

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOD MAMMERI, TIZI-OUZOU.



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : De Master en Électrotechnique
Option : Entraînements Électriques

Thème

**Étude et calcul d'un système
d'entraînement électrique d'un
mécanisme de levage**

Proposé et encadré par :
M^r. CHAIBI Rachid

Rédigé par :
M^r. FILALI Jugurta

Promotion 2013

Remerciements

Je tiens profondément à remercier dieu de nous avoir éclairci les chemins du savoir et ceux de la vie.

J'exprime ma sincère gratitude à mes parents qui m'ont soutenu par tous les moyens afin que je réussisse dans mes études. Surtout, par leurs encouragements qui m'animent de volonté.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr. CHAIBI Rachid qui m'a guidé pendant toute la durée de la réalisation de ce travail.

De même, je remercie Mr. REZGUI Slimane pour ses orientations.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont acceptés de juger ce modeste travail.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à l'achèvement de ce travail, et de mener à bien ce mémoire de master.

À mes très chers parents
À toutes ma famille
À tous mes amis (es)
À Lynda

Tables Des Matières

| | |
|--|-------|
| Remerciements | (ii) |
| Dédicaces | (iii) |
| Tables Des Matières | (iv) |
| Liste des symboles | (ix) |
| Introduction générale | (1) |
| Chapitre I : Généralités sur les entraînements électriques et les mécanismes de levages | |
| I.) Historique | (3) |
| I.1 Levier | (3) |
| I.2 Rampe | (3) |
| I.3 La chèvre | (4) |
| I.4 La grue à cage d'écureuil | (4) |
| I.5 Les Grues contemporaines..... | (4) |
| II.) Notion de la machine | (5) |
| II.a Machine simple | (5) |
| II.b Machine composée | (5) |
| II.1 Amplification des efforts de machine | (5) |
| II.2 Rapport de vitesse | (5) |
| II.3 Rendement d'une machine | (5) |
| II.4 Relation entre η , MA et VR | (5) |
| II.5 Sens du flux d'énergie | (6) |
| II.6 Quadrant de fonctionnement | (6) |
| II.7 Réversibilité d'une machine | (8) |
| III.) Appareils et accessoires de levage | (8) |
| III.1 Appareil de levage | (8) |
| III.1.a Appareils légers | (8) |
| III.1.b Appareils lourds ou mi-lourd | (9) |
| III.1.c Appareils de levage spécifique | (9) |
| III.2 Quelques appareils de levage | (10) |
| III.2.a Cric et vérins | (10) |
| III.2.b Palan | (10) |
| III.2.c Pont roulant | (10) |
| III.2.d Portique | (10) |
| III.2.e Potence | (10) |
| III.2.f Treuil | (10) |
| III.2.g Ascenseur | (10) |
| III.2.g.1 Ascenseur hydraulique | (11) |
| III.2.g.2 Ascenseur électrique suspendu | (11) |
| III.2.h Grue | (11) |
| III.2.h.1 Grues statiques..... | (11) |
| III.2.h.2 Grues mobiles | (11) |
| III.3 Accessoire d'appareil de levage | (12) |
| III.4 Quelques accessoires d'appareils de levage | (12) |
| III.4.a Moufle | (12) |
| III.4.b Poulie, réa et noix | (12) |
| III.4.c Palonnier | (12) |
| III.4.d Ventouse de levage..... | (12) |

| | |
|--|------|
| III.5 Dispositif | (12) |
| IV.) Généralités sur les entraînements électriques | (13) |
| IV.1 Type d'entraînements électriques | (13) |
| IV.2 Généralités sur les moteurs des entraînements électriques | (13) |
| IV.2.a Constitution | (13) |
| IV.2.b Comportement mécanique des moteurs électriques | (14) |
| IV.2.b.1 Moment d'inertie | (14) |
| IV.2.c Moteurs des entraînements électriques | (15) |
| IV.2.c.1 Moteur asynchrones (à induction) | (15) |
| IV.2.c.1.a Définition | (15) |
| IV.2.c.1.b Rotor bobiné | (15) |
| IV.2.c.1.c Rotor à cage | (15) |
| IV.2.c.1.d Utilisation | (16) |
| IV.2.c.2 Moteur synchrones | (16) |
| IV.2.c.2.a Définition | (16) |
| IV.2.c.2.b Moteur synchrone à aimants | (16) |
| IV.2.c.2.c Moteur synchrone rotor bobiné | (16) |
| IV.2.c.2.d Moteur synchrone à réluctance variable | (16) |
| IV.2.c.2.e Utilisation | (16) |
| IV.2.c.3 Moteur à réluctance variable | (17) |
| IV.2.c.3.a Définition | (17) |
| IV.2.c.3.b Utilisation | (17) |
| IV.2.c.4 Moteur à courant continu | (17) |
| IV.2.c.4.a Définition | (17) |
| IV.2.c.4.b Utilisation | (17) |
| V.) Généralités sur les réducteurs (Transmission de puissance) | (18) |
| V.1 Définition | (18) |
| V.2 Réduction | (18) |
| V.3 Transmission par obstacle | (19) |
| V.4 Transmission par adhérence | (19) |
| V.5 Cinématique | (19) |
| V.6 Inertie | (19) |
| VI.) Application | (20) |
| VI.1 Données techniques du mécanisme | (20) |
| VI.2 Inconnues | (21) |
| VII.) Conclusion | (21) |

Chapitre II : Dimensionnement

| | |
|--|------|
| I.) Définition des forces et des couples | (22) |
| I.1 analyse et calcul des forces agissant sur le système..... | (22) |
| I.1.a Calcul du poids du chariot | (22) |
| I.1.b Calcul du poids du contrepoids | (23) |
| I.2 Valeur du couple et de la puissance à l'arbre du tambour | (23) |
| I.2.a Mouvement vers le haut | (23) |
| I.2.b Mouvement vers le bas | (24) |
| I.3 Calcul de câble | (24) |
| I.3.a Calcul des contraintes sur le câble | (24) |

| | |
|--|------|
| I.4 Dimensionnement des poulies..... | (25) |
| I.5 Calcul préliminaire de la puissance d'entraînement de la machine | (25) |
| II.) Puissance d'entraînement avec prise en compte de la durée d'amorçage (facteur de charge) | (26) |
| II.) Choix du moteur | (26) |
| III.1 Choix du type du moteur | (26) |
| III.2 Choix de la puissance du moteur..... | (27) |
| IV.) Construction de tachygramme et diagramme de charge | (28) |
| IV.1 Tachygramme | (28) |
| IV.1.a Montée | (28) |
| IV.1.b descente | (28) |
| IV.2 Diagramme de charge | (29) |
| IV.2.a Montée | (29) |
| IV.2.b Descente | (30) |
| IV.3 Régime de fonctionnement | (32) |
| IV.3.a Couple équivalent | (33) |
| IV.3.b Facteur de surcharge mécanique | (33) |
| IV.4 Caractéristique mécanique | (33) |
| IV.4.a Caractéristique en régime moteur | (33) |
| IV.4.b Caractéristique en régime de freinage | (34) |
| V.) Frein de sécurité..... | (35) |
| VI.) Conclusion | (35) |

Chapitre III : Modèle dynamique

| | |
|--|------|
| I.) Modélisation de la partie mécanique | (36) |
| I.1 Calcul des inerties ramenées à l'arbre du moteur | (37) |
| I.2 Coefficients de rigidité ramenée à l'arbre du moteur | (37) |
| I.2.a Coefficient de rigidité d'étirage | (37) |
| I.2.b Coefficient de rigidité de torsion | (38) |
| I.3 schéma équivalent de calcul | (38) |
| I.3.a schéma équivalent de calcul à huit masses | (38) |
| I.3.b schéma équivalent de calcul à trois masses | (39) |
| I.3.c schéma équivalent de calcul à deux masses | (39) |
| I.3 Équation du mouvement | (39) |
| I.4 diagramme structurelle de la partie mécanique avec prise en compte du coefficient d'amortissement | (40) |
| II.) Modélisation du moteur électrique en régime moteur | (41) |
| II.1 Hypothèses simplificatrices | (41) |
| II.2 Équations électriques | (42) |
| II.3 Équations magnétiques | (42) |
| II.4 Transformation de Park | (43) |
| II.4.a Application de la transformation de Park au moteur | (44) |
| II.4.a.1 Équations électriques dans le repère dq | (44) |
| II.4.a.2 Couple électromagnétique | (46) |
| III.) Modèle moteur électrique – charge | (46) |
| III.1 Diagramme structurel du moteur-charge..... | (47) |
| IV.) Modélisation du moteur au régime freinage | (48) |

| | | |
|--------|---|------|
| IV.1 | Modèle mathématique avec les variables statoriques non transformées | (48) |
| IV.1.a | Équation du couplage statorique | (48) |
| IV.1.b | Équation statorique | (48) |
| IV.1.c | Équation rotorique | (49) |
| IV.1.d | Équations électriques | (49) |
| IV.1.e | Équation du couple électromagnétique | (49) |
| IV.2 | Dynamique du freinage..... | (50) |
| V.) | Résultats de simulation est interprétation | (52) |
| V.1 | Couple moteur | (52) |
| V.1.a | Interprétation | (52) |
| V.2 | Vitesse | (53) |
| V.2.a | Interprétation | (53) |
| V.3 | Influence du coefficient d'amortissement | (53) |
| V.3.a | Interprétation | (54) |
| V.4 | Résonance mécanique | (54) |
| V.4.a | Interprétation | (55) |
| V.5 | Résultat de simulation au régime freinage | (56) |
| V.5.a | Interprétation | (57) |
| VI.) | Conclusion | (57) |

Chapitre IV : Commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique de la machine asynchrone

| | | |
|---------|---|------|
| I.) | L'onduleur de tension..... | (58) |
| I.1 | Définition | (58) |
| I.2 | Modélisation de l'onduleur | (58) |
| I.2.a | Fonction de connexion | (59) |
| I.2.b | Fonction de conversion | (59) |
| II.) | Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale | (59) |
| III.) | Commande vectorielle par orientation du flux rotorique..... | (61) |
| III.1 | Principe | (62) |
| III.2 | Description de la commande vectorielle indirecte et directe | (62) |
| III.2.a | Commande indirecte | (62) |
| III.2.b | Commande directe | (63) |
| III.3 | Modèle de la machine en vue de sa commande vectorielle | (63) |
| III.3.a | Découplage des courants | (64) |
| III.4 | Synthèse des correcteurs PI | (64) |
| III.4.a | Structure des correcteurs PI | (64) |
| III.5 | Dimensionnement des correcteurs PI | (65) |
| IV.) | Observation du flux rotorique | (67) |
| IV.1 | Représentation d'état adaptée à l'observation du flux rotorique | (67) |
| IV.2 | Observateur d'ordre réduit | (68) |
| IV.3 | Détermination des gains par placement de pôles | (70) |
| V.) | Simulation de la commande vectorielle | (71) |
| V.1 | Résultats de simulation | (71) |
| V.2.a | Grandeurs magnétiques | (71) |
| V.2.a.1 | Interprétation | (72) |
| V.2.a | Grandeurs magnétiques | (73) |

| | |
|---|-------|
| V.2.a.1 Interprétation | (73) |
| VI.) Conclusion | (74) |
| Conclusion générale | (75) |
| Bibliographie | (77) |
| Annexe A : Donnée technique du moteur | (A-1) |
| Annexe B : Calcul de la fréquence de résonance mécanique | (B-1) |
| Annexe C : Généralisation par représentation d'état | (C-1) |

Liste des symboles

W : Charge à soulever ;
 E : Effort ;
 MA : Amplification de l'effort de la machine (mechanical advantage);
 η : Rendement de la machine ;
 P_a : Puissance absorbée ;
 P_u : Puissance utile ;
 VR : Rapport de vitesse (velocity ratio) ;
 C_m : couple moteur ;
 C_r : couple résistant ;
 J : moment d'inertie sommaire;
 C_t : Couple à l'arbre du tambour ;
 F_Σ : Force sommairess ;
 G_p : Poids du contre poids ;
 R_t : Rayon d'entraînement ;
 F_r : Forces réactives ;
 F_a : Forces actives ;
 μ_r : Coefficient de résistance au mouvement ;
 F_m : Poids du chariot ;
 F_N : Force du poids à la normale ;
 F_T : Force du poids à la tangentielle ;
 $F_{m_{montée}}$: Force du poids du chariot pour le mouvement vers le haut ;
 $F_{mT_{montée}}$: Force du poids tangentielle du chariot pour le mouvement vers le haut ;
 $F_{mN_{montée}}$: Force du poids normale du chariot pour le mouvement vers le haut ;
 $F_{m_{descente}}$: Force du poids du chariot pour le mouvement vers le bas ;
 $F_{T_{descente}}$: Force du poids tangentielle du chariot pour le mouvement vers le bas ;
 $F_{N_{descente}}$: Force du poids normale du chariot pour le mouvement vers le bas ;
 $F_{monté}$: Force de traction pour le mouvement vers le haut ;
 $C_{tmonté}$: Couple à l'arbre du tambour pour le mouvement vers le haut ;
 $P_{tmonté}$: Puissance à l'arbre du tambour pour le mouvement vers le haut ;
 ω_f : Vitesse mécanique du tambour en [rad/s] ;
 n_f : Vitesse mécanique du tambour en [tr/min] ;
 $F_{descente}$: Force de traction pour le mouvement vers le bas ;
 $C_{tdescente}$: Couple à l'arbre du tambour pour le mouvement vers le bas ;
 T : Tension du câble ;
 k : Coefficient de sécurité adapté au câble ;
 $d_{câble}$: Diamètre du câble ;
 F_{rup} : Force de rupture du câble ;
 n_1 : Contrainte dû à la charge ;
 n_2 : Contrainte d'incurvation ;
 $k_{réel}$: Coefficient de sécurité Réel ;
 D_p : Diamètre de la poulie

M_p : Masse de la poulie ;
 J_p : Moment d'inertie de la poulie ;
 $P_{smonté}$: La puissance à l'arbre du moteur pour le mouvement vers le haut ;
 $P_{sdescente}$: Puissance à l'arbre du moteur pour le mouvement vers le bas ;
 t_{monte} : Temps de monté ;
 $t_{descente}$: Temps de descente ;
 P_{moteur} : Puissance du moteur ;
 j_i : Rapport de transmission calculé ;
 j_{if} : Rapport de transmission réel ;
 Δt_i : Intervalles de temps des différents régimes ;
 ΔS_i : Longueur du parcours parcouru pendant Δt_i ;
 $a_{déc}$: Décélération du chariot ;
 C_{it} : Couple dû au moment d'inertie du tambour ramené à l'arbre du moteur ;
 C_{im} : Couple dû au moment d'inertie du moteur ;
 C_{ir}^d : Couple dû au moment d'inertie du réducteur ;
 C_{ifr}^d : Couple dû au moment d'inertie du frein ;
 C_{Fi} : Couple dû à la force d'inertie des masses du chariot, charge et contre poids ramené à l'arbre du moteur ;
 ω_m : Vitesse mécanique du moteur ;
 ω_e : vitesse électrique du rotor (rad/s),
 C_{eq} : Couple équivalent ;
 P_M : Facteur de surcharge mécanique ;
 C_{cr} : Couple critique (maximale) ;
 g_{cr} : Glissement correspondant au couple critique ;
 g_n : Glissement nominal ;
 P_p : Nombre de pair de pôles ;
 p : Operateur de Laplace ;
 σ : Coefficient de dispersion de Blondel ;
 T_r : Constante du temps électrique rotorique ;
 L_s : Inductance cyclique statorique ;
 L_r : Inductance cyclique rotorique ;
 I : Courants débité par la source continue ;
 I_d : Courant du freinage pour le mouvement vers le bas ;
 I_m : Courant du freinage pour le mouvement vers le haut ;
 J_i : Le moment d'inertie de l'élément(i) ;
 k_{ij} : Coefficient de rigidité élastique entre les éléments(i et j).
 E_c : Module d'élasticité du câble ;
 $S_{câble}$: Section du câble ;
 l : Longueur du câble ;
 W_c : Energie cinétique du système ;
 W_p : Énergie potentiel du système ;
 φ_i : Déplacement angulaire ;
 C_{vf} : Couple de freinage dû aux forces dissipatives ;

k_{vf} : Coefficient des frottements visqueux ;
 v_{sabc} : Tension simple des phases statoriques dans le référentiel triphasé ;
 v_{rabc} : Tension simple des phases rotoriques dans le référentiel triphasé ;
 v_{sdq0} : Tension simple des phases statoriques dans le référentiel de Park ;
 v_{rdq0} : Tension simple des phases rotoriques dans le référentiel de Park ;
 i_{rabc} : Courant des phases rotoriques dans le référentiel triphasé ;
 i_{sabc} : Courant des phases statoriques dans le référentiel triphasé ;
 i_{rdq0} : Courant des phases rotoriques dans le référentiel de Park ;
 i_{sdq0} : Courant des phases statoriques dans le référentiel de Park ;
 R_s : Résistance des enroulements statoriques ;
 R_r : Résistance des enroulements rotoriques ;
 l_s, l_r : Respectivement inductance propre d'une phase statorique et rotorique ;
 M_s : Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator ;
 M_r : Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du rotor ;
 M_1, M_2 et M_3 : Coefficient de mutuelle inductance entre une phase statorique et rotorique ;
 Φ_{sabc} : Flux totaux des phases statoriques dans le référentiel réel ;
 Φ_{rabc} : Flux totaux des phases rotoriques dans le référentiel réel ;
 $P(\theta_s)$: Transformation de Park des grandeurs statoriques ;
 $P(\theta_r)$: Transformation de Park des grandeurs rotoriques ;
 α : Angle électrique entre la phase (a) du stator et la phase (a) du rotor ;
 θ_s : Angle électrique entre la phase (a) du stator et l'axe directe du repère de Park ;
 θ_r : Angle électrique entre la phase (a) du rotor et l'axe directe du repère de Park ;
 Φ_{sdq0} : Flux totaux des phases statoriques dans le référentiel de Park ;
 Φ_{rdq0} : Flux totaux des phases rotoriques dans le référentiel de Park ;
 L_s : Inductance cyclique statorique ;
 L_r : Inductance cyclique rotorique ;
 M : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor ;
 P_e : Puissance instantanée fournie aux enroulements du moteur ;
 P_m : Puissance mécanique instantanée ;
 C_e : Couple électromagnétique ;
 ω_s : Vitesse de rotation du champ statorique ;
 ω_r : Pulsation des grandeurs rotoriques ;
 T_r : Constante du temps rotorique ;
 V_{dc} : Tension à la sortie du redresseur ;
 f_p : Fréquence de la porteuse ;
 f_s : Fréquence de la tension de référence ;
 m : Indice de modulation ;
 v_s : Amplitude de la tension de référence ;
 v_p : Amplitude de la tension de la porteuse ;
 v_{max} : Tension de l'onduleur ;
 $\widetilde{\theta}_r$: Angle électrique estimée entre la phase (a) du rotor et l'axe directe du repère de Park ;
 $\widetilde{\omega}_r$: Pulsation estimée des grandeurs rotoriques ;
 K_i : Gain de du régulateur intégral ;

K_p : Gain du régulateur proportionnel ;

R_{sr} : Résistance totale vue du stator ;

$[\widehat{\Phi}_{r_dq}]$: Matrice du flux rotorique observé ;

$[\widehat{i}_{s_dq}]$: Matrice des courants statoriques mesuré ;

$[K]$: Matrice gain de l'observateur ;

Introduction générale

I. Introduction générale :

Le besoin de construire des grands ouvrages a poussé l'homme pour développer les matériaux et matériels, permettant de rendre son travail plus simple et plus rapide. Parmi ces matériels on distingue les mécanismes de levages. Les premières utilisations de ces mécanismes sont apparues en Grèce au I^{er} siècle av. J.-C. dans l'utilisation de la presse à vis ainsi que les palans pour soulever les objets [1].

Le rôle des appareils de levage et de manutention devient de plus en plus important dans pratiquement toutes les branches. Leurs emplois sont évidemment une nécessité dans l'industrie qui doit à tout instant, déplacer des charges importantes. Mais l'amélioration du rendement d'un atelier ou un chantier, même modeste, qui dispose d'appareils sûrs, commodes et parfaitement adaptés, justifie leur installation et la dispense qui en résulte.

Aujourd'hui, ces mécanismes se retrouvent dans tous les secteurs, tel que (l'industrie, le commerce, l'entretien des surfaces des grandes immeubles...). Ces mécanismes sont parfois entraînés manuellement et parfois avec un ou plusieurs moteurs, soit diesels, à gaz ou électriques selon le besoin, par exemple, il est impérativement interdit d'utiliser un mécanisme de levage bruyant dans un hôpital.

L'objectif de ce présent mémoire est d'étudier et calculer un mécanisme de levage, ayant comme moteur d'entraînement un moteur électrique, dont le type sera choisi de manière adéquate au deuxième chapitre.

Le calcul des systèmes d'entraînement électrique est une tâche assez difficile. Ceci s'explique non seulement par la grande diversité des procédés industriels, mais aussi par la nature distincte et souvent non linéaire des éléments ; (convertisseurs électroniques de puissance, moteurs électriques, unités de commande, parties mécaniques) entrant dans leur structure.

Avant de passer au calcul et au dimensionnement on commence l'étude au premier chapitre, par la présentation des différents mécanismes de levage, les accessoires et la machine en générale pour but de voir les techniques exploitées pour mettre en œuvre ces mécanismes. Dans ce chapitre on va donner aussi une présentation générale et simplifiée des éléments principaux constituant ces appareils, qui sont :

- Le moteur électrique auquel on va donner l'importance primordiale dans cette partie du projet car son choix au chapitre qui suit exige des connaissances approfondies de chacun de ces moteurs électriques.
- Le réducteur (élément de transmission) qui est aussi un organe dont le choix du moteur en dépend, on va s'intéresser aux types de transmissions, ainsi qu'aux relations mathématiques que ce dernier impose dans le modèle de la chaîne cinématique.

Au deuxième chapitre on va choisir, dimensionner et calculer toutes les parties mobiles de la chaîne cinématique. De plus, on va construire la tachygramme, le diagramme de charge et la courbe du régime de fonctionnement du moteur. On calcule le facteur de surcharge mécanique et le couple équivalent, afin de vérifier si la puissance du moteur choisie est bonne. Et pour finir ce chapitre on va construire les caractéristiques mécaniques du moteur dans les quatre quadrants de fonctionnement.

Au troisième chapitre on passe à la partie la plus compliquée dans l'étude des entraînements électriques. Dans laquelle on élabore un modèle mathématique de toute la chaîne cinématique, qui traduit le fonctionnement dynamique et statique du système. Cela va se faire en deux parties :

- La première partie est l'élaboration du modèle de la partie mécanique seule, qui consiste à représenter la chaîne cinématique dans un bloc dit schéma équivalent de calcul par ses masses réelles reliées par des ressorts et le simplifier par la suite, pour arriver à un modèle à deux masses. Ce modèle à deux masses est transformé en équations mathématiques, en utilisant les équations de LAGRANGE reposant sur l'énergie cinétique et potentielle du système.

- La deuxième partie est l'élaboration du modèle mathématique du moteur en ses deux régimes : moteur et freinage. On va définir deux modèles pour le moteur car en régime moteur les tensions d'entrées sont alternatives et on applique les transformations de PARK au deux circuits du moteur, pour se rapprocher du modèle du moteur à courant continu, contrairement au régime de freinage par injection du courant continu aux phases statoriques, on s'intéresse qu'à rendre la matrice inductance qui dépend de la position du rotor en une matrice constante, par l'application de la transformation de Park au grandeur rotorique, En préservant les grandeurs statoriques non transformées puisque la tension d'entrée est continue.

Et pour finir ce chapitre on fait une simulation de tout le système en ses deux régimes (moteur et freinage) dans l'environnement Matlab/SIMULINK.

Le dernier chapitre est consacré à la commande vectorielle directe à flux rotorique orienté du moteur asynchrone, qui va se faire en quatre étapes :

- La première étape consiste à modéliser l'onduleur de tension ainsi que sa stratégie de commande qui est dans notre cas la MLI sinus-triangle afin de l'adapter à la commande du moteur asynchrone.

- A la deuxième étape on va faire un rappel sur le principe du contrôle vectoriel, puis l'appliquer à notre cas, en définissant les équations du découplage des courants statoriques i_{sd} et i_{sq} , afin de réguler le flux en agissant sur la composante du courant i_{sd} et le couple en agissant sur la composante i_{sq} .

- La troisième étape consiste à étudier l'observateur du flux rotorique, qui joue le rôle d'un capteur du flux puisque l'utilisation de ce dernier diminue la fiabilité d'un moteur asynchrone et augmente son coût de production, de plus on applique la méthode du placement des pôles pour déterminer les gains de l'observateur.

- A la quatrième étape on va vérifier la justesse des paramètres calculés des différents régulateurs et de l'observateur par une simulation numériques sous Matlab/SIMULINK.

CHAPITRE I : Généralités sur les entraînements électriques et les mécanismes de levages

Nous rencontrons les appareils de manutention, à tous les niveaux des activités économiques, tant industrielles que commerciales. Présents lors des phases transitoires des cycles d'élaboration des matériaux et des produits, ils sont également des compléments incontournables lors des opérations de transport. De ce fait, ils sont extrêmement variés suivant les matériaux et les produits à déplacer et le mode de déplacement choisi. Parmi eux, les appareils de levage représentent une importante famille de machines de toutes tailles déclinées en un certain nombre de types pouvant s'adapter à la grande variété des travaux à accomplir. [2]

Ces appareils sont formés de plusieurs pièces dites accessoires de levage, tel que, (moufles, poulies, crochets ...etc.). Ce présent chapitre est consacré à l'étude de ces appareils (mécanismes) ainsi que leurs accessoires.

I. Historique [1][3]

I.1 Levier (Préhistoire) :

Au III^e siècle av. J.-C., Archimède aurait affirmé être capable de soulever le monde à l'aide d'un levier, pourvu qu'on lui fournît le point d'appui adéquat. Cette image, particulièrement frappante, était destinée à démontrer la toute-puissance de l'un des plus anciens outils utilisés par l'homme pour déplacer de lourdes charges. Cet instrument figure aux côtés du plan incliné, du treuil et de la poulie dans la liste des machines simples, dressée par l'architecte romain Vitruve, au I^{er} siècle avant notre ère. L'analogie que présentent ces divers appareils réside essentiellement dans l'extrême simplicité de leur fonctionnement et dans leurs remarquables propriétés mécaniques.

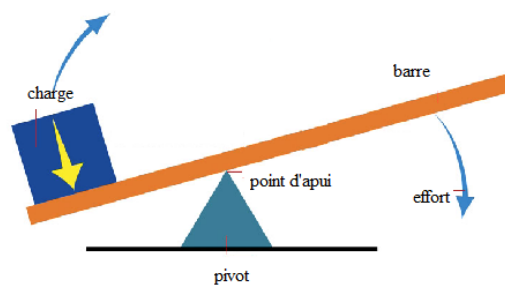


Figure I.1 photos d'un levier

I.2 Rampe (Antiquité) :

Plan incliné permettant le passage d'un niveau à un autre. Elle fut utilisée depuis l'antiquité par les égyptiens pour la construction des pyramides.



Figure I.2 photos d'une rampe

I.3 La chèvre (Moyen-âge) :

Cet appareil de levage fut employé depuis la plus haute antiquité pour la construction de certains monuments utilisant des blocs de pierre très lourde. Vu que la constitution de ces appareils était de bois et que la source d'énergie était musculaire, les charges levées atteignaient un maximum de 40 kilogramme. Du temps des Romains, ces chèvres furent surtout employées pour la construction des grands ouvrages d'art comme les aqueducs, les ponts et édifices.



Figure I.3 photo d'une chèvre

I.4 La grue à cage d'écureuil (Moyen-âge) :

C'est une grue dont le principe moteur est constitué par un tambour à l'intérieur duquel un homme qui marche entraîne l'ensemble et enroule le câble de levage. La démultiplication de la force de levage est de un pour dix entre diamètre du chemin de marche et diamètre du tambour d'enroulement.



Figure I.4 photo d'une grue à cage d'écureuil.

I.5 Les Grues contemporaines (aujourd'hui) :

La capacité des grues contemporaines a été grandement améliorée. Les grues statiques (aussi appelées grues à tour) peuvent être ancrées dans le sol (par fixation dans des fondations) et/ou lestées à la base par des blocs de béton.

La capacité actuelle de levage pour une grue à tour est, pour la plus grande, 64000 Kg à 30.30 m - 20000 Kg à 80.00 m de portée.



Figure I.5 photo d'une grue contemporaine.

II. Notion de la machine

La machine est un dispositif ou appareil qui reçoit de l'énergie sous une certaine forme utilisable et l'employer pour effectuer un travail utile particulier. Par exemple, les machines à vapeur utilisent l'énergie stipulée de la vapeur en un mouvement de translation.

Les machines de levage peuvent être définis comme des appareils pour soulever une force ou une charge (W) appliquer en un point au moyen d'une autre force appelée l'effort (E), appliquer en un autre point. Dans la majorité des cas, (E) est inférieur à (W), mais dans quelque temps il peut être supérieur à (W) [4]

Une machine a les trois caractéristiques suivantes :

- Le point d'application de l'effort.
- Mécanisme : l'organe mobile qui compose une machine.
- Le point où le travail utile est accompli, ou la charge est soulevé.

Les machines peuvent être classées en deux types :

- Machines simples
- Machines composées

II.a Machine simple

Elle a un seul point pour l'application de l'effort et un pour l'application de la charge, son mécanisme est simple. On peut citer quelques exemples de mécanismes simples qui sont : Levier, cric à vis, machines de brochage ...etc. [4]

II.b Machine composée

Elle a plus d'un point pour l'application de l'effort et la charge. Son mécanisme est compliqué. On peut citer quelques exemples des machines composées qui sont : imprimante, fraiseuse, raboteuse ...etc. [4]

II.1 Amplification des efforts de machine c'est le rapport entre le poids soulevé (W) et l'effort appliqué (E).

$$MA = \frac{W}{E} \quad (\text{I.1})$$

II.2 Rapport de vitesse c'est le rapport entre la distance parcouru par l'effort (E) et la distance (x) parcouru par la charge (W). $VR = \frac{y}{x}$ (I.2)

II.3 Rendement d'une machine c'est le rapport entre la puissance absorbée et la puissance utile. $\eta = \frac{Pu}{Pa}$ (I.3)

$$\text{D'où } \begin{cases} Pa = E \cdot y \\ et \\ Pu = W \cdot x \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

II.4 Relation entre η , MA et VR

$$\text{De (I.3) et (I.4) } \eta = \frac{W \cdot x}{E \cdot y} = \frac{W/E}{y/x} = \frac{MA}{VR} \quad (\text{I.5})$$

II.5 Sens du flux d'énergie

Du point de vue fonctionnel, on appelle moteur tout élément fournissant de l'énergie mécanique. Un élément absorbant de l'énergie est dit récepteur. Selon leur régime de fonctionnement certains organes jouent un double rôle :

- Un moteur électrique ou un moteur à piston devient un récepteur lorsqu'il contribue à freiner une machine;
- Une masse est réceptrice lorsqu'elle monte dans le champ de la gravité ou motrice lorsqu'elle descend;
- Une inertie est réceptrice lorsqu'elle accélère ou motrice lorsqu'elle décélère;
- Un ressort est récepteur lorsqu'il se tend ou moteur lorsqu'il se détend;

Le moteur d'un mécanisme de levage fournit une énergie W_m Figure(I.6) pour lever une charge. Après les pertes W_p dans les mécanismes de transmission et dans le treuil. La charge reçoit l'énergie (W_u). Le flux d'énergie dans ce cas va du moteur électrique jusqu'à la charge. En descente, la charge fournit l'énergie motrice W'_m ; après les pertes W'_p , l'énergie restante W_f est fournie au moteur. Le flux d'énergie prend maintenant sa source à la charge qui est motrice et se dirige vers ce qui est matériellement un moteur, mais qui joue en réalité le rôle d'un récepteur d'énergie mécanique; le moteur dans ce cas fonctionne comme un frein. [5]

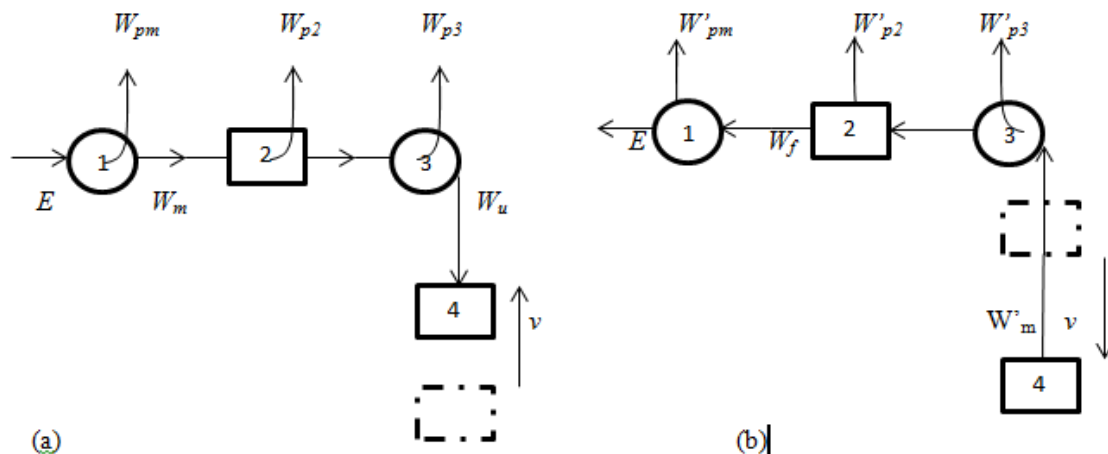


Figure I.6 Sens du flux d'énergie dans un mécanisme de levage.

II.6 Quadrant de fonctionnement

Pour une direction donnée, il existe deux sens du mouvement et deux sens pour l'effort. Il en résulte quatre combinaisons donnant deux sens du flux d'énergie.

La Figure I.7 représente un mécanisme de levage, on admet que la rotation est positive à la montée. Pour analyser le mouvement du mécanisme, il convient d'exprimer l'accélération par l'équation de la dynamique. [5]

$$Cm - Cr = J \frac{d\omega_m}{dt} . \quad (I.6)$$

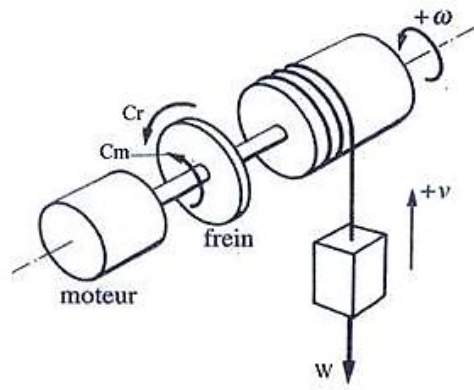


Figure I.7 schéma d'un mécanisme de levage.

D'où C_m : couple moteur (couple dû au moteur électrique).

C_r : couple résistant (couple dû à la charge).

J : moment d'inertie sommaire.

ω_m : vitesse angulaire.

- Quadrant I, montée :

$$C_m - C_r = J \frac{d\omega_m}{dt} .$$

La charge est résistante. Le moteur fournit de la puissance mécanique.

- Quadrant II, montée :

$$-C_m - C_r = J \frac{d\omega_m}{dt} .$$

Le couple moteur s'oppose au mouvement et freine.

- Quadrant III, descente :

$$-C_m - C_r = -J \frac{d\omega_m}{dt} .$$

Le signe moins devant l'accélération exprime ce sens du mouvement.

- Quadrant IV, descente:

$$-C_m + C_r = -J \frac{d\omega_m}{dt} .$$

Le moteur est en régime de freinage.

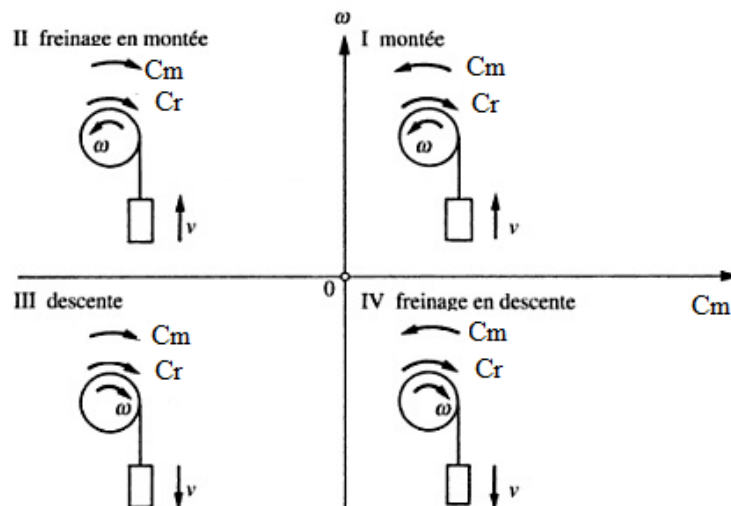


Figure I.8 Quadrants de fonctionnement d'un mécanisme de levage [5]

II.7 Réversibilité d'une machine

Quand la machine est capable d'effectuer le travail due à sa charge dans la direction de reverse, car l'effort est totalement enlevé, la machine serait réversible. Quand l'effort existe, ce dernier va effectuer un travail de résistance. Dès que l'effort sera enlevé le travail effectué sur la charge sera considéré comme une entrée et non une sortie.

Les conditions de réversibilité d'une machine sont les suivantes :

Soit

E =effort exigé, pour soulever la charge.

W =la charge soulevée par la machine.

y =distance parcourue par l'effort(E).

x = distance parcourue par la charge(W).

P_a =puissance absorbée.

P_u =puissance utile.

P_f =pertes par frottement. ($P_f = P_a - P_u$).

Dans une machine réversible la puissance utile de la machine doit être supérieure aux pertes par frottements lorsque E est nul.

$$W \cdot x > (E \cdot y - W \cdot x) \quad (I.7)$$

$$\begin{aligned} 2 \cdot W \cdot x > (E \cdot y) &\Rightarrow \frac{W \cdot x}{E \cdot y} > \frac{1}{2} &\Rightarrow \frac{MA}{VR} > \frac{1}{2} \\ \Rightarrow \eta > \frac{1}{2} > 0.5 \end{aligned}$$

Par conséquent pour qu'une machine soit réversible le rendement de la machine doit être supérieur à 50%. [4]

III. Appareil et accessoire de levage

III.1 Appareil de levage

On désigne par le terme appareil de levage, tout appareil destiné principalement à lever des charges. Auparavant, on avait tendance à faire la différence entre un appareil et un engin. Ainsi, pour désigner un appareil de levage motorisé et puissant, on utilise le terme engin de levage. Aujourd'hui, l'emploi de ce terme tend à disparaître au profit de l'emploi de plus en plus généralisé du terme appareil de levage.

Parmi les principaux appareils de levage, on retrouve les crics, vérins, palans, ponts roulants, portiques, potences et treuils. [6]

III.1.a Appareils légers

Ce sont des matériels fabriqués en série levant des charges allant jusqu'à 5 t.

On classe dans cette catégorie les appareils suivants :[7]

- **Appareils à bras**

Ce sont les palans à engrenages, les poulies, les moufles, les palans ou treuils à levier, les treuils de montage, les crics, les vérins, les chèvres... D'un poids léger, ils peuvent être déplacé facilement par les ouvriers ; ils sont tout particulièrement utilisés pour le montage des

infrastructures de base (tant qu'une électrification du lieu de travail n'est pas encore assurée) et surtout des travaux de montage et de réparation. [7]

- **Appareils mécanisés**

Ce sont les palans ou cabestans électriques, les treuils ou palans hydrauliques à poste fixe ou circulant sur monorails, des matériels utilisés essentiellement dans les ateliers. [7]

III.1.b Appareils lourds ou mi-lourd

Les charges levées par ces appareils peuvent évoluer de quelques tonnes à plusieurs dizaines de tonnes. Deux catégories sont à considérer selon leur mode d'installation. [7]

- **Appareils fixes**

Ce sont les appareils qui ne se déplacent que dans le cadre d'un espace limité par leur voie de roulement fixée au sol ou accrochée à la charpente de l'atelier, par exemple les ponts roulants (à crochet ou à benne), les portiques roulant sur des rails au sol, les grues fixes utilisées dans les ports. Ils nécessitent des raccordements électriques fixes et leur conduite est assurée par un personnel particulier. [7]

- **Appareils mobiles**

C'est la grande famille des grues mobiles automotrices sur pneumatiques ou sur chenilles. Rentrent également dans cette catégorie les portiques porte-conteneurs et les grues de bâtiment à tour qui sont conçues pour être démontées, transportées et remontées d'un chantier à un autre. [7]

III.1.c Appareils de levage spécifiques

Ce sont des appareils de mise à niveau destinés à lever des ouvriers spécialisés pour effectuer des opérations de montage ou de contrôle, ou bien des plates-formes élévatrices hydrauliques, soit motorisées, soit adaptées à un camion. On peut également classer dans cette catégorie des engins utilisés pour le chargement et le déchargement des véhicules tels que les grues auxiliaires ou hayons élévateurs, mais aussi des matériels lourds destinés à des usages très particuliers tels que grues flottantes, grues de bord, grues sur voies ferrées, etc. [7]

Les appareils de levage spécifiques souvent rencontrés sont les suivants :

- **Plates-formes élévatrices mobiles**

Les élévateurs mobiles de personnes sont des machines destinées à placer des personnes dans une position de travail exécuté depuis une plate-forme ou une nacelle montée sur une structure élévatrice fixée sur un véhicule ou sur un châssis remorqué, poussé ou automoteur. [8]

- **Grues auxiliaires**

Sont des grues moyennes, puisqu'elles chargent ou déchargent leur véhicule porteur ou sa remorque ; elles doivent donc avoir un poids limité, de manière à laisser une charge utile importante au convoi dont elles font partie, et une puissance permettant les opérations de chargement (ou de déchargement) des masses (divisibles ou non) que le véhicule transporte. [9]

- **Hayons élévateurs pour marchandises**

On appelle hayon élévateur, une plate-forme élévatrice fixée à l'arrière d'un véhicule de transport servant à élever ou à descendre des marchandises de toute nature entre le sol et le plancher du camion. L'utilisation des hayons améliore considérablement les conditions de travail et surtout diminue de façon conséquente les temps d'immobilisation des véhicules. [10]

III.2 Quelques appareils de levage

III.2.a Cric et vérins

Les crics et les vérins constituent une classe particulière d'appareils de levage parce qu'ils agissent par poussée sur la charge. Il existe cependant une certaine confusion entre le cric et le vérin. Le cric comprend normalement une crémaillère dont le mouvement de poussée sur la charge se fait par à-coup et sur une courte distance, alors que le vérin comprend un piston ou une vis dont le mouvement de poussée est continu. [6]

III.2.b Palan

Le palan est un appareil de levage qui est généralement suspendu et qu'on utilise, à poste fixe ou mobile, pour déplacer verticalement une charge. Il est muni d'un système de démultiplication de l'effort à fournir pour l'entraînement manuel ou motorisé de la charge. [6]

III.2.c Pont roulant

Le pont roulant est une structure qui se déplace sur deux voies de roulement parallèle aérienne et qui est constitué d'une ou deux poutres qui permettent le déplacement d'un appareil de levage. Il est muni de mécanismes d'entraînement manuels ou motorisés qui produisent les divers mouvements de l'ensemble. On distingue deux grandes catégories de ponts roulants : les ponts roulants posés et les ponts roulants suspendus [6].

III.2.d Portique

Le portique est une structure qui est constituée d'une ou plusieurs poutres munies de jambages sur lesquelles est placé un appareil ou accessoire de levage. [6]

III.2.e Potence

La potence est une structure constituée d'un bras horizontal qui pivote sur son axe et sur lequel est placé un appareil ou un accessoire de levage. Elle peut comprendre également une colonne sur laquelle est alors fixé le bras horizontal ; dans le cas contraire, il est prévu que le bras soit fixé directement à la structure du bâtiment. [6]

III.2.f Treuil

Le treuil est un appareil de levage et de traction qui agit sur des charges par l'intermédiaire d'un cordage, d'un câble ou d'une chaîne qui s'enroule sur un tambour ; il est actionné soit à la main, soit à l'aide d'un moteur. Muni ou non d'un mécanisme démultiplicateur, il comporte toujours un dispositif de freinage qui empêche la charge de descendre librement. Il s'utilise à poste fixe ou il peut être posé sur un pont roulant. [6]

III.2.g Ascenseur

Un ascenseur est un dispositif mobile ou semi mobile assurant le déplacement des personnes et des objets en hauteur (verticalement) sur des niveaux définis d'une construction. [11]

On distingue deux principales de familles d'ascenseurs.

III.2.g.1 Ascenseur hydraulique

Dans le cas le plus simple, la cabine est reliée au sommet d'un piston. Celui-ci se déplace verticalement à l'intérieur d'un cylindre. Le déplacement est contrôlé par une soupape hydraulique. Lorsque le liquide hydraulique est pompé dans le cylindre, la cabine monte; quand il revient dans le réservoir, la cabine descend; parfois on rajoute un contrepoids afin d'optimiser les consommations.[12]

III.2.g.2 Ascenseur électrique suspendu

L'entraînement de l'ascenseur est assuré par un moteur électrique. Le déplacement vertical de la cabine est favorisé par des guides scellés contre les parois par l'intermédiaire de patins avec ou sans galets de roulement [12].

III.2.h Grues

Une grue est un appareil de levage et de manutention réservé aux lourdes charges. La grue se caractérise essentiellement par une longue flèche en porte à faux, à laquelle la charge est suspendue, généralement au moyen d'un câble et d'un crochet ; cette flèche possède toujours au moins un degré de liberté par rapport au sol et parfois plusieurs, afin de permettre le déplacement de la charge dans un plan horizontal ; par exemple :

- rotation autour d'un axe vertical ;
- rotation (limitée) autour d'un axe horizontal ;
- déplacement sur rails (la grue étant équipée de roues), généralement de façon rectiligne (translation).

Les flèches des grues de chantier n'ont généralement qu'un seul degré de liberté, mais la charge est suspendue à un chariot mobile le long de leur flèche, dont la position doit rester toujours proche de l'horizontale. [13]

Selon le positionnement on distingue deux types de grue :

III.2.h.1 Grues statiques

Les grues statiques sont ancrées dans le sol (par fixation dans des fondations) et lestées à la base par des blocs de béton (une centaine de tonnes). Elles présentent l'avantage de pouvoir soulever de lourdes charges sur une hauteur quasi-illimitée. En revanche, pour construire une grue statique, on a besoin d'une grue mobile/télescopique qui va soulever un à un les différents éléments de la grue pour qu'ils soient assemblés par des ouvriers, en hauteur. [13]

III.2.h.2 Grues mobiles

Les grues mobiles sont montées sur roues et font partie intégrante d'un véhicule. Les contrepoids peuvent cependant être transportés séparément. Elles peuvent être déplacées facilement. [13]

III.3 Accessoire d'appareil de levage

Un accessoire d'appareil de levage est un organe ou un dispositif qui s'ajoute à un appareil de levage pour lui permettre d'accomplir la fonction qui le caractérise. Parmi les principaux accessoires de levage, on retrouve les crochets, les chaînes, les cordages, les grappins, les aimants et les ventouses de levage, ainsi les dynamomètres. [6]

III.4 Quelques accessoires d'appareils de levage

III.4.a Moufle

La moufle est un assemblage de plusieurs poulies dans une même chape qui permet, grâce à la démultiplication qui en résulte, de soulever une charge avec un moindre effort. [6]

III.4.b Poulie, réa et noix

La poulie est une roue concave destinée à recevoir une corde ou une chaîne, capable de tourner au tour de son axe. Le réa est une roue de poulie dont le pourtour présente une gorge qui peut loger une corde, un câble ou une courroie, dans le cas où le pourtour présente des alvéoles conçues pour entraîner une chaîne la roue s'appelle une noix. [6]

III.4.c Palonnier

Le palonnier est un accessoire de levage composé essentiellement d'une structure qui est suspendue à un appareil de levage et qui permet de répartir, dans l'espace, les points d'accrochage auxquels est fixée la charge. [6]

III.4.d Ventouse de levage

La ventouse de levage est un accessoire de levage qui comprend un ou plusieurs corps creux déformable qui sont montés sur une structure et qui maintiennent, par dépression, la charge à soulever. On utilise généralement plusieurs ventouses à la fois montées par exemple sur un palonnier. [6]

III.5 Dispositif

Un Mécanisme de levage comprend :

- un moteur ;
- une réduction par engrenage ;
- un tambour sur lequel s'enroule le câble ;
- un frein incorporé ou non au moteur ;
- un limiteur de course
- un appareillage de commande ;
- éventuellement, un limiteur de charge ou de couple [14].

IV. Généralités sur les entraînements électriques

L'entraînement électrique est un système électromécanique, constitué d'un dispositif de conversion d'énergie électrique, d'un mécanisme de transmission et d'un dispositif de commande.

IV.1 Type d'entraînements électriques

Un système d'entraînement électrique se compose en principe du moteur électrique et de la machine productrice; selon la tâche à accomplir, il peut être complété par un engrenage mécanique et un convertisseur. En fonction des exigences requises par le processus de travail, à savoir par exemple la capacité de commande ou de régulation et la précision des grandeurs réglées, il sera nécessaire de prévoir un système de traitement de l'information.

On distingue les types d'entraînements électriques suivants :

- Entraînements non asservis à une commande, pour conditions d'exploitation simples, charge pratiquement constante, avec démarreur pour puissances importantes, protection du moteur et simple commutateur.
- Entraînements asservis à une commande, pour exploitation avec vitesse de rotation variable à l'aide d'un organe de réglage (convertisseur pour faire varier la fréquence du moteur ou transmissions à régime variable) et d'une commande correspondante.
- Entraînements réglés par un organe de contrôle (convertisseur pour alimentation du moteur électrique), saisie des états effectifs et régulation précise ou par paliers du couple de rotation, de la vitesse de rotation.
- Entraînements gérés par ordinateur, avec fonctions supérieures de protection, de coordination et d'optimisation pour la gestion d'entraînements indépendants ou coordonnés. [15]

IV.2 Généralités sur les moteurs des entraînements électriques

Un moteur électrique est une machine qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique.

IV.2.a Constitution

- **Stator et rotor**

Sur le plan mécanique, un moteur est constitué d'une partie fixe, le stator et d'une partie mobile, le rotor, entre lesquelles se trouve un petit intervalle d'air, l'entrefer. Dans pratiquement tous les moteurs, le rotor est à l'intérieur du stator, bien que la configuration inverse existe pour des applications particulières. [16]

- **Enroulements**

Suivant le type de moteur, des enroulements peuvent être placés sur le stator, sur le rotor ou les deux parties à la fois. On rencontre deux types d'enroulements :

- Les enroulements concentrés formés de bobines placées sur des pôles saillants
- Les enroulements distribués constitués de conducteurs placés dans des encoches du circuit magnétique et assemblés ensuite par des connexions frontales. [16]

- **Circuit magnétique**

Sur le plan électromagnétique, un moteur comporte un circuit magnétique, constitué d'un matériau ferromagnétique à forte perméabilité, d'enroulements et éventuellement d'aimants permanents. Le matériau ferromagnétique est nécessaire pour que le flux produit soit assez élevé et pour qu'il soit canalisé afin de pouvoir utiliser correctement ses effets. Les parties ferromagnétiques soumises à un flux constant ou lentement variable peuvent être massives, alors que les parties soumises à un flux à variation rapide sont obligatoirement feuilletées pour limiter les pertes par courants de Foucault. [16]

IV.2.b Comportement mécanique des moteurs électriques

Le rotor et la charge entraînée forment un système de moment d'inertie J tournant à la vitesse de rotation ω autour d'un axe et soumis à un couple moteur de moment C_m et à des couples résistants de moment résultant C_r . Le principe fondamental appliqué à ce système et décrit par l'équation (I.6).

En régime permanent, la vitesse est constante et la relation (I.6) traduit alors l'égalité du couple moteur et du couple résistant : $C_m = C_r$.

Il est alors souvent commode de retrancher le moment du couple correspondant aux pertes internes afin de faire apparaître le moment C_u du couple utile du moteur et le moment C_{ch} du couple résistant de la charge. [16]

IV.2.b.1 Moment d'inertie

Le moment d'inertie du rotor chiffre la façon dont le moteur s'oppose aux variations de vitesse. Plus le moment d'inertie est grand, plus il faut un couple élevé pour obtenir une accélération donnée. Comme le couple est une grandeur importante pour le dimensionnement du moteur, on a tout intérêt d'avoir un faible moment d'inertie. Ce dernier dépend à la fois de la masse des parties mobiles et de la façon dont elles sont placées par rapport à l'axe de rotation, En effet, le moment d'inertie d'un solide (V) par rapport à un axe (Δ) est défini par

$$J = \iiint_{(v)} r^2 \rho dv \quad (I.8)$$

D'où r : Est la distance d'un point M du solide à l'axe de rotation

ρ : est la masse volumique en ce point.

dv : est l'élément de volume.

Le moment d'inertie d'un cylindre plein et homogène de masse m , de rayon R et de longueur l . La masse volumique sera

$$\rho = \frac{m}{\pi R^2 l} \quad (I.9)$$

Le moment d'inertie par rapport à l'axe du cylindre se calcule en considérant des nappes cylindrique de rayon r et d'épaisseur dr :

$$J = \int_0^R r^2 \rho 2\pi r l dr \quad [\text{Kgm}^2] \quad (I.10)$$

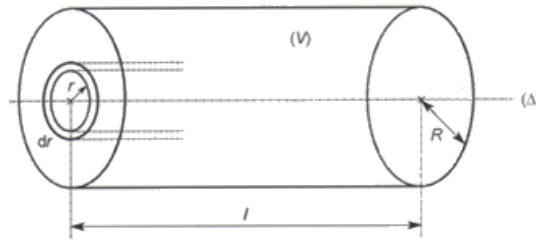


Figure I.10 Découpage d'un cylindre en nappes cylindriques pour le calcul de son moment d'inertie

La résolution de l'intégrale précédente donne $J = \rho \pi l \frac{R^4}{2}$

En introduisant la masse on arrive à :

$$J = \frac{1}{2} m R^2 \quad (\text{I.11})$$

On constate que le moment d'inertie est d'autant plus grand que la masse est importante et que le rayon du cylindre est élevé. On retrouve un résultat analogue dans tous les cas. [16]

IV.2.c Moteurs des entraînements électriques

Les entraînements électriques sont munis de moteur électrique permettant d'optimiser le processus industriel, ces moteurs électriques sont soit des moteurs à courant alternatif ou à courant continu.

IV.2.c.1 Moteur asynchrones

IV.2.c.1.a Définition

Un moteur asynchrone est un moteur à courant alternatif pour lequel la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant, un moteur à induction est un moteur asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux ou plus de deux circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique. [16]

IV.2.c.1.b Rotor bobiné

Dans ce cas, les encoches présentes à la périphérie du rotor contiennent un enroulement similaire à celui du stator. Le bobinage rotorique est toujours couplé en étoile et il est accessible de l'extérieur grâce à un système de bagues et de balais, ce qui permet d'agir sur les caractéristiques du moteur dans certains fonctionnements. [16]

IV.2.c.1.c Rotor à cage

Dans ce cas, les encoches contiennent des barres reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit. L'ensemble forme une cage d'écureuil. Les barres sont en alliage d'aluminium pour les machines de petite et moyenne puissance, en cuivre pour les moteurs de forte puissance. Dans ce cas la partie rotorique n'est pas accessible de l'extérieur, la cage rotorique forme un enroulement dont le nombre de phases et le nombre de pôles ne sont pas fixés par construction. [16]

IV.2.c.1.d Utilisation

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence. Les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité un rotor à cage. Les progrès faits ces dernières années dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil. [16]

IV.2.c.2 Moteur synchrones

IV.2.c.2.a Définition

Un moteur synchrone est un moteur à courant alternatif pour lequel la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. [16]

IV.2.c.2.b Moteur synchrone à aimants

Le rotor est feuilleté et comporte des aimants permanents, soit montrés en surface, soit enterrés. [16]

Le rotor des moteurs à aimants ne comportent pas d'amortisseurs. Ceux-ci ne sont pas nécessaires pour la stabilité du fonctionnement ou le démarrage en moteur asynchrone car la machine est systématiquement associée à une alimentation électronique. De plus, leur présence serait néfaste au comportement dynamique du système. [16]

IV.2.c.2.c Moteur synchrone rotor bobiné

Les machines à rotor bobiné peuvent être à entrefer constant ou à entrefer variable. Les rotors à pôles saillants sont bien adaptés aux machines multipolaires destinées à des vitesses de rotation basses ou moyennes.

Les moteurs à rotor bobiné sont souvent munis d'amortisseurs. Ce sont des barres de cuivre placées dans des encoches à la périphérie des pôles et reliées entre elles pour former une portion de cage ou une cage complète analogue à celle d'un moteur asynchrone. Les amortisseurs s'opposent aux oscillations consécutives aux changements brusques de fonctionnement. Ils permettent également de démarrer la machine comme un moteur asynchrone. [16]

IV.2.c.2.d Moteur synchrone à réluctance variable

Pour ce type de machines, le rotor ne comporte ni aimants permanents, ni enroulements d'excitation. [16]

IV.2.c.2.e Utilisation

Les moteurs synchrones sont rencontrés dans tous les domaines de puissance, de moins d'un Watt à plus de dix mégawatts, mais avec des technologies différentes. [16]

- **Moteurs synchrones à aimant**

Les moteurs synchrones à aimants sont présents pour les petites et moyennes puissances, jusqu'à quelques dizaines de kilowatts, plus rarement jusqu'à quelques centaines de kilowatts. Ils sont systématiquement associés à une alimentation électronique. Cette catégorie d'applications comprend les machines-outils, les robots, et plus généralement les entraînements à performances élevées. Grâce à leur rendement élevé, les moteurs synchrones à aimants occupent également une place importante dans les prototypes de véhicules électriques ou hybrides. [16]

- **Moteur synchrone à rotor bobiné**

Les moteurs synchrones à inducteur bobiné sont surtout utilisés dans le domaine des fortes puissances. Ils sont soit branchés directement sur le réseau, soit associés à une alimentation électronique. On rencontre à la fois des machines à entrefer constant et à pôles saillants. [16]

Dans cette catégorie d'application, on rencontre à la fois la traction ferroviaire, la propulsion des navires, les laminoirs, les compresseurs, Toutefois, la concurrence des moteurs asynchrones a réduit l'usage des moteurs synchrones dans certains de ces applications de forte puissance. [16]

IV.2.c.3 Moteur à réluctance variable

IV.2.c.3.a Définition

Un moteur à réluctance variable est un moteur électrique dans lequel le couple est produit par la tendance de sa partie mobile à se déplacer vers une position où l'inductance de la phase alimentée est maximale c'est à dire où la réluctance vue par cette bobine est minimale, L'appellation anglo-saxonne est *SRM* pour *Switched reluctance motor*. [16]

IV.2.c.3.b Utilisation

Les moteurs à réluctance variable sont employés dans les entraînements industriels, mais aussi pour des véhicules électriques et pour des applications aéronautiques ou leur excellente fiabilité est un avantage important. Les moteurs à réluctance variable sont disponibles pour les petites et moyennes puissances (de quelques watts à quelques centaines de kilowatts). [16]

IV.2.c.4 Moteur à courant continu

IV.2.c.4.a Définition

Un moteur à collecteur à courant continu est une machine destinée à transformer de l'énergie électrique disponible sous forme de tension et de courant continu, ou tout au moins unidirectionnels, en énergie mécanique. Il comporte un induit, un collecteur et des pôles magnétiques excités par une source de courant continu ou constitués d'aimants permanents.[16]

IV.2.c.4.b Utilisation

Pendant longtemps, le moteur à courant continu a été la machine à vitesse variable par excellence. De plus en plus remplacé dans ce rôle par le moteur à courant alternatif dans les applications industrielle, il est encore bien présent dans les réalisations existantes et il le sera encore pendant un certain nombre d'années, compte tenu de la durée de vie parfois assez longue des installations. Dans les applications industrielles, c'est le moteur à excitation séparé qui est de loin le plus courant : on le retrouve dans des domaines tels que le levage, le pompage, etc. L'application principale du moteur à excitation série est la traction ferroviaire.

Le moteur à courant continu a mieux résisté dans diverses applications de faible puissance. Dans les jouets, les petits moteurs à aimant alimentés par pile. Dans le domaine de la robotique, les petits actionneurs à courant continu à aimant sont encore bien présents malgré la concurrence des moteurs à courant continu à aimant sans balais.

Enfin, dans les accessoires automobiles, le moteur à courant continu est la solution traditionnelle. [16]

V. Généralités sur les réducteurs (Transmission de puissance)

Dans la majorité des cas les moteurs, (électriques ou thermiques) ne délivrent pas à la charge les valeurs souhaitées. Le plus souvent, la vitesse de rotation du moteur est supérieure à la vitesse du mouvement de la charge, ce qui nécessite l'utilisation d'un réducteur de vitesse. Ce même réducteur fait augmenter le couple exercé sur la charge [17].

V.1 Définition

Le rôle d'un réducteur de vitesse est de transmettre la puissance; du moteur au mécanisme d'action, tout en réduisant et augmentant la vitesse et le couple respectivement.

La Figure I.11 représente le choix simplifié du type de réduction.

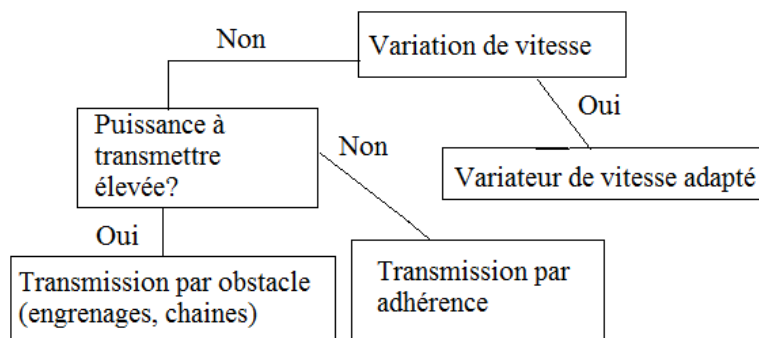
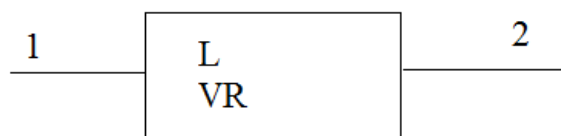


Figure I.11 Le choix simplifié du type de réduction [18]

NB: La variation de vitesse citée à la figure ci-dessus est une variation par le réducteur et non par le moteur.

V.2 Réduction

Un mécanisme est caractérisé par sa fonction d'espace L ou, très souvent dans le cas de transmissions uniforme, par son rapport de vitesses VR . On se propose de ramener à l'élément de réduction (1) des grandeurs attachées à l'élément (2) (figureI.12). Une grandeur réduite doit conférer au modèle équivalent le même comportement dynamique que la grandeur réelle au système réel. [5]



FigureI.12 Mécanisme.

V.3 Transmission par obstacle

La transmission par obstacle s'est développée au cours du temps au travers des engrenages. Ceux-ci sont en effet appréciés pour leur robustesse, leur rendement, leur modularité et leur précision. Ils sont effectués par un engrenage, courroies crantées ou Pignon et chaîne. [18]

V.4 Transmission par adhérence

Ces systèmes sont utilisés pour transmettre la puissance en conservant le sens de rotation. Ils évitent les bruits mais nécessitent un entretien fréquent par remplacement de la courroie. La transmission est assurée par des courroies plates, des courroies toriques et des courroies trapézoïdales, courroies polyvés et Roues de friction. [18]

V.5 Cinématique

Les déplacements sont liés par la loi d'espace supposée holônôme, c'est-à-dire indépendante de la vitesse, $x = L(y)$; Un déplacement y de l'élément (1) est identique au déplacement réduit x' , donc $x' = L^{-1}x$ [5]

Avec L^{-1} : la fonction inverse de la loi d'espace.

Dans le cas d'un déplacement élémentaire, on a

$$dx = L' dy \text{ et } dx' = \frac{1}{L'} dx$$

La dérivation par rapport au temps donne la vitesse réduite

$$V_2' = \frac{1}{L'} V_2$$

Par la définition du rapport de vitesse VR ou j (relation I.2) on a aussi

$$\begin{cases} x' = j \cdot x \\ \text{et} \\ V_2' = j \cdot V_2 \end{cases}$$

V.6 Inertie

L'énergie cinétique constitue le critère d'équivalence des inerties. L'énergie cinétique E'_{c2} (Figure I.13) de l'inertie réduite doit être égale à l'énergie cinétique E_{c2} de la masse m_2 avec la vitesse v_{G2} de son barycentre et du moment d'inertie autour du barycentre J_{G2} avec la vitesse ω_2 [5]

$$\frac{I_2'}{2} v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_{G2}^2 + \frac{1}{2} J_{G2} \omega_2^2$$

$$\Rightarrow I_2' = m_2 \frac{v_{G2}^2}{v_1^2} + J_{G2} \frac{\omega_2^2}{v_1^2}$$

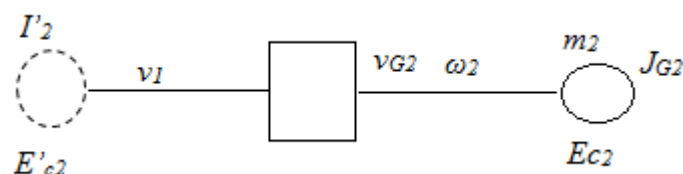


Figure I.13 Inertie réduite.

Considérons le cas d'une transmission tournante (figure I.14) avec le rapport de transmission $j = \frac{\omega_1}{\omega_2}$. La réduction de J_2 sur l'arbre d'entrée est $J_2' = \frac{1}{j^2} J_2$

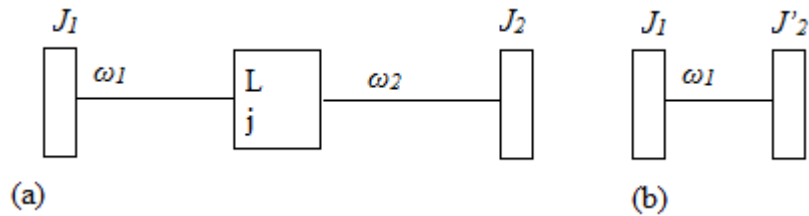


Figure I.14 transmission tournante: (a) système; (b) système réduit à l'arbre 2.

VI. Application

On considère un chariot Figure I.15 déplaçant sur rails transportant une charge de masse (m_c) sur une rampe, ayant les données techniques suivantes :

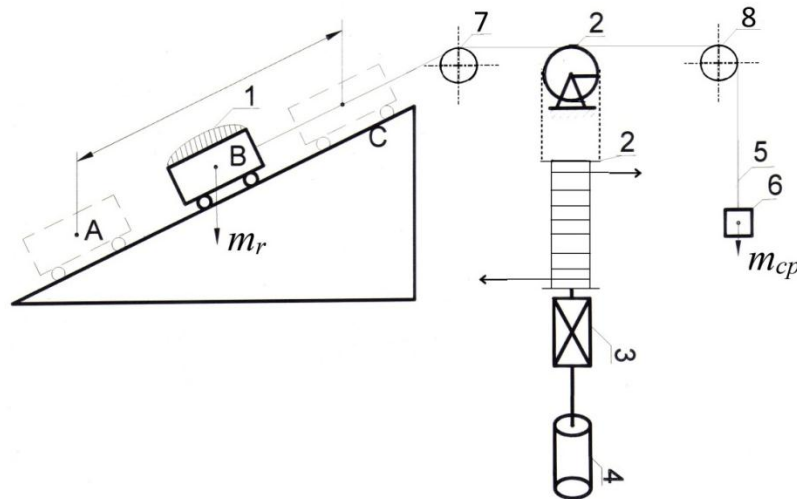


Figure I.15 mécanisme de levage.

- | | |
|---------------|---|
| 1 Chariot ; | 6 Contre poids ; |
| 2 Tambour ; | 7 Poulie de renvoi du câble coté chariot ; |
| 3 Réducteur ; | 8 Poulie de renvoi du câble coté contrepoids. |
| 4 Moteur ; | |
| 5 Câble ; | |

VI.1 Données techniques du mécanisme

- Diamètre de la roue du chariot : $D_c=0.25m$;
- Diamètre du tourillon de la roue : $D_{tr}=0.05m$;
- Coefficient de friction d'oscillation sur rail : $f=(5 \div 6).10^{-4}m$;
- Coefficient de friction de glissement des paliers de roue : $\mu=0.01 \div 0.015$;
- Coefficient de résistance à la friction du mouvement de la roue : $k=2.2$;
- Rendement du réducteur : $\eta_r=0.92$;
- Rendement du tambour : $\eta_t=0.92$;
- Masse du chariot : $m_r=50kg$;
- Masse de la charge : $m_c=500kg$;
- Masse du contre poids : $m_{cp}=200kg$;
- Vitesse de fonctionnement $V_f=0.7m/s$;
- Accélération admissible du chariot $a=0.8m/s^2$;
- Moment d'inertie du tambour : $J_t=6kg.m^2$;

Diamètre du tambour : $D_t=0.56m$.

Angle d'inclinaison du trajet : $\alpha=42^\circ$;

Temps de chargement $t_c=9s$;

Temps de déchargement $t_d=7s$;

Longueur du trajet du mouvement du chariot entre les points A et B : $l=20m$;

Longueur du trajet du mouvement du chariot chargé à V_f : $l'=18.5m$;

Longueur du trajet du mouvement du chariot vide à V_f : $l''=19m$.

VI.2 Inconnues

Puissance du moteur : P_m ;

Facteur de transmission j .

Diamètre et type du câble.

VII. Conclusion

Ce premier chapitre est dédié à la présentation du contexte général du mémoire. Au départ, nous avons présenté un historique sur les moyens de levage, ce qui nous permet de conclure que, si les appareils de levage, aujourd'hui, sont bien sophistiqués c'est parce que leurs utilisations ont commencé depuis la préhistoire. Par la suite on a présenté la machine en générale et une machine de levage en particulier, ce qui nous permet de conclure que la fonction principale des appareils de levage est de soulever des charges importantes en exerçant le moindre effort, et finalement on a pris le soin de donner les différents éléments constituant ces machines, ce qui nous permet de conclure, que la diversité des éléments constituant ces appareils permet de justifier la présence de plusieurs appareils de levage.

CHAPITRE II : Dimensionnement

Dès qu'une machine peut se raccorder à un réseau, le choix se dirige directement sur le moteur électrique, vu de leur simplicité et parce que ils sont fabriqués en grandes série. Ils sont propres, silencieux et fiables. Par la suite, ce choix nécessite à son tour un autre choix du type du moteur à utiliser. Le dimensionnement de la puissance de ce dernier nécessite le passage par l'élément récepteur, au bout de la chaîne cinématique, puis en remontant le cheminement de l'énergie jusqu'à l'organe d'entrée auquel est accouplé le moteur. [5]

I. Définition des forces et des couples Figure II.1

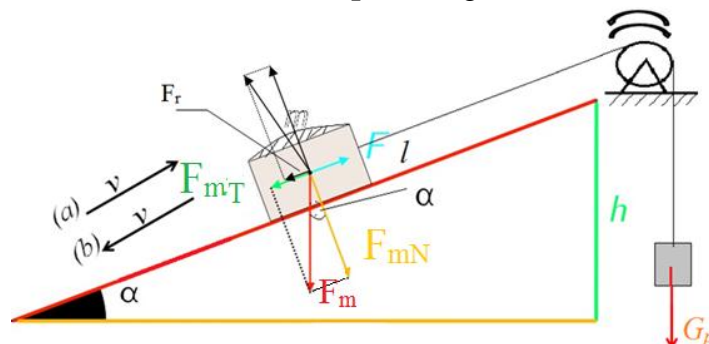


Figure II.1 Représentation des forces.

Les données numériques utilisées dans ce chapitre sont données au chapitre précédent

I.1 analyse et calcul des forces agissant sur le système

Le couple sur l'arbre du tambour se calcule par la relation (II.1).

$$C_t = (F_\Sigma \mp G_p) \cdot R_t \quad (\text{II.1})$$

D'où : F_Σ : résultante des forces actives (F_a) et réactives (F_r).

$$F_\Sigma = F_a \mp F_r \quad (\text{II.2})$$

$$F_r = \mu_r \cdot F_N = \mu_r \cdot F_m \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{II.3})$$

$$\mu_r = (f + \mu \cdot r_{tr}) \cdot \frac{2k}{D_c} \quad (\text{II.4})$$

D'où : F_r Force résistante due à la charge, La F_r montré à la (figure II.1) est une force résistante à la montée, La force résistante à la descente est de sens opposé, notamment pour F ;

μ_r : Le coefficient de résistance au mouvement, dépend à la fois du coefficient, d'oscillation du frottement sur le rail, des frottements par glissement dans les roulements de la roue et du coefficient de résistance à la friction du mouvement de la roue.

$$r_{tr} : \text{Rayon du tourillon de la roue} : r_{tr} = \frac{D_{tr}}{2} = 0.025 \text{ m}$$

$$\mu_r = (5 \cdot 10^{-4} + 0.01 \times 0.025) \cdot \frac{2 \times 2.2}{0.25} = 0.0132$$

I.1.a Calcul du poids du chariot F_m

On décompose le poids du chariot et celui de la charge en deux composantes, composante normale F_N et composante tangentielle F_T ;

$$\begin{cases} F_N = F_m \cdot \cos(\alpha) \\ F_T = F_m \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (\text{II.5}).$$

• Mouvement vers le haut

$$F_{m_{montée}} = (m_r + m_c) \cdot g$$

$$\text{Avec } g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$F_{m_{montée}} = (50 + 500) \times 9.8 = 5390 \text{ N}$$

$$\begin{cases} F_{mN_{montée}} = 5390 \cdot \cos(42) = 4005.55 \text{ N} \\ F_{mT_{montée}} = 5390 \cdot \sin(42) = 3606.61 \text{ N} \end{cases}$$

On calcule la force résistante due à la charge en utilisant la relation II.3

$$F_{r_{montée}} = \mu_r \cdot F_{N_{montée}} = 0.0132 \times 3277.27 = 52.87 \text{ N}$$

- **Mouvement vers le bas**

$$F_{m_{descente}} = m_r \cdot g$$

$$F_{m_{descente}} = (50) \cdot 9.8 = 490 \text{ N}$$

$$\begin{cases} F_{N_{descente}} = 490 \cdot \cos(42) = 364.14 \text{ N} \\ F_{T_{descente}} = 490 \cdot \sin(42) = 327.87 \text{ N} \end{cases}$$

On calcule la force résistante due à la charge en utilisant la relation II.3

$$F_{r_{descente}} = \mu_r \cdot F_{N_{descente}} = 4.80 \text{ N}$$

I.1.b Calcul du poids du contrepoids G_{CP}

Le mouvement du contrepoids est vertical donc on n'aura pas besoin de décomposer cette force.

$$G_{cp} = m_{cp} \cdot g$$

$$G_{cp} = 1960 \text{ N}$$

I.2 Valeur du couple et de la puissance à l'arbre du tambour

I.2.a Mouvement vers le haut

Pour que le chariot se déplace vers le haut, le moteur doit exercer une force supérieure ou égale à $F_{monté}$ avec

$$F_{monté} = F_{r_{montée}} + F_{T_{montée}} - G_{cp} \quad (\text{II.6}).$$

$$F_{monté} = 1699.48 \text{ N}$$

- **Couples à l'arbre du tambour**

$$C_{t_{monté}} = F_{monté} \cdot \frac{D_t}{2} = 475.85 \text{ N.m}$$

- **Puissance à l'arbre du tambour**

$$P_{t_{monté}} = C_t \cdot \omega_f \quad (\text{II.7}).$$

$$\text{Avec } \omega_f = \frac{v_f}{R_t} \quad (\text{II.8}).$$

$$\omega_f = \frac{2 \cdot v_f}{D_t} = 2.5 \text{ rad/s}$$

$$\Rightarrow n_f = \frac{60 \cdot \omega_f}{2\pi} = 23.88 \text{ tr/min}$$

$$P_{t_{monté}} = 289.56 \times 2.5 = 1189.64 \text{ W}$$

I.2.b Mouvement vers le bas

Pour que le chariot se déplace vers le bas, le moteur doit exercer une force supérieure ou égale à $F_{descente}$ avec

$$F_{descente} = F_{rdescente} - F_{Tdescente} + G_{cp}$$

$$F_{descente} = 4.81 - 327.87 + 1960 = 1636.93 \text{ N}$$

- **Couples à l'arbre du tambour**

$$C_{tdescente} = F_{descente} \cdot \frac{D_t}{2} = 458.34 \text{ N.m}$$

- **Puissance à l'arbre du tambour**

$$P_{tdescente} = C_{tdescente} \cdot \omega_f$$

$$P_{tdescente} = 1145.85 \text{ W}$$

I.3 Calcul de câble

La tension du câble T est égale à la somme du poids de la charge et le poids du contre poids

$$T = F_{Tmontée} + F_{monté} = 5306 \text{ N}$$

On adopte un coefficient de sécurité k, k=7.5.

$$F_{ktra} = k.T = 39 \text{ kN}$$

On choisit le câble de type - FC 1960 B sZ, du diamètre $d_{câble}$, $d_{câble} = 8 \text{ mm}$. [Catalogue de BRUGG LIFTING] On choisit le même pour le contre poids que pour la charge.

I.3.a Calcul des contraintes sur le câble

Le câble FC 1960 B sZ est un câble ayant : 6 torons de 7 fils, soit 42 fils de diamètre 0.9mm ; Charge de rupture indiquée : $F_{rup} = 44.59 \text{ kN}$

- **Contrainte due à la charge**

$$n_1 = \frac{T}{\frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4}} \quad (\text{II.9}).$$

Où n : nombre total des fils de diamètre d.

$$n_1 = 198.68 \text{ N/mm}^2$$

- **Contrainte d'incurvation**

$$n_2 = \frac{1}{4} \cdot E \cdot \frac{d}{D_t} \quad (\text{II.10}).$$

Où E : module d'élasticité longitudinale $E = 220\,000 \text{ N/mm}^2$

$$n_2 = \frac{1}{4} \times 220\,000 \times \frac{0.9}{560} = 88.39 \text{ N/mm}^2$$

- **Contrainte totale n :**

$n = n_1 + n_2 = 287.07 N/mm^2$, acceptable. L'acier qui constitue le câble a une charge de rupture $R_r = 1960 N/mm^2$. coefficient de sécurité réel :

$$k_{\text{réel}} = \frac{1960}{267.43} = 6.82$$

I.4 Dimensionnement des poulies :

- **Diamètre de la poulie :**

Le diamètre des poulies de renvoi doit être au minimum supérieur à 14 fois celui du câble. [Catalogue de BRUGG LIFTING]

$$D_p = 14d_{\text{câble}} = 112mm$$

- **Masse de la poulie :**

On peut tirer directement du catalogue de BRUGG LIFTING la masse de la poulie

$$M_p \approx 5.32 kg$$

- **Moment d'inertie :**

Puisque sa géométrie est cylindrique on calcule son moment d'inertie par la relation (I.11)

$$J_p = \frac{1}{2} \times 5.32 \times 0.056^2 = 0.00638 Kgm^2$$

I.5 Calcul préliminaire de la puissance d'entraînement de la machine :

$$P_{\text{séq}} \geq k_c \sqrt{\frac{P_{\text{smonté}}^2 \cdot t_{\text{monté}} + P_{\text{sdescente}}^2 \cdot t_{\text{descente}}}{t_{\text{monté}} + t_{\text{descente}}}} \quad (\text{II.11}).$$

D'où : t_{monte} Temps de montée, $t_{\text{monte}} = \frac{l}{v_f}$

t_{descente} Temps de descente $t_{\text{descente}} = t_{\text{monte}}$

k_c : Coefficient de différence entre le diagramme de charge dynamique du moteur et celui en statique. $k_c = (1.1 \div 1.3)$. On prend $k_c = 1.1$

$P_{\text{smonté}}$: La puissance a l'arbre du moteur pour le mouvement vers le haut

$$P_{\text{smonté}} = P_{\text{tmonté}} \frac{1}{\eta_t \cdot \eta_r} \quad (\text{II.12}).$$

$P_{\text{sdescente}}$: Puissance a l'arbre du moteur pour le mouvement vers le bas

$$P_{\text{sdescente}} = P_{\text{tdescente}} \frac{1}{\eta_t \cdot \eta_r} \quad (\text{II.13}).$$

- **Application numérique**

$$t_{\text{monte}} = \frac{20}{0.7} = 28.57s$$

$$P_{\text{smonté}} = 1405.53W$$

$$P_{\text{sdescente}} = 1353.79W$$

$$P_{\text{séq}} \geq 1517.89W$$

II. Puissance d'entraînement avec prise en compte de la durée d'amorçage (facteur de charge) $DD\%$

On appelle durée d'amorçage ou facteur de charge le rapport de la période de marche à la durée totale du cycle :

$$DD\% = 100 \frac{t_f}{t_{cycle}}$$

$$DD_s\% = 100\%$$

$$DD\% = 100 \frac{t_{monté} + t_{descente}}{t_{monté} + t_c + t_{descente} + t_d}$$

$$DD\% = 100 \frac{28.57 + 28.57}{28.57 + 9 + 28.57 + 7} = 78.12\%$$

$$P_{moteur} = P_{s\acute{e}q} \sqrt{\frac{DD\%}{DD_s\%}} \quad (\text{II.14}).$$

$$P_{moteur} = 1517.89 \sqrt{\frac{78.12}{100}} = 1341.64 \text{ W}$$

III. Choix du moteur

III.1 Choix du type du moteur

En se basant sur ce qu'on a vu au chapitre I (IV.2.c), on va éliminer les moteurs, synchrone et asynchrone à rotor bobiné de ce choix, car le premier s'utilise dans des applications de grandes puissances si il est à rotor bobiné et dans les entraînements à hautes performances si il est à aimant permanent, et le deuxième qui peut être remplacé par le moteur à cage qui est plus économique pourvu qu'on lui choisit une bonne commande.

La nécessité d'éliminer des secousses pendant tous les modes d'opération, pour éviter la formation des vagues d'élasticités dans le système [19] conduit à éliminer le moteur à reluctance variable.

Le choix entre le moteur à courant continu et le moteur asynchrone à cage est une sélection délicate, car ces deux moteurs sont les plus utilisés dans les appareils de levage.

Le tableau II.1 nous permet de sélectionner le type qui va de mieux pour notre système.

On favorise pour cette application le moteur asynchrone à cage triphasé. Les avantages est inconvénient en gras dans le tableau suivant, sont les critères de sélection pour notre système.

Tableau III.1 : Tableau de comparaison des moteurs [16]

| | Avantage | Inconvénient |
|--------------------------|---|---|
| Moteur à courant continu | <ul style="list-style-type: none"> - Couple élevé au démarrage - Contrôle du couple et de la vitesse indépendants - Vitesse de rotation stable et précise | <ul style="list-style-type: none"> - Dissipation d'énergie (au rotor) difficile à évacuer - Collecteur : - Coût élevé - Complexité de fabrication - Entretien nécessaire - Durée de vie limitée |
| Moteur asynchrone | <ul style="list-style-type: none"> - Robustesse, fiabilité - Pas de collecteur - Peu d'entretien - Durée de vie élevée - Coût faible | <ul style="list-style-type: none"> - Inertie élevée - Commande électronique complexe en variation de vitesse - Rendement plus faible qu'un |

| | | |
|------------------------------|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> - Couple, non nul au démarrage - Pilotage de la vitesse en boucle ouverte avec un fonctionnement stable | <ul style="list-style-type: none"> moteur synchrone - Difficulté de fonctionnement à faible vitesse |
| Moteur à reluctance variable | <ul style="list-style-type: none"> - faible coût - excellente fiabilité - vitesses de rotation très élevées - commande indépendante de la vitesse et du couple | <ul style="list-style-type: none"> - exige une alimentation électronique - complexité de la modélisation de sa commande - l'ondulation du couple et le bruit sont assez élevées |

III.2 Choix de la puissance du moteur :

Choisir un moteur en termes de puissance est un travail itératif qui se fait à l'aide des catalogues selon la démarche suivante :

- Choisir un moteur dont la puissance nominale est telle qu'il puisse toujours fournir la puissance d'entraînement requise sans échauffement anormal ;
- Vérifier que le moteur satisfait les conditions de démarrage ; si tel n'est pas le cas, choisir un moteur donnant un couple suffisant pour démarrer la machines dans le temps prescrit ;
- Vérifier que le moteur peut démarrer avec la fréquence requise sans chauffer anormalement. [5]

On choisit trois moteurs de puissance 1.5kw ayant les paramètres de fonctionnement suivants

- **Moteur 1** : $J_{mot}=0.0063\text{Kgm}^2$, $n_n=925\text{tr/min}$;
- **Moteur 2** : $J_{mot}=0.0035\text{Kgm}^2$, $n_n=1410\text{tr/min}$;
- **Moteur 3** : $J_{mot}=0.0015\text{Kgm}^2$, $n_n=2855\text{tr/min}$.

Puis on fait le calcul du rapport de transmission j_i et le produit $j_{if} \cdot J_{mot(i)}$ après avoir identifié le rapport de transmission effectif j_{if} à partir des catalogues.

- **Moteur 1 :**

$$j_1 = \frac{n_n}{n_f} = \frac{925}{23.88} = 38.74 \Rightarrow j_{1f} = 40$$

$$j_{1f} \cdot J_{mot(1)} = 0.252 \text{ Kgm}^2$$

- **Moteur 2 :**

$$j_2 = \frac{n_n}{n_f} = \frac{1410}{23.88} = 59.04 \Rightarrow j_{2f} = 63$$

$$j_{2f} \cdot J_{mot(2)} = 0.2205 \text{ Kgm}^2$$

- **Moteur 3 :**

$$j_3 = \frac{n_n}{n_f} = \frac{2855}{23.88} = 119.6 \Rightarrow j_{3f} = 125$$

$$j_{3f} \cdot J_{mot(3)} = 0.1875 \text{ Kgm}^2$$

Le moteurs N 3 est le moteur qui présente le rapport $j_i \cdot J_{mot(i)}$ minimal, mais notre choix se penche vers le moteur N2, car le rapport de transmission j_3 est important (encombrement).

Remarque : Au paragraphe III.2 nous avons montré la manière de choisir le moteur pour notre application, et comme les catalogues ne donnent pas les valeurs numériques des paramètres du schéma électrique équivalent ; Ces paramètres peuvent être calculés en faisant des essais sur le moteur (essai en charge, à vide et en court-circuit) ce qui sort du cadre du projet. Pour cela nous allons utiliser des valeurs numériques d'un autre moteur (Voir Annexe A).

IV. Construction de tachygramme et diagramme de charge

IV.1 Tachygramme

La tachygramme représente la fonction $V_f = f(t)$. Pour sa construction on détermine les intervalles de temps et les longueurs pour chaque régime :

IV.1.a Montée

(1) Intervalle de temps et longueur du parcours au démarrage

$$\text{Intervalle du temps : } \Delta t_1 = \frac{v_f}{a} = \frac{0.7}{0.8} = 0.875s$$

$$\text{La longueur de la distance parcourue à l'accélération: } \Delta S_1 = \frac{v_f \cdot \Delta t_1}{2} = \frac{0.7 \cdot 0.875}{2} = 0.31m$$

(2) Intervalle temps de fonctionnement à v_f constante:

$$\text{Longueur du parcours } \Delta S_2 = l' = 18.5m$$

$$\text{Intervalle du temps : } \Delta t_2 = \frac{\Delta S_2}{v_f} = \frac{18.5}{0.7} = 26.42s$$

(3) Intervalle temps de décélération du chariot jusqu'à (0m/s) et longueur du parcours

$$\text{Longueur du parcours } \Delta S_3 = l - \Delta S_1 - \Delta S_2 = 20 - 0.31 - 18.5 = 1.19m$$

$$\text{Intervalle du temps : } \Delta t_3 = \frac{2 \cdot \Delta S_3}{0.7} = 3.7s$$

$$\text{Décélération du chariot : } a_{d\acute{e}c} = \frac{v_f}{\Delta t_3} = \frac{0.7}{3.7} = 0.18m/s^2$$

(4) Intervalle temps de déchargement

$$\Delta t_4 = \Delta t_d = 7s$$

$$\Delta S_4 = 0m$$

IV.1.b descente

(5) Intervalle temps d'accélération jusqu'à v_f

$$\text{Intervalle du temps : } \Delta t_5 = \Delta t_1 = 0.875s$$

$$\text{La longueur de la distance parcourue à l'accélération: } \Delta S_5 = \Delta S_1 = 0.31m$$

(6) Intervalle temps de fonctionnement à v_f constante

$$\text{Longueur du parcours } \Delta S_6 = l'' = 19m$$

$$\text{Intervalle du temps : } \Delta t_6 = \frac{\Delta S_6}{v_f} = \frac{19}{0.7} = 27.14s$$

(7) Intervalle temps de décélération du chariot jusqu'à (0m/s) et longueur du parcours

$$\text{Longueur du parcours } \Delta S_7 = l - \Delta S_5 - \Delta S_6 = 20 - 0.31 - 19 = 0.69m$$

$$\text{Intervalle du temps : } \Delta t_7 = \frac{2 \cdot \Delta S_7}{0.7} = 1.97s$$

$$\text{Décélération du chariot : } a_{d\acute{e}c} = \frac{v_f}{\Delta t_3} = \frac{0.7}{1.97} = 0.36m/s^2$$

(8) Intervalle temps de chargement

$$\Delta t_8 = \Delta t_c = 9s$$

$$\Delta S_8 = 0m$$

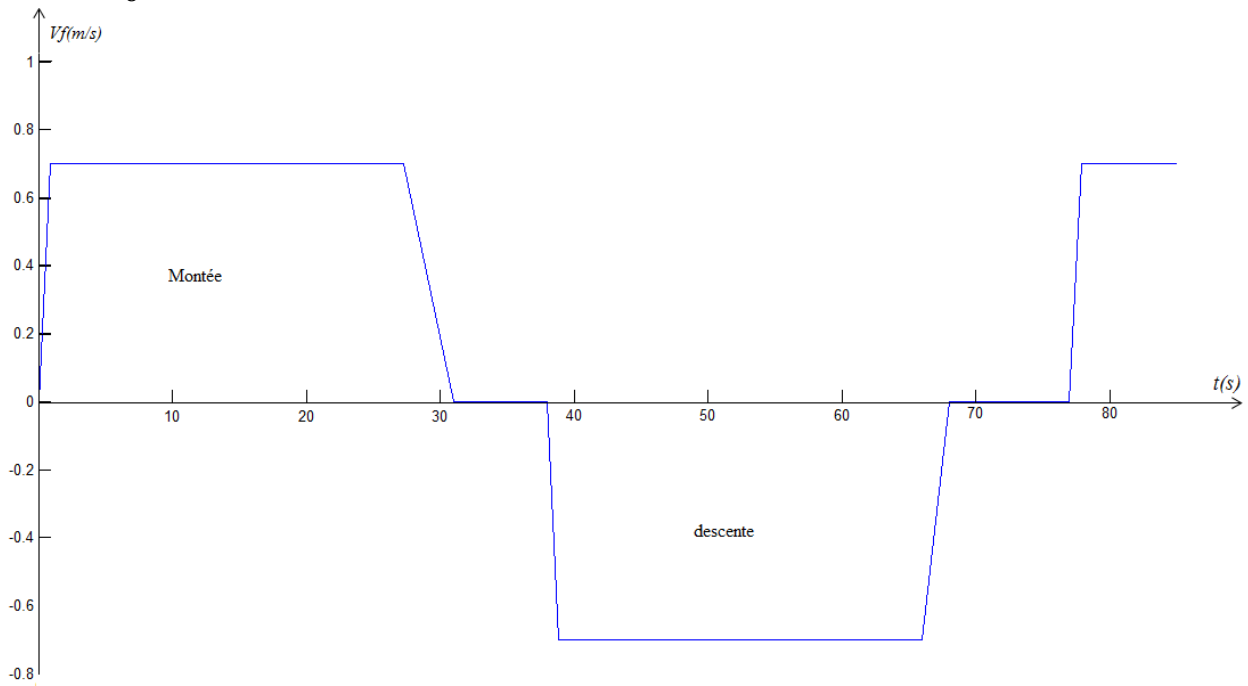


Figure II.2 Tachygramme

IV.2 Diagramme de charge

Le diagramme de charge représente la variation du couple en fonction du temps.

IV.2.a Montée**(1) Montée à vitesse constante**

Couple à l'arbre du tambour : $C_{tmonté} = 475.85N.m$

Couple à l'arbre du moteur : $C_{mmonté} = \frac{C_{tmonté}}{\eta_t \cdot \eta_r \cdot j} = 8.92N.m$

(2) Démarrage

Le couple que le moteur doit fournir au démarrage est

$$C_{dmonté} = C_{mmonté} + \Sigma C_i^d \quad (II.15).$$

Avec ΣC_i Somme des couples résistants due aux forces d'inertie.

$$\Sigma C_i^d = C_{Fi}^d + C_{it}^d + C_{im}^d + C_{ifr}^d + C_{ir}^d \quad (II.16).$$

Avec C_{Fi} : Couple dû à la force d'inertie des masses du chariot, charge et contre poids ramenées à l'arbre du moteur ;

C_{it} : Couple dû au moment d'inertie du tambour ramené à l'arbre du moteur ;

C_{im} : Couple dû au moment d'inertie du moteur ;

C_{ir}^d : Couple dû au moment d'inertie du réducteur ;

C_{ifr}^d : Couple dû au moment d'inertie du frein.

$$C_{Fi}^d = \frac{(m_r + m_c + m_{cp}) \cdot v_f^2 \cdot R_t}{2 \cdot \Delta S_1 \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot j} = 3.11 N \cdot m$$

$$C_{it}^d = \frac{J_t}{\eta_t \cdot \eta_r \cdot j} * \frac{\omega_f}{\Delta t_1} = 0.32 N \cdot m$$

$$C_{im}^d = J_m * \frac{\omega_m}{\Delta t_1} \quad \text{D'où } \omega_m = j \cdot \omega_f = 63 * 2.5 = 157.5 \text{ rad/s}$$

$$C_{im}^d = 0.0035 * \frac{157.5}{0.875} = 4.60 N \cdot m$$

Le moment d'inertie du frein est égale 20% le moment d'inertie du moteur.

$$C_{if}^d = 0.2 \cdot C_{im}^d = 0.92 N \cdot m$$

Le moment d'inertie du réducteur vaut 20% le moment d'inertie du moteur.

$$C_{ir}^d = 0.2 \cdot C_{im}^d = 0.92 N \cdot m$$

$$\Sigma C_i = 9.87 N \cdot m$$

$$C_{dmonté} = 8.92 + 9.87 = 18.79 N \cdot m$$

(3) Freinage à la montée

Les inerties sont motrices.

$$C_{fmonté} = \Sigma C_i^f - C_{mmonté}^f \quad (\text{II.17}).$$

$$\text{Avec } C_{mmonté}^f = \frac{\eta_t \cdot \eta_r \cdot C_{tmonté}}{j} = \frac{0.92 \cdot 0.92 \cdot 475.85}{63} = 6.39 N \cdot m$$

$$\Sigma C_i^f = C_{Fi}^f + C_{it}^f + C_{im}^f + C_{ifr}^f + C_{ir}^f$$

$$C_{Fi}^f = C_{Fi}^d = 3.11 N \cdot m$$

$$C_{it}^f = \frac{J_t}{\eta_t \cdot \eta_r \cdot j} * \frac{\omega_f}{\Delta t_3} = \frac{6}{0.92^2 * 63} * \frac{2.5}{3.7} = 0.076 N \cdot m$$

$$C_{im}^f = J_m * \frac{\omega_m}{\Delta t_3} = 1.09 N \cdot m$$

$$C_{ifr}^f = 0.2 \cdot C_{im}^f = 0.22 N \cdot m$$

$$C_{ir}^f = 0.2 * C_{im}^f = 0.22 N \cdot m$$

$$\Sigma C_i^f = 4.72 N \cdot m$$

$$C_{fmonté} = 4.72 - 6.39 = -1.67 N \cdot m$$

IV.2.b Descente

(1) Descente à vitesse constantes

$$C_{mdescente} = \frac{C_{tdescente}}{\eta_t \cdot \eta_r \cdot j} = \frac{458.34}{0.92 * 0.92 * 63} = 8.6 N \cdot m$$

(2) Démarrage

$$C_{ddescente} = C_{mdescente} + \Sigma C_i^d$$

$$\Sigma C_i^d = C_{Fi}^d + C_{it}^d + C_{im}^d + C_{ifr}^d + C_{ir}^d$$

$$C_{Fi}^d = C_{Fi}^d = \frac{(m_r + m_{cp}) \cdot v_f^2 \cdot R_t}{2 \cdot \Delta S_5 \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot j} = \frac{(50 + 200) \cdot 0.7^2 \cdot 0.28}{0.31 * 2 * 0.92^2 * 63} = 1.03 N \cdot m$$

$$C_{it}^d = \frac{J_t}{\eta_t \cdot \eta_r \cdot j} * \frac{\omega_f}{\Delta t_5} = \frac{6}{0.92^2 * 63} * \frac{2.5}{0.875} = 0.32 N.m$$

$$C_{im}^d = J_m * \frac{\omega_m}{\Delta t_5} = 0.0256 * \frac{157.5}{0.875} = 4.6 N.m$$

$$C_{ifr}^d = 0.2 \cdot C_{im}^d = 0.92 N.m$$

$$C_{ir}^d = 0.2 \cdot C_{im}^d = 0.92 N.m$$

$$\Sigma C_i^d = 7.79 N.m$$

$$C_{ddescente} = 8.6 + 7.79 = 16.39 N.m$$

(3) Freinage à la descente

Les inerties sont motrices.

$$C_{fdescente} = \Sigma C_i^f - C_{mdescente}^f$$

$$\text{Avec } C_{mdescente}^f = \frac{\eta_t \cdot \eta_r \cdot C_{t\text{descente}}}{j} = \frac{0.92 * 0.92 * 458.34}{63} = 6.16 N.m$$

$$\Sigma C_i^f = C_{Fi}^f + C_{it}^f + C_{im}^f + C_{ifr}^f + C_{ir}^f$$

$$C_{Fi}^f = C_{Fi}^d = 1.03 N.m$$

$$C_{it}^f = \frac{J_t}{\eta_t \cdot \eta_r \cdot j} * \frac{\omega_f}{\Delta t_7} = \frac{6}{0.92^2 * 63} * \frac{2.5}{1.97} = 0.14 N.m$$

$$C_{im}^f = J_m * \frac{\omega_m}{\Delta t_7} = 0.0256 * \frac{157.5}{1.97} = 2.04 N.m$$

$$C_{ifr}^f = 0.2 C_{im}^f = 0.41$$

$$C_{ir}^f = 0.2 \cdot C_{im}^f = 0.41$$

$$\Sigma C_i^f = 4.03 N.m$$

$$C_{fdescente} = 4.03 - 6.16 = -2.13 N.m$$

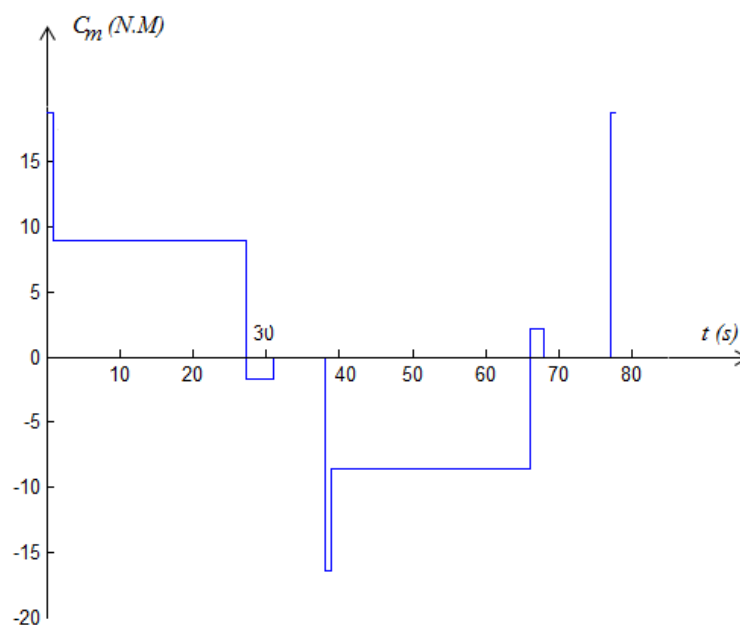


Figure II.3 Diagramme de charge

En prenant compte du fait que le couple moteur au démarrage vaut $2.1 * C_n$ et le couple exigé par le mécanisme d'action est $18.57 N.m$. Donc la condition de démarrage cité au paragraphe II.2 est vérifiée.

IV.3 Régime de fonctionnement

La puissance utile d'un moteur d'entraînement est le produit du couple moteur par la vitesse de fonctionnement.

$$P_u = C_m \cdot \omega_m \quad (\text{II.18}).$$

Au régime établi $\omega_m = j \cdot \omega_f = 157.5 \text{ rad/s}$

Tableau II.2 : Récapitulatif du diagramme de charge

| | Montée | | | Descente | | |
|--------------------------|-----------|----------------|----------|-----------|----------------|----------|
| | Démarrage | Régime établie | Freinage | Démarrage | Régime établie | Freinage |
| $C_m(N.m)$ | 18.57 | 8.92 | -1.67 | -16.39 | -8.6 | 2.13 |
| $\omega_m(\text{rad/s})$ | 157.5 | 157.5 | 157.5 | -157.5 | -157.5 | -157.5 |
| $P_u(\text{kW})$ | 2.92 | 1.4 | -0.26 | 2.58 | 1.35 | -0.34 |

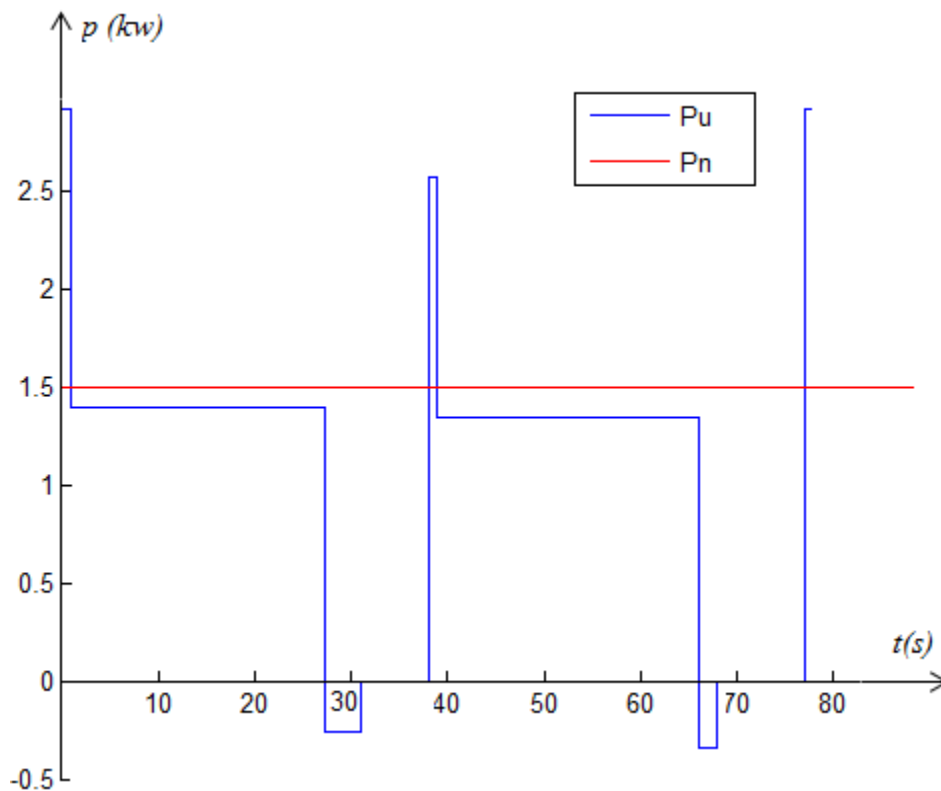


Figure II.4 Régime de fonctionnement.

IV.3.a Couple équivalent

Lorsque la puissance d'un moteur varie fortement, on définit un couple équivalent C_{eq} qui provoquerait les mêmes pertes en régime continu que les couples réels variables.[5]

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{\sum C_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}} \quad (\text{II.19}).$$

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{C_{dmonté}^2 \Delta t_1 + \Delta t_2 C_{mmonté}^2 + \Delta t_3 C_{fmonté}^2 + \Delta t_4 * 0 + \Delta t_5 C_{ddescente}^2 + \Delta t_6 C_{mdescente}^2 + \Delta t_7 C_{fdescente}^2 + \Delta t_8 * 0}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8}}$$

$$C_{eq} = 7.75 N.m$$

IV.3.b Facteur de surcharge mécanique

La charge varie souvent constamment au cours du temps avec une évolution correspondante de la température du moteur. Sous réserve de ne pas dépasser le courant maximal autorisé, le fonctionnement est limité seulement par l'échauffement et non par la puissance délivrée. On définit le facteur de surcharge mécanique, le rapport entre la plus grande puissance fournie par le moteur et sa puissance nominale.[5]

$$P_M = \frac{P_{max}}{P_N} \quad (\text{II.20}).$$

$$P_M = \frac{2.92}{1.5} = 1.95$$

IV.4 Caractéristique mécanique

IV.4.a Caractéristique en régime moteur

On utilise pour la construction de la caractéristique mécanique la formule de KLAUSS simplifiée :

$$C_m = \frac{2 \cdot C_{cr}}{\frac{g_{cr}}{g} + \frac{g}{g_{cr}}} \quad (\text{II.21}).$$

Avec

$$g_{cr} = g_n (\lambda_c + \sqrt{\lambda_c^2 - 1}) \quad (\text{II.22}).$$

$$\text{Et } g_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} \quad (\text{II.23}).$$

$$C_{cr} = \lambda_c C_n = 3.5 C_n \quad (\text{II.24}).$$

Application numérique :

$$g_n = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.05$$

$$g_{cr} = 0.23$$

$$C_{cr} = 2.4 * 10 = 24 N.m$$

$$C_m = \frac{48}{\frac{0.23}{g} + \frac{g}{0.23}}$$

IV.4.b Caractéristique en régime de freinage

L'un des principes du freinage du moteur asynchrone est analogue à celui des ralentisseurs électromagnétiques. L'injection du courant continu dans les phases statoriques crée un champ magnétostatique, qui, à son tour va induire des courants dans la cage rotorique en mouvement ; un couple antagoniste au mouvement est créé par les courants induits. [20]

Pour notre moteur, les enroulements statoriques sont alimentés par une source de tension continue selon le montage de la figure II.5

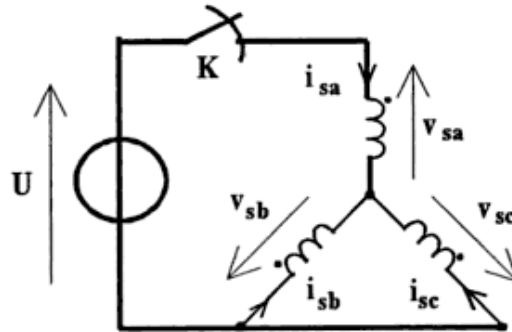


Figure II.5 Schéma du freinage

Le couple électromagnétique du freinage en fonction de la vitesse de rotation est donné par la relation (II.25).

$$C_m = \frac{-\frac{3.P_p}{2}(1-\sigma).L_s I^2 . \omega . T_r}{1+(\omega . T_r)^2} \quad (\text{II.25}).$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = 0.12s \quad (\text{II.26}).$$

Avec : P_p : Nombre de pair de pôles ;

σ : Coefficient de dispersion de Blondel ;

T_r : Constante du temps électrique rotorique ;

L_s : Inductance cyclique statorique ;

L_r : Inductance cyclique rotorique ;

I : Courants débité par la source continue.

Pour que le moteur freine selon les exigences de la tachygramme le courant doit être égal à :

- **Montée :**

$$I_m = \sqrt{\frac{C_{fmonté}(1+(\omega_f . T_r)^2)}{-\frac{3.P_p}{2}(1-\sigma).L_s . \omega_f . T_r}} = 10.59A$$

- **Descente :**

$$I_d = \sqrt{\frac{C_{fdescente}(1+(\omega_f . T_r)^2)}{-\frac{3.P_p}{2}(1-\sigma).L_s . \omega_f . T_r}} = 11.97A$$

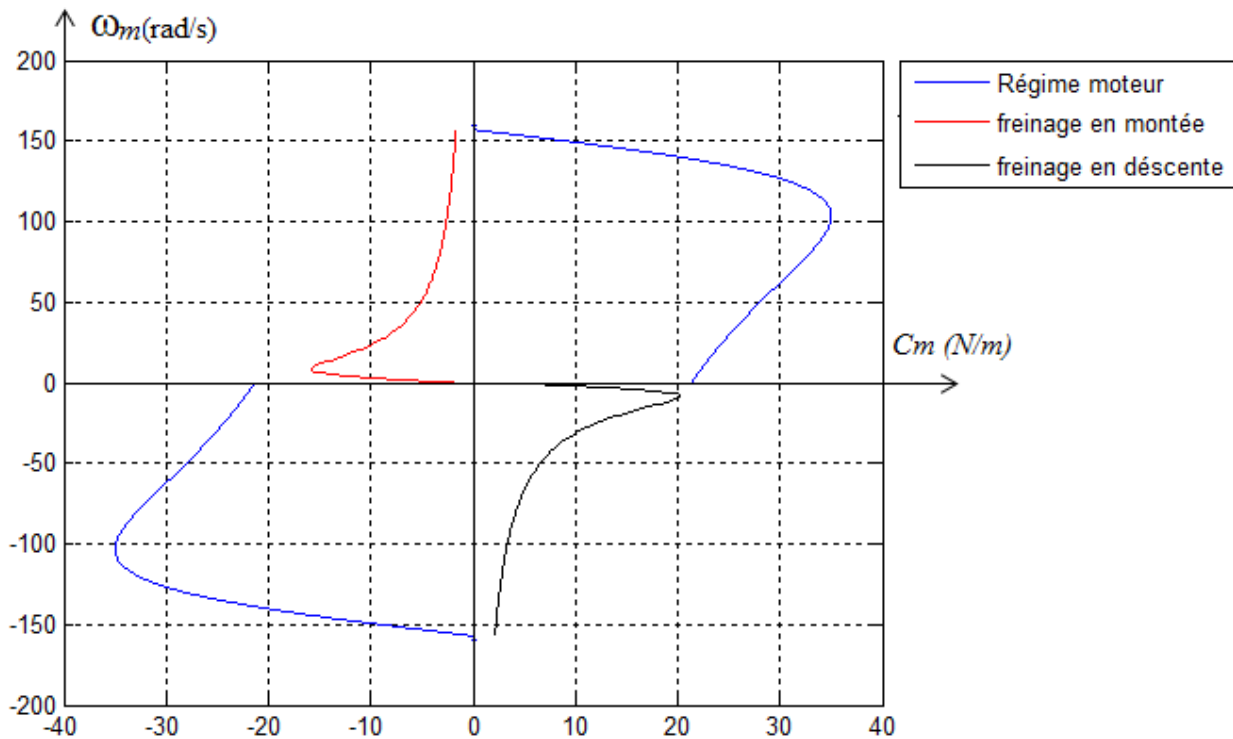


Figure II.6 Caractéristiques mécaniques du moteur

V. Frein de sécurité

Dans notre cas la commande utilisée est à quatre quadrants, ce qui permet au moteur le freinage, un régulateur de courant maintient un couple de freinage constant. Lorsque la vitesse est presque nulle, on déclenche le moteur en même temps que l'on fait agir un frein à friction qui finit de ralentir la machine en jouant ensuite le rôle de frein d'arrêt.

Ce système ménage considérablement le frein et permet de le construire plus petit puisque sa charge thermique et son usure sont moindres. Cependant, pour respecter la règle de sécurité élémentaire, le frein doit être capable de d'arrêter seul le mouvement de la charge en cas de défaillance du système électrique. [5]

VI. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons dimensionné les différents éléments de l'entraînement électrique, en partant de la charge puis en remontant vers l'élément actionneur (moteur). Nous avons conclu que la puissance d'un moteur électrique doit en principe être égale ou supérieure à la puissance d'entraînement, mais ce dernier est surchargeable en cas de marche en régime variable tant que ses éléments critiques ne dépassent pas leur température admissible.

CHAPITRE III : Modèle dynamique

La complexité d'un entraînement électrique rend difficile son étude globale tant à l'étape de conception, qu'au cours de son fonctionnement normal. Pour surmonter cette difficulté, on procède généralement à des simplifications : linéarisation de certaines caractéristiques, ajout des inerties de toutes les parties mobiles à celle du moteur, etc. En fonction des objectifs de modélisation, ces simplifications peuvent donner des résultats satisfaisants. [21]

La modélisation d'un mécanisme a pour but de décrire mathématiquement son fonctionnement afin de le voir fonctionner sur le papier ou à l'écran à travers ses équations. Les résultats du calcul sont numériques ou graphiques. Cette méthode offre de nombreux avantages :

- elle permet d'étudier le comportement d'un prototype et d'apporter les modifications nécessaires avant de le réaliser, d'où gain de temps et d'argent ;
- elle permet parfois d'éviter de faire des mesures trop coûteuses ou même impossibles sur l'objet réel (grande machines, simulation d'accidents) ;
- elle permet de faire fonctionner le système dans des situations extrêmes sans aucun danger, ni frais ;
- elle permet de découvrir des effets inattendus [5].

I. Modélisation de la partie mécanique

La partie mécanique d'un entraînement électrique constitue à elle seule un système complexe comprenant le rotor du moteur, Les éléments de transmission (mécanisme de transmission) et l'organe de travail (mécanisme d'action).

Le modèle simplifié unimasse, où l'ensemble de la partie mécanique est représentée par son inertie, est couramment utilisé pour l'étude des entraînements électriques. Mais, à cause de la rigidité finie des liaisons entre les différents éléments, il est important de faire une représentation en plusieurs masses de la partie mécanique. Ceci permet de mettre en évidence les possibilités de résonance mécanique qui peuvent avoir lieu dans ces types d'entraînements. Pour son analyse, la partie mécanique est remplacée par son modèle équivalent de calcul. Le modèle équivalent est obtenu à partir du schéma synoptique de l'entraînement (figure III.1). [21]

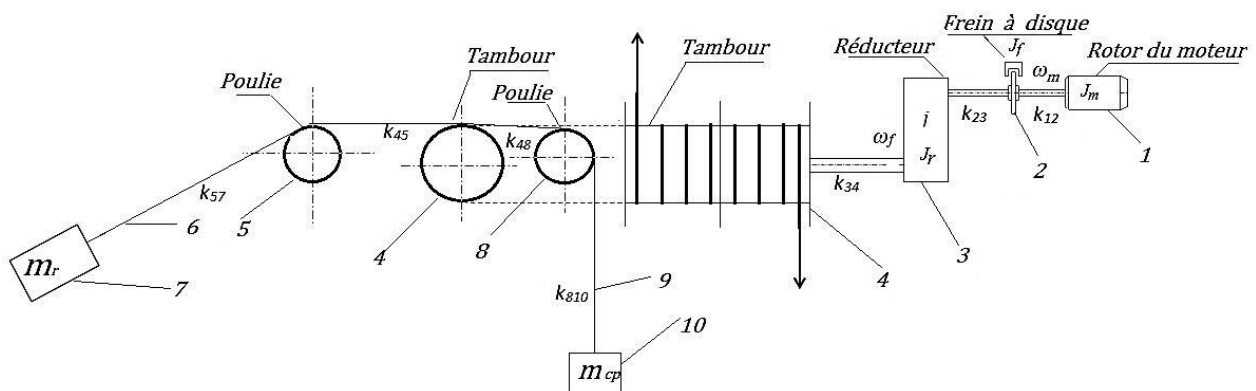


Figure III.1 Schéma synoptique du mécanisme

On note J_i Le moment d'inertie de l'élément (i) ;

k_{ij} : Coefficient de rigidité élastique entre les éléments (i et j).

I.1 Calcul des inerties ramenées à l'arbre du moteur

$$J'_1 = J_m = 0.0256 \text{kg.m}^2$$

$$J'_2 = J_f = 0.2.J_m = 0.0051 \text{kg.m}^2$$

$$J'_3 = 0.2J_m = 0.0051 \text{kg.m}^2$$

$$J'_4 = \frac{J_t}{j^2} = 0.0015 \text{kg.m}^2$$

$$J'_5 = J'_8 = \frac{J_p}{i^2.j^2} = 5 * 10^{-5} \text{kg.m}^2$$

D'où i rapport de vitesse entre le tambour et la poulie. $i = \frac{D_p}{D_t} = \frac{98}{560} = 0.175$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Montée } J'_7 = \frac{(m_r + m_c)R^2 t}{j^2} = 0.011 \text{kg.m}^2 \\ \text{Descente } J'_7 = \frac{(m_c)R^2 t}{j^2} = 0.001 \text{kg.m}^2 \end{array} \right.$$

$$J'_{10} = \frac{m_{cp}R^2 t}{j^2} = 0.004 \text{kg.m}^2$$

I.2 Coefficients de rigidité ramenés à l'arbre du moteur

I.2.a Coefficient de rigidité d'étirage

Il est dû à la résistance finie aux efforts de traction sur le câble :

$$k_{45} = \frac{E_c \cdot S_{\text{câble}}}{l_c} \quad (\text{III.1}).$$

- **Câble entre le tambour et la poulie (5)**

$$k_{45} = \frac{E_c \cdot S_{\text{câble}}}{l_1} = 6280000 \text{N/m}$$

Avec :

E_c : Module d'élasticité du câble ($10^5 \div 125.10^3$) N/mm^2 , $E_c = 125.10^3 \text{N/mm}^2$

$S_{\text{câble}}$: Section du câble $S_{\text{câble}} = 50.24 \text{mm}^2$

l_1 : Longueur du câble entre tambour (4) et poulie (5) $l_1 = 1 \text{m}$.

Coefficient de rigidité ramenée à l'arbre du moteur k'_{45} :

$$k'_{45} = \frac{k_{45} \cdot R^2 t}{j^2} = 124,05 \text{Nm/rad}$$

- **Câble entre la poulie (5) et la charge $l_2 = 20 \text{m}$**

$$k_{57} = \frac{E_c \cdot S_{\text{câble}}}{l_2} = 314000 \text{N/m}$$

Coefficient de rigidité ramenée à l'arbre du moteur k'_{57}

$$k'_{57} = \frac{k_{57} \cdot R^2 t}{j^2} = 6.20 \text{Nm/rad}$$

- **Câble entre le tambour et la poulie (8) $l_3 = 1 \text{m}$**

$$k_{48} = k_{45} \Rightarrow k'_{48} = k'_{45} = 124,05 \text{Nm/rad}$$

- Câble entre la poulie (8) et le contrepoids $l_4 = 20m$:

$$k_{810} = k_{57} \Rightarrow k'_{810} = k'_{57} = 6.20Nm/rad$$

I.2.b Coefficient de rigidité de torsion

- Coefficient de rigidité du manchon du couplage entre le frein et le rotor

$$k'_{12} = 50000Nm/rad$$

- Coefficient de rigidité du manchon du couplage entre le frein et réducteur

$$k'_{23} = 50000Nm/rad$$

- Coefficient de rigidité du manchon du couplage entre le réducteur et le tambour ramené à l'arbre du moteur

$$k_{34} = 480000Nm/rad$$

$$k'_{34} = \frac{k_{23}}{j^2} = 120.93Nm/rad$$

I.3 schéma équivalent de calcul

I.3.a schéma équivalent de calcul à huit masses

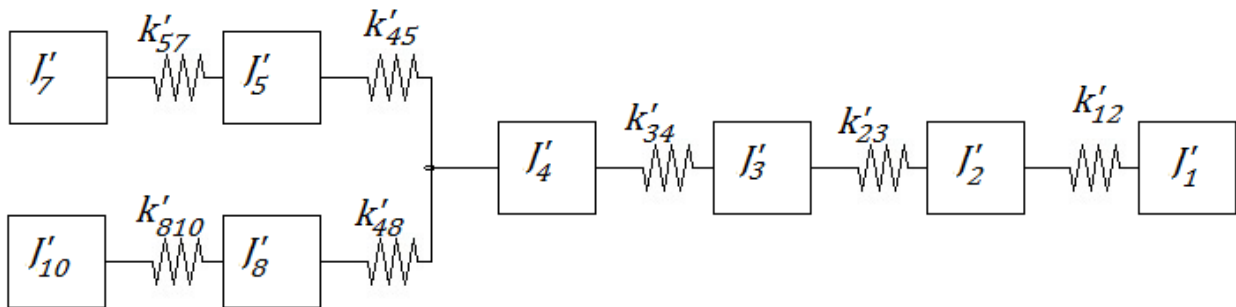


Figure III.2 Schéma équivalent de calcul à huit masses

L'analyse de ce système est très complexe, elle conduit à faire sortir un système d'équations à huit équations. Donc on procède aux simplifications suivantes.

I.3.b schéma équivalent de calcul à trois masses

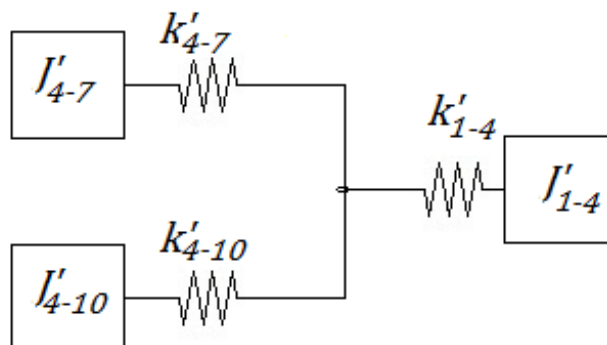


Figure III.3 Schéma équivalent de calcul à trois masses

Avec :

$$J'_{1-4} = J'_1 + J'_2 + J'_3 + J'_4 = 0.0373 \text{kg.m}^2$$

$$\begin{cases} \text{Montée} & J'_{4-7} = J'_5 + J'_7 = 0.0111 \text{kg.m}^2 \\ \text{Descente} & J'_{4-7} = J'_5 + J'_7 = 0.0011 \text{kg.m}^2 \end{cases}$$

$$J'_{4-10} = J'_8 + J'_{10} = 0.00405 \text{kg.m}^2$$

$$k'_{1-4} = \frac{1}{\frac{1}{k'_{12}} + \frac{1}{k'_{23}} + \frac{1}{k'_{34}}} = \frac{k'_{12}k'_{23}k'_{34}}{k'_{23}k'_{34} + k'_{12}k'_{34} + k'_{12}k'_{23}} = 120.35 \text{Nm/rad}$$

$$k'_{4-7} = \frac{1}{\frac{1}{k'_{57}} + \frac{1}{k'_{45}}} = \frac{k'_{45}k'_{57}}{k'_{45} + k'_{57}} = 5.9 \text{Nm/rad}$$

$$k'_{4-10} = \frac{1}{\frac{1}{k'_{810}} + \frac{1}{k'_{48}}} = \frac{k'_{810}k'_{48}}{k'_{810} + k'_{48}} = 5.9 \text{Nm/rad}$$

I.3.c schéma équivalent de calcul à deux masses

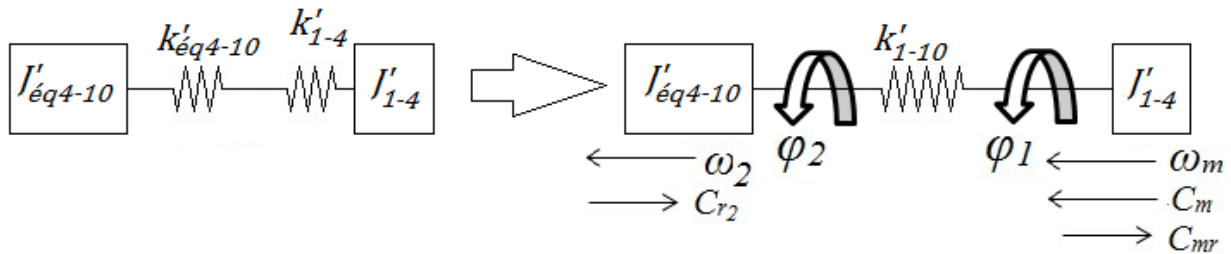


Figure III.4 Schéma équivalent de calcul à deux masses

Avec :

$$\begin{cases} \text{Montée} & J'_{éq4-10} = J'_{4-7} + J'_{4-10} = 0.0152 \text{kg.m}^2 \\ \text{Descente} & J'_{éq4-10} = J'_{4-7} + J'_{4-10} = 0.0052 \text{kg.m}^2 \end{cases}$$

$$k'_{éq4-10} = k'_{4-7} + k'_{4-10} = 11.8 \text{Nm/rad}$$

$$\text{Et } k'_{1-10} = \frac{1}{\frac{1}{k'_{éq4-10}} + \frac{1}{k'_{1-4}}} = \frac{k'_{éq4-10}k'_{1-4}}{k'_{1-4} + k'_{éq4-10}} = 10.75 \text{Nm/rad}$$

I.3 Equation du mouvement

Pour l'analyse de ce système on fait appel à l'équation de Lagrange

$$\begin{cases} \text{Mouvement de rotation} & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_c}{\partial \omega_i} \right) - \frac{\partial W_c}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial W_p}{\partial \varphi_i} = C_i \\ \text{Mouvement de translation} & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_c}{\partial v_i} \right) - \frac{\partial W_c}{\partial x_i} + \frac{\partial W_p}{\partial x_i} = F_i \end{cases} \quad (\text{III.2}).$$

Avec W_c , W_p : Respectivement énergie cinétique et énergie potentiel du système ;

F_i , C_i : Respectivement force et couple appliqué à l'élément i .

Un système à n masses doit être représenté par n équations :

$$\begin{cases} J'_{1-4} \frac{d\omega_m}{dt} + k'_{1-10}(\varphi_1 - \varphi_2) = C_m - C_{r1} \\ J'_{\acute{e}q4-10} \frac{d\omega_2}{dt} - k'_{1-10}(\varphi_1 - \varphi_2) = -C_{r2} \end{cases} \quad \text{(III. 3).}$$

Avec $\varphi_i = \int \omega_i dt$ (III.4).

Pour la construction du diagramme structurel on passe dans le domaine de Laplace.

$$\text{(III. 3)} \Rightarrow \begin{cases} J'_{1-4} P \omega_m(p) + \frac{k'_{1-10}}{P} (\omega_m(p) - \omega_2(p)) = C_m(p) - C_{r1}(p) \\ J'_{\acute{e}q4-10} P \omega_2(p) - \frac{k'_{1-10}}{P} (\omega_m(p) - \omega_2(p)) = -C_{r2}(p) \end{cases} \quad \text{(III. 5).}$$

On obtient alors le diagramme structurel du système à deux masses. Le couple moteur C_m est la grandeur de commande. Les couples résistants C_{r1} et C_{r2} constituent les perturbations appliquées au système.

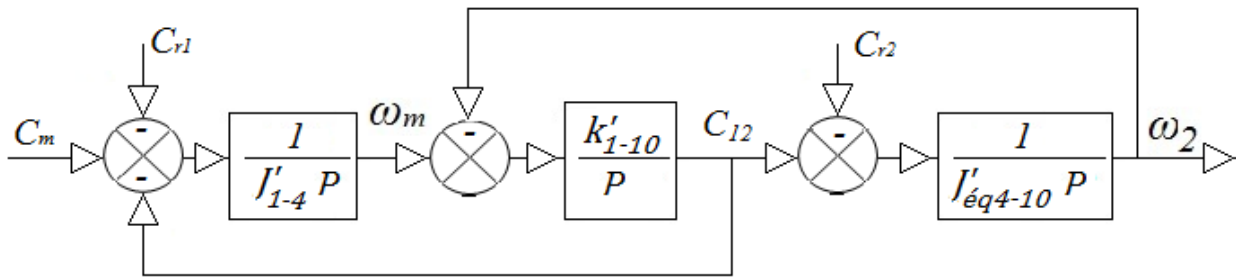


Figure III.3 diagramme structurel de la partie mécanique.

I.4 diagramme structurelle de la partie mécanique avec prise en compte du coefficient d'amortissement

A chaque fois il est nécessaire d'absorber des chocs mécaniques dans un système d'entraînement, les éléments constituant la partie mécanique sont liés entre eux par des accouplements élastiques figure(III.4), le couple de freinage est définie par C_{vf} .

Avec $C_{vf} = k_{vf}(\omega_m - \omega_2)$

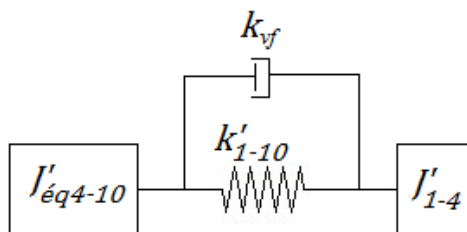


Figure III.4 Modèle équivalent calcul avec prise en compte de l'amortissement

Dans ce cas :

$$\begin{aligned} C_{12}(p) &= \frac{k'_{1-10}}{P} (\omega_m(p) - \omega_2(p)) + C_{vf} = \frac{k'_{1-10}}{P} (\omega_m(p) - \omega_2(p)) + k_{vf}(\omega_m(p) - \omega_2(p)) \\ \Rightarrow C_{12}(p) &= \left(\frac{k'_{1-10}}{P} + k_{vf} \right) (\omega_m(p) - \omega_2(p)) \end{aligned}$$

Avec : $k_{vf} = 1.2 N.m.s$: Coefficient des frottements visqueux (d'amortissement).

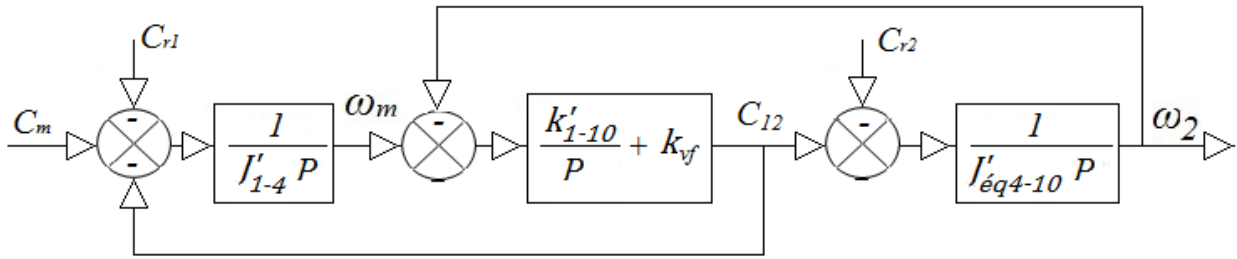


Figure III.5 Diagramme structurelle de la partie mécanique à deux masses avec prise en compte du coefficient d'amortissement

II. Modélisation du moteur électrique en régime moteur

II.1 Hypothèses simplificatrices

- Entrefer constant ;
- Effet des encoches négligé ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constantes ;
- Pertes ferromagnétiques négligeable ;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est prise en compte.

La machine est représentée à la (figure III.6) par ses six enroulements dans l'espace électrique ; L'angle α repère l'axe de la phase rotorique de référence \vec{R}_a par rapport à l'axe fixe de phase statorique de référence \vec{R}_a . Les flux sont comptés positivement selon les axes des phases ; le sens des enroulements est repéré par un point : un courant positif entrant par le point créé un flux positif dans l'enroulement. [20]

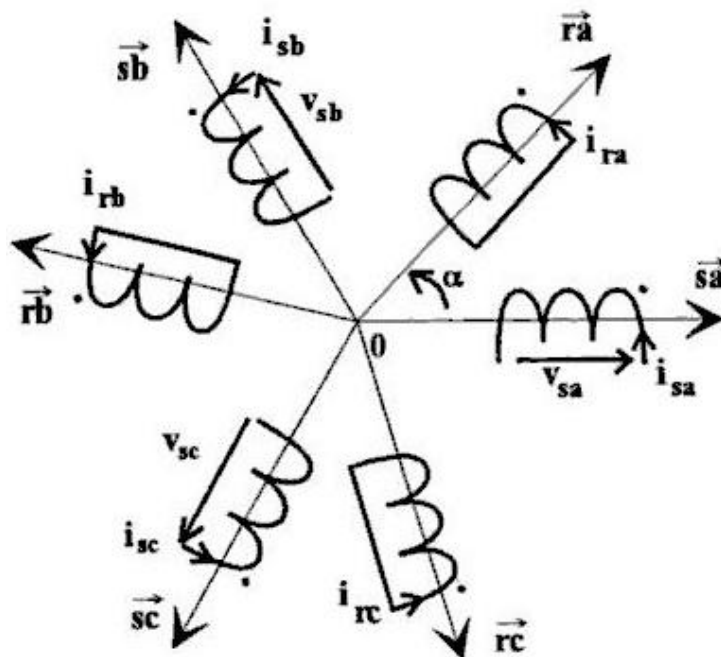


Figure III.6 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

II.2 Equations électriques

• Statorique

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6}).$$

$$\text{Ou } [v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{III.7}).$$

• Rotorique

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.8}).$$

$$\text{Ou } [v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] = [0] \quad (\text{III.9}).$$

Avec : R_s : Résistance des enroulements statoriques ;

R_r : Résistance des enroulements rotoriques.

II.3 Equations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & l_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10}).$$

Avec : l_s, l_r Respectivement inductance propre d'une phase statorique et rotorique ;

M_s Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator ;

M_r Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du rotor ;

M_1, M_2 et M_3 Coefficient de mutuelle inductance entre une phase statorique et rotorique.

$$\text{Ou } \begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11}).$$

$$\text{Avec } [L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.12}).$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.13}).$$

$$\text{Et } [M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos \alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{III.14}).$$

$$(III.7), (III.9) \text{ et } (III.11) \Rightarrow \begin{cases} [v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}\{[L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]\} \\ [v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}\{[M_{sr}]^t[i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}]\} \end{cases} \quad (III.15).$$

II.4 Transformation de Park

Les équations différentielles qui décrivent le fonctionnement du moteur asynchrone en régime quelconque sont compliquées, en particulier parce que leurs coefficients ne sont pas constants. Pour cela on fait appel à la transformation mathématique (transformation de Park) permettant de passer à des équations différentielles à coefficients constants grâce à des changements de variables.

- **Transformation de Park pour le stator**

$$[P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.16).$$

- **Transformation de Park pour le rotor :**

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta_r + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.17).$$

Les deux angles sont liés à l'angle électrique définissant la position du rotor par (Figure III.7)

$$\theta_s - \theta_r = \alpha \quad (III.18).$$

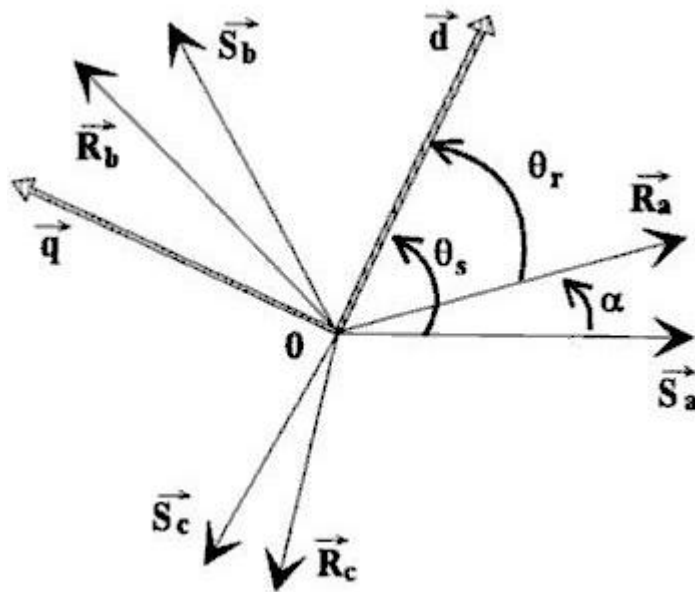


Figure III.7 Définition des angles dans le plan électrique.

II.4.a Application de la transformation de Park au moteur

Exprimons les matrices colonne des grandeurs triphasée ($[v_{sabc}]$, $[v_{rabc}]$, $[i_{sabc}]$, $[i_{rabc}]$, $[\Phi_{rabc}]$ et $[\Phi_{sabc}]$) en fonction des matrices colonne de Park ($[v_{sdq0}]$, $[v_{rdq0}]$, $[i_{sdq0}]$, $[i_{rdq0}]$, $[\Phi_{rdq0}]$ et $[\Phi_{sdq0}]$).

$$[v_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[v_{sdq0}] \quad (\text{III.19}).$$

$$[i_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}] \quad (\text{III.20}).$$

$$[\Phi_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{sdq0}] \quad (\text{III.21}).$$

$$[v_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}[v_{rdq0}] \quad (\text{III.22}).$$

$$[i_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdq0}] \quad (\text{III.23}).$$

$$[\Phi_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}[\Phi_{rdq0}] \quad (\text{III.24}).$$

En développant les expressions des flux, elles deviennent :

- **Stator :**

$$\begin{aligned} [\Phi_{sdq0}] &= [P(\theta_s)]\{[L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]\} \\ \Rightarrow [\Phi_{sdq0}] &= [P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}] + [P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdq0}] \end{aligned} \quad (\text{III.25}).$$

- **Rotor :**

$$\begin{aligned} [\Phi_{rdq0}] &= [P(\theta_r)]\{[M_{rs}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}]\} \\ \Rightarrow [\Phi_{rdq0}] &= [P(\theta_r)][M_{rs}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}] + [P(\theta_r)][L_r][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdq0}] \end{aligned} \quad (\text{III.26}).$$

$$(\text{III.25}) \text{ et } (\text{III.26}) \Rightarrow \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.27}).$$

Avec : $L_s = l_s - M_s$ Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$ Inductance cyclique rotorique ;

$M = \frac{3}{2}M_{sr}$ Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

II.4.a.1 Equations électriques dans le repère dq

Maintenant appliquant la transformation de Park aux équations électriques (III.7) et (III.9) :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[v_{sdq0}] = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_s)]^{-1}[\phi_{sdq0}] \right]$$

Multipliant à gauche par $[P(\theta_s)]$

$$[v_{sdq0}] = [R_s][i_{sdq0}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sdq0}] + [P(\theta_s)] \left(\frac{d[P(\theta_s)]^{-1}}{dt} \right) [\phi_{sdq0}] \quad (\text{III.28}).$$

$$\text{Avec } [P(\theta_s)] \left(\frac{d[P(\theta_s)]^{-1}}{dt} \right) = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.29}).$$

De même pour l'équation (III.9).

$$[P(\theta_r)]^{-1}[v_{rdq0}] = [R_r][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdq0}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_r)]^{-1}[\phi_{rdq0}] \right] \quad (\text{III.30}).$$

Multipliant à gauche par $[P(\theta_r)]$

$$[v_{rdq0}] = [R_r][i_{rdq0}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rdq0}] + [P(\theta_r)] \left(\frac{d[P(\theta_r)]^{-1}}{dt} \right) [\phi_{rdq0}] \quad (\text{III.31}).$$

$$\text{Avec } [P(\theta_r)] \left(\frac{d[P(\theta_r)]^{-1}}{dt} \right) = \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(\text{III.28}) \text{ a } (\text{III.31}) \Rightarrow \begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) \phi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) \phi_{rq} = 0 \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) \phi_{rd} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.32}).$$

(III.27) et (III.32) \Rightarrow

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \left(\frac{d}{dt} \right) & -L_s \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) & M \left(\frac{d}{dt} \right) & -M \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) \\ L_s \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) & R_s + L_s \left(\frac{d}{dt} \right) & M \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) & M \left(\frac{d}{dt} \right) \\ M \left(\frac{d}{dt} \right) & -M \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt} \right) & -L_r \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) \\ M \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) & M \left(\frac{d}{dt} \right) & L_r \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right) & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.33}).$$

On effectue le changement de variables suivant :

$$i_{rd} = \frac{M}{L_r} i'_{rd} \text{ et } i_{rq} = \frac{M}{L_r} i'_{rq} \quad (\text{III.34}).$$

En posant $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$ Coefficient de dispersion ;

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \text{ Constante de temps rotorique.}$$

L'équation III.33 devient :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & -L_s \omega_s & (1 - \sigma)L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & -(1 - \sigma)L_s \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s + L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & (1 - \sigma)L_s \omega_s & (1 - \sigma)L_s \left(\frac{d}{dt}\right) \\ \left(\frac{d}{dt}\right) & -\omega_r & \frac{1}{T_r} + \left(\frac{d}{dt}\right) & -\omega_r \\ \omega_r & \left(\frac{d}{dt}\right) & \omega_r & \frac{1}{T_r} + \left(\frac{d}{dt}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i'_{rd} \\ i'_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.35}).$$

II.4.a.2 Couple électromagnétique

Dans le cas général, la puissance électrique instantanée P_e fournie aux enroulements du moteur s'exprime en fonction des grandeurs d'axes dq :

$$P_e = v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq} + v_{rd}i_{rd} + v_{rq}i_{rq} \quad (\text{III.36}).$$

La puissance mécanique P_m regroupe l'ensemble des termes liés aux dérivées des positions angulaires :

$$P_m = (\Phi_{sd}i_{sq} - \Phi_{sq}i_{sd}) \frac{d\theta_s}{dt} + (\Phi_{rd}i_{rq} - \Phi_{rq}i_{rd}) \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{III.37}).$$

En Remplaçant les flux par leurs développements de l'équation (III.27)

$$\begin{aligned} P_m &= (L_s i_{sd} i_{sq} + M i_{rd} i_{sq} - L_s i_{sd} i_{sq} - M i_{rq} i_{sd}) \frac{d\theta_s}{dt} + (L_r i_{rd} i_{rq} + M i_{rq} i_{sd} - L_r i_{rd} i_{rq} - \\ & M i_{rd} i_{sq}) \frac{d\theta_r}{dt} \\ \Rightarrow P_m &= (M i_{rd} i_{sq} - M i_{rq} i_{sd}) \frac{d\theta_s}{dt} + (M i_{rq} i_{sd} - M i_{rd} i_{sq}) \frac{d\theta_r}{dt} \\ \Rightarrow P_m &= M (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} \end{aligned} \quad (\text{III.38}).$$

$$\text{Avec } \begin{cases} P_m = C_e \frac{\omega_e}{P_p} \\ \text{et } \omega_e = P_p \omega_m = \omega_s - \omega_r \end{cases} \quad (\text{III.39}).$$

(III.38) et (III.39) donnent l'expression du couple suivante

$$C_e = P_p M (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \quad (\text{III.40}).$$

Le couple électromagnétique peut s'écrire de plusieurs façons, On cite seulement celles qu'on va utiliser dans la suite.

$$\begin{cases} C_e = P_p (1 - \sigma) (i_{sq} i'_{rd} - i_{sd} i'_{rq}) \\ C_e = P_p \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \end{cases} \quad (\text{III.41}).$$

III. Modèle moteur électrique – charge

A partir des systèmes matriciels (III.35 et III.27) On tire les équations des courants suivantes :

$$L'_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} = \frac{-M}{L_r} \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + v_{sd} + L'_s \omega_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} \omega_s \Phi_{rq} \quad (\text{III.42}).$$

$$L'_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} = \frac{-M}{L_r} \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + v_{sq} - L'_s \omega_s i_{sd} - \frac{M}{L_r} \omega_s \Phi_{rd} \quad (\text{III.43}).$$

A partir du système d'équation (III.32) et le système matriciel (III.27) On tire les équations des flux suivantes :

$$T_r \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \phi_{rd} = M i_{sd} + T_r \phi_{rq} (\omega_s - \omega_r) \quad (III.44).$$

$$T_r \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \phi_{rq} = M i_{sq} - T_r \phi_{rd} (\omega_s - \omega_r) \quad (III.45).$$

III.1 Diagramme structurel du moteur-charge

Pour tracer le diagramme structurel du moteur électrique on fait appel à la transformation de Laplace.

- Transformation de Laplace

$$pL'_s I_{sd}(p) + R_s I_{sd}(p) = \frac{-M}{L_r} p \phi_{rd}(p) + V_{sd}(p) + L'_s \omega_s(p) I_{sq}(p) + \frac{M}{L_r} \omega_s(p) \phi_{rq}(p) \quad (III.46).$$

$$pL'_s I_{sq}(p) + R_s I_{sq}(p) = \frac{-M}{L_r} p \phi_{rq}(p) + V_{sq}(p) - L'_s \omega_s(p) I_{sd}(p) - \frac{M}{L_r} \omega_s(p) \phi_{rd}(p) \quad (III.47).$$

$$T_r p \phi_{rd}(p) + \phi_{rd}(p) = M I_{sd}(p) + T_r \phi_{rq}(p) (\omega_s(p) - \omega_r(p)) \quad (III.48).$$

$$T_r p \phi_{rq}(p) + \phi_{rq}(p) = M I_{sq}(p) - T_r \phi_{rd}(p) (\omega_s(p) - \omega_r(p)) \quad (III.49).$$

Avec $L'_s = \sigma L_s$ Inductance transitoire.

Les équations (III.46 à III.49) permettent de tracer le diagramme structurel suivant :

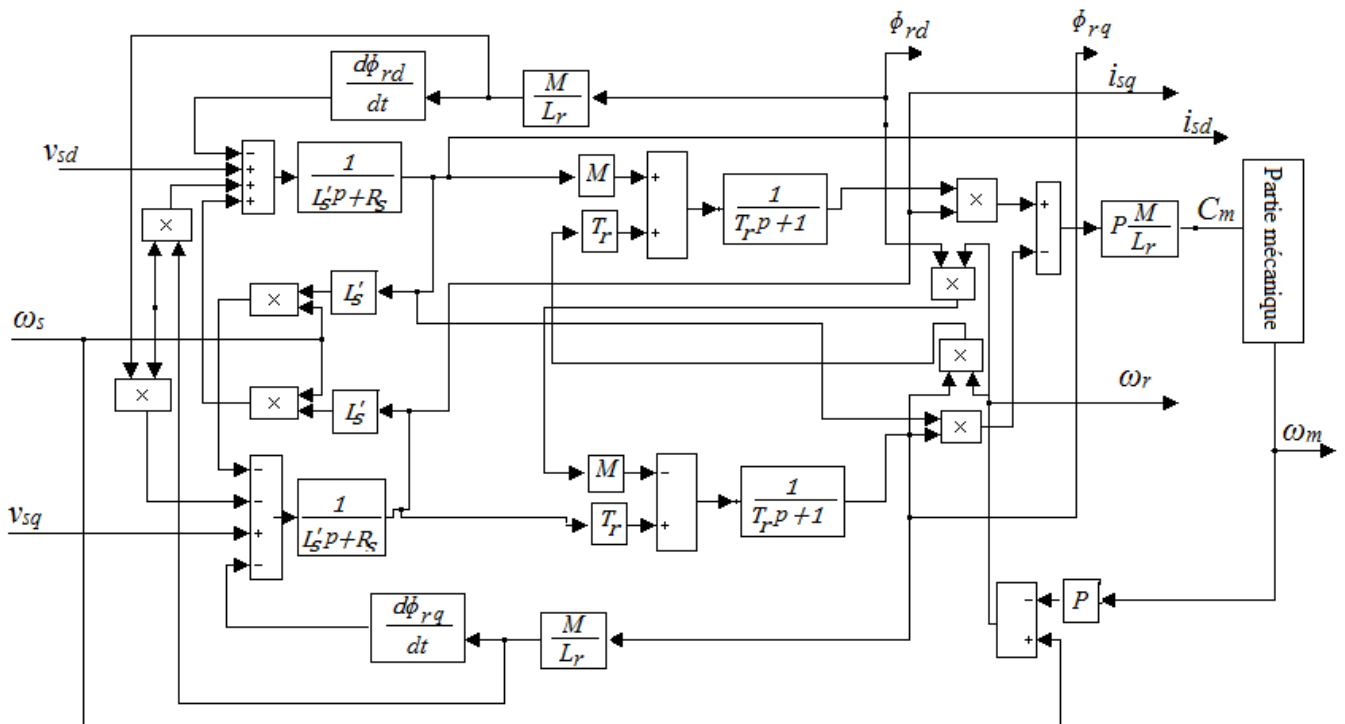


Figure III.8 Diagramme structurel du moteur-charge.

IV. Modélisation du moteur au régime freinage

IV.1 Modèle mathématique avec les variables statorique non transformée

L'une parmi les nombreuses raisons pour lesquelles on préserve les variables d'un enroulement d'un moteur asynchrone tel qu'ils sont est le modèle du freinage par injection du courant continu aux phases statorique. Ne pas les transformées signifie que les variables qui définissent l'état électrique des enroulements statoriques ou rotoriques demeurent sous forme de variables normales, tandis que l'état des raccordements entre les enroulements est maintenu par l'introduction de l'équation du couplage [27].

IV.1.a Equation du couplage statorique

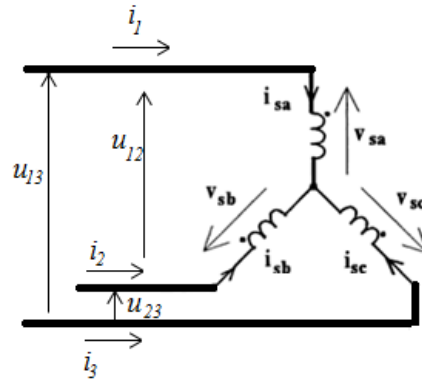


Figure III.9 Couplage étoile

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\text{Ou } [i_{sabc}] = [W_i][i_{s12}] \quad (\text{III.50}).$$

$$\begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}$$

$$\text{Ou } [u_{s12}] = [W_u][v_{sabc}] \quad (\text{III.51}).$$

IV.1.b Equation statorique

Appliquons les équations de couplages à la première équation du système (III.15).

Soit :

$$\begin{aligned} [W_u][v_{sabc}] &= \\ [R_s][W_u][W_i][i_{s12}] + \frac{d}{dt} ([W_u][L_s][W_i][i_{s12}] + [W_u][M_{sr}][P(\theta_r)]^{-1}[P(\theta_r)][i_{rabc}]) \\ [u_{s12}] &= [R_{s12}][i_{s12}] + \frac{d}{dt} ([M_{s12}][i_{s12}] + [M_{sr12dq}][i_{rdq0}]) \end{aligned} \quad (\text{III.52}).$$

$$\begin{aligned} \text{Avec : } [R_{s12}] &= R_s \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \\ [M_{s12}] &= L_s \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$[M_{sr12dq}] = M \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix}$$

IV.1.c Equation rotorique

Appliquons les équations de couplages à la deuxième équation du système (III.15).

Soit :

$$\begin{aligned} 0 = & [R_r][P(\theta_r)][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}([P(\theta_r)][L_r][P(\theta_r)]^{-1}[P(\theta_r)][i_{rabc}]) \\ & - \left(\frac{d}{dt}[P(\theta_r)]\right)[L_r][P(\theta_r)]^{-1}[P(\theta_r)][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}([P(\theta_r)][M_{sr}]^t[W_i][i_{s12}]) \\ & - \left(\frac{d}{dt}[P(\theta_r)]\right)[M_{sr}]^t[W_i][i_{s12}] \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 0 = [R_r][i_{rdq0}] + \frac{d}{dt}([M_{rdq}][i_{rdq0}] + [M_{rsdq12}][i_{s12}]) + \omega_r [A_2]([M_{rdq}][i_{rdq0}] + [M_{rsdq12}][i_{s12}]) \quad (\text{III.53})$$

$$\text{Avec : } [M_{sr12dq}] = M \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix},$$

$$: [M_{rdq}] = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$\text{Et } [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

IV.1.d Equations électriques

En conséquence, le système des équations du circuit électriques du moteur asynchrone dans ce cas peut être noté comme suit :

$$\begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -R_s & 0 & 0 \\ R_s & 2R_s & 0 & 0 \\ M\omega_r \frac{\sqrt{2}}{2} & M\omega_r \sqrt{2} & R_r & L_r \omega_r \\ -M\omega_r \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & -L_r \omega_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & -L_s & M\sqrt{\frac{3}{2}} & -M\frac{\sqrt{2}}{2} \\ L_s & 2L_s & 0 & M\sqrt{2} \\ M\sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & L_r & 0 \\ M\frac{\sqrt{2}}{2} & M\sqrt{2} & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.54})$$

IV.1.e Equation du couple électromagnétique

Dans ce cas le couple électromagnétique prend la forme suivante :

$$C_e = P_p M \left(\left(\frac{\sqrt{2}}{2} i_{s1} + \sqrt{2} i_{s2} \right) i_{rd} - \sqrt{\frac{3}{2}} i_{s1} i_{rq} \right) \quad (\text{III.55})$$

$$\text{Ou } C_e = \left(\frac{P_p(1-\sigma)L_s}{\sqrt{2}} \right) (-\sqrt{3}i_{s1}i'_{rq} + (i_{s1} + 2i_{s2})i'_{rd}) \quad (\text{III.56}).$$

IV.2 Dynamique du freinage

Le modèle dynamique est basé sur les équations III.54 et III.55. Pour un système triphasé des connexions (Figure II.5), nous appliquons directement les équations (III.54 et III.55) en prenant en compte des relations suivantes :

$$u_{12} = U_{DC} \quad u_{23} = 0 \quad i_3 = -i_1 - i_2 \quad (\text{III.57}).$$

Le système d'équations (III.54) peut être exprimé sous la forme :

$$[L] \frac{d[I]}{dt} = -([R_1] + \omega_r[R_2])[I] + [U] \quad (\text{III.58}).$$

Avec :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & -L_s & M\sqrt{\frac{3}{2}} & -M\frac{\sqrt{2}}{2} \\ L_s & 2L_s & 0 & M\sqrt{2} \\ M\sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & L_r & 0 \\ M\frac{\sqrt{2}}{2} & M\sqrt{2} & 0 & L_r \end{bmatrix};$$

$$[R_1] = \begin{bmatrix} R_s & -R_s & 0 & 0 \\ R_s & 2R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \text{ et}$$

$$[R_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ M\frac{\sqrt{2}}{2} & M\sqrt{2} & 0 & L_r \\ -M\sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}.$$

A partir de l'expression III.58 on peut écrire :

$$\frac{d[I]}{dt} = -[L]^{-1}([R_1] + \omega_r[R_2])[I] + [L]^{-1}[U] \quad (\text{III.59}).$$

A partir de l'équation (III.59) on trace le modèle SIMULINK du moteur en régime freinage.

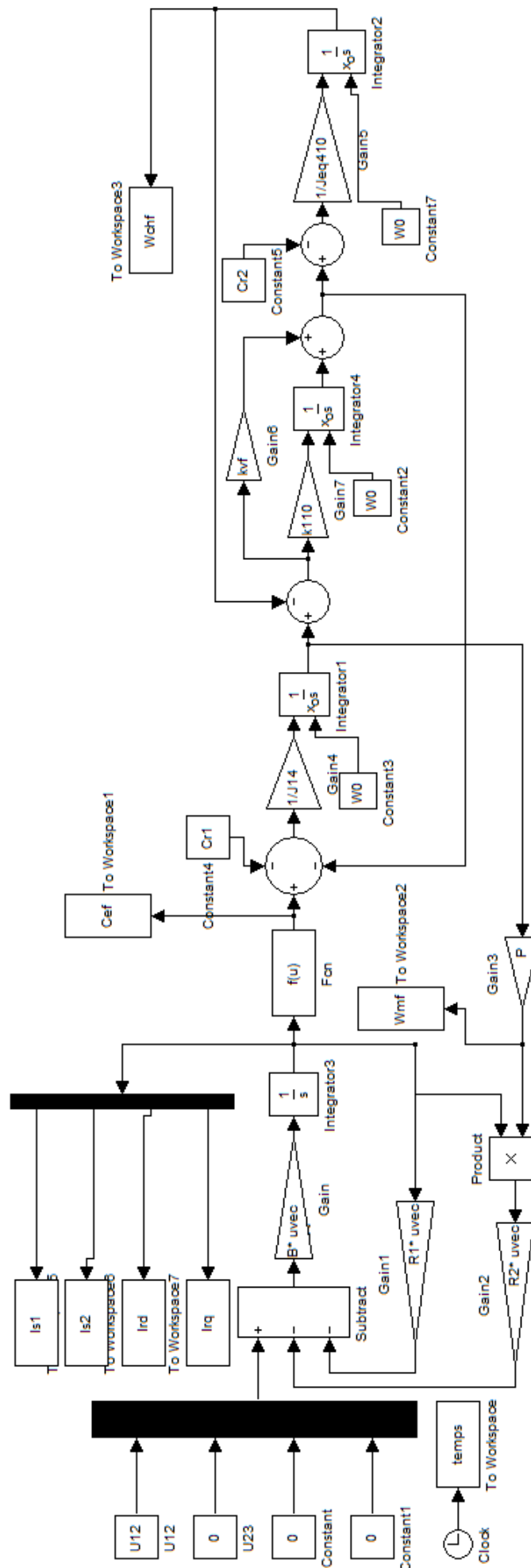


Figure III.10 Modèle SIMULINK du freinage par injection de courant continu aux phases statoriques de la MAS

V. Résultats de simulation est interprétation

Simulink est une boîte à outils de Matlab qui permet de faire des simulations de systèmes définis à l'aide d'un outil graphique.

Dans cette section du chapitre nous allons visualiser les régimes transitoires du couple et des vitesses des deux masses. Ensuite nous allons faire une étude comparative entre la dynamique du système avec prise en compte et sans prise en compte de l'amortissement, puis on va présenter l'influence de la résonance mécanique sur notre système.

V.1 Couple moteur :

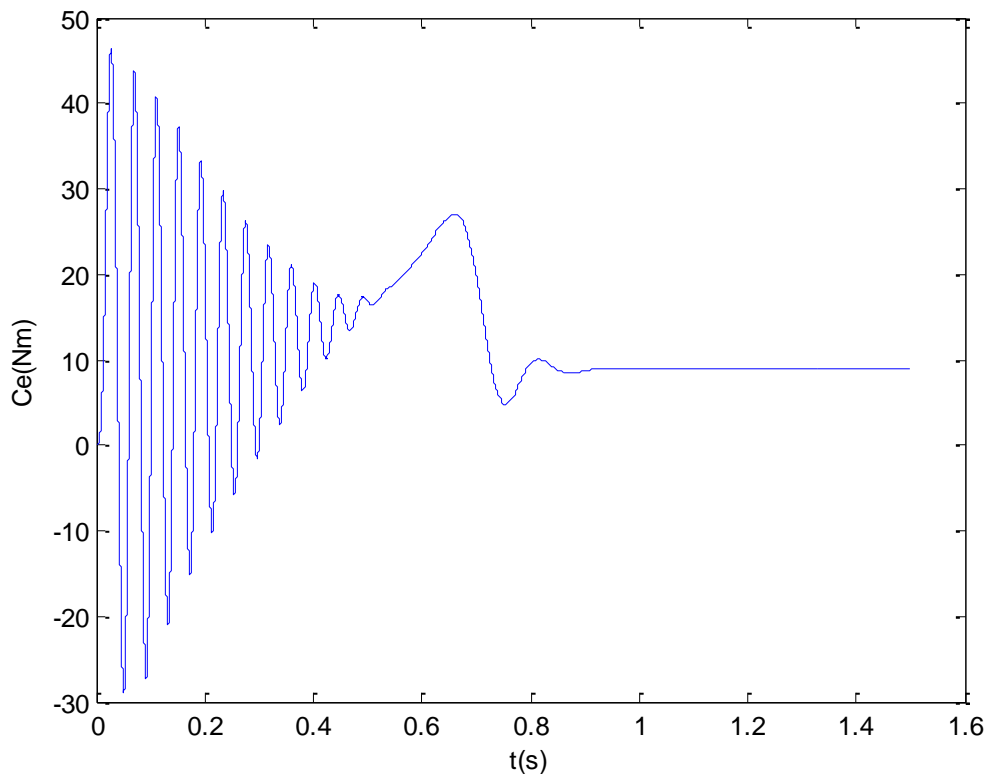


Figure III.11 Dynamique du couple moteur.

V.1.a Interprétation

Lors du démarrage direct du moteur asynchrone, on constate d'emblée que le couple est fortement pulsatoire. Ce qui peut s'expliquer en analysant l'équation III.40, le couple moteur est fortement lié aux courants statoriques et rotoriques, qui sont aussi liés aux tensions d'entrées par un système à non-linéarités paramétriques (équation III.33). Lorsque la vitesse de rotation augmente les ondulations du couple s'atténuent pour atteindre une valeur constante égale au couple résistant à la fin du régime transitoire

Ces ondulations peuvent s'avérer dangereuses et peuvent causer des dommages remarquables sur la partie mécanique, d'ailleurs c'est la raison du bruit engendrer par la partie mécanique à l'instant du démarrage. C'est pour cela qu'il faut prévoir une commande qui se base sur le modèle dynamique de la machine afin d'améliorer son comportement dynamique.

V.2 Vitesse

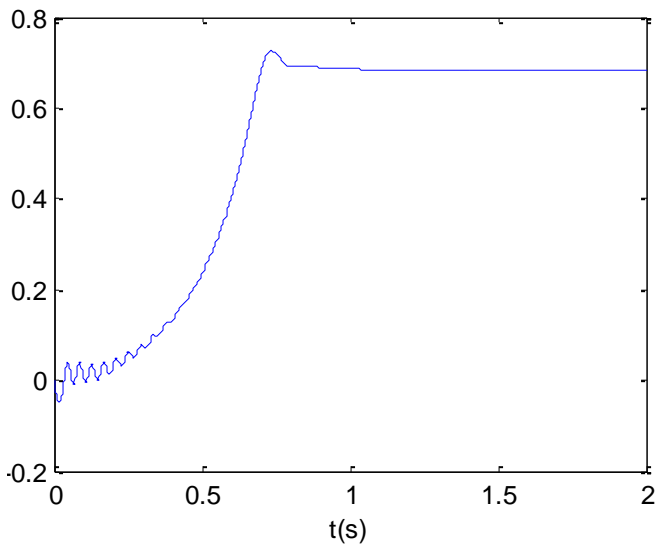


Figure III.12 (a) Dynamique de la vitesse linéaire du chariot

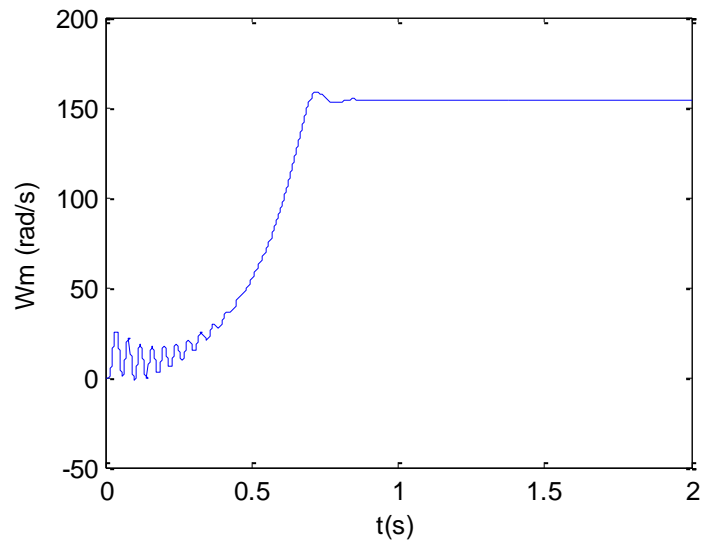


Figure III.12 (b) Dynamique de la vitesse de rotation du moteur

V.2.a Interprétation

La vitesse linéaire de la charge suit la vitesse de rotation du moteur en termes d'évolution. Ce qui peut s'expliquer par la deuxième équation du système (III.5). La vitesse de rotation du moteur présente de fortes ondulations que la vitesse du chariot car la présence des frottements visqueux sert de filtre de vibration.

V.3 Influence du coefficient d'amortissement

Introduire le coefficient d'amortissement dans le calcul rend le modèle plus complexe, c'est la raison pour laquelle on le néglige dans certains modèles. Mais il y a des modèles dont on ne peut se permettre de le négliger. Les trois figures ci-après nous donnent un aperçu général sur son influence sur la partie mécanique voire même sur le moteur électrique.

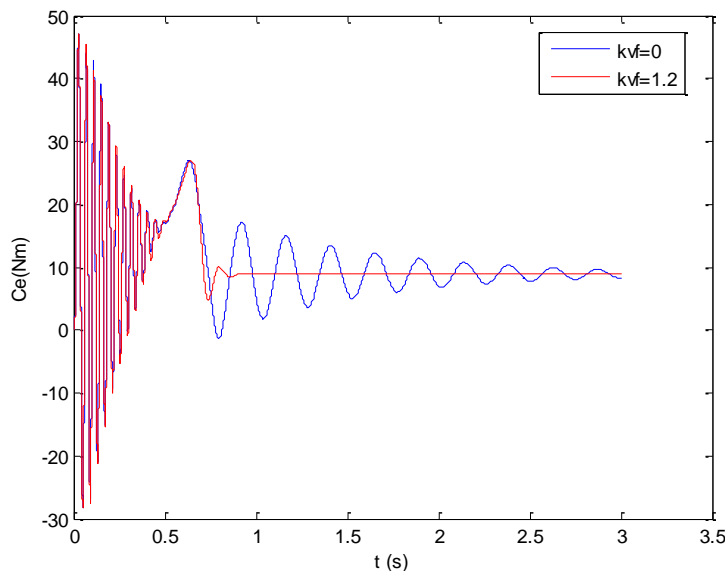


Figure III.13(a) Couple moteur

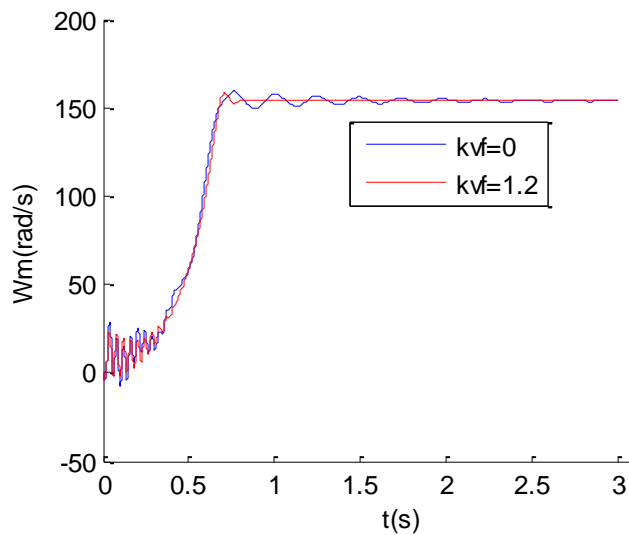


Figure III.13 (b) Vitesse de rotation du moteur

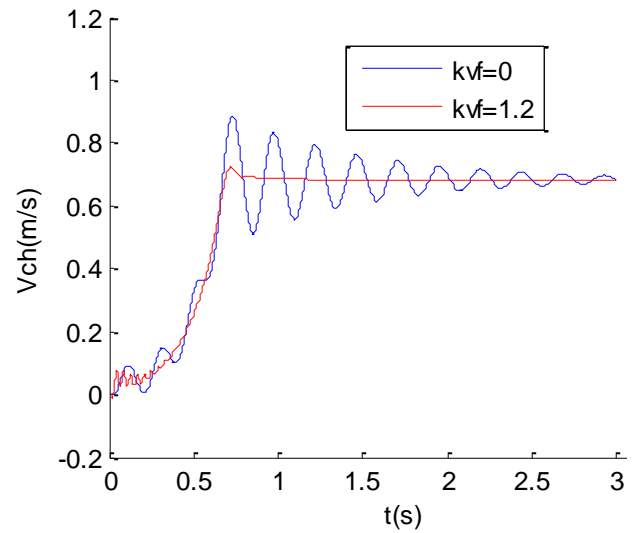


Figure III.13 (c) Vitesse du chariot

V.3.a Interprétation

La vitesse mécanique du moteur est moins touchée par ces ondulations, et cela peut s'expliquer par deux raisons. La première est due à la forte inertie que présente la première masse soit $0.0373kg.m^2$ (L'inertie retarde la vitesse mais elle l'aide à se stabiliser). Est la deuxième est due au fait que le coefficient d'amortissement se situe en aval de la première masse est donc elle a été influencée que par la chaîne de retour du couple C_{12} .

La raison pour laquelle on voit de fortes ondulations à la deuxième masse est due au fait que la deuxième masse qui rassemble, la poulie, la charge, le chariot et le contre poids qui sont reliés entre eux par des câbles qui ont des coefficients d'élasticités faibles.

On observant les trois figures III.13 (a, b et c) on constate d'emblée que l'amortissement est un très bon filtre d'ondulations et de vibrations mécaniques. Dans des mécanismes tels que le nôtre, présentant des coefficients d'élasticité faible voir de $10.75Nm/rad$, les concepteurs ont tendance souvent à intégrer des amortisseurs aux systèmes, soit par l'intégration des amortisseurs tel qu'on le voit sur les roues des voitures ou par les accouplements élastiques.

V.4 Résonance mécanique

En procédant à des transformations successives du diagramme structurel, on peut établir les relations entre le couple moteur C_e et les vitesses ω_m et ω_2 des différentes masses. Ces relations se traduisent sous forme de fonctions de transfert $W_1(p)$ et $W_2(p)$ (Voir annexe B).

Les Figures III.12 montrent la simulation du modèle lors du démarrage et de l'application du couple résistant $C_r = 8.92Nm$ à la fréquence de résonance.

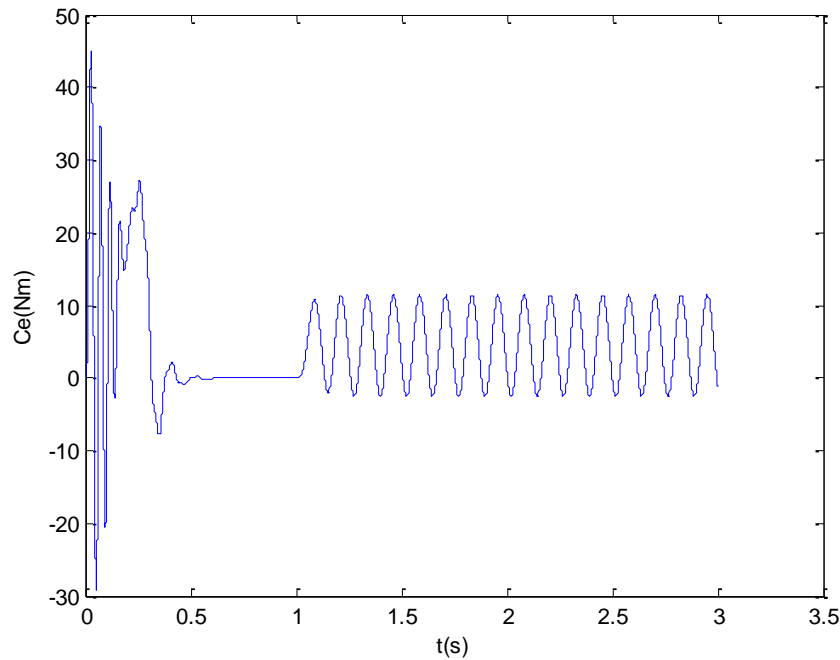


Figure III.14 (a) Couple moteur

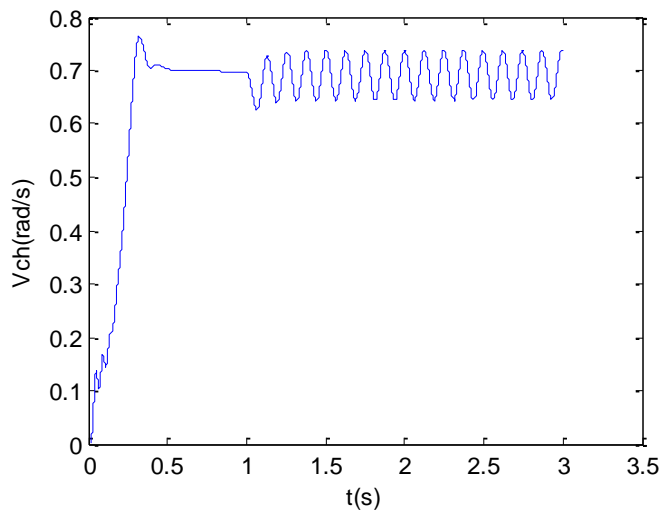


Figure III.14 (b) Vitesse du chariot

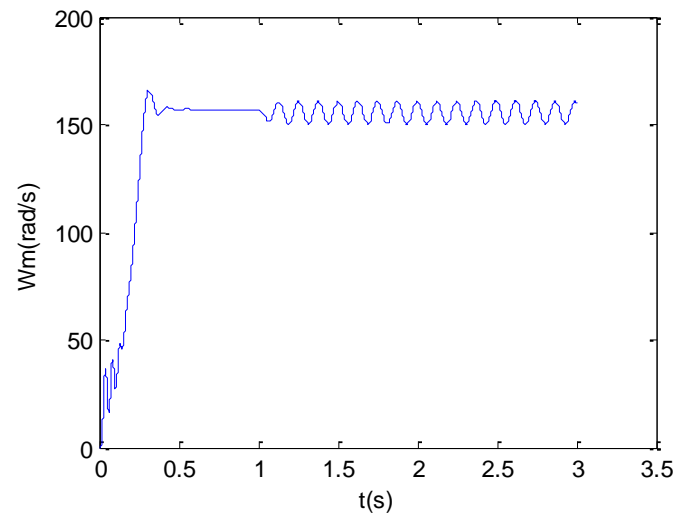


Figure III.14 (c) Vitesse de rotation du moteur

V.4.a Interprétation

Parmi les principales causes qui poussent l'ingénieur ou le concepteur à représenter la partie mécanique par plusieurs masses, le phénomène de résonance mécanique. Qu'il faut bien définir car les systèmes physiques ne supportent pas de tels contraintes.

Les trois Figures II.14 montrent que la fréquence de résonance cause des oscillations sur les paramètres mécaniques du système, ce qui peut engendrer un phénomène de broutement qui peut par la suite causer des dommages qui peuvent aller jusqu'au dysfonctionnement des éléments de la chaîne cinématique.

V.5 Résultat de simulation au régime freinage

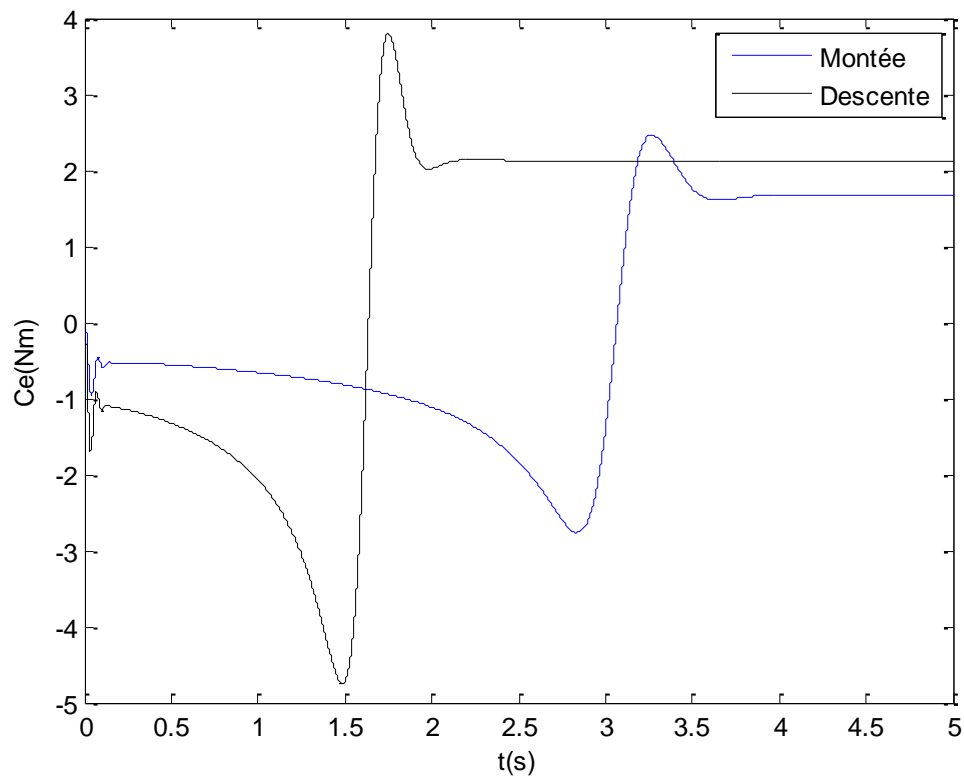


Figure III.15 (a) Couple du freinage en montée et en descente

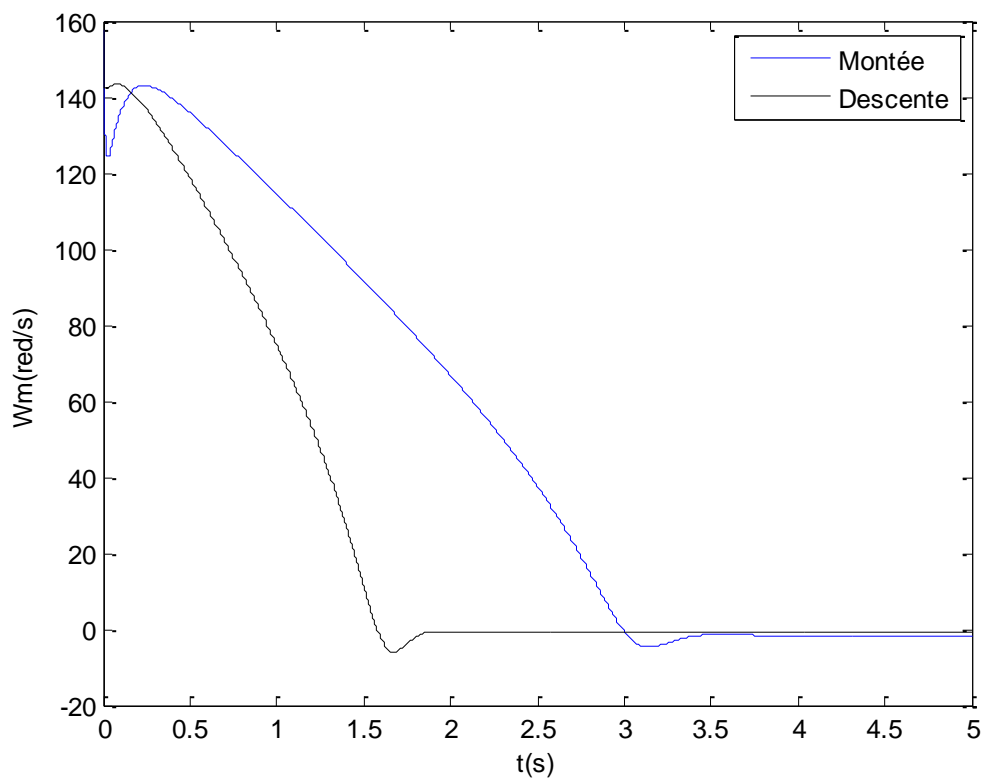


Figure III.15 (b) Vitesse du moteur en régime de freinage en montée et en descente

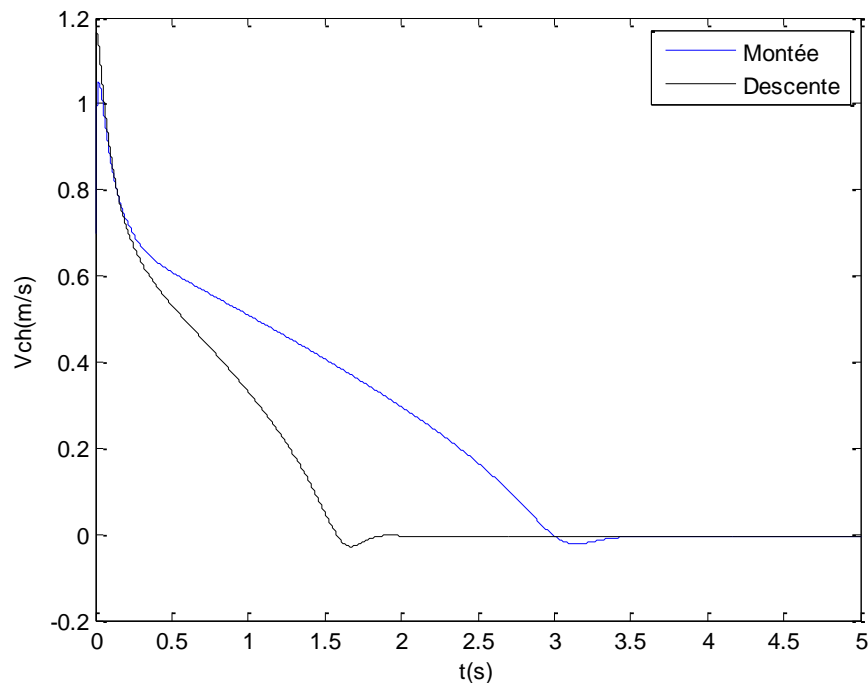


Figure III.15 (c) Vitesse du chariot en régime de freinage en montée et en descente

Remarque : Nous Avons représenté la vitesse et le couple du freinage en mêmes sans pour ne pas encombrer les figures. Les sens réel en suivant le raisonnement de la (Figure I.8) ; c.-à-d. :

- **En montée :** Le couple est négatif contrairement à la vitesse qui est positive.
- **En descente :** Le couple est positive et la vitesse négative.

V.5.a Interprétation

On constate à partir des trois figures III.15 (a, b et c) que le couple et le temps du régime transitoire sont une fonction directe du courant injecter dans les phases statorique, c.-à-d. en augmentant le courant continu dans les phases on obtient un freinage plus rapide et un couple importants en régime établie, ce qui conduit à avoir un couple à l'arrêt et il peut maintenir la charge à une très faible vitesse.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu le modèle dynamique du système ce qui nous a permis de vérifier le fonctionnement sur l'écran. La modélisation et la simulation économisent de temps et d'argent en dépensant de construire des prototypes. Il faut néanmoins que les modèles soient assez simples pour ne pas surcharger les calculs et pour mettre clairement en évidence les effets principaux.

Dans le cas les plus compliqués, les mécanismes se modélisent par une série d'inerties, reliés par des ressorts. Le calcul est considérablement facilité, en construisant un modèle dont le mouvement de toutes les inerties s'effectue par rapport à une quelconque pièce du mécanisme servant de référence. Le comportement dynamique d'un système aide le concepteur à choisir une commande adéquate, puisque cette dernière a pour but d'améliorer le comportement dynamique d'un mécanisme.

CHAPITRE IV : Commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique de la machine asynchrone

Les besoins sont très variés dans le domaine des entraînements. Ils vont des applications simples telles que l'entraînement des pompes, ventilateurs, jusqu'à des applications nécessitant des performances dynamiques ainsi que des plages de vitesse très étendues.

Le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage n'est réalisé dans de bonnes conditions qu'en faisant varier la fréquence des tensions appliquées. Cette solution exige des convertisseurs électroniques (Cyclo-convertisseur, onduleur de tension et onduleur de courant) et une commande élaborés.

I. L'onduleur de tension

I.1 Définition

L'onduleur de tension est un convertisseur statique (DC/AC) constitué de cellules de commutation généralement à transistors (faible puissance) ou à thyristors (forte puissance) [20]. Il permet d'imposer aux bornes de la machine des tensions d'amplitudes et de fréquences réglables en agissant sur la commande de ses interrupteurs, afin de permettre la commande des machines à courants alternatifs.

I.2 Modélisation de l'onduleur

Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. Dans l'hypothèse réaliste de la conduction continue, on montre que chaque groupe transistor diode, assemblés en parallèles, forme un interrupteur bicommandable dont l'état est complémentaire de celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation ($f_{11} = \overline{f_{12}}$).

L'onduleur de tension est alimenté par une tension du réseau redressée (V_{dc}). Le principe de redressement est d'injecter à l'entrée du redresseur une tension alternative sinusoïdale de 220/380 V du réseau à 50 Hz et de récolter à la sortie une tension ondulée d'une valeur moyenne égale à (V_{dc}), ensuite filtrée par un filtre LC , pour obtenir vers la fin l'expression de la tension continue :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{max} \quad (IV.1).$$

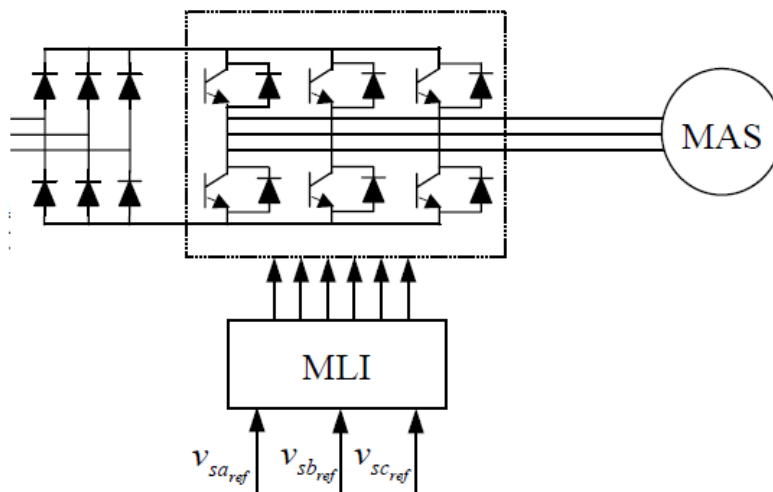


Figure IV.1 schéma d'alimentation d'une machine asynchrone par un onduleur de tension à partir d'un réseau triphasé.

I.2.a Fonction de connexion

Chaque interrupteur K_{ci} supposé idéaliser introduit une fonction de connexion f_{ci} ; le courant i_{ci} qui le traverse et la tension v_{ci} à ses bornes ont respectivement pour expression :

$$i_{ci} = f_{ci} i_c \quad \text{et} \quad v_{ci} = (1 - f_{ci})v_c \quad (\text{IV.2}).$$

Avec $f_{ci} = 0$: Interrupteur ouvert ;
 $f_{ci} = 1$: Interrupteur fermé ;
 i_c : Courant commuté ;
 v_c : Tension commuté.

Les deux interrupteurs d'un bras sont lié par la relation rigide entre leurs fonctions de connexion, soit :

$$f_{c1} + f_{c2} = 1 \quad (\text{IV.3}).$$

I.2.b Fonction de conversion

La fonction liant la valeur moyenne de la tension redressée aux fonctions de connexion est la fonction de conversion, soit :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.4}).$$

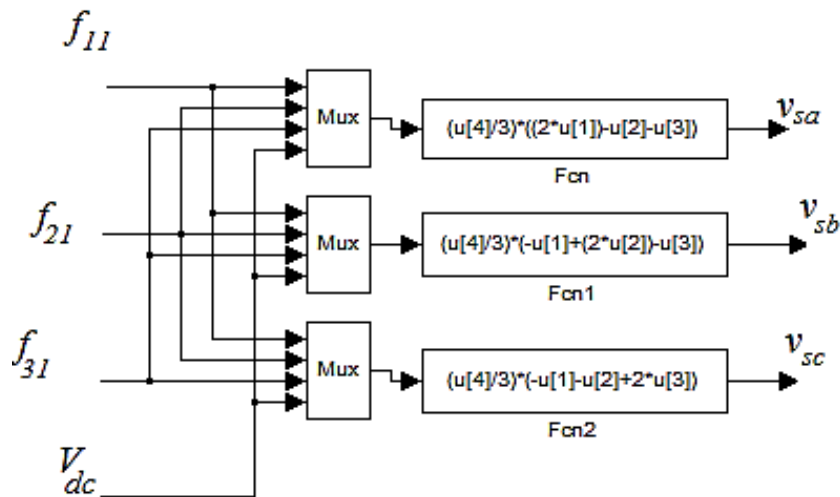


Figure IV.2 Schéma SIMULINK de l'onduleur.

II. Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

La tension de sortie du modulateur est formée d'une succession de créneaux d'amplitude égale à $\pm E$. La largeur des créneaux varie suivant une loi de modulation.

La loi de modulation est une comparaison entre la valeur d'une tension v_s , fonction sinusoïdale du temps à la fréquence f_s d'alimentation de la machine et la valeur d'une tension périodique (Porteuse) v_p qui est une succession de signaux triangulaires symétriques de fréquence f_p [22]. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la

porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasé de $\frac{2\pi}{3}$ à la même fréquence f_s .

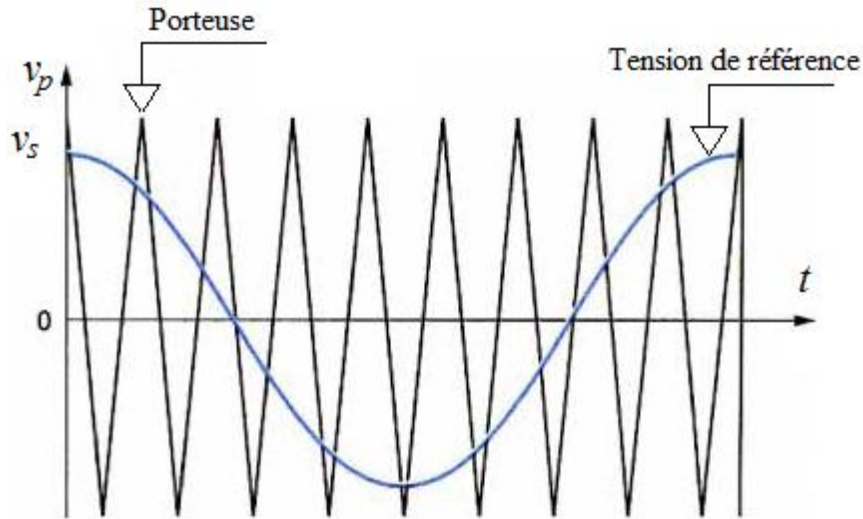


Figure IV.3 MLI sinus-triangle

- **Indice de modulation m** : C'est le rapport entre la fréquence de la porteuse f_p et celle de la tension de référence f_s .

$$m = \frac{f_p}{f_s} \tag{IV.5}$$

- **Coefficient de réglage de la tension r** : C'est le rapport entre la valeur de l'amplitude de la tension de référence v_s et celle de la porteuse v_p

$$r = \frac{v_s}{v_p} \tag{IV.6}$$

- **Tension de l'onduleur** : La tension à la sortie de l'onduleur est une fonction de r , son maximum vaut

$$v_{max} = rV_{dc} \tag{IV.7}$$

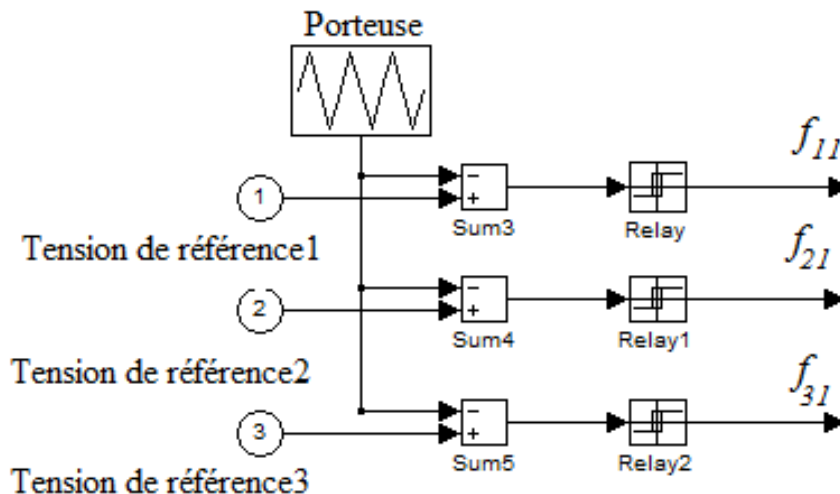


Figure IV.4 Schéma SIMULINK de la MLI sinus-triangle

III. Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

Le contrôle vectoriel des machines à courants alternatifs, hérité des travaux de Blaschke au début des années 1970, est devenu un standard incontournable. Elle a débouché sur de large gamme de commande des procédés industriels dès le début des années 1990.

L'essentiel des travaux de recherche dans le domaine de la commande de la machine asynchrone a été consacré à l'amélioration des performances du contrôle dynamique des variables couple et flux. Historiquement est apparue d'abord la commande scalaire reposant sur de simples lois statiques basées sur un modèle de la machine en régime établi. Puis, à partir des équations différentielles issues d'un modèle dynamiques de la machine, se sont généralisées des commandes dynamiques qualifiées de vectorielle basées sur le calage d'un référentiel d'étude avec un vecteur flux choisi [23].

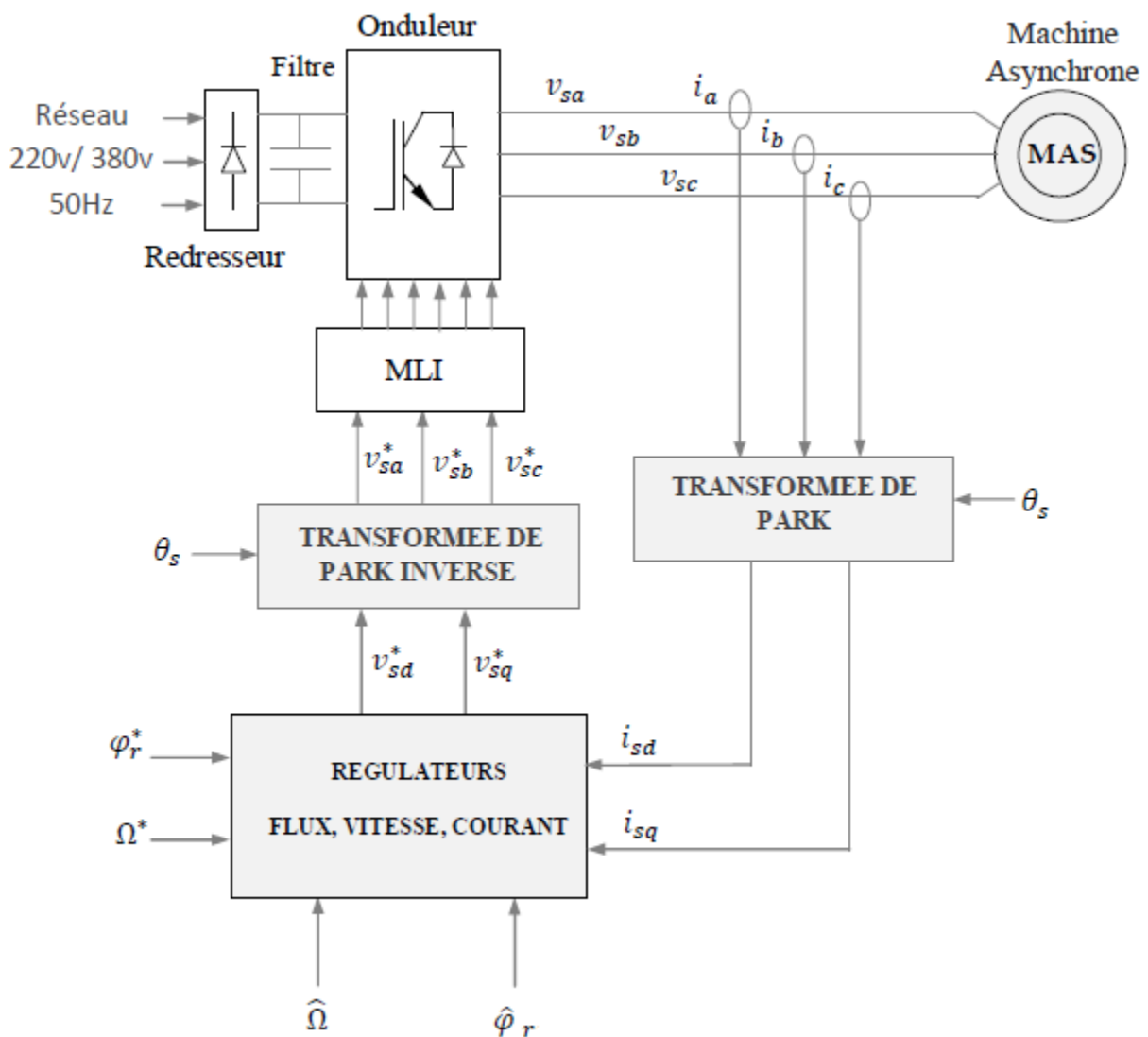


Figure IV.5 schéma synoptique de la commande vectorielle

III.1 Principe

L'objectif de la commande vectorielle des machines asynchrones est d'améliorer leur comportement régime dynamique et établie, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu. La composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine et la composante d'axe q joue le rôle du courant induit et permet de contrôler le couple. Cette commande appelée « commande à flux orienté » est basée sur un choix judicieux du repère (d,q) . Ce dernier est orienté de manière à ce que l'axe d soit en phase avec le flux désiré.

Nous avons vu que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère dq comme un produit croisé de courants ou de flux. Si nous reprenons l'écriture :

$$C_e = P_p \frac{M}{L_r} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd})$$

L'expression du couple se voit alors simplifiée et n'est plus fonction que du flux et du courant en quadrature. Ainsi, en maintenant le flux à une valeur constante, le couple ne dépend plus que de la composante en quadrature du courant statorique (i_{sq}) et peut être contrôlé par celle-ci [24].

$$C_e = P_p \frac{M}{L_r} (\phi_{rd} i_{sq}) \quad (IV.8).$$

Il convient de régler le flux en agissant sur la composante i_{sd} du courant statorique et on régule le couple en agissant sur la composante i_{sq} .

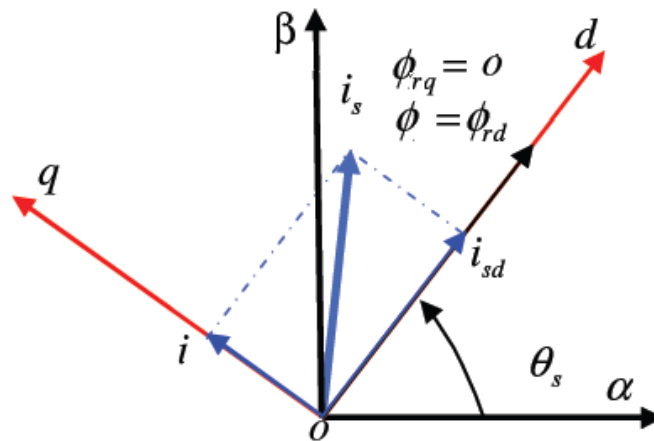


Figure IV.6 Principe de la commande vectorielle

III.2 Description de la commande vectorielle indirecte et directe

La commande vectorielle à flux rotorique orienté, est dite directe ou indirecte selon la méthode d'estimation du vecteur flux rotorique.

III.2.a Commande indirecte

Dans cette méthode, le flux n'est ni mesuré, ni reconstruit. Son orientation est réalisée par la position déduite par intégration de la pulsation d'auto pilotage, en se référant à l'équation suivante :

$$\bar{\theta}_r = \int_0^t \bar{\omega}_r dt + \theta_{r0} \quad (IV.9).$$

$$\text{Avec } \bar{\omega}_r = \frac{M}{T_r \phi_{rd}} i_{sq} \quad (IV.10).$$

En revanche, l'inconvénient de l'estimation indirecte du flux, c'est que sa précision est affectée par la variation de la résistance rotorique due à la variation de la température, ainsi qu'à la saturation dans le régime transitoire. Il apparaît d'emblée, que toute erreur relative sur la valeur de la constante de temps rotorique T_r se répercute directement sur les grandeurs estimées.

III.2.b Commande directe

La commande vectorielle directe nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase. Le vecteur flux est mesuré directement par des capteurs (rarement), dont la réalisation pratique est délicate (précision médiocre, filtrage du signal mesuré, coût élevé, ...). Ces capteurs sont donc proscrits et on a recours à des techniques d'estimations ou d'observations du flux à partir des grandeurs mesurables (modèle de la machine) [25].

III.3 Modèle de la machine en vue de sa commande vectorielle

Faire agir un moteur asynchrone comme moteur à courant continu n'est pas possible si l'on garde le modèle tel qu'il est, on voit bien que l'orientation du repère de Park a apporté une simplification à la relation III.41. D'autres modèles sont nécessaires parce que ce type de moteur a des équations rigides dépendant de plusieurs paramètres.

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{-1}{T_r} \phi_{rd} + \frac{M}{T_r} i_{sd} \quad (\text{IV.11}).$$

$$0 = \frac{M}{T_r} i_{sq} - \phi_{rd} \omega_r \quad (\text{IV.12}).$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{M}{bT_r} \phi_{rd} - a i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{1}{L'_s} v_{sd} \quad (\text{IV.13}).$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{-M}{b} \omega_m \phi_{rd} - a i_{sq} - \omega_s i_{sd} + \frac{1}{L'_s} v_{sd} \quad (\text{IV.14}).$$

$$\text{Avec : } a = \frac{L_r^2 R_s + M^2 R_r}{L'_s L_r^2} = 21.5238 \Omega/H \text{ et } b = L'_s L_r = 0.0099H$$

- **Equation du flux rotorique en fonction du courant i_{sd}**

$$H_\phi = \frac{\phi_{rd}(p)}{i_{sd}(p)} = \frac{M}{1+pT_r} \quad (\text{IV.15}).$$

- **Equation de la vitesse du rotor Ω en fonction du courant i_{sq}**

$$J_1 \frac{d\omega_m}{dt} = P_p \frac{M}{L_r} \phi_{rd} i_{sq} - C_r$$

Si on considère que le flux ϕ_{rd} est parfaitement contrôlé, et il est égale à ϕ_{rdref} .

$$\omega_m(p) = P_p \frac{M}{L_r} \phi_{rdref} \frac{1}{J_1 p} I_{sq}(p) - \frac{1}{J_1 p} C_r(p) \quad (\text{IV.16}).$$

- **Equation de la vitesse du synchronisme**

A partir de (IV.12), on obtient la pulsation du rotor :

$$\Rightarrow \omega_s(t) = \frac{M * i_{sq}(t)}{T_r \phi_{rdref}} + \omega_e \quad (\text{IV.17}).$$

$$\text{Avec } \omega_r(t) = \omega_s(t) - \omega_e(t)$$

III.3.a Découplage des courants

Des équations III.62 et III.63 on obtient les équations des tensions suivante :

$$L'_s \left(\frac{di_{sd}}{dt} - \frac{M}{bT_r} \Phi_{rd} + ai_{sd} - \omega_s i_{sq} \right) = v_{sd} \quad (\text{IV.18}).$$

$$L'_s \left(\frac{di_{sq}}{dt} + \frac{M}{b} \omega_m \Phi_{rd} + ai_{sq} + \omega_s i_{sd} \right) = v_{sq} \quad (\text{IV.19}).$$

$$\text{On Définit : } \begin{cases} v_{sd1} = v_{sd} + e_d \\ v_{sq1} = v_{sq} + e_q \end{cases} \quad (\text{IV.20}).$$

$$v_{sd} + \frac{M}{L_r T_r} \Phi_{rdref} + L'_s \omega_s i_{sq} = v_{sd} + e_d = v_{sd1} = L'_s \frac{di_{sd}}{dt} + L'_s a i_{sd}$$

$$v_{sq} - \frac{M}{L_r} \omega_m \Phi_{rdref} - L'_s \omega_s i_{sd} = v_{sq} + e_q = v_{sq1} = L'_s \frac{di_{sq}}{dt} + L'_s a i_{sq}$$

Par identification on obtient :

$$\begin{cases} e_d = \frac{M}{L_r T_r} \Phi_{rdref} + L'_s \omega_s i_{sq} \\ e_q = -\frac{M}{L_r} \omega_m \Phi_{rdref} - L'_s \omega_s i_{sd} \end{cases} \quad (\text{IV.21}).$$

En utilisant le formalisme de Laplace

$$H_i(p) = \frac{I_{sd}(p)}{V_{sd1}(p)} = \frac{I_{sq}(p)}{V_{sq1}(p)} = \frac{\frac{1}{aL'_s}}{(1 + \frac{1}{a}p)} \quad (\text{IV.22}).$$

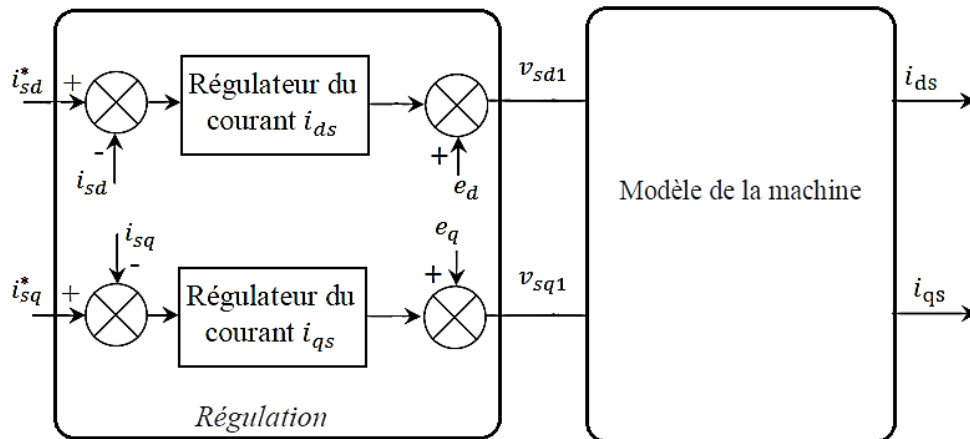


Figure IV.7 Découplage des courants

III.4 Synthèse des correcteurs PI

III.4.a Structure des correcteurs PI

La structure du régulateur PI est illustrée à la figure IV.8. L'action intégrale permettra d'annuler l'erreur statique entre i_{sd} et i_{sd}^* . L'action proportionnelle permettra d'atteindre plus rapidement la valeur finale en réduisant, par la méthode de compensation de pôle, la constante de temps du système contrôlé relativement au système en boucle ouverte [26].

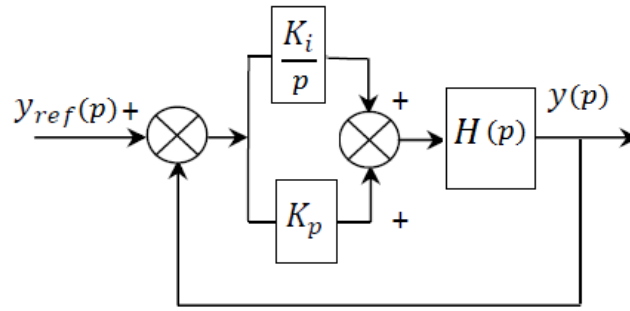


Figure IV.8 structure du régulateur PI

Soit $H(p)$ un système de premier ordre donné par :

$$H(p) = \frac{h_0}{1+p\tau_0} \quad (\text{IV.23}).$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$H_{FTBF}(p) = \frac{h_0 K_i \left(\frac{K_p}{K_i} p + 1 \right)}{(1+p\tau_0) \left(p + (K_p p + K_i) \frac{h_0}{1+p\tau_0} \right)} \quad (\text{IV.24}).$$

En appliquant la méthode de compensation de pôle on aura :

$$\begin{cases} \frac{K_p}{K_i} p + 1 = 1 + p\tau_0 \Rightarrow \tau_0 = \frac{K_p}{K_i} \\ H_{FTBF}(p) = \frac{h_0 K_i}{p + h_0 K_i} \Rightarrow \tau_{bf} = \frac{1}{h_0 K_i} \end{cases} \quad (\text{IV.25}).$$

Les paramètres du régulateur sont donc

$$\begin{cases} K_i = \frac{1}{h_0 \tau_{bf}} \\ K_p = \frac{\tau_0}{h_0 \tau_{bf}} \end{cases} \quad (\text{IV.26}).$$

III.5 Dimensionnement des correcteurs PI

- **Régulateurs des courants**

Connaissant la transmittance des courants H_i (IV.22), on applique la méthode de compensation de pôles :

$$H_i(p) = \frac{h_i}{(1+\tau_i p)}$$

$$\text{Avec } h_i = \frac{1}{aL'_s} = 0.4425$$

$$\tau_i = \frac{1}{a} = 0.0465 \text{ s}$$

Pour obtenir une boucle H_{ibf} trois fois plus rapide que H_i on impose $\tau_{ibf} = \tau_i/3$ [26].

$$K_{i1} = \frac{1}{h_i \tau_{ibf}} = 145.9314$$

$$K_{p1} = \frac{\tau_i}{h_i \tau_{ibf}} = 6.78$$

- **Régulateur du flux**

Connaissant la transmittance du flux rotorique H_ϕ (IV.15), on applique la méthode de compensation de pôles :

$$H_\phi(p) = \frac{h_\phi}{(1+\tau_\phi p)}$$

Avec $h_\phi = M = 0.094$

$$\tau_\phi = T_r = 0.1190$$

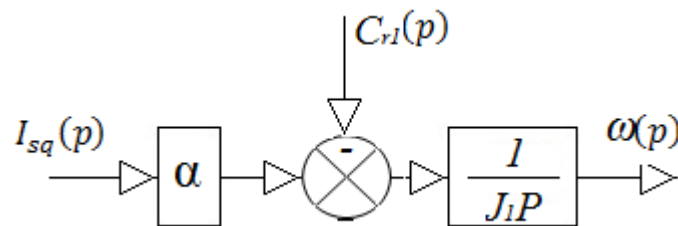
Pour obtenir une boucle $H_{\phi b f}$ dix fois plus rapide que H_ϕ on impose $\tau_{\phi b f} = \frac{T_r}{10}$ [26].

$$K_{i2} = \frac{1}{h_\phi \tau_{\phi b f}} = 894.0697$$

$$K_{p2} = \frac{\tau_\phi}{h_\phi \tau_{\phi b f}} = 106.3830$$

- **Régulateur de vitesse**

En observant l'équation IV.16 On peut constater que la régulation de la vitesse en tenant compte du couple résistant n'est pas comme les deux cas précédents. Pour cela nous proposons le schéma de régulation de la figure IV.10. Qui permet de contrôler la machine en asservissement (suivi de la consigne de vitesse $C_r = 0$) et en régulation (réjection du couple résistant $\omega_{ref} = 0$) [26].



FigureIV.9 Modèle de comportement en vitesse de la machine.

Avec $\alpha = P_p \frac{M}{L_r} \phi_{rdref} = 2.14$

Pour un fonctionnement en régulation ($\omega_{ref}(p) = 0$), on insère un correcteur proportionnel.

La fonction de transfrère en boucle fermée de la boucle interne est donnée par :

$$H_{\Omega b f r}(p) = \frac{\omega(p)}{C_r(p)} = \frac{\frac{1}{\alpha K_p}}{\left(1 + \frac{J_1}{\alpha K_p} p\right)} = \frac{h_{\Omega b f r}}{(1+\tau_{\Omega b f r} p)}$$

$$K_{p4} = \frac{J_1}{\alpha \tau_{\Omega b f r}} = 3.486$$

On impose $\tau_{\Omega b f r} = 5ms$ [26].

On applique la méthode de compensation du pôle à la boucle interne de la figure IV.10:

$$K_{i3} = \frac{1}{(-1/\alpha K_{p4})\tau_{\Omega bfa}} = 149.2$$

On impose $\tau_{\Omega bfa} = 50ms$ [26].

$$K_{p3} = \frac{\tau_{\Omega bfr}}{(-1/\alpha K_{p4})\tau_{\Omega bfa}} = 0.746$$

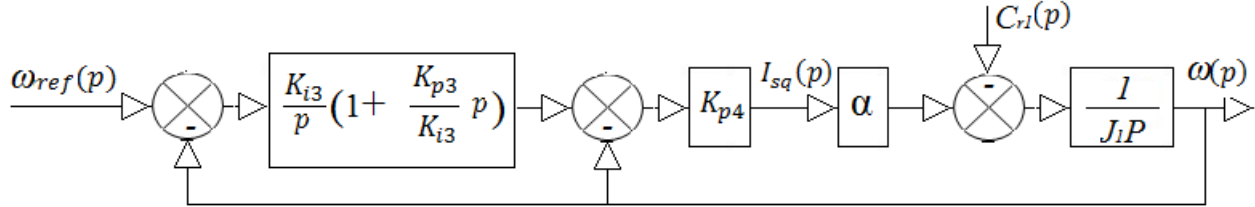


Figure IV.10 Schéma de régulation de vitesse.

IV. Observation du flux rotorique

Le flux rotorique à une importance capitale au sein du dispositif de contrôle du couple électromagnétique (équation IV.8), il intervient directement sur l'orientation indirecte du repère de Park et, par son influence dans le calcul de la pulsation statorique, participe à l'estimation des f.e.m. de découplage entre axes. D'un point de vue économique, l'utilisation d'un capteur de flux est à éviter [23].

IV.1 Représentation d'état adaptée à l'observation du flux rotorique

Pour développer un observateur de flux, il faut transposer le modèle de la machine asynchrone sous la forme d'équations d'état. A priori, le modèle de la machine asynchrone se prête difficilement à cette transposition, car les équations de la machine sont non linéaires. En effet, il existe dans ces équations des produits entre des courants et la vitesse qui sont des variables d'états (équations III.42 à III.45). Cependant, dans la majorité des cas, on peut supposer que la vitesse mécanique varie lentement par rapport aux grandeurs électriques, c'est-à-dire que les constantes de temps électriques les plus grandes sont beaucoup plus petites que la constante de temps mécanique. La vitesse est alors considérée comme un paramètre et non une variable [23].

$$\begin{bmatrix} \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} \\ \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_r} & (\omega_s - P_p \omega_m) & \frac{M}{T_r} & 0 \\ -(\omega_s - P_p \omega_m) & \frac{-1}{T_r} & 0 & \frac{M}{T_r} \\ \frac{MR_r}{L'_s L'_r} & \frac{M}{L'_s L'_r} P_p \omega_m & \frac{-R_{sr}}{L'_s} & \omega_s \\ \frac{-M}{L'_s L'_r} P_p \omega_m & \frac{MR_r}{L'_s L'_r} & -\omega_p & \frac{-R_{sr}}{L'_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L'_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L'_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (IV.27).$$

Avec : $R_{sr} = R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2}$ Résistance totale vue du stator.

IV.2 Observateur d'ordre réduit

Dans la mesure où l'on cherche à estimer les deux composantes du flux rotorique, l'estimateur dynamique de flux le plus simple que l'on puisse développer est déduit des deux premières équations du système précédent. La notation ($\widetilde{}$) désigne les grandeurs estimées et la notation ($\widehat{}$) désigne les grandeurs mesurées.

Soit :

$$\begin{bmatrix} \frac{d\widetilde{\Phi}_{rd}}{dt} \\ \frac{d\widetilde{\Phi}_{rq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_r^*} & (\omega_s - P_p \widetilde{\omega}_m) \\ -(\omega_s - P_p \widetilde{\omega}_m) & \frac{-1}{T_r^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{\Phi}_{rd} \\ \widetilde{\Phi}_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M^*}{T_r^*} & 0 \\ 0 & \frac{M^*}{T_r^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i}_{sd} \\ \widehat{i}_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.28}).$$

Ou

$$\begin{bmatrix} \frac{d\widetilde{\Phi}_{r,dq}}{dt} \end{bmatrix} = [A_r] [\widetilde{\Phi}_{r,dq}] + [B_r] [\widehat{i}_{s,dq}] \quad (\text{IV.29}).$$

Avec : $\begin{bmatrix} \frac{d\widetilde{\Phi}_{r,dq}}{dt} \end{bmatrix}$ Vecteur des variables d'état ;

$[\widehat{i}_{s,dq}]$ Vecteur d'entrée ;

$$[A_r] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_r^*} & (\omega_s - P_p \widetilde{\omega}_m) \\ -(\omega_s - P_p \widetilde{\omega}_m) & \frac{-1}{T_r^*} \end{bmatrix} \text{ et } [B_r] = \begin{bmatrix} \frac{M^*}{T_r^*} & 0 \\ 0 & \frac{M^*}{T_r^*} \end{bmatrix} \text{ Matrice dépendant du modèle du système.}$$

Pour obtenir un observateur à partir du système (IV.27), on lui ajoute un terme de correction calculé à partir d'un vecteur estimé et mesuré de sortie (voir Annexe C) :

$$[\mathcal{E}] = [K] \left[[\widehat{Y}] - [\widetilde{Y}] \right] = [K] \left[[\widehat{Y}] - [C_r] [\widetilde{\Phi}_{r,dq}] \right] \quad (\text{IV.30}).$$

On choisit une structure de gain similaire à celle de la matrice $[A_r]$

$$[K] = \begin{bmatrix} -k_1 & k_2 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.31}).$$

Le vecteur des sorties mesurées à considérer est donc dépendant des flux rotoriques :

$$[\widehat{Y}] = [C_r] [\widetilde{\Phi}_{r,dq}] \quad (\text{IV.32}).$$

Ce terme peut se déterminer à partir des deux dernières équations du système (IV.27) :

$$[D_2] \left[\frac{di_{s,dq}}{dt} \right] = [C_r] [\Phi_{r,dq}] + [D_1] [i_{s,dq}] + [v_{s,dq}] \quad (\text{IV.33}).$$

$$\text{Avec: } [D_2] = L_s^* \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [C_r] = \frac{M^*}{L_r^*} \begin{bmatrix} \frac{1}{T_r^*} & P_p \omega_m \\ P_p \omega_m & \frac{1}{T_r^*} \end{bmatrix} \text{ et } [D_1] = \begin{bmatrix} -R_{sr}^* & L_s^* \omega_s \\ -L_s^* \omega_s & -R_{sr}^* \end{bmatrix}.$$

En considérant que toutes ces grandeurs mesurables, on détermine alors une nouvelle expression du vecteur des sortie mesurées :

$$[\hat{Y}] = [C_r][\widehat{\Phi_{r_dq}}] = [D_2] \left[\frac{d\widehat{i_{s_dq}}}{dt} \right] - [D_1][\widehat{i_{s_dq}}] - [v_{s_dq_reg}] \quad (\text{IV.34}).$$

En associant (IV.28, IV.29 et IV.33), on obtient l'observateur suivant :

$$\left[\frac{d\widehat{\Phi_{r_dq}}}{dt} \right] = [A_r][\widehat{\Phi_{r_dq}}] + [B_r][\widehat{i_{s_dq}}] + [K] \left([D_2] \left[\frac{d\widehat{i_{s_dq}}}{dt} \right] - [D_1][\widehat{i_{s_dq}}] - [v_{s_dq_reg}] - [C_r][\widehat{\Phi_{r_dq}}] \right) \quad (\text{IV.35}).$$

$$\text{Ou } \left[\frac{d\widehat{\Phi_{r_dq}}}{dt} \right] = [A_k][\widehat{\Phi_{r_dq}}] + [B_k][\widehat{i_{s_dq}}] + [K][D_2] \left[\frac{d\widehat{i_{s_dq}}}{dt} \right] - [K][v_{s_dq_reg}] \quad (\text{IV.36}).$$

Avec :

$$[A_k] = [A_r] - [K][C_r] = \begin{bmatrix} a_{1k} & -a_{2k} \\ a_{2k} & a_{1k} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.37}).$$

$$[B_k] = [B_r] - [K][D_1] = \begin{bmatrix} b_{1k} & -b_{2k} \\ b_{2k} & b_{1k} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.38}).$$

$$\begin{aligned} \text{Et : } a_{1k} &= \frac{-1}{T_r^*} + \frac{M^*}{L_r^*} \left(\frac{k_1}{T_r^*} + k_2 P_p \omega_m \right) \\ a_{2k} &= -(\omega_s - P_p \omega_m) - \frac{M^*}{L_r^*} \left(k_1 P_p \omega_m - \frac{k_2}{T_r^*} \right) \\ b_{1k} &= \frac{M^*}{T_r^*} - k_1 R_{sr}^* + k_2 L_s'^* \omega_s \\ b_{2k} &= -k_1 L_s'^* \omega_s - k_2 R_{sr}^* \end{aligned}$$

L'estimation du flux à partir de l'observateur obtenu par l'équation (IV.29) nécessite la connaissance de la dérivée du courant. Il n'est cependant pas nécessaire de dériver du courant mesuré pour connaître cette valeur. En effet, un simple changement de variable permet de prendre en compte la dérivée du courant sans la calculer directement. On définit alors un nouveau vecteur d'état qui reprend tous les termes dérivés :

$$[\tilde{Z}] = [\widehat{\Phi_{r_dq}}] - [K][D_2][\widehat{i_{s_dq}}] \quad (\text{IV.39}).$$

L'observateur (IV.35) s'écrit alors comme suit :

$$\left[\frac{d\tilde{Z}}{dt} \right] = [A_k][\tilde{Z}] + [B'_k][\widehat{i_{s_dq}}] - [K][v_{s_dq_reg}] \quad (\text{IV.40}).$$

Avec

$$[B'_k] = [B_k] + [A_k][K][D_2] \quad (\text{IV.41}).$$

Le vecteur est finalement déduit de la relation suivante :

$$[\widehat{\Phi_{r_dq}}] = [\tilde{Z}] + [K][D_2][\widehat{i_{s_dq}}] \quad (\text{IV.42}).$$

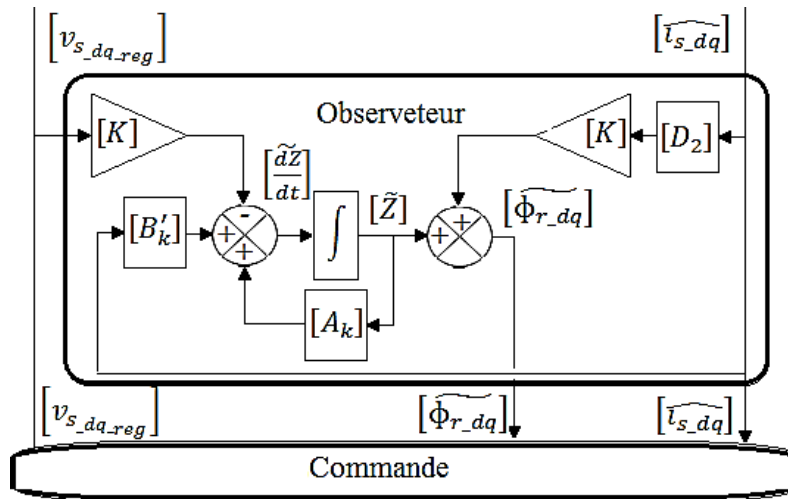


Figure IV.11 Schéma fonctionnel de l'observateur de flux rotorique d'ordre réduit.

IV.3 Détermination des gains par placement de pôles

Les gains de l'observateur doivent être choisis afin de fixer le temps de réponse de l'observateur (qui doit être inférieur au temps de réponse du processus) et au minimum assurer sa stabilité. Il s'ensuit alors des valeurs particulières pour les pôles du polynôme caractéristique de la matrice $[A]$ [23]. Le polynôme caractéristique de la matrice $[A_k]$ se détermine de la manière suivante ($[I]$ est la matrice identité).

$$P_c = \det(p[I] - [A_k]) = p^2 - 2a_{1k}p + a_{1k}^2 + a_{2k}^2 \quad (\text{IV.43}).$$

Les solutions générales de ce polynôme sont :

$$(-a + jb) \text{ et } (-a - jb)$$

Par identification on trouve : $a = -a_{1k}$ et $b = a_{2k}$

De ces relations on déduit

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\frac{M^*}{L_r^*} \left(\left(\frac{1}{T_r^*} \right)^2 + (P_p \omega_m)^2 \right)} \begin{bmatrix} \left(a - \frac{1}{T_r^*} \right) \frac{1}{T_r^*} + \left(b - (\omega_p - P_p \omega_m) \right) P_p \omega_m \\ P_p \omega_m \left(a - \frac{1}{T_r^*} \right) + \frac{1}{T_r^*} \left(-b + (\omega_p - P_p \omega_m) \right) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.44}).$$

En pratique, on choisit les pôles de l'observateur afin d'augmenter la dynamique de celui-ci, ce qui revient à choisir des pôles ayant une partie réelle inférieure à $(-R_r/L_r)$ [23].

Soit :

$$-R_r/L_r = -8.4$$

Donc on choisit $-a = -9$.

Le choix de b repose sur l'amortissement de l'observateur b/a , soit un amortissement de 0.2 [23].

Donc $b = 1.8$

En fin :

$$k_1 = 0.0241 \quad \text{et} \quad k_2 = 0.0042$$

V. Simulation de la commande vectorielle

A L'aide du Matlab SIMULINK nous allons vérifier la commande vectorielle :

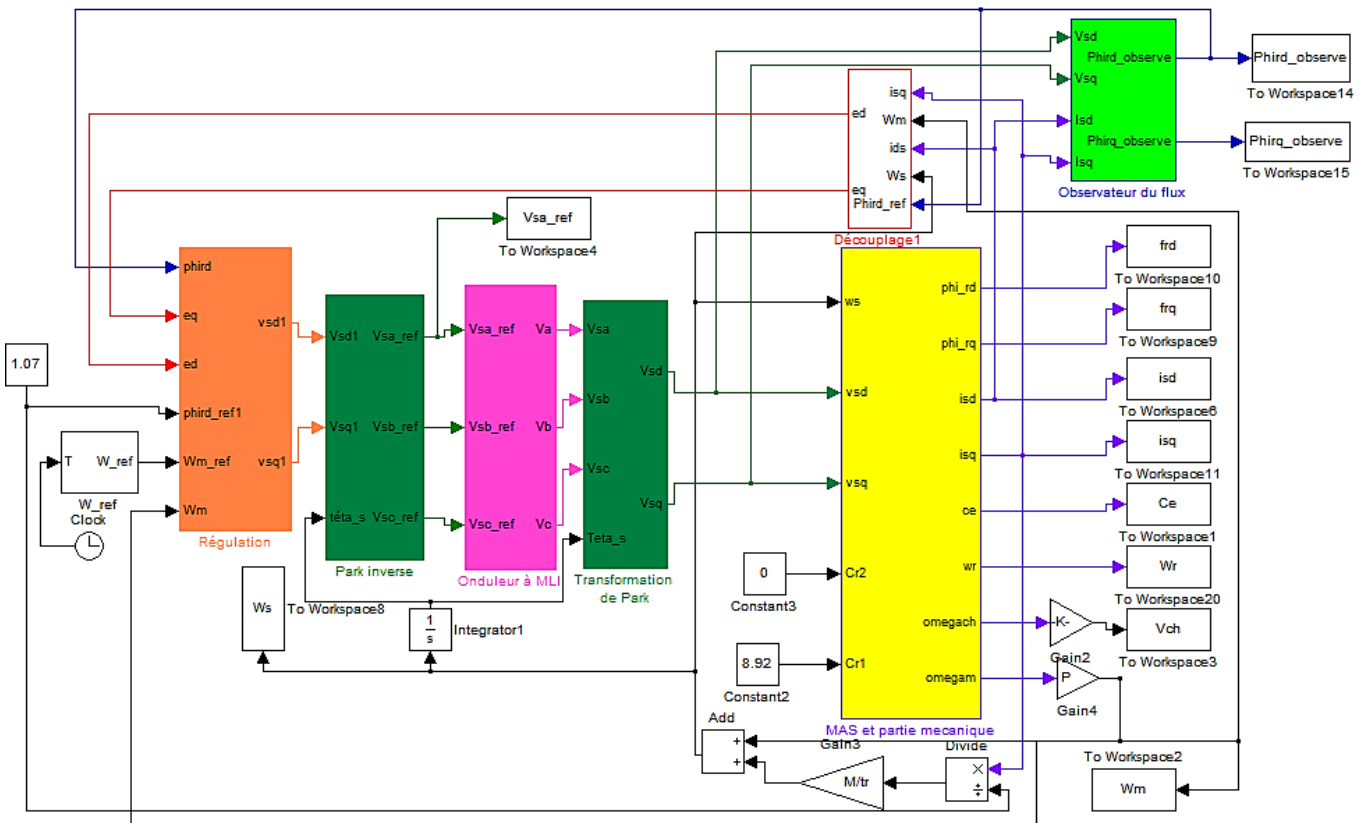


Figure IV.12 Modèle SIMULINK de la commande vectorielle

V.1 Résultats de simulation

V.1.a Grandeurs mécaniques

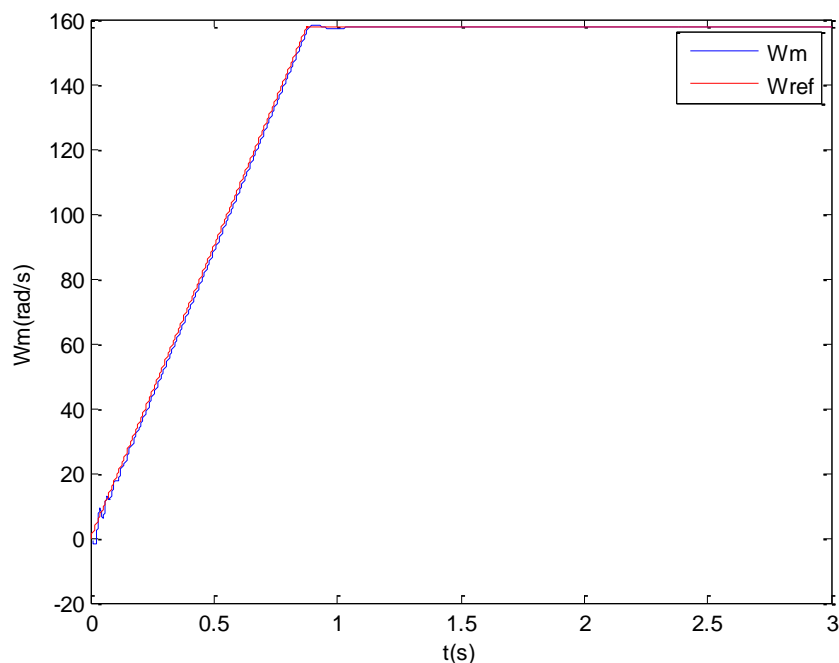


Figure IV.13 comparaison entre la vitesse mécanique et la vitesse de référence.

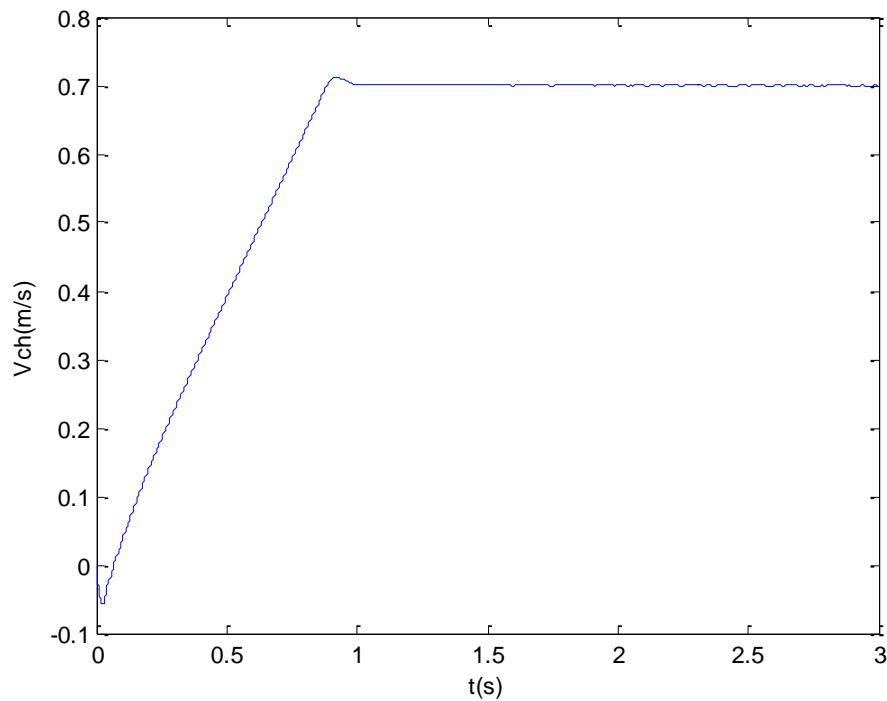


Figure IV.14 évolution de la vitesse du chariot en fonction du temps.

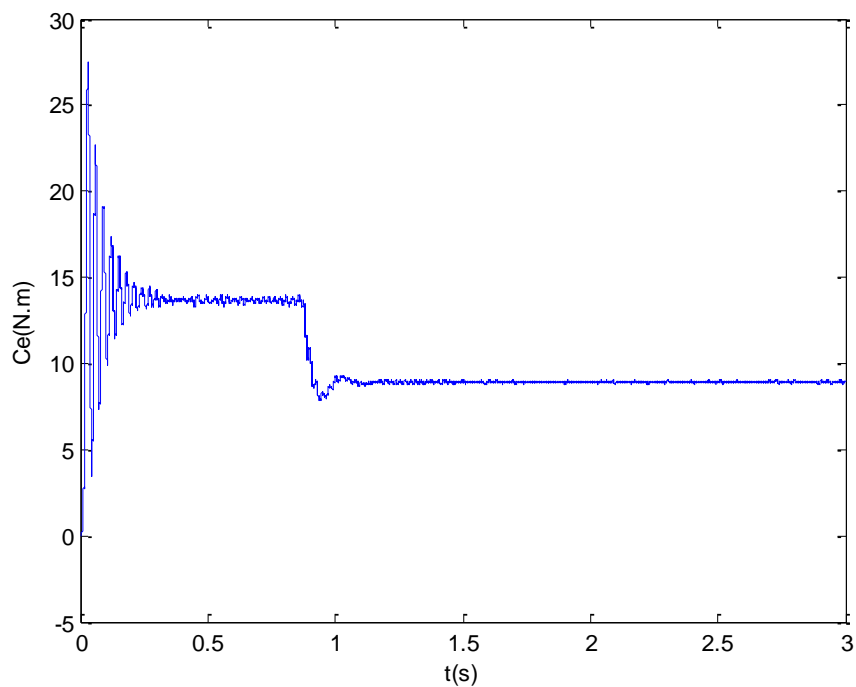


Figure IV.15 Dynamique du couple.

V.1.a.1 Interprétation

À la figure IV.15 on a eu un couple de 14 N.m ce qui ne correspond pas au diagramme de charge calculé au chapitre II dont on a eu un couple au démarrage de 18.79N.m. Ce qui a été engendré par les ondulations du couple au démarrage qui on causées une accélération importante de la vitesse du chariot. Cette accélération peut être remarquée à la figure (IV.14) dans l'intervalle [0 à 0.3s].

La présence d'harmoniques sur la tension d'alimentation des moteurs à induction peut avoir des effets visibles sur son fonctionnement ce qui peut être remarqué à la (figure IV.15). Les harmoniques vont générer un couple oscillant sur la machine, ce qui va perturber le fonctionnement des processus sensibles. Ces couples oscillants vont aussi avoir tendance à accentuer la fatigue mécanique des machines, mais la part de la fatigue mécanique due aux harmoniques reste difficilement quantifiable

V.2.a Grandeurs magnétiques

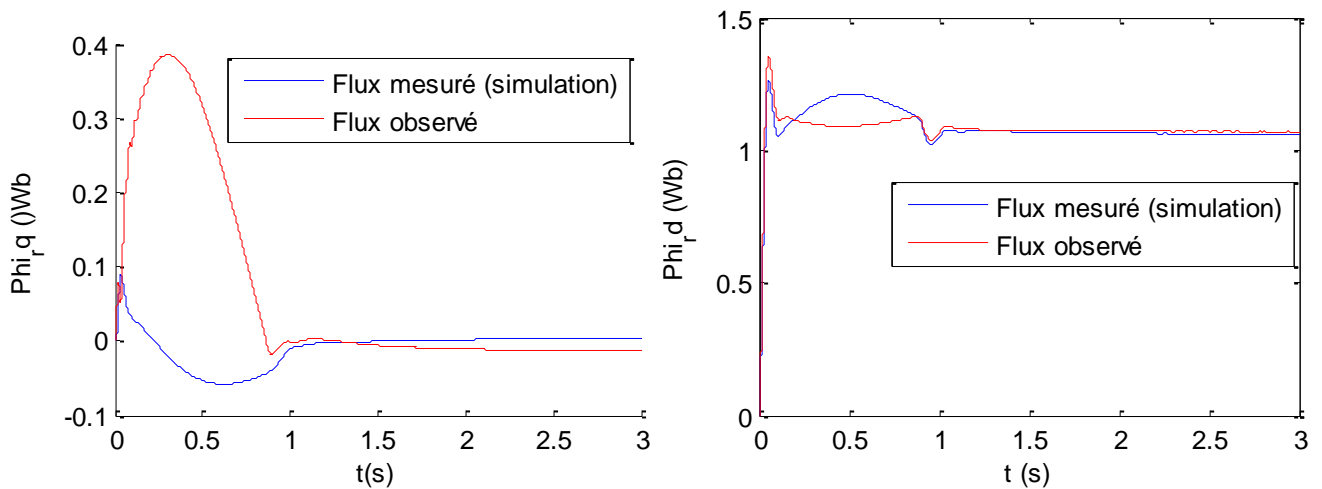


Figure IV.16 Comparaison entre les valeurs des flux mesurés et observés

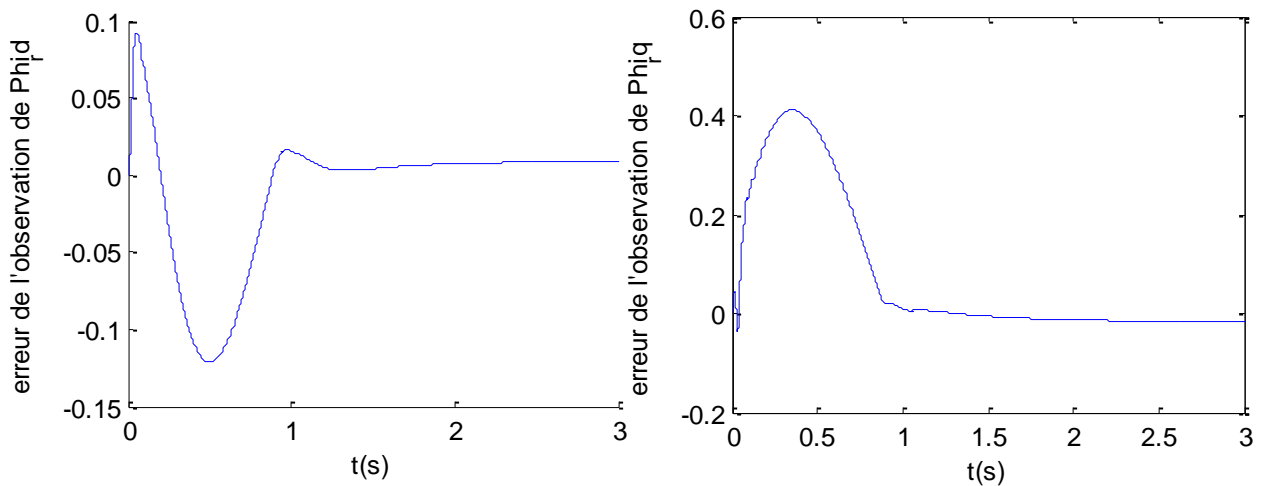


Figure IV.17 erreur de l'observation

V.2.a.1 Interprétation

À partir des deux figures précédentes on remarque que l'erreur sur l'estimation en régime établi de la composante directe et la composante en quadrature du flux est de l'ordre (10^{-3}), donc on peut dire que l'estimation est plus au moins bonne. Contrairement au régime transitoire l'erreur est importante soit un max de 0.4 Wb pour ϕ_{rq} et 0.13 Wb pour ϕ_{rd} , cela est dû à l'hypothèse qu'on a pris au paragraphe (IV.1) qui suppose que la vitesse est constante pendant ce régime.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les éléments à prendre en compte pour le contrôle d'un mécanisme de levage actionné par un moteur asynchrone à cage. Au départ le modèle mathématique de l'onduleur de tension ainsi que la stratégie de commande par modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle ont été étudiés. Par la suite on a passé à la présentation de la commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique en découplant les composantes du courant statorique, permettant la régulation du flux et de la vitesse séparément. Cette commande nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase. Pour cela un observateur du flux d'ordre réduit a été mise en œuvre pour remplacer le capteur du flux rotorique. Et finalement par simulation sous le simulateur de MATLAB on a pu vérifier nos calculs.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude par simulation d'un mécanisme de levage d'un point de vue électrique.

A la lumière de l'étude bibliographique approfondie nous avons pu apprécier l'importance des recherches effectuées sur les différents mécanismes de levage. Plus particulièrement sur leurs motorisations. L'attention particulière portée par les chercheurs sur le moteur électrique a fait de celui-ci l'objet de nombreuses applications tel que la traction ferroviaire, les appareils de levage et récemment le véhicule électrique.

Pour dimensionner une machine on est obligé de commencer le calcul par l'élément situant au bout de la chaîne cinématique et remontée jusqu'à l'organe actionneur. Des calculs ont été effectués par de lois simples de la mécanique classique ont pu donner des résultats satisfaisants.

Le modèle dynamique de la partie mécanique a été étudié, en un modèle multimasses où on représente les masses par leur moment d'inertie et les liaisons entre elles par des ressorts et amortisseurs. Ce modèle ayant (n) masses est souvent ramené à trois ou deux masses, vue de la complexité de son analyse. Le choix du nombre de masses repose sur les vitesses auxquelles on s'intéresse. Le plus grand avantage auquel nous nous sommes reconnaissants à ce modèle est la possibilité de vérifier le bon choix des liaisons utilisées, de plus il nous permet de mettre en évidence le phénomène de la résonance mécanique. À la fréquence de résonance les oscillations du couple sont très importantes et atteignent des amplitudes de (11.4 Nm) qui sont supérieures à l'amplitude du couple appliqué soit (8.92Nm).

Le démarrage direct du moteur asynchrone sans aucun contrôle a été simulé au chapitre III dont on remarque que les grandeurs mécaniques évoluent d'une manière très oscillatoire. On a aussi simulé au chapitre III le freinage par injection du courant continu aux phases statoriques dont on remarque que ce type de freinage est plus intéressant aux faibles vitesses qu'aux fortes vitesses.

Le choix de la stratégie de commande vectorielle dépend de l'application à laquelle cette commande est destinée et des moyens matériels disponibles pour mettre en œuvre cette dernière. Les commandes souvent rencontrées dans ces applications (levage par moteur asynchrone) sont : commande vectorielle sans capteur mécanique et avec capteur mécanique. Dans notre cas nous nous sommes intéressés à la deuxième. Mais la présence du capteur mécanique qui donne une précision de vitesse de $\pm 0.01\%$ diminue la fiabilité du moteur et comme notre application n'exige pas une grande précision de la vitesse il serait préférable de traiter la deuxième.

La commande vectorielle a été simulée au chapitre IV, dont on a eu des résultats satisfaisants. La première remarque qu'on peut donner aux résultats est que le régime transitoire est très long 0.875s. Mais cette durée a été imposée par la vitesse de référence afin de satisfaire le cahier des charges.

Perspectives :

En ce qui concerne le développement futur de ce travail de mémoire, il serait intéressant d'étudier :

- Le contrôle en échauffement du moteur ;
- Control vectorielle avec prise en compte des sensibilités paramétriques ;
- Validation de ces résultats en réalisant l'expérimentale ;
- Élaboration du schéma de puissance de la commande.

Bibliographie

- [1] Encyclopédie HACHETTE Multimédia 2005.
- [2] ag7010« Appareils de levage – Généralités » technique de l'ingénieur.
- [3] http://espacetechno.info/5/histoire_des_structures%20-%20Outil%20machine.html site internet consulté en avril 2013.
- [4] R.K Rajput « Elements of mechanical engineering », Edition LAXMI PUBLICATION, Delhi 2005
- [5] Georges SPINLER « conception des machines principe et application», Volume 2 et 3. PRESSE POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES.
- [6] GILLES Boivin «Lexique des appareils de levage », Edition Les PUBLICATIONS DU QUEBEC, Québec 1996.
- [7] Georges SCHEMM ag7000«La manutention au cœur de la logistique» technique de l'ingénieur.
- [8] Georges SCHEMM ag7080 « Appareils de levage de personnes Plates-formes élévatrices mobiles » technique de l'ingénieur.
- [9] Hubert GIBOUIN a9460 « Chargement de véhicules – Grues auxiliaires » technique de l'ingénieur.
- [10] Georges SCHEMM ag7050 « Matériels de mise à niveau » technique de l'ingénieur.
- [11] B. Sofiane, B. Samir « Contribution par le calcul des cycles et paramètres au fonctionnement d'un ascenseur » Mémoire de master option 'entraînements électriques' UMMTO 2012
- [12] www.ne.ch/neat/documents/.../CRDE_NEWS_35_Ascenseurs.pdf site internet consulté en avril 2013.
- [13] http://tpe.parios.org/grues_statiques.html site internet consulté en avril 2013.
- [14] Henri-Pierre NAUD, a939 « Appareils de levage motorisés légers et moyens » technique de l'ingénieur, 1982.
- [15] www.energie-environnement.ch/fichiers/dp_pdf/.../MOD_E05F.pdf site internet consulté en mars 2013.
- [16] Pierre MAYE « MOTEURS ELECTRIQUES INDUSTRIELS » Dunod, Paris, 2005.
- [17] Francis Esnault « Construction mécanique, transmission de puissance », Dunod, Paris, 1997, 2001.
- [18] Guillaume SABATIER, François RAGUSA, Hubert ANTZ « Manuel de technologie mécanique» Dunod, Paris, 2006.
- [19] L. Kh. Datskovskii, V.I.Rogovoi, I.S.Kuznetsov, I.A.Kuz'min, P.G.Vainstein, et A.V.Biryukov. « Electric Drives of Mine_Lifting Machines » Allerton Press, Inc., 2010.

- [20] Jean Pierre, Caron. Jean Paul, Hautier « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Technip, Paris, 1995.
- [21] MAMADOU LAMINE DOUMBIA « Outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machines électriques : exemple d'application » Thèse de philosophe docteur (ph.d), école polytechnique de Montréal, CANADA, 2000.
- [22] Gilbert PASQUALINI, D 3 562 « Alimentation par convertisseurs statiques : régimes transitoires » technique de l'ingénieur.
- [23] B. Robyns, B. François, P. Degobert, J.P. Hautier « Commande vectorielle de la machine asynchrone (Désensibilisation et optimisation par la logique floue)», Technip, Paris, 2007.
- [24] Fateh MEHAZZEM « Contribution à la Commande d'un Moteur Asynchrone destiné à la Traction électrique » Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [25] Lamia YOUB, A.CRĂCIUNESCU « Etude comparative entre la commande vectorielle a flux orienté et la commande directe du couple de la machine asynchrone » U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 69, No. 2, 2007
- [26] C. Chaigne, E. Etien, S. cauët, L. Rambault, « commande vectorielle sans capteur des machines asynchrones », Lavoisier, Paris, 2005.
- [27] Piotr Wach « Dynamics and Control of Electrical Drives », Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [28] Pierre Lopez, Ahmed Saïd Nouri, « Théorie élémentaire et pratique de la commande par les régimes glissants », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

A. Donnée technique du moteur

Les données suivantes ont été tirées de la référence [28]

- Puissance nominale : $P_n=1.5\text{kw}$;
- Moment d'inertie : $J_{mot}=0.0256\text{Kgm}^2$;
- Vitesse nominale : $n_n=1430\text{ tr/min}$;
- Tension composé nominale : $U_n= 380\text{V}$;
- Courant nominal : $I_n=6.1\text{A}$;
- Couple nominal : $C_n=10\text{Nm}$;
- Fréquence des courants statoriques : $f=50\text{Hz}$;
- Nombre de pair de pôles : $P_p=2$;
- Inductance cyclique rotorique : $L_r = 0.094\text{H}$;
- Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.105\text{H}$;
- Inductance mutuelle entre stator et rotor : $M_{sr} = 0.094\text{H}$;
- Coefficient de dispersion de Blondel : $\sigma = 0.105$;
- Résistance des enroulements statoriques $R_s = 1.47\Omega$;
- Résistance des enroulements rotoriques $R_r = 0.79\Omega$.

B. Calcul de la fréquence de résonance mécanique

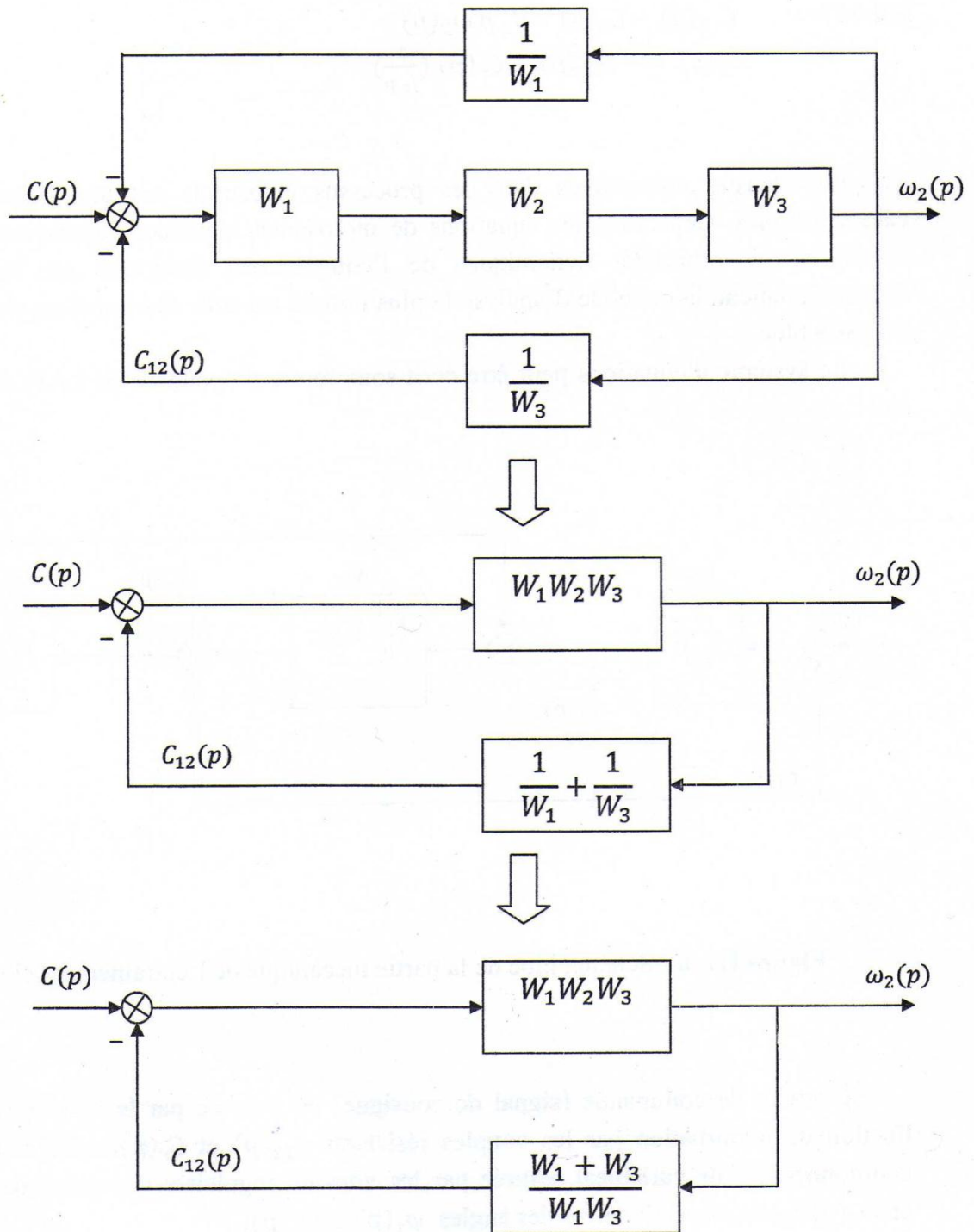


Figure B. 1 Simplification du diagramme structurel

B.1 Simplification du diagramme structurelle

La Figure B.1 nous montre les simplifications successives qu'on a apportées à la partie mécanique.

Avec :

$$W_3 = \frac{1}{J'_{1-4}p} \quad (\text{B.1.})$$

$$W_2 = \frac{k_{vf}p+k'_{1-10}}{p} \quad (\text{B.2.})$$

$$W_3 = \frac{1}{J'_{éq4-10}p} \quad (\text{B.3.})$$

$$\begin{aligned} W_{\omega 2} &= \frac{\omega_2(p)}{C(p)} = \frac{W_1 W_2 W_3}{1+W_1 W_2 W_3 \left(\frac{W_1+W_3}{W_1 W_3} \right)} \\ &= \frac{W_1 W_2 W_3}{1+W_1 W_2+W_2 W_3} = \frac{Nu(p)}{D\acute{e}(P)} \end{aligned} \quad (\text{B.4.})$$

- **Numérateur :**

$$\begin{aligned} Nu(p) &= W_1 W_2 W_3 = \frac{1}{J'_{1-4}p} \frac{k_{vf}p+k'_{1-10}}{p} = \frac{1}{J'_{1-4}J'_{éq4-10}p^2} \left(\frac{k_{vf}p+k'_{1-10}}{p} \right) \\ &= \frac{1}{p^3} \frac{k'_{1-10}}{J'_{1-4}J'_{éq4-10}} + \frac{1}{p^3} \frac{k_{vf}}{J'_{1-4}J'_{éq4-10}} = \frac{\Omega_{12}^2}{J'_{1-4}+J'_{éq4-10}} \frac{1}{p^3} + \frac{2\alpha_{vf}}{J'_{1-4}+J'_{éq4-10}} \frac{1}{p^3} \\ &= \frac{1}{(J'_{1-4}+J'_{éq4-10})p} \frac{\Omega_{12}^2+2\alpha_{vf}}{p^2} \end{aligned} \quad (\text{B.5.})$$

Avec : $\Omega_{12}^2 = \frac{k'_{1-10}(J'_{1-4}+J'_{éq4-10})}{J'_{1-4}J'_{éq4-10}}$ Fréquence cyclique des oscillations ;

Et $2\alpha_{vf} = \frac{k_{vf}(J'_{1-4}+J'_{éq4-10})}{J'_{1-4}J'_{éq4-10}}$: Coefficient d'atténuations des vibrations mécanique.

- **Dénominateur :**

$$\begin{aligned} D\acute{e}(P) &= 1 + \frac{1}{J'_{1-4}p} \frac{k_{vf}p+k'_{1-10}}{p} + \frac{k_{vf}p+k'_{1-10}}{p} \frac{1}{J'_{éq4-10}p} \\ &= 1 + \frac{1}{p^2} \left(\frac{k'_{1-10}}{J'_{1-4}} + \frac{k'_{1-10}}{J'_{éq4-10}} \right) + \frac{1}{p} \left(\frac{k_{vf}}{J'_{1-4}} + \frac{k_{vf}}{J'_{éq4-10}} \right) \\ &= 1 + \frac{1}{p^2} \Omega_{12}^2 + \frac{1}{p} 2\alpha_{vf} \end{aligned} \quad (\text{B.6.})$$

$$\Rightarrow W_{\omega 2} = \frac{\Omega_{12}^2+2\alpha_{vf}}{(J'_{éq4-10}+J'_{1-4})p(p^2+2\alpha_{vf}p+\Omega_{12}^2)} \quad (\text{B.7.})$$

- **Les Racines :**

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_{2,3} = -55.5595 \pm j45.7320 \end{cases}$$

Avec $\Omega_r = 45.732 \text{ rad/s}$ Fréquence de résonance mécanique.

C. Généralisation par représentation d'état

La synthèse des estimateurs et observateurs d'état se développe à partir des équations différentielles du modèle écrites sous forme vectorielle et synthétisée par les équations d'état suivantes :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{C.1.})$$

$$[Y] = [C][X] + [D][U] \quad (\text{C.2.})$$

$[X]$ Représente le vecteur des variables d'état, $[U]$ représente le vecteur d'entrée et $[Y]$ représente le vecteur de sortie. $[A]$, $[B]$, $[C]$ et $[D]$ sont des matrices qui dépendent du modèle du système.

C.1 Observateur d'état

Les observateurs sont utilisés lorsqu'une partie du modèle est mal connue. Dans le cas où certaines entrées de perturbation ne sont pas mesurables, alors il existe nécessairement une erreur entre les grandeurs de sortie et leur estimation.

$$[\mathcal{E}] = [\hat{Y}] - [\tilde{Y}] = [\hat{Y}] - [C][\tilde{X}] \quad (\text{C.3.})$$

Dès lors, cet écart peut être utilisé pour réaliser une correction pondérée sur la valeur estimée de la dérivée du vecteur d'état (figure C.1). La structure obtenue sera alors appelée observateur et correspond à une estimation en boucle fermée.

$$[\dot{\tilde{X}}] = [A][\tilde{X}] + [B][U_{reg}] + [K][\hat{Y}] - [C][\tilde{X}] \quad (\text{C.4.})$$

La matrice des gains $[K]$ est déterminée afin de régler la dynamique de l'observateur en fixant les valeurs propres de la matrice d'état résultante $[A_r] = [A] - [K][C]$. Elle caractérise la dynamique de l'erreur d'observation ($[\mathcal{E}]$).

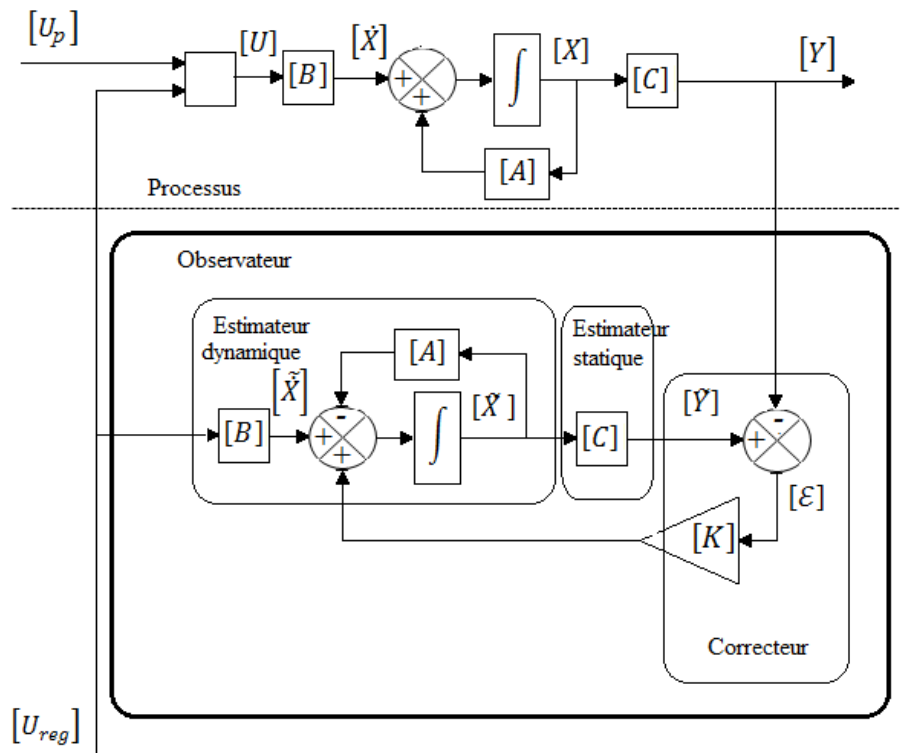


Figure C.1 Observateur d'état en boucle fermée