



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Thème

**Impact de l'Impédance du Transformateur sur le
Comportement du Moteur à Induction lors de la
Chute de Tension**

Réalisé par :

- CHERGUI Hamza
- AD Atmane

Encadré par :

- Dr. TIR Zoheir

Soutenu en Juin 2018

REMERCIEMENT

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre du programme de master en commande électrique.

Au terme de ce travail, nous tiens à remercier mon directeur de notre mémoire Dr TIR Zoheir, pour son encadrement, son soutien et ses encouragements tout au long de ce projet.

Nous tiens à remercier également le Doctorant Hamidani Bilal et Zeghib Okba, pour sa disponibilité, ses conseils et ses recommandations.

Nous remercions également à l'ingénieur de laboratoire Mlle. CHERIFI Hakima.

Enfin, nous ne saurais oublier nos amis qui ont apportés soutien et encouragement durant toutes ces années.

À toutes ces personnes, nous offre notre profonde gratitude.

Sommaire

REMERCIEMENT	.....	I
Sommaire	.....	II
Liste des figure	.....	IV
Liste des tableaux	.....	IV
Symboles et notation	.....	V
Introduction générale	.....	VI
Chapitre I	Généralité sur les Chutes de Tension	
1-Introduction	.....	1
2-Chute de tension	.....	1
2-1 Définition.....	.....	1
2-2 Causes de la chute de tension .....	.....	2
2-2-1 Les chutes de tension dues aux défauts .....	.....	2
2-2-2 Les chutes de tension dues au démarrage du moteur à induction.....	.....	2
2-2-3 Les chutes de tension dues à l'activation du transformateur.....	.....	3
2-2-4 Effets de tension à plusieurs étapes dues à des défauts .....	.....	3
2-3 Caractérisation de la chute de la tension .....	.....	3
2-3-1 Type de défaut : .....	.....	4
2-3-2 Emplacement du défaut : .....	.....	4
2-3-3 rapport X / R des lignes : .....	.....	5
2-3-4 Point sur l'onde d'amorçage : .....	.....	5
2-4 Classification des chutes de tension .....	.....	5
2-5 Classification ABC .....	.....	5
2-6 Facteurs qui influent sur le type de chute de la tension.....	.....	7
2-6-1 Type de défaut .....	.....	7
Influence des connexions d'enroulement du transformateur sur la propagation des chutes de tension		7
2-7 Calculs théoriques .....	.....	11
2-8 Effet des chutes de tension sur les moteurs à induction.....	.....	13
2-8-1 Moteurs à induction et défauts triphasés (équilibrés) .....	.....	15
2-8-2 Moteurs à induction et défauts déséquilibrés .....	.....	16
3-Impédance des transformateurs .....	.....	17
3-1 L'effet de l'impédance sur la chute de tension.....	.....	19

3-4-2 Essai en court-circuit	44
3-4-3 Convertir les valeurs en Pu	45
3-4-4 Les Paramètres du transformateur obtenus	45
4-Conclusion	46
Références	46
Chapitre III	L'impact de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute de tension
1-Introduction	47
2- L'impact de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute des tensions	47
2-1 Résultats de simulation lors de chutes de tension symétrique (type "A")	48
2-1-2 sans transformateur (Défaut de type « A »)	48
2-1-1 Avec transformateur (Défaut de type « A »)	50
2-2 Chutes de tension asymétrique	52
2-2-1 Sans transformateur (Défaut de type "E")	52
2-2-2 Avec transformateur (Défaut de type "G")	54
3-Etude pratique	56
3-1 Présentation :	56
3-2 Matérielles utilisées	56
3-3 Banc d'essai	59
3-4 Les résultats expérimentaux	60
3-4-1 Chutes de tension symétrique (type "A")	60
3-4-1-1) Sans transformateur (Défaut de type « A »)	60
3-4-1-2 Avec transformateur (Défaut de type « A »)	62
3-4-2 Chutes de tension asymétrique	64
3-4-2-1 Sans transformateur (Défaut de type « E »)	64
3-4-2-2 Avec transformateur (Défaut de type « G »)	66
3-5 Comparaison des résultats	67
3-6 Interprétation globale des résultats	68
3-7 Résumer les résultats	69
4-Conclusion	70
5-Référence	70
Conclusion générale	VII

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure 1-1 : La durée de la chute de tension et la profondeur.....	2
Figure 1 2: Une chute de tension triphasée équilibrée (symétrique)	4
Figure 1 3: Une chute de tension triphasée non équilibrée (asymétrique)	4
Figure 1 4: Classification ABC des chutes de tension	6
Figure 1 5: Circuits équivalents homopolaires des connexions d'enroulement de transformateur.	9
Figure 1 6: le système d'alimentation.....	12
Figure 1 7: Le modèle de diviseur de tension.....	13
Figure 1 8: plaque signalétique d'un transformateur	17
Figure 1 9: La figure illustre la différence d'impédance pour divers transformateurs.....	18
Figure 1-10 : Les cinq connexions de transformateur utilisées et leurs circuits équivalents homopolaires ..	20

CHAPITRE II

Figure2 1: Représentation générale de l'ensemble avec un plan de coupe du moteur triphasé asynchrone	24
Figure 2 2 : La vue schématique de la machine asynchrone triphasée.	25
Figure 2 3 : transformer les enroulements disposés sur trois axes (a, b, c) en des enroulements deux axes (d, q).....	27
Figure 2 4 : Mesure de résistance R_s	29
Figure 2 5 : circuit équivalent du moteur à induction à vide	29
Figure 2 6 : Méthode de séparation des pertes.....	30
Figure 2 7 : circuit équivalent du moteur à induction à rotor bloqué	31
Figure 2 8 : circuit simplifiée du moteur à induction à rotor bloqué	31
Figure 2 9 : Résultats de l'essai en court-circuit	31
Figure 2 10 : Circuit équivalent d'un moteur MAS à vide.....	33
Figure 2 11 : Vitesse rotorique	36
Figure 2 12 : Couple électromagnétique ..	36
Figure 2 13 : Courant statorique	36
Figure 2 14 : Types de noyau des transformateurs de puissance triphasée : (a) noyau triplex, (b) noyau cuirassé. (c) noyau à trois colonnes, (d) noyau à cinq colonnes.....	37
Figure 2 15 : Trois transformateurs monophasés identiques	38
Figure 2 16 : Trois transformateurs à créer une colonne centrale unique	38
Figure 2 17 : Trois transformateurs à supprimer la colonne centrale.....	39
Figure 2 18 : Le circuit magnétique du transformateur est réalisé à plat.....	39
Figure 2 19 : Schémas du modèle du transformateur monophasé	41
Figure 2 20 : Schémas simplifié du modèle du transformateur monophasé.....	41
Figure 2 21 : Circuit équivalent du transformateur réel.	42
Figure 2 22 : Circuit équivalent du transformateur on ramène les impédances du secondaire.....	42
Figure 2 23 : Circuit équivalent simplifié du transformateur	42
Figure 2 24 : Essai à vide	43
Figure 2 25 : Essai en court-circuit	44

CHAPITRE II

Figure 3 1 : Simulation de teste expérimentale.....	47
Figure 3 2 : Tension de source à leurs de chute de tension type A	48
Figure 3 3 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A	48
Figure 3 4 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A	48

Figure 3 5 : Tension de source à leurs de chute de tension type A	50
Figure 3 6 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A	50
Figure 3 7 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A	50
Figure 3 8 : Tension de source à leurs de chute de tension type E.....	52
Figure 3 9 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type E.....	52
Figure 3 10 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type E.....	52
Figure 3 11 : Tension de source à leurs de chute de tension type G	54
Figure 3 12 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type G	54
Figure 3 13 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type G	54
Figure 3 14 : Circuit de teste	56
Figure 3 15 : Circuit de capteur de courant	Figure 3 16 : Circuit de capteur de tension
Figure 3 17 : Photographie prise lors de l'expérience de chute de tension	59
Figure 3 18 : Tension de source à leurs de chute de tension type A.....	60
Figure 3 19 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A.....	60
Figure 3 20 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A.....	60
Figure 3 21 : Tension de source à leurs de chute de tension type A.....	62
Figure 3 22 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A.....	62
Figure 3 23 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A.....	62
Figure 3 24 : Tension de source à leurs de chute de tension type E	64
Figure 3 25 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type E	64
Figure 3 26 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type E.....	64
Figure 3 27 : Tension de source à leurs de chute de tension type G	66
Figure 3 28 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type G	66
Figure 3 29 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type G	66

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau1 1: L'influence de la connexion d'enroulement des transformateurs dans la propagation des creux de tension.....	8
Tableau1 2: la combinaison et le type de chute de tension [4]	10

CHAPITRE II

Tableau 2 1 : Résultats de l'essai à vide	30
Tableau 2 2 : Distribution empirique des réactances de fuite entre le stator et le rotor des machines asynchrones.....	32
Tableau 2 3 : Les résultats des Paramètres du moteur obtenus	35
Tableau 2 4 : Les résultats des Paramètres du transformateur triphasé obtenu.....	45

CHAPITRE III

Tableau 3 1 : Comparaison des résultats des tensions	67
Tableau 3 2 : Comparaison des résultats des vitesses rotation et couples électromagnétique.....	67

Symboles et notation

U_{ref}	La tension de référence
MT	Moyen tension
HT	Haute tension
X/R	Le rapport X/R
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Pu	Per unit
RMS	Root mean square
3 ϕ	Triphasée
ABC	Classification ABC
Z_F	L'impédance entre le couplage point-commun et le défaut
Z_S	L'impédance de la source au couplage point-de-commun
Pcc	Couplage point-de-commun
Δv	La chute de tension
E	La tension de pré-événement
Fem	La force électromotrice
ZT	Impédance neutres
RT	Résistance de transformateur
XT	Inductance de transformateur
Z0	Impédance de fuite
ZN	Impédance neutres des enroulements primaires
Zn	Impédance neutres des enroulements secondaire
MAS	Machine asynchrone
ω_s	Pulsation statorique
ω_r	vitesse électrique de rotation
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	Les tensions statoriques
V_{ar}, V_{br}, V_{cr}	Les tensions rotoriques.
I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	Les courants statoriques.
I_{ar}, I_{br}, I_{cr}	Les courants rotoriques.
$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$	Les flux statoriques.
$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$	Les flux rotoriques.

R_s	Résistances statoriques .
R_r	Résistances rotoriques.
$[L_{ss}]$	Matrice d'inductances statoriques
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductances rotoriques
$[M_{sr}]$	Matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor.
L_s	Inductance propre d'une phase statorique
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique
M_s	Inductance mutuelle entre phases statoriques
M_r	Inductance mutuelle entre phases rotoriques.
J	Le moment d'inertie
Ω	vitesse angulaire de rotation du moteur
f_r	Coefficient de frottement
C_{em}	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
(a, b, c)	Indice des phases statoriques
(d, q)	Indices pour les composantes de Park directe et en quadrature respectivement
g	Le glissement
V_a	La tension à vide
I_a	Le courant à vide
P_{10}	La puissance à vide
P_j	Perte joule
P_{fer}	Pert fer
$P_{méc}$	Pert mécanique
X_{ls}	Réactance de fuite du stator
X_{lr}	Réactance de fuite du rotor
X_m	La réactance de magnétisation
L_m	L'inductance magnétisante par phase
l_s	L'inductance de fuite du stator par phase
l_r	L'inductance de fuite du rotor par phase
\mathfrak{R}_0	La réluctance d'un circuit magnétique
MI	Moteur à induction

Introduction générale

Les moteurs sont les éléments les plus importants dans le domaine industriel. Par conséquent, il était nécessaire de créer une vaste espace d'étude et de développement pour réaliser les meilleures performances. Et, il existe de nombreux types de moteurs, mais le plus important dans le domaine industriel est le moteur à induction ou le moteur asynchrone, qui occupe une grande partie de la grande utilisation à cause des caractéristiques qui correspondent au domaine d'utilisation.

Comme avec d'autres équipements électriques, les moteurs asynchrones sont soumis à de nombreux problèmes qui exigent des étudiants de se concentrer sur eux dans leurs études, Parmi ces problèmes, il y a la chute de tension, qui est l'un des problèmes qui affectent les meilleures performances des moteurs, La situation s'aggrave si le moteur est alimenté à travers d'un transformateur et subit une chute de tension qui se produit déjà dans le domaine industriel. Où, le transformateur d'isolement est installé en amont de la source d'alimentation pour isoler l'équipement sur des défauts externes

Dans ce contexte, le sujet de notre étude est l'impact de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute de tension. L'objectif de notre choix de ce sujet est d'analyser ce type de problème, qui cause de lourdes pertes aux institutions industrielles.

Nous avons inclus le chapitre I sous le titre de généralités sur les chutes de tension, dans lesquelles nous avons mené une brève étude de ce problème, où nous l'avons défini et les raisons de son apparition et ses caractéristiques, ainsi que comptés ses types et la façon de se propager à travers les transformateurs. Ensuite, nous avons parlé de l'impact sur les moteurs à induction et dans la dernière, nous avons parlé de l'impédance de transformateur et son impact sur la chute de la tension.

Le deuxième chapitre était intitulé "modélisation et identification du système" et se compose de deux parties :

La partie théorique est divisée par deux sous parties : nous parlons dans la première sous partie sur les moteurs asynchrones où nous l'avons défini et mentionné des composants à l'extraction de modèle mathématique, Et de la même manière, nous avons discuté des transformateurs triphasés dans la deuxième sous partie.

La partie pratique est consacrée à l'identification paramétrique du moteur à induction et du transformateur triphasé à travers plusieurs essais.

Le troisième et le dernier chapitre, sera intitulé : l'impact de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute des tensions, ce chapitre est divisé en deux parties

La première partie est consacrée à l'effet de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute des tensions par simulation. Nous avons étudié les deux types de chute de tension existants (symétriques et asymétriques) avec/sans transformateur.

La deuxième partie est pour objet de valider pratiquement l'étude de l'effet de la chute de tension sur le moteur.

Une conclusion générale sera faite pour clôturer notre étude.

Chapitre I

Généralité sur les Chutes de Tension

1- Introduction

Une chute de tension ou creux de tension (sag ou dip en anglais), est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence (U_{ref}), suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à une minute). La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT.

Dans ce chapitre, intitulé «Généralités sur la chute de tension», nous aborderons les différents aspects du sujet, à commencer par sa définition, ses causes, ses caractéristiques les plus importantes et ses effets sur les moteurs asynchrones, et L'impact de l'impédance du transformateur sur la chute de tension et donc sur le moteur à induction

2- Chute de tension

2-1 Définition [1], [3]

La définition des creux de tension est souvent en fonction de deux paramètres : amplitude / profondeur et durée. Cependant, ces paramètres sont interprétés différemment par diverses sources. D'autres paramètres importants qui décrivent une chute de tension sont le point-sur-onde où la chute de la tension se produit, et comment l'angle de phase change pendant la chute de la tension. Un saut d'angle de phase pendant un défaut est dû au changement du rapport X/R. Le saut d'angle de phase est un problème particulier pour l'électronique de puissance utilisant une commutation de phase ou de passage par zéro.

Une chute de tension ou un creux de tension, tel que défini par la norme IEEE 1159, pratique recommandée par l'IEEE pour surveiller la qualité de l'énergie électrique, est «une diminution comprise entre 0,1 et 0,9 pu. en tension quadratique moyenne (RMS) à la fréquence de puissance pour des durées de 0,5 à 1 min». Les temps d'effacement typiques des défauts vont de trois à trente cycles en fonction de l'amplitude du courant de défaut et du type de détection de surintensité et d'interruption.

Une autre définition donnée dans IEEE Std. 1159, 01/03/73 est « Une variation de la valeur RMS de la tension à partir de la tension nominale pendant une durée supérieure à 0,5 cycles de la fréquence d'alimentation, mais inférieure ou égale à 1 minute. Habituellement décrit plus en détail en utilisant un modificateur indiquant l'amplitude d'une variation de tension (par exemple chute, gonflement ou interruption) et éventuellement un modificateur indiquant la durée de la variation (par exemple, instantané, momentané ou temporaire).

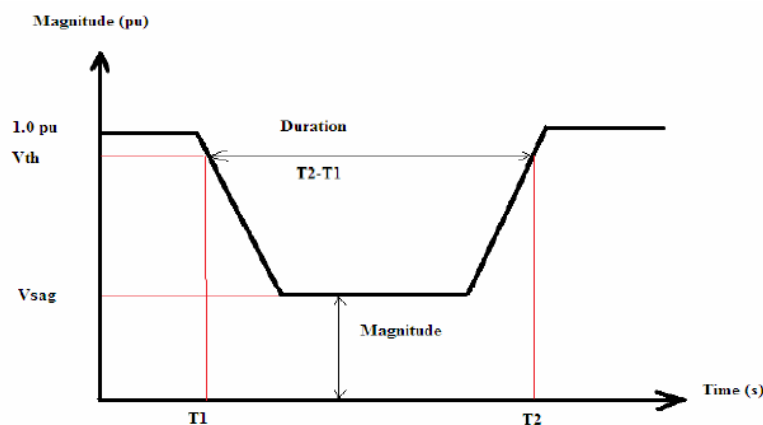


Figure 01-01 : La durée de la chute de tension et la profondeur [3]

2-2 Causes de la chute de tension

Les chutes de tension peuvent être classées en causes anthropiques et naturelles. Les causes anthropiques (résultant des activités humaines sur le réseau électrique) comprennent les opérations de commutation ou de démarrage de gros moteurs, les défauts du système d'alimentation (court-circuit), les changements de charge soudains, etc. Les causes naturelles incluent les intempéries, la pollution, Par conséquent, deux causes principales des chutes de tension sont les défauts de court-circuit dans le schéma d'alimentation interne de l'installation du client, ou les défauts sur d'autres branches du réseau d'alimentation (dans les équipements) et l'augmentation soudaine du charge comme le démarrage de grandes charges de moteur ou des opérations de commutation [2].

Nous allons fournir un bref examen des causes des chutes de tension. Ils sont comme suit :

2-2-1 Les chutes de tension dues aux défauts

Les chutes de tension dues à des défauts peuvent être critiques pour le fonctionnement d'une centrale électrique et, par conséquent, sont très préoccupantes. En fonction de la nature du défaut (par exemple, symétrique ou asymétrique), les amplitudes des creux de tension peuvent être égales dans chaque phase ou inégales respectivement.

En cas de défaillance du système de transmission, les clients ne subissent pas d'interruption, car les systèmes de transmission sont mis en boucle / en réseau [1].

2-2-2 Les chutes de tension dues au démarrage du moteur à induction

Comme les moteurs à induction sont équilibrés en 3ϕ , les creux de tension dus à leur démarrage sont symétriques. Chaque phase tire approximativement le même d'appel de courant. L'amplitude de l'affaissement de la tension dépend de :

- Caractéristiques du moteur à induction
- Résistance du système au point où le moteur est connecté [1].

2-2-3 Les chutes de tension dues à l'activation du transformateur

Les causes des chutes de tension dues à l'activation du transformateur sont :

- Fonctionnement normal du système, qui comprend l'activation manuelle d'un transformateur.
- Actions de ré-enclenchement

Les creux de tension sont de nature asymétrique, souvent décrits comme une chute soudaine de la tension du système suivie d'une récupération lente. La principale raison de l'activation du transformateur est le sur-fluxage du noyau du transformateur qui conduit à la saturation. Parfois, pour des creux de tension de longue durée, plus de transformateurs sont entraînés dans la saturation. C'est ce qu'on appelle l'interaction sympathique [1].

2-2-4 Effets de tension à plusieurs étapes dues à des défauts

Les creux de tension à plusieurs étapes sont associés à des défauts liés aux systèmes de transmission. Ils présentent différents niveaux de magnitude avant que la tension atteigne un niveau normal. Les principales causes de ce type de creux sont :

- Changements dans la nature de défauts
- Changements dans la configuration du système (par exemple, temporisation du disjoncteur) [1].

2-3 Caractérisation de la chute de la tension

La tension pendant un chute de tension est supposée être RMS constante, habituellement la tension de phase la plus basse. Cependant, en réalité, la valeur RMS varie pendant une chute. Par conséquent, diverses méthodes ont été proposées pour caractériser les creux de tension.

L'approche la plus courante pour définir un niveau de tension pendant un creux est de considérer la tension de phase la plus basse et d'ignorer le reste. Cependant, cette méthode ne rapporte qu'une chute par défaut et ne fait pas la distinction entre les creux de tension monophasés et polyphasés.

Une autre méthode consiste à considérer la tension dans chaque phase. Une chute de la tension dans chaque phase sera comptée comme un événement distinct. Avec cette méthode. Une chute de la tension triphasée sera comptée comme trois chutes de tension.

La troisième représentation consiste à utiliser la tension moyenne de toutes les phases. Cette méthode ne rapporte qu'une seule chute de tension par défaut, et habituellement aucune des phases n'a la même tension que la moyenne [1].

Une étude de tension triphasée des chutes de tension donne deux groupes principaux, les chutes de tension symétriques et asymétriques. Une chute de tension équilibrée a une amplitude égale dans toutes les phases et un déphasage de 120 degré entre les tensions, comme le montre la figure1- 2.

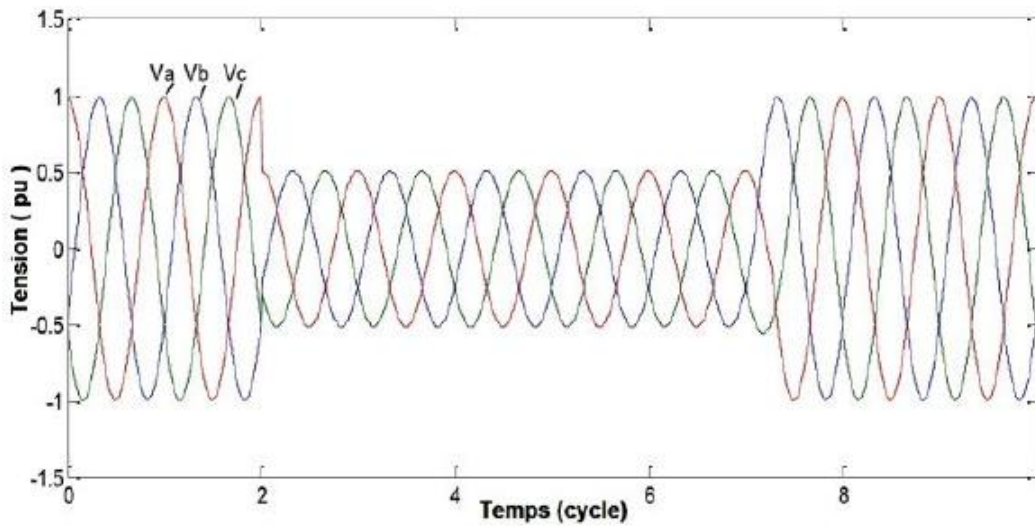


Figure 01 2: Une chute de tension triphasée équilibrée (symétrique) [1]

Les creux de tension non équilibrés n'ont pas la même amplitude dans toutes les phases ou un déphasage de 120° entre les phases. Ces types sont plus compliqués et peuvent être divisés en 6 sous-groupes. Un exemple de la chute de tension à deux phases est illustré à la figure 1-3, [1].

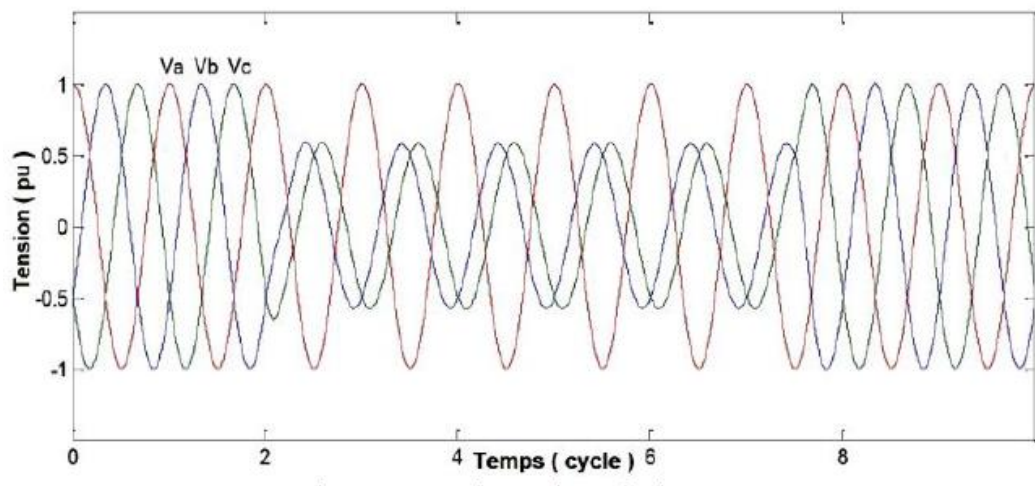


Figure 01 3: Une chute de tension triphasée non équilibrée (asymétrique) [1]

2-3-1 Type de défaut :

Le type de défaut dans le système d'alimentation est le premier facteur qui affecte les caractéristiques de la chute de tension. Les creux de tension peuvent être équilibrés ou déséquilibrés, en fonction des causes ou du type de défaut. Si les tensions de phase individuelles sont égales, la chute de tension est équilibrée, tandis que si la tension de phase est différente, une chute de tension déséquilibrée se produira [3].

2-3-2 Emplacement du défaut :

En plus du type, les emplacements des défauts dans le système ont un grand impact sur l'ampleur ainsi que le saut d'angle de phase de l'affaissement. [3].

2-3-3 rapport X / R des lignes :

Avec le changement du rapport X / R de la ligne, il y a un changement dans le rapport X / R du défaut à l'impédance de la source qui affectera l'amplitude ainsi que le saut d'angle de phase [3].

Lorsque vous effectuez des calculs de court-circuit, il est important de prendre en compte le rapport X/R. Plus le rapport X / R est élevé, plus le courant de défaut crête asymétrique est élevé. Par conséquent, lors de la vérification des caractéristiques de l'équipement électrique, il convient de tenir compte à la fois du calibrage de court-circuit symétrique et du rapport X / R [3].

2-3-4 Point sur l'onde d'amorçage :

Le point sur l'onde d'amorçage est l'angle de phase de l'onde de tension fondamentale à laquelle la chute de tension commence. Cet angle correspond à l'angle auquel l'erreur de court-circuit se produit

2-4 Classification des chutes de tension

Les types de chute de tension sont généralement basés sur les tensions individuelles (à la fois l'amplitude et l'angle) pour chacune des trois phases pendant les chutes. Habituellement, les creux de tension triphasés sont classés selon la classification ABC ou la classification des composants symétriques. Cependant, le type de chute de tension selon la classification ABC est fréquemment utilisé en raison de sa simplicité car il est basé sur un modèle de réseau simplifié. Par conséquent, la classification repose sur des hypothèses incomplètes et ne peut être utilisée pour obtenir les caractéristiques des creux mesurés. La classification symétrique des composants est plus générale et donne un lien direct avec les tensions mesurées, mais elle est plus difficile à comprendre et une traduction vers la classification ABC peut convenir à de nombreuses applications. De plus, la classification ABC a été élaborée pour analyser la propagation de chute de tension de la transmission à la distribution, lorsqu'une perturbation se propage à travers un transformateur [4].

2-5 Classification ABC

Il existe sept (7) types de chute de tension de base selon la classification ABC. Ceux-ci sont montrés (formes d'équation et de phaseur) dans la figure ci-dessous en considérant la phase A comme référence. La tension de pré-événement dans la phase A est indiquée par E1, rappelant l'équivalence entre la tension de phase A et la tension de séquence positive dans un système équilibré. La tension dans la phase ou entre les phases, qui a connu la chute de tension est notée par V.

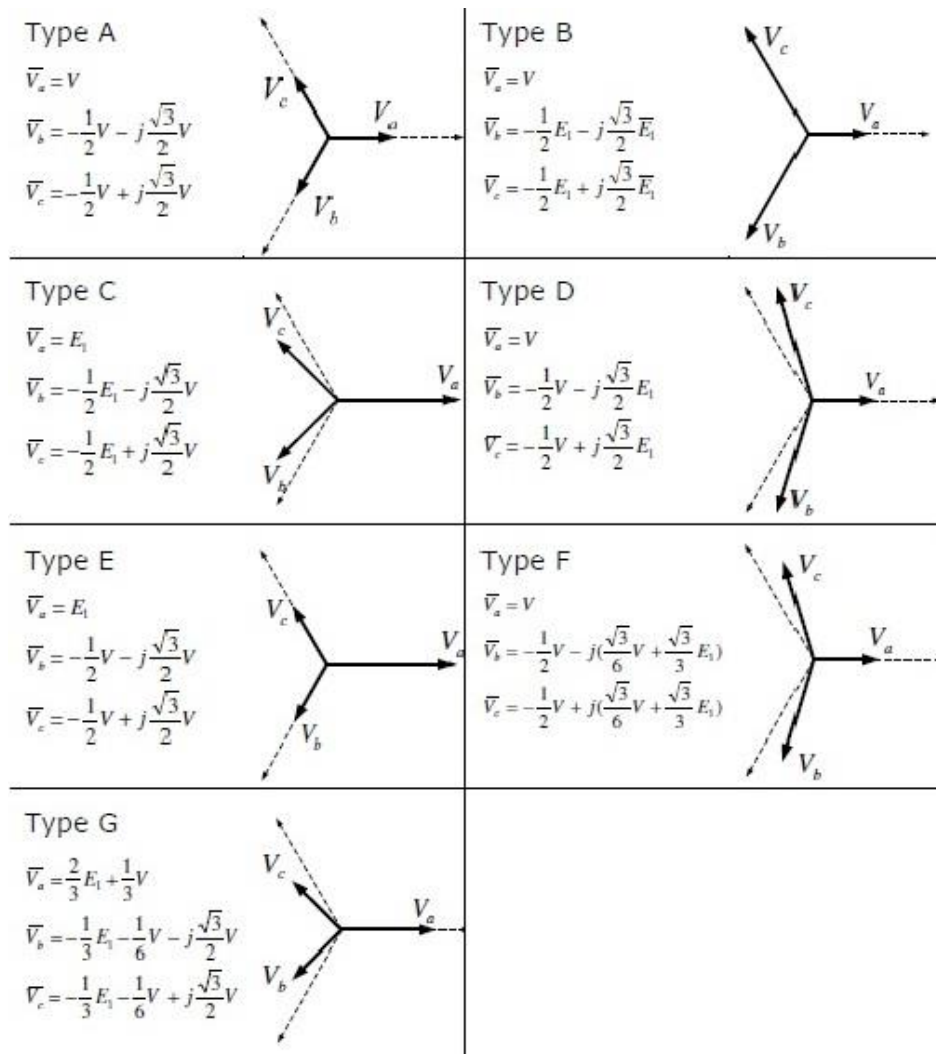


Figure 01 4: Classification ABC des chutes de tension [4]

A partir de la figure (1-4), on peut observer ce qui suit :

La chute de tension Type A entraîné une baisse des trois tensions de la même valeur.

Le type B a la tension de phase défaillante réduite.

La chute de tension de type C entraîne le changement des deux tensions de phase affectées le long de l'axe imaginaire seulement (à la fois en amplitude et en angle).

Pour le type D, les deux tensions de phase affectées changent dans l'axe réel uniquement avec une baisse d'amplitude correspondante dans la phase restante.

Le type E se traduit par une amplitude de tension réduite dans les deux phases affectées.

Le type F est similaire au type D, sauf que le changement de tension est le long des axes réels et imaginaires.

La chute de tension G est similaire au type C mais avec le changement de tension dans les deux axes. De plus, la phase restante subit également une baisse de tension [4].

2-6 Facteurs qui influent sur le type de chute de la tension

Plus précisément, au niveau des terminaux d'équipement, ces facteurs affectent le type de chute de tension :

2-6-1 Type de défaut

Les creux de tension sont principalement causés par des défauts du système. Chaque type de défaut a un effet différent sur les tensions au point de défaut, ce qui a ensuite défini les types des chutes de tension.

- défaut de ligne unique à la terre (phase + T)
- défaut de ligne à ligne (biphasée)
- défaut Double-Line à la terre (biphasée +T)
- défaut triphasée (triphasée)

2-6-2 Influence des connexions d'enroulement du transformateur sur la propagation des chutes de tension

Les connexions d'enroulement du transformateur sont classées en trois types pour expliquer la propagation des creux de tension déséquilibrés triphasés, ainsi que le changement du type de chute de tension, d'un niveau de tension à un autre.

Les caractéristiques des creux de tension, selon la valeur de l'amplitude, l'angle de phase et les durées peuvent être déterminées, mais ces caractéristiques dans les lignes de charge peuvent différer de celles d'origine. Les creux de tension, tout en se propageant dans tout le système électrique, modifient leurs caractéristiques, non seulement en raison de l'impédance entre l'origine de défaut et la charge, mais aussi en raison du type de connexion des transformateurs sur le réseau, l'enroulement du transformateur entre l'emplacement des défauts et la charge a une influence plus importante sur l'amplitude et l'angle de phase de la chute de tension [5], [7].

L'influence de la connexion d'enroulement des transformateurs dans la propagation des creux de tension peut être observée lorsque la perturbation contient des composantes homopolaires et que la connexion d'enroulement bloque le flux de cette séquence. Dans certains creux de tension, les quantités de composantes homopolaires ne sont pas impliquées car l'origine des courts-circuits n'implique pas la masse.

Dans ces cas, l'influence peut être attendue à la suite du déphasage introduit par certains transformateurs [5], [7].

Connexion de Transformateur	Type de la Chute de Tension						
	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F	Type G
YnYn	A	B	C	D	E	F	G
Yy, Dd, Dz	A	D	C	D	G	F	G
Yd, Dy, Yz	A	C	D	C	F	G	F

Tableau1 1: L'influence de la connexion d'enroulement des transformateurs dans la propagation des creux de tension

Les transformateurs triphasés peuvent être classés en trois types concernant la propagation de l'affaissement entre le primaire et le secondaire [6].

Type 1 - Transformateurs qui ne change rien aux tensions. Les tensions primaires (pu) sont égales aux tensions secondaires (pu). La seule configuration de transformateur qui tombe sous ce type est le transformateur étoile-étoile à la terre (YnYn) [5].

Ce type de transformateur peut être défini mathématiquement par la simple matrice de transformation :

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Type 2 - Transformateurs qui suppriment la tension homopolaire. Fondamentalement, la tension secondaire (pu) est égale à la tension primaire (pu) moins la composante homopolaire. Le delta-delta (Dd), le delta-zigzag (Dz) et l'étoile-étoile (avec les deux enroulements non mis à la terre ou avec un seul point étoile mis à la terre) appartiennent à ce type [5].

Les transformateurs de ce type peuvent être définis mathématiquement au moyen de la matrice de transformation :

$$T_2 = \left(\frac{1}{3}\right) \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Type 3 - Transformateurs qui changent les tensions de ligne et de phase. delta-étoile (Dy), étoile-delta (Yd) et l'étoile-zigzag (Yz) correspondent sous ce type [5].

Ce type de transformateur peut être défini mathématiquement au moyen de la matrice de transformation :

$$T_3 = \left(\frac{j}{\sqrt{3}}\right) \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dans chacune de ces trois catégories, il y aura des transformateurs avec un indice horaire différent (par exemple, Yd I et Yd II) conduisant à un déphasage différent entre les tensions du côté primaire et du côté secondaire. Cette différence n'a aucune importance pour les creux de tension rencontrés par l'équipement. Tout ce qui compte est le changement entre les tensions de pré-défaut et les tensions de défaut, en amplitude et en angle de phase. L'ensemble du diagramme de phaseurs, avec des phaseurs avant et pendant la panne, peut être tournée sans aucune influence sur l'équipement. Une telle rotation peut être vue comme un décalage du point zéro sur l'axe du temps, ce qui n'a bien sûr aucune influence sur le comportement de l'équipement [5].

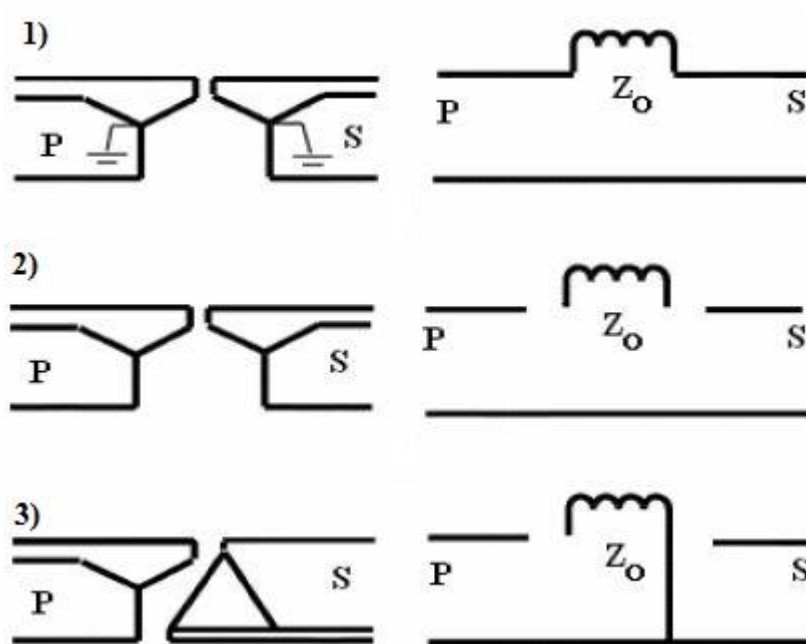


Figure 01 5: Circuits équivalents homopolaires des connexions d'enroulement de transformateur [5].

Dans les transformateurs qui éliminent les composantes homopolaires, la tension dans leur côté secondaire est égale à la tension appliquée au côté primaire soustraite la composante homopolaire. Certains transformateurs ont un circuit homopolaire en tant que branche ouverte du côté primaire et / ou secondaire. Ils bloquent la composante homopolaire de la tension, transformateurs tels que : Yy, Dd, YNd, Dy et Yd.

Une chute de tension qui a des composantes de séquence zéro est le résultat d'une seule ligne à la terre et d'une double ligne à la ligne à la terre.

La différence est plus significative lorsque ces chutes de tensions à travers les transformateurs de type 3, en plus de ne pas autoriser le passage à séquence zéro, introduisent également le déphasage.

Une caractéristique importante concerne les transformateurs de type 2 qui, de leur côté secondaire, ne seront jamais vus comme une interruption [8].

La classification ABC est dérivée en fonction de la combinaison des trois facteurs discutés ci-dessus. Le tableau ci-dessous résume la combinaison et le type de chute de tension qui en résulte [4].

Type de chute de tension	Type de défaut				Type de transformateur			Connexion de charge	
	3 ph	Ph-ph	Ph-N	2ph-N	1	2	3	Y	Δ
A									
B									
C									
D									
E									
F									
G									

Tableau1 2: la combinaison et le type de chute de tension [4]

Exemples :

- Pour un défaut (Phase-Neutre), un transformateur de type 2 et connexion de charge en étoile le type de chute de tension est D sont à prévoir.
- Pour le défaut (2 Phases-Neutre), aucun transformateur et charge connectée par delta - le type de chute de tension est F.

De plus, sur la base du tableau présenté ci-dessus, on peut noter :

Les chutes de tension de type A sont dues à des défauts triphasés, indépendamment de l'enroulement du transformateur et des connexions de charge.

Les creux de tension de type B sont uniquement causés par des défauts (phase-neutre)

Les types C et D sont produits à partir de défauts (phase-neutre ou 2 phases).

Les types E, F et G ne sont attendus que si le défaut est (2 phases-neutre).

L'enroulement du transformateur et les connexions de charge font varier le type de chute de tension lorsque la perturbation se propage dans le système d'alimentation [4].

2-7 Calculs théoriques

Considérons le système d'alimentation illustré à la figure (1-6) où les chiffres (1 à 5) indiquent les positions de défaut et les lettres (A à D) sont charges.

Un défaut dans le réseau de transmission, la position de défaut 1, provoquera un sérieux chute de tension pour les deux sous-stations bordant la ligne en défaut. Cette chute est ensuite transférée à tous les clients alimentés par ces deux postes. Comme il n'y a normalement aucun générateur connecté à des niveaux de tension plus bas, il n'y a rien pour maintenir la tension. Le résultat est que tous les clients A, B, C et D. subissent une chute de tension profonde [7].

La chute de tension ressentie par A est susceptible d'être un peu moins profond, car les générateurs connectés à cette sous-station maintiendront la tension. Un défaut en position 2 ne causera pas beaucoup de chute de tension pour le client A. L'impédance des transformateurs entre la transmission et le système de sous-transmission est suffisamment importante pour limiter considérablement la chute de tension du côté haute tension du transformateur.

La chute de tension subie par le client A est encore atténué par l'alimentation des générateurs de sa sous-station de transport locale. Le défaut à la position 2 entraînera cependant un affaissement important aux deux sous-stations de sous-transmission et donc à tous les clients alimentés à partir d'ici (B, C et D) [7].

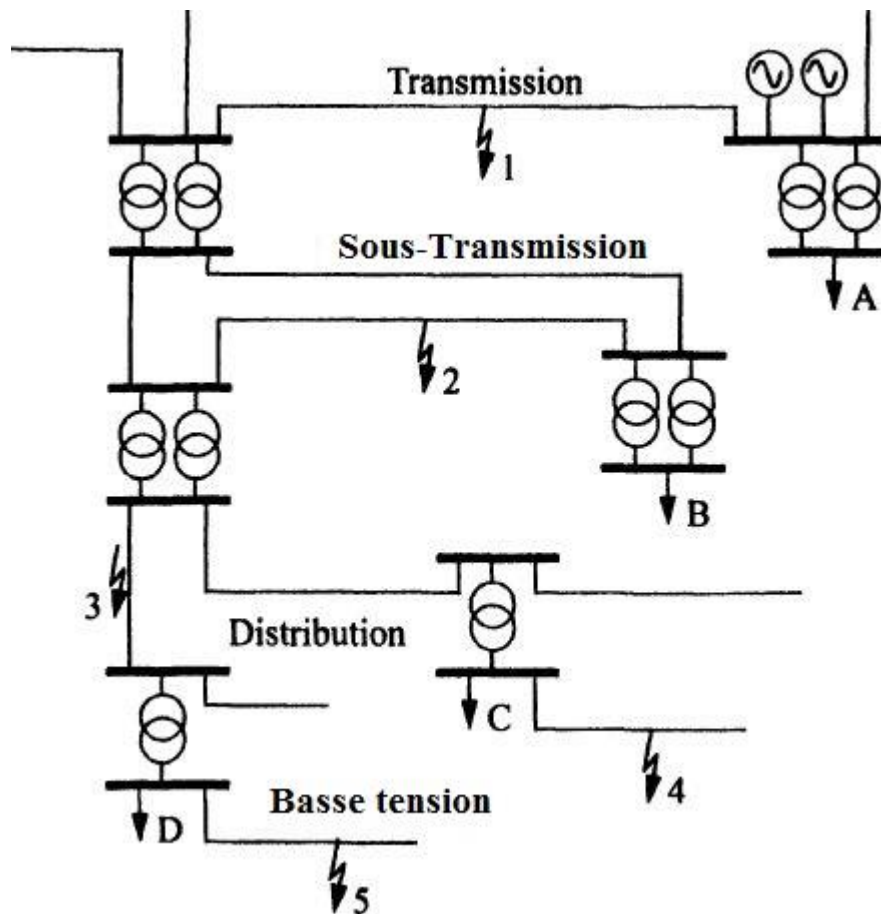


Figure 01 6: le système d'alimentation [7]

Un défaut à la position 3 provoquera une chute de tension très profonde pour le client D, suivi d'une interruption courte ou longue lorsque la protection effacera le défaut. Le client C ne subira qu'une chute de tension profonde. Si une ré-fermeture rapide est utilisée dans le système de distribution, le client C subira deux ou plusieurs creux peu après l'autre pour un défaut permanent.

Le client B ne subira qu'une chute de tension peu profonde en raison de l'erreur sur la position 3, toujours en raison de l'impédance du transformateur. Le client A ne remarquera probablement rien de cette faute. Enfin, le défaut 4 provoquera une chute de tension profonde pour le client C et une chute de tension pour le client D. Pour le défaut 5, le résultat est inverse : un creux profond pour le client D et un creux pour le client C. Clients A et B ne sera pas influencé par les fautes 4 et 5 [7].

Pour quantifier l'amplitude de la chute de tension dans les systèmes radiaux, le modèle de diviseur de tension, illustré à la figure 1-7, peut être utilisé. Cela peut sembler un modèle plutôt simplifié, en particulier pour les systèmes de transmission. Mais il s'est avéré être un modèle plutôt utile pour prédire certaines des propriétés des creux de tension. Sur la figure (1-7), nous voyons deux impédances : Z_S est l'impédance de la source au couplage point-de-commun ; et Z_F est l'impédance entre le couplage point-commun et le défaut. Le couplage au point de commun est le point à partir

duquel le défaut et la charge sont alimentés. En d'autres termes : c'est le lieu où le courant de charge part du courant de défaut [7].

Nous allons souvent abréger "couplage point-commun" en PCC. Dans le modèle de diviseur de tension, le courant de charge avant et pendant le défaut est négligé [1].

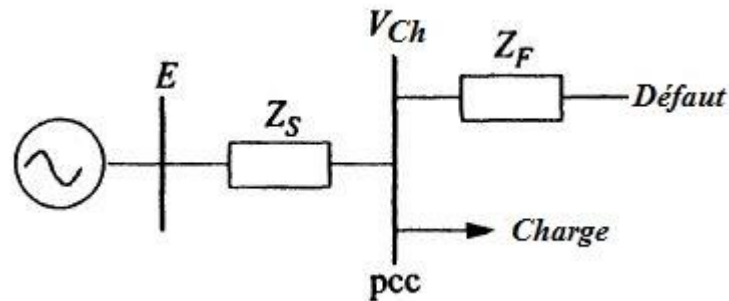


Figure 01 7: Le modèle de diviseur de tension [1]

Il n'y a donc pas de chute de tension entre la charge et le pcc. La tension à la pcc, et donc la tension aux bornes de l'équipement, peut être trouvée à partir de :

$$\Delta v = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} E$$

Nous supposons que la tension de pré-événement est exactement 1 pu, donc $E = 1$. Cela donne l'expression suivante pour l'amplitude de la chute de tension

$$\Delta v = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F}$$

Toute impédance de défaut doit être incluse dans l'impédance d'alimentation Z_F pour que la chute de tension devienne plus profonde pour les défauts électriquement plus proches du client (lorsque Z_F devient plus petit) et pour les systèmes avec un niveau de défaut plus petit (lorsque Z_S devient plus grand).

Un modèle monophasé a été utilisé ici, alors qu'en réalité le système est triphasé. Cela signifie que cette équation à proprement parler ne vaut que pour les défauts triphasés [9].

2-8 Effet des chutes de tension sur les moteurs à induction

Les moteurs à induction représentent les charges les plus courantes dans les applications de système d'alimentation. Ils consomment environ 60% de l'énergie électrique produite dans les pays industrialisés. La perte de leur service dans les usines en continu peut entraîner une fermeture coûteuse. Les raisons du déclenchement du service de moteur à induction essentiel sont nombreuses. Cependant, la recherche révèle que les chutes de tension constituent l'une des principales causes de

l'arrêt du moteur à induction, perturbant ainsi le processus de production industrielle entraînant des pertes financières [1].

Indépendamment du type de chute de tension, les effets de base observés des creux de tension sur les moteurs à induction sont :

- Perte de vitesse
- Pics de courant et de couple.

La réponse des moteurs asynchrones aux creux de tension diffère selon le type de chute de tension. Une classification détaillée et une comparaison des creux de tension subis par les charges triphasées ont été présentées. La classification et la comparaison ont été complétées par les phaseurs et leurs équations. Les comparaisons ont été effectuées sur la base de la nature des creux de tension et du type de défaut [1].

Les effets des différents types de creux de tension sur les performances et le comportement des moteurs à induction dépendent de facteurs tels que :

- Ampleur de la chute de tension
- Durée de la chute de tension
- Paramètres électriques du moteur
- Charge et inertie mécanique [1].

Parmi les effets de la chute de tension, nous distinguons les suivants :

- **Pointe de couple négative**

Considérons un moteur asynchrone fonctionnant en régime permanent et la tension d'alimentation est supprimée et réappliquée plusieurs cycles plus tard (interruption courte). Au moment où la tension d'alimentation est rétablie, la **Fem** du moteur est déphasée par rapport à la tension d'alimentation. Afin d'aligner les courants du rotor, le moteur doit décélérer, ce qui entraîne des transitoires de couple négatifs pouvant atteindre 20 fois le couple nominal du moteur. Cette quantité de couple négatif finira par entraîner des dommages mécaniques (arbre du rotor) et électriques si on le laisse se poursuivre (enroulements du moteur) [3].

- **Condition de basse tension**

Le fonctionnement du moteur en dessous de la tension nominale indiquée sur la plaque signalétique réduit son efficacité, réduit la durée de vie ou, pire, provoque une défaillance prématurée. Pour conduire une charge mécanique fixe, un moteur tire une quantité spécifique d'énergie de la source.

Cette quantité de puissance a une corrélation directe avec la tension et le courant prélevés. Ainsi, lorsque la tension d'alimentation devient faible, le courant doit augmenter pour maintenir le niveau de puissance requis pour entraîner la charge. Une augmentation de courant n'est un danger pour le moteur que si ce courant dépasse le courant nominal de la plaque signalétique du moteur. Lorsque le courant dépasse la cote de la plaque signalétique, de la chaleur commence à s'accumuler dans le moteur. Sans une correction rapide, une chaleur excessive finira par endommager le moteur [3].

La charge connectée est un facteur important dans la détermination de la diminution de la tension d'alimentation qu'un moteur peut supporter. Pour un moteur qui porte une charge légère, si la tension diminue, le courant augmentera à peu près dans la même proportion que la tension diminue. À titre d'exemple, une diminution de tension de 10% entraînerait une augmentation de 10% du courant de charge. Cela n'endommagerait pas le moteur si le courant reste inférieur à la valeur indiquée sur la plaque signalétique. Si le même moteur conduisait une charge lourde, il y a déjà un courant élevé. En cas de réduction de la tension, le courant de charge augmente jusqu'à une nouvelle valeur, qui peut dépasser le courant nominal à pleine charge. La basse tension appliquée à la borne du moteur peut entraîner une surchauffe, une durée de vie réduite, une capacité de démarrage réduite et un couple de tirage et d'arrachement réduit [3].

2-8-1 Moteurs à induction et défauts triphasés (équilibrés)

Lors d'un défaut triphasé, les tensions aux bornes du moteur diminuent. Les conséquences de cette baisse sont doubles :

- Le flux magnétique dans l'entrefer n'est plus en équilibre avec la tension du stator. Le flux diminue avec une constante de temps allant jusqu'à plusieurs cycles. Pendant cette période, le moteur à induction contribue au défaut et maintient la tension aux bornes du moteur.
- La chute de tension entraîne une baisse du couple électrique : le couple électrique est proportionnel au carré de la valeur efficace de la tension. Le couple mécanique dans le temps moyen reste largement inchangé. Le résultat est que le moteur ralentit. Pendant que le moteur ralentit, il faudra un courant plus important avec un facteur de puissance plus petit. Cela pourrait faire baisser la tension encore plus. Pour les petites chutes de tension, un nouvel état stationnaire pourrait être atteint à une vitesse plus faible, en fonction du comportement vitesse / couple de la charge mécanique. Pour les creux profonds, le moteur continuera à ralentir jusqu'à ce qu'il atteigne l'arrêt ou jusqu'à ce que la tension revienne, selon la première éventualité. La constante de temps mécanique des moteurs électriques est de l'ordre d'une seconde et plus. Par conséquent, le moteur n'aura normalement pas encore atteint la vitesse nulle lors de la récupération de tension [7].

Le moment où la tension récupère les phénomènes opposés se produisent. Le flux dans l'entrefer se reconstituera. Cela provoque un grand courant d'appel qui ralentit la récupération de tension. Après cela, le moteur accélérera jusqu'à ce qu'il atteigne sa vitesse de pré-événement. Pendant la réaccélération, le moteur prend de nouveau un courant plus important avec un facteur de puissance plus petit, ce qui provoque un fléchissement de la tension post-défaut, pouvant durer parfois plusieurs secondes.

La contribution de la charge du moteur à induction au défaut peut être modélisée comme une source de tension derrière la réactance. La source de tension a une valeur d'environ 1 pu à l'initiation du défaut et décroît avec la constante de temps subtransitoire (entre 0,5 et 2 cycles).

La réactance est la réactance de fuite du moteur, qui est comprise entre 10% et 20% sur la base du moteur. Notez que ce n'est pas la réactance de fuite qui détermine le courant de démarrage, mais la réactance de fuite à la vitesse nominale [7].

2-8-2 Moteurs à induction et défauts déséquilibrés

Le comportement d'un moteur à induction lors d'une panne déséquilibrée est plutôt compliqué

- Seul un programme d'analyse de réseau simulant une grande partie du système peut donner une image précise des effets quantitatifs. Les phénomènes suivants jouent un rôle dans l'interaction entre le système et le moteur à induction lors de défauts non équilibrés.
- Pendant le premier ou les deux premiers cycles après le déclenchement du défaut, le moteur à induction contribue au défaut. Cela provoque une augmentation de la tension de séquence positive. La tension négative et la tension homopolaire ne sont pas affectées.
- Le moteur à induction ralentit, entraînant une diminution de l'impédance de séquence positive. Cette diminution de l'impédance entraîne une augmentation du courant puis une chute de la tension positive.
- L'impédance de séquence négative du moteur est faible, typiquement de 10 à 20% de l'impédance nominale positive. La tension négative due au défaut sera ainsi considérablement amortie aux bornes du moteur. L'impédance de séquence négative est indépendante du glissement. La tension de séquence négative restera alors constante pendant l'événement.
- Le moteur à induction ne prend aucun courant homopolaire. La tension de zéro séquence ne sera pas affectée par le moteur à induction [7].

Lorsque les tensions de ligne appliquées à un moteur à induction ne sont pas égales, comme dans le cas des creux de tension asymétriques, des courants de déséquilibre dans les enroulements du stator se produiront. Un déséquilibre de faible pourcentage de tension entraînera un déséquilibre de courant en pourcentage beaucoup plus important. Les moteurs triphasés alimentés en tension déséquilibrée

produiront un courant déséquilibré d'environ 6 à 10 fois plus déséquilibré que la tension. Ce déséquilibre de courant dans les moteurs triphasés peut entraîner une surchauffe et des dommages prématurés aux moteurs.

Bien que les faibles baisses de température aient peu d'effet de réchauffement, l'exposition continue à ce type d'état dégrade l'isolation du moteur et réduit considérablement la durée de vie. Le déséquilibre de la tension et du courant est calculé conformément à la définition IEEE de la différence maximale d'amplitude entre phases divisée par la moyenne des tensions triphasées exprimée en pourcentage [7].

3- Impédance des transformateurs

Les transformateurs représentent peut-être le pourcentage le plus élevé d'impédance dans une installation. En conséquence, l'impédance d'un transformateur est souvent cruciale pour la performance d'un système électrique en ce qui concerne les perturbations générées par la charge.

Les transformateurs classiques prêts à l'emploi ont généralement l'impédance spécifiée sur leur plaque signalétique Figure (1-8). Cette impédance est presque toujours spécifiée à une température de fonctionnement maximale, par exemple 6,5% à 170 ° C.

Cette impédance spécifiée est à la fréquence de puissance fondamentale (50/60 Hz) et ne fournit aucune indication de l'impédance complexe du transformateur, ou de ses performances à des fréquences plus élevées [10].

Les techniques de construction et d'enroulement du transformateur affectent grandement l'impédance du transformateur à la fois à la fréquence fondamentale et aux harmoniques supérieures.

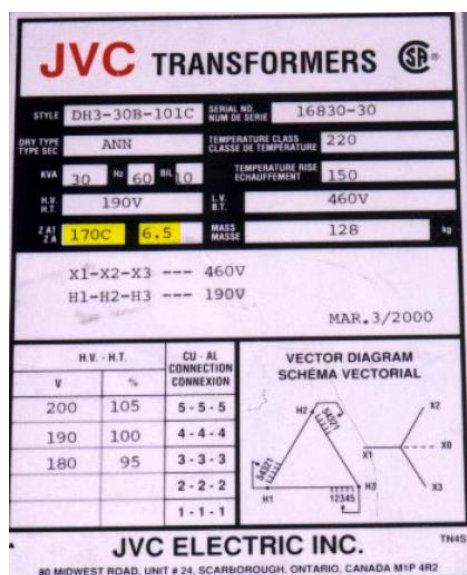


Figure 01 8: plaque signalétique d'un transformateur [10]

Les techniques de construction et d'enroulement du transformateur affectent grandement l'impédance du transformateur à la fois à la fréquence fondamentale et aux harmoniques supérieures.

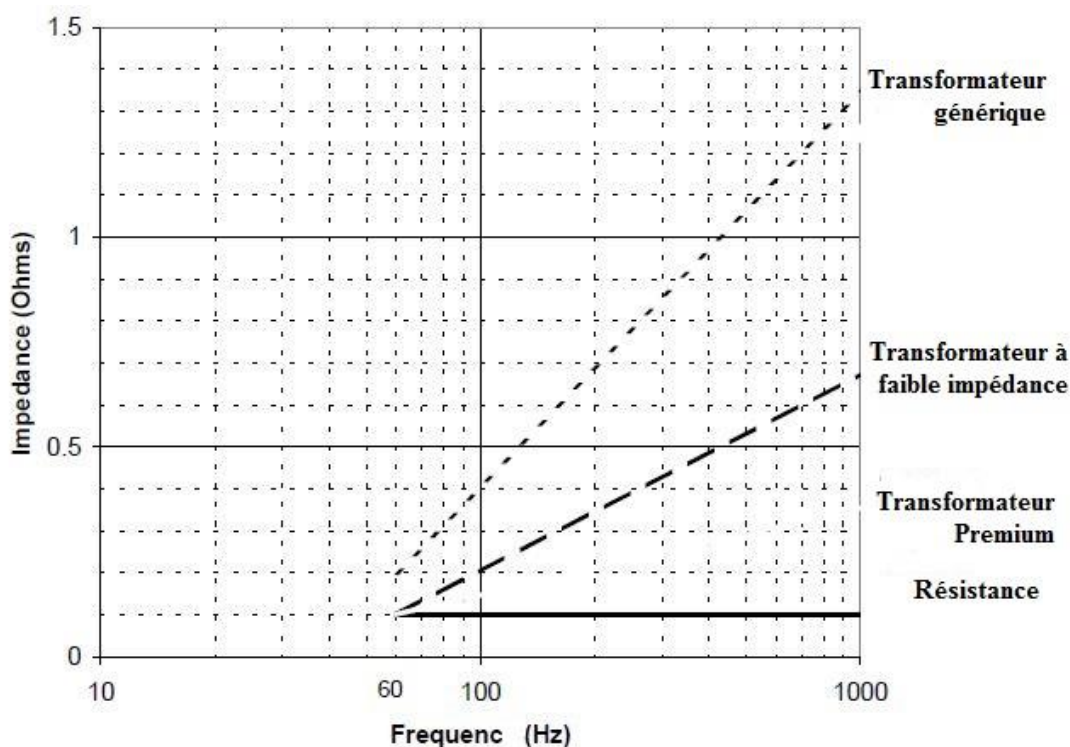


Figure 01 9: La figure illustre la différence d'impédance pour divers transformateurs [10].

- **Une résistance** est montrée pour la comparaison. L'impédance ne dépend pas de la fréquence, et est donc plat de 60 Hz à 1000 Hz
- **Un transformateur générique**, utilisant des techniques d'enroulement conventionnelles et généralement optimisé au coût, a une impédance spécifique à 60 Hz (ici, 0,2 ohms). Lorsque la fréquence augmente, l'impédance augmente considérablement.
- **Un transformateur à faible impédance**, utilisant les mêmes techniques d'enroulement conventionnelles qu'un transformateur générique, mais conçu avec plus d'acier et de cuivre pour réduire l'impédance, a une impédance inférieure à la fréquence fondamentale et une impédance proportionnellement plus faible aux fréquences plus élevées.
- Enfin, **un transformateur Premium**, utilisant du cuivre et de l'acier de meilleure qualité, et des techniques d'enroulement de meilleure qualité, a une impédance plus faible à la fois à la fréquence fondamentale et à des fréquences plus élevées.

Même si un transformateur à faible impédance et un transformateur Premium ont une impédance similaire à la fréquence fondamentale, l'impédance du transformateur à des fréquences plus élevées est souvent très différente [10].

3-1 L'effet de l'impédance sur la chute de tension

L'impédance de transformateur peut être représentée le plus simplement comme une résistance de source insérée dans la source de tension alternative idéale. Cette résistance produit une chute de tension proportionnelle au courant de charge - plus le courant est important, plus la chute de tension est élevée.

La modélisation de transformateur est l'un des problèmes les plus importants dans les simulations de la chute de tension. Les modèles linéaires de transformateurs conviennent si la chute est causée par des défauts de court-circuit. Il peut être utilisé pour obtenir des caractéristiques de la chute de tension précises. Les caractéristiques de la chute de tension sont affectées par les différences entre les enroulements, les méthodes de mise à la terre. Les transformateurs introduisent une représentation de séquence différente et des valeurs de tension et de courant différentes. Le transformateur est modélisé en tant qu'impédance série ($Z_T = R_T + jX_T$), où R_T et X_T sont respectivement la résistance du transformateur et la réactance. Les paramètres R_T et X_T peuvent être déterminés par un test de court-circuit et leur valeur est la même pour la représentation des séquences positive et négative. Les connexions des enroulements primaire et secondaire du transformateur triphasé sont considérées comme des principes principaux permettant de dériver le circuit équivalent homopolaire et de déterminer le déphasage dans les circuits de séquence positive et négative. La figure (1-10) montre les cinq connexions de transformateur couramment utilisées et leurs circuits équivalents homopolaires

L'impédance, Z_0 représente l'impédance de fuite, Z_T et les impédances neutres (Z_N et Z_n) le cas échéant, qui peuvent être calculé comme [11]. :

$$Z_0 = Z_T + 3Z_n$$

Z_N et Z_n sont respectivement les impédances neutres des enroulements primaires et secondaires du transformateur (Grainger, 1994). Le taux de changement de régulateur doit être pris en compte dans le calcul de l'impédance du transformateur. Les différents types de connexions en étoile-triangle de l'enroulement du transformateur entraînent un déphasage de $n.30$ ($n = 1, 5, 11, \dots$, etc.). La propagation de la chute de tension est affectée par ces déphasages et doit donc être prise en compte dans les modèles (IEEE Std-1346, 1998) [11].

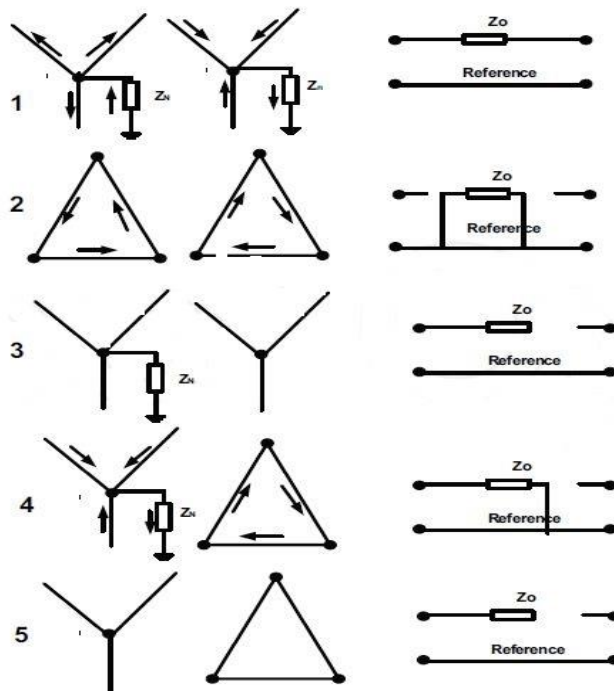


Figure 01-10 : Les cinq connexions de transformateur utilisées et leurs circuits équivalents homopolaires [11]

4- Conclusion

Nous avons discuté dans ce chapitre de la chute de tension, où nous avons brièvement abordé la définition du conventionnel et rappelé les raisons et facteurs les plus importants qui l'affectent et ensuite Nous avons classé ses types et leur impact sur les équipements industriels, en particulier le moteur à induction (sujet d'étude).

Ensuite, nous avons parlé du rôle de connexion des enroulements des transformateurs dans la propagation de la chute de tension. Enfin, nous avons discuté du rôle de l'impédance du transformateur et de son impact sur la chute de tension.

Référence :

- [1] George G. Karady, "Effects of Voltage Sags on Loads in a Distribution System", Arizona State University, October 2005
- [2] Readlay Makaliki , "Voltage Sag Source Location in Power Systems", Institutionen för Energi och Miljö SWEDEN, December 2006.
- [3] Malala Abubakar Abubakar, "Effects of voltage sag during starting of an induction motor", Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, January 2016.
- [4] "Voltage sag types - abc classification", Power Quality in Electrical Systems)A compilation of various power quality information, issues, applications, technologies, news and updates).
- [5] J. Blanco, R. Leal, J. Jacome , J.F. Petit , G. Ordoñez and V. Barrera , " The influence of transformers, induction motors and fault resistance regarding propagation voltage sags", Ing. Inv., Volume 31, Issue 2SUP, p. 139-147, 2011. eISSN 2248-8723. Print ISSN 0120-5609.
- [6] Nita R. Patne, K. L. Thakre , " Effect of transformer on stochastic estimation of voltage sag due to faults in the power system: a PSCAD/EMTDC simulation ", Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.18, No.1, 2010 .
- [7] M. H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems,Voltage Sags and interruptions," , IEEE Press series on Power Engineering, New York, 2000.
- [8] W. R. Mendes, M. I. Samesima, F. A. Moura, " Influence of Power Transformer Winding Connections on the Propagation of Voltage Sags through Electric System", Conference: Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International.
- [9] Math. H. J. Bollen, " IEEE Tutorial on voltage sag analysis", Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden.
- [10] M. J. Russell, C. E. Engineer, and P. PowerLines, "The impact of mains impedance on power quality", originally Presented at Power Quality 2000 (Boston, MA) on October 4, 2000.
- [11] Nesrallah Salman, Azah Mohamed, Hussain Shareef, "Voltage Sag Mitigation by Network Reconfiguration", Universiti Kebangsaan Malaisie

Chapitre II

Modélisation et Identification du Système Global

1- Introduction

La modélisation du Système électrique, dont le présent chapitre lui sera essentiellement consacré, est une phase primordiale pour pouvoir aborder le problème d'identification paramétrique, le vif du sujet. et par conséquent, extraire le modèle du système avec précision.

Ainsi, la modélisation d'un système réel est sa représentation par un modèle mathématique. Simulé par un ordinateur, ce modèle permet d'une part de restituer une image du système observable expérimentalement, et d'autre part de prévoir son comportement dans des conditions plus ou moins variées que celles obtenues par l'expérimentation, et par conséquent de mieux concevoir et de mieux exploiter le système réel.

Le système électrique que nous allons étudier dans ce chapitre est un moteur électrique triphasé (cage d'écuriel) + un transformateur triphasé (d'isolement), que nous modéliserons séparément pour obtenir leurs paramètres à utiliser dans la suite.

2- Moteur à induction

2-1 Description de la MAS

Les moteurs asynchrones triphasés peuvent être considérés parmi les machines électriques les plus fiables : ils exercent leur fonction pendant de nombreuses années avec une maintenance réduite et s'adaptent aux performances différentes selon les exigences de la production ainsi que des applications de service. Comme nous l'avons déjà dit, ces moteurs trouvent leur application dans les secteurs industriels les plus différents, tels que l'agroalimentaire, la chimie, la métallurgie, la papeterie ou le traitement de l'eau et les systèmes extractifs. Les applications concernent les équipements avec des composants de machines à vitesse fixe ou variable tels que des systèmes de levage comme des ascenseurs ou de bons palans, des systèmes de transport comme convoyeurs, des installations de ventilation et de climatisation sans oublier les pompes et les compresseurs. D'après les considérations ci-dessus, on peut facilement déduire comment les moteurs asynchrones triphasés peuvent être considérés comme la machine électrique la plus répandue pour les applications industrielles (la consommation électrique des moteurs électriques représente environ 75% de la consommation totale dans le domaine industriel) [1].

2-2 Typologies et utilisation

Un moteur asynchrone triphasé peut avoir :

- un rotor à bagues
- un rotor à court-circuit, plus communément défini rotor à cage d'écuriel.

La principale différence entre ces deux types provient de la structure du rotor. Plus précisément, le premier type de rotor est constitué de bobinages réels comme ceux du stator, il présente une structure plus complexe et plus fragile (balais glissant sur le rotor, avec interposition possible de résistances pour le contrôle de la phase de démarrage), a besoin d'entretien périodique et a de grandes dimensions hors-tout; le deuxième type est constitué d'un rotor avec des tiges court-circuitées aux deux extrémités et par conséquent, grâce à sa simplicité de construction plus élevée, il produit un type de moteur très simple, robuste et économique [1].

Grâce au développement de l'électronique de contrôle, qui permet de régler la vitesse de manière très simple et efficace, toutes les applications utilisant des moteurs qui prévoient la possibilité de régulation de vitesse (moteurs cc ou moteurs à bagues) ont été remplacées par des moteurs asynchrones, en particulier ceux à cage d'écureuil, qui sont couramment utilisés pour contrôler les pompes, les ventilateurs, les compresseurs et de nombreuses autres applications industrielles [1].

2-3 Structure du moteur asynchrone

Afin de mieux comprendre comment un moteur asynchrone triphasé est structuré, voici une brève description des parties principales qui constituent la machine tournante, c'est-à-dire les parties où les phénomènes électriques générant l'opération proviennent.

2-3-1- Le stator

Le premier élément que nous décrivons est le stator, qui peut être défini comme l'ensemble des pièces fixes assurant la fonction de support - au moins partiel - du moteur, mais fondamentalement il constitue la partie du circuit magnétique qui comprend les enroulements inducteurs logés dans fentes spéciales faites en correspondance avec sa surface interne. Le stator, représenté sur la figure (1-1), est constitué d'un alliage d'acier au silicium ou de tôles d'acier, isolées l'une de l'autre. De par sa structure, il dépend à quel point il est affecté par des flux magnétiques variables dans le temps qui provoquent des pertes dues à l'hystérésis (liée à l'aimantation non linéaire du matériau) et à des "courants de Foucault" induits. Dans les fentes obtenues dans la structure des tôles, trois enroulements primaires sont insérés (chacun d'entre eux étant constitué par d'autres bobines connectées différemment), auxquels est appliquée la tension d'alimentation et qui génèrent le champ magnétique. Les enroulements du stator triphasé peuvent être connectés en étoile ou en triangle. Ceci peut être réalisé avec des moteurs équipés d'une boîte à bornes à 6 bornes, de sorte qu'il est possible d'alimenter le même moteur avec différentes tensions de réseau triphasées [1].

2-3-2 Le rotor

Le deuxième élément est le rotor, qui est positionné à l'intérieur du stator et constitue le circuit induit du moteur. Pour un moteur à cage d'écureuil, le rotor - comme représenté sur la figure (1-1) est constitué d'un système de barres (en cuivre ou aluminium), coaxiales à l'axe de rotation et directement moulées dans les fentes ménagées le long de la périphérie externe du ferromagnétique, ils sont fermés en court-circuit par deux bagues situées sur les extrémités et constituant également une fixation mécanique. Ainsi, on obtient un rotor extrêmement compact et robuste auquel est également fixé l'arbre du moteur.

Le champ magnétique induit, qui constitue le principe de fonctionnement du moteur, fait tourner l'arbre du moteur, convertissant ainsi l'énergie électrique en énergie mécanique [1].

Il y a d'autres composants mécaniques qui constituent le moteur. Les principaux sont :

- les deux paliers montés sur le stator et ayant la fonction de supporter l'arbre du moteur.
- le châssis qui, grâce aux ailettes de refroidissement, dissipe la chaleur produite notamment par le stator et qui abrite également la boîte à bornes de raccordement.
- le ventilateur, qui assure le refroidissement.

Une représentation générale de l'ensemble avec un plan de coupe du moteur triphasé asynchrone est donnée à la figure 2-1 [1].

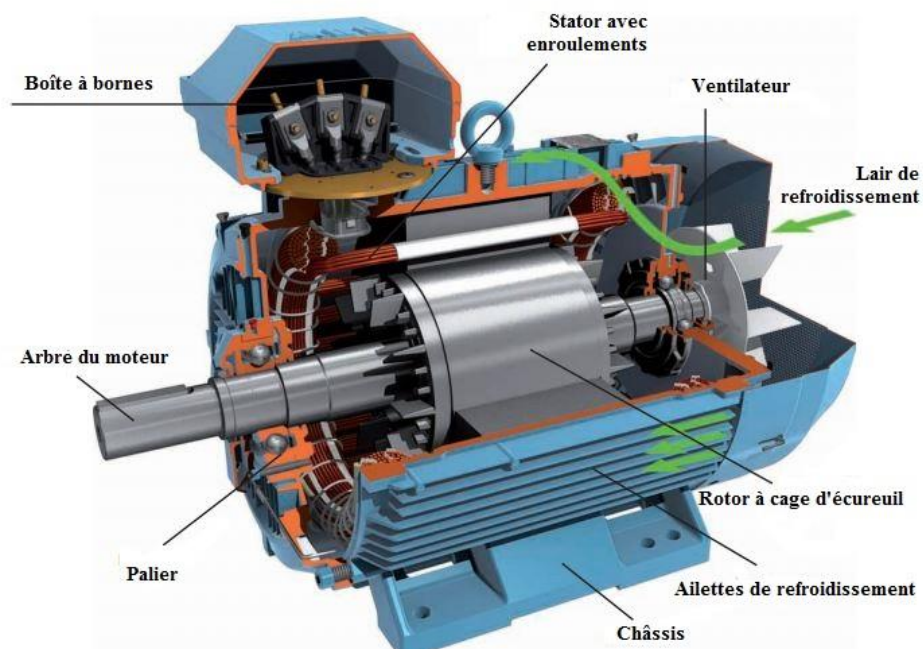


Figure 2 1 : Représentation générale de l'ensemble avec un plan de coupe du moteur triphasé asynchrone [1].

2-4 Modèle triphasée (réel) de la MAS

La structure de la machine à induction analysée contient : trois enroulements de phase identiques placés sur le stator dans un angle de 120 degrés électriques de configuration de différence de phase, trois enroulements de phase identiques placés sur le rotor avec une différence de phase similaire ; un entrefer constant (fentes proches dans une approche idéale) ; un circuit magnétique insaturé (linéaire) permettant à chaque enroulement d'être caractérisé par une inductance principale et une inductance de fuite. Chaque enroulement de phase a ω_s tourne sur le stator et ω_r tourne sur le rotor et une distribution harmonique. Toutes les inductances sont considérées comme constantes. La vue schématique de la machine est présentée sur la figure 1-2 [4].

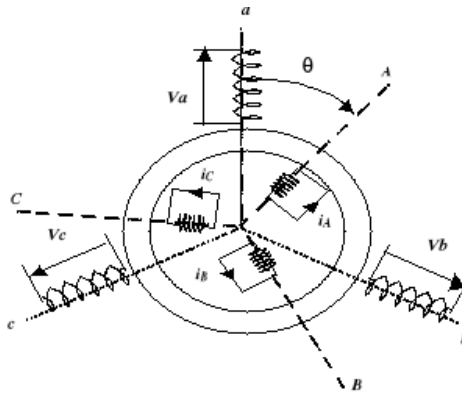


Figure 2 2 : La vue schématique de la machine asynchrone triphasée [4].

2-4-1 Equations électriques

De la loi de Faraday, qui donne la relation entre la tension \mathbf{V} à travers la résistance de la bobine \mathbf{R} et inductance \mathbf{L} , le courant \mathbf{I} et les variations des flux [2]

On applique cette relation sur le moteur asynchrone on trouve :

$$\left. \begin{aligned}
 [V_s] &= [R_s] \cdot [I_s] + \left(\frac{d}{dt}\right) [\Phi_s] \\
 [V_s] &= [V_{as}, V_{bs}, V_{cs}]^T \\
 [I_s] &= [I_{as}, I_{bs}, I_{cs}]^T \\
 [\Phi_s] &= [\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}]^T \\
 \text{Avec} \\
 [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}
 \end{aligned} \right\} \text{II-1}$$

$$\left. \begin{aligned}
 0 &= [R_r] \cdot [I_r] + \left(\frac{d}{dt}\right) [\Phi_r] \\
 0 &= [V_{ar}, V_{br}, V_{cr}]^T \\
 [I_r] &= [I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]^T \\
 [\Phi_r] &= [\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}]^T \\
 \text{Avec} \\
 [R_r] &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}
 \end{aligned} \right\} \text{II-2}$$

- V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Les tensions statoriques.
- V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : les tensions rotoriques.
- I_{as}, I_{bs}, I_{cs} : les courants statoriques.
- I_{ar}, I_{br}, I_{cr} : les courants rotoriques.
- $\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$: les flux statoriques.
- $\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$: les flux rotoriques.
- R_s : les résistances statoriques .
- R_r : les résistances rotoriques.

2-4-2 Les équations magnétiques

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes [2] :

$$\begin{bmatrix} [\Phi_s] \\ [\Phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{sr} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad \text{II-3}$$

Avec :

- $[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques
- $[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques.
- $[M_{sr}]$: Matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor.

Les matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ s'écrivent alors :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{II-4} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad \text{II-5}$$

- L_s : Inductance propre d'une phase statorique.
- L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.
- M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques.
- M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques [2]:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = [M_{sr}] \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left[\theta - \left(\frac{4\pi}{3}\right)\right] & \cos\left[\theta - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ \cos\left[\theta - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right] & \cos\theta & \cos\left[\theta - \left(\frac{4\pi}{3}\right)\right] \\ \cos\left[\theta - \left(\frac{4\pi}{3}\right)\right] & \cos\left[\theta - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right] & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{II-6}$$

La résolution du système d'équations (II-6) est difficile du fait que les termes des matrices des inductances $[M_{sr}]$ et $[M_{sr}]^T$ varient en fonction de la position du rotor par rapport au stator (angle θ) et nécessitent donc d'être recalculées à chaque pas d'échantillonnage.

Nous utilisons alors des transformations mathématiques, qui permettant résoudre de telles difficultés. Parmi les transformations utilisées on cite celles de **Park**.

2-4-3 Equation mécanique

L'étude des caractéristiques dynamiques du moteur exige l'introduction de l'équation du mouvement suivante [2] : $J \cdot \left(\frac{d\Omega}{dt}\right) = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega$ II-7

Avec :

- J : Le moment d'inertie
- Ω : vitesse angulaire de rotation du moteur
- f_r : Coefficient de frottement
- C_{em} : Couple électromagnétique
- C_r : Couple résistant

2-5 Modèle biphasé du MAS

Le modèle triphasé réel de MAS, non linéaire et fortement couplé entraînant la complexité de sa résolution. L'utilisation de la transformation de Park permet de contourner ce problème et d'obtenir un système d'équations à coefficients indépendants de la position (constants) et donc facile à résoudre (modèle biphasé) [4].

2-5-1 Transformation de Park

La transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques disposés sur trois axes (a, b, c) en des enroulements fictifs équivalents, du point de vue électriques et magnétiques disposés sur deux axes (d, q)

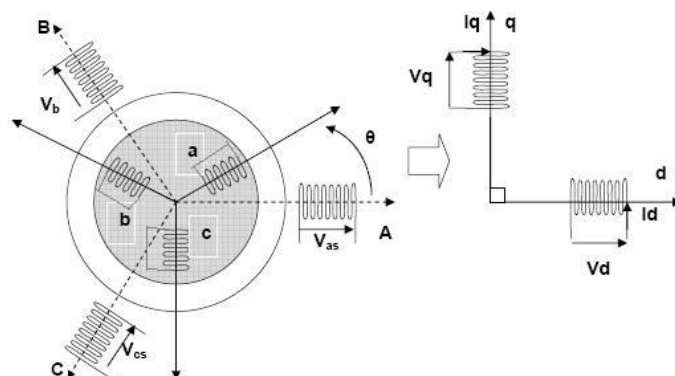


Figure 2 3 : transformer les enroulements disposés sur trois axes (a, b, c) en des enroulements deux axes (d, q) [4].

2-5-2 Schéma équivalent de la machine asynchrone en régime permanent

L'alimentation statorique triphasé est équilibrée. L'enroulement rotorique est court-circuité et le rotor tourne à vitesse constante ω_r . Les courants statoriques sont :

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} \cdot I_s \cos(\omega t + \alpha) \\ i_b &= \sqrt{2} \cdot I_s \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c &= \sqrt{2} \cdot I_s \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad \text{II-8}$$

En appliquant la transformation de Park et en choisissant un repère lié au champ tournant, on a :

$$\theta_{dq} = \theta_s \text{ tel que :}$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \omega + \omega_r \text{ (Vitesse de synchronisme)} \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad , \quad \omega = P\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{II-9}$$

$$\begin{bmatrix} i_{0s} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{dq}) & \cos(\theta_{dq} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{dq} - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{dq}) & -\sin(\theta_{dq} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{dq} - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{II-10}$$

De la même façon, on obtient pour les tensions statoriques et les grandeurs rotoriques, des grandeurs constantes du fait du choix du référentiel. Il en résulte que les flux totalisés sont constants, ceci a pour conséquence l'annulation des tensions induites en régime permanent.

Les équations de tensions seront :

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \cdot L_s \cdot I_{qs} - \omega_s \cdot L_m \cdot I_{qr} \\ V_{qs} &= R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot L_s \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot L_m \cdot I_{dr} \\ 0 &= R_r \cdot I_{dr} - (\omega_s - \omega)(L_r \cdot I_{qr} + L_m \cdot I_{qs}) \\ 0 &= R_r \cdot I_{qr} + (\omega_s - \omega)(L_r \cdot I_{dr} + L_m \cdot I_{ds}) \end{aligned} \right\} \quad \text{II-11}$$

Où les flux magnétiques du rotor et du stator dans le repère d-q :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{ds} &= L_s \cdot I_{ds} + L_m \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} &= L_s \cdot I_{qs} + L_m \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} &= L_r \cdot I_{dr} + L_m \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} &= L_r \cdot I_{qr} + L_m \cdot I_{qs} \end{aligned} \right\} \quad \text{II-12}$$

En tenant compte du moteur à induction, les tensions de rotor sont : $V_{dr} = V_{qr} = 0$ II-13

2-6 Identification paramétrique de la machine asynchrone à cage

2-6-1 Mesure de résistance R_s

Comme montré la Figure 2-4, une tension continue V_{cc} est appliquée de sorte que le courant I_{cc} est proche de la valeur nominale du moteur [5].

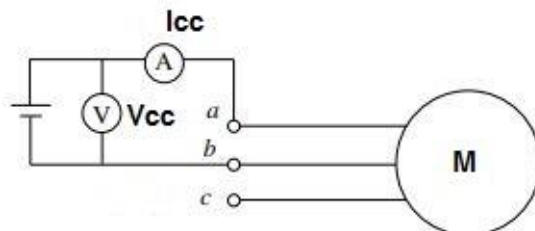


Figure 2 4 : Mesure de résistance R_s [5].

Parce que la machine est connectée en Y

$$R_s = \frac{R_{cc}}{2} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad \text{II-14}$$

On a, $V_{cc} = 52 \text{ v}$, $I_{cc} = 1,35 \text{ A}$.

$$\text{Finalement : } R_s = \frac{R_{cc}}{2} = \frac{52}{1,35} \quad R_s = 19,26 \Omega$$

2-6-2 Essai à vide

L'essai est effectué en appliquant une tension nominale équilibrée sur les enroulements du stator à la fréquence nominale. La petite puissance fournie à la machine est due aux pertes de noyau, au frottement et aux pertes d'enroulement. La machine tourne à une vitesse presque synchrone, ce qui fait le glissement presque zéro ($g = 0$). voir la figure 2-5 [3],[5].

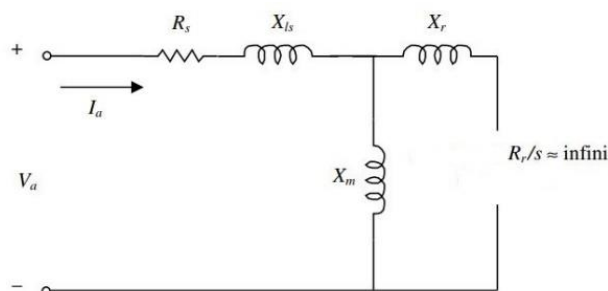


Figure 2 5 : circuit équivalent du moteur à induction à vide [3]

Les données mesurées sont les suivantes : $V_a = \frac{V_{10}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$, $I_a = 0,48 \text{ A}$

II-15

2-6-3 Méthode de séparation des pertes

La méthode de séparation des pertes repose sur les propriétés des pertes fer et des pertes mécaniques, les pertes fer sont proportionnelles au carré de la tension et la vitesse à vide de la machine ne décroît pratiquement pas, c'est-à-dire, elle est considérée comme constante lors des variations de la tension de la valeur nominale à 20% de cette dernière par suite les pertes mécaniques le seront également [3].

N° d'essai	V_{10} V	I_{10} A	P_{10} W	P_j W	$P_{10}-P_j$ W	$U_{10}^2/100$
1	40	0.19	7	2.085	4.915	16
2	80	0.22	8	2.79	5.21	64
3	120	0.25	11	3.61	7.39	144
4	160	0.33	16	6.29	9.71	256
5	200	0.42	21	10.19	10.81	400
6	220	0.48	25	13.31	11.69	484

Tableau 2 1 : Résultats de l'essai à vide

On illustre une courbe dont l'axe des ordonnées aura pour grandeur $P_{10} - P_j$ et pour abscisse $U_{10}^2/100$. Le carré de la tension à l'abscisse permet d'avoir une courbe linéaire des pertes fer. Le prolongement de cette caractéristique coupe l'axe des ordonnées au point qui détermine les pertes mécaniques. Les pertes fer sont tirées du graphe au point de la tension nominale. Ceci est montré sur la figure suivante :

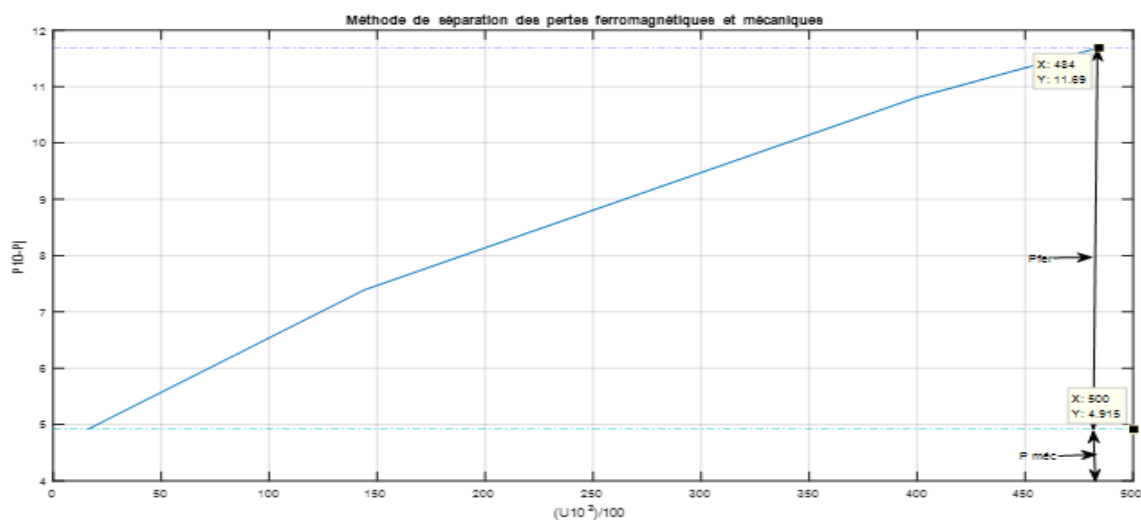


Figure 2 6 : Méthode de séparation des pertes

De la courbe de la méthode de séparation des pertes, on tire à partir des valeurs nominales, les pertes mécaniques et les pertes fer. $P_{méc} = 4.915 W$ $P_{fer} = 11.69 W$

2-6-4 Essai de court-circuit (rotor bloqué)

Le rotor est à l'arrêt, tandis qu'une basse tension est appliquée aux enroulements du stator pour faire circuler le courant nominal. Mesurez la tension et la puissance de la phase. Comme il n'y a pas de glissement, ($g = 1$) qui nous donne le circuit équivalent suivant [3], [5].

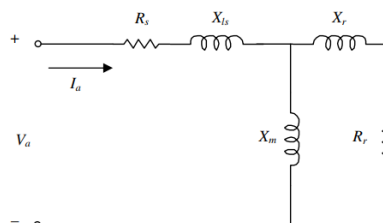


Figure 2 7 : circuit équivalent du moteur à induction à rotor bloqué [3]

Nous simplifions le circuit

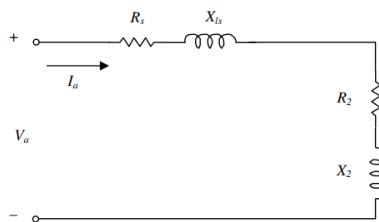


Figure 2 8 : circuit simplifiée du moteur à induction à rotor bloqué [3]

Nous avons trouvé les mesures suivantes :

Essai de court-circuit	
V_{cc} (V)	105
I_{cc} (A)	1.4
P_{cc} (W)	131
F (Hz)	50

Figure 2 9 : Résultats de l'essai en court-circuit

Données : $V_a = \frac{V_{cc}}{\sqrt{3}} = \frac{105}{\sqrt{3}} = 60.62 V$

$$I_a = 1.4 \text{ A}$$

$$P_a = \frac{P_{cc}}{3} = \frac{131}{3} = 43.66 \text{ W}$$

II-17

$$Q_a = \sqrt{(V_a * I_a)^2 - P_a^2} = \sqrt{(60.62 * 1.4)^2 - 43.66^2} = 72.77 \text{ vars}$$

II-18

2-6-5 Calcul de X_{ls} et X_{lr}

à l'aide du tableau qui présente les coefficients empiriques de distribution des réactances de la machine asynchrone, nous déterminons les valeurs des réactances [3].

Classe	Caractéristiques	Fraction de $(X_{ls} + X_{lr})$	
		X_{ls}	X_{lr}
A	Couple de démarrage normal Courant de démarrage normal	0.5	0.5
B	Couple de démarrage normal Bas courant de démarrage	0.4	0.6
C	Couple de démarrage élevé Bas courant de démarrage	0.3	0.7
D	Couple de démarrage élevé Glissement élevé	0.5	0.5
Rotor bobiné		0.5	0.5

Tableau 2 2 : Distribution empirique des réactances de fuite entre le stator et le rotor des machines asynchrones [3]

Le moteur de la classe A

$$X_{ls} = 0.5 * \frac{Q_a}{I_a^2} = 0.5 * \frac{72.77}{1.4^2}$$

$$X_{ls} = 18.56 \Omega$$

$$X_{lr} = 0.5 * \frac{Q_a}{I_a^2} = 0.5 * \frac{72.77}{1.4^2}$$

$$X_{lr} = 18.56 \Omega$$

II-19

2-6-6 Calcul de la résistance R_μ et la réactance X_μ

Le schéma ci-dessous permet de calculer les différentes réactances. Ce calcul nécessite au préalable l'utilisation de la méthode de séparation des pertes [3].

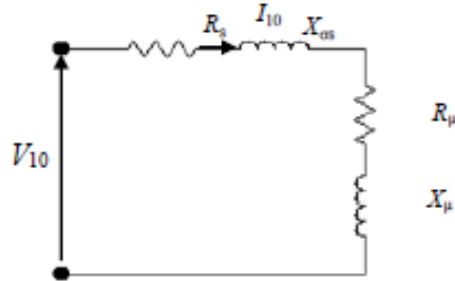


Figure 2 10 : Circuit équivalent d'un moteur MAS à vide [3]

On peut déduire la réactance de magnétisation X_μ .

On a :

$$V_{10} = Z_{10} \cdot I_{10} \Rightarrow Z_{10} = \frac{V_{10}}{I_{10}} = \frac{127}{0.48} \quad \text{II-20}$$

$$Z_{10} = 264.58\Omega$$

$$X_\mu = \sqrt{(Z_{10}^2 - (R_S + R_\mu)^2)} - X_{ls} \quad \text{II-21}$$

$$R_\mu = \left[\frac{P_{10} - P_{méc}}{3I_{10}^2} \right] - R_S = \frac{25 - 4.915}{3} \cdot 0.48^2 - 19.26 \quad \text{II-22}$$

$$R_\mu = 9.798\Omega$$

$$X_\mu = \sqrt{(264.58^2 - (19.26 + 9.798)^2)} - 18.56$$

$$X_\mu = 244.41\Omega$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi 50} = \frac{244.41}{314} \quad \text{II-23}$$

$$L_\mu = 0.778 H$$

$$X_{Ls} = X_{ls} + X_\mu = 18.56 + 244.41 \quad \text{II-24}$$

$$X_{Ls} = 262.97\Omega$$

$$L_S = L_R = \frac{262.97}{314}$$

$$L_S = L_r = 0.837H$$

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{(\sqrt{3} * I_{cc}^2)} = \frac{105}{\sqrt{3.1.4}} \quad \text{II-25}$$

$$Z_{cc} = 43.3 \Omega$$

$$R_r = \frac{P_{cc}}{3.I_{cc}^2} - R_s = \frac{131}{3*1.4^2} - 19.26 \quad R_r = 3.019 \Omega \quad \text{II-26}$$

En résumé,

1. Résistance d'enroulement de stator $R_s = 19.26 \Omega/\text{phase}$
2. Résistance d'enroulement de rotor $R_r = 3.019 \Omega/\text{phase}$
3. Réactance de magnétisation $X_m = 244.41 \Omega/\text{phase}$

L'inductance magnétisante par phase est

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{244.41}{2\pi*50} \quad L_m = 0.778 H$$

Réactance de fuite du stator $X_{ls} = 18.56 \Omega / \text{phase}$

L'inductance de fuite du stator par phase est :

$$l_s = \frac{X_{ls}}{2\pi f} = \frac{18.56}{2\pi*50} \quad l_s = 0.059 H$$

Réactance de fuite du rotor $X_{lr} = 18.56 \Omega/\text{phase}$

L'inductance de fuite du rotor par phase est :

$$l_r = \frac{X_{lr}}{2\pi f} = \frac{18.56}{2\pi*50} \quad l_r = 0.059 H$$

2-6-7 Détermination des paramètres mécaniques

Les équations électriques sont liées à l'équation mécanique par la position angulaire du rotor qui intervient dans l'expression des inductances mutuelles stator-rotor.

$$J \cdot \left(\frac{d\Omega}{dt} \right) = C_{em} - C_r$$

A. Essai de ralentissement

Le Principe de la méthode de ralentissement utilisée consiste à lancer la machine à sa vitesse nominale ω_n puis à couper l'alimentation et à laisser le moteur ralentir sous l'effet des frottements [3].

La vitesse diminue progressivement sous l'effet des pertes mécaniques ($-f_r \Omega^2$)

$$\text{On a donc : } P_{mec} = -f_r \Omega^2 = J \Omega \cdot \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)$$

II-27

D'après l'expression du couple résistant, l'inertie peut être calculée par :

$$J = \frac{P_{mec}}{\Omega_{r0} \left(\frac{d\Omega_r}{dt} \right)}$$

A partir de mesure on trouve :

$$\Omega_{r0} = 148.7 \text{ rad/s} \quad , \quad d\Omega_r = 156.55 \text{ rad/s} \quad , \quad dt = 4.27 \text{ s} \quad , \quad P_{mec} = 4.915 \text{ W}$$

$$J = \frac{4.915}{148.7 \left(\frac{156.55}{4.27} \right)} \quad J = 0.0009 \text{ kg.m}^2$$

B. Détermination du coefficient de frottement f_r

$$\text{On a : } \Delta t = \left(\frac{J}{f_r} \right) \Rightarrow f_r = \left(\frac{J}{\Delta t} \right) = \frac{0.0009}{4.27}$$

II-28

$$f_r = 0.0002 \text{ Nm.s/rad}$$

Les Paramètres du moteur obtenus :

Paramètres	Valeurs
R_s	19.26 Ω
R_r	3.019 Ω
L_m	0.778 H
L_s	0.837 H
L_r	0.837 H
J	0.0009 kg.m^2
f_r	0.0002 Nm.s/rad

Tableau 2 3 : Les résultats des Paramètres du moteur obtenus

2-6-8 résultats de simulation de la MAS

La machine asynchrone est normalement alimentée directement à partir du réseau industriel par un système de tensions triphasées équilibrées.

Les figures ci-dessous représentent les résultats obtenus, ce dernier sera simulé à l'aide du logiciel SIMULINK sous MATLAB. Les paramètres de la MAS utilisée dans ce travail sont donnés expérimentalement

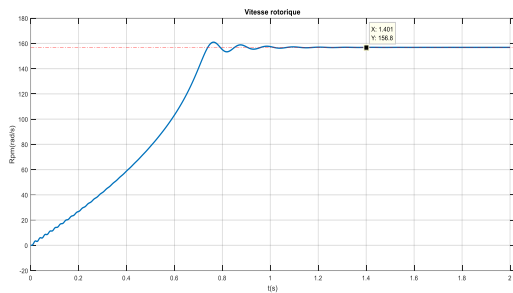


Figure 2 11 : Vitesse rotorique

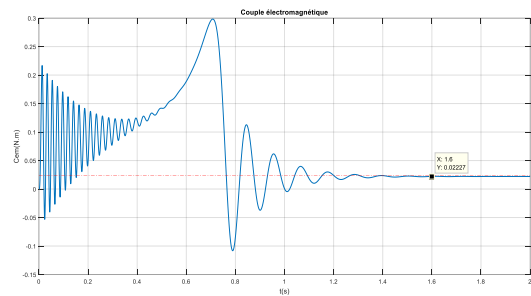


Figure 2 12 : Couple électromagnétique

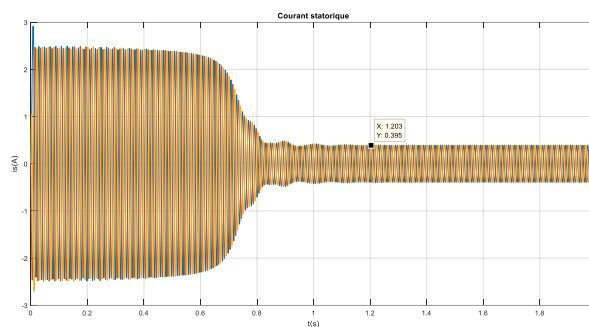


Figure 2 13 : Courant statorique

Notons que les paramètres de la machine sont donnés ci-dessus. En première étape on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimenté directement par le réseau standard 127/220V, 50HZ et sans l'application de perturbation ($C_r = 0$).

L'examen des courbes permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale permet d'avoir :

Aux premiers instants, les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro, mais qui disparaissent rapidement au bout de quelques alternances (environ de 0,7s), le régime permanent est atteint, ces oscillations peuvent être à l'origine de la destruction de la machine par échauffement en cas de répétitions excessives.

Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, présentes aux premiers instants de démarrage des battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à zéro.

3- Transformateur triphasée

3-1 Structure du transformateur triphasé

Un transformateur se compose de noyau, bobine, réservoir, isolation et autres accessoires. Le noyau de fer est fait de tôles pour réduire les pertes par courants de Foucault et le matériau est un alliage de silicium pour réduire les pertes d'hystérésis et améliorer les caractéristiques de magnétisation. La réduction de l'épaisseur des tôles réduit les pertes par courants de Foucault dans le noyau. Il existe deux classes de bobines : les enroulements concentriques (cylindriques) et les enroulements entrelacés (en crêpes). Pour les enroulements concentriques, la bobine haute tension est typiquement enroulée sur la bobine basse tension pour obtenir un bon couplage entre les enroulements. Pour les enroulements entrelacés, les bobinages haute tension et basse tension sont empilés en alternance de bobines en forme de galette. Dans la conception réelle, de nombreuses modifications sont utilisées par les différents fabricants. Le papier, le carton comprimé, l'huile minérale et la résine époxy sont utilisés pour l'isolation [6].

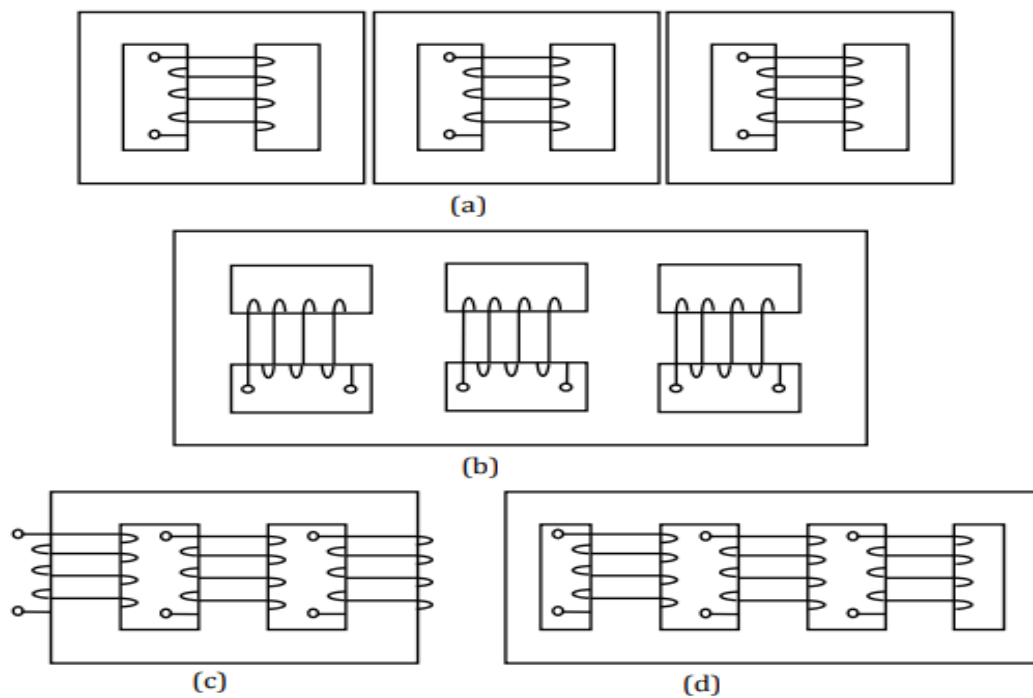


Figure 2 14 : Types de noyau des transformateurs de puissance triphasée : (a) noyau triplex, (b) noyau cuirassé. (c) noyau à trois colonnes, (d) noyau à cinq colonnes [6].

3-2 Le circuit magnétique du transformateur triphasé

Pour réaliser un transformateur triphasé, on peut associer trois transformateurs monophasés identiques :

Chacun de ces trois transformateurs possède un bobinage de N_1 spires et un bobinage de N_2 spires.

La réluctance d'un circuit magnétique est \mathcal{R}_0 [7]

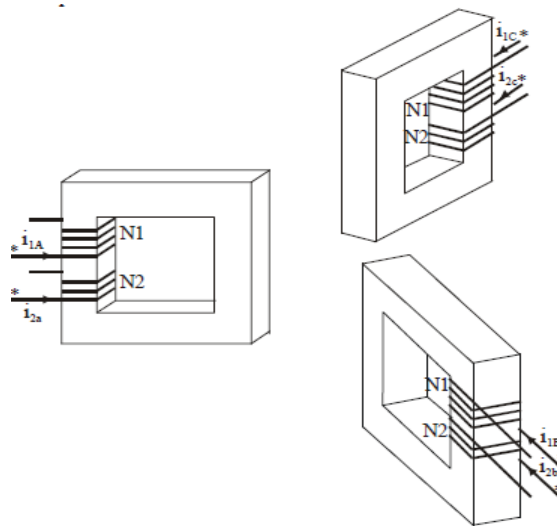


Figure 2 15 : Trois transformateurs monophasés identiques [7]

Ces trois transformateurs peuvent être réunis de façon à créer une colonne centrale unique

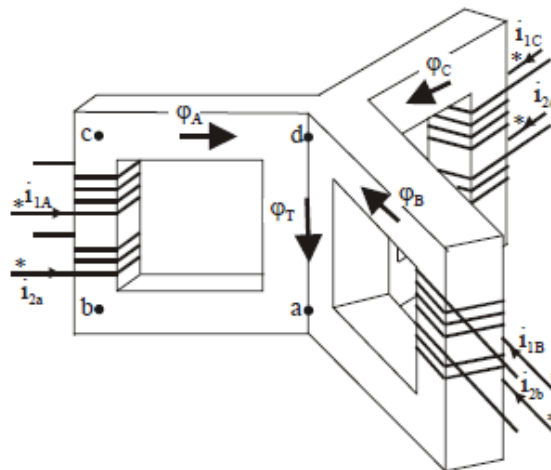


Figure 2 16 : Trois transformateurs à créer une colonne centrale unique [7]

avec

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0 \text{ et } i_{2a} + i_{2b} + i_{2c} = 0 \Rightarrow \varphi_T = 0$$

II-29

On en déduit donc qu'on peut supprimer la colonne centrale :

Les réluctances de chaque tiers du circuit magnétique figure : 2-15 sont identiques.

En réalité pour des raisons de facilités de réalisation, le circuit magnétique du transformateur est réalisé à plat figure : 2-16.

Les réluctances des trois colonnes ne sont pas identiques.

Toutefois, afin de maintenir une facilité de modélisation, nous conserverons l'hypothèse de l'identité des réluctances [7].

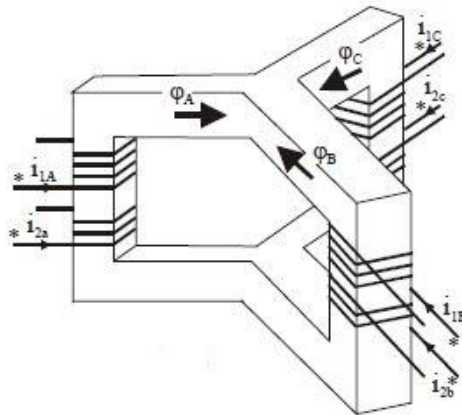


Figure 2 17 : Trois transformateurs à supprimer la colonne centrale [7]

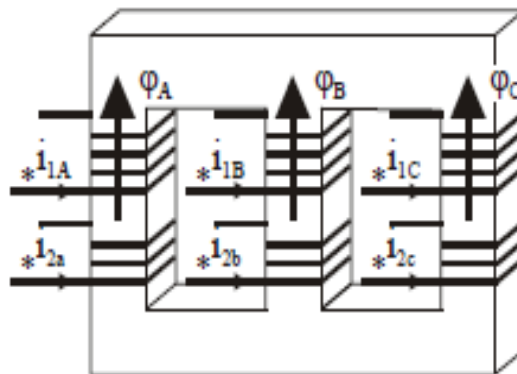


Figure 2 18 : Le circuit magnétique du transformateur est réalisé à plat [7]

Nous allons maintenant préciser les relations entre les flux totaux dans les différents bobinages et les courants qui les engendrent.

Les hypothèses précédentes sont maintenues :

- Circuit magnétique linéaire
- L'identité des réluctances des trois colonnes (bien que le transformateur soit à plat, on raisonne comme s'il était en étoile)

Les différents bobinages sont repérés par l'indice de leur courant (1A, 1B, 1C, 2a, 2b, 2c). (Indice (1) et majuscule pour les primaires ; indice (2) et minuscule pour les secondaires).

On remarquera que les bobinages 1A, 1B et 1C ont le même nombre de spires et qu'ils voient le même circuit magnétique équivalent. Par conséquent : $L_A = L_B = L_C$ et de même $M_{AB} = M_{BC} = M_{CA}$ etc...

$$\begin{bmatrix} \phi_{1A} \\ \phi_{1B} \\ \phi_{1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AB} \\ M_{AB} & L_A & M_{AB} \\ M_{AB} & M_{AB} & L_A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{Aa} & M_{Ab} & M_{Ab} \\ M_{Ab} & M_{Aa} & M_{Ab} \\ M_{Ab} & M_{Ab} & M_{Aa} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix} \quad \text{II-30}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{2a} \\ \phi_{2b} \\ \phi_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ab} \\ M_{ab} & L_a & M_{ab} \\ M_{ab} & M_{ab} & L_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{Aa} & M_{Ab} & M_{Ab} \\ M_{Ab} & M_{Aa} & M_{Ab} \\ M_{Ab} & M_{Ab} & M_{Aa} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} \quad \text{II-31}$$

Pour la colonne A on peut donc écrire :

$$\phi_{1A} = L_A \cdot i_{1A} + M_{AB} \cdot (i_{1B} + i_{1C}) + M_{Aa} \cdot i_{2a} + M_{Ab} (i_{2b} + i_{2c})$$

$$\phi_{2a} = L_a \cdot i_{2a} + M_{ab} \cdot (i_{2b} + i_{2c}) + M_{Aa} \cdot i_{1A} + M_{Ab} (i_{1B} + i_{1C})$$

3-2-1 Modèle monophasé de chaque colonne

Nous allons maintenant montrer que lorsque :

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0 \text{ et } i_{2a} + i_{2b} + i_{2c} = 0$$

Chaque colonne du transformateur triphasé se comporte comme un transformateur monophasé.

Si $i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0$ et $i_{2a} + i_{2b} + i_{2c} = 0$ on en déduit :

$$\begin{aligned} \phi_{1A} &= L_A \cdot i_{1A} - M_{AB} \cdot i_{1A} + M_{Aa} \cdot i_{2a} - M_{Ab} \cdot i_{2a} = (L_A - M_{AB})i_{1A} + (M_{Aa} - M_{Ab})i_{2a} \\ \phi_{2a} &= (L_a - M_{ab})i_{2a} + (M_{Aa} - M_{Ab})i_{1A} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \phi_{1A} \\ \phi_{2a} \end{aligned}} \right\} \quad \text{II-32}$$

$$L_A - M_{AB} = L_{C1}$$

$$M_{Aa} - M_{Ab} = M$$

$$L_a - M_{ab} = L_{C2}$$

$$M_{Aa} - M_{Ab} = M$$

II-33

$$\text{D'où l'équation matricielle : } \begin{bmatrix} \phi_{1A} \\ \phi_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{C1} & M \\ M & L_{C2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{2a} \end{bmatrix} \quad \left. \vphantom{\begin{bmatrix} \phi_{1A} \\ \phi_{2a} \end{bmatrix}} \right\} \quad \text{II-34}$$

A partir de la matrice inductance de chaque colonne, on peut appliquer la démarche décrite pour le transformateur monophasé [7] :

Les inductances propres sont décomposées en inductances principales et inductances de fuite :

$$\begin{bmatrix} \phi_{1A} \\ \phi_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{C1} & M \\ M & L_{C2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{fA} + L_{HC1} & M \\ M & L_{fa} + L_{HC2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{2a} \end{bmatrix} \quad \text{II-35}$$

Ce qui conduit aux schémas du modèle du transformateur monophasé suivants :

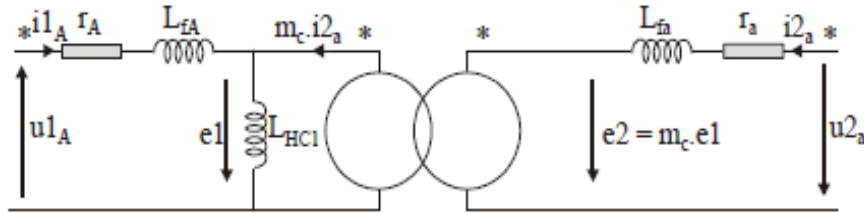


Figure 2 19 : Schémas du modèle du transformateur monophasé [7]

On montrera au paragraphe suivant que si le flux de fuite est faible par rapport au flux principal :

$$m = \sqrt{\frac{L_{HC2}}{L_{HC1}}} \approx \frac{N_2}{N_1} \quad \text{II-36}$$

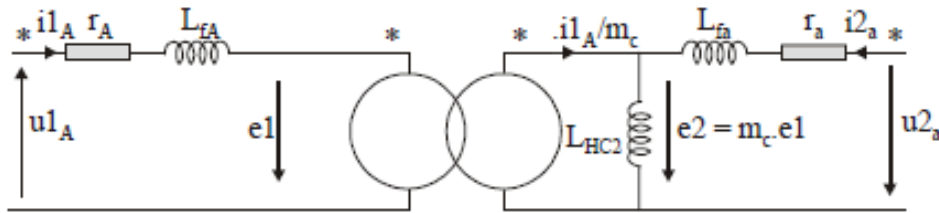


Figure 2 20 : Schémas simplifié du modèle du transformateur monophasé [7]

3-3 Circuit équivalent du transformateur réel

3-3-1 Effet de μ

Puisque la perméabilité du noyau est finie, la réluctance sera non-nulle. Par conséquent, pour créer le flux Φ dans le noyau, il faut un courant i_m . Ceci peut être représenté par une inductance L_m , qu'on appelle une inductance magnétisante [8].

3-3-2 Pertes dans le noyau

On représente les pertes dans le noyau par une résistance R_m en parallèle avec l'inductance magnétisante L_m [8].

3-3-3 Fuites au primaire et secondaire

On représente ces pertes par des inductances L_1 et L_2 pour le primaire et le secondaire respectivement.

3-3-4 Résistance des fils

On représente la résistance des fils de cuivre par des résistances R_1 et R_2 pour le primaire et le secondaire, respectivement [8].

Nous pouvons représenter toutes les paramètres des transformateurs avec le circuit équivalent suivants

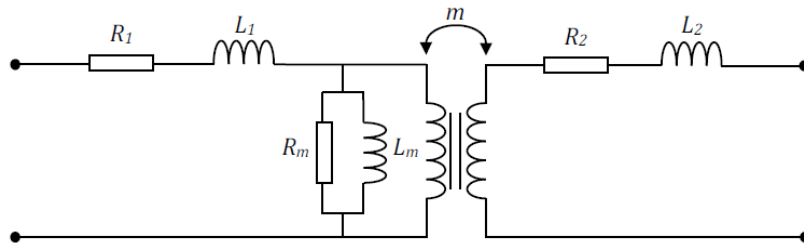


Figure 2 21 : Circuit équivalent du transformateur réel [8].

Pour faciliter l'analyse du circuit, on ramène les impédances du secondaire au primaire. On obtient alors le circuit de la figure 2-21

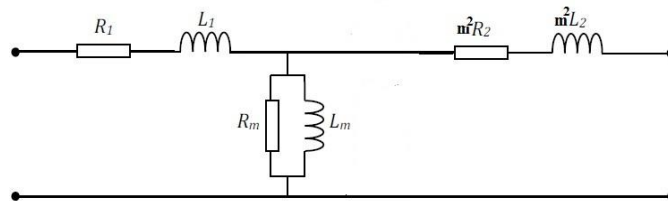


Figure 2 22 : Circuit équivalent du transformateur on ramène les impédances du secondaire [8].

Dans un transformateur typique, le courant I_0 est seulement 2 à 4% de la valeur du courant I_1 . Pour simplifier l'analyse, on peut donc négliger le courant I_0 . On va donc supposer que le noyau à des pertes Fer négligeables et une perméabilité élevée.

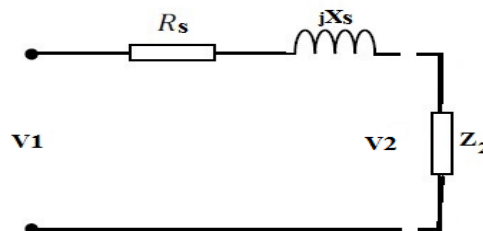


Figure 2 23 : Circuit équivalent simplifié du transformateur [8].

$$\left. \begin{aligned} R_s &= R_1 + R'_2 = R_1 + m^2 R_2 \\ X_s &= X_1 + X'_2 = X_1 + m^2 X_2 \end{aligned} \right\}$$

3-4 Identification paramétrique d'un transformateur triphasé

Peur déterminé les paramètres du circuit équivalent du transformateur représenté dans la figure 2-21 Nous faisons ces essais suivants :

Ces essais de transformateurs sont effectués pour trouver les paramètres du circuit équivalent du transformateur et les pertes du transformateur. L'essai en circuit ouvert et l'essai de court-circuit sur le transformateur sont très économiques et pratiques car ils sont effectués sans charger réellement le transformateur.

Peur déterminé les paramètres du circuit équivalent du transformateur représenté dans la figure 2-7 Nous faisons ces essais suivants :

3-4-1 Essai à vide

L'essai en circuit ouvert ou à vide sur un transformateur est effectué pour déterminer «la perte sans charge (perte de cœur)» et «le courant à vide». Le schéma de circuit pour l'essai de circuit ouvert est montré dans la figure ci-dessous. Habituellement, l'enroulement de secondaire reste ouvert et l'enroulement du primaire est connecté à son alimentation normale. Un wattmètre (W), un ampèremètre (A) et un voltmètre (V) sont connectés au primaire, la tension appliquée est lentement augmentée de zéro à la valeur nominale du côté primaire

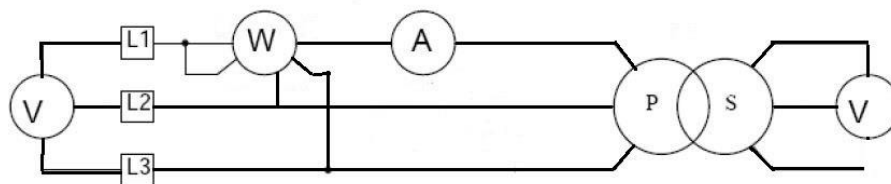


Figure 2 24 : Essai à vide

Les valeurs obtenues :

$$V_{10} = 380V, I_{10} = 0.12A, P_{10} = 14W, Q_{10} = 24Mvar, V_{20} = 401V$$

$$m = \frac{V_{20}}{V_{10}} = \frac{401}{380} \quad m = 1.055$$

$$R_m = \frac{3 \cdot U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{3 \cdot 380^2}{14} \quad R_m = 30.942 \text{ K}\Omega$$

$$X_m = \frac{3 \cdot U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{3 \cdot 380^2}{25} \quad X_m = 17.328 \text{ K}\Omega$$

$$L_m = \frac{X_m}{\omega} = \frac{17.328}{2 \cdot \pi \cdot 50} \quad L_m = 55.156 \text{ H}$$

3-4-2 Essai en court-circuit

Le schéma de connexion pour l'essai de court-circuit ou l'essai d'impédance sur le transformateur est indiqué sur la figure ci-dessous. Le côté secondaire du transformateur est court-circuité et le wattmètre (W), le voltmètre (V) et l'ampèremètre (A) sont connectés du côté primaire du transformateur. La tension est appliquée du côté primaire et augmentée du zéro jusqu'à ce que la lecture de l'ampèremètre soit égale au courant nominal. Toutes les lectures sont prises à ce courant nominal.

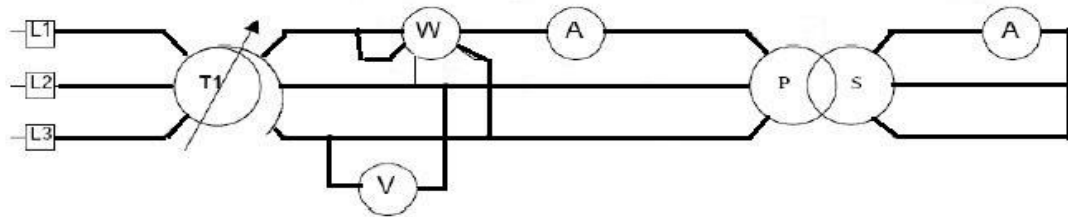


Figure 2 25 : Essai en court-circuit

Les valeurs obtenues :

$$V_{1cc} = 37V, I_{2cc} = 2.83 A, P_{1cc} = 63W$$

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{3 * I_{2cc}^2} = \frac{63}{3 * 2.83^2}$$

$$R_s = 2.62 \Omega$$

$$R_1 = R_2 = \frac{R_s}{2} = \frac{2.62}{2} \quad R_1 = R_2 = 1.31 \Omega$$

$$Z_s = m. \frac{U_{1cc}}{\sqrt{3} * I_{2cc}} = 1.055 * \frac{37}{\sqrt{3} * 2.83} = 7.96 \Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{7.96^2 - 2.62^2}$$

$$X_s = 7.52 \Omega$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_s}{2} = \frac{7.52}{2}$$

$$X_1 = X_2 = 3.76 \Omega$$

$$L_1 = L_2 = \frac{X_1}{\omega} = \frac{3.76}{2 * \pi * 50} \quad L_1 = L_2 = 0.0119 H$$

3-4-3 Convertir les valeurs en Pu

$$Z_{bs} = \frac{U_{z0}^2}{S_n} = \frac{401^2}{1500} \quad Z_{bs} = 107.2 \Omega \quad \text{II-38}$$

$$R_m \% = 100 * \left(\frac{R_m}{Z_{bs}} \right) = 100 * \left(\frac{30942}{107.2} \right) \quad R_m \% = 288.63 \text{ Pu} \quad \text{II-39}$$

$$X_m \% = 100 * \left(\frac{X_m}{Z_{bs}} \right) = 100 * \left(\frac{17328}{107.2} \right) \quad X_m \% = 161.64 \text{ Pu} \quad \text{II-40}$$

$$R_s \% = 100 * \left(\frac{R_s}{Z_{bs}} \right) = 100 * \left(\frac{2.62}{107.2} \right) \quad R_s \% = 2.44 \text{ Pu} \quad \text{II-41}$$

$$X_s \% = 100 * \left(\frac{X_s}{Z_{bs}} \right) = 100 * \left(\frac{7.52}{107.2} \right) \quad X_s \% = 7.01 \text{ Pu} \quad \text{II-42}$$

3-4-4 Les Paramètres du transformateur obtenus

paramètres	valeurs
$R_1 = R_2$	1.31 Ω
$L_1 = L_2$	0.0119 H
R_m	30.942 K Ω
L_m	55.156 H
R_s	2.62 Ω
X_s	7.52 Ω
Z_s	7.96 Ω

Tableau 2 4 : Les résultats des Paramètres du transformateur triphasé obtenu

4- Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on s'est intéressé à l'établissement des modèles d'action du moteur asynchrone triphasé et le transformateur triphasé.

Nous avons commencé notre étude du moteur à induction à travers la définition du moteur et de ses composants et ensuite nous avons abordé les équations de base (électriques, magnétiques et mécaniques) ainsi que les Transformation de Park, nous obtenons finalement le circuit équivalent au moteur, Ce que nous avons adopté dans l'extraction des paramètres du moteur à travers des expériences (essai : à vide, en court-circuit, en ralentissement).

De la même manière, nous avons étudié le transformateur triphasé et finalement obtenu les paramètres pour une utilisation dans des expériences pratiques (Chapitre III).

Références

- [1] Three-phase asynchronous motors, (Generalities and ABB proposals for the coordination of protective devices).
- [2] Bachani Mohamed," Identification paramétrique de la machine asynchrone", Université des Sciences et de la Technologie d'Oran mohamed boudiaf, 2013.
- [3] Berrehail Belkacem, "Identification Des Parametres D'un Moteur Asynchrone A Cage", Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [4] Rebaia Chergui, "Identification Des Paramètres D'une Machine Asynchrone Triphasée", Université de Batna, 2015.
- [5] Tze-Fun Chan and Keli Shi, "Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives", First Edition.
- [6] Yahiou Abdelghani," Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : Cas du courant d'appel",Université Ferhat Abbas - Setif,2012.
- [7] Michel Plou "Chapitre 7 : Le Transformateur Triphasé", Edition 2010.
- [8] Gabriel Cormier " Chapitre 8 : Transformateur", Université de Moncton : coursGEN1153

Chapitre III

L'impact de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute de tension

1- Introduction

Après avoir abordé dans le premier chapitre le problème de la chute des tensions et de leur impact sur les équipements industriels, notamment le moteur à induction, nous examinerons dans le troisième chapitre l'impact de la chute des tensions sur le moteur à induction expérimentalement.

Ce chapitre comprend deux parties :

- Partie de simulation : Dans laquelle nous simulons la chute de tension dans les deux types (symétrique et asymétrique) en utilisant les paramètres réels du moteur et du transformateur.
- Partie expérimentale : Dans laquelle nous étudierons expérimentalement l'impact de la chute de tension sur le moteur à induction avec transformateur et sans transformateur et prendrons les mêmes types que nous étudierons dans le partie de simulation.

Enfin, nous comparons et commenterons les résultats.

2- L'impact de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute des tensions

Figure (3-1) montre le schéma dans laquelle on a étudié l'effet de l'impédance du transformateur sur le moteur à induction lors de la chute de tension à simulation. Avec une source d'alimentation variable pour pouvoir de changer la valeur de chaque phase afin de créer pas mal de types de chute de tension.

Pour une chute de tension de type A, nous réduisons la valeur des trois phases de 20%

Pour une chute de tension de type E, nous réduisons la valeur de deux phases de 20% seulement et les connectons directement au moteur sans utiliser le transformateur.

Pour obtenir la baisse de la tension de type G, nous réduisons les deux phases de 20% et on fait la connexion Yy du transformateur.

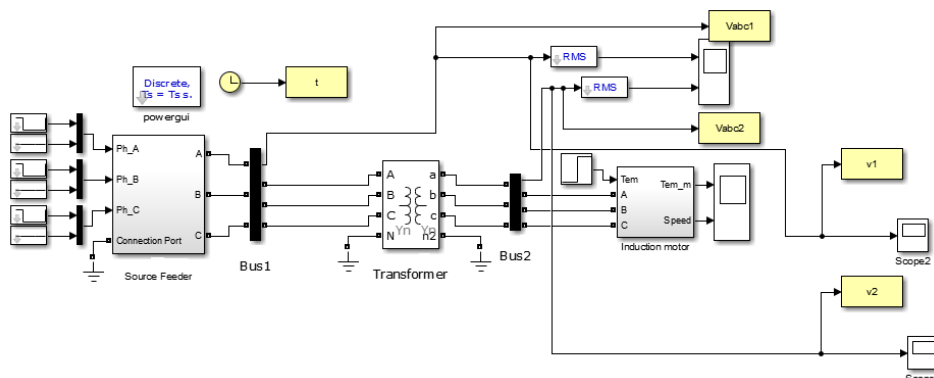


Figure 3 1 : Simulation de teste expérimentale

2-1 Résultats de simulation lors de chutes de tension symétrique (type "A")

2-1-2 sans transformateur (Défaut de type « A »)

Pour simuler la chute de tensions de type A sans transformateur, nous réduisons la valeur de l'amplitude de tension dans les trois phases de même valeurs vaut (20%).

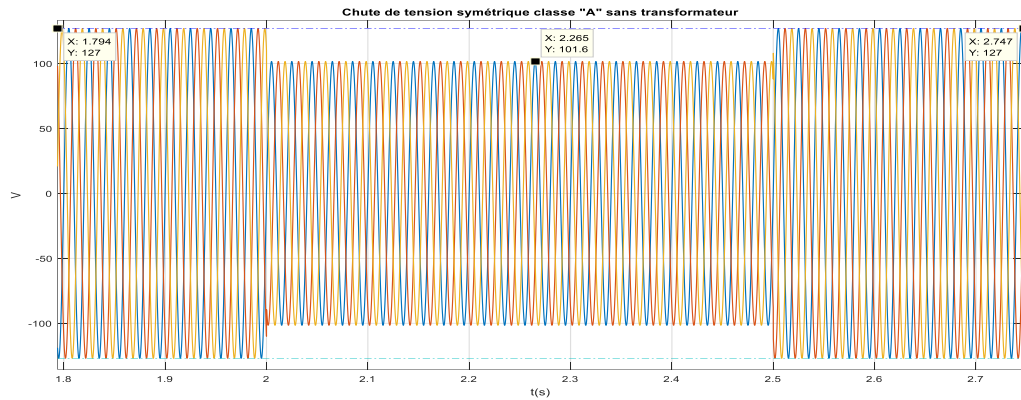


Figure 3 2 : Tension de source à leurs de chute de tension type A

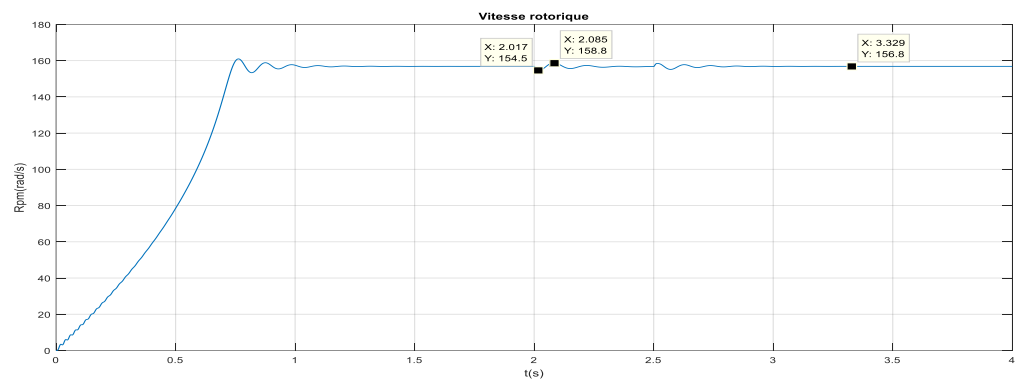


Figure 3 3 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A

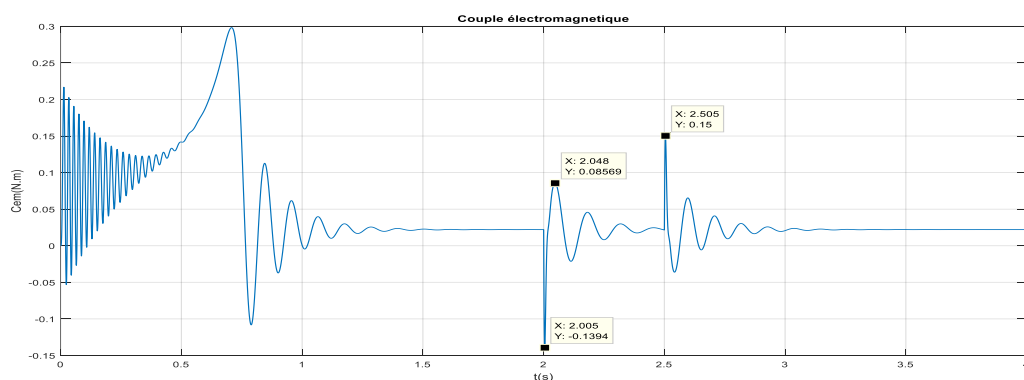


Figure 3 4 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A

Interprétation des résultats de la simulation

Les chute de tension dus à des défauts triphasés (creux type A) sans transformateur, présentent des chutes de tension de la même profondeur sur les trois phases sans déphasage supplémentaire (figure 3-2). Le moteur a été soumis à des creux de tension de 20% dans la durée de chute égale à 0.5 s.

La (figure 3-3) montre la fluctuation de la vitesse de rotation du moteur lors d'une chute de tension, où la vitesse diminue au début de la chute (154.5 rad/s) , puis remonte au maximum (pic) (158.8 rad/s) , puis fluctuer , à la fin de la chute vous retournez en maximum vitesse (pic), et puis retour à la stabilité.

Les influences de l'amplitude de la chute de tension et de la durée de la chute sur le moteur à induction sont illustrées à la (figure 3-4). Le pic de couple est le maximum de couple qui se produit en raison des creux de tension. Habituellement, cela s'est produit après que la chute de tension soit terminée (0.15 N.m).

2-1-1 Avec transformateur (Défaut de type « A »)

Pour simuler la chute de tensions de type A avec transformateur, nous réduisons la valeur de l'amplitude de tension dans les trois phases de même valeur vaut (20%).

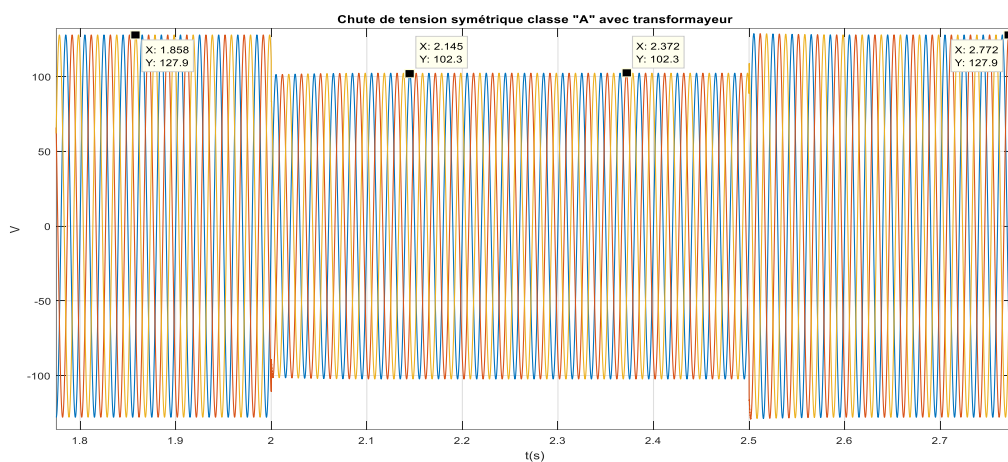


Figure 3 5 : Tension de source à leurs de chute de tension type A

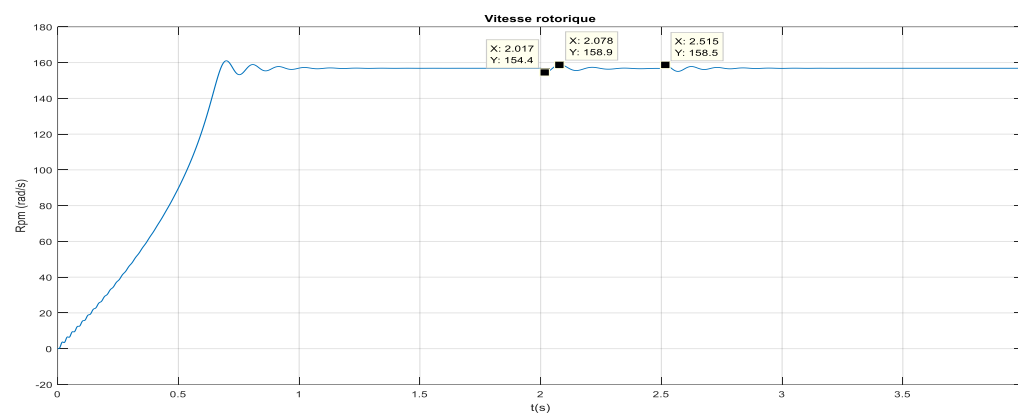


Figure 3 6 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A

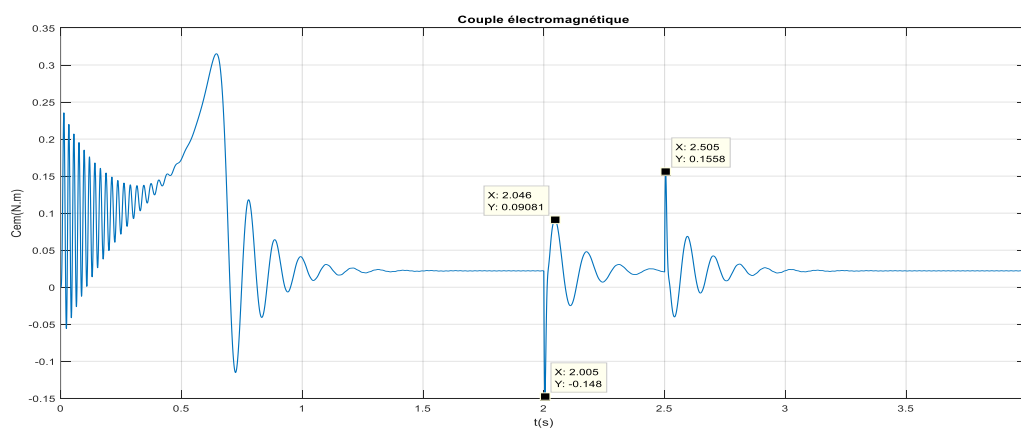


Figure 3 7 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A

Interprétation des résultats de la simulation

Les chute de tension dus à des défauts triphasés (creux type A) avec transformateur, présentent des chutes de tension de la même profondeur sur les trois phases sans déphasage supplémentaire (figure 3-5).

La (figure 3-6) montre la fluctuation de la vitesse de rotation du moteur lors d'une chute de tension, où la vitesse diminue au début de la chute (154.4 rad/s) , puis remonte au pic de vitesse rotation (158.9 rad/s) , puis fluctuer , à la fin de la chute, vous retournez en pic vitesse (158.5 rad/s), et puis retour à la stabilité.

Les influences de l'amplitude de la chute de tension et de la durée de la chute sur le moteur à induction sont illustrées à la (figure 3-7). Le pic de couple est le maximum de couple qui se produit en raison des creux de tension. Habituellement, cela s'est produit après que la chute de tension soit terminée (0.1558 N.m). Sur la (figure 3-7), le moteur a été soumis à des creux de tension de 20% dans la durée de chute égale à 0.5 s.

2-2 Chutes de tension asymétrique

2-2-1 Sans transformateur (Défaut de type "E")

Pour simuler la chute de tensions de type E, nous réduisons la valeur de l'amplitude de tension des deux phases de même valeur vaut (20 %).

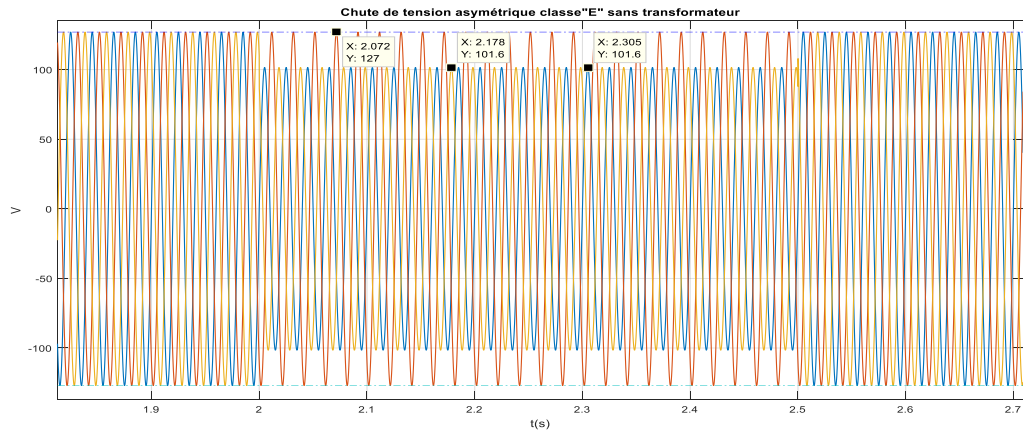


Figure 3 8 : Tension de source à leurs de chute de tension type E

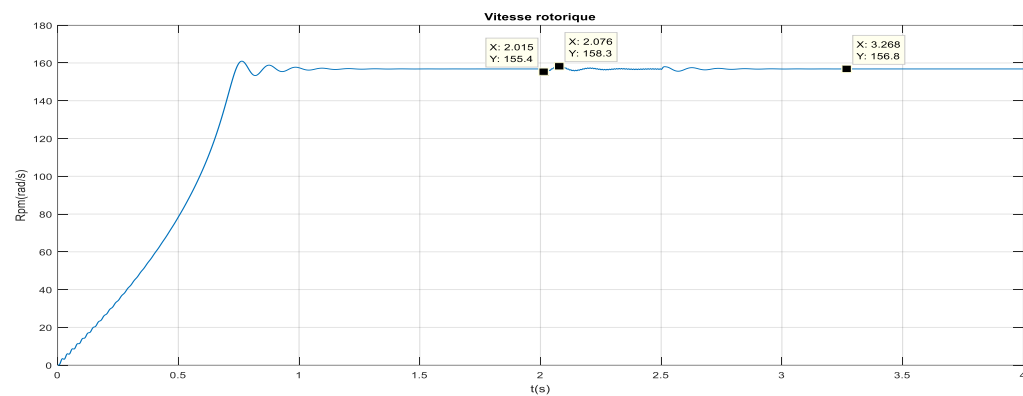


Figure 3 9 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type E

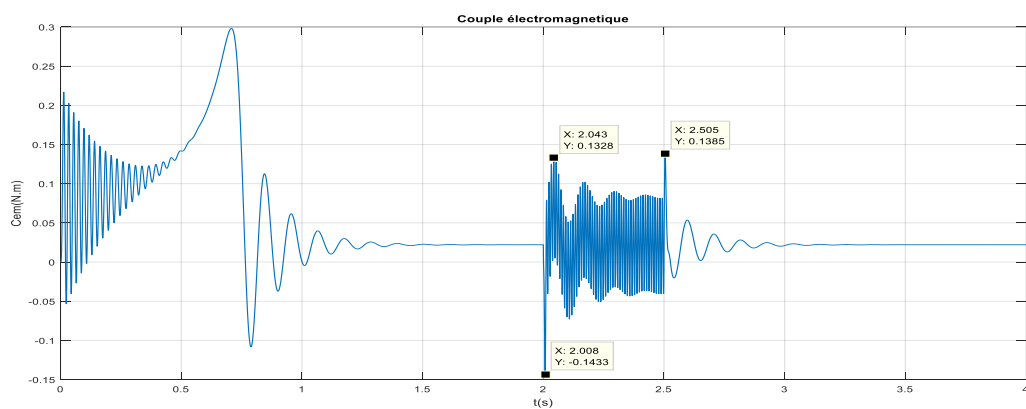


Figure 3 10 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type E

Interprétation des résultats de la simulation

les figure (3-8 , 3-9 ,3-10) la tension appliquée, le couple de charge et la vitesse de rotation pour le moteur à induction connecté à l'alimentation triphasée ayant un chute de tension type E pendant la durée constante (0.5 s). L'effet de la chute de tension est légèrement différent du type A où l'on observe à la figure (3-8) une diminution de la tension pour deux phases seulement. La troisième phase reste constante, en outre à la figure (3-9), au début de la chute, la vitesse diminue à 155,4 rad / s, puis pic jusqu'à 158.3 rad/ s, pour retomber au moment de la fin de la chute pour atteindre une valeur maximale, puis se stabiliser à la vitesse nominale.

Comme nous le remarquons sur la figure (3-10), une grande chute de la couple au début de la chute, puis augmente directement vers le pic, puis commence à fluctuer de manière significative jusqu'à la fin de la chute, puis augmenter à la valeur maximale.

2-2-2 Avec transformateur (Défaut de type "G")

Pour simuler la chute de tensions de type G, nous réduisons la valeur de l'amplitude de tension dans les deux phases avec des valeurs égales vaut (20 %). puis relions le transformateur à l'un des types Yy

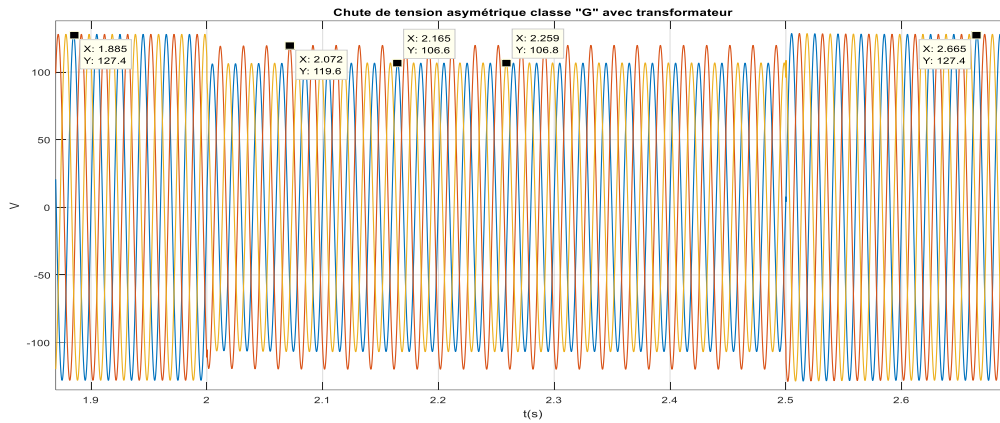


Figure 3 11 : Tension de source à leurs de chute de tension type G

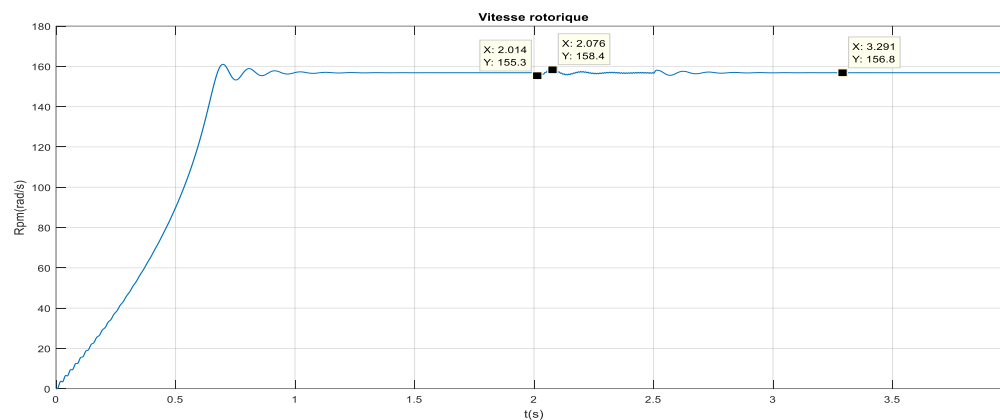


Figure 3 12 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type G

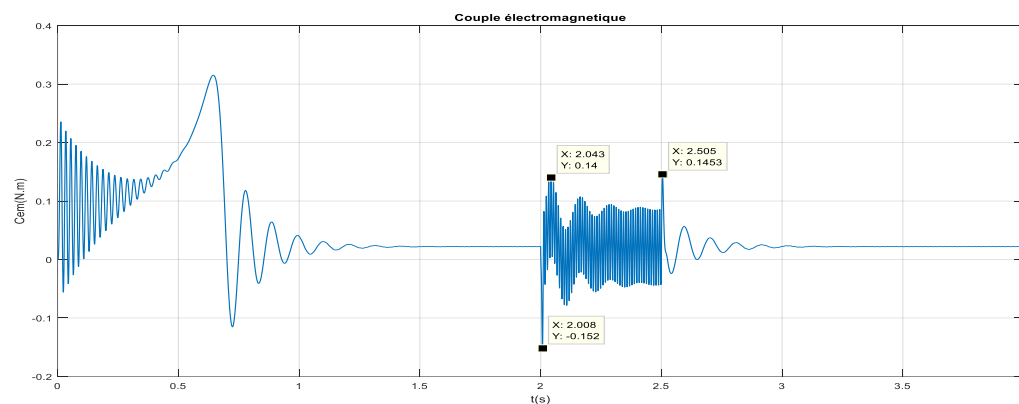


Figure 3 13 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type G

Interprétation des résultats de la simulation

Les creux de tension de type G sont dus à de la propagation d'un chute de tension type E à travers de transformateurs couplés en étoile/étoile, présentent des chutes de tension avec déphasages supplémentaires pour deux des phases et une faible baisse de tension pour la troisième phase figure (3-11).

En outre à la figure (3-12), au début de la chute, la vitesse diminue à 155,3 rad/s, puis pic jusqu'à 158.4 rad/ s, pour retomber au moment de la fin de la chute pour atteindre une valeur maximale, puis se stabiliser à la vitesse nominale.

Comme nous le remarquons sur la figure (3-13), une forte baisse de la couple au début de la chute de tension (-0.152 N.m), puis augmente directement vers le pic (0.14 N.m), puis commence à fluctuer de manière significative jusqu'à la fin de la chute, puis augmenter à la valeur maximale (0.145 N.m).

3- Etude pratique

3-1 Présentation :

Dans cette expérience, nous essayons de déterminer l'effet de l'impédance du transformateur sur le moteur asynchrone à cage d'écureuil lors de la chute de tension (symétrique et asymétrique).

Pour visualiser ces phénomènes, nous utiliserons les capteurs de courant, de tension et capteur de vitesse interfacé à l'oscilloscope Puis au logiciel Matlab pour ploter les caractéristiques de la machine (tension, vitesse, courant, ... Et puis une comparaison sera faite pour valider le modèle de simulation. Nous connectons le moteur à induction à une source d'alimentation triphasée directement ou à travers des résistances en série par Commutateur (Pour créer une chute de tension), ensuite, connectez-le au transformateur d'isolement, Et puis prenez les valeurs à traiter par le logiciel Matlab

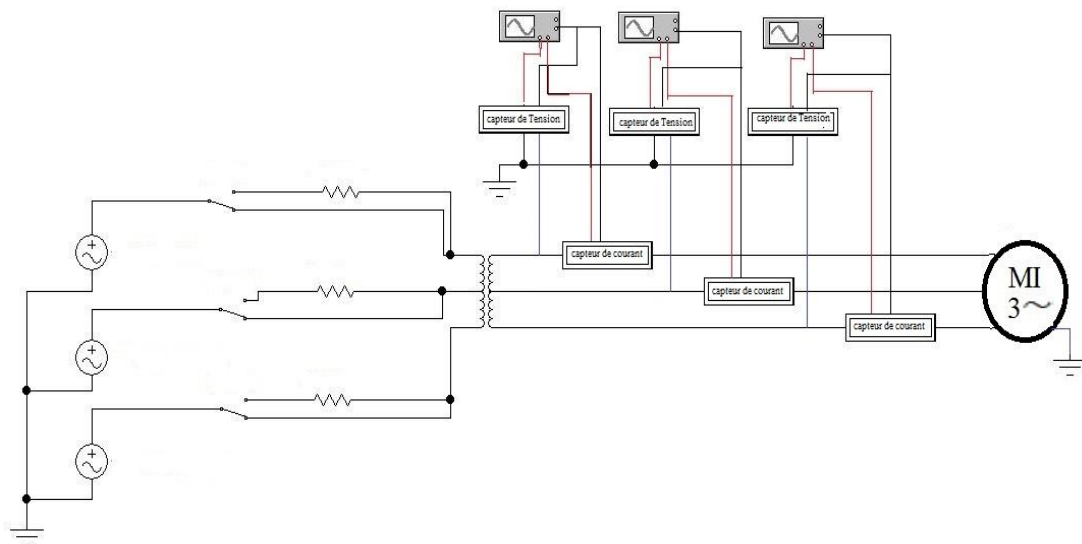


Figure 3 14 : Circuit de teste

3-2 Matérielles utilisées

Le banc d'essai qu'on a utilisé est équipé les matériels suivants :

Moteur à induction (Cage d'écureuil)

- Type : EM-3330-3C [1]
- Tension nominale : 220 Vac, 50/60 Hz
- Courant nominale : 1,4 A
- Vitesse nominale : 1670 tr / min (60 Hz) ; 1420 tr / min (50 Hz)
- Puissance nominale : 0.3 KW
- Facteur de puissance : 0,82



☒ **Source d'alimentation triphasée**

- Type : EM-3310-1E [1]
- Interrupteur de protection contre les surintensités / les fuites
- Boutons de démarrage et d'arrêt d'urgence
- Tension de fonctionnement : 3* 220 Vac, 50/60 Hz
- Puissance nominale : 3*220 Vac / 10 A
- Protection par fusible
- Indicateur de température



☒ **Commutateur inverseur**

- Type : EM-3310-2C [1]
- Charge de commutation : 400 Vac / 10 A
- Positions de commutation : FOR - STOP - REV



☒ **Transformateur d'isolement**

- Type : EM-3340-3B [1]
- Puissance nominale : 1.5 KVA
- Primaire : dépend de la tension de la ligne locale
- Secondaire : 3 220 Vac
- Fréquence : 50 / 60Hz



☒ **Unité de freinage à poudre magnétique équipé d'un capteur de vitesse et couple)**

- Type : EM-3320-1C [1]
- Alimentation : 110 / 220Vac
- frein à poudre magnétique de refroidissement par air forcé
- Couple de freinage : 0,999 kg-m (9,999 N-m) max.
- Détection de vitesse : Type photoélectrique, 60 impulsions / rév.
- Détection de couple : Transducteur de couple à jauge de contrainte, barre de torsion
- Détection de la température : Interrupteur thermique
- Unité de base : Intégrale, alliage d'aluminium
- Connexion au contrôleur via le câble dédié
- Ventilateur de refroidissement : 12Vdc / 0.29 A
- sorties CC analogiques :
- Une. Sortie de couple (1 V / 1 kg-m)
- Vitesse de sortie (1 V / 1000 tr / min)



☒ Capteurs de courant [2]

- courant Rms nominal primaire : $I_{pn} = 50A$
- plage de mesure du courant primaire : $I_{pn} = 0 \dots + - 70 A$
- R_m : mesure de la résistance
- I_{sn} : courant Rms nominal secondaire: 50 mA
- Ratio de conversion = 1: 1000
- Tension d'alimentation $U_c (+ - 5\%) = + - 12 \dots 15 V$



☒ Capteur de tension [2]

- courant Rms nominal primaire : $I_{pn} = 10mA$
- Plage de mesure du courant primaire : $I_{pn} = 0 \dots + 14 mA$
- R_m : mesure de la résistance
- I_{sn} : courant Rms nominal secondaire: 25 mA
- ration de conversion = 2500: 1000
- Tension d'alimentation $U_c (+ - 5\%) = + - 12 \dots 15 V$



☒ Oscilloscope de stockage

- Bande passante 25 MHz
- 2 canaux d'entrée
- Compteur de fréquence en temps réel à 6 chiffres
- 4 Ko de longueur de mémoire par canal
- Détection de crête aussi rapide que 10ns
- Sauvegarde / Rappel de 15 paramètres du panneau avant et formes d'onde
- Gamme de base de temps : 1nS ~ 10nS / div
- Port USB pour la connexion PC



☒ Système d'acquisition de données

Il se compose de deux circuits électriques : circuit de capteur de courant et de tension. Leur fonction est qu'ils adaptent les valeurs de tension et courant obtenus à des valeurs acceptables pour les cartes d'acquisitions de données.

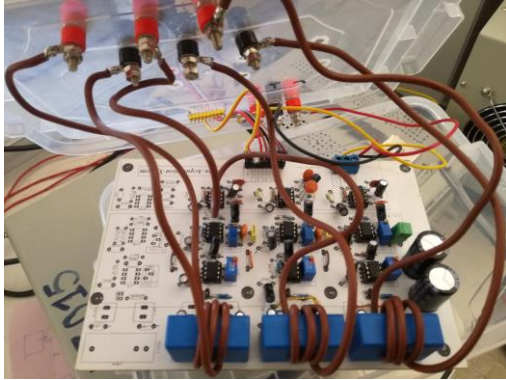


Figure 3 15 : Circuit de capteur de courant

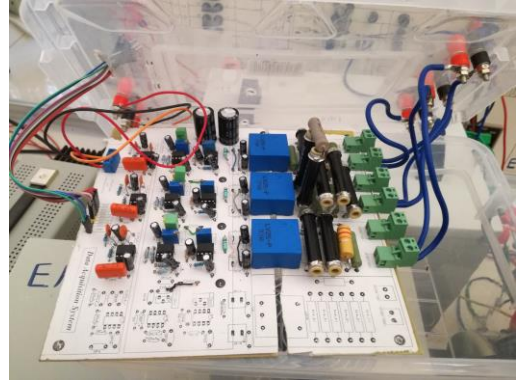


Figure 3 16 : Circuit de capteur de tension

3-3 Banc d'essai

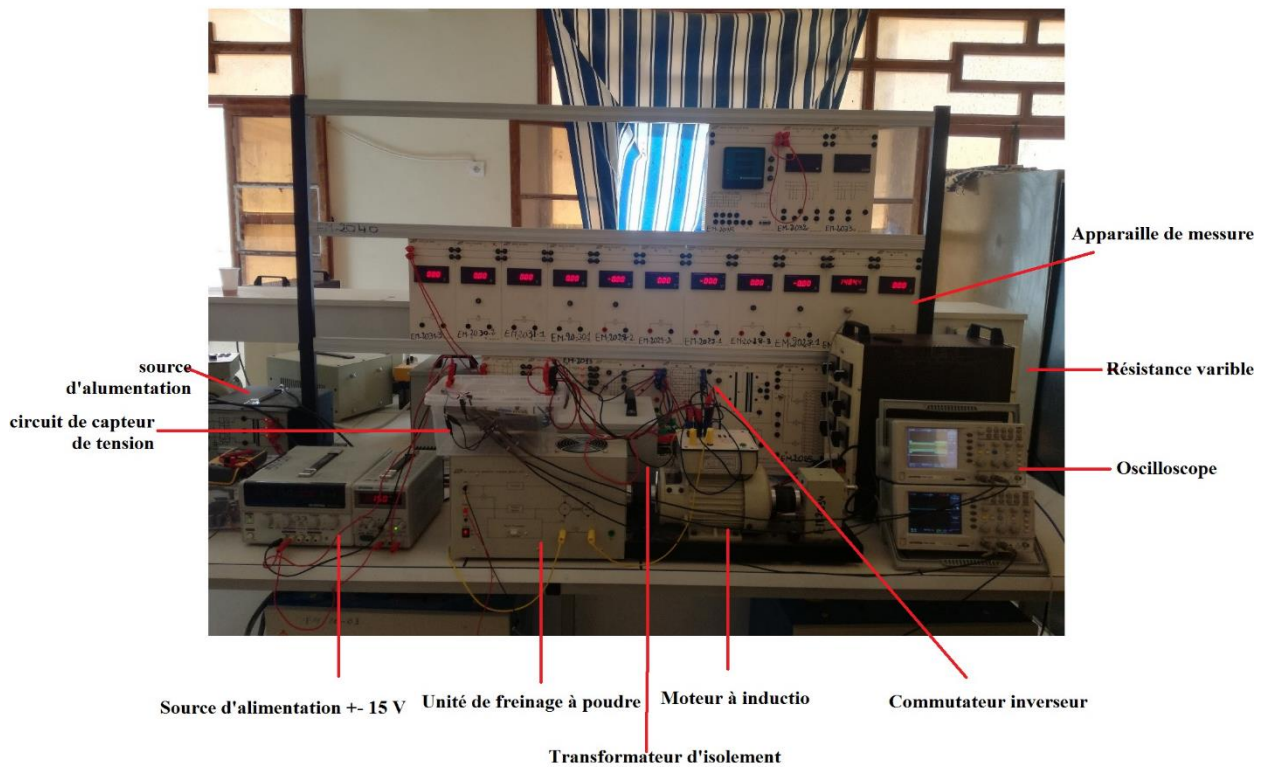


Figure 3 17 : Photographie prise lors de l'expérience de chute de tension

3-4 Les résultats expérimentaux

3-4-1 Chutes de tension symétrique (type "A")

3-4-1-1 Sans transformateur (Défaut de type « A »)

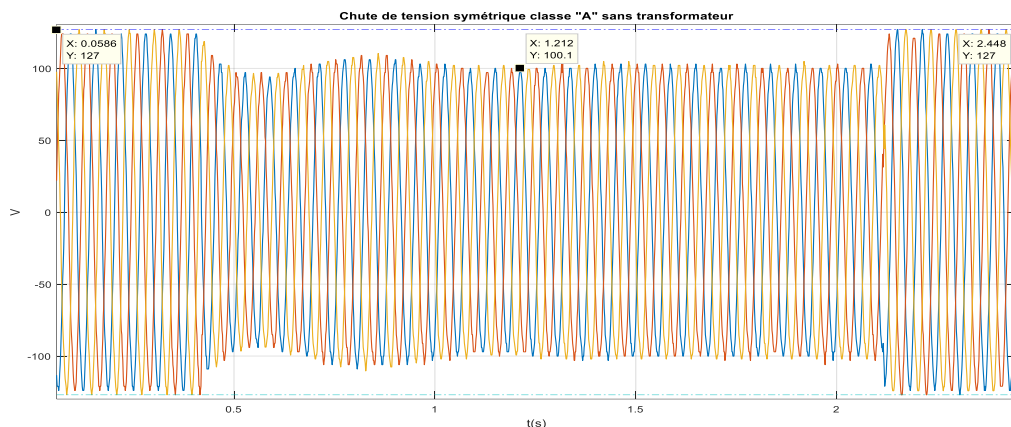


Figure 3 18 : Tension de source à leurs de chute de tension type A

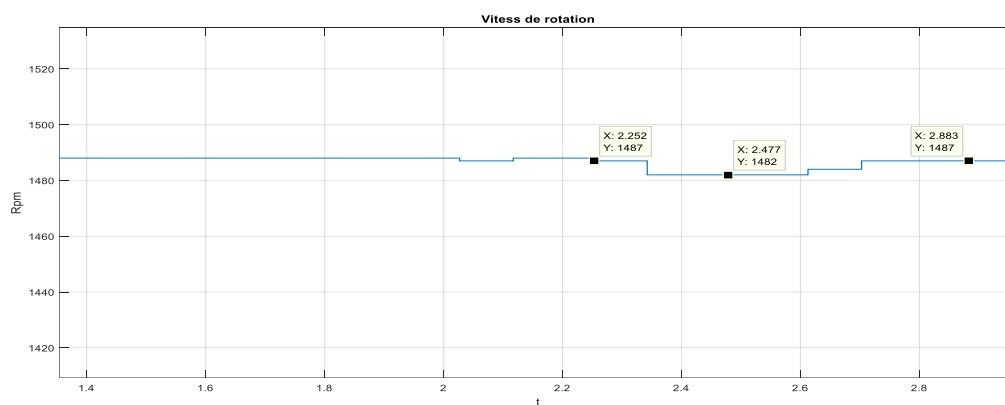


Figure 3 19 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A

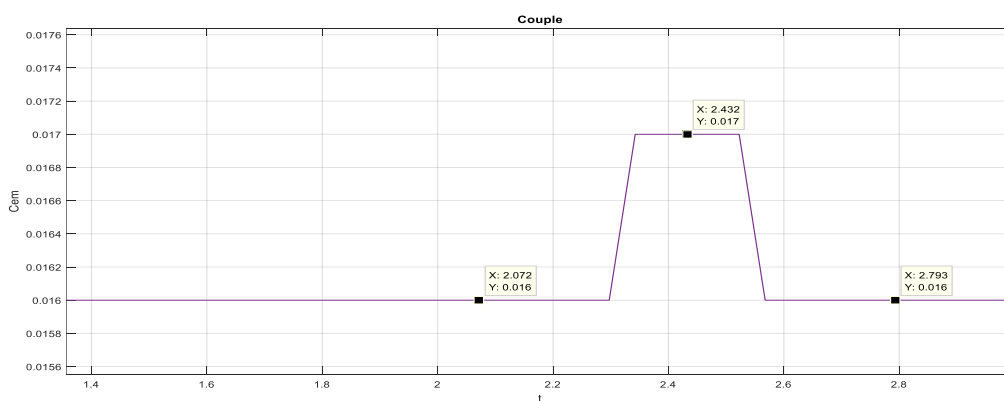


Figure 3 20 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A

Interprétation des résultats de la simulation

La chute de tension dans la figure (3-18) change en fonction de la variation de la durée de la baisse, où l'on remarque d'abord que le taux de chute dépasse 20% puis diminué à moins de 20% puis se stabilise à 20%.

Quant à la vitesse de rotation diminue au début de la chute (environ 5 cycles) pour continuer sur ce cas jusqu'à la fin de la chute.

Le couple est l'inverse de la vitesse de rotation, qui augmente au début de la chute et revient à sa valeur à la fin de la chute.

3-4-1-2 Avec transformateur (Défaut de type « A »)

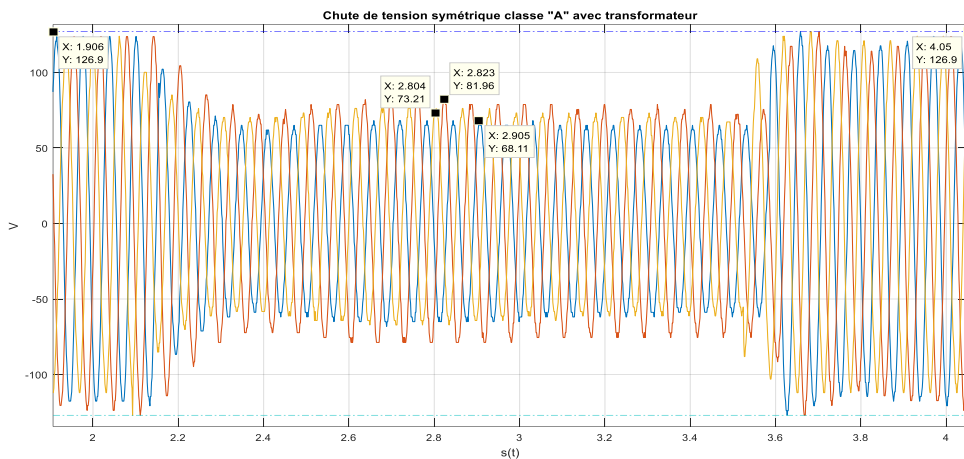


Figure 3 21 : Tension de source à leurs de chute de tension type A

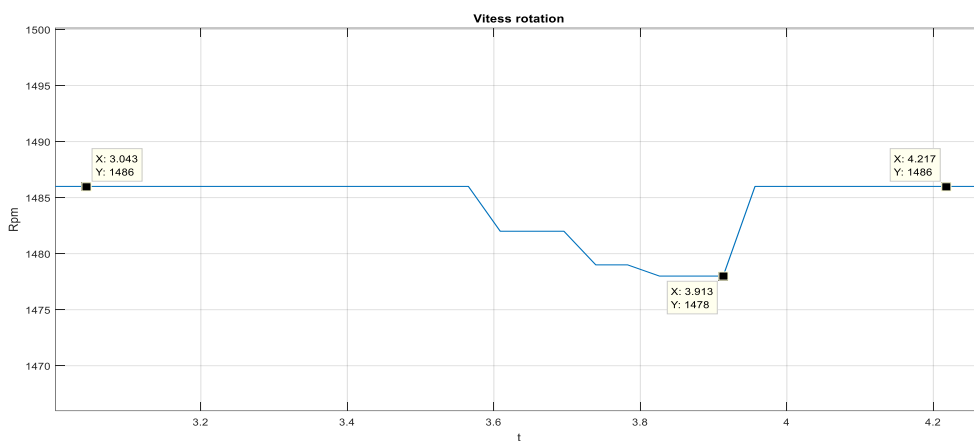


Figure 3 22 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type A

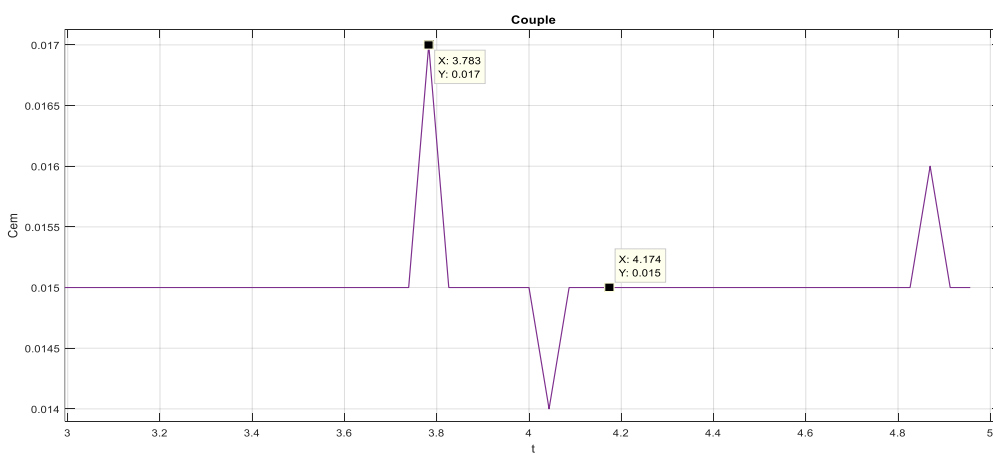


Figure 3 23 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type A

Interprétation des résultats de la simulation

A partir des figures obtenues à partir de l'expérience de la chute de tension de type A symétrique avec transformateur on note ce qui suit :

La figure (3-21) montre que la chute de tension est de l'ordre de 40%, en raison de notre incapacité à capter une chute de tension de 20%, Nous notons également de la chute des trois phases, mais dans des proportions inégales. et cela est dû à des troubles dans la source d'alimentation.

Nous notons également à figure (3-22) que la vitesse était inférieure que la diminution de l'expérience sans transformateur (environ 8 cycles).

Dans la figure (23), nous observons que le couple a atteint un pic au moment du la chute de tension.

3-4-2 Chutes de tension asymétrique

3-4-2-1 Sans transformateur (Défaut de type « E »)

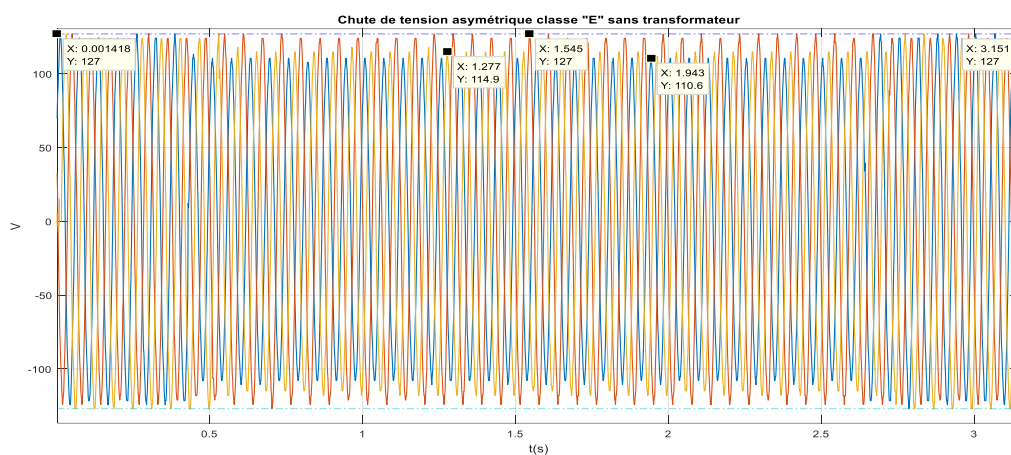


Figure 3 24 : Tension de source à leurs de chute de tension type E

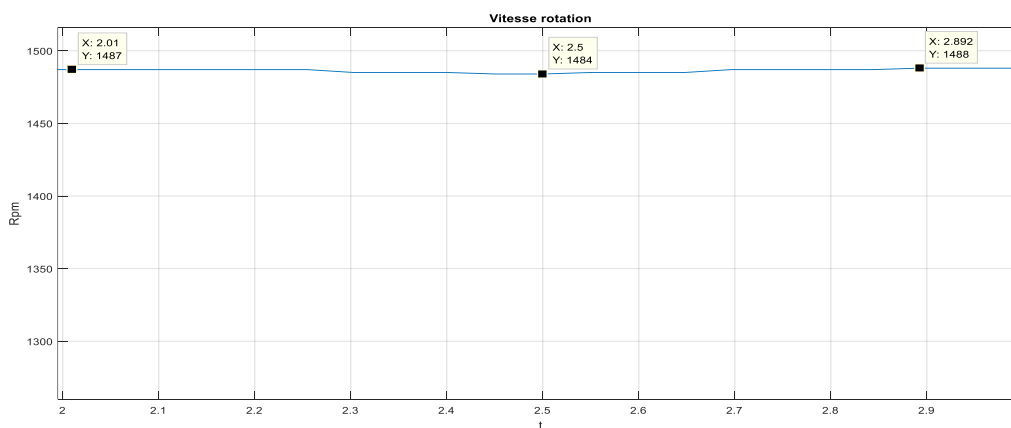


Figure 3 25 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type E

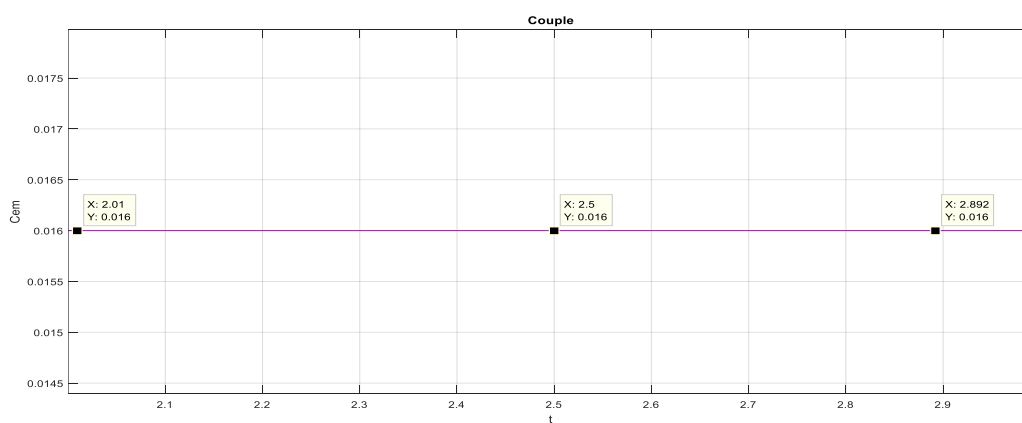


Figure 3 26 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type E

Interprétation des résultats de la simulation

Dans la figure (3-24) nous notons que la chute de tension était en deux phases seulement, mais à des degrés divers en raison de ce qui a été mentionné précédemment (déséquilibre de la source de nutrition), et qu'il y a un déphasage entre les deux phases Qui les a fait chute de tension.

Il est clair que ce type de chute de tension n'a pas affecté de manière significative la vitesse de rotation (Figure 3-25) Où Il n'a pas dépassé la baisse (3 cycles).

Le couple (figure 3-26) n'a pas montré de changement

3-4-2-2 Avec transformateur (Défaut de type « G »)

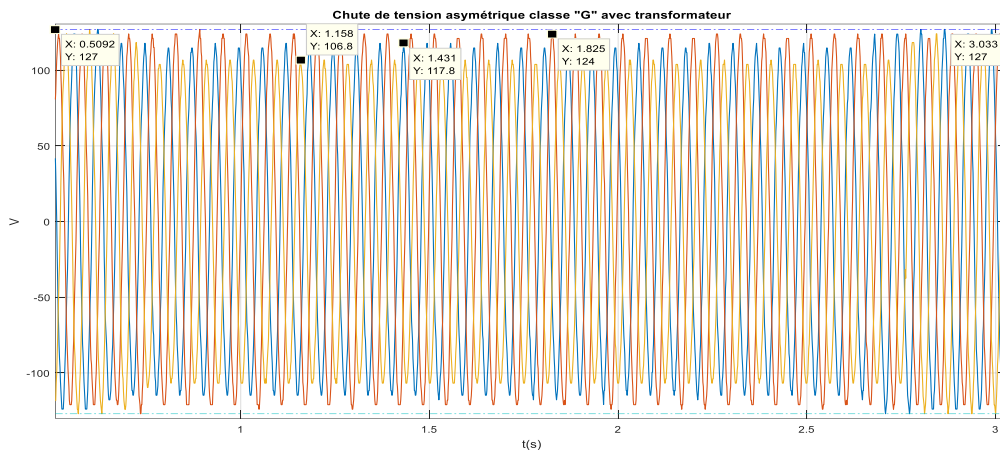


Figure 3 27 : Tension de source à leurs de chute de tension type G

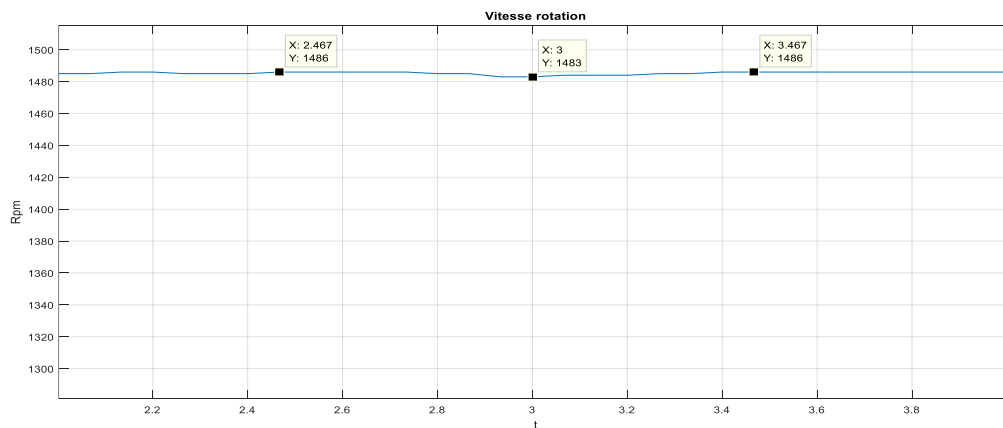


Figure 3 28 : Vitesse de rotation à leurs de chute de tension type G

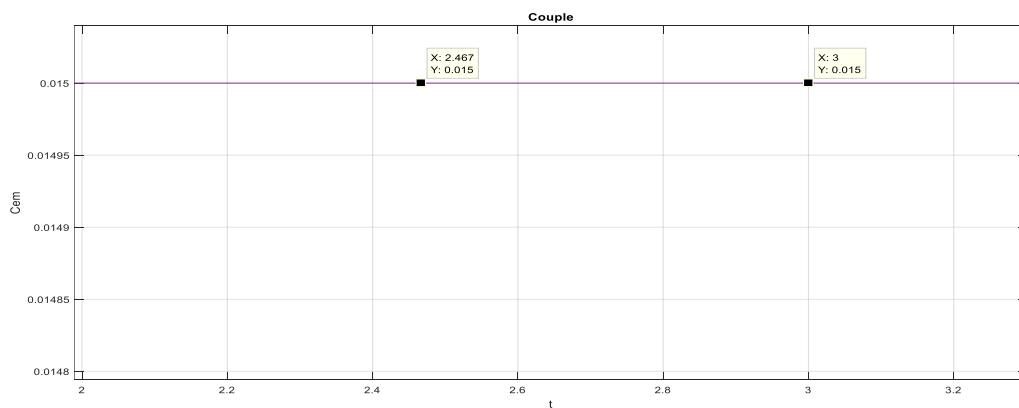


Figure 3 29 : Couple électromagnétique à leurs de chute de tension type G

Interprétation des résultats de la simulation

Une légère réduction du régime moteur (4 cycles) (figure 3-28)

Il n'y a pas de changement dans le couple moteur (figure (3-29)

3-5 Comparaison des résultats :

La chute de tension		Simulation			Expérimental		
		PH1(v)	Ph2(v)	Ph3(v)	Ph1(v)	Ph2(v)	Ph3(v)
Symétrique	Avec transformateur	102	102	102	73	82	68
	Sans transformateur	101	101	101	100	100	100
Asymétrique	Avec transformateur	106	106	119	106	117	124
	Sans transformateur	101	101	127	115	110	127

Tableau 3 1 : Comparaison des résultats des tensions

La chute de tension		Simulation		Expérimental	
		Rpm (Tr/min)	Cem (N.m)	Rpm (Tr/min)	Cem (N.m)
Symétrique	Avec transformateur	1476	0.09	1478	0.017
	Sans transformateur	1476	0.085	1482	0.017
Asymétrique	Avec transformateur	1483	0.14	1483	0.015
	Sans transformateur	1483	0.13	1484	0.016

Tableau 3 2 : Comparaison des résultats des vitesses rotation et couples électromagnétique

3-6 Interprétation globale des résultats

Les figures (3-18 à 3-20) montrent l'effet transitoire sur le comportement MI causé par une chute de tension symétrique. La figure (3-21 à 3-23) est différente lorsque l'impédance du transformateur est prise en compte lors des creux symétriques et asymétriques. Lorsque la chute de tension symétrique est appliqué à l'IM, les pics les plus sévères se produisent au début et à la fin de la chute de tension, parce que les creux symétriques n'ont pas de tension de séquence négative (N'a pas apparu en fait, mais est apparu dans les simulations Ceci est dû à la vitesse d'apparition et à l'incapacité de l'oscilloscope à capturer), donc la forme d'onde n'est pas oscillatoire. Lorsque l'impédance du transformateur est prise en compte, le couple et la vitesse ont un pic moins que lorsque l'impédance du transformateur n'est pas prise en compte.

Le comportement MI pendant les creux de tension asymétriques, types E et G, est représenté sur les Figure (3-24 à 3-29). Dans ces cas, le couple et la vitesse présentent une distorsion plus élevée, et leurs valeurs sont plus élevées par rapport à l'application d'une chute de tension symétrique. Une distorsion plus élevée est due au fait que la tension de séquence négative est appliquée à le moteur. En outre, une valeur plus élevée du couple et de la vitesse est due à la présence de l'impédance du transformateur lorsqu'il est connecté en série avec le moteur (apparaissent clairement dans la simulation). En comparant les affaiblissements symétriques et asymétriques de même profondeur et de même durée, on peut observer que les pics de couple peuvent être plus élevés.

La raison en est qu'ils ont la même séquence positive et la même tension de séquence négative.

Lorsque la machine n'est pas mise à la terre, les chutes de types E et G de même amplitude et de même durée ont des conséquences identiques puisqu'ils ont les mêmes tensions de séquence positives et négatives ils ne diffèrent que par la tension homopolaire.

Remarque :

Notez à partir des courbes de chaque type que la période de chute de tension n'est pas uniforme car nous avons fait l'expérience deux fois (faute de matériel nécessaire)

- Première expérience : capturer les changements de tension
- La deuxième expérience : pour capturer les changements de vitesse et de couple

3-7 Résumer les résultats

De l'étude expérimentale liée aux creux de tension, les conclusions suivantes peuvent être tirées

- ❖ Le régime transitoire dépend de nombreux éléments, tels que l'amplitude et la durée de la chute, les paramètres électriques du moteur, la charge et l'inertie mécanique. En fonction du type de défaut (symétrique ou asymétrique), les instants de la chute de tension et de rétablissement ont des effets différents sur les pics de couple.
- ❖ Quel que soit le type de chute de tension, les effets observés d'un creux de tension sur l'alimentation de la machine à induction sont des pertes de vitesse et des pics de couple.
- ❖ Le couple maximal en cas de chute de tension dépend presque linéairement de l'amplitude de la chute de tension.
- ❖ Le couple maximal au point de rétablissement de la tension dépend presque sinusoidalement de la durée.
- ❖ Le pic de couple positif et négatif se produit au début et à la fin de la chute de tension.
- ❖ Les effets de la chute de tension de type A montrent des oscillations initiales dans la chute de tension et les points de récupération, les pics de couple sont généralement obtenus dans le premier cycle après la chute ou les points de tension de récupération.
- ❖ Les transitoires des creux asymétriques sont très différents de ceux symétriques. Ils sont sensibles aux instants de tension de défaut et de rétablissement, ou aux angles de tension dans ces instants.
- ❖ Dans la chute tension type E et G, la vitesse et le couple transitoires montrent des oscillations non amorties en raison de la tension inverse.
- ❖ En comparant les creux symétriques et asymétriques avec la même profondeur et la même durée, on peut observer que les pics de couple peuvent être plus élevés au creux asymétriques.
- ❖ Les courants lors de chute de tension sur peuvent atteindre des niveaux supérieurs aux valeurs de démarrage direct et la durée de surintensité peut durer plus de deux fois la période de démarrage normale.
- ❖ Le couple électromagnétique généré par le moteur à induction est directement proportionnel au carré de la tension appliquée, d'où la chute de la tension peut affecter très gravement les performances du moteur à induction. Si l'amplitude de la chute de la tension est très élevée, il peut arrêter complètement le moteur ou un système composé de divers moteurs, et le redémarrage du système prendra beaucoup de temps.
- ❖ Le point d'amorçage de la chute de tension n'a aucun effet sur les pics de couple et les pics de perte de vitesse pour la creux type A

- ❖ chute de tension type « A » a l'effet le plus grave sur le moteur à induction parmi tous les types de creux.
- ❖ la chute de tension E et G ont leurs pics de couple maximum et minimum et les pointes de perte de vitesse pour l'angle d'amorçage de chute
- ❖ la chute de tension E et G ont les mêmes valeurs de pics de couple maximum et minimum, et les pics de perte de vitesse, mais à des angles différents.
- ❖ Le moteur ayant une puissance nominale plus élevée présente des pics de couple plus élevés que ceux du moteur à puissance nominale faible.
- ❖ Les moteurs à induction ont des valeurs plus élevées de pics de couple et de pics de perte de vitesse à pleine charge en comparaison de la condition du vide

4- Conclusion

Après avoir abordé dans le premier chapitre le problème de la chute des tensions et de leur impact sur les équipements industriels, notamment le moteur à induction, nous examinerons dans ce chapitre l'impact de la chute des tensions sur le moteur à induction expérimentalement. Nous avons reparti ce chapitre en deux parties :

- Partie théorique : nous simulons la chute de tension dans les deux types (symétrique et asymétrique) en utilisant les paramètres réels du moteur et du transformateur.
- Partie pratique : nous étudierons expérimentalement l'impact de la chute de tension sur le moteur à induction avec transformateur et sans transformateur et prendrons les mêmes types que nous étudierons dans le partie de simulation.

Enfin, nous comparons des résultats obtenus.

5- Référence

[1] Electrical machines système EM-300 Series (catalogue de matérielle).

[2] www.lem.com

Conclusion générale

Parmi les facteurs qui entravent le progrès de la production dans les établissements industriels, il y a le faible rendement du matériel usagé, et comme nous l'avons déjà parlé de lui, Comme nous l'avons déjà mentionné, le moteur à induction est l'un des équipements les plus importants utilisés dans le domaine industriel, S'il perd ses rendement ou cesse de travailler, l'employeur est exposé à une grande perte. D'où l'importance de notre sujet, qui est un diagnostic du défaut et de l'analyse et la connaissance de ses causes et essayer de trouver des solutions si possible.

Les défauts que nous avons essayé de diagnostiquer dans notre sujet étaient la chute de tension et ses effets négatifs sur le moteur à induction ainsi que l'impact de l'impédance de transformateur. Malgré le Manque d'équipement du laboratoire, nous avons pu, dans une certaine mesure, exploiter ce qui existe pour faire des expériences qui nous permettent d'identifier les effets secondaires de ce problème.

D'expériences théoriques et pratiques, nous avons vu l'effet de la chute de tension sur le moteur à induction, en particulier avec la présence d'un transformateur

Nous avons trouvé que même si le transformateur d'isolement est important pour protéger les installations contre les risques externes, toutefois, dans le cas d'une chute de la tension affecter négativement le moteur à induction.