

Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme de Master
en Electrotechnique
Option : Electromécanique

Thème

*Analyse des différents modes de
démarrage des propulseurs d'étraves
navales*

Présenté par :

KADI RAFIK & NACER BRAHIM

Encadreur :

M_r: BENDAHMANE. B

Devant le jury composé de :

M_r: MELLAH I

M_r: AZIB

Année universitaire : 2014 / 2015

Remerciements

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

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude et remerciement à notre promoteur, M_r BENDAHMANE, pour avoir assuré le suivi de ce travail, pour toute l'aide qu'il nous a apportée.

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail et l'honneur qu'ils nous font en acceptant de le juger.

Nous remercions toutes personnes ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Rafik & Brahim

Dédicaces

C'est avec un grand honneur que je dédie ce modeste travail :

✚ à mes chers parents, à qui je doit tout.

✚ à mes chers frères et sœur.

✚ à toute ma famille.

✚ à toute mes proches.

✚ à tous mes amis à l'université et ailleurs.

Rafik

Dédicaces

*Je dédie ce travail, à mes parents qui m'ont orienté et soutenu
dans les choix difficiles.*

A ma femme et sa famille.

A mes enfants Djebri et Zakaria

A mes frères et sœurs, ainsi que leurs familles.

*A ma grande famille que ce soit du côté paternel ou du côté
maternel.*

A mon binôme et toute sa famille.

A tous mes amis.

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à
l'aboutissement de ce mémoire.*

*Je le dédie aussi à tous ceux qui le liront, et j'espère qu'ils
trouveront dans son contenu des réponses à leurs questions.*

Brahim...

Sommaire

Le sommaire

Listes des tableaux et des figures

Notation

| | |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 01 |
|----------------------------|----|

Chapitre I : Généralité sur les propulseurs d'étraves navales

| | |
|---|----|
| I.1. introduction..... | 02 |
| I.2. analyse du problème..... | 02 |
| 1.3. Généralité sur les propulseurs d'étraves navales..... | 03 |
| I.3.1. Présentation de propulseur d'étrave navale..... | 03 |
| I.3.2. Le rôle de propulseur d'étrave navale..... | 04 |
| I.3.3. Les types des propulseurs d'étraves navales..... | 04 |
| I.3.4. Technologie d'hélices..... | 05 |
| I.4. Constitution d'un moteur asynchrone triphasé à cage..... | 06 |
| I.4.1. Le stator..... | 06 |
| I.4.2. Le rotor..... | 06 |
| ➤ Rotor à cage d'écureuil..... | 07 |
| I.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone..... | 07 |
| I.6. Démarrages des moteurs asynchrones à cage..... | 08 |
| I.7. Choix du mode de démarrage de MAS..... | 09 |
| I.8. Différent mode de démarrage des propulseurs d'étraves navales..... | 10 |
| I.8.1. Démarrage direct sous pleine tension..... | 10 |
| I.8.2. Démarrage étoile triangle de MAS du PEN..... | 11 |
| I.8.3. Démarrage du PEN par autotransformateur..... | 12 |
| I.8.4. Démarrage du PEN par résistance ou inductance statorique..... | 13 |
| I.9. Conclusion..... | 14 |

Chapitre II : La modélisation du moteur asynchrone du propulseur d'étrave navale

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 15 |
| II.2. Hypothèses simplificatrices..... | 15 |
| II.3. Modélisation de la machine asynchrone du PEN..... | 16 |
| II.3.1. Modèle de moteur asynchrone du PEN..... | 16 |
| II.3.2. Equation électrique et équation du couple..... | 16 |
| II.3.3. Equation magnétique..... | 17 |
| II.3.4. Equation d'induction de fuite..... | 18 |
| II.4. Conclusion..... | 20 |

Chapitre III : La simulation des différents modes de démarrage du propulseur d'étrave navale

| | |
|--|-----------|
| III.1. Introduction..... | 22 |
| III.2. Résultat de la simulation de démarrage direct du PEN..... | 22 |
| III.3. Résultat de la simulation de démarrage étoile triangle du PEN..... | 25 |
| III.4. Démarrage du PEN par autotransformateur | 27 |
| III.5. Démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur..... | 29 |
| III.5.1. Démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur à vitesse constante.. | 29 |
| III.5.2. Démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur à vitesse variable..... | 31 |
| III.6. Interprétation des résultats de la simulation..... | 34 |
| III.7. Conclusion..... | 35 |
| Conclusion générale..... | 36 |

Bibliographie

Annexe

Liste des figures

| | Pages |
|--|--------------|
| Figure 1.1 : Schéma de réseau électrique du navire..... | 03 |
| Figure 1.2 : Schéma d'emplacement d'un propulseur d'étrave navale | 03 |
| Figure 1.3 : Image d'hélice du propulseur d'étrave navale..... | 04 |
| Figure 1.4 : La forme géométrique d'hélice..... | 05 |
| Figure 1.5 : Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à cage..... | 06 |
| Figure 1.6 : Cage d'écureuil..... | 07 |
| Figure 1.7 : Schéma de démarrage direct du propulseur d'étrave navale..... | 10 |
| Figure 1.8 : Caractéristique du couple $T=f(N)$ Pendant le démarrage direct..... | 11 |
| Figure 1.9 : Caractéristique du courant $I=f(N)$ pendant le démarrage direct..... | 11 |
| Figure 1.10 : Schéma de démarrage étoile-triangle du propulseur d'étrave navale..... | 11 |
| Figure 1.11 : Caractéristique du couple $T=f(N)$ pendant le démarrage étoile triangle..... | 12 |
| Figure 1.12 : Caractéristique du courant $I=f(N)$ pendant le démarrage étoile triangle..... | 12 |
| Figure 1.13 : Schéma de démarrage du propulseur d'étrave navale par autotransformateur..... | 12 |
| Figure 1.14 :Schéma de démarrage du propulseur d'étrave navale par résistance statorique | 13 |
| Figure 1.15 : Caractéristique du couple $T=f(N)$ pendant le démarrage par résistance statorique | 14 |
| Figure 1.16 : Caractéristique du courant $I=f(N)$ pendant le démarrage du par résistance statorique | 14 |
| Figure 2.1 : le circuit équivalent du moteur asynchrone..... | 18 |
| Figure 2.2 : Le circuit équivalent d'un générateur et d'un moteur asynchrone..... | 20 |

| | |
|--|-----------|
| Figure 3.1 : La vitesse angulaire $\omega(t)$ pour le démarrage direct de MAS à cage du propulseur d'étrave navale..... | 22 |
| Figure 3.2 : Le courant généralisé $i_s(t)$ pour le démarrage direct de MAS à cage du PEN... | 23 |
| Figure 3.3 : Couple électromagnétique $M_e(t)$ pour le démarrage direct de MAS à cage du PEN..... | 23 |
| Figure 3.4 : Caractéristique mécanique du HPR à l'angle de rotation nul..... | 25 |
| Figure 3.5 : Vitesse $\omega(t)$ (1), et la tension $U(t)$ (2) pendant le démarrage étoile triangle du PEN..... | 26 |
| Figure 3.6 : Courant généralisé statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage étoile triangle du PEN..... | 26 |
| Figure 3.7 : Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage du PEN étoile triangle.. | 27 |
| Figure 3.8 : Vitesse $\omega(t)$ (1), et la tension $U(t)$ (2) pendant le démarrage du PEN par autotransformateur | 28 |
| Figure 3.9 : Courant généralisé statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage du PEN par autotransformateur du PEN..... | 28 |
| Figure 3.10 : Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage du PEN par autotransformateur..... | 29 |
| Figure 3.11 : Vitesse $\omega(t)$ (1), la tension $U(t)$ (2), pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse constante..... | 32 |
| Figure 3.12 : Courant généralisé statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse constante..... | 30 |
| Figure 3.13 : Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse constante..... | 31 |

Figure 3.14 : Vitesse $\omega(t)$ (1), la tension $U(t)$ (2), et la fréquence $f(t)$ (3) pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur à vitesse variable..... 32

Figure 3.15 : Courant généralisé statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur à vitesse variable..... 32

Figure 3. 16 : Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur à vitesse variable..... 33

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques normales de HPR à l'angle de rotation nul..... 25

Tableau 3.2 : Résultats comparatifs des différents modes de démarrages des propulseurs d'étraves navales..... 33

Nomenclature

PEN : Propulseur d'étrave navale

MAS : moteur asynchrone

HPR : hélice à pas variable

Notations

T : poussée d'hélice.

M : masse de navire.

V_2 : vitesse des particules d'eau à la sortie d'hélice.

V_1 : vitesse des particules d'eau entrant dans l'hélice.

Ω_s : la vitesse de synchronisme c'est-à-dire la fréquence de rotation du champ statorique

Ω_r : la vitesse de rotation

g : glissement.

P : le nombre de paires de pole du la machine.

C_d : couple démarrage.

I_d : le courant démarrage..

R_2' : résistance du rotor ramenée au stator.

X_2' : réactance du rotor ramenée au stator.

$I_b = \sqrt{2}I_1$: la valeur crête de courant de phase.

$U_b = \sqrt{2}U_n$: la valeur crête de la tension

$f_b = f_1$: fréquence nominale de la tension.

$\omega_b = 2\pi f_b$: fréquence angulaire.

$\Psi_b = U_b / \omega_b$: la valeur crête de flux.

$R_b = U_b / I_b$: résistance.

$p_b = \sqrt{3} U_b I_b$: puissance.

$M_b = p_b / \omega_b$: couple.

$J_b = p^2 M_b / \omega_b^2$: moment d'inertie.

U_s : la tension statotique.

U_r : la tension rotorique.

I_s : courant statotique.

I_r : courant rotorique.

Ψ_s : flux statotique.

Ψ_r : flux rotorique.

L_s : inductance statotique.

L_r : inductance rotorique.

L_m : l'inductance mutuelle.

M_e : couple électromagnétique.

R_s : résistance statotique.

R_r : résistance rotorique.

M_r : couple résistant.

J : moment d'inertie sur l'arbre du moteur électrique.

j : unité imaginaire.

$L_{S\sigma}$: l'inductance de fuite de l'enroulement statotique.

$L_{r\sigma}$: l'inductance de fuite de l'enroulement rotorique.

P_1 : la puissance consommée.

P_2 : la puissance utile.

η : le rendement.

M_{moyn} : le couple moyen nominal

M_{moy} : le couple moyenne

t_d : le temps de démarrage

I_n : le courant nominal

Introduction générale

Introduction générale

Les propulseurs d'étraves navales (PEN) doivent assurer la manœuvre des navires en cas de faibles vitesses et faciliter les manoeuvres de port. Elles jouent le rôle des propulseurs auxiliaires dans des navires (accostage, remorqueurs, ou d'appareillage, etc.. La puissance nominale des PEN peut atteindre 15 % de la puissance électromagnétique du moteur principal du navire, et jusqu'à 50 % de la puissance de toute l'installation énergétique de navire. Les plus répandus sont les PEN avec l'hélice à pas réglable (HPR) à base des moteurs asynchrones à cage d'écureuil (MAS) dont la puissance peut atteindre 2000 KW. Le moteur asynchrone est plus utilisé dans l'ensemble des applications (industrielles, maritime, aérien, etc...). Du fait de sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique. Il est utilisé dans une large gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de watts. Malgré ses bonnes qualités il est loin d'être idéal, son principal inconvénient c'est qu'il développe au démarrage un couple relativement faible par rapport au courant de démarrage élevé, ce qui implique une chute de tension considérable dans le réseau électrique naval, et un temps de démarrage long [10].

L'objectif de notre travail est l'analyse des différents modes de démarrages des propulseurs d'étrave, afin de détecter le mode de démarrage le plus avantageux, qui garantit une chute de tension minimale, un courant de démarrage acceptable et un couple important.

Pour cela, nous avons réparti notre travail comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur le propulseur d'étrave navale à base d'une machine asynchrone à cage, le rôle, les types des propulseurs d'étraves navales et les différents types de démarrage.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil du propulseur d'étrave naval.

En fin, le troisième chapitre est consacré à la simulation des différents modes de démarrages des moteurs asynchrones des propulseurs d'étraves navales, et leurs analyses.

Finalement, ce travail se termine avec une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les Propulseurs d'étraves navales

I.1. Introduction

Aujourd'hui plus qu'hier, tous les secteurs militaires et civils qu'ils soient maritimes, terrestres aériens ou spatiaux. Font de plus en plus appel à l'électricité, plus faible, plus souple et moins polluante, pour assurer les fonctions majeures de mobilité et d'évolution, cette conception des nouveaux équipements (moteurs électriques, électronique de puissance, informatique industrielle...) et le développement des sources d'énergie dynamique (génératrices, alternateurs). Dans le domaine maritime, les navires tout électriques s'imposent comme une solution et une finalité à la plupart des navires.

I.2. Analyses du problème

La puissance du propulseur d'étrave est comparable avec la puissance de la station électrique du navire. Le démarrage direct du propulseur d'étrave provoque des chutes de tension inacceptable dans le réseau électrique d'un navire, cela va conduire à la mise hors tension de toute la station électrique.

L'analyse de cette problématique dans l'objectif d'en trouver une solution nous impose une étude de l'évolution du courant absorbé durant les différents modes de démarrage de propulseur d'étrave. Donc pour réduire ce courant il faut agir sur deux paramètres :

- Réduction de la tension d'alimentation. Cette action peut être assurée par trois procédés à savoir : l'autotransformateur, démarrage étoile triangle ou l'utilisation d'un gradateur.
- L'augmentation de l'impédance du circuit statorique (le circuit rotorique est inaccessible puisque le moteur est à cage), cette action est réalisée par la mise en série de chaque enroulement de phase statorique avec des résistances. Mais cette technique provoque des chutes de tension très élevée (pertes par effet joule). Au démarrage du PEN, il y a un appel fort du courant qui provoque des chutes de tension allant jusqu'à 20% de la valeur nominale. Ce qui influence négativement sur le réseau électrique de navire et provoque la mise hors tension dans le navire. Pour la diminution de l'influence des effets négatifs, le démarrage de PEN s'effectue à l'aide des appareils spéciaux (autotransformateurs, étoile triangle, convertisseur de tension, gradateur...).

Sur la figure (1.1) un schéma d'un réseau électrique avec propulseur d'étrave est présenté.

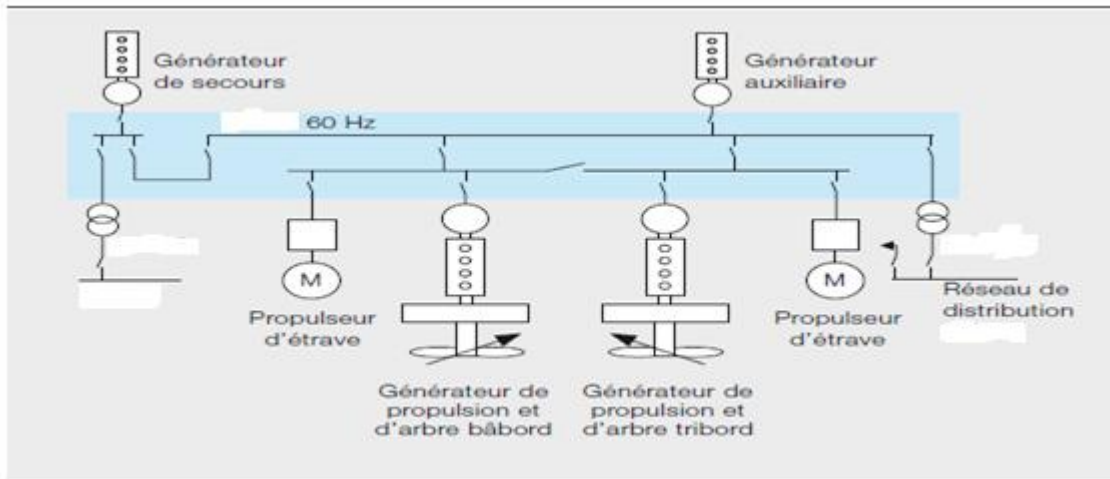


Figure 1.1. Schéma de réseau électrique du navire

I.3. Généralités sur les propulseurs d'étraves navales

I.3.1. Présentation de propulseur d'étrave navale

Un propulseur d'étrave navale est un dispositif utilisé sur les grands navires et les bateaux pour faciliter l'entrée et la sortie d'une station d'accueil sans l'aide d'un remorqueur. Le style plus commun de propulseur d'étrave est un système d'hélice qui est monté dans la zone inférieure de l'avant de navire. Réalise de bâbord à tribord, ou de gauche à droit, le propulseur d'étrave navale est utilisé pour pousser la partie avant du navire du quai lorsque vous quittez le port. Lorsque le navire est assis encore, le capitaine est capable de diriger le mouvement de navire en utilise le propulseur d'étrave navale, qui est capable de diriger le navire sans l'aide de mouvement vers l'avant.

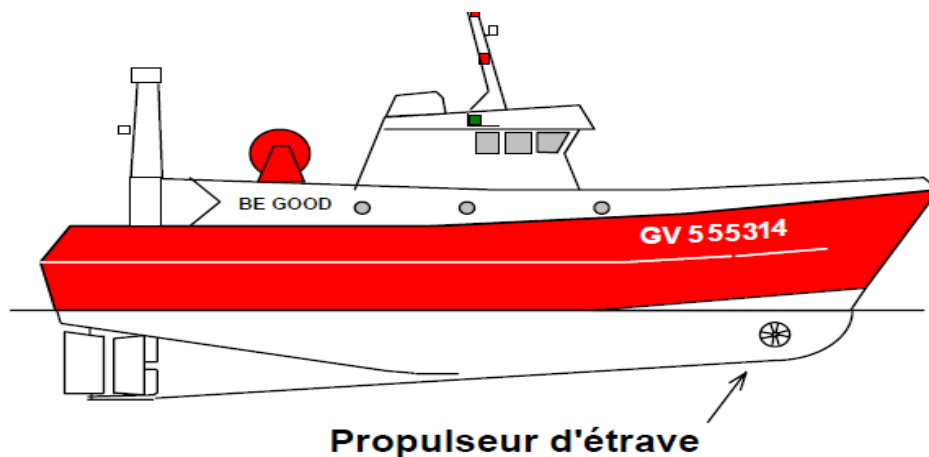


Figure 1.2. Schéma d'emplacement d'un propulseur d'étrave navale [2]

I.3.2. Le rôle de propulseur d'étrave navale

Un propulseur d'étrave doit assurer les manœuvres des navires en cas de faible vitesse et facilite le mouvement dans le port. Il s'agit d'accoster un bateau ou de quitter le quai de port, sans l'aide d'une remorque. Le propulseur d'étrave joue le rôle de propulseur auxiliaire dans les navires, un inconvénient du propulseur d'étrave est la légère réduction en marche avant qu'il crée, ce qui provoque un navire à utiliser plus de carburant pour parcourir la même distance comme un navire non propulseur équipé. Le cout est souvent compensé par la capacité du propulseur d'étrave d'économiser sur les frais de bateau-remorqueur pour accoster dans certains ports. Généralement pour les navires-équipes d'un propulseur d'étrave sont les propulseurs avec l'hélice à pas réglable figure (1.3) à base des moteurs asynchrone à cage d'écureuil.



Figure 1.3. Image d'hélice du propulseur d'étrave navale

I.3.3. Les types des propulseurs d'étraves navales

Il existe deux types des propulseurs d'étraves, hydrauliques et électriques. Les propulseurs hydrauliques nécessitent un système hydraulique soigneusement conçu pour fonctionner de manière fiable et efficace. Il arrive souvent qu'un tel système soit uniquement pour le propulseur d'étrave du bateau. La forme la plus courante de ce type de système utilise un moteur diesel, comme source d'alimentation. Le propulseur électrique constitue d'une hélice est plus facile à installer, près de l'étrave.

I.3.4 .Technologies d'hélices

Les hélices sont pour la plupart fabriquées à partir des matériaux non ferreux tels que le bronze le nickel, et les hélices en acier inoxydable. Ces matériaux combinent une bonne résistance aux contraintes mécanique à la corrosion à l'érosion par phénomène cavitation. Une hélice peut être définie à partir des paramètres géométriques comme la montre la figure (1.2).

Avec :

- Le nombre de pales.
- L'angle de devers δ_r traduisant également le fait que la pale est inclinée.
- Les rayons d'axe r_h et d'extrémité de pale R_0 .

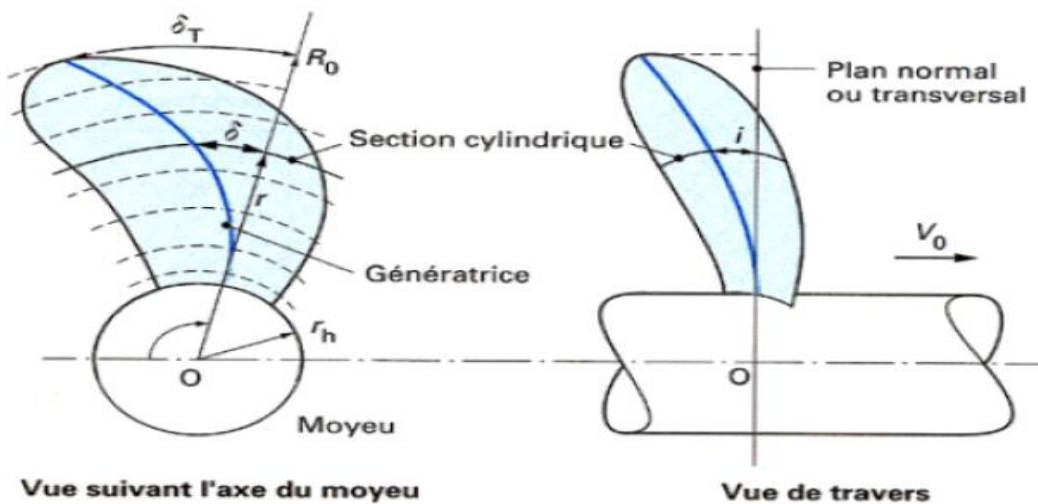


Figure 1.4. La forme géométrique d'hélice [1]

D'une manière générale, l'hélice permet d'accélérer les particules d'eau qui la traversant tout en leur imprimant un mouvement rotatif. Cette accélération des particules se traduit physiquement par l'apparition d'une poussée qui propulse le navire et se quantifie [02] mathématiquement par :

$$T=M*(V_2-V_1) / dt$$

T : poussée d'hélice.

M : masse du navire.

V_2 : vitesse des particules d'eau à la sortie d'hélice.

V_1 : vitesse des particules d'eau entrant dans l'hélice.

I.4. Constitution d'un moteur asynchrone triphasé à cage

Le moteur asynchrone est composé principalement de deux parties, l'une fixe appelée le stator et l'autre mobile appelée le rotor, ces deux parties sont séparées entre elles par un entrefer.

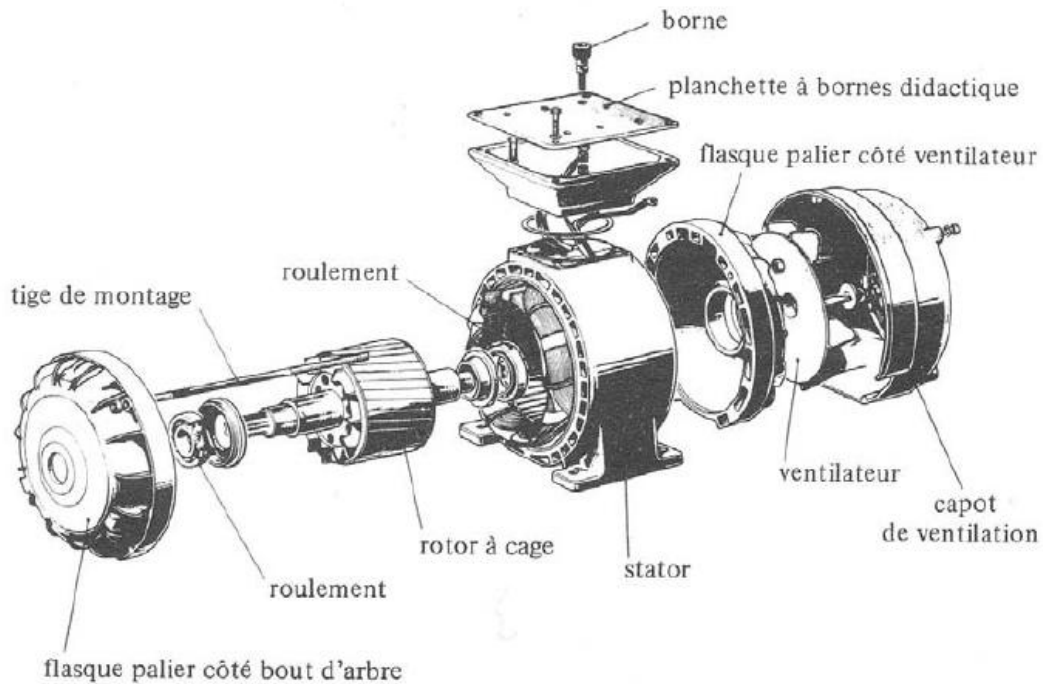


Figure 1.5. Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à cage [3]

I.4.1. Le stator (inducteur)

Il représente la partie fixe du moteur, c'est un cylindre creux constitué par une couronne de tôle empilée et serrée dans une carcasse, formant ainsi un anneau à l'intérieur duquel se trouvent des encoches qui contiennent l'enroulement statorique, dont les entrées et les sorties aboutissent à une plaque à bornes, afin de faciliter leurs couplages (en étoile ou en triangle) [4].

I.4.2. Le rotor (induit)

Il représente la partie mobile du moteur, et il n'est relié à aucune alimentation extérieure.

➤ **Rotor à cage d'écureuil**

Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par deux anneaux de court-circuit. Pour les moteurs de faibles puissances, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées des unes des autres (feuilletage). Pour les moteurs de forte puissance, les barres sont insérés dans le rotor puis les anneaux de court-circuit sont soudés ou brasés aux barres. Cette construction simple, robuste et moins couteuse a fait de lui, le rotor le plus utilisé, surtout pour les moteurs de grandes puissances. L'ensemble barre-anneaux forme ainsi une cage d'où le nom rotor à cage d'écureuil (Figure 1.6) [4].

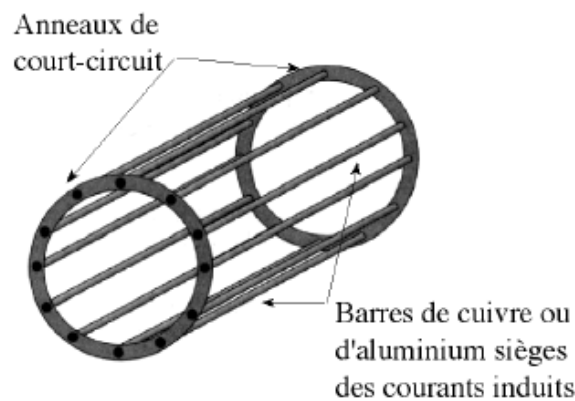


Figure 1.6. Cage d'écureuil [5]

I.5. Principe de fonctionnement de MAS

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. Ce champ tournant est synchrone de la fréquence des courants statoriques, c.-à-d que sa fréquence de rotation (vitesse) est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. L'enroulement du rotor est donc soumis à des variations de flux du champ magnétique. Une force électromotrice induite apparaît et crée des courants rotoriques et c'est l'action du flux ou du champ tournant des courants, qu'il a lui-même induits, qui sont responsables de l'apparition d'un couple de force de Laplace, qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique. La machine est dite asynchrone, car elle est dans l'impossibilité sans présence d'un entraînement extérieur,

d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, si le rotor tourne à la même vitesse de synchronisme, donc le flux à travers chacune des bobines rotoriques sera constant, et les courants s'annulent de même que le couple qu'ils produisent et la machine n'est plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée glissement. Il représente l'écart en pourcentage entre la vitesse de synchronisme (champ tournant) et la vitesse de rotation de rotor. On le définit par l'expression: $g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$

Et si en plus, le rotor est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine devient un alternateur [4].

I.6. Démarrages des moteurs asynchrones à cage [6]

Les éléments principaux de démarrage sont le courant de démarrage et le couple de démarrage.

$$C_d = C_{em}(g=1) = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{R_2'}{[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

$$I_d = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Avec:

R_1 : résistance du stator

X_1 : réactance du stator.

R_2' : résistance du rotor ramenée au stator.

X_2' : réactance du rotor ramené au stator.

Ω_s : vitesse de synchronisme (rd/s).

g : le glissement.

Pour que le rotor puisse se mettre en mouvement, le couple de démarrage doit être supérieur au couple résistant du mécanisme entraîné.

Pendant la phase de démarrage d'un moteur asynchrone, la plage du couple moteur compatible avec un démarrage correct de la charge nécessite un appel de courant important au démarrage sous une tension nominale. Cet appel de courant entraîne :

- Des chutes de tensions supplémentaires par rapport au régime permanent dans les réseaux de faible puissance, ce qui nuit au fonctionnement des appareils voisins.
- Des contraintes thermiques supplémentaires pour le moteur : les machines sont dimensionnées pour un point de fonctionnement nominal, lors du démarrage il convient de s'assurer que l'échauffement imposé au moteur ne risque pas de le détériorer. Donc la valeur de courant de démarrage ne doit pas dépasser certaines limites.

Quel que soit le type de moteur, il est nécessaire, au démarrage, de limiter le courant d'appel et de conserver un couple de démarrage suffisamment important.

I.7. Choix du mode de démarrage de MAS

Le choix de démarrage est guidé par des critères économiques et techniques qui sont :

- Les caractéristiques mécaniques.
- Les performances recherchées.
- La nature du réseau d'alimentation électrique.
- L'utilisation du moteur existant dans le cas d'un rééquipement.
- La politique de maintenance de l'entreprise.
- Le coût de l'équipement.

Le choix d'un démarrage sera lié:

- Au type d'utilisation: souplesse au démarrage.
- A la nature de la charge à entraîner.
- Au type de moteur asynchrone.
- A la puissance de la machine.
- A la puissance de la ligne électrique.
- A la gamme de vitesse de requise pour l'application.

I.8. Différents modes de démarrage des propulseurs d'étraves navales

I.8.1. Démarrage direct sous pleine tension

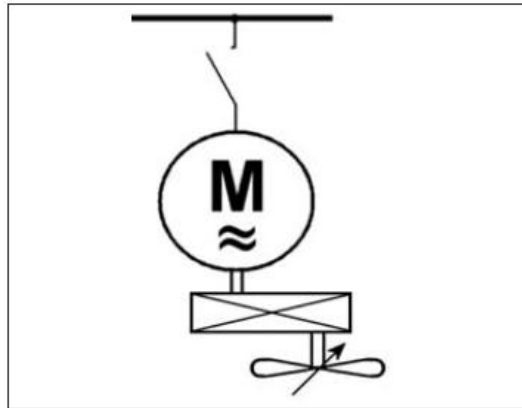


Figure 1.7. Schéma de démarrage direct du propulseur d'étrave navale [7]

Au démarrage l'appel du courant est de 4 à 7 fois le courant nominal I_n (ce qui exige un bon dimensionnement des protections), et sa durée peut varier de 1 à 10 secondes environ en fonction, du moment d'inertie total (moteur et charge), du couple moteur et du couple résistant.

Malgré les avantages qu'il présente (simplicité de l'appareillage ce mode convient dans les cas suivants [8] :

- La surcharge du courant puisse être supportée par le réseau sans perturbation des autres récepteurs et que la machine entraînée puisse supporter le choc mécanique du au couple moteur.
- La puissance du moteur est faible par rapport à la puissance de réseau (utilisé pour les moteurs de puissance inférieure à 10 fois la puissance apparente du réseau ou pour les moteurs de faible puissance).
- La machine à entrainer ne nécessite pas la mise en rotation progressive et peut accepter une mise en rotation rapide.
- Le couple de démarrage doit être élevé, et il ne convient pas si:
 - Le réseau ne peut pas accepter des chutes de tension.
 - La charge ne peut pas accepter des chocs mécaniques.

Sur les figures (1.8) et (1.9) sont présentés les paramètres du MAS au démarrage direct.

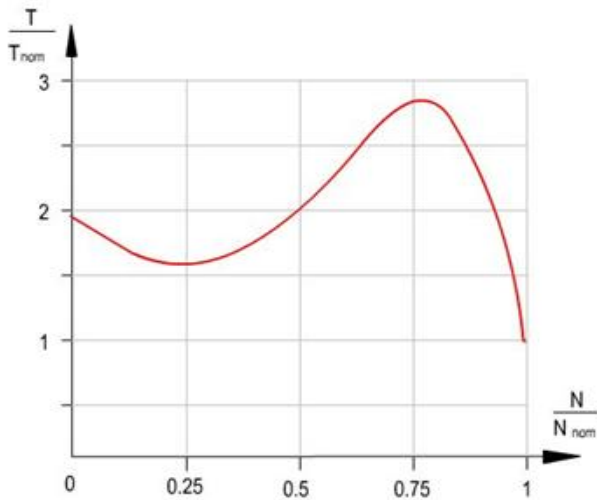


Figure 1.8. Caractéristique du couple
 $T=f(N)$ pendant le démarrage direct

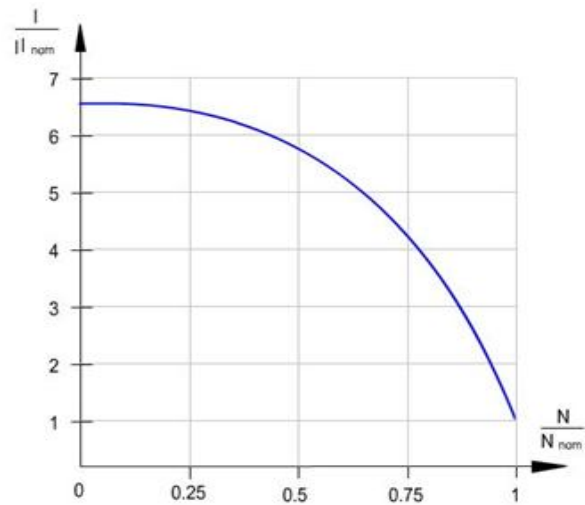


Figure 1.9. Caractéristique du courant
 $I=f(N)$ pendant le démarrage direct

I.8.2. Démarrage étoile-triangle de MAS du PEN

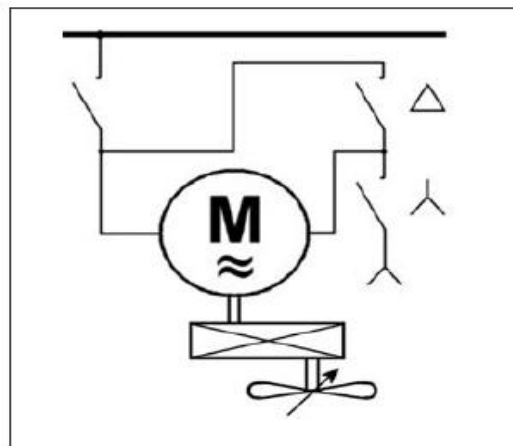


Figure 1.10. Schéma de démarrage étoile-triangle du propulseur d'étrave navale [7]

Il s'applique aux moteurs dont le stator est destiné à un couplage triangle, à la mise sous tension, les enroulements statoriques du moteur sont couplés ont étoile, la tension par enroulement est $U/\sqrt{3}$, le courant de ligne est 3 fois moins que dans le couplage tringle de même le couple est devisé par trios. Lorsque le moteur atteint une vitesse suffisante, on passe au montage triangle qui ramène le moteur sur sa caractéristique normale.

Ce mode de démarrage il présente des avantages [8] :

- Appel de courant en étoile réduit de $\sqrt{3}$ de sa valeur en direct.
- Faible complication d'appareillage.

Mais il présente des inconvénients qui sont :

- Couple de démarrage fixé par l'alimentation.
- Couple réduit au tiers de sa valeur en direct.
- La déconnexion du réseau au moment de chargement de couplage à la reconnexion au réseau le moteur passe par un régime transitoire qui peut être néfaste (pics de courant et de couple).

Sur les figures (1.11) et (1.12) sont présentés des paramètres du démarrage étoile triangle.

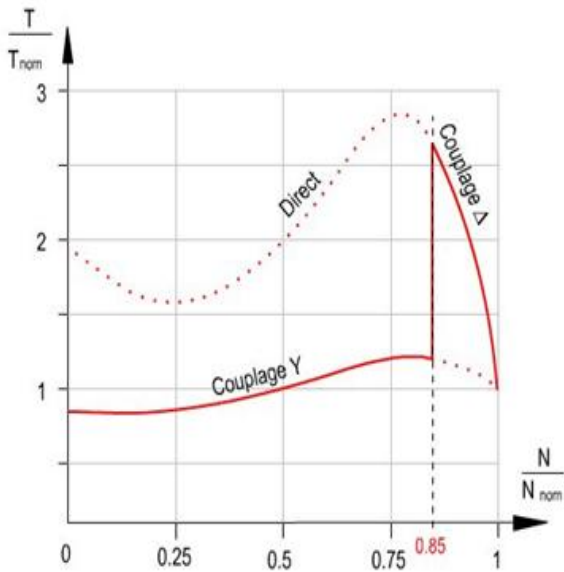


Figure 1.11. Caractéristique du couple $T=f(N)$ pendant le démarrage étoile triangle

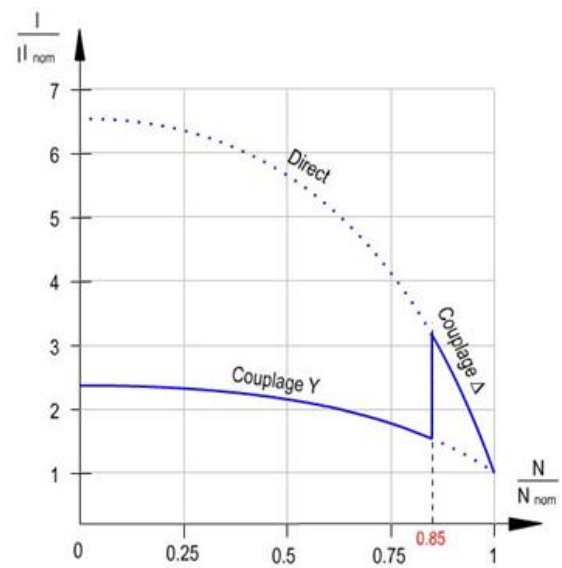


Figure 1.12 caractéristique du courant $I=f(N)$ pendant le démarrage étoile triangle

I.8.3. Démarrage du PEN par autotransformateur

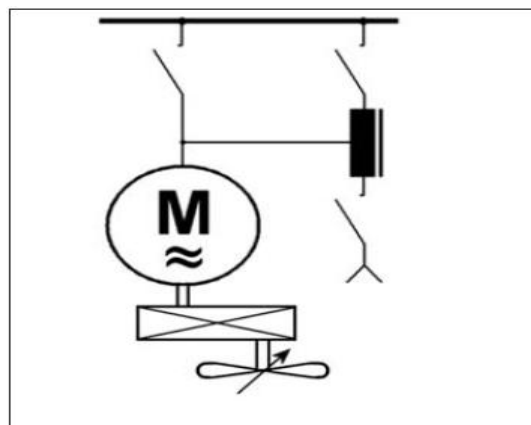


Figure 1.13. Schéma de démarrage du propulseur d'étrave par autotransformateur [7]

Cela consiste à réduire la tension d'alimentation en modifiant le nombre de spires de secondaire d'un transformateur.

Un autotransformateur réglable est un appareil dont le circuit primaire est alimenté par le réseau et qui délivre à son secondaire une tension qui peut varier linéairement de 0 à 100% de la tension primaire.

Lors de démarrage avec l'autotransformateur, la tension est divisée par K et le courant est divisé par K^2 par rapport au courant de démarrage, lors de branchement direct au réseau, de même pour le couple. Cette méthode nous permet de choisir le couple de démarrage, de supprimer les phénomènes transitoires et un passage de différent temps de démarrage sans coupure du courant.

Ce système présente le plus d'avantages techniques, il est utilisé en général pour les machines de puissance élevée. Il conduit à un cout de l'installation relativement élevée surtout pour la conception de l'autotransformateur [9].

I.8.4. Démarrage du PEN par résistance ou inductance statorique

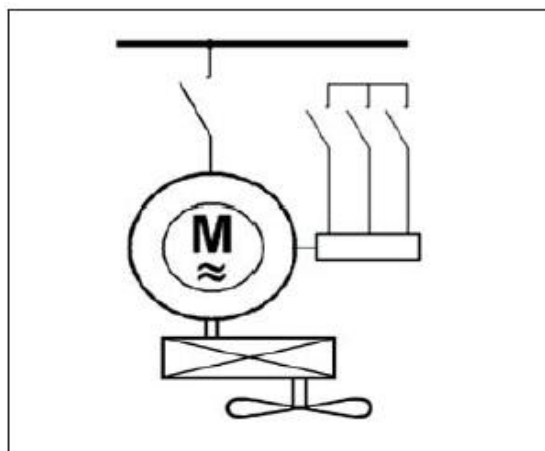


Figure 1.14. Schéma de démarrage du propulseur d'étrave naval par résistance ou inductance statorique [7]

Elles sont mises en série avec le stator, ce qui revient à faire chuter la tension aux bornes du moteur. L'avantage de ce mode de démarrage est que le passage à l'alimentation direct peut se faire sans coupure de l'alimentation (forte réduction des pointes de courant transitoires). L'inconvénient est que le couple est plus diminué que le courant (le couple étant proportionnel au carré de la tension, est on gros divisé par K^2 lorsque le courant est divisé par

k) et aussi les pertes de puissance dans les résistances. Donc ce mode de démarrage n'est applicable que lorsqu'on donne peu d'importance au couple de démarrage [9].

Les caractéristiques du couple et du courant pour ce mode de démarrage sont présentées sur les figures (1.5) et (1.16).

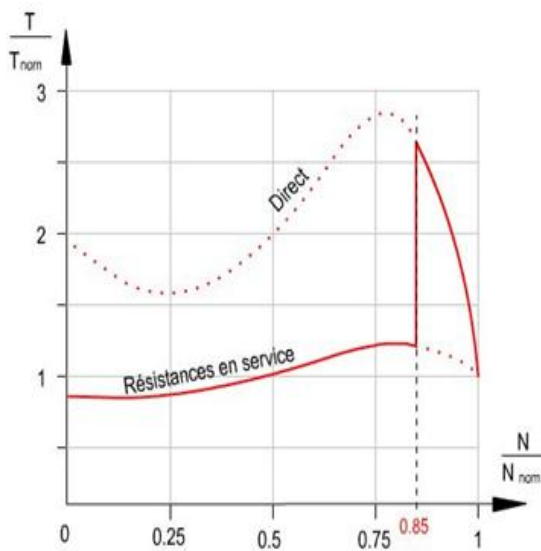


Figure 1.15. Caractéristique du couple pendant le démarrage par résistance statorique $T=f(N)$

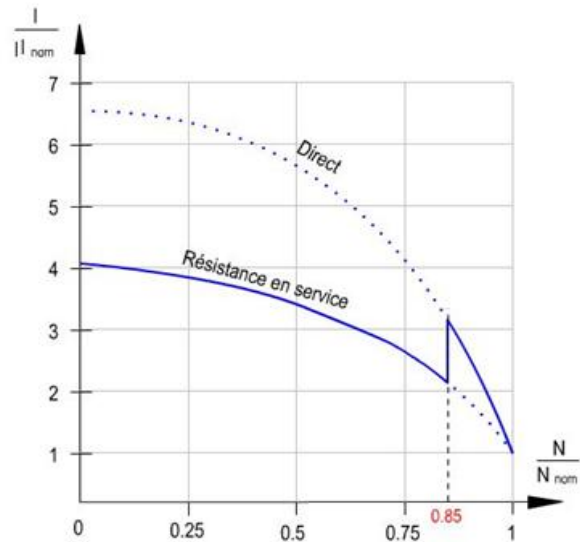


Figure 1.16. Caractéristique du courant pendant le démarrage par résistance statorique $I=f(N)$

I.9. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons effectué une présentation de propulseur d'étrave navale et celle de la machine asynchrone à cage et les différents modes de démarrage de propulseur d'étrave navale à base d'une machine asynchrone à cage, à savoir le démarrage direct, étoile triangle, autotransformateur...ect, on à montré leurs avantages et leurs inconvénients.

Chapitre II

La modélisation du moteur asynchrone à cage du propulseur d'étrave navale

II.1. Introduction

La machine asynchrone n'est pas un système simple à modéliser, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement comme la saturation, les courants de Foucault, l'effet pelliculaire... etc.

Cependant, nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes, car d'une part, leur formulation mathématique est difficile, d'autre part leur incidence sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable dans certaines conditions. Ceci nous permet d'obtenir des équations simples qui traduisent fidèlement le fonctionnement de la machine.

II.2. Hypothèses simplificatrices

Pour alléger les calculs dans la simulation et faciliter le travail de modélisation, nous effectuons des hypothèses simplificatrices de la machine asynchrone à cage.

Voici ces hypothèses :

- Le moteur est d'une construction symétrique.
- Entrefer parfaitement lisse.
- La saturation dans le circuit magnétique est négligeable.
- Le phénomène d'hystérésis n'est pas pris en compte.

Les principales valeurs de base sont les valeurs crêtes du courant de phase, de tension nominale de phase, et la fréquence nominale de la tension.

$$i_b = \sqrt{2}I_1 \quad , \quad U_b = \sqrt{2}U_{1n} \quad , \quad f_b = f_1.$$

Le reste de la base et son dérivé à partir des valeurs données par les expressions suivantes :

$$\omega_b = 2\pi f_b : \text{fréquence angulaire ;} \quad t_b = 1/\omega_b : \text{temps.}$$

$$\psi_b = U_b/\omega_b : \text{flux.}$$

$$R_b = U_b/I_b : \text{résistance}$$

$$P_b = \sqrt{3} U_b I_b : \text{puissance.}$$

$$M_b = P_b/\omega_b : \text{couple.}$$

$J_b = p^2 M_b / \omega_b^2$: Moment d'inertie.

Tous les calculs sont effectués pour la machine bipolaire équivalente. Pour passer à la machine réelle ayant 2P de pole, la vitesse angulaire doit diminuer en P fois, et l'augmentation de couple par P fois.

Les paramètres de l'enroulement rotorique doivent être donnés au primaire.

Il convient de noter que les unités relatives sont utilisées que pendant le calcul de régime transitoire correspondant. Après toutes les valeurs sont exprimées en unités physiques ou en fraction de leurs valeurs nominales.

II.3. Modélisation de la machine asynchrone du PEN

II.3.1. Modèle de moteur asynchrone du PEN

On a proposé le système d'équations suivant pour décrire un moteur naval asynchrone à cage d'écureuil. Le modèle est basé sur l'introduction des vecteurs généralisés (courants, tensions, flux et, etc), pour caractériser les valeurs instantanées des grandeurs de phases du stator et du rotor du moteur asynchrone.

Le courant statorique en fonction des courants de phase i_a , i_b , et i_c est donné par la relation suivante :

$$i_s = 2/3(i_a + ai_b + a^2i_c)$$

Avec: $a = e^{j120^\circ}$ rotation opérateur.

En suppose que la bobine de rotor réduit à l'enroulement du stator écrit dans un système de coordonnées α , β , fixe par rapport au stator, la relation entre les vecteurs de tensions (U_s , U_r), les courants (i_s , i_r), de flux (ψ_s , ψ_r), et de couple électromagnétique M_e sont écrits par les équations suivantes :

II.3.2. Equations électriques et équation du couple [10]

$$\begin{cases} U_s = i_s R_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \\ U_r = i_r R_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r \Psi_r \\ M_e = \Psi_r i_r + M_r J \frac{d\omega_r}{dt} \end{cases} \quad (II.1)$$

II.3.3. Equation magnétique

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \Psi_r = L_r i_r + L_m i_s \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

U_s : la tension statorique.

U_r : la tension rotorique.

I_s : courant statorique.

I_r : courant rotorique.

ψ_s et ψ_r : flux statorique et rotorique.

L_s et L_r : inductance statorique et inductance rotorique.

L_m : l'inductance mutuelle.

R_s et R_r : résistance statorique et résistance rotorique.

M_e : couple électromagnétique.

M_r : couple résistant.

J : la somme du moment d'inertie sur l'arbre du moteur électrique.

ω_r : la vitesse angulaire du rotor.

j : unité imaginaire.

t : temps.

Les équations (II.1) avec les conditions initiales sont un système complet d'équations différentielles pour des conditions de fonctionnement stationnaires et transitoires du moteur asynchrone du propulseur d'étrave .

Le circuit équivalent correspondant pour les vecteurs généralisés est valable pour des conditions non - stationnaires et stationnaires (Fig.2.1) [10].

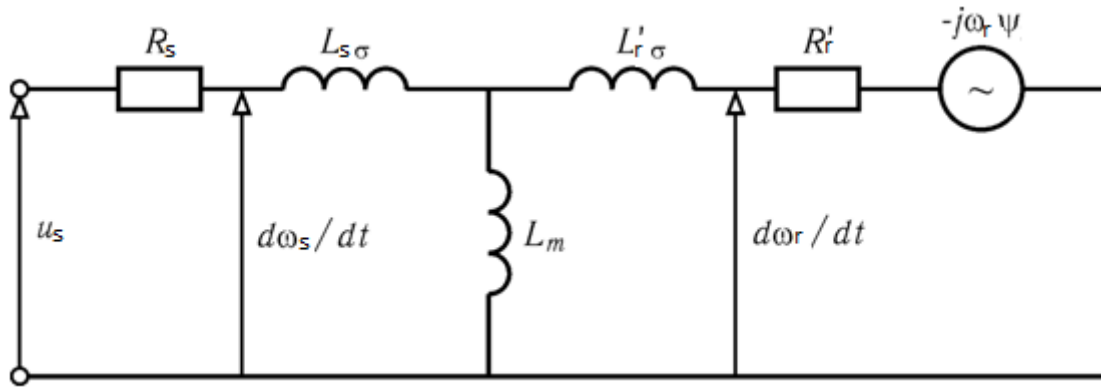


figure 2.1. le circuit équivalent du moteur asynchrone

II.3.4. Equations d'inductance de fuite

$$\begin{cases} L_{s\sigma} = L_s - L_m \\ L_{r\sigma} = L_r - L_m \end{cases} \tag{II.3}$$

Avec :

$L_{s\sigma}$: l'inductance de fuite de l'enroulement statorique.

$L_{r\sigma}$: l'inductance de fuite de l'enroulement rotorique.

L'équation différentielle résultante (II.1) à la forme canonique $y' = (x, y...)$, exprime courants généralisés par flux.

$$\begin{cases} i_s = (\Psi_s L_r - \Psi_r L_m) / D \\ i_r = (\Psi_r L_s - \Psi_s L_m) / D \end{cases} \tag{II.4}$$

Avec :

$$D = L_s L_r - L_m^2$$

Nous écrivons l'expression du couple électromagnétique du moteur sous la forme suivante:

$$M_e = \Psi_r \times i_r = \psi_r i_r \sin(\psi_r \wedge i_r) = L_m \psi_r i_r \sin(i_s \wedge i_r)$$

Après les transformations appropriées, on obtient un système de trois équations différentielles:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_s}{dt} = U_s - R_s(\Psi_s L_r - \Psi_r L_m)/D \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = U_r + j\omega_r \Psi_r - R_r(\Psi_r L_s - \Psi_s L_m)/D \\ \frac{d\omega_r}{dt} = (L_m i_s i_r \sin(i_s \wedge i_r) - M_r)/J \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Dans le système d'équations, trois inconnues Ψ_s , Ψ_r et ω_r , dont deux Ψ_s , Ψ_r sont des vecteurs généralisés, et le troisième ω_r est un scalaire.

La résolution du système obtenu par la méthode numérique nécessite de déterminer à chaque moment les valeurs des inconnus, et aussi de déterminer les autres valeurs (la puissance, les pertes dans les enroulements, les courants dans le stator et le rotor, le couple électromagnétique, le facteur de puissance et le rendement).

Pour l'analyse de régime statique de moteur asynchrone du PEN, on a exploité les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_1 = m_1 U_s I_s \cos \varphi \\ P_2 = P_1 - \sum p_{er} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$$\eta = P_2/P_1$$

Avec:

P_1 : la puissance consommée.

P_2 : la puissance utile.

$\sum p_{er}$: les pertes.

η : le rendement.

$$m_1 = 3$$

Le circuit équivalent du générateur et du moteur asynchrone est représenté sur la (figure 2.2), elle est obtenue en combinant le circuit équivalent d'un générateur synchrone, qui comprend la source de force électromotrice E_g , l'inductance L_d , connecter en série avec le circuit équivalent du moteur à induction représenté à la (figure 2.1).

Par la combinaison de l'inductance L_d et $L_{1\sigma}$ on obtient l'inductance totale :

$$L_d + L_{s\sigma} = L'_{s\sigma}$$

Pour le moteur asynchrone, il est possible d'utiliser le modèle mathématique d'écrit ci-dessus (figure 2.1), en remplaçant respectivement $L_{s\sigma}$ par $L'_{s\sigma}$ et U_s par E_g [10].

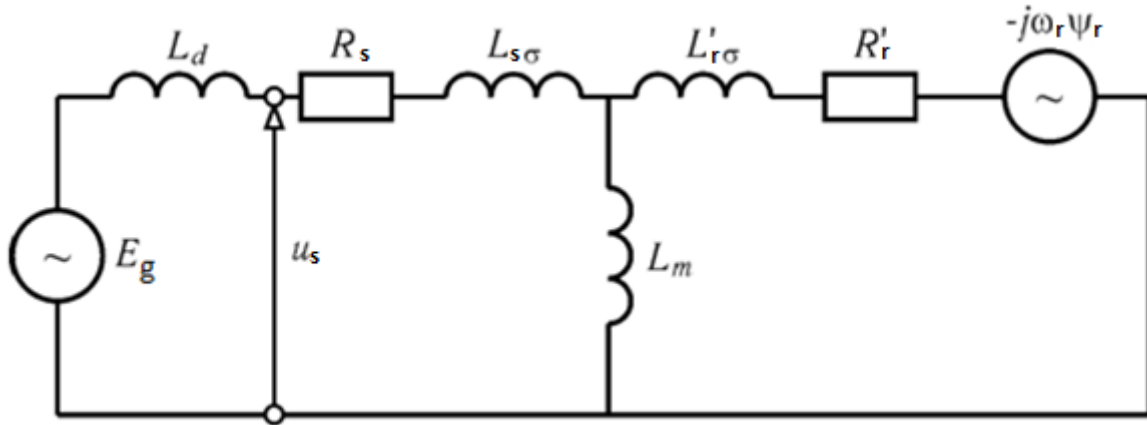


Figure 2.2. Le circuit équivalent d'un générateur et d'un moteur asynchrone

La tension U_L dans les inductances connectées en série $L_d + L_{s\sigma} + L'_{r\sigma}$ égal à :

$$U_L = \frac{d\Psi_s}{dt} - \frac{d\Psi_r}{dt} \tag{II.7}$$

D'après l'équation (II.1) on trouve :

$$\frac{d\Psi_s}{dt} - \frac{d\Psi_r}{dt} = U_s - i_s R_s + i_r R_r - j\omega_r \Psi_r \tag{II.8}$$

Le facteur de présentation : $K_d = L_d / (L_d + L_s + L'_r)$, on obtient une expression de la chute de tension aux bornes de l'inductance L_d :

$$U_{Ld} = K_d \cdot U_L \tag{II.9}$$

L'application de la loi de Kirchhoff sur le circuit de la (figure 2.2) donne :

$$U_s = E_g - U_{Ld} \tag{II.10}$$

Des équations (II.7), (II.8) et (II.10) on obtient la formule pour la tension appliquée aux bornes de l'enroulement du moteur :

$$U_s = E_g - K_d (U_s - i_s R_s + i_r R_r - j\omega_r \Psi_r) \tag{II.11}$$

II.4. Conclusion

Ce chapitre présente une modélisation de la machine asynchrone à cage pour répondre aux objectifs suivants :

- Etablir un modèle adéquat de la machine tel que ce modèle permet de représenter le plus fidèlement possible le fonctionnement de la machine.

- Simplifier les calculs et limiter le nombre de variables une hypothèse simplificatrice est utilisée.

Ceci permet de définir le modèle de connaissance qui sera utilisé dans une simulation des différents modes de démarrage des propulseurs d'étraves navales.

Chapitre III

*La simulation des différents
modes de démarrage du
propulseur d'étrave navale*

III.1. Introduction

Le calcul des paramètres des différents modes de démarrage du PEN est réalisé à base des modèles mathématiques développés. Cette modélisation s'appuie sur un programme écrit sous le langage algorithmique C++. Pour la résolution numérique du système d'équations obtenu, la méthode Runge-Kutta du quatrième ordre est choisie.

Les bases de données de départ du programme développé sont les paramètres du moteur asynchrone, le couple résiste du mécanisme, le moment d'inertie du complexe et l'indice du démarrage du PEN envisagé et les paramètres de commande.

III.2. Résultat de la simulation de démarrage direct du PEN

Considérons le démarrage direct du moteur on va prendre $U= 380v$, $N= 100tr /min$ pour un moment d'inertie du complexe de $45kg.m^2$.

L'analyse de ce mode de démarrage est effectuée à des valeurs constantes (nominales) de fréquence et de tension, en conformité avec les équations (II.4) et (II.5) et le circuit équivalent représenté sur la figure (2.1).

Les calculs de ce démarrage donnent les valeurs instantanées de la vitesse angulaire ω , de courant généralisé statorique i_s , et de couple électromagnétique M_e en fonction de temps (t), qui sont représentés sur les figures 3.1 à 3.3.

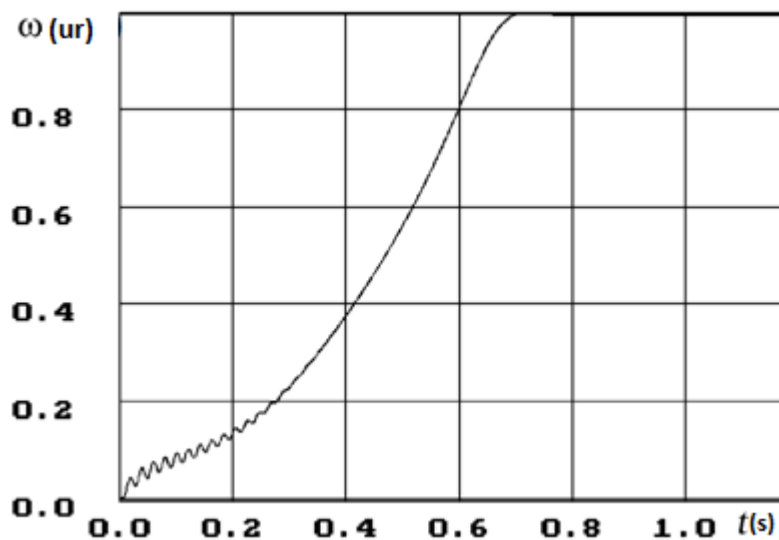


Figure 3.1. La vitesse angulaire $\omega(t)$ pour le démarrage direct de MAS à cage du propulseur d'étrave navale

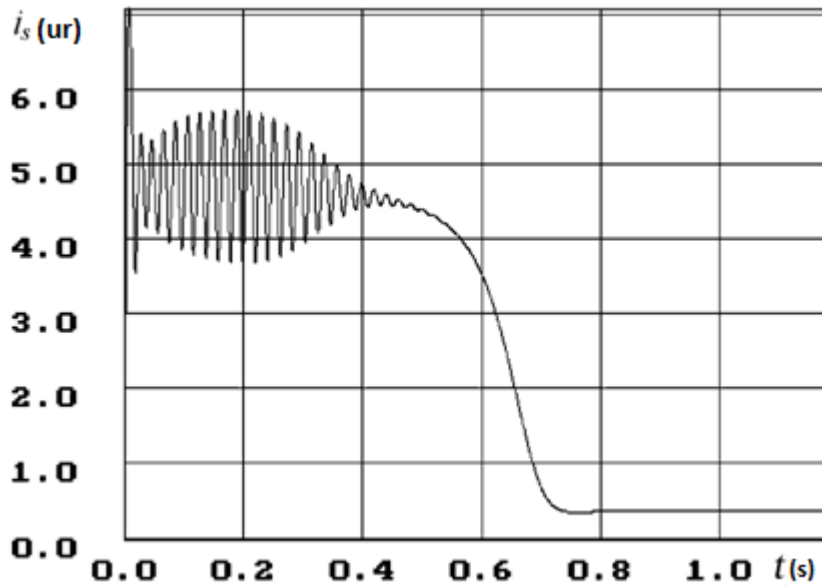


Figure 3.2. Le courant généralisé $i_s(t)$ pour le démarrage direct de MAS à cage du PEN

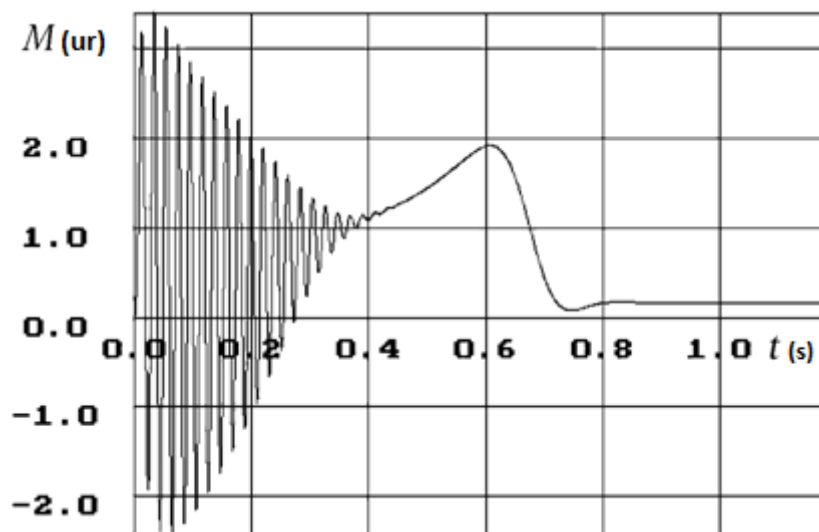


Figure 3.3. Couple électromagnétique $M_c(t)$ pour le démarrage direct de MAS à cage du PEN

Dans le cas d'un démarrage du moteur à vide ($M = 0$), le temps de démarrage peut être calculé par la formule suivante :

$$t_s = \Delta\omega J_y / M_{moy} \quad (3.1)$$

Avec:

$\Delta\omega$: la vitesse angulaire (rad /s).

J_s : le moment d'inertie sur l'arbre de moteur (kg.m^2).

$M_{\text{moy n}}$: le couple moyen nominal pendant le démarrage de moteur (N.m).

On a

$$\Delta\omega = \omega_n (1 - g_n) = 2\pi f / p (1 - g_n) = 103,15 \text{ rad/s}$$

Le couple moyen du moteur pendant le démarrage est déterminé par la formule suivante :

$$M_{\text{moy}} = (2 M_d + M_{\text{max}}) / 3,5 = (2,0,1,05 + 2,022) / 3,5 = 1,178 \text{ N.m}$$

Et le couple moyen nominal par la relation suivante :

$$M_{\text{moy n}} = M_{\text{moy}} \cdot M_n = 1,178 \cdot 5722 = 6739 \text{ N.m}$$

Selon la formule (3.1) le temps de démarrage est :

$$t_s = \Delta\omega J_s / M_{\text{moy n}} = 103,15 \cdot 45 / 6739 = 0,688 \text{ s}$$

Le temps de démarrage, trouvé pour les mêmes données d'entrée en utilisant le programme, égal à 0,667 seconde. L'erreur relative est de 3 % et la convergence peut être considérée comme tout à fait satisfaisante. Les paramètres considérés de façons complexes ne peuvent pas être vérifiés par des méthodes simples.

Pour être en mesure de comparer les options envisagées en termes de leurs conditions de fonctionnement, ils ont été choisis des rapports de base de l'analyse d'un certain nombre de systèmes d'alimentation spécifique marine, qui peut être considérée comme norme :

- Le rapport entre le moment d'inertie total du complexe (J_d) et le moment d'inertie de l'arbre de moteur (J_s) est : $K_j = J_s / J_d = 1,5$.

- Le rapport entre la capacité de puissance totale de station électrique et du propulseur d'étrave : $K_p = P_{se}/PE$, lorsque le moteur naval est alimenté à partir du réseau de navire $K_p = 4$, et lorsqu'il est alimenté par générateur séparé $K_p = 1,5$.
- Le taux d'augmentation de la tension à l'excitation forcée de générateur égale à 4ur/s.

Afin de faciliter les conditions de démarrage, l'angle d'attaque des hélices à pas variable (HPR), qui est généralement équipés d'un propulseur, le couple résistant de démarrage est fixé à un minimum de résistance hydraulique. Les Caractéristiques mécaniques normales de HPR en termes relatifs, à angle zéro de rotation de la vis est donné dans le tableau 3.1. et la figure 3.4.

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N^* | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| M^* | 0,090 | 0,013 | 0,006 | 0,019 | 0,036 | 0,058 | 0,084 | 0,110 | 0,137 | 0,167 | 0,200 |

Tableau 3.1. Caractéristiques mécaniques normales de HPR à l'angle de rotation nul.

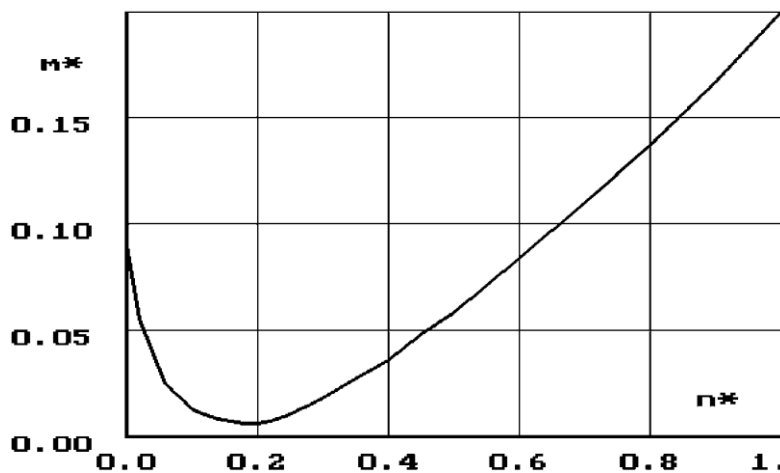


Figure 3.4. Caractéristique mécanique du HPR à l'angle de rotation nul

III.3. résultat de la simulation de démarrage étoile triangle du PEN

Pour les fortes puissances des moteurs asynchrones, généralement on utilise le démarrage étoile triangle. L'enroulement du stator est connecté premièrement en étoile puis en triangle.

Pendant le fonctionnement le moteur connecté en triangle, donc essentiellement il démarre avec une tension réduite de $\sqrt{3}$.

Les inconvénients de cette méthode consistent à augmenter le temps de démarrage, et l'échauffement des enroulements du moteur qui provoque des pertes importantes, et on remarque qu'il existe un pic de courant pendant le déplacement de couplage étoile en triangle.

Les courbes des valeurs de la vitesse $\omega(t)$ et $i_s(t)$ et $M_e(t)$ pour le démarrage étoile triangle sont représenté sur les figures 3.5 et 3.6 et 3.7 respectivement.

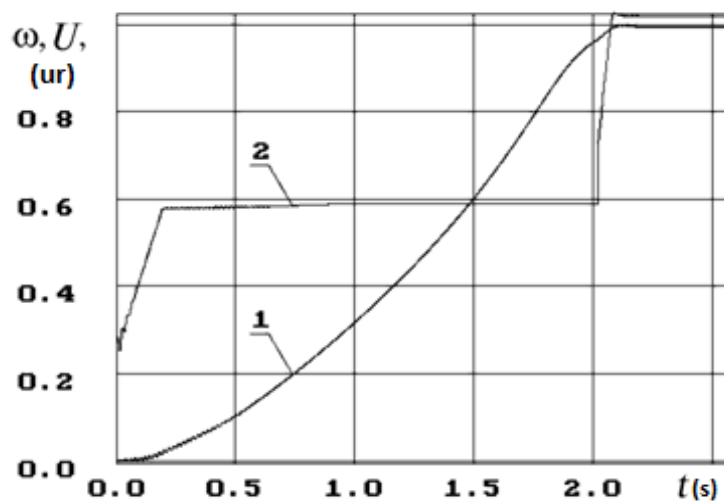


Figure 3.5. Vitesse $\omega(t)$ (1), et la tension $U(t)$ (2) pendant le démarrage

Etoile triangle du PEN

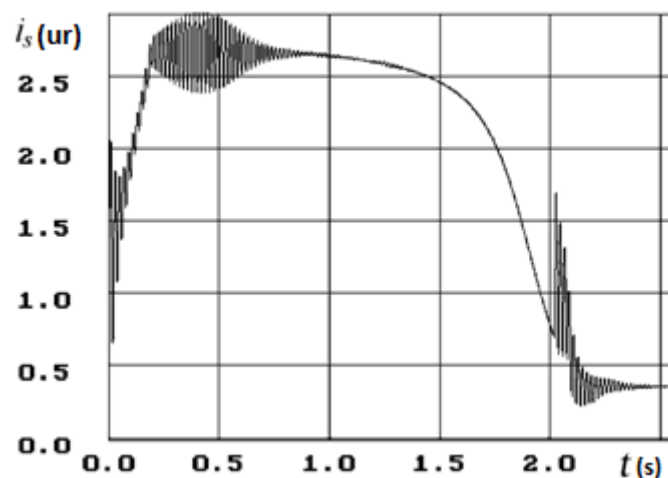


Figure 3.6. Courant généralisé statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage étoile triangle du PEN

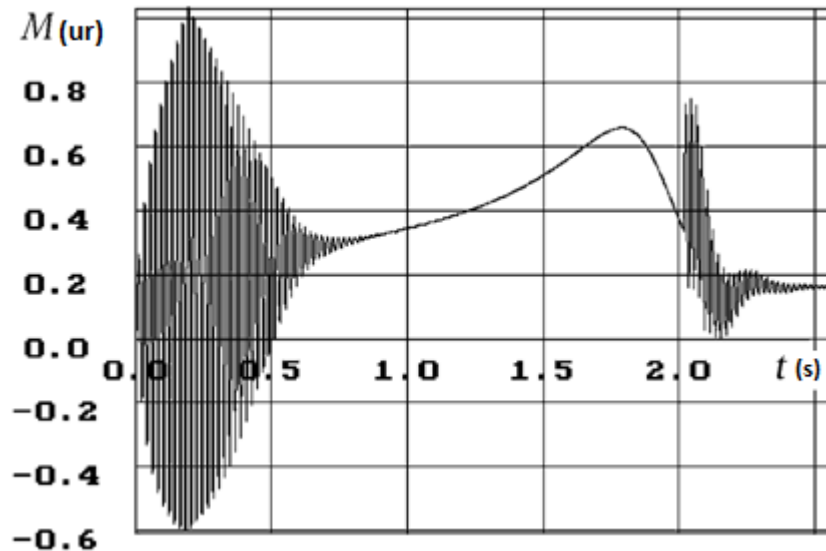


Figure 3.7. Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage étoile triangle du PEN

III.4. Démarrage du PEN par autotransformateur

Le démarrage par autotransformateur est très similaire au démarrage étoile triangle, mais il existe des inconvénients pour ce démarrage consiste à l'augmentation de temps de démarrage, pic de courant, et des pertes importantes dans le moteur.

Les courbes de la vitesse $\omega(t)$, de courant généralisé $i_s(t)$ et de couple électromagnétique $M_e(t)$ pour le démarrage du PEN par autotransformateur sont représenté sur les figures 3.8 et 3.9 et 3.10 respectivement.

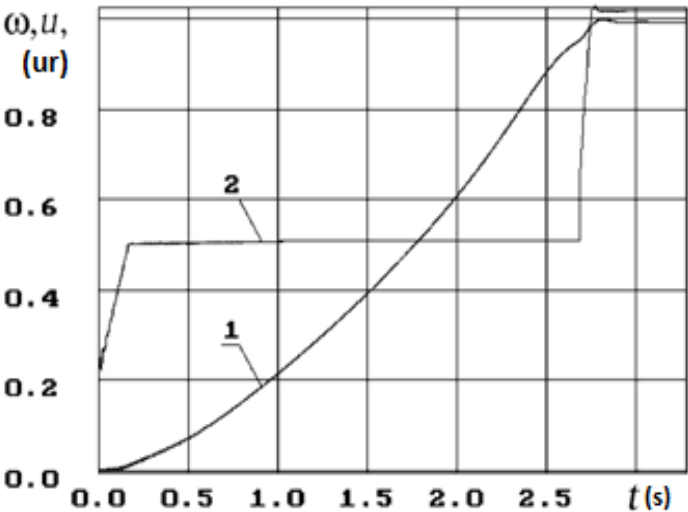


Figure 3.8. Vitesse $\omega(t)$ (1), et la tension $U(t)$ (2) pendant le démarrage du PEN par autotransformateur

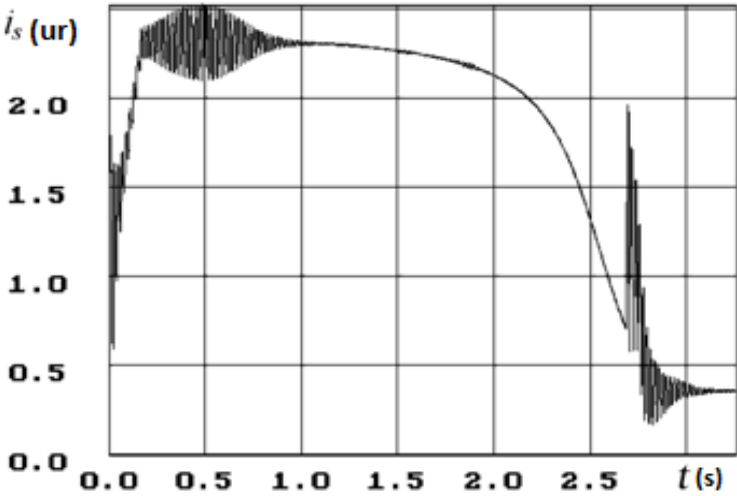


Figure 3.9. Courant généralisé statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage du PEN par autotransformateur

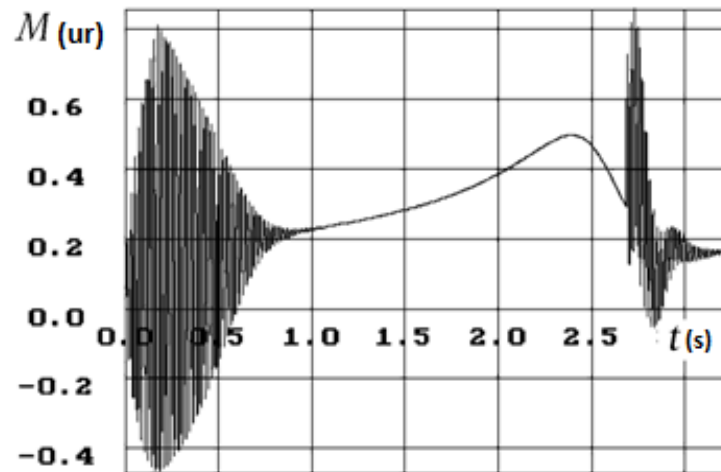


Figure 3.10. Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage du PEN par autotransformateur

III.5. Démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur

Lorsque le moteur est alimenté à partir d'un seul générateur diésel, peut être mise en œuvre deux façons, avec vitesse constante et avec vitesse variable.

III.5.1. Démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur à vitesse constante

On augmente assez vite la tension à une valeur à laquelle la multiplicité de courant de démarrage i_s est égale à la maximale autorisée (2 à 2,5 I_n), et ensuite on augmente la tension à la valeur nominale.

Les courbes de la vitesse $\omega(t)$, le courant généralisé statorique $i_s(t)$, et le couple électromagnétique $M_e(t)$ pour le démarrage du PEN à partir d'un seul diésel générateur à vitesse constante sont représenté sur les figures 3.11 et 3.12 et 3.13 respectivement.

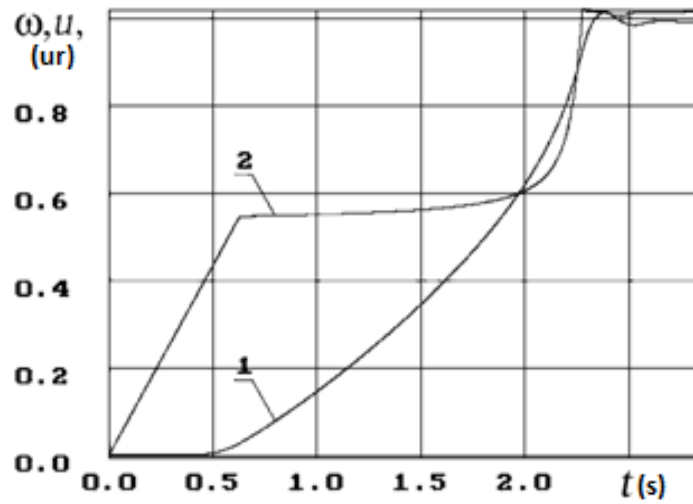


Figure 3.11. Vitesse $\omega(t)$ (1), et la tension $U(t)$ (2) pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse constante

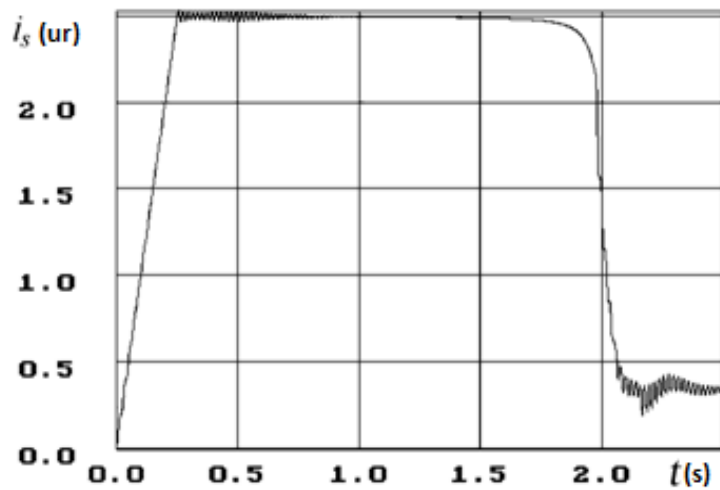


Figure 3.12. Courant généralisé statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse constante

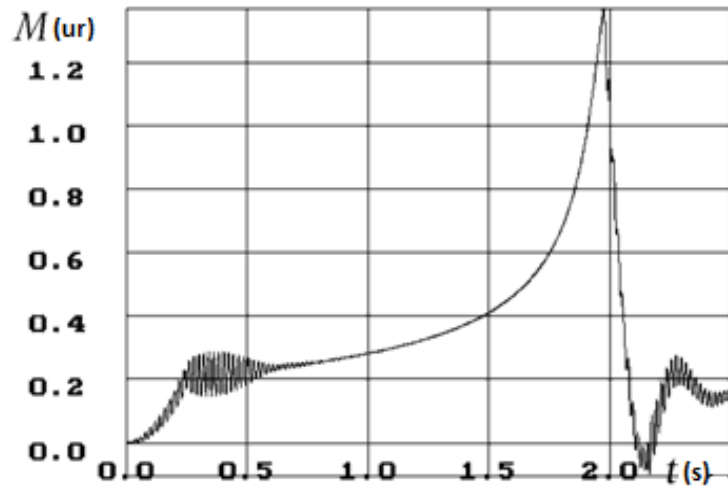


Figure 3.13. Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse constante

- Comme on peut le voir sur les figures (figure 3.11 à 3.13) cette méthode est différente de celles d'étoile triangle et d'autotransformateur, par l'absence de pic de courant.

III.5.2. Démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse variable

Ici la vitesse d'augmentation de la tension pour le générateur est 2 ur/s, et la vitesse d'augmentation de la fréquence est de 1 ur/s, de tels sorts qu'il faut que la vitesse d'augmentation de la tension corresponde à deux fois celle de la fréquence.

Les courbes de la vitesse $\omega(t)$ et $i_s(t)$ et $M_e(t)$ pour le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse variable sont représenté sur les figures 3.14 et 3.15 et 3.16 respectivement.

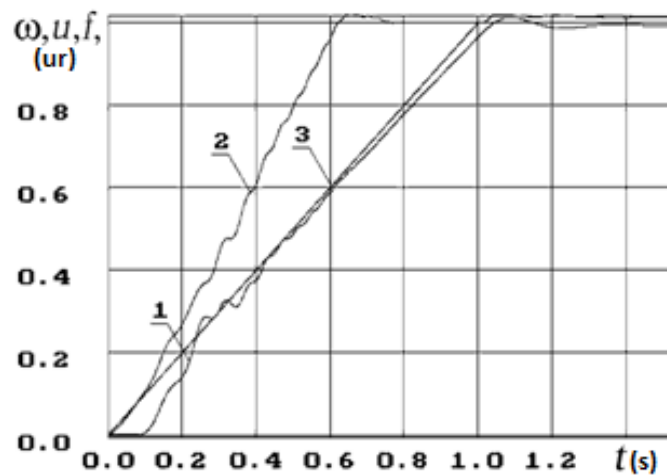


Figure 3.14. Vitesse $\omega(t)$ (1), la tension $U(t)$ (2), et de fréquence $f(t)$ (3) pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse variable

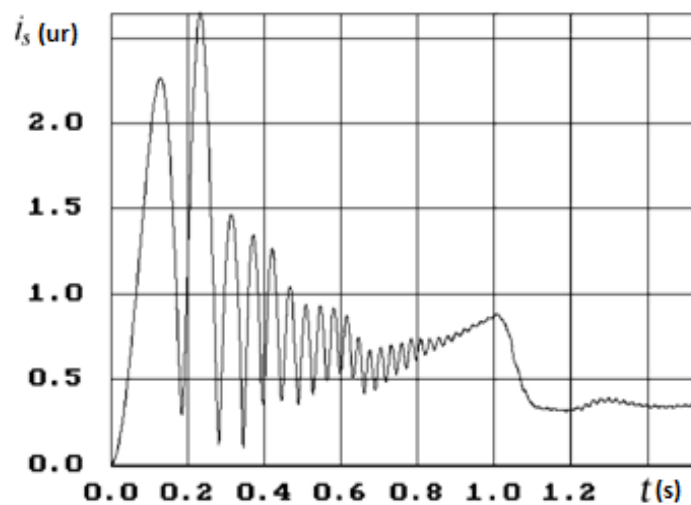


Figure 3.15. courant généralisée statorique $i_s(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse variable

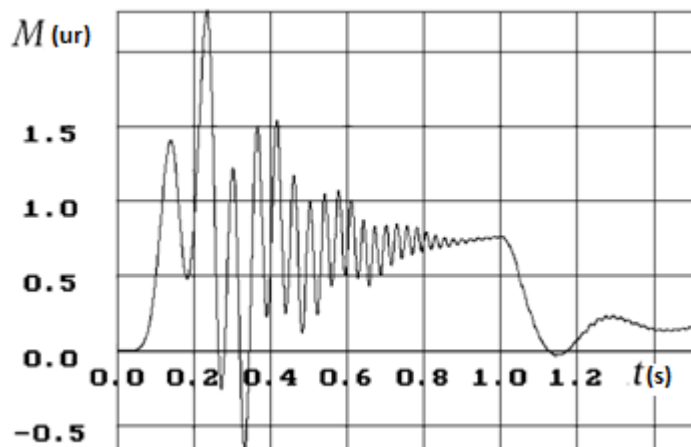


Figure 3.16. Couple électromagnétique $M_e(t)$ pendant le démarrage du PEN à partir d'un seul diesel générateur à vitesse variable

Dans le tableau (3.2) sont données les valeurs numériques des différents modes de démarrage analysés.

| | t_d (s) | I_n (A) | I_d (A) | $Q(w)$ | K_p |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|
| ZT | 2,084 | 2617,08 | 3324,45 | 426 | 3,988 |
| TR | 2,770 | 2308,60 | 2849,85 | 437 | 3,072 |
| UG | 2,327 | 2399 | 2839,70 | 419 | 3,513 |
| FG | 1,033 | 1179,70 | 2735,70 | 45,7 | 0,862 |

Tableau 3.2. Résultats comparatifs des différents modes de démarrages des propulseurs d'étraves

Avec :

ZT : étoile triangle.

TR : autotransformateur.

UG : diésel générateur à vitesse constante.

FG : diésel générateur à vitesse variable.

III.6. Interprétation des résultats de la simulation

Pour le démarrage direct, les courbes de la figure (3.1 , 3.2 , 3.3), montrent que le couple électromagnétique développé au démarrage est $C_d=9727.5$ Nm, le courant absorbé est $I_d=6780$ A, et que la vitesse nominale est atteinte au bout de $t_s=0,68$ seconde, donc on a un $I_d=7I_n$ qui est très élevé et nocive pour notre système et pour le réseau électrique du navire. Et pour les courbes de la figure (3.5 , 3.6 , 3.7) de démarrage étoile triangle on remarque que le couple électromagnétique au démarrage est $C_d=4005.4$ Nm, et le courant absorbé est $I_d=3324.45$ A, et la vitesse nominale est atteinte pendant $t_s=2.08$ s, c.-à-d on a diminué le I_d par rapport au démarrage direct, mais il reste toujours élevé avec un t_d long et on remarque un pic du courant brutal pendant le passage de l'étoile au triangle.

Et pour les courbes de la figure (3.8 , 3.9 , 3.10) on a un couple électromagnétique développé $C_d=3147.1$ Nm, avec un courant absorbé $I_d=2849.85$ A, et la vitesse nominale est atteinte pendant $t_d=2.7$ s, tel qu'on remarque que le I_d est diminué par rapport au démarrage précédent, mais les résultats sont toujours inacceptables tel que le pic du courant, et le temps de démarrage t_d long, et un autre problème qu'est le autotransformateur lui-même, qui est fragile, coûteuse, et plus il augmente la charge de navire (lourd).

Donc, il faut un mode de démarrage du PEN mieux que les trois précédents et pour ce la on a utilisé le démarrage à partir d'un diésel générateur à vitesse constante, les résultats de ce mode de démarrage sont représentés sur les courbes de la figure (3.11 , 3.12 , 3.13), avec un couple électromagnétique développé au démarrage $C_d=1716.5$ Nm, et un courant absorbé $I_d=2839.7$ A, et la vitesse nominale est atteinte au bout de $t_d=2.3$ s, et il atteint la tension nominale U_n pendant 2.25s.

D'après les résultats de ce dernier essai, on remarque que le démarrage à partir d'un seul diésel générateur à vitesse constante est mieux que les trois modes de démarrage précédent, puisque on a diminué le I_d et éliminé le pic du courant, mais on a toujours un couple C_d faible, et un temps de démarrage long, et pour cela on a choisie un autre mode de démarrage qu'est le démarrage à partir d'un diésel générateur à vitesse variable.

Pour le démarrage à partir d'un seul diésel générateur à vitesse variable on a les courbes de la figure (3.14 , 3.15 , 3.16) qui montrent un courant absorbé $I_d=2735.7$ A, et un couple électromagnétique développé au démarrage $C_d=8010.8$ Nm, et que la vitesse nominale est atteinte au bout de $t_d=1.03s$, et que la fréquence de synchronisation est atteinte pendant 1.2s, avec une tension nominale atteinte durant 0.62s. Donc on a les meilleurs résultats de tous les modes de démarrage du PEN, avec un courant I_d acceptable et un couple élevé, et un temps de démarrage t_d très petit.

III.7. Conclusion

Les résultats obtenus montrent les paramètres (courant de démarrage, couple de démarrage, la vitesse, etc...) des différents modes de démarrage du propulseur d'étrave. Cela nous a permis de faire une étude comparative des différents modes de démarrage du propulseur d'étrave.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons réalisé est l'analyse des différents modes de démarrage des propulseurs d'étraves navales.

Pour cela, on a commencé par faire une étude comparative entre plusieurs types de démarrage. En se basant sur les différents inconvénients et d'avantages de ces types de démarrage.

En fin, on a modélisé et simulé la machine asynchrone à cage du PEN, en effectuant plusieurs modes de démarrages à cette dernière (démarrage direct, étoile triangle, autotransformateur, à partir d'un seul diésel générateur à vitesse constante, et à partir d'un seul diésel générateur à vitesse variable).

On peut conclure que le démarrage à partir d'un diésel générateur séparé à vitesse variable présente plusieurs avantages tels que:

- Nous permet d'effectuer un démarrage souple.
- Un temps de démarrage court.
- Un courant de démarrage acceptable.
- Un couple de démarrages convenable.
- Diminuer et limiter les chutes de tension au maximum.
- Ce démarrage ne nécessite pas des équipements de démarrage, ce qui va permettre de réduire l'encombrement dans un bateau.

Comme perspectives, nous proposons d'étudier les démarrages commandés des MAS du propulseur d'étrave navale à partir des convertisseurs de tension ou de fréquence.

Références bibliographiques

Référence bibliographique

- [1] **LAURENT DROUEN**. Machine électrique intégrées à des hélices marines : contribution à une modélisation et conception multi-physique. Electric power. Arts et métiers Paris Tech, 2010.
- [2] **PHILIPPE LOUSSOUARN**. Cours sur les propulseurs d'étraves.
- [3] **J. CHATELAIN**. Machines électriques. Tomes 1 et 2. T3E. Dunod. 1983.
- [4] **P. BARRET**. Machines électrique. Théorie et mise en œuvre. Editions marketing S.A, 2002.
- [5] **H. NEY**. Electrosystème, première STI. Editions Nathan technique, 1992.
- [6] **M. KOSTENKO, L. PIOTROVSKI** : machines électriques, tome II. Editions Mir 1979.
- [7] **SAM ELECTRONICS GmbH**, Energy and Drives. [http:// Sam-electronics.de](http://Sam-electronics.de)
- [8] **DELVA, LECLERCQ et TRANNOY**. Physique appliqué, Terminal génie électrotechnique. Edition hachette éducation, 1994.
- [9] **A. FOUILLE**. Electrotechnique à l'usage des ingénieurs : 2 Machine électrique. Edition Dunod 1969.
- [10] l'accroissement de l'efficacité de transmission de puissance vers les propulseurs d'étraves navales, Thèse de PhD, **B. BENDAHMANE**. Académie nationale maritime d'Odessa, 2002, Ukraine.

Annexe

Annexe

Les paramètres du moteur asynchrone à cage

Puissance sur l'arbre : $P_n = 590$ kw.

La tension nominale : $U_n = 380$ V

Nombre de paires de pôles : $p = 3$.

Le courant nominal : $I_n = 1130$ A.

Le couple nominal : $M_n = 5722$ Nm.

Le $\cos \varphi_n = 0,86$.

$N_n = 985$ tr/min.

$R_s = 0,01 \Omega$

$X_s = 0,10 \Omega$

$R_r' = 0,0145 \Omega$

$X_r' = 0,18 \Omega$

$R_m = 0,52 \Omega$

$X_m = 3,2 \Omega$