Pulsation ω » et une boucle de retour « La puissance électrique », comme le montre la Figure II.5. Cette méthode de modélisation peut être appliquée au système d'alimentation du navire parce-que la condition des constantes de temps du bloc 1 et de bloc 2 de Figure III.8 est toujours vérifiée. Dans ce contexte, le constant de temps mécanique $\tau_{mécanique}$ est plus grande que le constant de temps électrique $\tau_{électrique}$, comme présenté dans l'équation II.1.

$$\tau_{électrique} \ll \tau_{mécanique} \quad (\text{II.1})$$

Pour les modélisations élémentaires des composants du réseau électrique embarqué, le simple modèle « E-R-L » ou le modèle d'état sous forme matricielle est utilisé pour construire les sous-modèles du réseau électrique. En effet, ces sous-modèles d'état des différents composants élémentaires peuvent être présentés dans le repère triphasé « abc », ou dans des repères spécifiques tels que le repère diphasé tournant de l'alternateur principal [Adk-1975].

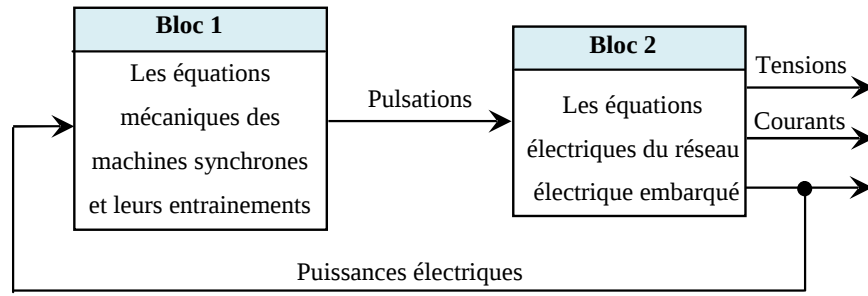


Figure II.5. Approche de modélisation en cascade du réseau électrique embarqué.

Afin de construire le modèle global du système d'alimentation du navire d'un navire, les sous-modèles électriques des composants élémentaires (Alternateurs, lignes et la charge) doivent être reliés entre eux par les égalités de tension au bout de lignes et par l'application la loi des nœuds pour les courants [Abd-06]. En effet, l'application de la loi de Kirchhoff et de courant sur les sous-modèles construits est valable uniquement si tous les sous-modèles des composants électriques sont mis dans un repère commun et prédéfini. À cet égard, il est important de noter que le repère de Park d'un alternateur est lié à son rotor. Par conséquent, lorsqu'il y a deux alternateurs connectés en parallèle ayant des angles rotoriques différents, alors deux repères de Park distincts seront obtenus. Donc, pour construire le modèle global unique du réseau électrique embarqué, le repère de Park de l'alternateur principal est défini comme un repère principal, ensuite, tous les autres modèles diphasés des alternateurs entrants, des lignes et des charges sont projetées vers le repère principal, en utilisant la matrice de passage. La définition et les propriétés de matrice de passage, ainsi que les étapes de construction du modèle global sont détaillées au-dessous.

II.4.1 Définition et propriétés de matrice de passage

La matrice de passage $P(\varphi_{ip})$ est définie comme une matrice de changement de base, de sorte que n'importe quel vecteur $\vec{x}$ de coordonnées (x_{di}, x_{qi}) et tournant avec une vitesse rotorique φ_i dans un repère (d_i, q_i) peut être exprimé dans un repère principal (d_p, q_p) tournant à la vitesse φ_p par les coordonnées $(x_{di,p}, x_{qi,p})$, comme l'illustre la Figure II.6.

Par la projection les coordonnées (x_{di}, x_{qi}) sur le repère principal (d_p, q_p) , on trouve les équations suivantes:

$$\begin{aligned} x_{di,p} &= x_{di} \cos(\varphi_{ip}) - x_{qi} \cos\left(\frac{\varphi}{2} - \varphi_{ip}\right) \\ x_{qi,p} &= x_{di} \cos(\varphi_{ip}) + x_{qi} \cos\left(\frac{\varphi}{2} - \varphi_{ip}\right) \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$\theta_{ip} = \theta_i - \theta_p \quad (\text{II.3})$$

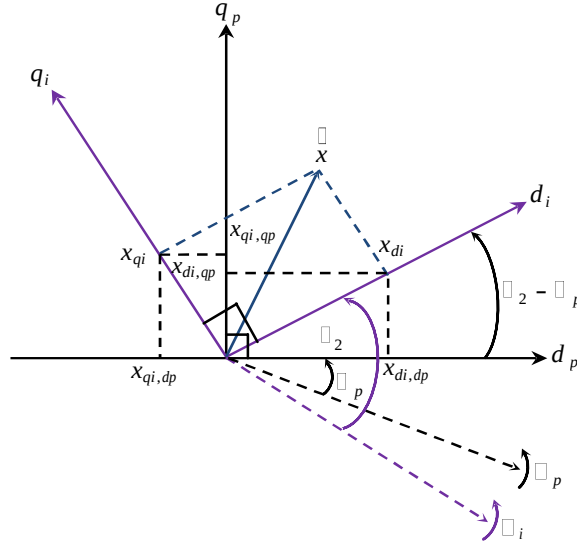


Figure II.6. Transformation du repère local vers le repère d'alternateur principal.

En appliquant les lois triangulaires sur l'équation II.5, les coordonnées du vecteur $\vec{x}$ dans le repère (d_i, q_i) peuvent être exprimées dans le repère principal (d_p, q_p) comme suit :

$$\begin{aligned} x_{di,p} &= x_{di} \cos(\theta_{ip}) - x_{qi} \sin(\theta_{ip}) \\ x_{qi,p} &= x_{di} \sin(\theta_{ip}) + x_{qi} \cos(\theta_{ip}) \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

Les équations de projection au-dessus permettent de définir la matrice de passage $P(\theta_{ip})$ présentée dans l'équation II.6. En effet, la matrice $P(\theta_{ip})$ peut être utilisée pour réécrire les coordonnées du vecteur $\vec{x}$ dans un repère (d_i, q_i) vers des coordonnées dans le repère diphase de l'alternateur principal (d_p, q_p) . Les repères (d_i, q_i) et (d_p, q_p) sont tournés avec des vitesses rotoriques ω_i et ω_p , qui correspondent à des rotations d'angles θ_i et θ_p , respectivement.

$$\begin{bmatrix} x_{di,p} \\ x_{qi,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{ip}) & -\sin(\theta_{ip}) \\ \sin(\theta_{ip}) & \cos(\theta_{ip}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{di} \\ x_{qi} \end{bmatrix} = P(\theta_{ip}) \begin{bmatrix} x_{di} \\ x_{qi} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

La connaissance des propriétés de matrice de passage $P(\theta_{ip})$ permet de simplifier les calculs dans les prochaines étapes de modélisation du réseau électrique embarqué. En effet, les deux propriétés

les plus intéressantes sont le calcul de l'inverse et la dérivée de l'inverse de matrice de passage. Les calculs des résultats obtenus sont détaillés dans l'annexe B.

L'inverse de matrice de passage est:

$$P^{-1}(\theta_{ip}) = P(-\theta_{ip}) \quad (\text{II.7})$$

dérivé l'inverse de matrice de passage est :

$$\frac{d}{dt}(P^{-1}(\theta_{ip})) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{ip}) & -\sin(\theta_{ip}) \\ \sin(\theta_{ip}) & \cos(\theta_{ip}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{ip} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

II.4.2 Principe de construction du modèle électrique globale

Le model global du système d'alimentation du navire contient un bloc pour les systèmes mécaniques et l'autre pour les systèmes électriques du réseau. Ce dernier est concerné par la sortie statorique des alternateurs (courant et tension), les tensions au bout de lignes, et la consommation électrique de la charge. Afin d'établir le modèle électrique global du réseau électrique embarqué, les étapes ci-dessous doivent être suivies:

En première étape, la modélisation élémentaire doit être effectuée de sorte que chaque composant électrique dans le système d'alimentation du navire(les alternateurs, les lignes et la charge) est modélisé dans le repère triphasé « abc ». En suit, tous les sous-modèles seront transformés vers son propos repère biphasé « dq ».

En deuxième étape, tous les sous-modèles construits sont réécrits dans un repère principal (d_p, q_p) utilisant la matrice de passage $P(\theta_{ip})$. En effet, le repère biphasé de l'alternateur principal est choisi comme un repère commun pour tous les modèles élémentaires.

L'étape dernière consiste à faire une liaison entre les modèles électriques des composants du système d'alimentation du navire (Alternateur, ligne et la charge). Cette relation sera effectuée en appliquant les lois des tensions et des courants.

Si tous les modèles élémentaires du système d'alimentation du navire ont été établis dans le repère de l'alternateur principal, le modèle électrique global du réseau constitué de « n » alternateurs et « m » charges connectés entre eux à travers des lignes peut être présenté selon l'axe « d_p », comme illustré à la Figure II.7.

À travers la Figure II.7, les lois de Kirchhoff et de nœud seront appliquées pour construire le modèle électrique global du réseau électrique embarqué. En effet, les relations établies dans

l'équation II.9 et II.10 combinent entre le modèle électrique des alternateurs et le modèle électrique de ligne et de consommateur électrique (la charge).

Par l'application la loi de Kirchhoff, on trouve :

$$\begin{aligned} \begin{cases} V'_{d,p} = V'_{di,p} = V'_{dlj,p} \\ V'_{q,p} = V'_{qi,p} = V'_{qlj,p} \end{cases} \quad i, j \in N \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

Par l'application la loi de nœud, on trouve :

$$\begin{aligned} \begin{cases} \sum_{i=1}^{i=n} i_{di,p} = \sum_{j=1}^{j=m} i_{dlj,p} \\ \sum_{i=1}^{i=n} i_{qi,p} = \sum_{j=1}^{j=m} i_{qlj,p} \end{cases} \quad i, j \in N \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

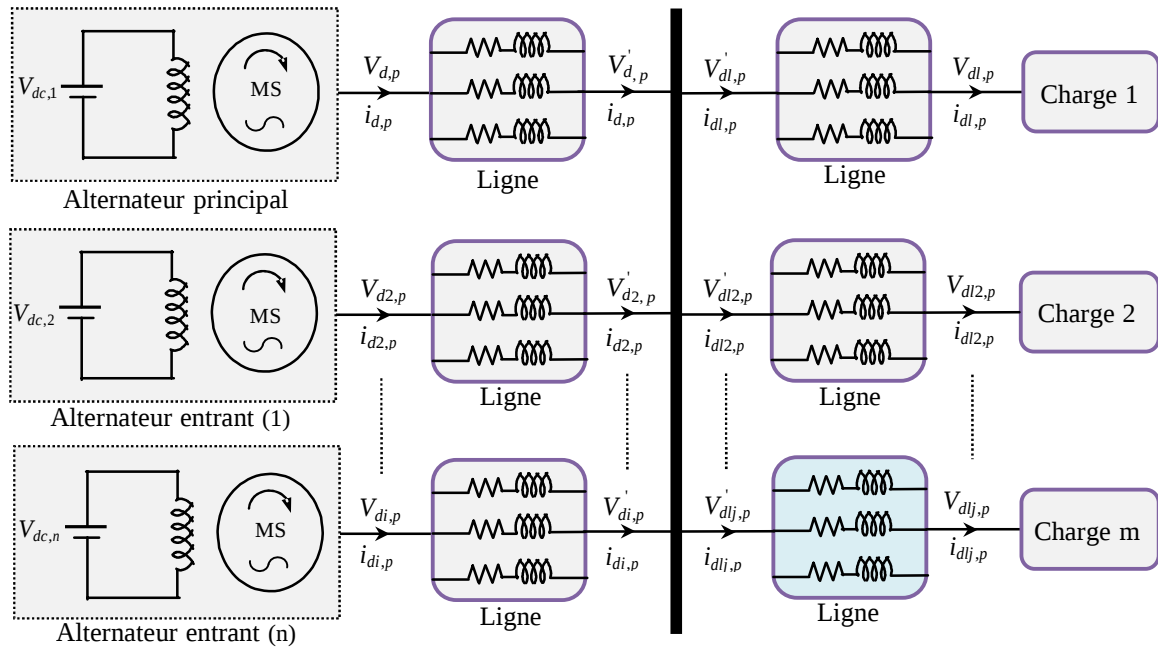


Figure II.7. Schéma illustratif du système d'alimentation du navire selon l'axe « d_p ».

II.5 Modélisation des systèmes élémentaires

L'application de la méthodologie de modélisation sur le système d'alimentation du navire consiste à modéliser chaque composant élémentaire dans son propre repère de Park. Ensuite, les différents sous-modèles établis doivent être réécrits dans le repère principal. Dans la modélisation des machines tournantes, les hypothèses suivantes sont prises en considération :

- La saturation est négligée,

- Les harmoniques d'espace sont négligés,
- L'effet de la température, l'effet de peau, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés,
- La distribution du courant est uniforme dans les sections des conducteurs.

II.6 Simulation les modèles globaux du réseau électrique d'un système d'alimentation dans les navires

Afin d'illustrer le comportement dynamique du réseau électrique embarqué, des simulations en boucle ouverte sont présentées ci-dessous. Elles seront élaborées afin de visualiser l'effet du déséquilibre des conditions de synchronisation sur les grandeurs de sortie du réseau électrique embarqué.

II.6.1 Simulation d'un réseau double alternateur, ligne et charge passive « RLC »

L'intérêt de cette simulation est de montrer les conditions de fonctionnement du système d'alimentation du navire de la topologie de deux alternateurs connectés en parallèle dans le jeu de barres et afin de justifier le modèle de réseau établi au-dessus. Dans ce contexte, trois simulations ont été élaborées sur cette topologie du système d'alimentation du navire(Double alternateur + Ligne+ Charge «RLC»), en utilisant le modèle de simulation illustré dans la Figure II.8.

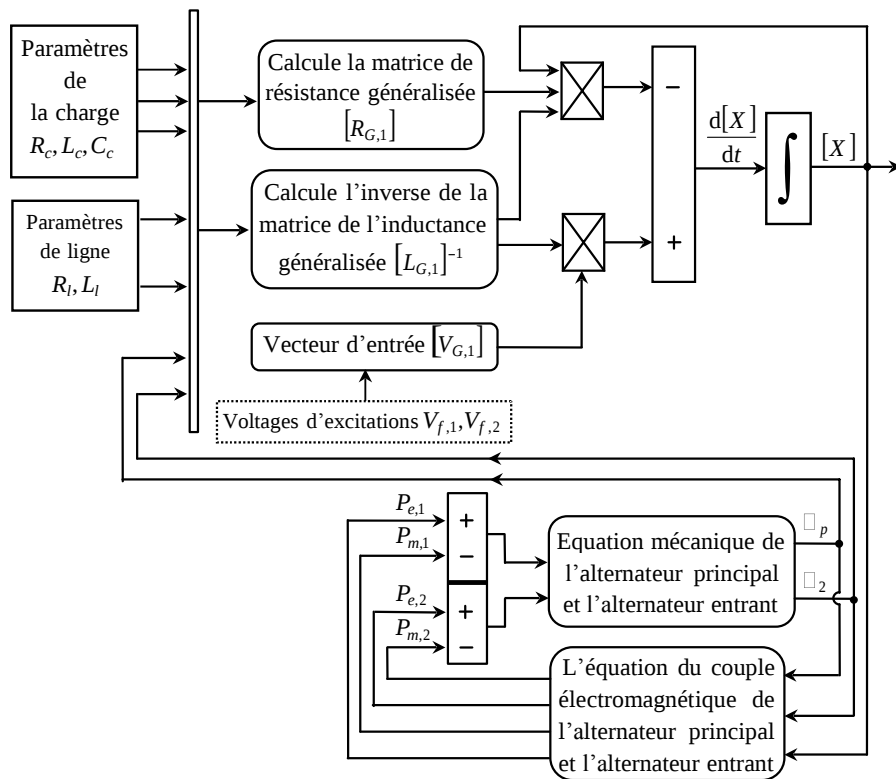


Figure II.8. Model de simulation d'un double alternateur connecté avec une charge « RLC ».

Dans la première simulation de cette topologie du réseau, on prend les paramètres de simulation du réseau d'un mono alternateur connecté avec la charge passive via les lignes électriques, c'est-à-dire que la valeur de la charge sera variée tous les 50s et les autres paramètres restent constants, et en prenant en considération que:

$$\begin{aligned} \omega_p &= \omega_2 = 314 \text{ rad/s} \\ V_{f,1} &= V_{f,2} = 0.33 \text{ pu} \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

Les résultats de simulation obtenues montrent que lorsque les tensions d'excitation sont égales et les vitesses de rotation sont identiques, cela conduit au fonctionnement parfait du système d'alimentation du navire(les conditions de synchronisation sont respectées). En effet, les deux alternateurs parallèles sont fournis des tensions et des courants triphasés sinusoïdaux de fréquences 50Hz et de déphasage $2\pi/3$ rad, comme l'illustre les Figure II.9 et II.10.

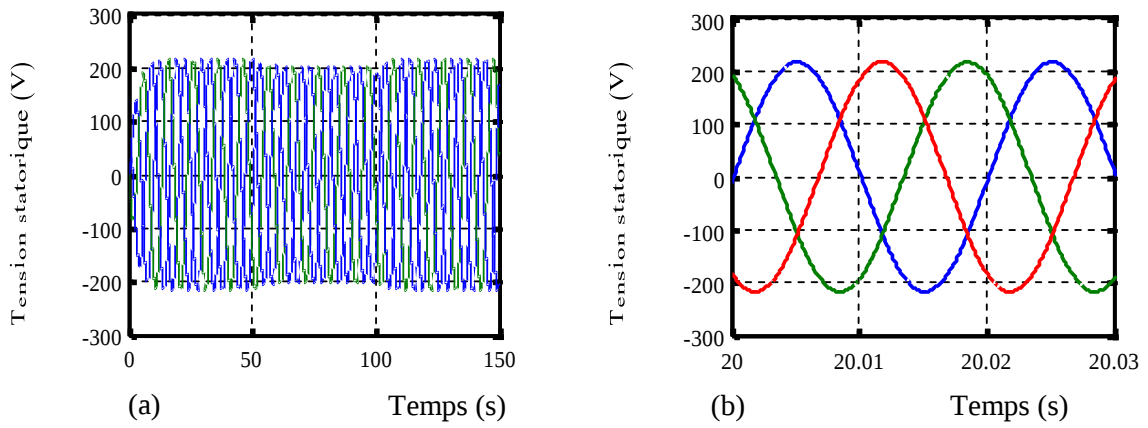


Figure II.9. Tension statorique du réseau: (a) Tension triphasée du réseau, (b) Zoom de la tension triphasée du réseau électrique embarqué.

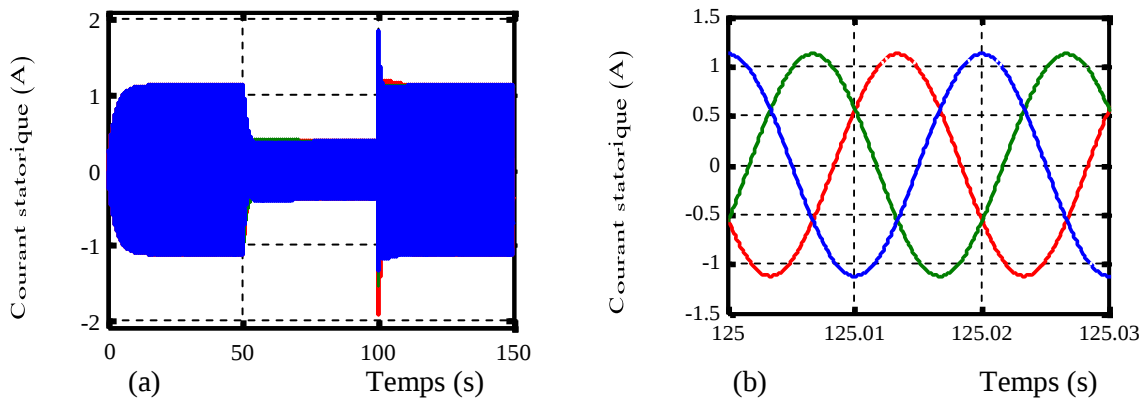


Figure II.10. Tension statorique du réseau: (a) Tension triphasée, (b) Zoom de la tension triphasée du réseau électrique embarqué.

D'après la Figure II.11, le courant de la charge est en phase avec les courants statoriques des deux alternateurs parallèles, et il est égal la somme des courants statoriques des alternateurs. De plus, les alternateurs génèrent un courant d'amortissement triphasé mais il est plus petit comparant avec le courant d'amortissement du réseau d'un mono alternateur connecté avec une charge « RLC », comme le montre la Figure II.12. Dans ce contexte, la variation de la charge provoque une variation dans la valeur efficace de tension et de courant aux bornes de la charge, comme l'illustre la Figures II.13.

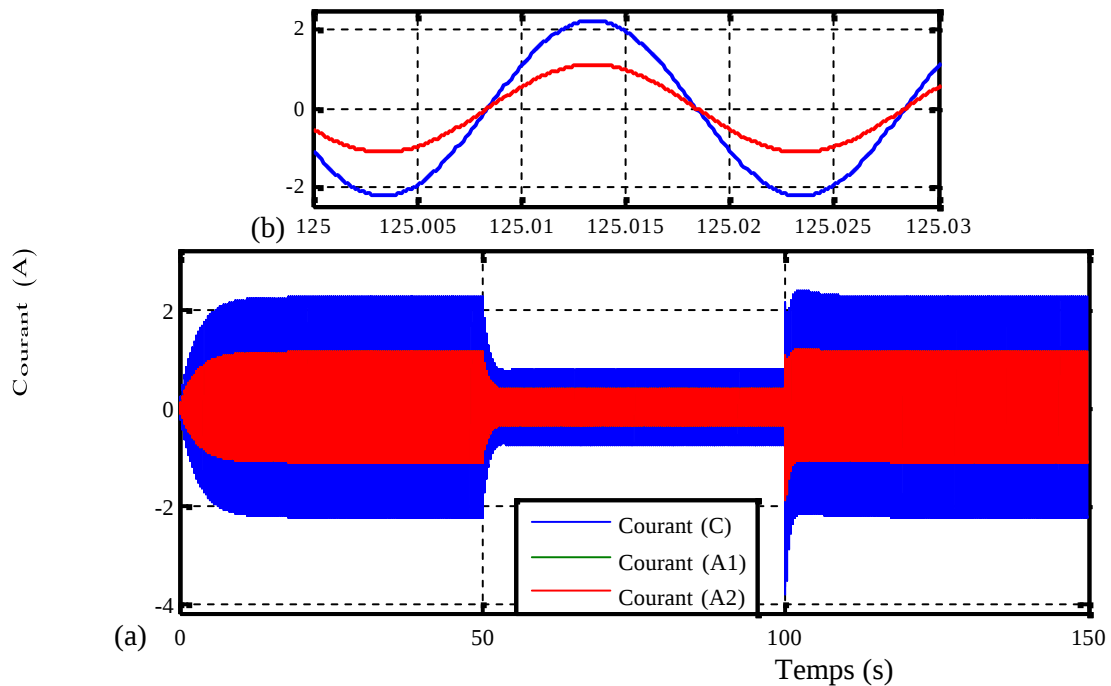


Figure II.11. Courant du réseau électrique embarqué: (a) Courants statoriques et courant de la charge, (b) Zoom des courants monophasés(C, charge ; A, Alternateur).

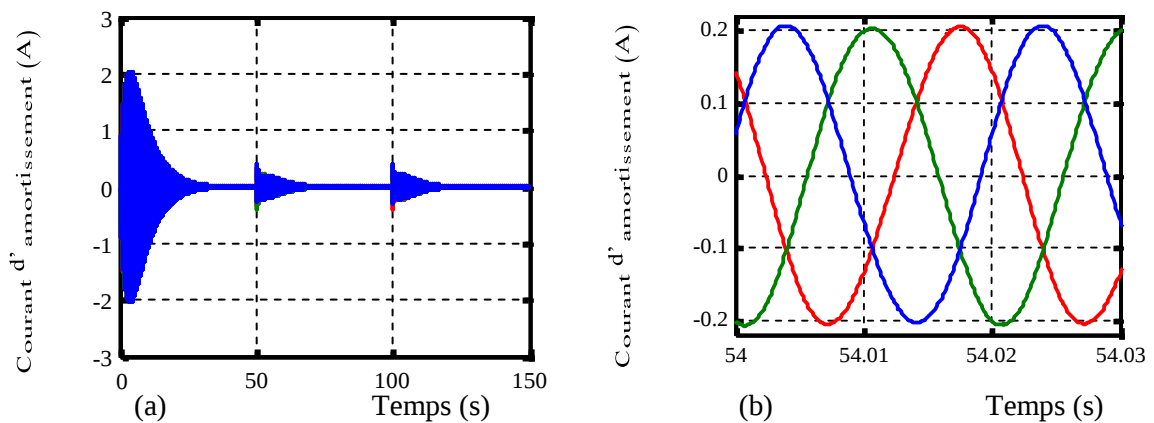


Figure II.12. Courant d'amortissement de l'alternateur (a) Courant d'amortissement triphasé, (b) Zoom du courant d'amortissement.

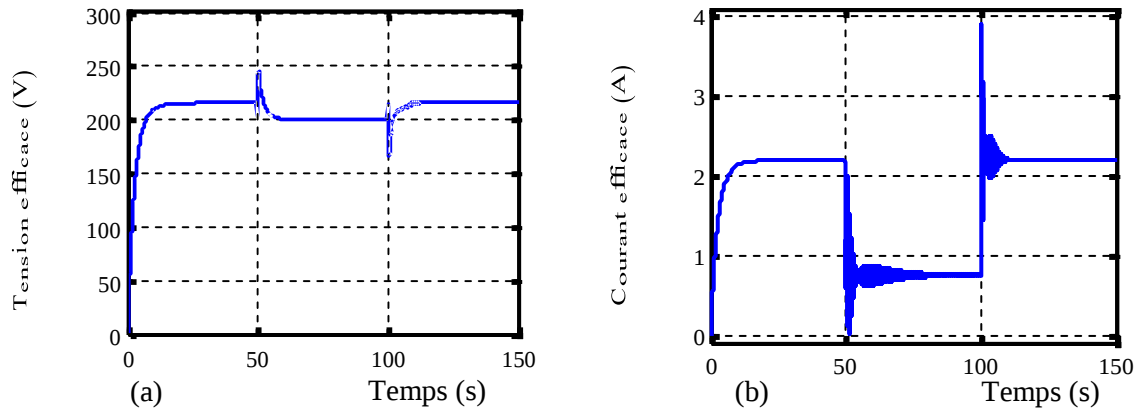


Figure II.13. Courant et tension aux bornes de la charge passive «RLC»: (a) Tension efficace, (b) Courant efficace.

Dans la deuxième simulation de cette topologie du réseau électrique, les paramètres fixes de la deuxième simulation du réseau d'un mono alternateur connecté avec une charge passive via les lignes électriques sont utilisés, c'est-à-dire que les pulsations, la valeur de la charge et les paramètres de ligne sont maintenus constants et on va varier les tensions d'excitations de l'alternateur entrant et principal comme suit :

1. $0 \leq t \leq 50s$: $V_{f,1} = 0.33pu$; $V_{f,2} = 0.33pu$.
2. $50 \leq t \leq 100s$: $V_{f,1} = 0.50pu$; $V_{f,2} = 0.50pu$.
3. $100s \leq t \leq 120s$: $V_{f,1} = 0.33pu$; $V_{f,2} = 0.28pu$

Les résultats obtenus en deuxième simulation montrent que lorsque les tensions d'excitations des alternateurs parallèles varient de la même manière ($V_{f,1} = V_{f,2} = 0.35 Pu$), cela s'induit une variance dans la tension statorique et dans les courants d'excitations, comme l'illustre la Figure II.14. Dans ce cas, les alternateurs parallèles sont fournis des courants triphasés sinusoïdaux de fréquence 50 Hz, et le courant de la charge est en phase avec les courants statoriques des deux alternateurs, comme le montre la Figure II.15 (b). Cependant, lorsque les deux tensions d'excitations varient de manière indépendamment les unes des autres ($V_{f,1} = 0.33 Pu$; $V_{f,2} = 0.28 Pu$), un déphasage de $\pi / 2$ rad st apparu entre les courants statoriques de premier et deuxième alternateur, comme le montre la Figure II.15 (c). Ce déphasage entre les courants statoriques peut être provoqué un court-circuit dans le réseau de distribution. Par conséquent, l'équivalence des tensions d'excitation doit être assurée dans le système d'alimentation du navire pour éviter le court-circuit et les dysfonctionnements des systèmes électriques.

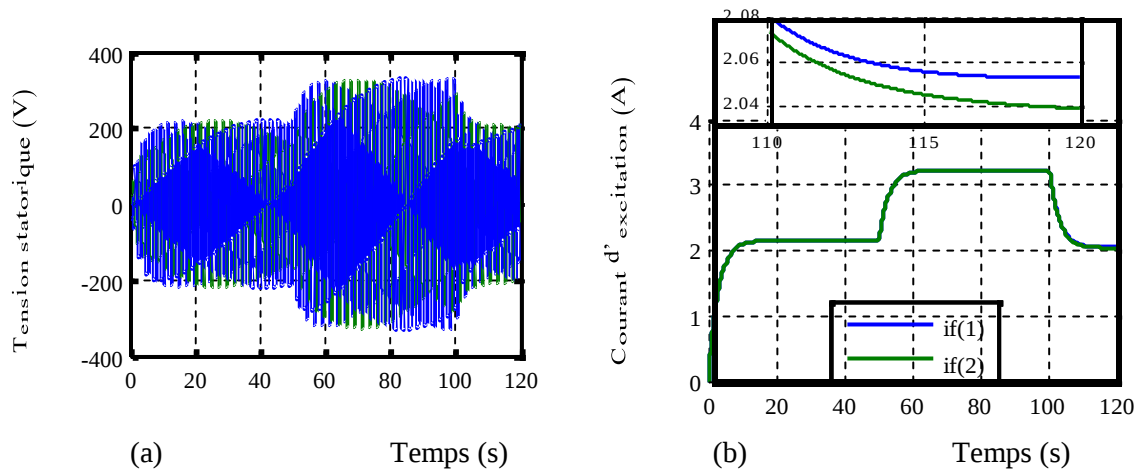


Figure II.14. Tension du réseau électrique embarqué: (a) Tension statorique du réseau électrique (b) Tension d'excitation des alternateurs parallèles.

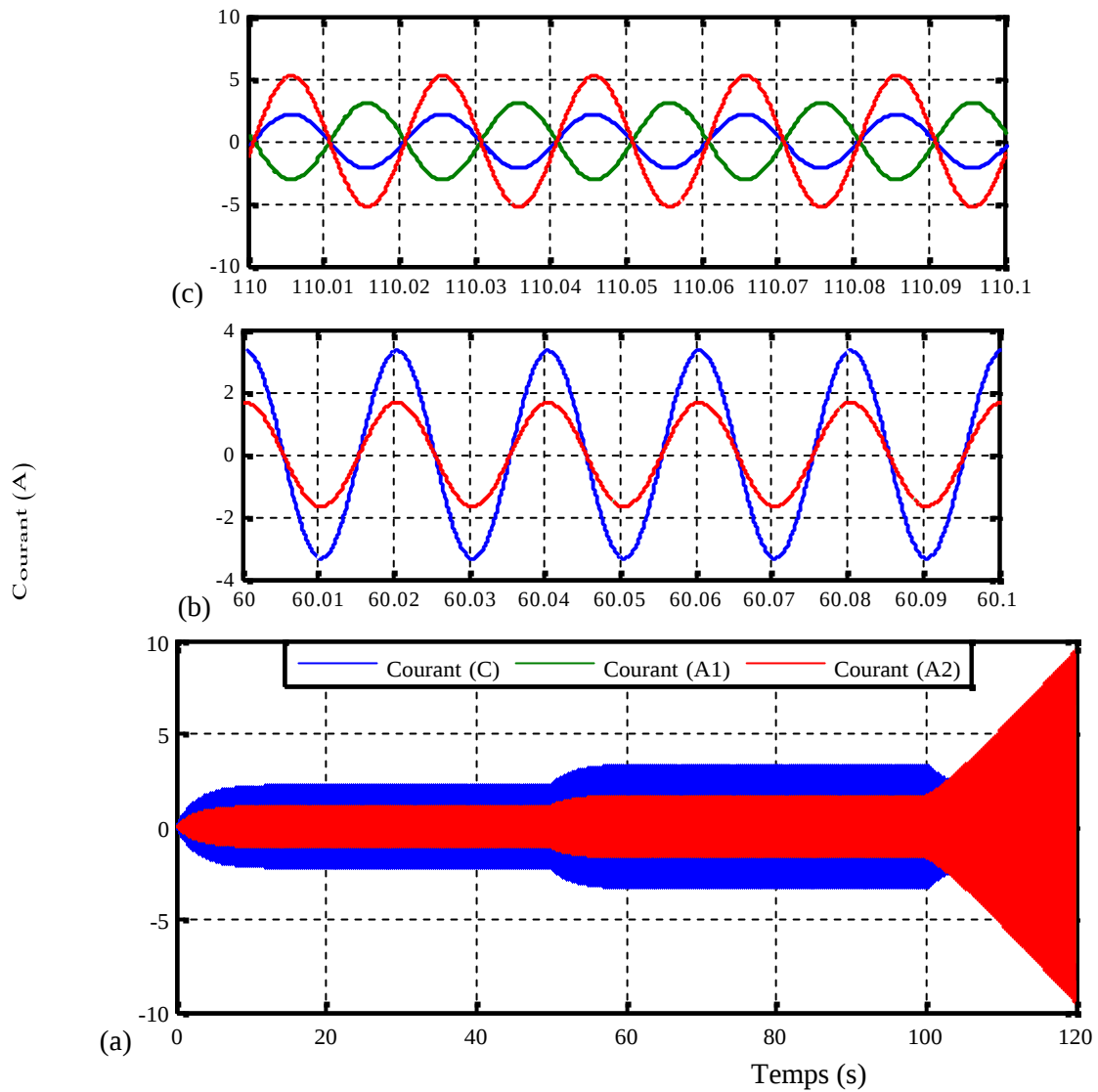


Figure II.15. Courant du réseau électrique embarqué: (a) Courant monophasé des alternateurs parallèles et de la charge « », (b, c) Zoom des courants monophasés.

Dans la troisième simulation de cette topologie, les paramètres fixes de la troisième simulation du réseau d'un mono alternateur connecté avec une charge à travers des lignes sont utilisés, c'est-à-dire que les tensions d'excitations, la valeur de la charge et les paramètres de ligne sont maintenus constants et on va varier les pulsations de l'alternateur entrant et principal. Dans un premier temps, on va varier les pulsations de la même manière telles que:

1. $0 \leq t \leq 50s$: $\omega_p = 314 \text{ rad/s}$; $\omega_2 = 314 \text{ rad/s}$.
2. $50 \leq t \leq 100s$: $\omega_p = 500 \text{ rad/s}$; $\omega_2 = 500 \text{ rad/s}$.

Ensuite, on prend deux valeurs distinctes de pulsation dans lequel :

3. $\omega_p = 314 \text{ rad/s}$; $\omega_2 = 300 \text{ rad/s}$.

D'après les résultats de simulation ci-dessous, lorsque les pulsations des alternateurs parallèles varient de la même manière ($\omega_p = \omega_2 = 500 \text{ rad/s}$) , cela s'induit une variance de la fréquence de tension et peut être entraine une surtension mais les sorties statoriques restent toujours sinusoïdales, comme l'illustre la Figures II.16. Cependant, si les deux pulsations varient de manière indépendamment les unes des autres (la condition de synchronisation n'a pas respecté $\omega_p \neq \omega_2$), alors des harmoniques vont apparaître dans les sorties statoriques, comme l'illustre la Figure II.17.

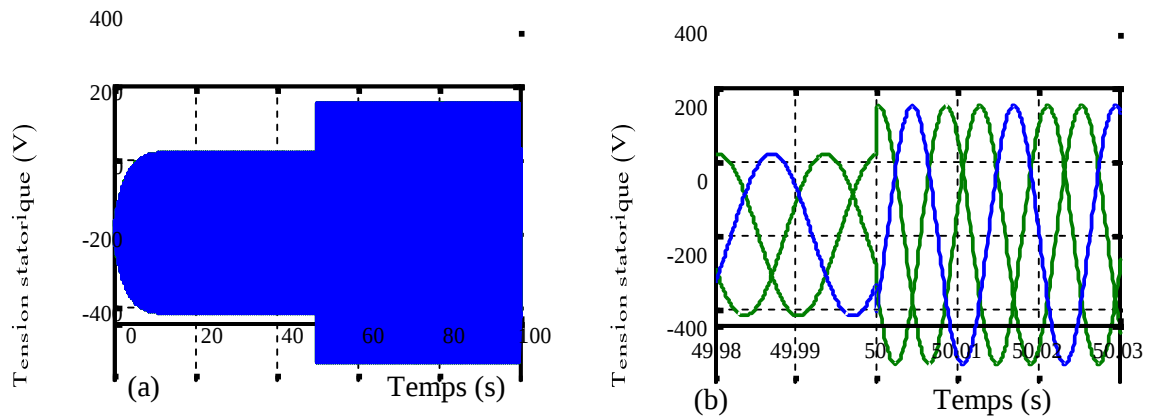


Figure II.16. Tension statorique du réseau: (a) Tension triphasée du réseau, (b) Zoom de la tension triphasée du réseau électrique embarqué.

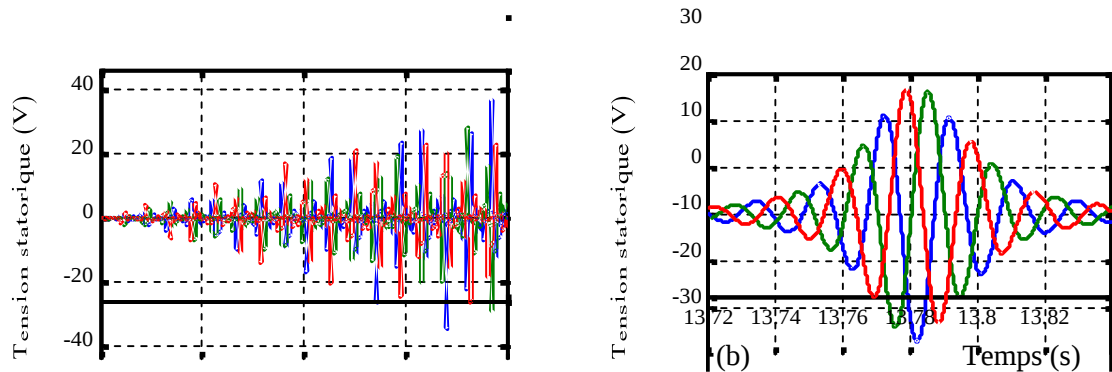


Figure II.17. Tension statorique du réseau: (a) Tension triphasée, (b) Zoom de la tension triphasée du réseau électrique embarqué.

D'après les résultats de simulation de deux topologies du réseau électrique embarqué, les points suivants peuvent être retenus en considération:

- 1- Dans la première topologie du réseau électrique embarqué, le courant de charge est égal au courant statorique de l'alternateur. Tandis que, dans la deuxième topologie du réseau électrique embarqué, le courant de la charge devient égal la somme des courants statoriques. À cette fin, la puissance consommée par la charge dans la deuxième topologie du réseau a été répartie entre les deux alternateurs parallèles.
- 2- Puisque les courants statoriques étant divisés en moitié entre les deux alternateurs, donc les pertes dans les lignes de transport électriques et les échauffements des câbles de transmission peuvent diminuer.
- 3- Le bon fonctionnement du système d'alimentation du navire consiste à respecter les conditions de synchronisation telles que l'équivalence de pulsation rotorique et les égalités des tensions aux bornes des alternateurs parallèles.
- 4- La stabilité de tension consiste à utiliser des régulateurs dans les entrées de tension d'excitation. À cette fin, les tensions d'excitations des alternateurs doivent être variées de la même manière.
- 5- La stabilité de fréquences consiste à intégrer des régulateurs dans les entrées de pulsation rotorique. À cet égard, les pulsations des alternateurs parallèles doivent être égales.

II.7 Conclusion

La pollution est l'un des facteurs qui affecte négativement les sentiments, les réactions et la sensibilité humains. À cet égard, de nombreux projets de recherche ont été mis en œuvre dans tous les domaines industriels afin de réduire les émissions de gaz polluants. Dans le domaine du transport, les constructeurs des outils de transport ont tenté de réduire les émissions de gaz polluants, en électrifiant les équipements pneumatiques et hydrauliques. Cette nouvelle technologie d'électrification nécessite une grande quantité d'énergie pour répondre aux besoins énergétiques des éLe système de distribution électrique des navires est basé sur le couplage des alternateurs parallèles, qui assure la distribution d'énergie électrique au réseau de consommation. Ce système d'alimentation électrique est reconnu par le système d'alimentation du navireet son objectif est d'assurer la continuité de la distribution électrique pour diverses charges et de répondre aux besoins électriques des équipements installés à bord des navires.

Afin de comprendre le comportement général du réseau électrique embarqué, une modélisation globale de ce type de réseau électrique a été présentée. À cette fin, une méthodologie de modélisation du système d'alimentation du navire a été suggérée afin de construire un modèle

global et unique pour n'importe quel nombre de générateurs parallèles et la nature des charges installées à bord des navires. En effet, la méthodologie de modélisation proposée conduit à construire un modèle d'état dynamique qui peut être analysé en faisant les différentes variations sur ses grandeurs d'entrées. Elle est basée sur la modélisation élémentaire de chaque composant électrique du réseau électrique embarqué.

Le meilleur fonctionnement du système d'alimentation du navire consiste à respecter les conditions de synchronisation, sinon des harmoniques seront apparus dans les sorties statoriques des alternateurs. De plus, la stabilité de tension et de fréquence consiste à mettre des régulateurs dans les entrées d'excitations et de pulsations des alternateurs, respectivement. À cet égard, la modélisation du réseau électrique embarqué en vue de commande sera présentée dans le prochain chapitre.

Supervision du réseau de distribution électrique dans les navires

III.1	Introduction	41
III.2	Supervision du réseau de distribution électrique dans les navires	42
III.3	Méthodes de surveillance du réseau de distribution électrique dans les navires.....	43
III.3.1	Supervision par lampes	43
III.3.2	Supervision par synchroscope	45
III.3.3	Inconvénients des systèmes de supervision manuels	46
III.4	Les Serveurs web	47
III.4.1	Définition	47
III.4.2	Principaux serveurs web et technologies actuelles.....	47
III.4.2.1	Principaux serveurs :	47
III.4.2.2	Technologies actuelles	48
III.4.3	Architecture client-serveur	48
III.4.4	Le protocole http :	49
III.5	Raspberry Pi	50
III.5.1	Définition	50
III.5.2	Fiche technique	50
III.5.3	Aspect matériel.....	51
III.5.3.1	CPU et GPU	51
III.5.3.2	Mémoire	51
III.5.3.3	Connecteurs.....	52
III.5.3.4	Aspect Logiciel	52
III.6	Conclusion.....	53

III.1 Introduction

Le réseau électrique embarqué se caractérise par une forte interaction entre les différentes sources et charges. Ce réseau est constitué des alternateurs parallèles tels que les machines synchrones qui vont être entraînées par des turbines ou des moteurs à diesel et des charges électriques de différentes natures (passives, actives, linéaires et non linéaires). En effet, ces sources énergétiques sont connectées en parallèle sur le jeu de barres afin de produire l'énergie électrique aux consommateurs électriques, à condition que la connexion des alternateurs respecte les conditions de synchronisation. Le réseau électrique embarqué est intégré dans les outils de transport pour augmenter la puissance de distribution et la fiabilité de l'ensemble du système d'alimentation, et afin d'assurer la continuité de la distribution électrique même en cas d'une défaillance d'un alternateur.

Au vu de comprendre le comportement dynamique et le fonctionnement du réseau électrique embarqué, il paraît intéressant de représenter mathématiquement le modèle du réseau électrique embarqué. Cette représentation ne doit pas être trop complexe mais approches vers la réalité physique qui permet d'étudier et de simuler le comportement global du réseau électrique. En effet, le modèle construit doit être dynamique pour effectuer les différentes opérations sur la topologie du réseau tel que, couplage/découplage d'un alternateur, la variance de la charge et prévoir d'appliquer les défauts électriques sur le modèle du réseau tel que les chutes de tension et les court-circuit. Ce modèle dynamique du réseau électrique embarqué permet de justifier le modèle construit, et de vérifier la fiabilité des correcteurs et les systèmes de commande qui seront utilisés pour contrôler le réseau électrique embarqué.

Dans ce chapitre, nous allons illustrer les composants élémentaires du réseau électrique embarqué, en prenant comme exemple le réseau de bord du navire tout électrique. De plus, la méthodologie de modélisation du réseau électrique embarqué est présentée et son principe sera détaillé de sorte que chaque composant du réseau électrique embarqué est modélisé. En conséquence, trois différents modèles du réseau électrique embarqué sont établis utilisant la méthodologie de modélisation proposée. Deux modèles sont présentés dans ce chapitre qui consiste à mettre un modèle global d'un mono-alternateur connecté à une charge RLC via des lignes de transport électrique et un autre modèle qui consiste à remplacer le mono-alternateur par double alternateur. Dans l'annexe B, le modèle d'un double alternateur connecté avec une charge RLC et machine asynchrone à travers les lignes électriques a été construit. Enfin, les modèles globaux du réseau électrique embarqué présentées dans ce chapitre sont justifiés par des simulations en boucle ouverte, en mettant en évidence la variation de la charge et les conditions de synchronisation.

III.2 Supervision du réseau de distribution électrique dans les navires

Ces dernières années, les réseaux électriques installés dans les outils du transport ont adopté la connexion en parallèle des alternateurs, qui fonctionnent en synchronisme avec l'alternateur principal. La topologie de distribution électrique a été changée à cause de plusieurs facteurs mais les principaux sont l'augmentation de la demande de charge, la nécessité d'augmenter la fiabilité énergétique et la réduction des pertes dans le réseau de distribution. En effet, le développement du réseau électrique dans les outils du transport améliore non seulement les performances des systèmes installés mais également l'aspect environnemental, en ramenant les taux d'émission de CO_2 à un niveau très acceptable.

Le processus de connexion d'un alternateur en parallèle avec un autre alternateur ou avec un système de jeu de barres est appelé « Synchronisation ». Lors de la mise en parallèle d'un générateur alternatif avec un autre générateur, il est essentiel de respecter les critères de synchronisation pour réaliser un système de distribution plus efficace [Gna-18]. En effet, ces critères peuvent être représentés dans un diagramme vectoriel, comme le montre la Figure III.1, et ils peuvent être mentionnés comme suit:

- 1- L'amplitude de la différence de tension entre les parallèles alternateurs doit être petite que possible ($< \pm 5\%$).
- 2- La différence d'angle de phase entre le système d'alimentation électrique doit être aussi petite que possible ($< \pm 1$ degré).
- 3- La différence de fréquence de glissement entre les alternateurs doit être inférieure à 0,1 Hz.

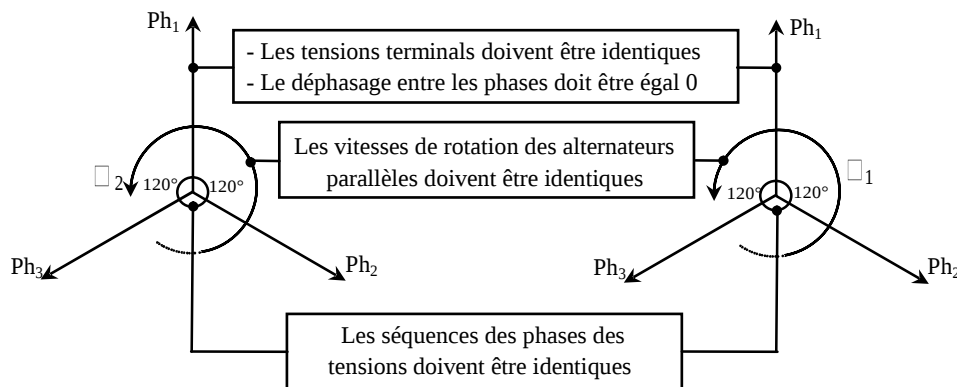


Figure III.1 Diagramme vectoriel des conditions de synchronisation.

Après avoir satisfait aux critères ci-dessus, les bobines des contacteurs de puissance triphasée sont excités et l'énergie électrique produite par les générateurs parallèles sera transportée aux

consommateurs électriques. Dans ce contexte, les critères de synchronisation sont basés sur l'égalité de la tension, de fréquence, d'angle et la séquence de phase [Ami-14].

III.3 Méthodes de surveillance du réseau de distribution électrique dans les navires

Lors de l'ajout d'un nouvel alternateur à un réseau électrique embarqué, il est très important ou nécessaire de faire la synchronisation au départ. En effet, lorsque le disjoncteur triphasé de l'alternateur parallèle est fermé sans respecter les conditions de synchronisation, à ce moment-là, un courant de court-circuit va produire, ce qui sera nocif pour les équipements installés dans le réseau électrique [Rut-16]. À cause de ça, la gestion du réseau électrique embarqué se repose sur deux méthodes de connexion les alternateurs parallèles:

- 1- La méthode manuelle : C'est une méthode qui basait sur l'observation de l'opérateur, qui est responsable de prendre la décision de fermeture le disjoncteur afin de connecter les alternateurs parallèles.
- 2- La méthode automatique : Elle dépend de l'automatisation du processus de synchronisation afin de contrôler l'équivalence de tension et de fréquence fournie par les alternateurs parallèles. Cette technique de synchronisation basée sur un algorithme et une stratégie de contrôle de sorte que la commutation du disjoncteur soit fermée ou soit ouverte lorsque les conditions de synchronisation sont respectivement équilibrées ou déséquilibrées.

Parmi les méthodes de synchronisation les plus connues dans la supervision manuelle de réseau électrique embarqué on constate :

III.3.1 Supervision par lampes

Il existe trois processus pour vérifier les conditions de synchronisation du réseau électrique embarqué à l'aide des lampes. La première méthode est basée sur les trois lampes sombres. Figure III.2. montre la synchronisation avec la technique de trois lampes sombres. En effet, cette méthode est généralement utilisée dans les petits générateurs de puissance, et elle repose sur un voltmètre qui mesurait le potentiel entre les deux alternateurs parallèles. Dans cette méthode, la vitesse de clignotement des trois lampes se produit à un taux égal à la différence de fréquences entre les deux alternateurs parallèles. En effet, les trois lampes s'allument et s'éteignent en même temps si les phases sont correctement connectées. Si l'état de trois lampes est changé, cela signifie que la séquence de phase n'est pas correctement connectée [Rut-16]. L'un des avantages de cette méthode est qu'il est facile de définir la séquence de phases, de plus, c'est une méthode moins chère par rapport aux autres méthodes de synchronisation.

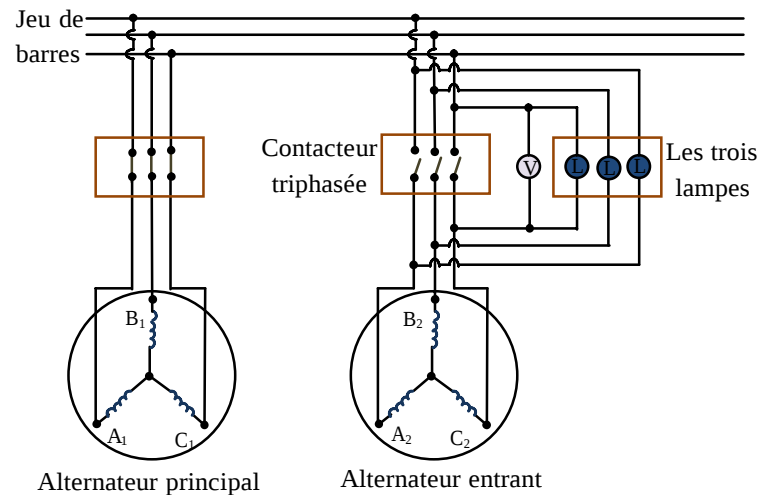


Figure III.2. Méthode de synchronisation avec la technique de trois lampes.

La deuxième méthode est basée sur trois lampes brillantes, qui consiste de connecter les lampes à travers les phases telles que A1 est connecté à B2, B1 est connecté à C2 et C1 est connecté à A2, comme le montre la Figure III.3. Si la séquence de phases est bien correcte, alors les trois lampes deviennent claires et sombres simultanément. Le bon moment pour connecter l'alternateur entrant est au milieu de la période de forte luminosité [Pat-15].

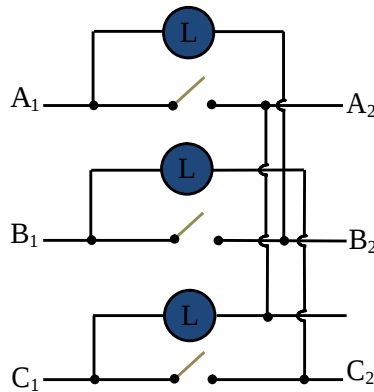


Figure III.3. Branchement électrique de la méthode de trois lampes brillantes.

La troisième méthode est basée sur deux lampes brillantes et une sombre indiquant l'état de synchronisation du réseau électrique embarqué. En effet, dans cette méthode, la lampe L1 est connectée à travers le pôle dans la ligne intermédiaire du commutateur de synchronisation, tandis que les lampes L1 et L3 sont connectées de manière transposée, comme l'illustre la Figure III.4. Cette méthode est utile pour déterminer si la fréquence de l'alternateur entrant est inférieure ou supérieure à la fréquence de l'alternateur principale [Rut-16].

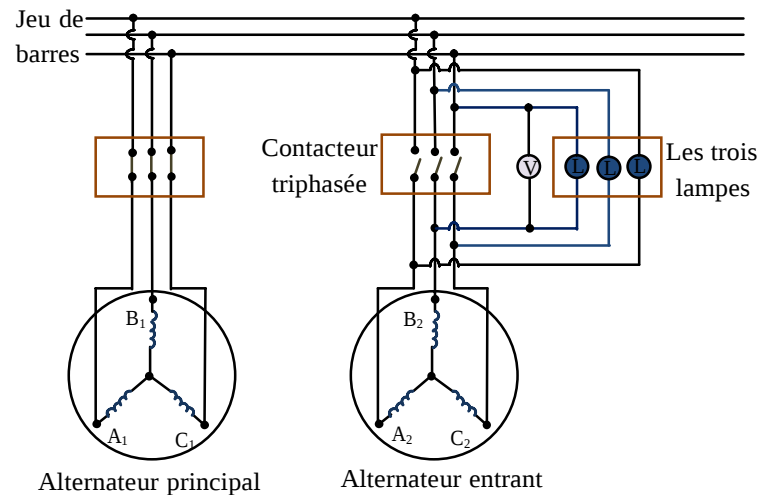


Figure III.4. Branchement électrique de la méthode de deux lampes brillantes et une sombre.

Lorsque la séquence de lampes L1- L2- L3 deviennent claires et sombres, cela s'indique que la fréquence a fréquence de l'alternateur entrant est supérieure à la fréquence du générateur principal. Par conséquent, la vitesse rotorique de l'alternateur entrant doit être réduite. De plus, la séquence de clignotement L1- L3- L2 indique que la fréquence du générateur entrant est inférieure à celle de principal. D'autre part, le bon moment pour fermer le commutateur est obtenu au moment où la lampe connectée droite est sombre et que les autres lampes croisées sont lumineuses. Par d'ailleurs, si la séquence de phases est incorrecte, alors les trois lampes s'éteignent.

III.3.2 Supervision par synchroscope

Le synchroscope est utilisé pour l'observation des conditions de synchronisation du réseau électrique embarqué. Il reçoit par ces bobines la tension de sortie des alternateurs parallèles, comme le montre la Figure III.5. Le principe de fonctionnement du synchroscope est basé sur la différence de fréquence entre les deux alternateurs. Par conséquent, le pointeur de synchroscope ne tourne pas lorsque la fréquence de la tension principale est égale à la fréquence de tension du générateur entrant. Autrement, il tourne proportionnellement à la valeur de différence [Bar-18].

La séquence de phases du réseau électrique embarqué est généralement soigneusement vérifiée au moment de l'installation (avant de connecter les deux alternateurs). Le synchroscope compare la tension d'une phase de l'alternateur arrivant avec celle de la phase associée de l'alternateur principal, la position de l'aiguille du synchroscope montre la différence de phase entre les tensions de l'alternateur entrant et arrivant [Tho-12]. Lorsque les fréquences sont équivalentes, l'aiguille devient immobile. Sinon, l'aiguille tourne d'une manière ou d'une autre. La direction du pointeur indique le temps que l'alternateur entrant fonctionne à un rythme rapide ou lent, c'est-à-dire que la fréquence de l'alternateur entrant est élevée ou faible que celle de l'alternateur arrivant. Figure III.5 montre le remplacement de synchroscope dans le réseau électrique embarqué.

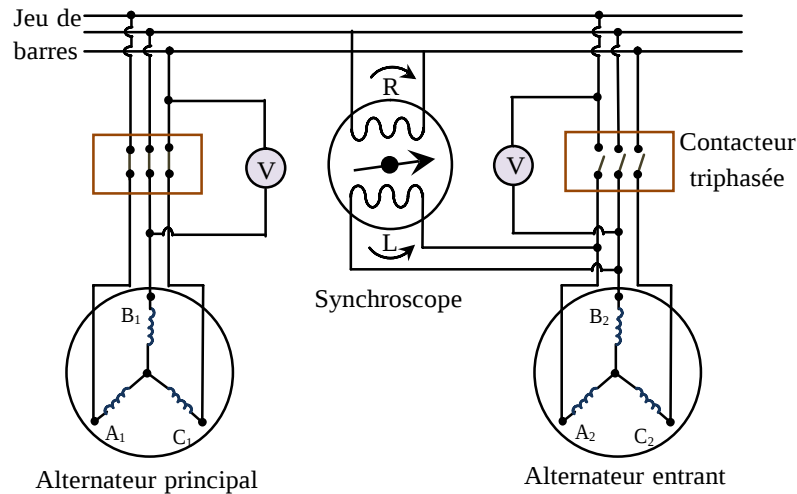


Figure III.5. Installation électrique du dispositif synchroscope (R : Rapide; L : Lente).

Dans la salle de contrôle, le synchroscope est installé dans les panneaux de synchronisation avec deux voltmètres à proximité, de sorte que l'opérateur peut facilement observer la portée du synchroscope et des voltmètres comme l'illustre la Figure III.6. À cette fin, le synchroscope peut confirmer l'égalité de fréquence et de séquence de phase. De plus, les voltmètres peuvent confirmer l'égalité de la tension. Dans ce contexte, la supervision des voltmètres et synchroscope signe au l'opérateur la décision qu'il faut prendre pour connecter l'alternateur entrant.



Figure III.6. Supervision des conditions de synchronisation dans le panneau de contrôle [Pat-15].

III.3.3 Inconvénients des systèmes de supervision manuels

Les lampes sont utilisées pour la supervision du réseau électrique embarqué. Malgré cette méthode est moins coûteuse mais elle possède des inconvénients qui peuvent menacer la fiabilité du réseau électrique. Parmi ces inconvénients on mentionne:

- Les lampes deviennent sombres à environ la moitié de sa tension nominale. Il est donc possible que le disjoncteur de connexion soit commuté même en cas de différence de phase entre les alternateurs entrants et l'alternateur principal.

- La durée de vie des lampes est plus courte.
- Le clignotement des lampes n'indique pas quelle lampe possède la fréquence plus élevée.

Dans la méthode du synchroscope, pendant le processus de synchronisation, si le synchroscope produit une erreur angulaire lors de la fermeture de l'interrupteur, cela provoque une oscillation de puissance et des contraintes mécaniques indésirables sur l'alternateur.

L'inconvénient de la méthode manuelle est que l'interrupteur ne peut pas être fermé dans le temps exact lorsque la différence de fréquence est détectée. De plus, les synchroscopes et les lampes sont installés dans des armoires électriques, alors le processus de supervision nécessite de nombreux opérateurs pour gérer la surveillance du réseau électrique embarqué, en plus du fait que la présence des opérateurs devant les panneaux de surveillance est obligatoire à tout moment. Par conséquent, pour se débarrasser des inconvénients de la méthode de synchronisation manuelle, il est important de développer un système de synchronisation automatique intelligent qui soit plus précis, plus rapide et plus efficace.

À cette fin, un système de synchronisation intelligent sera développé et sera détaillé dans la suite du chapitre basé sur un serveur web et système embarqué « Raspberry Pi ».

III.4 Les Serveurs web

III.4.1 Définition

Un serveur Web est un serveur informatique qui utilise le protocole HTTP pour fournir les données qui constituent les pages Web demandé par les utilisateurs avec des requêtes transmises de leurs navigateurs. Le serveur web peut être un ordinateur ou un Appliance dédié.

III.4.2 Principaux serveurs web et technologies actuelles

III.4.2.1 Principaux serveurs :

- **Apache (Linux/Unix) :**
 -  Opérationnel à grande échelle.
 -  open source, très stable.
 -  pages html, scripts CGI, pages PHP.
 -  peu de ressources matérielles, complexe à administrer.
- **MIIS (Windows) :**
 -  Microsoft Internet Information Server.
 -  Pages html, pages asp.
 -  Opérationnel a grand échelle, facile a installé et administrer.
 -  Performances moyennes, grosse ressource matérielle.

- **Java Web Server (Unix/Linux/Windows):**
 - 🌐 pages html, pages JSP.
 - 🌐 serveur complet destiné aux entreprises, propriété de Sun.
- **Jakarta-Tomcat (Unix/Linux/windows):**
 - 🌐 Outil de développement open source.

III.4.2.2 Technologies actuelles

- ❖ **Script CGI** : la programmation Common Gateway Interface permet de faire construire dynamiquement des documents par un serveur http. Généralement elle est associée au serveur apache sous Linux/Unix. La CGI est une norme d'écriture des scripts exécutable par apache qui génère des pages web. On peut écrit un script CGI en plusieurs langages :
 - Windows: C, C++, Visual basic.
 - Unix: PERL, C, C++, Fortran, Pascal, Tcl, sh, csh, ksh...
 - Mac os : AppleScript.
- ❖ **Pages ASP, JSP, PHP** : ASP : Technologie liée au serveur MIIS (donc Windows), des scripts écrits en VB ou JS sont insérés dans les pages asp et exécutés aux demandes. JSP : Technologie liée au serveur Java Web Server et Jakarta-Tomcat. PHP : Technologie destinée à remplacer les scripts CGI sur Apache.

III.4.3 Architecture client-serveur

Le client :

- ✓ -initie la communication.
- ✓ Emet des requêtes au serveur.
- ✓ Reçoit des réponses du serveur. #exemple : Google chrome

Le serveur :

- ✓ attends les requêtes des clients.
- ✓ Reçoit des requêtes.
- ✓ Traite les requêtes.
- ✓ Emet les réponses aux clients.

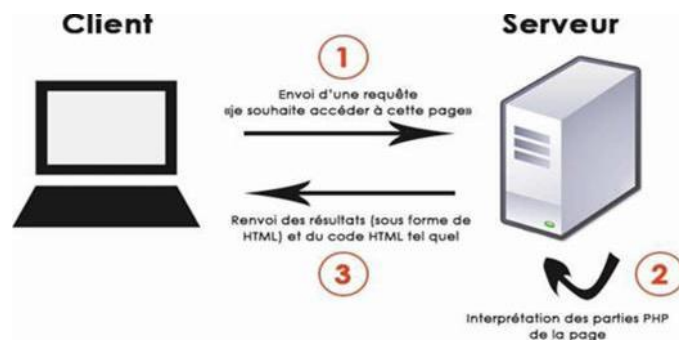


Figure III.7. Architecture client-serveur

III.4.4 Le protocole http :

L'HyperText Transfer Protocol est un protocole de Communication client/serveur qui transfère des documents hypertextes via n'importe quelle connexion fiable, mais on utilise le protocole Tcp, HTTP utilise par défaut le port 80.

L'émission d'un document par un serveur HTTP vers un client Web se passe de la façon suivante :

- Le client effectue une connexion TCP sur le port HTTP du serveur cible, le serveur accepte la connexion ;

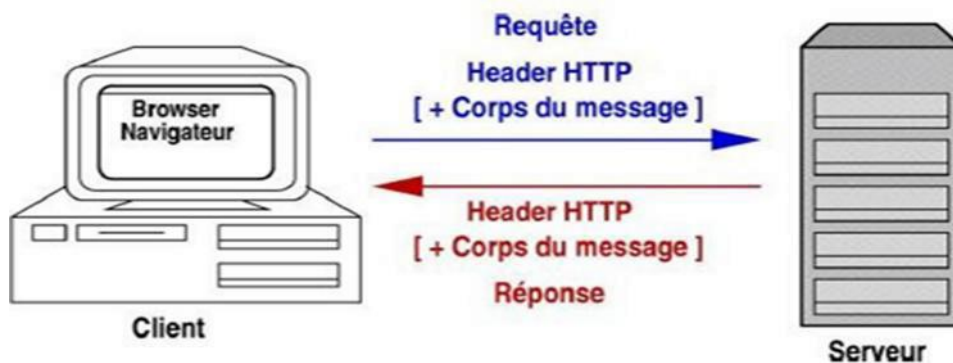


Figure III.8. Le protocole http

- Le client émet sa requête, il s'agit d'une ligne de texte Termine par les caractères CR (Carrige Return) et LF (Line Feed). Le corps d'une requête est composé de la commande GET suivie d'un espace et de l'adresse du document souhaite ;
- Le serveur expédie le document demande, c'est un fichier HTML ;
- Le serveur coupe la connexion, elle matérialise aussi la fin du document.

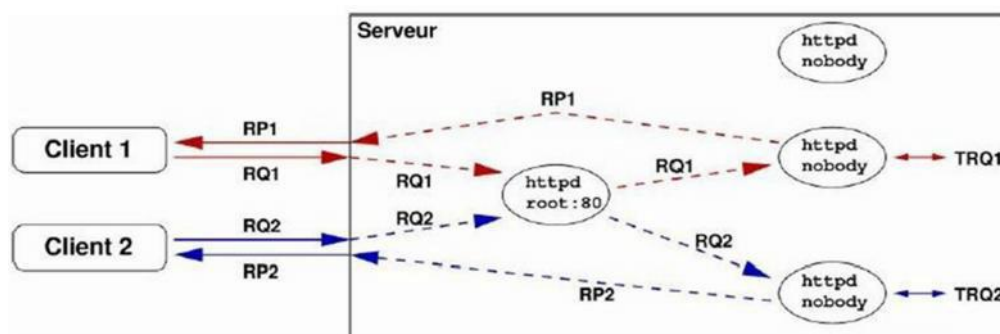


Figure III.9. Le protocole http

III.5 Raspberry Pi

III.5.1 Définition

Le Raspberry Pi est un ordinateur a une taille de carte de crédit avec un processeur ARM créée par des professeurs du département informatique de l'université de Cambridge dans le cadre de la fondation Raspberry Pi.

III.5.2 Fiche technique

Caractéristiques	
Développeur	Raspberry Pi fondation
Fabricant	Newark Corporation (en), RS Components (en), Farnellelement14 (en)
Type	Ordinateur à carte unique
Date de sortie	29février2012
Environnement	Linux(Debian, Fedoraet ArchLinux), RISCOS, Windows IOT
Système d'exploitation	Linux (Raspbian, Pidora, et Arch Linux ARM gentoo), RISC OS,FreeBSD,NetBSD,Windows10IoT(uniquementcompatibl eavecLeRaspberryPi2B,3Bet3B+), expérimental Windows 10 (arm édition)Plan 9
Alimentation	Micro-USB5V
Processeur	BroadcomBCM2835 - ARM1176JZF-S 700 MHz (modèle 1) ou 1 GHz (Modèle Zero) Broadcom BCM2836 - Cortex-A7 900 MHz (modèle2) BroadcomBCM2837 - ARM Cortex-A531.2GHz(modèle3B) BroadcomBCM2837B0-ARM Cortex-A531.4GHz(modèle3B+)
Stockage	CarteSD(A,B), CartemicroSD (A+,B+,2B,3Bet3B+)
Carte graphique	BroadcomVideoCoreIV ¹ @250MHz (modèles 1, 2 et Zero); @400MHz (modèle3Bet 3B+)
Connectivité	USB, Ethernet (modèle B, B+, 2B, 3B, 3B+) (RJ45), HDMI,RCA, Jack 3,5 mm, Micro USB Bluetooth (3B = 4.1, 3B+ = 4.2), Wifi (modèle 3B, 3B+ et Zero W),PoE(modèle 3B+)
Dimensions	85,60mm ×53,98 mm×17mm (A, B,B+, 2B,3Bet3B+), 65mm ×53,98mm ×17mm (A+), 65 mm ×30 mm ×5 mm (PCBv1.2, PCB,1.3 etW)
Masse	44,885g(A,B,B+, 2B,3B),23g(A+)
Site web	www.raspberrypi.org

Tab III.1. Fiche technique Raspberry

III.5.3 Aspect matériel

III.5.3.1 CPU et GPU

Le Soc employé avec le RasPi est le modèle BCM2835 de Broadcom, avec son microprocesseur CPU: (Central Processing Unit) et son GPU (Graphics Processing Unit).

Le BCM2835 est constitué d'un microprocesseur ARM1176JZF-S fonctionnant à 700 MHz et d'un processeur graphique VideoCore® IV. Il est conçu pour les applications mobiles et doit donc afficher une faible consommation de façon à économiser la batterie. Une vitesse d'horloge relativement lente permet d'abaisser la consommation d'énergie, et c'est pourquoi le BCM2835 tourne à 700 MHz, environ le quart de celle d'un PC de bureau. Une fréquence réduite permet également au processeur de fonctionner sous une tension faible, diminuant ainsi la chaleur produite et prolongeant la durée de vie de la puce.

Le processeur graphique VideoCore IV de Broadcom assure tous les traitements vidéo et audio demandés au SoC. Ce GPU prend en charge la norme OpenGL ES 2.0, ce qui est essentiel pour une API (Application Program Interface) fonctionnant sur du matériel embarqué, comme c'est le cas du Broadcom 2835. En bref, cela signifie que le BCM2835 est capable d'afficher des graphiques en trois dimensions, avec tous les filtres de texture requis pour les jeux et les vidéos en haute définition. Cette puce implémente de façon matérielle un codec H.264, 1080 p, 30 trames/sec, indispensable pour la haute définition. Une performance plutôt impressionnante.

III.5.3.2 Mémoire

Deux types de mémoire sont employés dans le RasPi : la DRAM (Dynamic Random Access Memory) et la flash SD (Secure Digital).

Le RasPi type B est pourvu de 512 Mo de RAM facilement visible sur la carte. La DRAM fournie par Samsung est signalée sur le SoC par le marquage K4P4G324EB-AGC1, qui correspond à une puce DRAM de 4 Gbit faible consommation conçue pour les applications mobiles. Grâce à cette RAM, le système d'exploitation pourra travailler de manière très efficace et les programmes pourront s'exécuter rapidement. La mémoire flash SD sert à stocker le système d'exploitation, tous les programmes et les autres données qui doivent persister. Le RasPi utilise une mémoire flash SD à la manière d'un PC qui utilise un disque dur pour conserver de façon permanente les données et les programmes.

III.5.3.3 Connecteurs

Le RasPi est équipé de neuf connecteurs : alimentation, HDMI (High Définition Multimédia Interface), vidéo composite, audio, Ethernet, USB (Universal Serial Bus), deux connecteurs d'extension future et GPIO (Generated Purpose Input/Output). Chaque connecteur possède une fonction précise.

- **Alimentation** : Le connecteur d'alimentation est une prise micro USB câblé de façon à apporter la tension Continue de 5 V. Sur le transformateur d'alimentation du RasPi est indiqué un courant de 1 000 mA (1 A) sous 5V.
- **HDMI** : Le RasPi est capable de générer des signaux vidéo et audio répondant à la norme HDMI.
- **Vidéo composite** : Le RasPi est capable de générer une sortie vidéo analogique sur la prise RCA.
- **Audio** : Le RasPi est également capable de produire une sortie audio analogique en stéréo. Elle est disponible sur une prise jack stéréo standard de 3,5 mm. Cette sortie audio est l'équivalent analogique de la sortie numérique disponible sur le connecteur HDMI. Il faudra un amplificateur audio pour entendre le son car la puissance du signal produit par le RasPi n'est pas suffisante pour que la sortie soit connectée directement à un haut-parleur non amplifié. Il est possible également d'utiliser un casque audio de bonne qualité.
- **Ethernet** : Le connecteur Ethernet est un connecteur RJ45 standard.
- **USB** : Le RasPi possède de ports USB empilés. Attention, le RasPi est incapable de fournir le courant de 500 mA nécessaire à l'alimentation de ces périphériques. Il est possible de pallier à ce problème en utilisant un concentrateur USB actif.
- **EXTENSION FUTURE ET GPIO**: Ces connecteurs seront développés lors d'une « future » activité.

III.5.3.4 Aspect Logiciel

Le RasPi a été conçu pour fonctionner avec plusieurs systèmes d'exploitation comme :

- **Linux** - La plateforme par défaut du Raspberry Pi ;
- **FirefoxOS** (anciennement Boot to Gecko), le système d'exploitation mobile développé par Mozilla a été annoncé comme fonctionnel par l'association ;
- **RISC OS** ;
- **NetBSD** (aucun support de OpenBSD pour le Pi n'est à l'ordre du jour) ;
- **FreeBSD** support natif des modèles 1, 2 et Zero ;

- **Windows 10:** Microsoft a annoncé que la version de leur nouveau système d'exploitation est compatible.

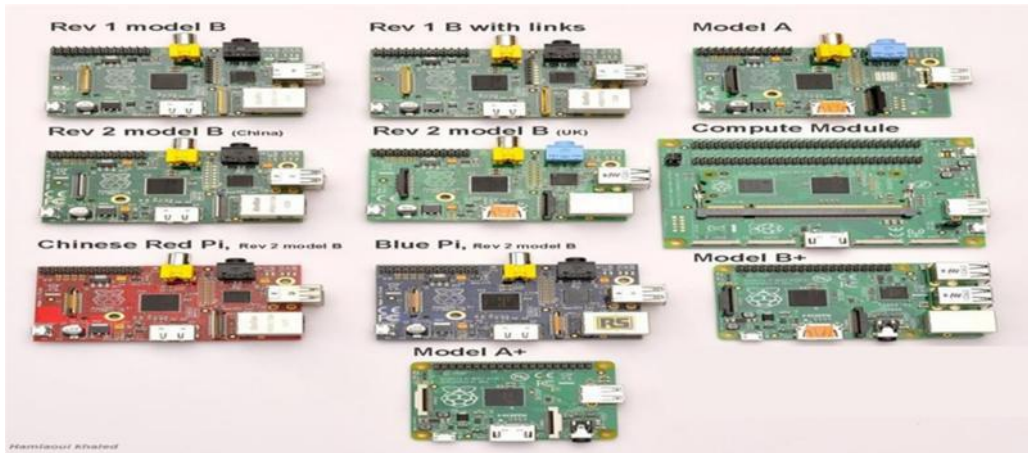


Figure III.10. Les différents modèles des Raspberry-Pi

III.6 Conclusion

La plupart des machines synchrones fonctionneront en parallèle avec d'autres machines synchrones. Le processus de connexion d'une machine en parallèle avec une autre machine en respectant les conditions de synchronisation. Les conditions suivantes doivent être remplies pour un fonctionnement en parallèle sont les suivantes: -

- La séquence de phase des tensions du jeu de barres et la tension de la machine entrante doivent être identiques.
- Les tensions du jeu de barres et la tension du terminal entrant de la machine doivent être en phase.
- La tension aux bornes de la machine entrante et de l'alternateur qui doit être connecté en parallèle ou avec la tension du jeu de barres doit être égale.
- La fréquence de la tension générée par la machine entrante et la fréquence de la tension du jeu de barres doivent être égales.

Réalisation d'un système de supervision intelligent pour un système d'alimentation du navire

IV.1	Introduction	55
IV.2	Développement d'un système de supervision intelligent	55
IV.3	Développement d'un capteur de passage par zéros	57
IV.3.1	Transformateur	58
IV.3.2	Circuit intégré «TLC556»	60
IV.3.3	Transistor « BC 547B ».....	62
IV.3.4	Circuit globale du capteur de passage par zéros.....	62
IV.3.5	Modélisation et estimation des valeurs de résistances et de condensateurs	63
IV.3.6	Résultat et discussion	65
IV.4	Développement d'un système de mesure	69
IV.5	Vérification les conditions de synchronisation.	69
IV.6	Communication entre les dispositifs de mesure.....	71
IV.7	Communication entre le système de supervision et l'application Smartphone.	73
IV.8	Développement d'une application de supervision.....	74
IV.9	Conclusion:	76

IV.1 Introduction

Le réseau électrique embarqué est essentiel pour l'alimentation des différents systèmes électriques dans les véhicules ou les machines industrielles. Pour garantir une alimentation électrique efficace et fiable, il est nécessaire de surveiller en temps réel les mesures électriques telles que la tension et la fréquence. Dans cette optique, le Raspberry Pi et une application de surveillance peuvent être utilisés pour modéliser et superviser le réseau électrique embarqué. Ce processus implique le développement d'un capteur de passage par zéros, la vérification des conditions de synchronisation et la communication entre les différents dispositifs de mesure. La modélisation et la supervision du réseau électrique embarqué offrent des avantages tels que la détection rapide des anomalies et la maintenance préventive. Cette approche permet également de garantir une alimentation électrique efficace et fiable, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement des systèmes électriques embarqués. Dans cette étude, nous examinerons les différentes étapes du processus de modélisation et de supervision du réseau électrique embarqué, ainsi que les méthodes et les outils utilisés pour y parvenir.

IV.2 Développement d'un système de supervision intelligent

Dans ce développement, les conditions de synchronisation du couplage des alternateurs parallèles sont supervisées à l'aide de l'unité de surveillance intelligente, et elle a été développée pour surveiller et isoler les alternateurs entrants à distance en cas de dysfonctionnement des conditions de synchronisation. L'unité de surveillance lit les signaux d'entrée et évalue les valeurs de fréquences, de tension et d'angle et la séquence de phase. Ensuite, elle prend automatiquement la décision de fermeture ou d'ouverture le disjoncteur triphasé du générateur entrant selon l'état des conditions de synchronisation, comme l'illustre la Figure IV.1. L'avantage principal de cette unité c'est la supervision à distance tous les mesures du réseau électrique embarqué (tension, courant, puissance...etc.), l'isolation rapide en cas d'un déséquilibre dans les conditions de synchronisation, réduire les opérateurs dans la salle de contrôle et construire d'un réseau électrique plus fiable et plus précis dans les mesures.

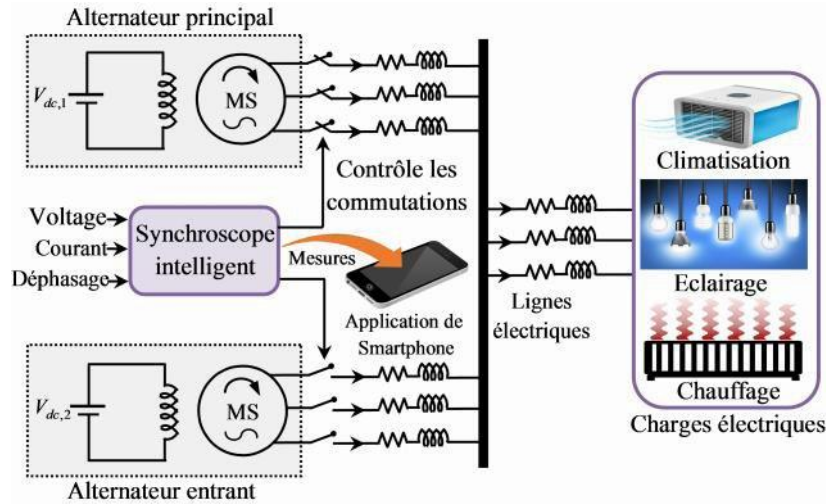


Figure IV.1. Superviser les conditions de synchronisation avec un synchroscope intelligent.

Dans les systèmes conventionnels; les fréquences sont mesurées avec des fréquencemètres, les tensions sont mesurées avec des voltmètres, les séquences de phases sont mesurées avec des séquenceurs de phases et le temps de synchronisme est mesuré avec un synchroscope. Dans ce développement, tous les instruments de mesure sont éliminés et seront remplacés par un moyen de calcul plus fiable, efficace, rapide et précis. Par conséquent, l'unité de synchronisation sera développée par des systèmes embarqués tels que Arduino-Uno ,Arduino-Nano et Raspberry-Pi.

Le processus de développement d'un système de synchronisation intelligent est basé sur trois blocs interconnectés entre eux. Le premier bloc consiste à réaliser un système de passage par le zéro, qui sera développé afin de détecter le zéro de chaque tension alternative produite par les alternateurs parallèles. En effet, le bloc de passage par le zéro est utilisé dans le système de synchronisation intelligent afin de mesurer la fréquence et le déphasage entre les phases. Le deuxième bloc consiste à mettre en place un système de mesures de tension et de courant afin de vérifier à tout moment l'équivalence des tensions produites par les alternateurs parallèles et de surveiller les intensités des courants. De plus, un troisième bloc de calcul et de communication a été ajouté afin de vérifier toutes les conditions de synchronisation et de relier les deux blocs de mesures précédentes avec une application de Smartphone. En effet, ces trois blocs seront connectés entre eux via un protocole prédéfini «communication machine à machine». Une fois les données mesurées enregistrées dans une base de données dans le troisième bloc, après elles seront envoyées à l'application Smartphone pour une supervision à distance. Dans ce contexte, lorsque le synchroscope intelligent détecte un déséquilibre dans les conditions de synchronisation, l'interrupteur du disjoncteur s'ouvrira et le générateur entrant sera isolé automatiquement. En plus, un message est alerte musicale seront envoyés à l'application en temps réel pour alerter les opérateurs.

IV.3 Développement d'un capteur de passage par zéros

Dans le but de synchronisation, le réseau électrique embarqué sera géré et contrôlé par des outils de protection dans les armoires électriques afin d'isoler les alternateurs entrants en cas de détection des déséquilibres dans les conditions de synchronisation. À cette fin, les fréquences et le déphasage entre les tensions doit être vérifiés à tout moment. Par conséquent, un capteur de passage par zéros doit être développé. Dans ce contexte, il existe deux types de signaux de sortie lorsque les capteurs de passage par zéro détectent les zéros du signal sinusoïdal. Le premier est une sortie d'impulsion étroite. Cette impulsion est générée lorsque l'entrée du signal passe du signe négatif au signe positif. D'un autre côté, une sortie avec une amplitude élevée constante (par exemple 5V) est établie lorsque l'entrée de signal est positive, et avec une amplitude nulle lorsque l'entrée de signal est négative. Le dernier est utilisé dans ce développement pour détecter la polarité des signaux d'entrée.

Le capteur de passage par zéros est un circuit dépendant des composants d'électronique de puissance. Parmi les composants typiques qui avaient l'habitude de détecter le passage par zéros sont; les opto-isolateurs, les comparateurs et les amplificateurs opérationnels. En effet, le circuit de [Wal-03] est basé sur un dispositif optocoupleur et a été illustré dans la Figure IV.2. Ce schéma électronique présente un avantage de l'isolation entre la partie de puissance et de commande mais la réponse de l'optocoupleur en haute fréquence est très mauvaise. De plus, la photodiode est liée à des conditions de basse température et peut donner une mauvaise réponse avec le temps.

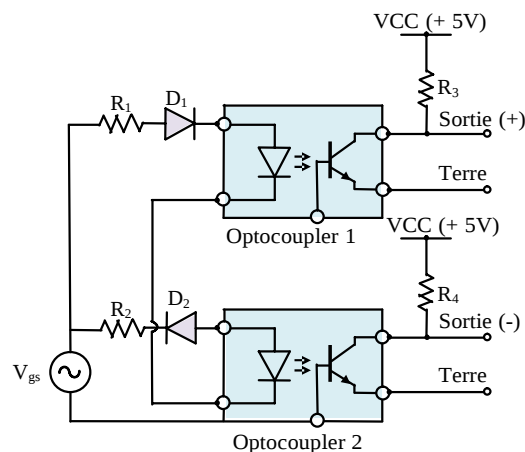


Figure IV.2. Développement d'un capteur de passage par zéro par un dispositif optocoupleur [Wal-03].

De plus, le dispositif comparateur est utilisé dans [Ell-13] et le circuit électronique utilisé a été montré dans la Figure IV.3. Le comparateur est intégré pour comparer l'entrée de tension avec la masse. Cependant, cette mesure peut être incorrecte en cas de bruit ou de chute de tension dans le signal d'entrée.

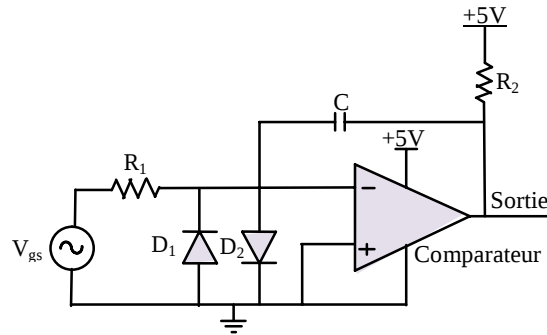


Figure IV.3. Développement d'un capteur de passage par zéro à l'aide d'un comparateur[Ell-13].

Dans [Irm-11], le passage par zéro est détecté par l'utilisation un amplificateur opérationnel, comme l'illustré la Figure IV.4. Le circuit a donné plus d'efficacité dans l'onde carrée de sortie, mais le condensateur intégré peut provoquer un retard entre la sortie et le signal d'entrée.

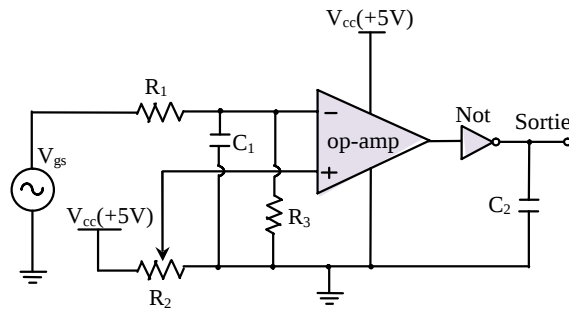


Figure IV.4. Développement d'un capteur de passage par un amplificateur opérationnel[Irm-11].

Dans cette réalisation, le capteur de passage par zéros se caractérise par la fiabilité, la précision, et la sortie du capteur peut être gérée par des systèmes de basse tension (microcontrôleur, Raspberry Pi, ArduinoUno ... etc.). En effet, ce capteur est composé d'un transformateur d'isolement (1 mH, 600 mOhm), et un circuit de temporisation monolithique « TLC556 ». De plus, un transistor NPN «BC547B» est implémenté en parallèle avec le transformateur pour contrôler l'ouverture et le court-circuit du transformateur. Afin de construire un capteur plus précis, chaque composant utilisé dans le développement du capteur sera modélisé et détaillé ci-dessous. Le capteur est testé avec divers signaux sinusoïdaux qui diffèrent en amplitude et en fréquences. Dans l'application du capteur, le déphasage entre deux signaux sinusoïdaux est mesuré par le dispositif microcontrôleur « ArduinoUno ». Les résultats obtenus sont visualisés par l'oscilloscope, et le temps de déphasage mesuré est transmis à l'ordinateur pour la supervision.

IV.3.1 Transformateur

Dans cette réalisation, le capteur de passage par zéros est développé par un petit transformateur d'isolement «KEMET / su9v-07010». Cette isolation galvanique sépare la partie de puissance et la

partie de contrôle. En effet, les caractéristiques de ce transformateur sont présentées dans l'annexe A, et le circuit équivalence de transformateur est illustré dans la Figure IV.5.

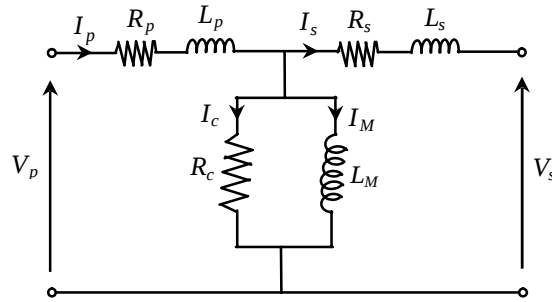


Figure IV.5. Schéma de circuit équivalent de transformateur d'isolation.

Les paramètres de circuit équivalents du transformateur peuvent être obtenus en mesurant la puissance (P), la tension (V) et le courant (I) dans le cas de l'ouverture et de court-circuit du secondaire. Par conséquent, ces tests sont effectués comme suit:

➤ **Test de circuit ouvert**

Le secondaire est maintenu ouvert, et un wattmètre «W», voltmètre «V» et un ampèremètre «A» sont placés dans le primaire du transformateur, comme le montre la Figure IV.6.

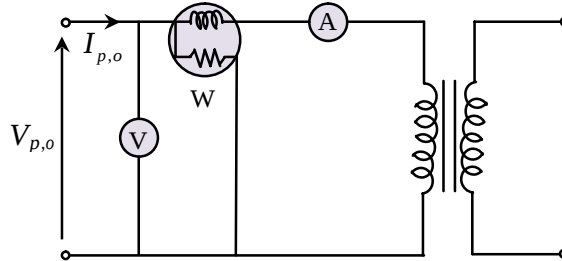


Figure IV.6. Test de circuit ouvert sur le transformateur d'isolation.

Par l'utilisation des mesures trouvées dans le test en circuit ouvert ($P_{p,o}$, $V_{p,o}$ et $I_{p,o}$), les paramètres R_c et X_M peuvent être estimés comme suit:

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{V_{p,o}^2}{P_{p,o}} \\ \frac{1}{X_M} &= \frac{I_{p,o}}{V_{p,o}} \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (IV.1)$$

$$\text{Avec : } \varphi = \text{Arc cos}\left(\frac{P_{p,o}}{V_{p,o} I_{p,o}}\right) \quad (IV.2)$$

➤ Test de court-circuit

Le secondaire est court-circuité et un wattmètre «W», un voltmètre «V» et un ampèremètre «A» sont placés dans le côté primaire. En effet, la tension sera augmentée lentement jusqu'au le courant primaire atteigne la valeur nominale. La Figure IV.7. Montre le test de court-circuit.

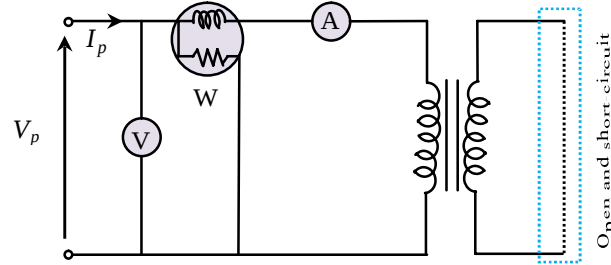


Figure IV.7. Test de court-circuit sur le transformateur d'isolation.

En utilisant les mesures trouvées dans le test de court-circuit ($P_{p,s}$, $V_{p,s}$, et $I_{p,s}$), la résistance de l'enroulement primaire et secondaire, et l'inductance de fuite de la bobine primaire et secondaire peuvent être déterminés comme suit:

$$\begin{aligned} R_p + R_s &= \frac{V_{p,s}}{I_{p,s}} \cos(\phi) \\ X_p + X_s &= \frac{V_{p,s}}{I_{p,s}} \sin(\phi) \end{aligned} \quad (IV. 3)$$

$$\text{Avec : } \phi = \text{Arc cos}\left(\frac{P_{p,s}}{V_{p,s} I_{p,s}}\right) \quad (IV. 4)$$

IV.3.2 Circuit intégré «TLC556»

Le circuit intégré «TLC556» est un dispositif de synchronisation monolithique qui peut générer une fréquence pouvant aller jusqu'à 2 MHz. Ce circuit est compatible avec les appareils MOS, CMOS et TTL. En effet, le TLC556 se caractérise par une entrée à haute impédance, une faible consommation d'énergie et peut utiliser pour leur fonctionnement un condensateur de synchronisation moins coûteux [Jaa-14]. Dans cette réalisation, le TLC556 est utilisé comme un oscillateur qui génère un signal carré de fréquence 120 kHz et comme une petite bascule de Schmitt (trigger de Schmitt). Les caractéristiques de développement du TLC556 à la température de 25°C et pour une tension d'alimentation 5V sont présentés dans l'annexe A.

Afin d'utiliser TLC556 comme oscillateur, la première entrée de déclenchement sera liée à la première entrée de seuil (Threshold et Trigger), comme l'illustre la Figure IV.8. Par conséquent, le condensateur C_T sera chargé à travers R_A et R_B , tandis que le déchargement est effectué uniquement

à travers la résistance R_B . Le TLC556 donne un niveau haut en sortie ($+V_{CC}$) pendant le cycle de charge du condensateur « T_H ». Le processus de charge s'arrête lorsque la tension du condensateur atteint le niveau de seuil ($\frac{2}{3}V_{CC}$). Dans ce cas, la sortie du TLC556 passe de haut (5V) en niveau bas (0 V), et le condensateur sera déchargé via un transistor intégré. Le processus de décharge se poursuivra pendant la période « T_L », et s'arrêtera lorsque la tension du condensateur atteindra le niveau de déclenchement ($\frac{1}{3}V_{CC}$). Dans ce cas, la sortie du TLC556 passe de bas en haut niveau (5 V). Les périodes du cycle (T_H et T_L) sont calculées par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} T_H &\approx T_L + C_T R_B \ln(2) \\ T_L &\approx C_T R_A \ln(2) \end{aligned} \quad (IV. 5)$$

Afin d'obtenir un signal carré de fréquence 120 kHz et avec un rapport cyclique de 50%, le condensateur C_T est fixe à 1 nF, et la résistance R_B est choisie très petite car $T_H - T_L = 0$. De plus, la R_A peut être calculée à travers l'équation (IV. 5).

D'un autre côté, la bascule Schmitt est obtenue en connectant un circuit résistance-condensateur ($C_2 // R_2$) à la deuxième entrée de déclenchement. En effet, la deuxième entrée de déclenchement est également liée à la deuxième entrée de seuil, comme l'illustre la Figure IV.8. La deuxième sortie du TLC556 est contrôlée par le potentiel appliqué sur le circuit parallèle ($C_2 // R_2$).

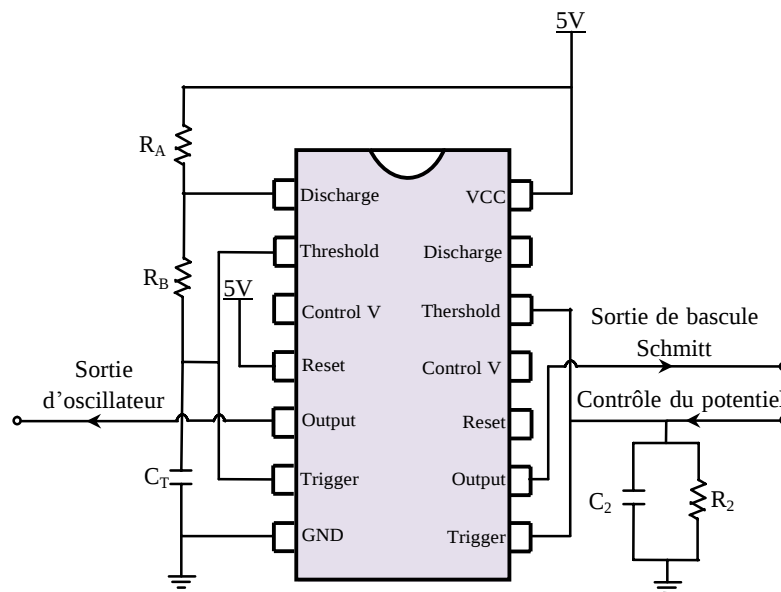


Figure IV.8. Développement d'un oscillateur et d'une bascule de Schmitt en utilisant TLC556.

IV.3.3 Transistor « BC 547B »

Le transistor BC 547B est un composant d'électronique NPN au silicium, son principe de fonctionnement est basé sur deux jonctions PN. Il a des valeurs effectives qui doivent être respectées et ne dépassent pas leurs valeurs limites, sinon le transistor va griller ou devenir inutile. À cette fin, les caractéristiques de transistor BC 547B sont présentées dans l'annexe A.

Dans ce développement, le transistor est placé en parallèle avec le secondaire du transformateur, comme l'illustre la Figure IV.9. Par conséquent, lorsque la tension appliquée sur la base du transistor est supérieure à + 0,7 V, le transistor sera conduit et le transformateur sera court-circuité.

Sinon, en cas d'application d'une tension négative dans la base, le transistor sera bloqué et le transformateur se mettra en circuit ouvert. Ce concept sera utilisé pour contrôler le potentiel appliqué à la petite bascule Schmitt ($C_2 // R_2$).

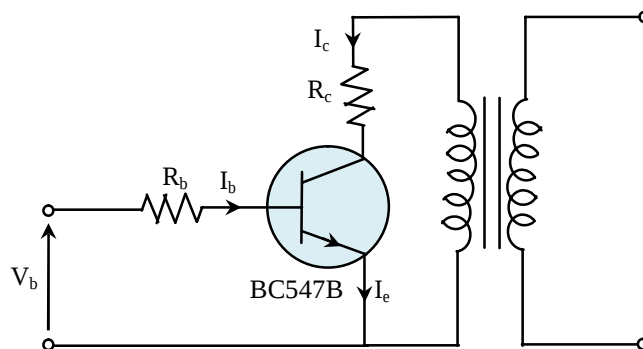


Figure IV.9. Mise en place du transistor dans le circuit du capteur de passage par zéros.

IV.3.4 Circuit globale du capteur de passage par zéros

La Figure IV.10. illustre le circuit global du capteur de passage par zéros. En effet, le circuit du capteur est contenue les dispositifs électroniques précités (transformateur galvanique, circuit intégré « TLC556 » et transistor« BC547 »). Dans ce contexte, la diode utilisée dans le circuit global est "1N4847" car elle a une propriété de commutation rapide. De plus, la diode Schottky "1N5817" est encore utilisée comme un chemin pour contrôler le potentiel effectué sur le trigger de Schmitt. Ce type de diode (1N5817) est utilisé car il a une faible tension directe et un mode de commutation très court. Dans ce circuit, les valeurs des condensateurs et des résistances sont estimées grâce à modélisation globale du circuit du capteur. Dans ce développement, la base du transistor peut être contrôlée à travers une tension d'alimentation sinusoïdale reliée par un filtre passe-bas. Ce filtre réduira la tension élevée (220V) à une faible tension (5 ou 24 Volts), en utilisant des résistances et des condensateurs bien estimés.

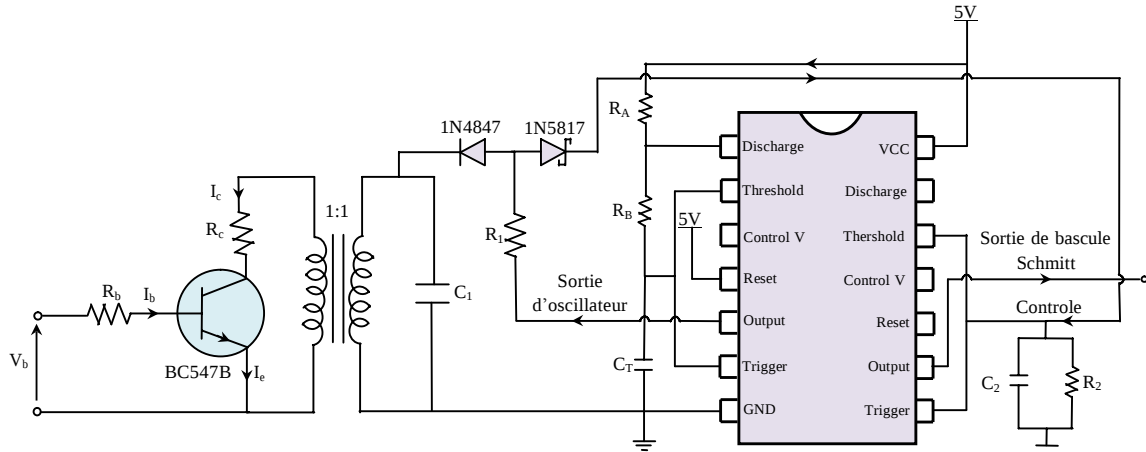


Figure IV.10. Circuit global du capteur de passage par zéros.

IV.3.5 Modélisation et estimation des valeurs de résistances et de condensateurs

➤ Estimation de la valeur de R_1 et C_1

Les paramètres de R_1 et C_1 peuvent être estimés en modélisant le circuit de charge dans la Figure II.14, sans intégrer la bascule de Schmitt, comme l'illustre la Figure IV.11. Dans ce contexte, la fonction de transfert V_{in} / U_C sera établie en appliquant la loi de maille et de Kirchhoff sur le circuit de charge. Par conséquent, les équations suivantes peuvent être établies:

$$\begin{aligned} V_{in} &= R_1 I_1 + U_C \\ U_C &= L_M \frac{dI_L}{dt} \\ I_C &= C \frac{dU_C}{dt} \\ I_1 &= I_C + I_L \end{aligned} \quad (IV. 6)$$

Avec: $V_{in} = V_{CC} - V_{D,1}$ (IV. 7)

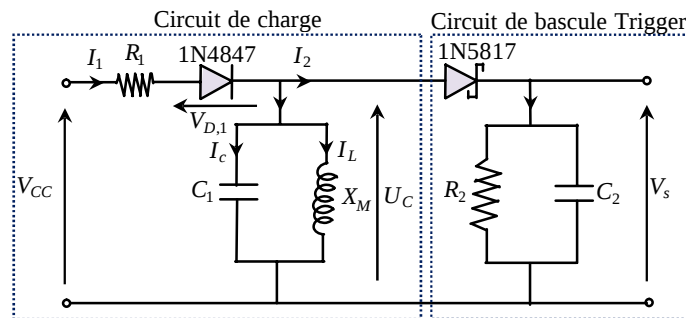


Figure IV.11. Schéma de circuit équivalent du capteur lorsque le circuit de bascule Trigger en état de charge.

En utilisant l'équation (IV. 6), le modèle d'état de circuit de charge peut être déduit:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_C \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/R_1 C_1 & -1/C_1 \\ 1/L_M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_C \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/R_1 C_1 \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \quad (IV. 8)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_C \\ I_L \end{bmatrix}$$

Afin de construire la fonction de transfert $F(p)$ à partir du modèle d'état présenté dans l'équation (IV. 8), l'équation ci-dessous sera appliquée.

$$F(p) = C(P I_2 - A)^{-1} B \quad (IV. 9)$$

Les calculs matriciels de l'équation (IV. 9) est détaillé dans l'annexe A, et la fonction de transfert du circuit de charge $F(p)$ peut être présentée comme suit:

$$F(p) = \frac{U_C}{V_{in}} = \frac{P}{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} p + \frac{1}{L_M C_1}} \quad (IV. 10)$$

Par la correspondance entre la forme canonique d'une fonction de transfert de deuxième ordre avec la fonction de transfert obtenue dans l'équation (IV. 10), la valeur de R_1 et C_1 peuvent être estimées comme suit:

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_M} &= \frac{1}{L_M} \\ \frac{1}{2 R_1 C_1} &= \frac{1}{2 R_1 C_1} \end{aligned} \quad (IV. 11)$$

➤ Estimation de la valeur de R_2 et C_2

Tant que le signal d'entrée est positif, le transistor sera conduit et le transformateur devient court-circuité. Par conséquent, la plus part de courant traversent les résistances et les inductances de fuite de transformateur. Dans ce cas, la tension aux bornes du condensateur C_1 devient plus petite, et le courant du transformateur I_T devient supérieur à I_2 ($I_T \gg I_2$). Par conséquent, le condensateur C_1 peut être illuminé dans le circuit équivalent du capteur (pendant la conductivité du transistor) et le courant du transformateur I_T devient presque égal I_1 ($I_T \approx I_1$), comme le montre la Figure IV.12.

En utilisant l'hypothèse annoncée ci-dessus ($I_1 \approx I_T$), la relation entre la valeur de C_2 et la valeur de R_2 peut être estimée comme suit:

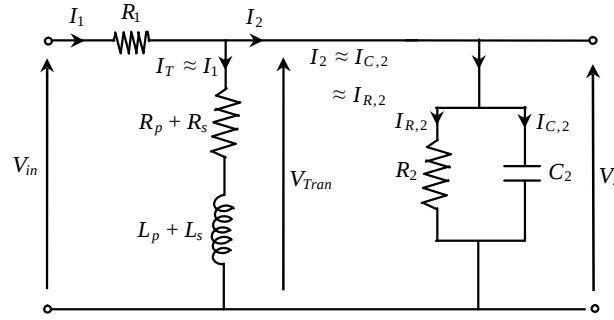


Figure IV.12. Schéma de circuit équivalent du capteur lorsque le transformateur est court-circuité

$$v_s(t_1) = \frac{-K_1 V_{in} L_{eq} e^{-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} t_1}}{R_2 C_2 R_{eq}} + K_2 = \frac{1}{3} V_{CC}$$

$$C_2 = \frac{3V_{in} L_{eq}}{V_{CC} R_2 R_{eq}}$$

IV.3.6 Résultat et discussion

Le capteur de passage par zéros est testé par des générateurs AC et DC. En effet, le générateur AC est alimenté la base du transistor avec différentes tensions alternatives en amplitude et en fréquence. Tandis que le générateur DC alimente le circuit intégré "TLC5556" par 5V DC. À cet égard, le capteur est testé par deux signaux alternatifs avec des amplitudes (5 et 10V) et des fréquences (50 et 60Hz) différentes. Afin de justifier les valeurs choisies, presque les appareils TTL utilisent 5 Volts comme niveau d'entrée, et les appareils API sont utilisés 0 à 10 V comme entrées analogiques. De plus, les fréquences utilisées dans les systèmes d'alimentation sont 50 et 60 Hz. Figures IV.13-16 présentent les résultats obtenus par le capteur de passage par zéros qui a été alimenté par des signaux d'entrée alternatives. Par conséquent, le capteur a atteint l'objectif souhaité et a donné une détection de zéros plus précise et des résultats fiables et satisfaisants. Dans ce contexte, la précision du capteur n'a pas changé lorsque la tension passe de 5 à 10 V et la fréquence de 50 à 60 Hz.

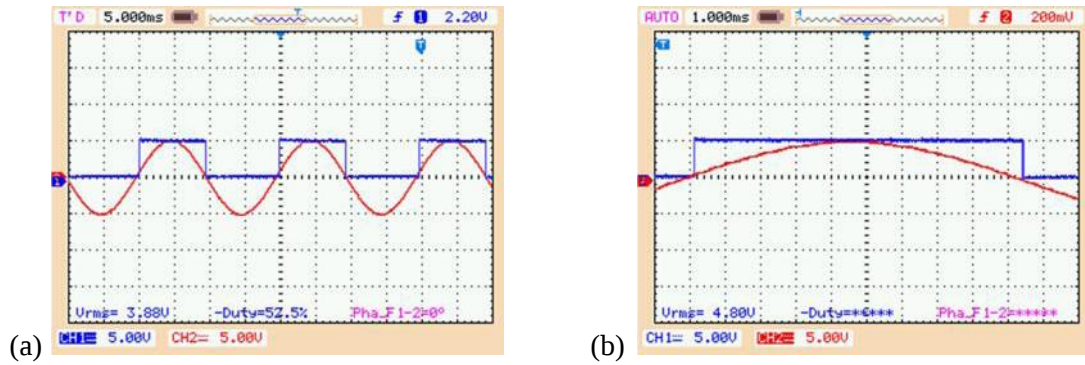


Figure IV.13. Détection de passage par zéro pour une entrée sinusoïdal d'amplitude 5V et de fréquence 50Hz ; (b) Précision de capteur pour une entrée de (5V, 50Hz).

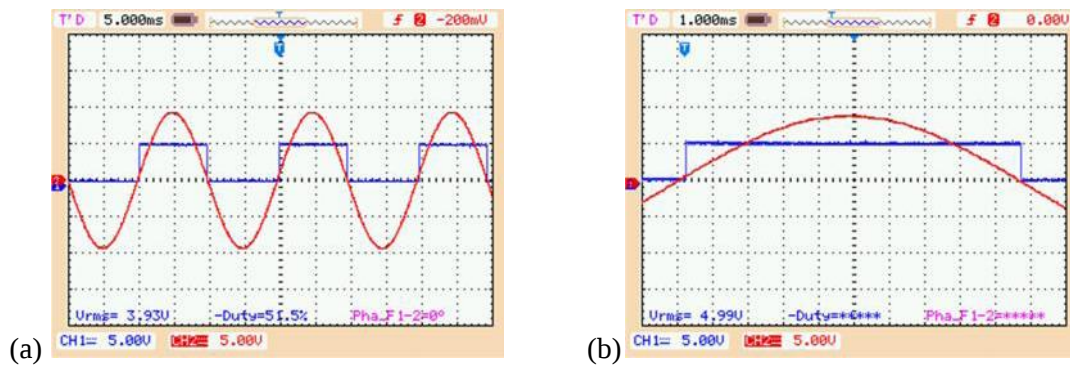


Figure IV.14. Détection de passage par zéro pour une entrée sinusoïdal d'amplitude 10V et de fréquence 50Hz ; (b) Précision de capteur pour une entrée de (10V, 50Hz).

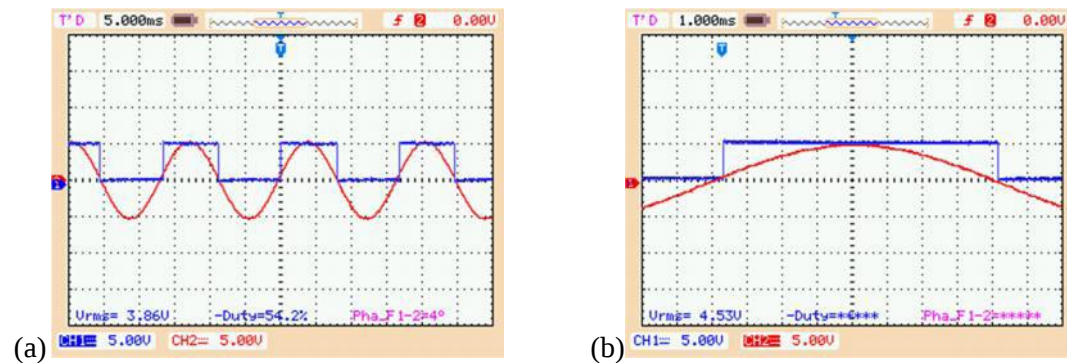


Figure IV.15. Détection de passage par zéro pour une entrée sinusoïdal d'amplitude 5V et de fréquence 60Hz ; (b) Précision de capteur pour une entrée de (5V, 60Hz).

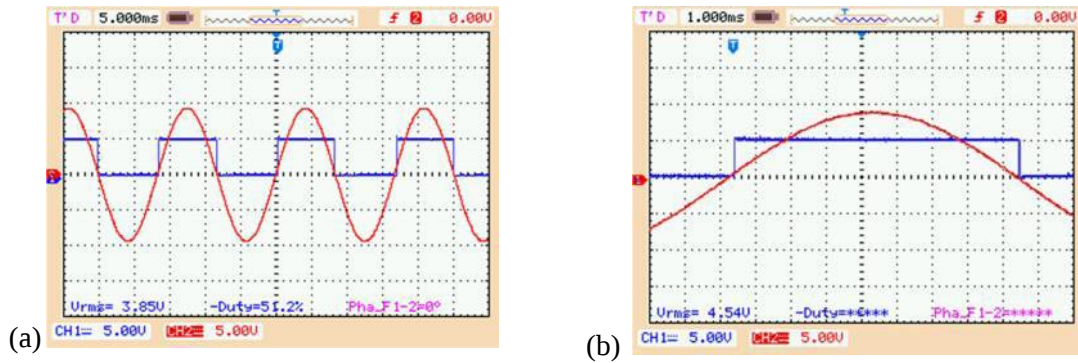


Figure IV.16.Détection de passage par zéro pour une entrée sinusoïdal. (a) entrée sinusoïdal d'amplitude 10V et de fréquence 60Hz ; (b) Précision de capteur pour une entrée de (10V, 60Hz).

Dans ce développement, le circuit intégré «TLC556» génère un signal carré de fréquence 120 kHz, avec un rapport cyclique 50%, comme l'illustre la Figure IV.17. En effet, la mesure de tension à la borne de la capacité C_T varie entre le seuil et le niveau de déclenchement ($\frac{2}{3}V_{CC}$, $\frac{1}{3}V_{CC}$), comme le montre la Figure IV.18. Cette précision de charge et de décharge du condensateur C_T entre les deux niveaux de déclenchement a généré un signal carré dans la première sortie du TLC556. Dans le circuit ouvert du transformateur (le transistor est bloqué), la tension entre le condensateur installé à la borne du transformateur C_1 a une onde sinusoïdale d'amplitude égale $+ \frac{2}{3}V_{CC}$ et contient quelques distorsions, comme le montre la Figure IV.19 (a). Cette distorsion est causée par l'effet magnétique du transformateur. À cette fin, le circuit de charge fournit à la bascule Schmitt une tension supérieure au seuil, comme le montre la Figure IV.20 (a). Par d'ailleurs, lorsque le transformateur est court-circuité (le transistor est conduit), la tension à la borne du condensateur C_1 devient très petite, comme l'illustre la Figure IV.19 (b). Par conséquent, une basse tension ($\frac{1}{3}V_{CC}$) est mesurée à l'entrée de la bascule de Schmitt, comme le montre la Figure IV.20 (b).

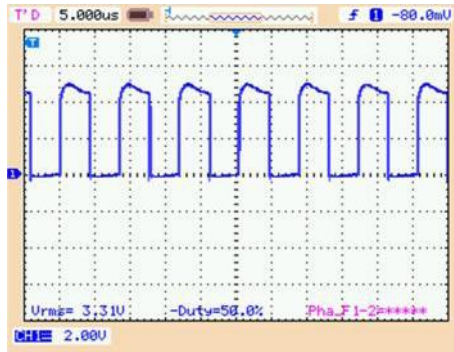


Figure IV.17. Tension mesurée dans la première sortie du TLC555.

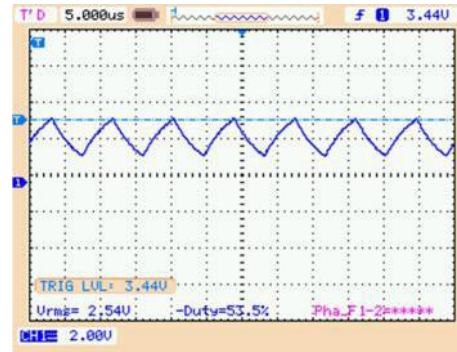
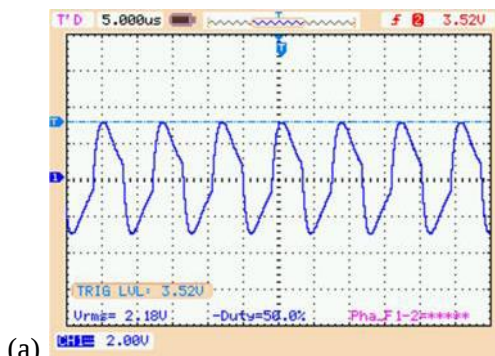
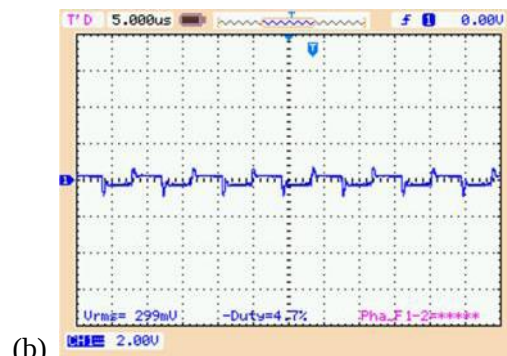


Figure IV.18. Tension mesurée à la borne du condensateur C_T .

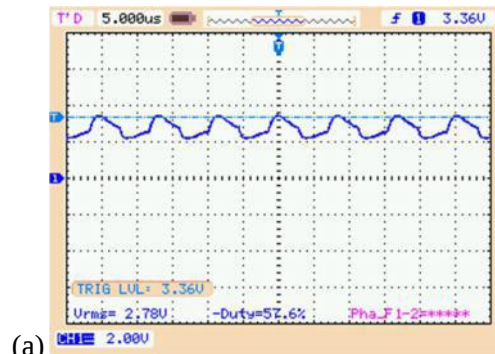


(a)

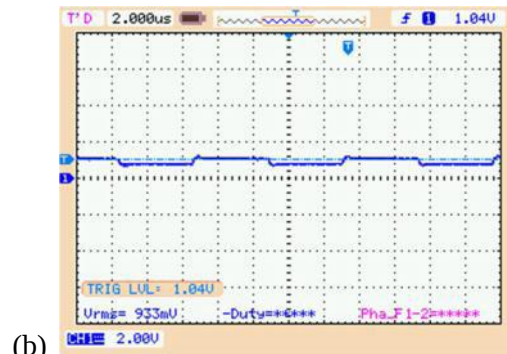


(b)

Figure IV.19. Tension mesurée à la borne du condensateur C_1 . (a), Secondaire du transformateur est ouvert ; (b), Secondaire du transformateur est court-circuité.



(a)



(b)

Figure IV.20. Tension mesurée à la borne de la bascule de Schmitt. (a), Secondaire du transformateur est ouvert ; (b), Secondaire du transformateur est court-circuité.

Par conclusion, le fonctionnement du capteur de passage par zéros dépend sur les deux états du transistor (conduit ou bloqué) qui provoque un changement dans le statut de secondaire du transformateur (le secondaire en état ouvert ou court-circuité). A cette fin, le potentiel de circuit ($C_2 // R_2$) sera varié entre le seuil et le niveau de déclenchement ($\frac{2}{3}V_{CC}$, $\frac{1}{3}V_{CC}$), comme le

montre Figure IV.21. Ces variations de potentiel dans l'entrée de la bascule de Schmitt génèrent un signal carré dans la deuxième sortie du TLC556.

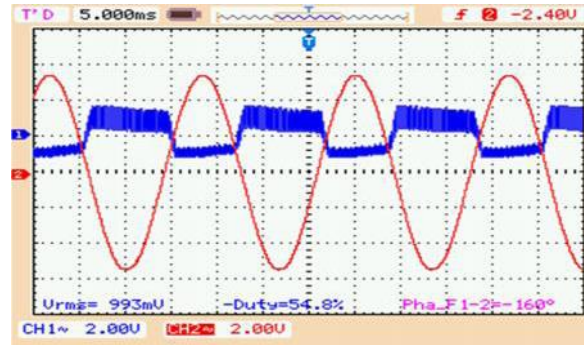


Figure IV.21. Tension mesurée à la borne de la bascule de Schmitt (le transformateur est en circuit ouvert et court-circuité).

IV.4 Développement d'un système de mesure

Le système de supervision du réseau électrique embarqué est basé sur des blocs de mesure. À cette fin, un capteur de tension et de courant a été développé afin de mesurer la tension et le courant triphasé fournis par les alternateurs parallèles. Dans ce contexte, le microcontrôleur « Arduino Nano » effectue le processus de mesure et de calcul numérique, puis les données sont envoyées au système embarqué « Raspberry Pi » pour vérifier l'équivalence des tensions mesurées et les intensités des courants.

IV.5 Vérification des conditions de synchronisation.

L'équivalence des tensions fournies par les alternateurs parallèles est vérifiée à l'aide du système embarqué « Raspberry Pi » tandis que l'équivalence de fréquence et le déphasage entre les phases seront vérifiés à l'aide d'un capteur de passage par zéros. En effet, le déphasage est mesuré à l'aide des interruptions du microcontrôleur « ArduinoUno » (INT0 "PD2", INT1 "PD2" et Timer 2). Par conséquent, le temporisateur Timer2 commence à compter lorsque le flag de la première interruption est élevé (INTF0 = 1), et s'arrête lorsque le flag de la deuxième interruption est établi (INTF1 = 1), comme le montre la Figure IV.22. Lorsque le compteur de temporisateur atteint la valeur maximale "débordement de temporisateur", une variable globale est incrémentée. Finalement, le déphasage peut être calculé par l'équation suivante:

$$T_{shift} = \frac{1}{f_A} * 2^8 * prescaler * counter \quad (IV.13)$$

L'algorithme utilisé pour vérifier le déphasage entre les phases est présenté dans l'annexe A.

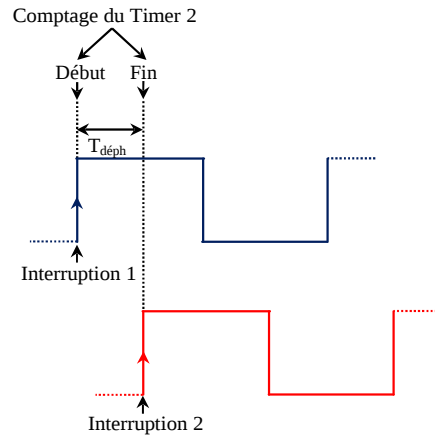


Figure IV.22. Processus de comptage le temps de déphasage « $T_{\text{déph}}$ » entre les deux signaux.

En tant qu'application, l'algorithme est testé par deux signaux carrés décalés. Le premier signal carré est obtenu en détectant le passage par zéro d'un signal sinusoïdal de 5 V et de fréquence 50 Hz, et l'autre est un signal carré virtuel construit. Le décalage entre les deux signaux est ajusté par un potentiomètre, comme le montre la Figure IV.23.

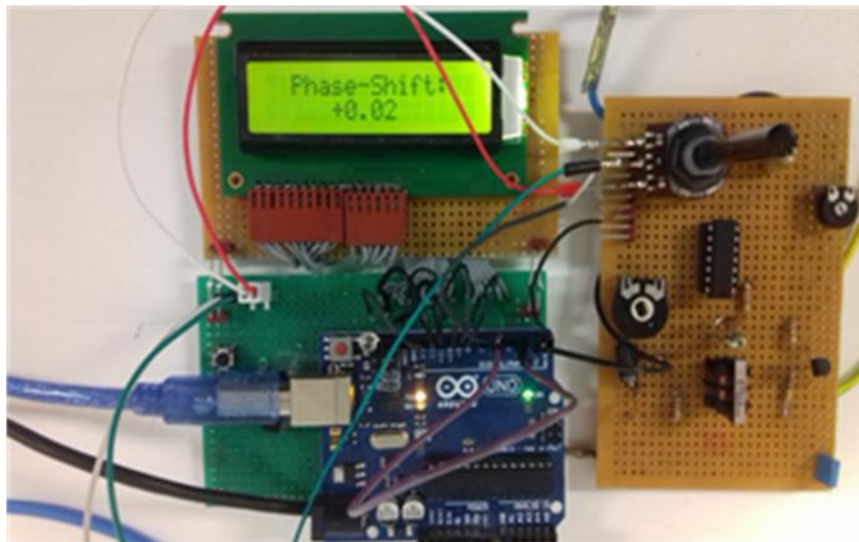


Figure IV.23. Mesure le déphasage à l'aide d'un microcontrôleur « ArduinoUno ».

Les deux phases décalées sont présentées dans la Figure IV.24.

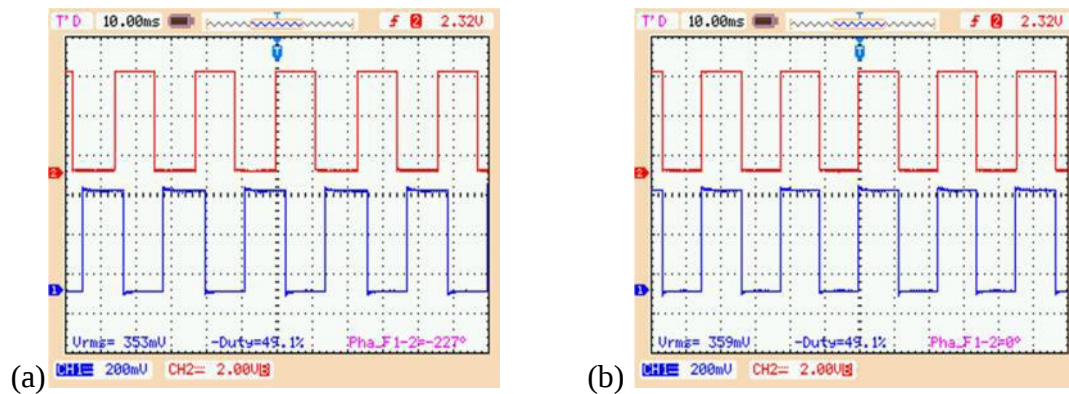


Figure IV.24. Déphasage contrôlé par potentiomètre. (b), Les deux signaux en phase ; (a) Les deux signaux sont déphasés.

Les résultats de mesures (le déphasage entre les signaux) sont surveillés par un cristal liquide (LCD) et un micro-ordinateur. En fait, les données sont transférées vers l'ordinateur sous le protocole de communication UART. Dans ce contexte, le port «COM3» est utilisé dans la transmission et la réception des données calculées. D'autre part, la vitesse de transmission des données est prédéfinie dans le programme d'Arduino «Serial. begin (9600)». Les résultats obtenus à partir des calculs de déphasage sont présentés sur la Figure IV.25, et sont identiques avec le déphasage montré dans la Figure IV.24 (a, b).

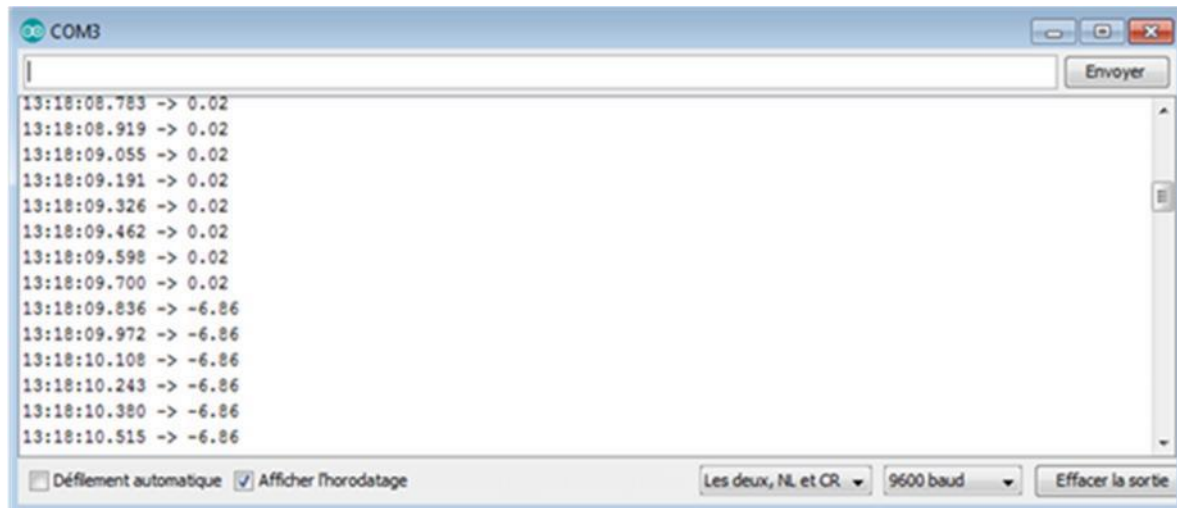


Figure IV.25. Surveillance des temps de déphasage à l'aide d'un Protocol UART.

IV.6 Communication entre les dispositifs de mesure

L'unité de synchronisation intelligente réalisée est basée sur le système embarqué « Raspberry pi ». En effet, le Raspberry Pi combine entre les dispositifs de supervision « les blocs de mesures

réalisés ci-dessus » et le système software « l'application de supervision ». Dans ce contexte, la communication entre le « Raspberry Pi » et les autres blocs sera effectué par un protocole prédéfinis dans le programme « Python » [Sub-18]. Parmi les protocoles utilisés dans ce développement on constate:

- **Protocole UART** : Ce protocole a été utilisé pour faire une interface entre le capteur de passage par zéros et le Raspberry Pi.
- **Protocole SPI** : est un protocole pour la communication série, et il a utilisé afin de faire une interface entre l'unité de mesure et le système embarqué « Raspberry Pi ». À cette fin, le module MCP3008 a été utilisé comme intermédiaire entre les deux.
- **Protocole CSI** : Ce type de communication a été utilisé dans notre développement afin d'effectuer une interface entre RPi caméra et le Raspberry Pi.

À cette fin, le prototype représenté sur la Figure IV.26 a été réalisé afin d'effectuer la communication entre les dispositifs de mesure. Ce prototype est contenu une unité de calcul et de combinaison entre les systèmes softwares et hardwares « Raspberry Pi », un caméra « RPi » pour la supervision de l'entourage du réseau électrique et des lampes qui sont représentées les charges électriques du réseau. De plus, l'automate « ZELIO Schneider » a été intégré dans le système de surveillance afin de détecter l'isolement des générateurs dans le réseau électrique embarqué en cas de dysfonctionnement dans les conditions de synchronisation. En effet, le contact ouvert du disjoncteur triphasé est connecté à l'entrée de l'automate, et en cas d'isolement par le système de surveillance, l'automate confirme l'isolement et un message et alerte seront envoyés à l'opérateur.



Figure IV.26.Prototype de communication entre les dispositifs de mesures et l'application de Smartphone.

IV.7 Communication entre le système de supervision et l'application Smartphone.

La communication entre l'application Smartphone et Raspberry Pi dépend de la configuration des paramètres du réseau sur la carte du Raspberry-Pi afin de l'attribuer une adresse IP fixe, et de le convertir comme un serveur web en installant le serveur web « Apache 2 ». Cependant, le Raspberry Pi a une adresse IP privée et l'opérateur ne peut pas être accédé à l'application de Smartphone « Application Web » en utilisant cette adresse. Pour résoudre ce problème, le DNS dynamique « DynDNS » est utilisé dans le processus de communication. Cela se fait en remplaçant l'adresse IP locale du Raspberry Pi par une adresse publique fixe. À cette fin, un compte de sous-domaine dans le fournisseur dynamique DNS (par exemple, «no-ip», «dyndns.org») est créé, puis le routeur est configuré sous le processus DDNS, comme le montre la Figure IV.27.

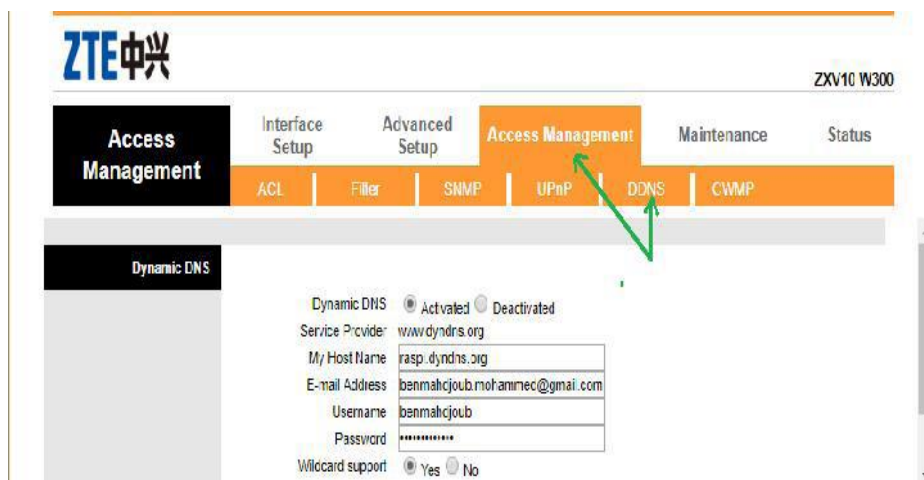


Figure IV.27. Configuration du dynamique DNS dans le modem « Djaweb ZTE ZXV10 W300 »

La communication entre le Raspberry Pi et l'application de Smartphone se fait selon un réseau informatique. Au début, la requête fait par l'opérateur est orientée vers le routeur, qui est le seul à pouvoir de combiner entre les réseaux locaux et publics. En suit, le requête est redirigée vers le Raspberry Pi par un port forward («HTTP, port 80», «HTTPS, port 443») et sera traité par le serveur adapté dans le Raspberry Pi «Apache2». Enfin, les requêtes traitées par Apache2 seront envoyées à l'application de surveillance. Figure IV.28 présente le processus de communication entre le système embarqué «Raspberry Pi» et l'application du site Web.

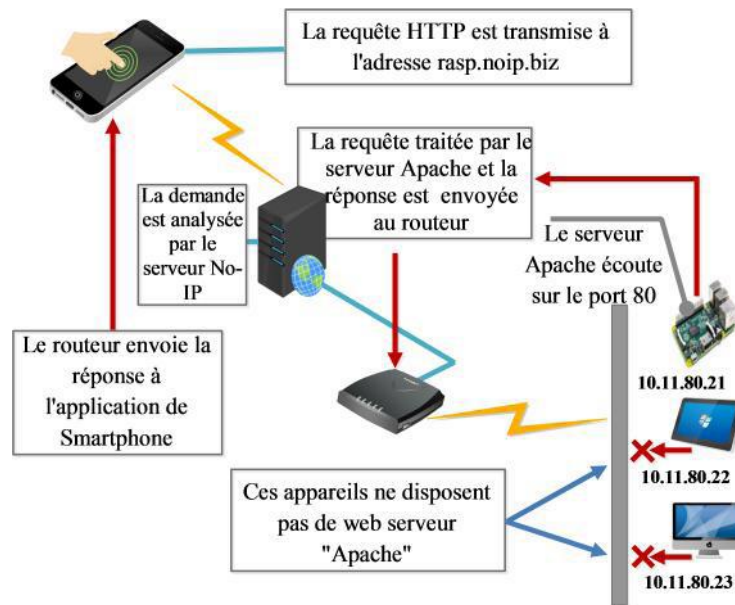


Figure IV.28. Processus de communication entre le système embarqué «Raspberry Pi» et l'application du Smartphone.

IV.8 Développement d'une application de supervision

Dans ce développement, l'application de supervision utilisée est un site Web sémantique, qui sera géré en arrière-plan par des ressources exécutables telles que JSON et XML. Dans ce contexte, la structure de la page HTML est basée sur le support XML, qui organise la structure du site web afin de modifier partiellement le format de la page HTML. Par conséquent, les valeurs envoyées par le système de synchronisation sont automatiquement mises à jour dans l'application de supervision, sans aucune actualisation des données par l'opérateur. En effet, le format HTML est géré par le moteur de recherche « Ajax », et les valeurs obtenues sont échangées et stockées dans un fichier JSON ou dans une base de données locale dans le système embarqué «Raspberry Pi».

Afin d'illustrer l'objectif principal du moteur Ajax, une petite comparaison entre le site Web classique «sans moteur Ajax» et une application Web moderne «avec moteur Ajax» est effectuée. Dans un site Web traditionnel, la requête est traitée par le serveur Apache 2 et la réponse sera envoyée dans un format «HTML / CSS». Dans ce cas, l'opérateur doit cliquer sur le bouton de l'actualisation pour visualiser les nouvelles informations obtenues. En revanche, dans le cas d'utilisation de moteur Ajax, les requêtes sont traitées et renvoyées au site web dans un format «XML». Par conséquent, le moteur Ajax traitera la réponse XML, puis une modification partielle sera apportée à la page HTML, et les nouvelles données seront mises à jour automatiquement, sans aucune intervention de l'opérateur. À cet effet, la position de modification sur la page est définie par le langage HTML.

Figure IV.29. présente l'application Smartphone utilisé dans la supervision du réseau électrique embarqué. La sécurité de l'application est basée sur la plate-forme du sémaphore. Cette plateforme repose sur un pointeur qui provoque une file d'attente, dans laquelle les chaines en attente seront bloquées. En effet, le but principal de la méthode du sémaphore est assuré la synchronisation entre les opérateurs qui utilisent la ressource critique «Raspberry Pi», et d'éviter l'interblocage du site web.

L'application de supervision contient deux parties principales; la première partie permet de modifier les paramètres de l'application, tels que changement le mot passe et le nombre des opérateurs qui peuvent accéder en même temps à la ressource critique « Raspberry Pi ». De plus, la deuxième partie permet de surveiller les conditions de synchronisation et peut utiliser pour contrôler les équipements du réseau électrique embarqué (isoler les appareils défectueux). En effet, la deuxième partie affiche la topologie globale du réseau électrique installé, et contient des boutons de contrôle et de surveillance. Les boutons de contrôle sont intégrés au l'application Smartphone afin d'isoler les appareils défectueux mais les boutons de surveillance sont utilisés pour superviser les mesures de tension et de courant ou pour surveiller l'environnement des équipements électriques à l'aide d'une caméra connectée au Raspberry Pi.

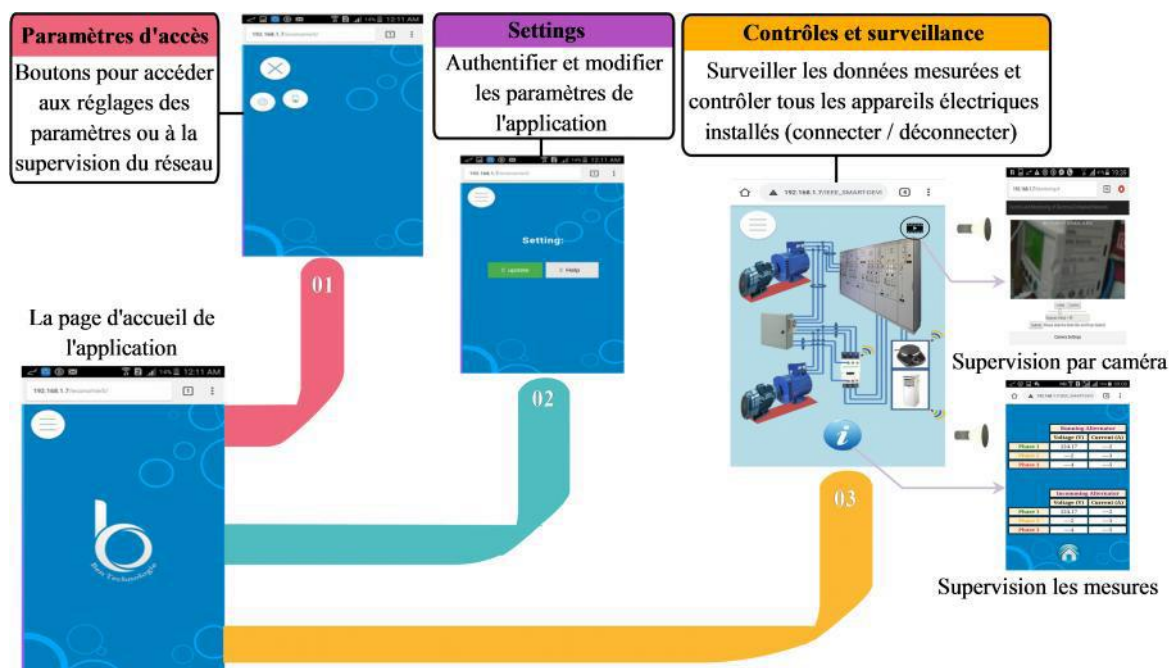


Figure IV.29. Application de surveillance des mesures et des conditions de synchronisation du réseau électrique embarqué

IV.9 Conclusion:

Dans ce chapitre, un système embarqué de supervision a été établi grâce au développement du système de synchronisation intelligent et une application de surveillance sur Smartphone. Dans ce contexte, un capteur de passage par zéro a été développé, et est utilisé pour vérifier l'adéquation des fréquences et du déphasage entre les phases des deux alternateurs, principal et entrant. De plus, une unité de mesure, constitué de capteurs de tension et de courant, est construite afin de vérifier l'égalité des tensions triphasées fournies par les deux générateurs en parallèle. Les mesures de ces blocs sont envoyées au système embarqué "Raspberry-Pi" via un protocole prédéfini dans le programme. Les valeurs obtenues sont enregistrées dans un fichier JSON, et elles sont envoyées à l'application de surveillance via le réseau informatique. En effet, le système embarqué envoie un message sous forme d'une alerte à l'opérateur en cas de déséquilibre dans les conditions de synchronisation.

L'intérêt de ce développement est d'assurer un fonctionnement plus fiable du réseau électrique embarqué, et qui peut être surveillé et contrôler à distance. A travers les résultats présentés, le système embarqué ainsi réalisé a montré de très bonnes performances. La supervision et la surveillance des conditions de synchronisation et l'avertissement de l'opérateur humain ont été réalisés en temps réel, ce qui va permettre de protéger tous les dispositifs du réseau électrique embarqué.

Conclusion générale

Dans l'ensemble, l'analyse et l'automatisation d'un système d'alimentation diesel-électrique pour un navire marchand sont des processus complexes qui impliquent la compréhension approfondie des besoins énergétiques de l'ensemble du système de propulsion et des équipements électriques embarqués. L'état de l'art sur l'évolution des besoins énergétiques du transport a montré que les exigences en matière de durabilité et d'efficacité énergétique ont augmenté, ce qui a entraîné une demande accrue de systèmes de propulsion diesel-électrique plus efficaces et plus respectueux de l'environnement.

La conception et la supervision du réseau électrique embarqué sont également des éléments clés pour garantir le bon fonctionnement et la sécurité du système. La modélisation du réseau électrique embarqué est un outil précieux pour simuler et analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement et pour optimiser la commande du système. En utilisant des techniques de modélisation avancées, telles que la modélisation basée sur la physique ou la simulation basée sur des données, il est possible d'optimiser les performances du système et d'augmenter son efficacité énergétique.

En conclusion, la conception, la supervision et l'optimisation d'un système d'alimentation diesel-électrique pour un navire marchand sont des défis complexes qui exigent une expertise multidisciplinaire en ingénierie électrique, en génie mécanique, en gestion de projet et en informatique. Cependant, avec une planification et une mise en œuvre minutieuses, ainsi qu'une utilisation appropriée des outils de modélisation et d'analyse, il est possible de créer des systèmes de propulsion diesel-électrique efficaces et respectueux de l'environnement qui répondent aux besoins énergétiques en constante évolution des outils de transport modernes.

Bibliographie

- [Abd-06] L. Abdeljalil, « Modélisation Dynamique et Commande des Alternateurs Couplés dans un réseau électrique embarqué », (Doctoral dissertation), 2006.
- [Acc-19] A. Accetta, M. Pucci, «Energy management system in DC micro-grids of smart ships: Main gen-set fuel consumption minimization and fault compensation », IEEE Transactions on Industry Applications, 55, (3), pp. 3097-3113, 2019.
- [Adk-75] B. Adkins R. G. Harley , « The general theory of alternating current machines”, Application to practical problems”, Editor. Chapman and Hall, London, 1975
- [Ame-10] N. Amelon, « Contribution à la modélisation dynamique des alternateurs en vue de la simulation des réseaux embarqués ou îlotés », (Doctoral dissertation, Nantes).
- [Ami-14] U. Amin, G. Ahmad, S., Zahoor, F. Durrani, « Implementation of parallel synchronization method of generators for power & cost saving in University of Gujrat», Energy and Power Engineering, 6(10), 317, 2014.
- [Bar-05] F. Barruel , « Analyse et conception des systèmes électriques embarqués. Application aux réseaux de bord d'avion », (Doctoral dissertation), 2005
- [Bar-18] T.K. Barik, « Synchrophasor Based Centralized Remote Synchroscope for Power System Restoration», Virginia Tech, 2018.
- [Beh-19] F. Behrendt, «Cycling the smart and sustainable city: analyzing EC policy documents on internet of things, mobility and transport, and smart cities», Sustainability, 11(3), 763, 2019.
- [Bou-18] Y. Bousse, M.V. Corazza, D.S. Arriaga, G. Sessing, «Electrification of Public Transport in Europe: Vision and Practice from the ELIPTIC project », IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, pp. 1-6, 2018.
- [Bov-18] A. Boveri, F. Silvestro, M. Molinas, E. Skjong, « Optimal sizing of energy storage systems for shipboard applications», IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(2): 801-811, 2018.
- [Car-18] J. Carlton, « Marine propellers and propulsion. Butterworth-Heinemann», 2018.
- [Che-19] L. Chen, J. Wang, C. Xu, «The Application of Solar Photovoltaic Power Generation System in Ships», Journal of Coastal Research, 94(SI), 525-529, 2019.
- [Cho-04] E.Y. Choueiri, E. Y, « A critical history of electric propulsion: The first 50 years (1906-1956) », Journal of Propulsion and Power, 20(2): 193-203, 2004.
- [Cim-05] G. O. Cimuca, «Flywheel energy storage system associated to the wind generators», (Doctoral dissertation), 2005.

- [Col-13] B. Collin, « L'énergie électrique embarquée », Technologie maritime, 2013
- [Cuz-17] R.M. Cuzner, V. Singh, « Future shipboard MVdc system protection requirements and solid-state protective device topological tradeoffs », IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 5(1): 244-259, 2017.
- [Dah-10] W. M. Dahalan, H. Mokhlis, «Techniques of network reconfiguration for service restoration in shipboard power system: A review», Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(11), 5556-5563, 2010.
- [Dem-15] K. Desmond, « Gustave Trouve: French Electrical Genius (1839-1902) », McFarland, 2015.
- [Dem-17] K. Desmond, «Electric Boats and Ships: A History »,McFarland, 2017.
- [Dem-75] F. P. De Mello , « Power System Dynamics-Overview», Symposium on adequacy and philosophy of modelling», Dynamic system performance IEEE paper CHO 970-4 PWR, 1975.
- [Ell-13] R. Elliott,« Zero Crossing Detectors and Comparators», <http://sound.westhost.com/appnotes/an005.htm>, 2013
- [Gee (a)-17] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, « Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments», Applied Energy, 194, 30-54, 2017.
- [Gee (b)-17] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman , « Parallel control for hybrid propulsion of multifunction ships», IFAC-PapersOnLine, 50(1), 2296-2303.
- [Gee-17] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman, « Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments», Applied Energy, 194, 30-54, (2017).
- [Gir-14] X. Giraud, « Méthodes et outils pour la conception optimale des réseaux de distribution d'électricité dans les aéronefs » , (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA), 2014.
- [Gna-18] R. Gnanamalar, S. Sheeba, V. Gomathy, R. Geethamani, R. Khan, « Embedded Design in Synchronization of Alternator Automation», International Journal of Engineering and Technology, 2018, 7(2.24): 460-463.
- [Ion-15] M. M.Ion, « Amélioration de la sélectivité des protections électriques des navires lors de l'alimentation à quai-Augmentation du courant de court-circuit » , (Doctoral dissertation), 2015.
- [Irm-11] E. Irmak, I. Colak, O. Kaplan, N. Guler,« Design and application of a novel zero-crossing detector circuit », Proceedings of the 3rd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp.1-4, 11-13,2011.
- [Jaa-14] I. Jaafar, B.V. Wenger,« New PLL based signal conditioning circuitry for capacitive sensors»,In 2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA), IEEE, 2014(pp. 7-12).

- [Jay-17] S. G. Jayasinghe, L., Meegahapola, N., Fernando, Z., Jin, J.M. Guerrero , «Review of ship microgrids: System architectures, storage technologies and power quality aspects», inventions, 2(1), 4, 2017.
- [Jot-17] S. Jothibas, S.Santos, « New electric shipboard topologies for high resiliency. IEEE Transactions on Power Systems, 33(3): 2975-2983, 2017.
- [Kum-19] D. Kumar, F. Zare, « A Comprehensive Review of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality and Regulations», IEEE Access, 2019.
- [Kun-19] M. Kunicka, W. Litwin, « Energy Demand of Short-Range Inland Ferry with Series Hybrid Propulsion Depending on the Navigation Strategy », Energies, 12(18): 3499,2019.
- [Leq-15] B. Lequesne, «Automotive electrification: the nonhybrid story», IEEE Trans Transp Electr 1(1):40–53, 2015.
- [Mcc-14] D. Mccollum, V. Krey, P. Kolp, «Transport electrification: A key element for energy system transformation and climate stabilization», Climatic change, 123:651-664, 2014.
- [Mcc-14] D. Mccollum V. Krey P. Kolp P «Transport electrification: A key element for energy system transformation and climate stabilization», Climatic change, 123:651-664, 2014.
- [Moj-17] . Mojtaba O. Hasan, K.. Seunggu, «Vehicle Energy Consumption and an Environmental Impact Calculation Model for the Transportation Infrastructure Systems», Journal of Cleaner Production. 174: 424-436, 2017.
- [Ngu-08] H. H. Nguyen, « Méthodes et outils pour la conception de composants intégrés dans un réseau électrique embarqué », (Doctoral dissertation), 2008
- [O'Ro-20] R. O'Rourke, « Electric-drive Propulsion for US Navy ships: Background and issues for Congress», Library Of Congress Washington Dc Congressional Research Service, 2000.
- [Pat-15] U. Patil, M. More, V. Magar, V.S. Kamble, « Design and Fabrication of Synchronizing Panel for Parallel Operation of Alternators», International Journal for Scientific Research and Development (IJSRD), 3(5), pp.766-768, 2015.
- [Rad-13] D. Radu, R. Jeannot, M.Megdiche, J.P. Sorrel, « Shore Connection Applications – Main challengers », 2013.
- [Rut-16] V.S. Ruturaj VS, P.D. Bharadwaj PD “A Review on generator grid synchronization Needs Effects, Parameters and Various Methods», International journal for research in applied science and engineering technology (IJRASET),2016, 4, pp.715-723, 2016.
- [Sat-17] K.Satpathi, A. Ukil, , J. Pou, « Short-circuit fault management in DC electric ship propulsion system: protection requirements, review of existing technologies and future research trends», IEEE Transactions on Transportation Electrification, 4(1): 272-291, 2017.

- [Sha-16] F. Shariatzadeh, N. Kumar, A.K. Srivastava, « Optimal control algorithms for reconfiguration of shipboard microgrid distribution system using intelligent techniques», IEEE Transactions on Industry Applications, 53(1): 474-482, 2016.
- [Skj-15] E. Skjong, E. Rødskar, M. M. Molinas Cabrera, T. A. Johansen, J. Cunningham, «The marine vessel's electrical power system: From its birth to present day», Proceedings of the IEEE, 2015.
- [Skj-15] E. Skjong, E. Rødskar, M. Molinas, T. Johansen, and J. Cunningham, «The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day», Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 12, pp. 2410–2424, 2015.
- [Skj-16] E. Skjong, R. Volden, E. Rødskar, M. Molinas, T.A. Johansen, J. Cunningham, «Past, present, and future challenges of the marine vessel's electrical power system », IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2(4): 522-537,2016.
- [Sor-00] J. P. Sorrel , « Architecture, conception et protection des réseaux de distribution: Le navire tout électrique », REE. Revue de l'électricité et de l'électronique, (9), 62-66.
- [Spy-11] A.G. Spyrou, « From T-2 to Supertanker: Development of the Oil Tanker, Revised. iUniverse», 1940-2000, 2011.
- [Sub-18] A. Subero, « USART, SPI, and I2C: Serial Communication Protocols. Programming PIC Microcontrollers with XC8», Springer, 2018.
- [Sul-15] C. Sulzberger, « First Edison Lights at Sea: The SS Columbia Story, 1880-1907 [history] », IEEE Power and Energy Magazine,13(1) : 92-101, 2015.
- [Tho-12] M.J. Thompson , « Fundamentals and advancements in generator synchronizing systems», 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, IEEE Publishing, pp.203-214, 2012.
- [Vic-15] A.Vicenzutti, D. Bosich, G. Giadrossi, G. Sulligoi, « The Role of Voltage Controls in Modern All-Electric Ships: Toward the all electric ship». IEEE Electrification Magazine, 3(2), 49-65, 2015.
- [Vic-15] A. Vicenzutti, D. Bosich, G., Giadrossi, G. Sulligoi, «The Role of VoltageControls in Modern All-Electric Ships: Toward the all electric ship», IEEE Electrification Magazine, 3(2), 49-65, 2015.
- [Wal-03] R.W. Wall,« Simple methods for detecting zero crossing », Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2003), vol. 3, pp. 2477–2481, 2003.
- [Xia-18] X. Xiaoyu, E. G. Jorge, S. Shuanghe, S «Impacts of urbanization and air pollution on building energy demands —Beijing case study», 225: 98-109,2018.
- [Xiu-05] Y. Xiuxia, Y. Zhang, «Intelligent Real-time Fault Restoration of the Large Shipboard Power System Based on Genetic Algorithm », International Journal of Information Technology, 11: 12. 2005.

- [Yua-20] Y. Yuan, J. Wang, X., Yan, B., Shen, T., Long, « A review of multi-energy hybrid power system for ships», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110081.2020.
- [Zha-19] X. Zhaoxia, Z. Tianli, L. Huaimin, J.M. Guerrero, C. L. Su, J. C. Vásquez , «Coordinated Control of a Hybrid-Electric-Ferry Shipboard Microgrid», *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(3): 828-839, 2019.
- [Zha-19] X. Zhaoxia, Z. Tianli, L. Huaimin, J.M. Guerrero, C.L. Su, J.C. Vásquez, « Coordinated Control of a Hybrid-Electric-Ferry Shipboard Microgrid », *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5, (3), pp. 828-839.