



FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme  
de  
**MASTER**

*Option : Electromécanique*

***Etude des diverses configurations des transformateurs  
triphases et calcul des courants magnétisants***

Proposé et dirigé par :

✧ M<sup>r</sup> : **CHOUCHOU Abdelmadjid.**

Présenté par :

✧ **BETTACHE Fahima**

Mémoire soutenu, Devant le jury composé de

|                                       |           |              |
|---------------------------------------|-----------|--------------|
| ➤ M <sup>r</sup> Belhamdi Saad        | Président | Univ. M'sila |
| ➤ M <sup>r</sup> Rouabhi Riadh        | Examineur | Univ. M'sila |
| ➤ M <sup>r</sup> Chouchou Abdelmadjid | Encadreur | Univ. M'sila |

# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

- ❧ A la lumière de ma vie, mes chers parents, Ma mère "Zouhra" la source de la tendresse, et mon père "Saad", qui m'encourage dans les instants délicats, Et j'espère que Dieu les bénira avec la santé et le bien-être, Et Si Dieu le veut, je serai la source de leur fierté.*
- ❧ A ma très cher sœur "Yamina" et sa petite famille, surtout son jeune fils le bien-aimé sur mon cœur "Islem".*
- ❧ A mes deux chères frères "Tayeb" et "Elbachir".*
- ❧ A mon encadreur Mr "Abd elmadjid CHOUCHOU".*
- ❧ A tous les professeurs qui m'ont enseigné.*
- ❧ A tous les deux familles "BETTACHE" et "HAFID"*



## Remerciements

Louange à ALLAH qui m'a permis de travailler sur ce projet et m'a donné la capacité et la volonté de terminer ce travail. J'espère qu'elle sera utile à tous ceux qui le liron.

Je remercie particulièrement mes parents qui ont veillé à ce que j'aie atteint ce jour et j'espère que leur désir de voir mon succès et mes progrès se réalisera.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon encadreur Dr : "CHOUCHOU Abdelmadjid" merci beaucoup d'avoir abordé ce sujet .C'était mon honneur de travailler sous ton encadrement.Merci pour tes idées scientifiques et tes conseils avisés sur un grand nombre de sujet. J'ai beaucoup appris de ta vision, et ton idées qui sont toujours appropriées et compréhensibles, Au même temps merci beaucoup beaucoup pour ta patience. À cet égard, je tiens à vous remercier pour m'a enseigner au cours des années dernières. Tout mon temps avec toi ont été très enrichissantes et votre culture scientifique et votre pédagogie seront un modèle pour moi.

Je salue la sollicitude dont ma famille, en particulier mon cher frère "Teyab", qui m'a soutenu moralement et m'a motivé d'attention pour que je puisse avancer dans mon travail.

Je voudrais signifier toute ma gratitude à Mr "ABDOU Abdelhak", Mr "Rouabhi Riadh" et "Charik Khaled", Je vous remercie pour votre aide, qui a facilité mon travail

Je remercie les membres du jury, d'avoir accepté de juger ce travail.Ou encore qui prirent le temps de relire mon travail, et d'y apporter leurs judicieuses corrections.

Un grand merci à toutes celles et ceux qui ont permis à cette thèse de s'accomplir, qui m'ont encouragé jusqu'au bout, Même avec un mot gentil.

Je tiens à remercier monsieur "Baadji Abdelkarim", monsieur "Djmiat Amar", et madam "Saadi Samira". Ce sont les personnes les plus influentes de ma vie. Merci pour le grand rôle que vous avez joué dans ma vie.

Et au final, je voudrais ajouter que mes années d'études dans cette spécialisation m'ont permis de rencontrer de nombreuses personnes qui m'ont apporté une expérience de vie, en particulier mes professeurs, et je les remercie de m'avoir enseigné, en particulier les professeurs de génie électrique.

*{Merci d'égayer mon quotidien}*

## Résumé

Les transformateurs sont des dispositifs qui transfèrent l'énergie d'un circuit à un autre au moyen d'un champ magnétique commun. L'étude du schéma équivalent du transformateur montre que le courant magnétisant c'est le courant qu'excite le circuit magnétique, donc il représente la composante réactive du courant à vide.

Notre travail présente un outil original théorique et expérimental sur les mécanismes magnétiques des transformateurs triphasé, ainsi que sur les méthodes de modélisation de ce dernier. Par conséquent, nous avons organisé cette recherche en quatre chapitres, qui sont :

Le premier chapitre, nous n'avons pas réduit les informations disponibles et certains détails sur un transformateur particulier utilisé pour rechercher des similitudes dans le système développé. Nous avons expliqué les systèmes triphasés équilibrés.

Le deuxième chapitre présente le système triphasé déséquilibré et la méthode de détermination des composants symétriques, nous avons étudié la fonction d'un transformateur triphasé en régime déséquilibré.

En ce qui concerne la partie réservée au troisième chapitre, ou on étudie analytiquement le courant magnétisant d'un transformateur triphasé, on utilise le transformateur triphasé «KARCAGI ALT.TECHNIKA» avec la configuration «Dy».

En fin le quatrième chapitre ; est une étude expérimentale et numérique sur le transformateur choisit pour la réalisation de ce travail.

### Mots clés :

Le transformateur triphasé, étude analytique, courant magnétisant, schéma équivalent, configuration triphasé.

## Abstract

Transformers are devices that transfer energy from one circuit to another by means of a common magnetic field. The study of the equivalent schema of the transformer shows that the magnetizing current is the current that excites the magnetic circuit; therefore, it is the reactive component of the no-load current.

Our work presents an original theoretical and experimental tool on the magnetic mechanisms of three-phase transformers, as well as on the modeling methods of the latter. Therefore, we organized this research in four chapters, which are:

In the first chapter, we unrolled an available information and some details on a particular transformer which was used to search any similarities within the developed system. In addition, we have explained the three phase systems for the balanced regime.

The second chapter presents the unbalanced three-phase system, the method of determining symmetrical components allowing a general approach of all three-phase systems. In addition, we have studied the function of a three-phase transformer in the unbalanced regime.

Then, the third chapter is an analytical study of the magnetizing current of the three-phase transformer «KARCAGI ALT. TECHNIKA» with the configuration «Dy».

At the end, we have the fourth chapter, which is an experimental and numerical study on the transformer used in our work.

### **Keywords:**

The transformer three phases, Analytical study, magnetizing current, equivalent schema, three-phase configuration.

## Tables des matières

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| DÉDICACE.....                                              | II   |
| REMERCIEMENTS.....                                         | III  |
| RESUME .....                                               | IV   |
| ABSTRACT .....                                             | V    |
| TABLES DES MATIERES .....                                  | VI   |
| LISTE DES FIGURES.....                                     | IX   |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                   | XII  |
| LISTE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS .....                 | XIII |
| INTRODUCTION GENERALE.....                                 | 2    |
| CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES TRANSFORMATEURS.....    | 6    |
| I.1    INTRODUCTION .....                                  | 6    |
| I.2    HISTORIQUE .....                                    | 6    |
| I.3    DEFINITION DU TRANSFORMATEUR .....                  | 8    |
| I.4    LES TYPES DU TRANSFORMATEUR .....                   | 8    |
| I.4.1    Transformateur à colonnes .....                   | 9    |
| I.4.2    Transformateur cuirassé .....                     | 9    |
| I.4.3    Transformateur en "double T" .....                | 10   |
| I.5    L'UTILISATION DES TRANSFORMATEURS .....             | 10   |
| I.5.1    Le transformateur dans Le réseau électrique ..... | 10   |
| I.5.1.1    La production d'électricité .....               | 11   |
| I.5.1.2    Le transport d'énergie électrique : .....       | 12   |
| I.5.1.3    La distribution électrique : .....              | 12   |
| I.5.2    Les applications industrielles : .....            | 13   |
| I.5.2.1    Transformateurs de sous-station : .....         | 13   |
| I.5.2.2    Transformateurs de four : .....                 | 13   |
| I.5.2.3    Transformateurs embarqués : .....               | 14   |
| I.6    TRANSFORMATEURS SPECIAUX : .....                    | 14   |
| I.6.1    Autotransformateur : .....                        | 14   |
| I.6.2    Transformateur de tension (TT) : .....            | 15   |
| I.6.3    Transformateurs de courant (TI) : .....           | 16   |
| I.7    LE TRANSFORMATEUR MONOPHASE : .....                 | 16   |
| I.7.1    Symboles et convention des points : .....         | 16   |
| I.7.2    Principe du fonctionnement : .....                | 17   |
| I.7.2.1    Les équations magnétiques : .....               | 18   |
| I.7.2.2    Equation électrique : .....                     | 18   |
| I.7.2.3    Equation des Ampères-tours : .....              | 19   |
| I.7.3    Schéma équivalent : .....                         | 19   |
| I.8    LE TRANSFORMATEUR TRIPHASE : .....                  | 23   |

|                                                                    |                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I.8.1                                                              | Principes éléments de constitution :                                           | 23        |
| I.8.1.1                                                            | Un circuit magnétique fermé :                                                  | 23        |
| I.8.1.2                                                            | Les enroulements (bobines) :                                                   | 24        |
| I.8.2                                                              | Caractéristiques d'un transformateur triphasé :                                | 25        |
| I.8.2.1                                                            | Les tensions :                                                                 | 26        |
| I.8.2.2                                                            | La puissance assignée :                                                        | 26        |
| I.8.2.3                                                            | L'intensité assignée :                                                         | 26        |
| I.8.2.4                                                            | Le rapport de transformation triphasé :                                        | 26        |
| I.8.2.5                                                            | Le couplage des enroulements :                                                 | 27        |
| I.8.2.6                                                            | L'indice horaire :                                                             | 28        |
| I.9                                                                | LE SYSTEME TRIPHASÉ :                                                          | 30        |
| I.9.1                                                              | Systèmes triphasés équilibrés :                                                | 30        |
| I.9.1.1                                                            | Equations de F.m.m :                                                           | 31        |
| I.9.1.2                                                            | Equations des tensions :                                                       | 32        |
| I.9.2                                                              | Le fonctionnement d'un transformateur triphasé en régime équilibré :           | 32        |
| I.10                                                               | CONCLUSION :                                                                   | 33        |
| <b>CHAPITRE II. LE SYSTEME TRIPHASÉ DESEQUILIBRE</b>               |                                                                                | <b>35</b> |
| II.1                                                               | INTRODUCTION :                                                                 | 35        |
| II.2                                                               | PRESENTATION DU SYSTEME TRIPHASÉ DESEQUILIBRE :                                | 35        |
| II.2.1                                                             | Les composants symétriques :                                                   | 35        |
| II.2.2                                                             | L'opérateur « a » :                                                            | 36        |
| II.2.3                                                             | Le système triphasé déséquilibré et la transformation de Fortescue :           | 37        |
| II.3                                                               | DETERMINATION DES COMPOSANTS SYMETRIQUES :                                     | 39        |
| II.3.1                                                             | La détermination directe des composants symétrique :                           | 39        |
| II.3.2                                                             | Méthodes simplifiées pour la détermination des composantes :                   | 41        |
| II.4                                                               | COMPOSANTS SYMETRIQUES DES GRANDEURS TRIPHASÉES :                              | 44        |
| II.4.1                                                             | Relation entre les composants des tensions simples et des tensions composées : | 44        |
| II.4.2                                                             | Relation entre les courants de ligne et les courants de phases :               | 46        |
| II.4.3                                                             | Puissance électrique et composantes symétriques :                              | 47        |
| II.5                                                               | L'ÉTUDE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ EN RÉGIME DESEQUILIBRE :                  | 48        |
| II.5.1                                                             | Le schéma équivalent par phase pour le système homopolaire :                   | 49        |
| II.5.1.1                                                           | L'influence du couplage des primaires et secondaires :                         | 49        |
| II.5.1.2                                                           | L'influence du circuit magnétique :                                            | 51        |
| II.5.1.3                                                           | Présentation du schéma équivalent par phase :                                  | 52        |
| II.5.2                                                             | Le schéma équivalent par phase pour le système direct :                        | 54        |
| II.5.3                                                             | Le schéma équivalent par phase pour le système inverse :                       | 55        |
| II.6                                                               | CONCLUSION :                                                                   | 57        |
| <b>CHAPITRE III : ÉTUDE ANALYTIQUE SUR LE COURANT MAGNÉTISANTS</b> |                                                                                | <b>59</b> |
| III.1                                                              | INTRODUCTION :                                                                 | 59        |
| III.2                                                              | DESCRIPTION DU TRANSFORMATEUR « KARCAGI ALT. TECHNIKA » 1kVA :                 | 59        |
| III.2.1                                                            | Les Dimensions réelles des enroulements :                                      | 60        |
| ➤                                                                  | Section de la colonne :                                                        | 62        |
| ➤                                                                  | Nombre de spires d'enroulement secondaire :                                    | 62        |
| ➤                                                                  | Nombre des spires d'enroulement primaire :                                     | 62        |
| III.2.2                                                            | Les Dimensions réelles du noyau :                                              | 63        |
| III.2.3                                                            | Calcul de la puissance triphasée :                                             | 64        |
| III.3                                                              | LA DISTRIBUTION DU CHAMP MAGNÉTIQUE :                                          | 65        |
| III.4                                                              | LE COURANT MAGNÉTISANT :                                                       | 66        |
| III.4.1                                                            | Méthode générale de la détermination de courant magnétisant :                  | 67        |

|                                                                             |                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.4.2                                                                     | La courbe d'aimantation : .....                                                             | 68        |
| III.4.3                                                                     | Détermination des courbes d'aimantation du transformateur Dy : .....                        | 69        |
| III.4.3.1                                                                   | Détermination de la courbe d'aimantation des colonnes externes : .....                      | 70        |
| III.4.3.2                                                                   | Détermination de la courbe d'aimantation de la colonne centrale : .....                     | 70        |
| III.4.4                                                                     | Détermination analytique des courants magnétisants monophasés du transformateur Dy1 : ..... | 71        |
| III.4.4.1                                                                   | Le courant magnétisant des branches externes : .....                                        | 71        |
| III.4.4.2                                                                   | Le courant magnétisant de la branche central : .....                                        | 73        |
| III.4.5                                                                     | Détermination analytique des courants magnétisants triphasés du transformateur Dy1 : .....  | 73        |
| III.4.5.1                                                                   | Le courants magnétisants vus du côté y d'un transformateur Dy sans neutre : .....           | 73        |
| III.4.5.2                                                                   | Les courants magnétisants vus du côté D d'un transformateur Dy : .....                      | 75        |
| III.5                                                                       | CONCLUSION : .....                                                                          | 76        |
| <b>CHAPITRE IV : L'ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE D'UN TRANSFORMATEUR</b> |                                                                                             |           |
| <b>TRIPHASE .....</b>                                                       |                                                                                             | <b>78</b> |
| IV.1                                                                        | INTRODUCTION : .....                                                                        | 78        |
| IV.2                                                                        | DESCRIPTION DU MATERIEL DE L'EXPERIENCE : .....                                             | 78        |
| IV.3                                                                        | IDENTIFICATION ET MODELISATION DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE : .....                           | 80        |
| IV.3.1                                                                      | Essai à vide : .....                                                                        | 80        |
| IV.3.2                                                                      | L'essai en court-circuit : .....                                                            | 83        |
| IV.4                                                                        | SIMULATION DU TRANSFORMATEUR PAR MATLAB : .....                                             | 86        |
| IV.4.1                                                                      | Essai à vide : .....                                                                        | 86        |
| IV.4.2                                                                      | Essai en court-circuit : .....                                                              | 87        |
| IV.5                                                                        | CONCLUSION : .....                                                                          | 89        |
| <b>CONCLUSION GENERAL .....</b>                                             |                                                                                             | <b>91</b> |
| <b>LES REFERENCES.....</b>                                                  |                                                                                             | <b>94</b> |

# Liste des figures

## Chapitre I :

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (I-1) :</b> Les deux modèles de transformateur inventé par "Gaulard" .....                        | 7  |
| <b>Figure (I-2) :</b> Le premier modèle pratique d'un transformateur de "W. Stanley" en 1885.....           | 7  |
| <b>Figure (I-3) :</b> Transformateur triphasé 250 MVA, 735 kV d 'Hydro-Québec.....                          | 8  |
| <b>Figure (I-4) :</b> Transformateur monophasé.....                                                         | 8  |
| <b>Figure (I-5) :</b> Transformateur triphasé .....                                                         | 8  |
| <b>Figure (I-6) :</b> Transformateur à colonnes.....                                                        | 9  |
| <b>Figure (I-7) :</b> Transformateur cuirassé .....                                                         | 9  |
| <b>Figure (I-8) :</b> Transformateur Tt11 (Marcus Transformer of Canada Ltd).....                           | 10 |
| <b>Figure (I-9) :</b> Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique.....                        | 11 |
| <b>Figure (I-10) :</b> Transformateur élévateur de sortie de centrale électrique .....                      | 11 |
| <b>Figure (I-11) :</b> Transformateur d'interconnexion de réseau .....                                      | 12 |
| <b>Figure (I-13) :</b> Poste de distribution.....                                                           | 13 |
| <b>Figure (I-12) :</b> Poste de distribution sur poteaux .....                                              | 13 |
| <b>Figure (I-14) :</b> L'installation d'électrometallurgie : four alimenté en courant continu.....          | 13 |
| <b>Figure (I-15) :</b> Transformateur de TGV – Photo : SNCF .....                                           | 14 |
| <b>Figure (I-16) :</b> Autotransformateur .....                                                             | 14 |
| <b>Figure (I-17) :</b> L'autotransformateur variable.....                                                   | 15 |
| <b>Figure (I-18) :</b> Transformateur de tension .....                                                      | 15 |
| <b>Figure (I-19) :</b> Transformateur de courant .....                                                      | 16 |
| <b>Figure (I-20) :</b> Symboles et convention du transformateur idéal. ....                                 | 17 |
| <b>Figure (I-21) :</b> Fonctionnement d'un transformateur.....                                              | 17 |
| <b>Figure (I-22) :</b> Le schéma équivalent d'un transformateur .....                                       | 19 |
| <b>Figure (I-23) :</b> Le schéma équivalent en T ramené au primaire.....                                    | 20 |
| <b>Figure (I-24) :</b> Le schéma équivalent en T ramené au secondaire .....                                 | 21 |
| <b>Figure (I-25) :</b> Le schéma équivalent en $\Gamma$ ramené au primaire .....                            | 22 |
| <b>Figure (I-26) :</b> Le schéma équivalent en $\Gamma$ ramené au secondaire.....                           | 22 |
| <b>Figure (I-27) :</b> Principes éléments d'un transformateur.....                                          | 23 |
| <b>Figure (I-28) :</b> Le circuit magnétique d'un transformateur triphasé .....                             | 24 |
| <b>Figure (I-29) :</b> Deux technologies du circuit magnétique.....                                         | 24 |
| <b>Figure (I-30) :</b> Les enroulements de transformateur .....                                             | 25 |
| <b>Figure (I-31) :</b> La plaque signalétique d'un transformateur.....                                      | 25 |
| <b>Figure (I-32) :</b> Les trois différents types des couplages.....                                        | 27 |
| <b>Figure (I-33) :</b> L'indice horaire d'un transformateur $Dy_1$ .....                                    | 28 |
| <b>Figure (I-34) :</b> Le circuit magnétique d'un transformateur triphasé en régime équilibré.....          | 31 |
| <b>Figure (I-35) :</b> Le schéma équivalent du transformateur triphasé en régime sinusoïdal équilibré ..... | 33 |

## Chapitre II :

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (II-1) :</b> L'opérateur « a » .....                                                                                                      | 36 |
| <b>Figure (II-2) :</b> Les composantes symétriques .....                                                                                            | 38 |
| <b>Figure (II-3) :</b> Représentation vectoriel d'un système triphasé des courants .....                                                            | 39 |
| <b>Figure (II-4) :</b> Le système Homopolaire .....                                                                                                 | 39 |
| <b>Figure (II-5) :</b> Le système Direct .....                                                                                                      | 40 |
| <b>Figure (II-6) :</b> Le système Inverse .....                                                                                                     | 40 |
| <b>Figure (II-7) :</b> Le retour à partir des composants aux courants réels .....                                                                   | 40 |
| <b>Figure (II-8) .....</b>                                                                                                                          | 42 |
| <b>Figure (II-9) .....</b>                                                                                                                          | 43 |
| <b>Figure (II-10) :</b> Le couplage étoile pour un circuit triphasé .....                                                                           | 44 |
| <b>Figure (II-11) :</b> Le couplage triangle d'une charge triphasée .....                                                                           | 46 |
| <b>Figure (II-12) :</b> Un circuit magnétique triphasé possède cinq noyaux .....                                                                    | 52 |
| <b>Figure (II-13) :</b> Un circuit magnétique triphasé possède trois noyaux .....                                                                   | 52 |
| <b>Figure (II-14) :</b> Le transformateur étoile avec neutre – étoile avec neutre .....                                                             | 53 |
| <b>Figure (II-15) :</b> Le transformateur étoile avec neutre –étoile sans, ou le transformateur étoile avec neutre-zig-zag avec ou sans neutre..... | 53 |
| <b>Figure (II-16) :</b> Un transformateur étoile avec neutre – triangle .....                                                                       | 53 |
| <b>Figure (II-17) :</b> Un transformateur avec un primaire couplé en zig-zag avec neutre .....                                                      | 54 |
| <b>Figure (II-18) :</b> Le diagramme vectoriel du système direct d'un transformateur(Yd1).....                                                      | 54 |
| <b>Figure (II-19) :</b> Le schéma équivalent pour le système direct .....                                                                           | 54 |
| <b>Figure (II-20) :</b> Le diagramme vectoriel du système inverse d'un transformateur(Yd1) .....                                                    | 55 |
| <b>Figure (II-21) :</b> Le schéma équivalent par phase pour le système inverse .....                                                                | 55 |
| <b>Figure (II-22) :</b> Le diagramme vectoriel des systèmes directs et inverses du courant secondaire et primaire .....                             | 56 |

## Chapitre III :

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (III-1) :</b> Transformateur triphasé utilisé et sa plaque signalétique .....                                                              | 59 |
| <b>Figure (III-2) :</b> L'épaisseur du noyau .....                                                                                                   | 60 |
| <b>Figure (III-3) :</b> Dimensions de la section de colonne et d'une phase du transformateur .....                                                   | 60 |
| <b>Figure (III-4) :</b> Les caractéristiques géométriques du noyau.....                                                                              | 63 |
| <b>Figure (III-5) :</b> Courbe des pertes fer en fonction de l'induction maximale .....                                                              | 65 |
| <b>Figure (III-6) :</b> Réalisation d'une phase du transformateur par COMSOL .....                                                                   | 65 |
| <b>Figure (III-7) :</b> Directions des A.t des enroulements primaires et secondaire.....                                                             | 66 |
| <b>Figure (III-8) :</b> Champ magnétique d'une phase de transformateur .....                                                                         | 66 |
| <b>Figure (III-9) :</b> Le schéma équivalent du circuit magnétisant .....                                                                            | 66 |
| <b>Figure (III-10) :</b> Le diagramme vectoriel général de fonctionnement du circuit magnétisant .....                                               | 67 |
| <b>Figure (III-11) :</b> La constriction graphique de la courbe « i (t) » par les deux courbes « e (t) » et « Ø (t) » .....                          | 69 |
| <b>Figure (III-12) :</b> Configuration destinée à obtenir la courbe d'aimantation sur les colonnes externes et le schéma électrique équivalent ..... | 70 |
| <b>Figure (III-13) :</b> Circuit destiné à obtenir le courant magnétisant monophasé de la branche droite. ....                                       | 72 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (III-14) :</b> Circuit destiné à obtenir le courant magnétisant monophasé de la branche central. ....              | 73 |
| <b>Figure (III-15) :</b> Le circuit équivalent pour obtenir les courants magnétisants triphasés du côté secondaire (y). .... | 74 |
| <b>Figure (III-16) :</b> Le circuit équivalent pour obtenir les courants magnétisants triphasés du côté Delta. ....          | 76 |

#### **Chapitre IV :**

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure (IV-1) :</b> Mesure de la résistance et l'inductance d'enroulement primaire .....   | 79 |
| <b>Figure (IV-2) :</b> Mesure de la résistance et l'inductance d'enroulement secondaire ..... | 80 |
| <b>Figure (IV-3) :</b> Le schéma du montage de l'essai à vide .....                           | 80 |
| <b>Figure (IV-4) :</b> La réalisation du montage de l'essai à vide dans laboratoire .....     | 81 |
| <b>Figure (IV-5) :</b> Schéma du montage d'essai en court-circuit .....                       | 83 |
| <b>Figure (IV-6) :</b> La réalisation de l'essai en court-circuit dans laboratoire .....      | 84 |
| <b>Figure (IV-7) :</b> Schéma équivalent d'une phase de transformateur.....                   | 85 |
| <b>Figure (IV-8) :</b> Le schéma bloc de l'essai à vide.....                                  | 86 |
| <b>Figure (IV-9) :</b> Les courbes obtenues selon l'essai à vide.....                         | 87 |
| <b>Figure (IV-10) :</b> Le schéma bloc de l'essai en court-circuit.....                       | 88 |
| <b>Figure (IV-11) :</b> La courbe de ( $I_{2cc}$ ) .....                                      | 88 |
| <b>Figure (IV-12) :</b> Les courbes de ( $V_{1cc}$ ) et ( $I_{1cc}$ ).....                    | 88 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau (I-1) :</b> Les couplages et les caractéristiques des transformateurs triphasés.....                         | 30 |
| <b>Tableau (II-1) :</b> les trois systèmes équilibrés.....                                                              | 37 |
| <b>Tableau (II-2) :</b> les différents cas possibles du couplage d'un transformateur .....                              | 51 |
| <b>Tableau (III-1) :</b> Distance entre la colonne et l'enroulement secondaire en fonction de la tension nominale ..... | 61 |
| <b>Tableau (III-2) :</b> Largeur du canal de fuite principal en fonction de la tension nominale.....                    | 61 |
| <b>Tableau (III-3) :</b> le facteur k .....                                                                             | 62 |
| <b>Tableau (III-4) :</b> Caractéristiques géométriques du noyau du transformateur.....                                  | 63 |
| <b>Tableau (IV-1) :</b> Les appareils de mesure utilisés pour l'étude expérimentale.....                                | 79 |

## Liste des sigles et des abréviations

### A

$a$  : L'opérateur de rotation

### E

$E_2$  : La f.é.m. induit créées par la bobine primaire [V]  
 $E_2$  : La f.é.m. induit créées par la bobine secondaire [V]  
 $E'_1$  : La f.é.m. induit créées par la bobine primaire ramenée au secondaire [V]  
 $E'_2$  : La f.é.m. induit créées par la bobine secondaire ramenée au primaire [V]  
 $E_{1T}$  : La f.é.m. totale induit créées par la bobine primaire [V]  
 $E_{2T}$  : La f.é.m. totale induit créées par la bobine secondaire [V]  
 $E_A$  : La f.é.m. induit créées par la phase "A" au primaire [V]  
 $E_a$  : La f.é.m. induit créées par la phase "a" au secondaire [V]  
 $E_B$  : La f.é.m. induit créées par la phase "B" au primaire [V]  
 $E_b$  : La f.é.m. induit créées par la phase "b" au secondaire [V]  
 $E_C$  : La f.é.m. induit créées par la phase "C" au primaire [V]  
 $E_c$  : La f.é.m. induit créées par la phase "c" au secondaire [V]

### F

$|F|$  : La matrice de **Fortescue**  
 $f_p$  : Facteur de puissance

### I

$I_1$  : Le courant primaire [A]  
 $I'_1$  : Le courant primaire ramené au secondaire [A]  
 $I_{1v}$  : Le courant primaire à vide [A]  
 $I_{1va}$  : La composante active du courant primaire à vide [A]  
 $I_{1vr}$  : La composante réactive du courant primaire à vide [A]  
 $I_2$  : Le courant secondaire [A]  
 $I'_2$  : Le courant secondaire ramené au primaire [A]  
 $I_A$  : Le courant primaire de la phase "A" [A]  
 $I_a$  : Le courant secondaire de la phase "a" [A]  
 $I_B$  : Le courant primaire de la phase "B" [A]  
 $I_b$  : Le courant secondaire de la phase "b" [A]  
 $I_C$  : Le courant primaire de phase "C" [A]  
 $I_c$  : Le courant secondaire de la phase "c" [A]  
 $I_o$  : La composante homopolaire du courant [A]  
 $I_d$  : La composante directe du courant [A]  
 $I_i$  : La composante inverse du courant [A]

## J

|          |                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------|
| $j$      | : Le nombre complexe                                      |
| $J_{21}$ | : Le courant polygonal entre la phase 1 et la phase 2 [A] |
| $J_{31}$ | : Le courant polygonal entre la phase 1 et la phase 3 [A] |
| $J_{32}$ | : Le courant polygonal entre la phase 2 et la phase 3 [A] |

## K

|       |                                |
|-------|--------------------------------|
| $K_c$ | : Coefficient liée au couplage |
|-------|--------------------------------|

## L

|        |                                                  |
|--------|--------------------------------------------------|
| $l_1$  | : L'inductance primaire [H]                      |
| $l'_1$ | : L'inductance primaire ramené au secondaire [H] |
| $l_2$  | : L'inductance secondaire [H]                    |
| $l'_2$ | : L'inductance secondaire ramené au primaire [H] |
| $l_A$  | : L'inductance primaire de la phase "A" [H]      |
| $l_a$  | : L'inductance secondaire de la phase "a" [H]    |
| $l_B$  | : L'inductance primaire de la phase "B" [H]      |
| $l_b$  | : L'inductance secondaire de la phase "b" [H]    |
| $l_C$  | : L'inductance primaire de phase "C" [H]         |
| $l_c$  | : L'inductance secondaire de la phase "c" [H]    |

## M

|     |                                |
|-----|--------------------------------|
| $m$ | : Le rapport de transformation |
|-----|--------------------------------|

## N

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| $N$   | : Le neutre au primaire                         |
| $n$   | : Le neutre au secondaire                       |
| $N_1$ | : Le nombre des spires de la bobine primaire.   |
| $N_2$ | : Le nombre des spires de la bobine secondaire. |

## P

|     |                           |
|-----|---------------------------|
| $P$ | : La puissance active [W] |
|-----|---------------------------|

## Q

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| $Q$ | : La puissance réactive [VAR] |
|-----|-------------------------------|

## R

|                |                                                            |
|----------------|------------------------------------------------------------|
| $\mathfrak{R}$ | : La réluctance du circuit magnétique [ $\Omega$ ]         |
| $R_f$          | : La résistance de fuit [ $\Omega$ ]                       |
| $r_1$          | : La résistance primaire [ $\Omega$ ]                      |
| $r'_1$         | : La résistance primaire ramené au secondaire [ $\Omega$ ] |
| $r_2$          | : La résistance secondaire [ $\Omega$ ]                    |
| $r'_2$         | : La résistance secondaire ramené au primaire [ $\Omega$ ] |
| $r_A$          | : La résistance primaire de la phase "A" [ $\Omega$ ]      |
| $r_a$          | : La résistance secondaire de la phase "a" [ $\Omega$ ]    |
| $r_B$          | : La résistance primaire de la phase "B" [ $\Omega$ ]      |
| $r_b$          | : La résistance secondaire de la phase "b" [ $\Omega$ ]    |
| $r_C$          | : La résistance primaire de phase "C" [ $\Omega$ ]         |
| $r_c$          | : La résistance secondaire de la phase "c" [ $\Omega$ ]    |

## S

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| $S$ | : La puissance apparent [VA] |
|-----|------------------------------|

## U

|          |                                                          |
|----------|----------------------------------------------------------|
| $U_{21}$ | : La tension complexe entre la phase 1 et la phase 2 [V] |
| $U_{31}$ | : La tension complexe entre la phase 1 et la phase 3 [V] |

$U_{32}$  : La tension complexe entre la phase 2 et la phase 3 [V]

## V

$V_1$  : La tension primaire [V]

$V_1'$  : La tension primaire ramenée au secondaire [V]

$V_{1v}$  : La tension primaire à vide [A]

$V_2$  : La tension secondaire [V]

$V_2'$  : La tension secondaire ramenée au primaire [V]

$V_{2v}$  : La tension secondaire à vide [A]

$V_A$  : La tension primaire de la phase "A" [V]

$V_a$  : La tension secondaire de la phase "a" [V]

$V_B$  : La tension primaire de la phase "B" [V]

$V_b$  : La tension secondaire de la phase "b" [V]

$V_C$  : La tension primaire de phase "C" [V]

$V_c$  : La tension secondaire de la phase "c" [V]

$V_o$  : La composante homopolaire de la tension [V]

$V_d$  : La composante directe de la tension [V]

$V_i$  : La composante inverse du La tension [V]

## X

$X_m$  : La réactance magnétique [ $\Omega$ ]

$X_p$  : La réactance primaire [ $\Omega$ ]

$X_s$  : La réactance secondaire [ $\Omega$ ]

## Z

$Z_m$  : L'impédance magnétique [ $\Omega$ ]

## Ø

$\emptyset_1$  : Le flux vu par la bobine primaire [Wb]

$\emptyset_{1T}$  : Le flux vu par la bobine primaire [Wb]

$\emptyset_{f1}$  : Le flux de fuit vu par la bobine primaire [Wb]

$\emptyset_{f2}$  : Le flux de fuit vu par la bobine secondaire [Wb]

$\emptyset_2$  : Le flux vu par la bobine secondaire [Wb]

$\emptyset_{2T}$  : Le flux vu par la bobine secondaire [Wb]

$\emptyset_v$  : Le flux à vide [Wb]

## Ω

$\omega$  : Pulsation angulaire.



### Les abréviations :

|         |                                          |
|---------|------------------------------------------|
| TSA     | : Transformateur des services auxiliaire |
| TT      | : Transformateur de tension              |
| TI      | : Transformateur d'intensité             |
| TGV     | : train à grand vitesse                  |
| F.é.m.  | : Force électromotrice                   |
| Les A.t | : les ampères-tours                      |

# **Introduction**

## **générale**

## Introduction générale

Généralement un transformateur est une machine électrique statique à courant alternatif qui permet d'obtenir le changement de la valeur efficace de la tension ou du courant en gardant la même fréquence [1]. Il ayant au moins deux enroulements bobinés sur un même noyau magnétique. Les enroulements ainsi bobinés peuvent transférer l'énergie d'un enroulement à l'autre par l'entremise d'un flux magnétique commun, créé et partagé par les deux enroulements. Le nombre des enroulements permet de modifier la tension et le courant d'un enroulement à l'autre. [2]

Le transformateur fut inventé par "Lucien Gaulard" en 1882 sous le nom de "générateur secondaire". Le vocabulaire Electrotechnique international le définit comme :

"Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables, d'intensité et de tension généralement différentes, mais de même fréquence." [3]. Cet appareil électrique est très simple, mais il n'en constitue pas moins l'un des plus utiles. Le transformateur permet de modifier la tension et le courant dans un circuit. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons. L'étude du transformateur nous aidera également à comprendre le fonctionnement d'un grand nombre de machines telles que moteurs d'induction, alternateurs, Compensateurs Synchrones....etc, car ces machines utilisent aussi le principe de induction électromagnétique [4].

On peut classer les transformateurs selon deux aspects qu'ils sont indépendants l'un de l'autre, le premier c'est le milieu réfrigérant, et le deuxième c'est le type de construction. On a distingué deux types de milieu réfrigérant qu'ils sont l'air et l'huile. Aussi deux types de construction des transformateurs sont : L'un c'est le type à colonnes, L'autre c'est le type à cœur

Les transformateurs les plus couramment utilisés sont le transformateur monophasé et le transformateur triphasé. Ce dernier possède plusieurs configurations particulières pour l'étude comme la connexion  $Dy_1$ , la connexion en T et la connexion Scott.

La connexion  $Dy_1$  se bobine sur un noyau à trois colonnes, où une paire des bobines c'est-à-dire des bobines sur la colonne centrale, est partagée entre deux circuits magnétiques.

Les deux connexions Scott en T se bobinent sur deux noyaux distincts et possèdent donc deux circuits magnétiques séparés. En plus de la connexion Scott est utilisée pour une transformation de trois phases en deux phases.

Comme nous le savons déjà que le transformateur n'est pas un appareil parfait, c'est-à-dire pendant le transfert d'énergie il produit des pertes qui se traduisent soit de la chaleur ou de l'échauffement.

Ces pertes sont causées par deux effets sont :

- L'effet Joule dans les enroulements et le noyau (courant des enroulements et courants de Foucault). Les pertes par effet Joule sont majoritairement des pertes d'énergie dans les enroulements en cuivre. [5]
- l'effet de magnétisation (hystérésis).

Les pertes dans le transformateur se manifestent sous forme de chaleur et donnent lieu : à une élévation de température, et à une diminution de rendement. [4]

Peu importe la configuration, le nombre des enroulements et des phases, et la forme de noyau, le transformateur consomme une petite partie de l'énergie à transférer à la charge. Cette énergie est consommée pour la magnétisation du noyau. Le courant correspondant à cette énergie consommée est nommé le courant magnétisant. En effet, la tension alternative appliquée fait varier la direction des dipôles magnétiques du noyau, et, ainsi, le flux magnétique varie. Ceci, à son tour, induit un courant dans l'enroulement alimenté qui correspond au courant magnétisant (à condition que tous les autres enroulements soient ouverts). [2]

Pour notre travail on s'intéresse aux transformateurs réels sans aucune charge ainsi qu'aux transformateurs à trois colonnes. Il est connu que les pertes associées au noyau sont beaucoup plus petites que la puissance transférée, aussi les pertes dues à l'effet Joule sont négligeables par rapport à la puissance nécessaire pour la magnétisation de noyau.

### Objectifs du travail :

De nombreuses travaux et recherches qui ont donné des préliminaires aux courants magnétisants et les transformateurs électriques. Et à notre mémoire celui-ci est peut être un travail bref mais il comprend de nombreuses parties. Généralement cette mémoire vise à démonté deux objectifs techniques différents, qu'ils sont :

- L'un c'est l'étude de fonctionnement transformateur triphasé dans le système triphasé déséquilibré.
- L'autre est obtenir la forme des courants magnétisants triphasés à l'aide des formes des courants magnétisants obtenus par les essais monophasés.

Aussi notre travail présente un outil original théorique et expérimental sur les mécanismes magnétiques des transformateurs «Dy», ainsi que sur les méthodes de modélisation de ce dernier.

## Organisation du travail :

Ce mémoire sur le titre de " Etude des diverses configurations des transformateurs triphasés et calcul des courants magnétisants ", est composé d'une introduction et de quatre chapitres.

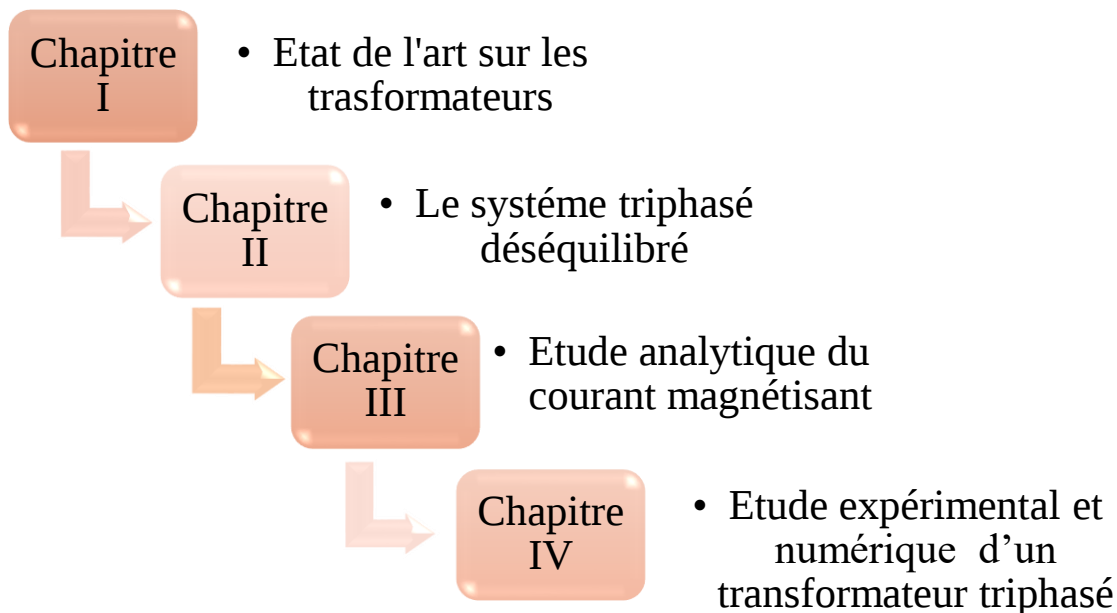
Le premier chapitre représente une recherche plus détaillée sur le transformateur électrique.

Le deuxième chapitre c'est une étude sur le déséquilibre d'un système triphasé, une étude sur le fonctionnement d'un transformateur triphasé dans le système déséquilibré.

Le troisième chapitre du mémoire comporte une étude analytique sur le courant magnétisant de chacune des phases d'un transformateur  $Dy_1$  ainsi que la simulation du champ magnétique d'une phase du transformateur triphasé par logiciel "COMSOL Multiphasiques"

Le quatrième chapitre est réservé à l'étude expérimentale d'un transformateur triphasé et simulation de ce transformateur par logiciel du "MATLAB-Simulink " d'un transformateur triphasé.

## Etude des diverses configurations des transformateurs triphasés et calcul des courants magnétisants



A pink ribbon banner with a slight 3D effect and a reflection below it, containing the chapter title.

# **Chapitre I**

## **État de l'art sur les transformateurs**

# Chapitre I : état de l'art sur les transformateurs

## I.1 Introduction :

Les transformateurs sont des appareils électriques largement utilisés dans l'industrie de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique, ainsi que dans beaucoup d'autres secteurs fonctionnant avec l'énergie électrique.

Ce chapitre est consacré à une présentation générale d'un transformateur, après la définition et d'un transformateur et son importance, on donne quelques notions de base sur les transformateurs comme les symboles, le principe de fonctionnement et le schéma équivalent, on a vu pour le transformateur triphasé les caractéristiques et les éléments de constitutions. Aussi on a vu le régime équilibré et le fonctionnement d'un transformateur dans ce régime.

## I.2 Historique :

Le physicien "Hans Christian Oersted" a découvert qu'un conducteur peut générer un champ magnétique s'il traversé par un courant en 1820. Quelques années plus tard le monde obtenu des corps aux notions d'induction et de self-induction par "Josef Henry" exactement en 1830. Puis en 1831 une série d'expériences avec un appareil constitué d'un anneau de fer et d'enroulements de fil de cuivre isolé a été faite par l'anglais "Michael Faraday".

En 1882 "Lucien Gaulard" (1850-1888), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la Société Française des Electriciens un "générateur secondaire", dénommé depuis transformateur. Devant le scepticisme de ses compatriotes, il s'adresse à l'anglais "Gibbs" et démontre le bien-fondé de son invention à Londres. [6]

En 1883, "Lucien Gaulard" et "John Dixon Gibbs" réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2000 Volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres [7].

En 1884 "Gaulard" met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2000 Volts et allant de Turin à "Lanzo" et retour (80 km).

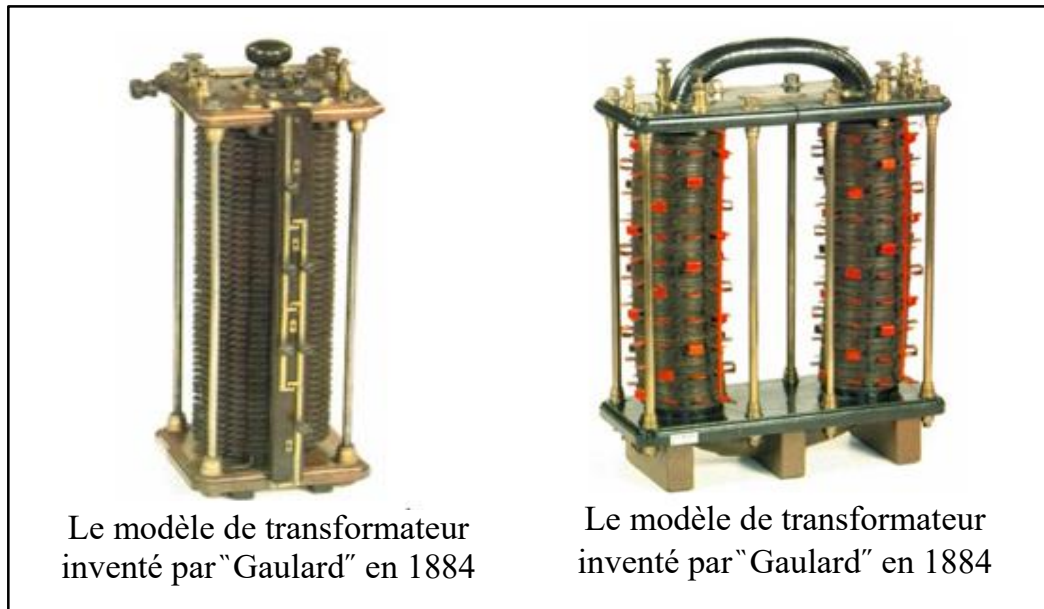
"Gaulard" attaque, perd ses procès, est ruiné, et finit ses jours dans un asile d'aliénés. Le transformateur de "Gaulard" de 1886, n'a pas grand-chose à envier aux transformateurs actuels, son circuit magnétique fermé (le prototype de 1884 comportait un circuit magnétique ouvert, d'où un bien médiocre rendement) est constitué d'une multitude de fils de fer annonçant le circuit feuilleté à tôles isolées [6].

Gaulard se bat contre les tenants du continu (parmi lesquels Desprez). Cette lutte est aussi âpre que celle qui oppose Edison (tenant du continu) à "Tesla" et "Westinghouse" (tenant de l'alternatif) outre Atlantique à la même époque.

La reconnaissance de Gaulard interviendra trop tardivement. Entre-temps, des brevets ont été pris aussi par d'autres. Le premier brevet de Gaulard en 1882 n'a même pas été délivré en son temps, sous prétexte que l'inventeur prétendait pouvoir faire « quelque chose de rien » !

Alors on peut admettre par l'intérêt du transformateur qui permet d'élever la tension délivrée par un alternateur et facilite ainsi le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension. La reconnaissance de "Gaulard" interviendra trop tardivement.

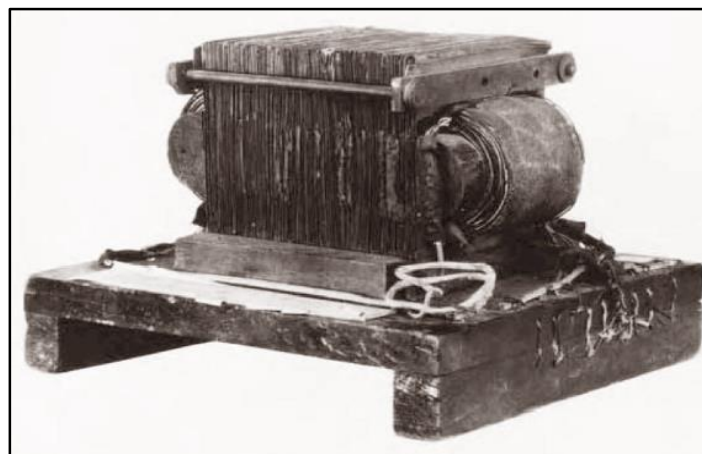
On représente par la figure (I.1) les deux modèles de transformateur inventé par "Gaulard" en 1884 et 1886.



**Figure (I-1) :** Les deux modèles de transformateur inventé par "Gaulard"

Ainsi, en 1885, les Hongrois "Karoly Zipernowsky", "Miksa Dery" et "Otto Titus Blathy" mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme "Ganz" à Budapest. Dans le même temps aux USA, "W. Stanley" développe également des transformateurs [8]

Le premier transformateur moderne et pratique construit par "William Stanley" en 1885, note que le noyau est composé de tôles individuelles. La figure (I.2) [9]



**Figure (I-2) :** Le premier modèle pratique d'un transformateur de "W. Stanley" en 1885

Le premier transformateur triphasé a été construit en 1889, actuellement les transformateurs sont très développés soit du côté de construction soit de conception (750/400 kV, 400/220 kV, 220/60 kV, 60/10 ou 30 kV, 10 ou 30kV/380 V).

Mais il y a plusieurs types des transformateurs triphasés, par exemple on représente par la Figure (I.3) le transformateur triphasé 250 MVA, 735 kV d'Hydro-Québec.



**Figure (I-3) :** Transformateur triphasé 250 MVA, 735 kV d 'Hydro-Québec

## I.3 Définition du transformateur :

Le transformateur est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur efficace d'un signal alternatif en maintenant la fréquence et la forme de l'onde inchangées, c'est-à-dire il est transformé un signal alternatif (tension, ou courant) vers un autre signal alternatif aussi avec la même fréquence mais une valeur efficace déferent.

Les transformateurs sont des machines entièrement statiques, cette absence de mouvement est d'ailleurs à l'origine de leur excellent rendement [4].



**Figure (I-4) :** Transformateur monophasé



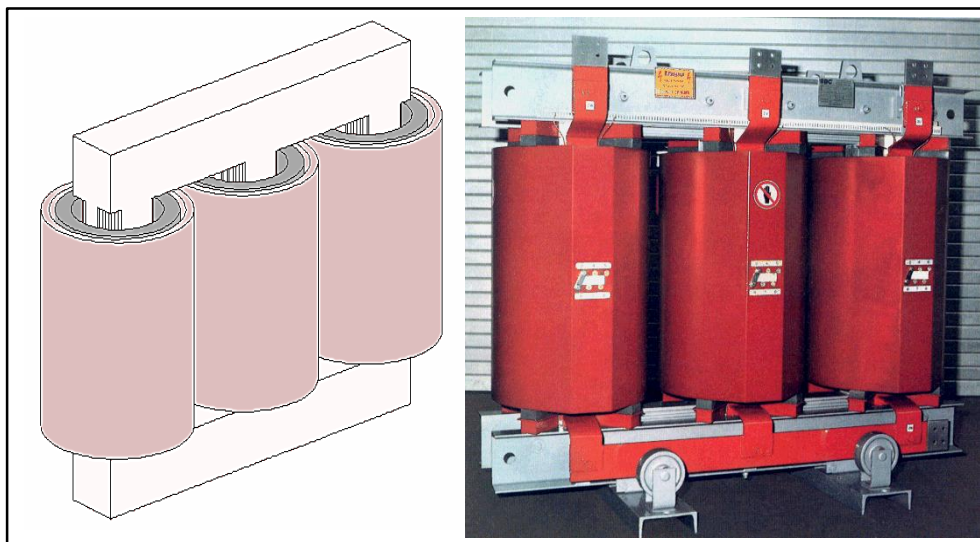
**Figure (I-5) :** Transformateur triphasé

## I.4 Les types du transformateur :

Le choix d'un type de transformateur sur cette large gamme dépend non seulement des contraintes électriques, mécaniques et thermiques, mais également des problèmes d'encombrements et économiques. Toutefois, la majorité des équipements commercialisés concernent des transformateurs à colonnes, de distribution et d'une puissance allant de quelques dizaines à quelques centaines de kVA. [10]

## I.4.1 Transformateur à colonnes :

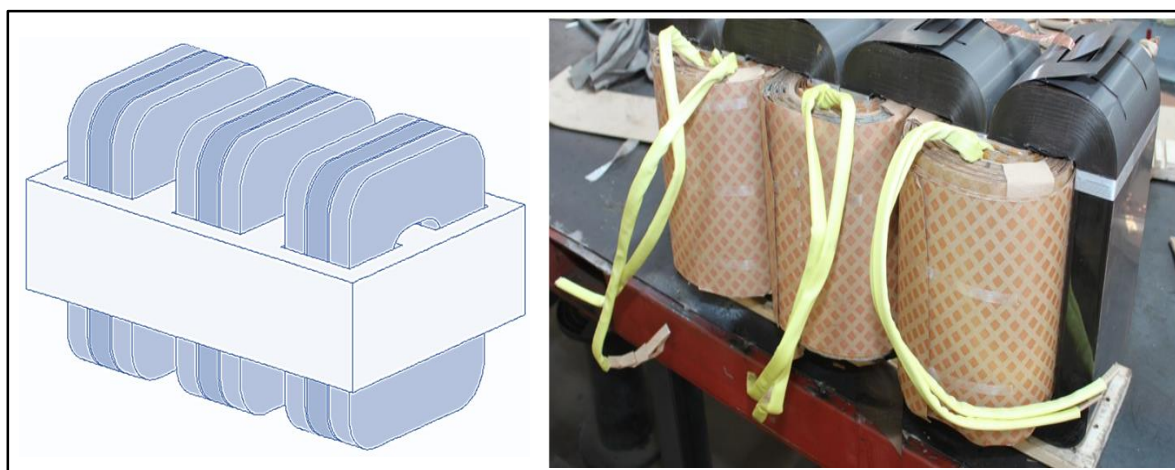
Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mises en jeux. [10]



**Figure (I-6) :** Transformateur à colonnes

## I.4.2 Transformateur cuirassé :

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et des enroulements [11].



**Figure (I-7) :** Transformateur cuirassé

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages [11].

### I.4.3 Transformateur en "double T" :

Le transformateur en "double T" équivaut à placer en série deux transformateurs utilisant la connexion Scott afin de réaliser une conversion électrique, de triphasée à diphasée et vice-versa. Il existe trois types de connexions disponibles selon l'indice horaire souhaité : Tt0, Tt1 et Tt11. [10]

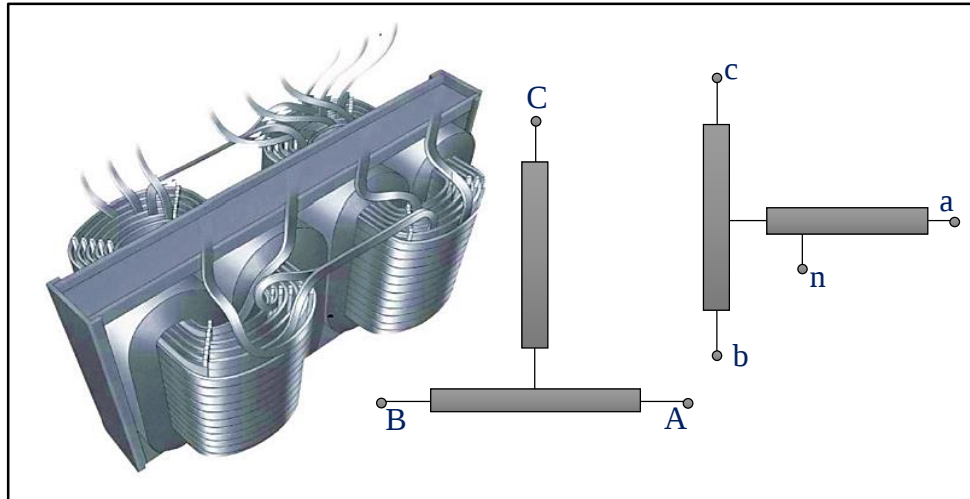


Figure (I-8) : Transformateur Tt11 (Marcus Transformer of Canada Ltd)

## I.5 L'utilisation des transformateurs :

Généralement l'objectif de l'utilisation d'un transformateur électrique peut être soit d'adapter, c'est-à-dire élever ou abaisser, le niveau de tension d'une source d'énergie électrique. Soit d'assurer une séparation électrique (dite aussi : galvanique) entre deux circuits, c'est-à-dire l'absence de potentiels communs entre ces circuits. Le premier cas correspond au besoin le plus fréquemment rencontré. Dans cette application, l'importance économique du transformateur est essentielle, car c'est son existence qui permet, au travers du changement de tension le transport d'énergie électrique à grande distance, et qui a conduit, par voie de conséquence, à l'abandon du courant continu pour la production de cette énergie [12].

### I.5.1 Le transformateur dans Le réseau électrique :

Aujourd'hui, il est difficile d'imaginer un réseau électrique ou un appareil de conversion de l'électricité sans transformateur puisqu'il a permis le développement des réseaux électriques alternatifs de transport sur de longues distances en modifiant et en adaptant très facilement avec un excellent rendement, les niveaux de tension. C'est un constituant essentiel des réseaux électriques. L'énergie électrique est " transformée " plusieurs fois (3 - 4) entre son lieu de production et celui d'utilisation.

Les transformateurs participent par ailleurs au réglage de la tension au moyen de changeur de prise (modification du rapport de transformation) soit en charge, soit à vide. En 2007, il y avait 128,54 GVA de transformateurs sur le réseau 400 kV et 123,21 GVA sur le réseau 225 KV. [3]

Le réseau est classiquement découpé en trois parties principales : la production, le transport et la distribution d'électricité. Figure (I.9)

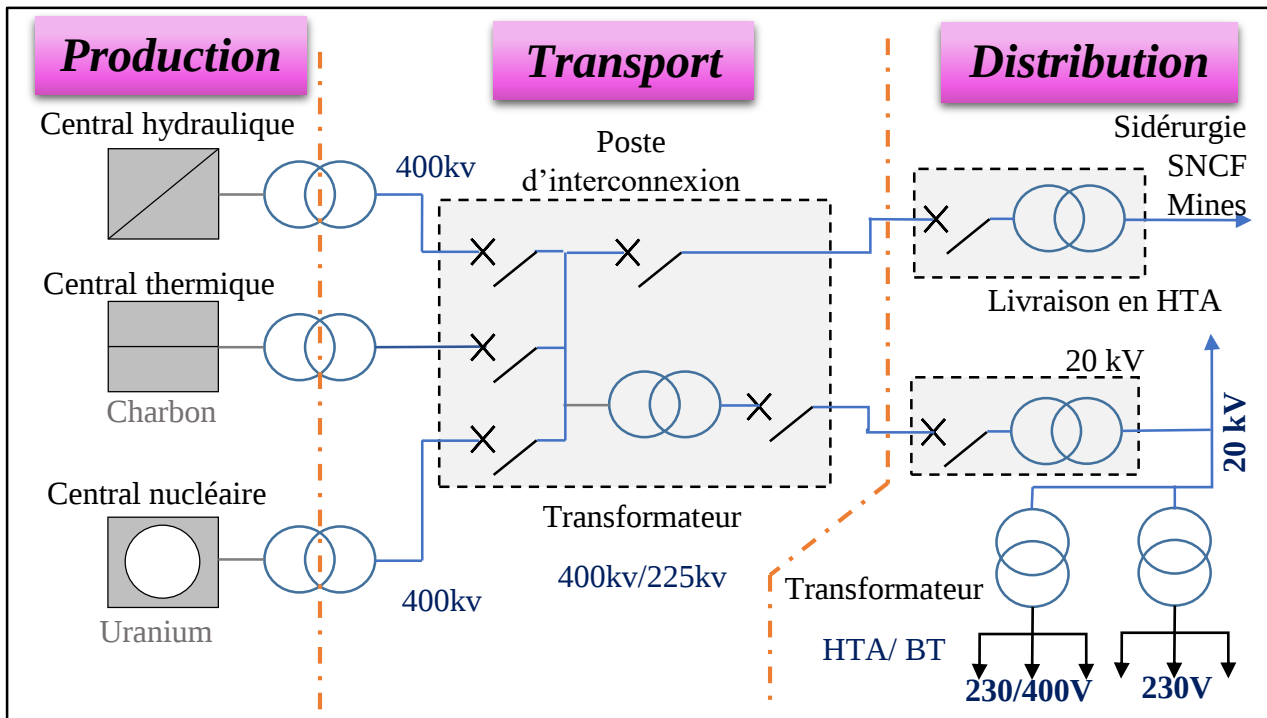


Figure (I-9) : Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique

### I.5.1.1 La production d'électricité :

Après la production d'énergie électrique par les différentes centrales électriques, cette énergie est mise à disposition sur le réseau de transport, à travers un transformateur élévateur.

- **Transformateur élévateur de tension** : la figure (I.10) représente un transformateur élévateur de sortie de centrale électrique, triphasé 760 MVA 345 kV. L'enroulement primaire du transformateur comporte des prises des réglages hors tension. Dans tous les cas les enroulements des transformateurs raccordés aux groupes sont couplés en triangle afin de filtrer les harmoniques de rangs multiples de 3 et de réduire les taux de composantes inverses transmises par le réseau [13]. Les générateurs fournissent de l'énergie à un niveau de tension de quelques kV typiquement. Pour minimiser les pertes sur les lignes, la tension doit être aussi élevée que possible, afin de réduire les courants qui transitent, généralement à 400 kV ou 220 kV en France [14]



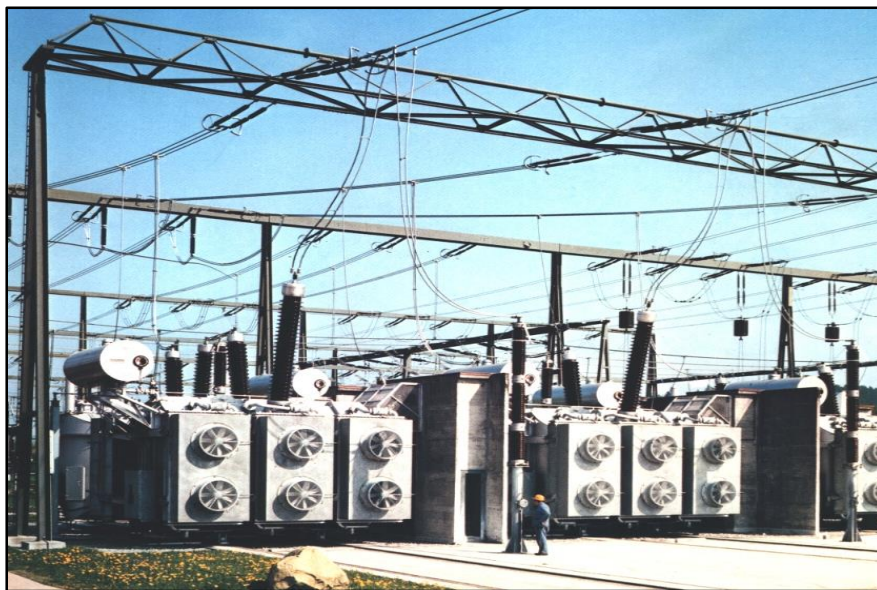
Figure (I-10) : Transformateur élévateur de sortie de centrale électrique

## I.5.1.2 Le transport d'énergie électrique :

Le réseau de transport d'énergie électrique assure la répartition de l'électricité depuis les grands centres de production jusqu'aux réseaux de distribution qui sont connectés aux consommateurs, le réseau de transport comporte majoritairement des transformateurs d'interconnexion

- **Transformateur d'interconnexion** : Selon la figure (I.11) on représente un transformateur d'interconnexion de réseau, ces transformateurs adaptent les différents niveaux de tensions du transport, généralement sont des autotransformateurs et des transformateurs pour les connexions de plus faible tension.

Les autotransformateurs d'interconnexion sont dotés d'un tertiaire de compensation alimentant un transformateur des services auxiliaire (TSA) et dans certains cas, une batterie d'inductances dont le rôle est de compenser la puissance réactive d'origine capacitive fournie par les lignes du réseau de transport [13].



**Figure (I-11) :** Transformateur d'interconnexion de réseau

## I.5.1.3 La distribution électrique :

La liaison entre le réseau de transport et le client final est généralement assurée par le réseau de distribution électrique. C'est un réseau de proximité dont les tensions sont moindres que celles du réseau de transport, et comprenant de nombreux transformateurs abaisseurs pour adapter la tension aux différents usagers.

- **Transformateurs abaisseurs** : Ils adaptent la tension du réseau électrique de transport, Ces transformateurs sont situés dans des postes de transformation.

- **Transformateurs de distribution** : Ces transformateurs de faible puissance (quelques centaines de KVA) sont en général utilisés pour abaisser la tension 20 kV du réseau de distribution et l'adapter à un utilisateur final à des fins domestiques ou industrielles, le plus souvent en 400 V triphasé. A la différence des transformateurs précédents, plutôt imposants, ces transformateurs sont construits en série, et ont tendance à être remplacés lorsqu'ils sont défectueux [14]. Ils alimentent des charges monophasées, déséquilibrées et asynchrones, ils doivent être capables de supporter des courants homopolaires permanents. [13]

Les transformateurs de distribution sont intégrés dans les postes cabines, La figure (I.12). Ou fixés hors de portée sur un châssis ou sur un poteau, La figure (I.13).



**Figure (I-12) :** Poste de distribution sur poteaux



**Figure (I-13) :** Poste de distribution Cabiné

## I.5.2 Les applications industrielles :

L'utilisation des transformateurs présents selon le type de transformateur par suivant :

### I.5.2.1 Transformateurs de sous-station :

- **Transformateurs de sous station électrique :**

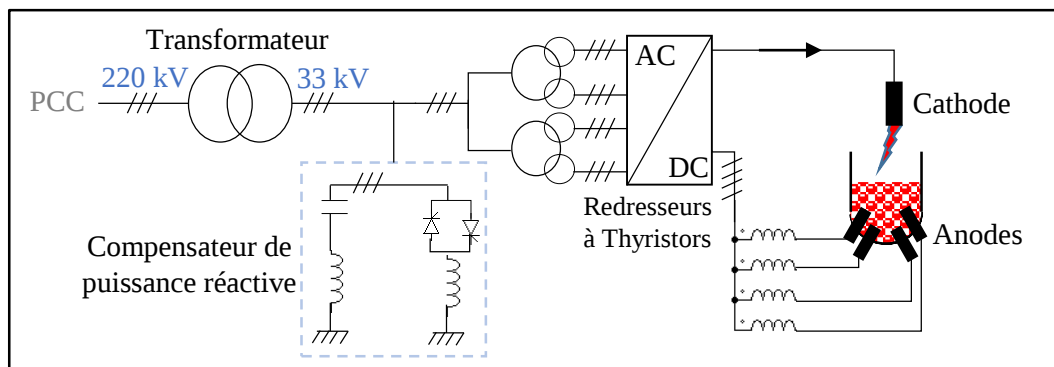
Certaines de ces industries sont alimentées directement par le réseau de transport haute tension 220 kV ou 90 kV et possèdent leur propre poste de transformation.

- **Transformateurs de sous station ferroviaires :**

Ces appareils monophasés servent à l'alimentation des caténaires en 25 kV d'un côté et sont connectés sur le réseau 220 kV de l'autre.

### I.5.2.2 Transformateurs de four :

Ces transformateurs situés juste avant les fours ou les bassins d'électrolyse peuvent alimenter des redresseurs de puissance (Figure I.14), issue de (POSTIGLIONE, 2006)). Leur spécificité est de délivrer de forts courants, jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines, de kA, pour les processus industriels. La puissance de ces appareils est typiquement de plusieurs dizaines de MVA. De plus ces appareils sont très chargés et contraints en exploitation, ils vieillissent donc généralement plus vite que des transformateurs de réseau. [14]



**Figure (I-14) :** L'installation d'électrometallurgie : four alimenté en courant continu

## I.5.2.3 Transformateurs embarqués :

Ils sont présents dans les locomotives des trains ou métros et adaptent l'énergie transmise par les caténaires aux moteurs et auxiliaires électriques du train. Ce sont des appareils monophasés qui ont un encombrement mécanique extrêmement optimisé par rapport à la puissance qu'ils transmettent. Par exemple Les transformateurs de TGV qu'ils intègrent les contraintes combinées des locomotives (grande puissance) et des automotrices (faible masse). En effet, il faut concevoir un transformateur de l'ordre de 5 MVA suffisamment léger pour que la motrice puisse respecter l'exigence de masse à l'essieu de 17,5 t, y compris pour une rame devant fonctionner sous 15 kV 16,7 Hz. Sur tous les TGV, le transformateur est installé sur le plancher de la motrice et donc avec une forme moins aplatie. Cette dernière disposition permet en général de gagner environ 1t sur la masse du transformateur [15].



Figure (I-15) : Transformateur de TGV – Photo : SNCF

## I.6 Transformateurs spéciaux :

Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale. La plupart possèdent les propriétés de base.

### I.6.1 Autotransformateur :

On appelle autotransformateur, la figure (I.16), un transformateur composé d'un enroulement unique monté sur un circuit magnétique. Pour un autotransformateur abaisseur, par exemple, la haute tension est appliquée à l'enroulement complet et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement et une prise intermédiaire [16].

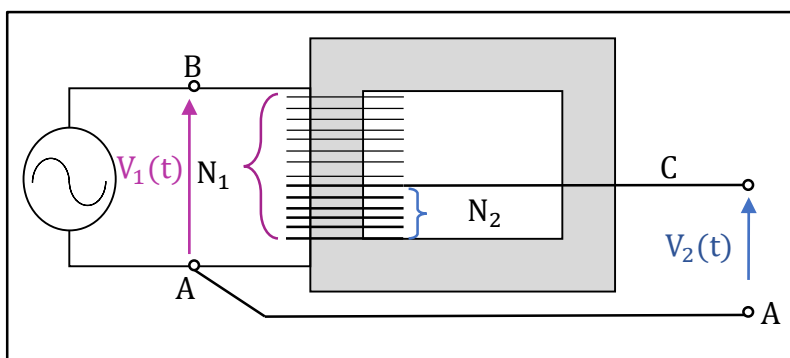


Figure (I-16) : Autotransformateur

La figure (I.17) représente deux exemples pour l'autotransformateur variable.



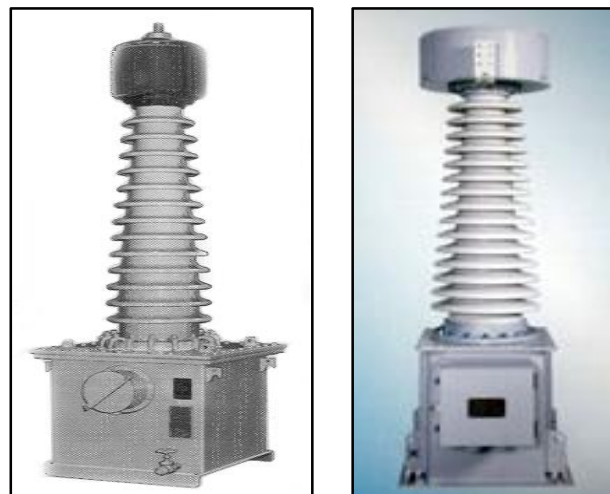
**Figure (I-17) : L'autotransformateur variable**

A l'opposé de l'autotransformateur, on trouve le transformateur d'isolement, transformateur de rapport en général  $m = 1$ , qui a pour fonction non de changer la tension, mais de supprimer toute liaison galvanique entre deux circuits (par exemple pour la sécurité des personnes intervenant sur les circuits placés au secondaire). L'appareil qui suit, le transformateur d'impédance, n'appartient plus, en tant que fonction principale, au domaine de la conversion d'énergie, mais à celui de la métrologie. Ceci n'empêche nullement qu'il soit très utilisé dans les installations de production et d'utilisation de l'énergie électrique [12].

## I.6.2 Transformateur de tension (TT) :

Les transformateurs de tension comme la figure (I.18), sont des transformateurs de haute précision dont le rapport de transformation varie très peu avec la charge [4].

Ils sont utilisés sur les lignes à haute tension pour alimenter des appareils de mesure (voltmètre, wattmètre, etc.) ou de protection (relais). Ils servent à isoler ces appareils de la haute tension et à les alimenter à des tensions appropriées. Le rapport de transformation est choisi de façon que la tension secondaire soit d'une centaine de volts, ce qui permet l'utilisation d'instruments de fabrication courante pour la mesure de tension élevées. Le primaire des transformateurs de tension est branché en parallèle avec le circuit dont on veut connaître la tension. Leur construction diffère très peu de celle des transformateurs conventionnels. Cependant, leur puissance nominale est généralement faible (inférieure à 500 VA) de sorte que le volume de l'isolation dépasse souvent celui du cuivre et de l'acier utilisé [16].



**Figure (I-18) : Transformateur de tension**

### I.6.3 Transformateurs de courant (TI) :

Transformateurs de courant sont des transformateur de haute précision dont le rapport de transformation demeure essentiellement constant même lorsque la charge secondaire varie [4].

Ils sont utilisés pour éviter d'avoir à connecter des ampèremètres, des bobines de courant d'instrument et des relais directement aux lignes à haute tension. Les transformateurs de courant réduisent le courant selon un rapport connu. Ainsi, des instruments et des dispositifs de contrôle petits et précis peuvent être utilisés car ils sont isolés de la ligne haute tension. L'enroulement primaire d'un transformateur de courant est connecté en série avec l'une des lignes fils. L'enroulement primaire consiste en quelques tours de fil lourd enroulé sur un fer laminé cœur. La bobine secondaire a plus de tours de fil plus petit et est enroulée sur le même noyau que la bobine primaire. Le courant nominal de l'enroulement primaire est le courant maximum que le l'enroulement sera nécessaire pour effectuer. Pour des courants plus élevés, la ligne en question peut être installée à travers un noyau toroïdal sans aucun virage. Le noyau agit alors comme l'enroulement primaire et a pas de connexion à la ligne. L'enroulement secondaire est toujours évalué à 5 A. [17]



Figure (I-19) : Transformateur de courant

## I.7 Le transformateur monophasé :

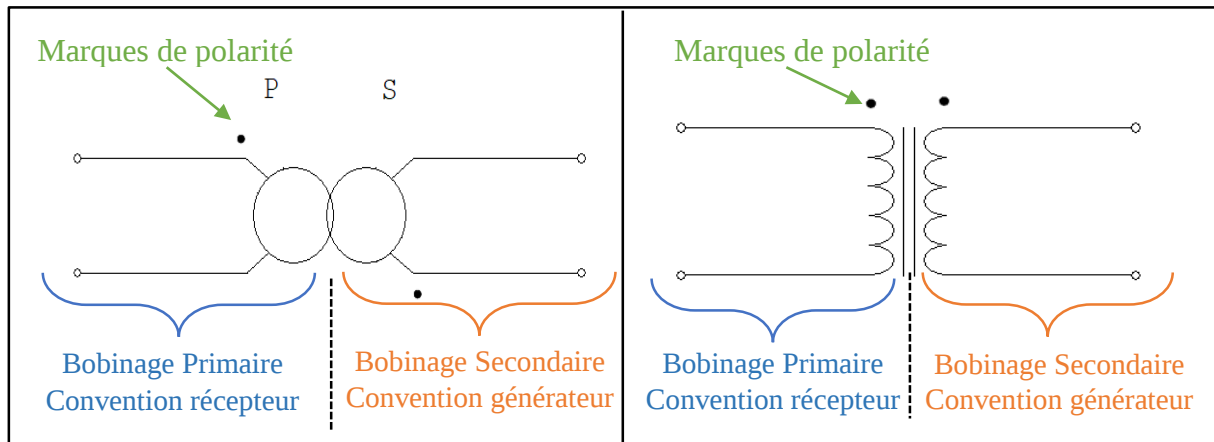
Un transformateur monophasé est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système monophasé de courant alternatif en un ou plusieurs systèmes de courant alternatif monophasé de même fréquence, d'intensité et de tension efficaces généralement différents, en assurant un isolement galvanique [18].

### I.7.1 Symboles et convention des points :

La figure (I.20) représente les deux symboles les plus usuels du transformateur monophasé derniers font apparaître la convention dite « des points » qui permet de repérer les sens Conventionnels des tensions primaire et secondaire. La règle est simple : il suffit de placer la flèche des tensions sur le point. C'est ce qui est mis en apeure sur les symboles de la figure (I.20) qui fait apparaître à titre d'exemple deux cas différents.

Une fois ce sens repéré, il faut ensuite orienter les courants de telle manière à toujours faire apparaître le primaire en convention récepteur et le secondaire en convention générateur. C'est

uniquement en respectant ces conventions que les relations du transformateur idéal s'appliquent sans souci de signe et qu'il est possible de s'affranchir de l'examen minutieux du sens des bobinages pour lever le doute sur le sens des tensions [19].



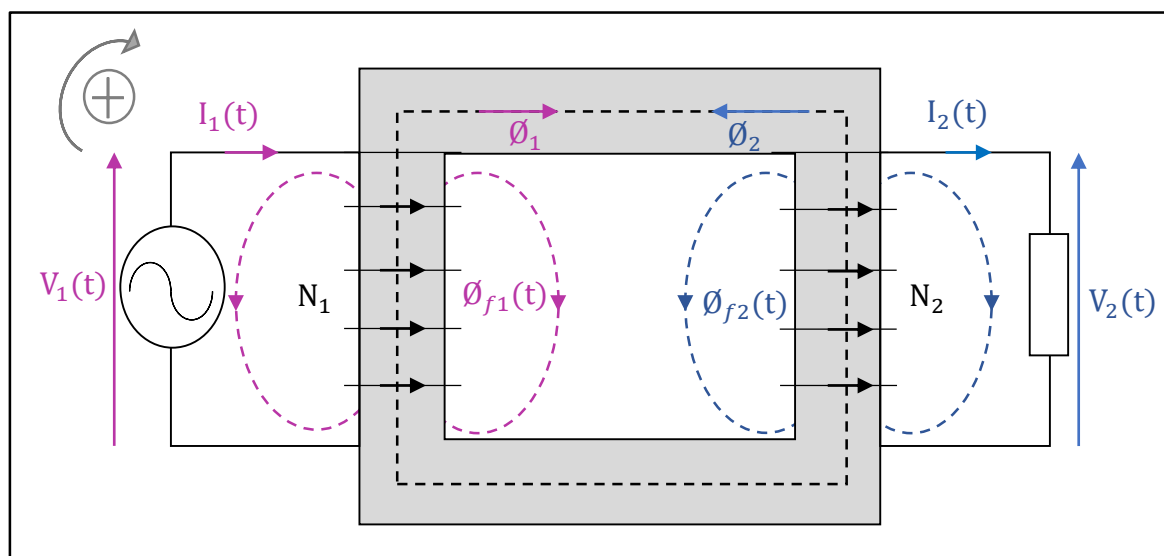
**Figure (I-20) :** Symboles et convention du transformateur idéal.

## I.7.2 Principe du fonctionnement :

- L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale, il est donc traversé par un courant sensiblement sinusoïdal. En première approximation, nous pouvons négliger les chutes de tension et admettre que le flux à travers le circuit magnétique est sinusoïdale aussi, en quadrature arrière de la tension. En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable  $\Phi$  circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ( $d\Phi/dt$ ) et au nombre de spire que comporte cet enroulement [11].

Ainsi, apparaît entre les bornes du secondaire une tension sinusoïdale, qui peut être visualisée à l'oscilloscope, et dont nous pouvons mesurer la valeur efficace.

- L'origine de la force électromotrice induite dans le secondaire est due à un phénomène que nous connaissons : la liaison magnétique entre les deux bobinages : c'est une **f.é.m.** mutuelle induite. Grâce à la présence du fer, la liaison magnétique est excellente et le coefficient  $K$  de couplage est à peine inférieur à l'unité.



**Figure (I-21) :** Fonctionnement d'un transformateur

### I.7.2.1 Les équations magnétiques :

Considérent la figure (I.21) on peut écrire les équations des flux suivant :

$$\begin{cases} \emptyset_{1T} = \emptyset_1 + \emptyset_{f1} - \emptyset_2 \\ \emptyset_{2T} = \emptyset_1 - \emptyset_{f2} - \emptyset_2 \end{cases} \dots \dots \dots (I. 1)$$

$\emptyset_{1T}$  : Flux total vu par une spire de la bobine 1

$\emptyset_{2T}$  : Flux total vu par une spire de la bobine 2

Et les f.é.m. induit créées par les deux bobinages :

$$\begin{cases} E_{1T} = N_1 \frac{d\emptyset_{1T}}{dt} \\ E_{2T} = N_2 \frac{d\emptyset_{2T}}{dt} \end{cases} \dots \dots \dots (I. 2)$$

Donc on a :

$$\begin{cases} E_{1T} = N_1 \frac{d(\emptyset_1 + \emptyset_{f1} - \emptyset_2)}{dt} \\ E_{2T} = N_2 \frac{d(\emptyset_1 - \emptyset_{f2} - \emptyset_2)}{dt} \end{cases} \dots \dots \dots (I. 3)$$

Tel que  $\emptyset = \emptyset_1 - \emptyset_2$  étant le flux principal, on aura :

$$\begin{cases} E_{1T} = N_1 \frac{d\emptyset}{dt} + l_1 \frac{dI_1}{dt} \\ E_{2T} = N_2 \frac{d\emptyset}{dt} - l_2 \frac{dI_2}{dt} \end{cases} \dots \dots \dots (I. 4)$$

Avec  $l_1$  et  $l_2$  étant les inductances de fuite associées aux flux de fuite primaire et secondaire.

### I.7.2.2 Equation électrique :

On a :

$$\begin{cases} V_1 = r_1 I_1 + E_{1T} \\ V_2 = E_{2T} - r_2 I_2 \\ \begin{cases} V_1 = r_1 I_1 + N_1 \frac{d\emptyset}{dt} + l_1 \frac{dI_1}{dt} \\ V_2 = N_2 \frac{d\emptyset}{dt} - l_2 \frac{dI_2}{dt} - r_2 I_2 \end{cases} \end{cases} \dots \dots \dots (I. 6)$$

Tel que :

$$E_1 = N_1 \frac{d\emptyset}{dt}$$

$$E_2 = N_2 \frac{d\emptyset}{dt}$$

On a :

$$\begin{cases} V_1 = E_1 + r_1 I_1 + l_1 \frac{dI_1}{dt} \\ V_2 = E_2 - r_2 I_2 - l_2 \frac{dI_2}{dt} \end{cases}$$

$$\text{Donc les équations électriques sont : } \begin{cases} V_1 = E_1 + r_1 I_1 + l_1 \frac{dI_1}{dt} \\ E_2 = V_2 + r_2 I_2 + l_2 \frac{dI_2}{dt} \end{cases}$$

En complexe, les équations deviennent :

$$\begin{cases} \overline{V}_1 = (r_1 + j l_1 \omega) \overline{I}_1 + \overline{E}_1 \\ \overline{E}_2 = (r_2 + j l_2 \omega) \overline{I}_2 + \overline{V}_2 \end{cases} \dots \dots \dots (I.7)$$

### I.7.2.3 Equation des Ampères-tours :

Même si aucun lien électrique n'existe entre les deux bobines, il n'en reste pas que le couplage donne lieu au lien magnétique assuré par le flux principal [20].

L'équation qui exprime à vide c'est-à-dire le secondaire ouvert et en charge :

$$\begin{cases} N_1 \overline{I}_1 - N_2 \overline{I}_2 = \overline{\mathcal{R}} \overline{\Phi} & \text{en charge} \\ N_1 \overline{I}_{1v} = \overline{\mathcal{R}} \overline{\Phi}_v & \text{à vide} \end{cases}$$

Le flux diminue légèrement avec la charge mais on peut supposer que le flux reste constant car imposé pour une tension donnée, [20]

Donc l'équation électrique au primaire devient :

$$\overline{V}_1 = (r_1 + j l_1 \omega) \overline{I}_1 + \overline{E}_1 \quad \text{Est constant.}$$

Puisque le terme  $(r_1 + j l_1 \omega) \overline{I}_1$  est négligeable

On peut déduire que :  $\overline{V}_1 \approx \overline{E}_1$

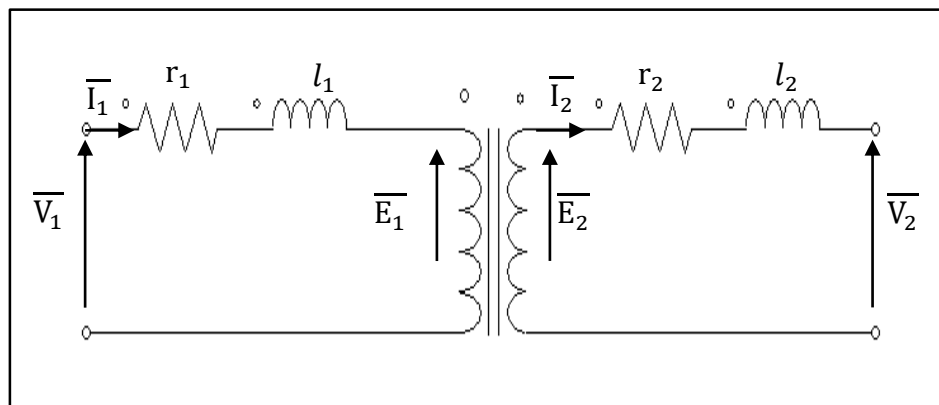
Avec  $\overline{E}_1 = j N_1 \omega \overline{\Phi}$  qu'il implique que le flux est constant.

On établit alors, puisque  $\overline{\Phi}_v \approx \overline{\Phi}$  l'équation des Ampères-tours :

$$N_1 \overline{I}_1 - N_2 \overline{I}_2 = N_1 \overline{I}_{1v} \dots \dots \dots (I.8)$$

### I.7.3 Schéma équivalent :

Le schéma équivalent complet du transformateur avec si possible des inductances et des résistances illustrant les consommations actives et réactives.



**Figure (I-22) :** Le schéma équivalent d'un transformateur

Pour cela, on peut déjà remarquer qu'il existe une relation simple entre les deux **f.é.m.**  $\overline{E}_1$  et  $\overline{E}_2$ , c'est-à-dire entre les deux équations électriques. En effet on a :

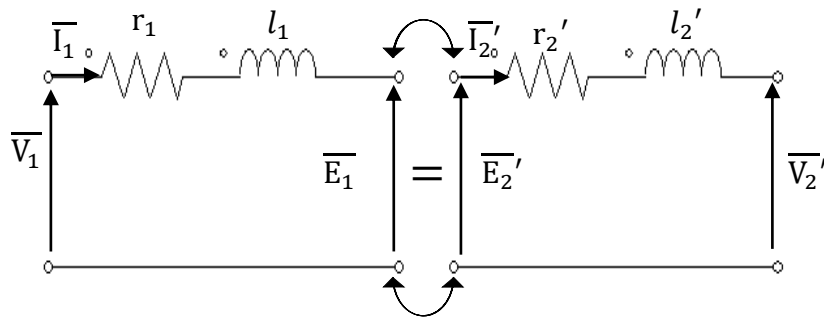
$$\frac{\overline{E}_1}{\overline{E}_2} = \frac{\overline{N}_1}{\overline{N}_2} = m$$

Par les équations (I.7) et (I.8) on peut exprimer différemment le courant primaire en fonction

du courant secondaire :  $\overline{I}_1 = \overline{I}_{1V} + \frac{\overline{I}_2}{m}$

On suppose que :  $\frac{\overline{I}_2}{m} = \overline{I}_2'$ , donc on aura :  $\overline{I}_1 = \overline{I}_{1V} + \overline{I}_2'$

Si on a  $\overline{I}_2'$  le courant secondaire, de manière à pouvoir effectuer une liaison électrique entre les deux mailles on peut tenter de transformer l'équation électrique au secondaire.



Selon le schéma précédent il faudrait alors s'assurer qu'on a bien  $\overline{E}_1 = \overline{E}_2'$ , puis poser les conditions d'équivalence imposées par la conservation des puissances. Ainsi, si on part du principe que les puissances apparentes sont conservées, on a :  $E_2 I_2 = E_2' I_2'$

Donc :

$$E_2' = \frac{E_2 I_2}{I_2'} = m E_2$$

$$E_2' = E_1$$

On peut obtenir bien l'égalité des deux f.é.m., le courant  $\overline{I}_1'$  représente bien le courant secondaire ramené au primaire et il est possible de connecter les deux schémas. Par ailleurs, le courant  $\overline{I}_{1V}$ , issu de l'équation des Ampères-tours est associé au flux principal  $\Phi$  qui donne lieu, à la fois la puissance magnétisante et aux inévitables pertes actives c'est-à-dire les pertes fer associées. Il s'agit de la branche magnétisante du transformateur, similaire à celle de la bobine à noyau étudiée précédemment [20].

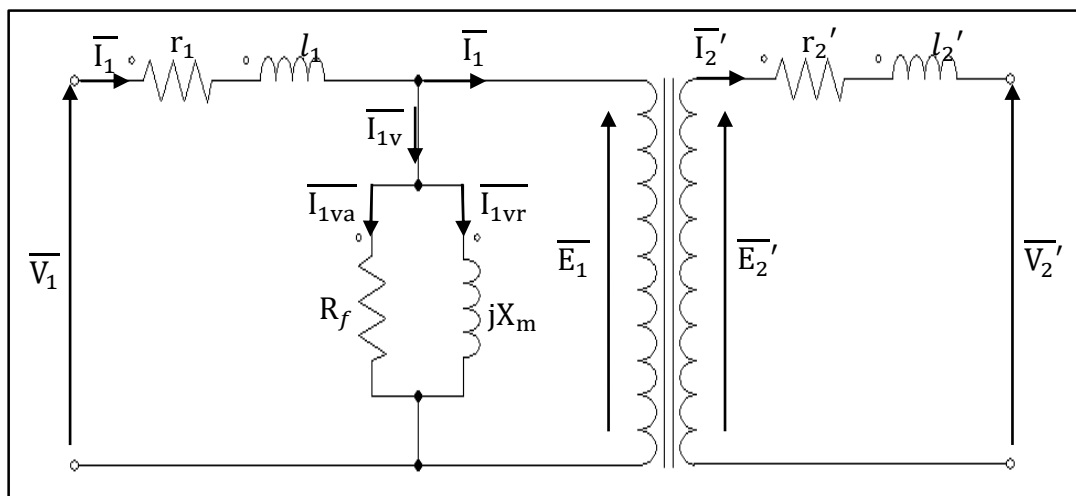


Figure (I-23) : Le schéma équivalent en T ramené au primaire

Selon la figure(I.23) qui représente le schéma équivalent en T du transformateur ramené au primaire on obtient la résistance vue du primaire  $R_f$  qui représente les pertes fer, et une réactance vue du primaire  $X_m$  illustrant la puissance magnétisante.

Pour trouver les valeurs des éléments secondaires ramenés, il suffit d'écrire la conservation des puissances :

$$\begin{cases} r_2(I_2)^2 = r'_2(I'_2)^2 \\ l_2 \omega (I_2)^2 = l'_2 \omega (I'_2)^2 \\ V_2 I_2 = V'_2 I'_2 \end{cases}$$

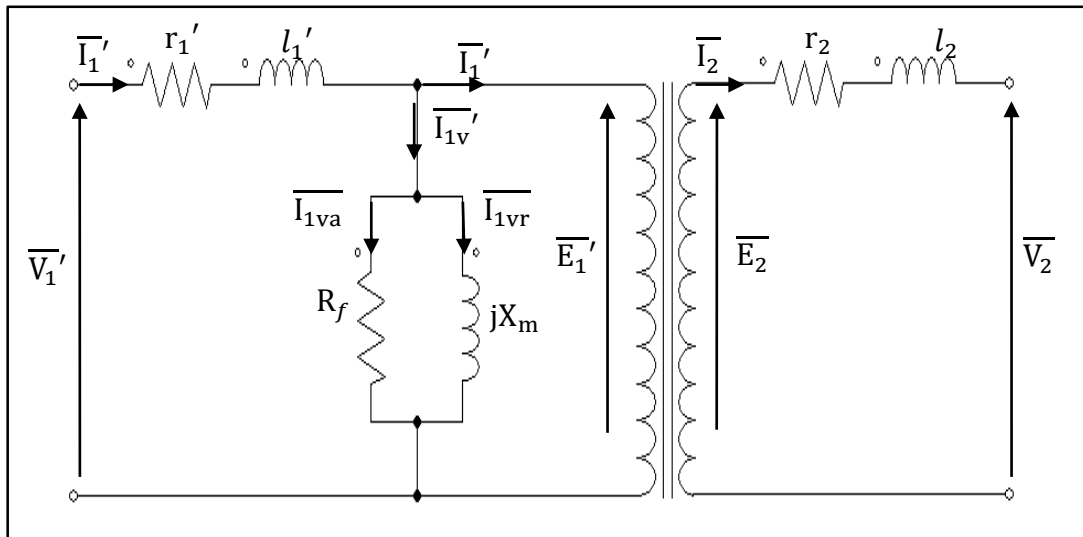
Donc :

$$\begin{cases} r'_2 = r_2 \left( \frac{I_2}{I'_2} \right)^2 \\ l'_2 = l_2 \left( \frac{I_2}{I'_2} \right)^2 \\ V'_2 = V_2 \frac{I_2}{I'_2} \end{cases}$$

On obtient :

$$\begin{cases} r'_2 = m r_2 \\ l'_2 = m l_2 \\ V'_2 = m V_2 \end{cases}$$

- Le même raisonnement peut se faire si on ramène le transformateur au secondaire il suffit d'établir les nouvelles valeurs ramenées en posant :



**Figure (I-24) :** Le schéma équivalent en T ramené au secondaire

$$m \bar{I}_1 = m \bar{I}_{1V} + \bar{I}_2$$

Tel que (  $m \bar{I}_1 = \bar{I}_1'$  ) et (  $m \bar{I}_{1V} = \bar{I}_{1V}'$  ) :

$$\bar{I}_1' = \bar{I}_{1V}' + \bar{I}_2$$

$$\text{Et : } \bar{E}_1' = \bar{E}_2$$

On a :

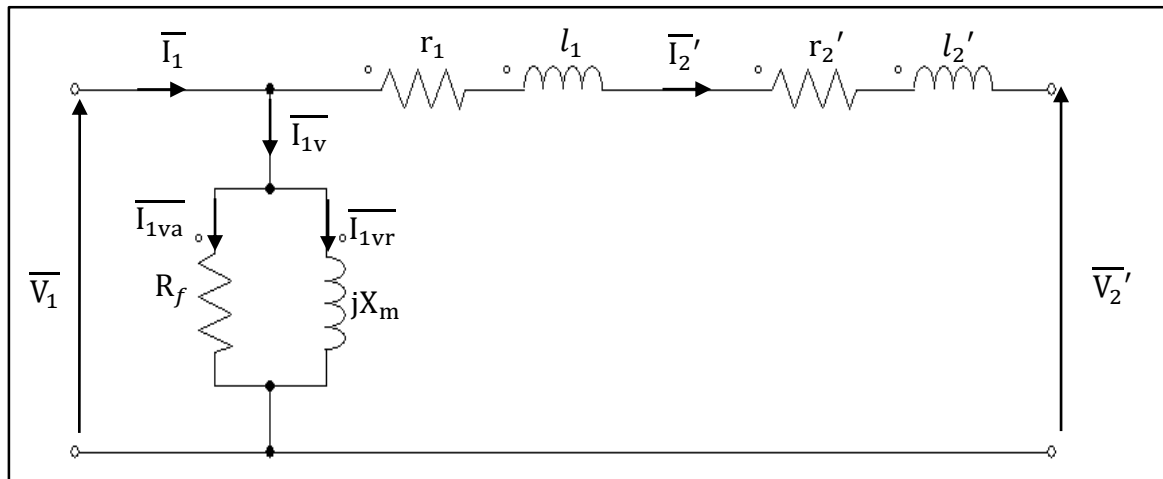
$$\begin{cases} r_1 (I_1)^2 = r'_1 (I'_1)^2 \\ l_1 \omega (I_1)^2 = l'_1 \omega (I'_1)^2 \\ V_1 I_1 = V'_1 I'_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} r'_1 = r_1 \left( \frac{l_1}{l'_1} \right)^2 \\ l'_1 = l_1 \left( \frac{l_1}{l'_1} \right)^2 \\ V'_1 = V_1 \frac{l_1}{l'_1} \end{cases}$$

Selon la figure (I.24) on en déduit les valeurs des éléments primaires ramenées au secondaire :

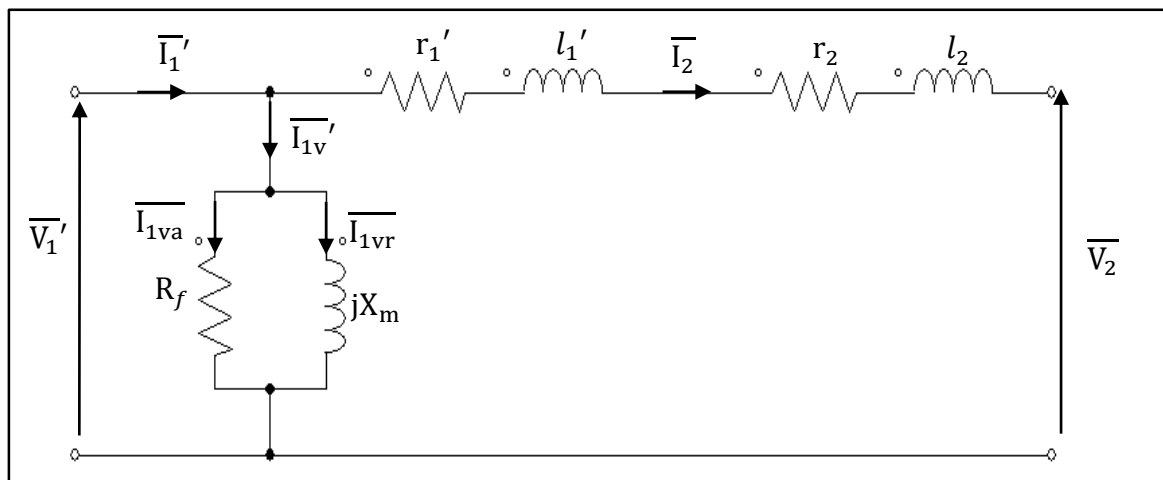
$$\begin{cases} r'_1 = r_1 \frac{1}{m^2} \\ l'_1 = l_1 \frac{1}{m^2} \\ V'_1 = V_1 \frac{1}{m^2} \end{cases}$$

- Il est souvent plus commode d'utiliser le schéma en  $\Gamma$  pour mieux exploiter les essais à effectuer sur le transformateur (il est difficile de séparer les inductances de fuite secondaire et primaire par des essais classique, les schémas équivalents en  $\Gamma$  sont moins précis que les schémas en T. [20])

Les figures suivant représentent les schémas équivalents en  $\Gamma$ .



**Figure (I-25) :** Le schéma équivalent en  $\Gamma$  ramené au primaire



**Figure (I-26) :** Le schéma équivalent en  $\Gamma$  ramené au secondaire

## I.8 Le transformateur triphasé :

Le transformateur triphasé comporte trois enroulements primaires et trois enroulements secondaires, ou avec des montages spéciaux de transformateurs monophasés c'est-à-dire on peut utiliser trois transformateurs monophasés identiques dont on groupe les primaires et les secondaires en étoile ou en triangle. [4]

Dans les deux cas, le rapport de transformation dépend des couplages utilisés et, en outre, un déphasage peut apparaître entre les tensions primaires et secondaires. Afin de simplifier la réalisation du circuit magnétique et de diminuer le volume occupé par le transformateur ainsi que la masse de fer utilisée, on réalise souvent des transformateurs triphasés à noyaux coplanaires possédant trois colonnes. [16]

### I.8.1 Principes éléments de constitution :

Tous les transformateurs comprend principalement de :

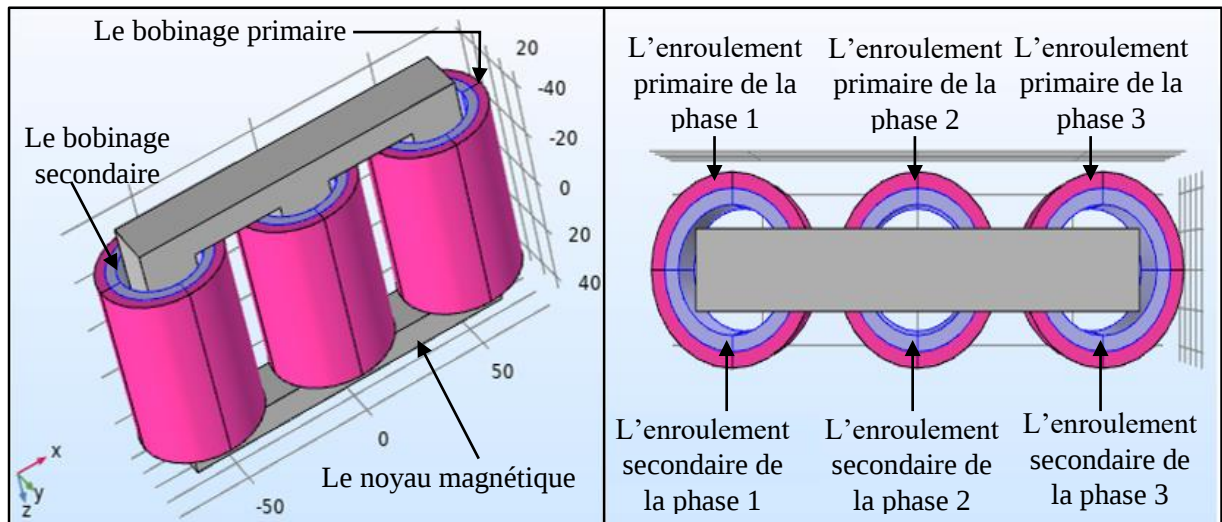


Figure (I-27) : Principes éléments d'un transformateur

#### I.8.1.1 Un circuit magnétique fermé :

Comme les bobine à noyau de fer triphasées, les transformateurs triphasés peuvent être réalisés à partir de trois unités monophasées dont les circuits magnétiques sont distincts et à flux libre, la figure (I.28). Cet élément est caractérisé par :

- de perméabilité magnétique aussi haute que possible afin de faciliter le plus possible le passage des lignes de champ magnétique.
- d'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes.
- feuilleté (tôles de 0,2 à 0,3mm d'épaisseur) afin de limiter les courants de FOUCAULT
- de résistance électrique aussi élevée que possible, toujours dans le but d'affaiblir les courants de FOUCAULT, à cette fin on utilise des aciers au silicium (2 à 3 %). [16]

Mais ; la plupart du temps, on emploie un circuit magnétique triphasé. Les circuits à culasses en étoile ou en triangle sont peu utilisés à cause de leur difficulté de réalisation. Le circuit à culasses droites possédant quatre ou cinq noyaux, à flux libre, est parfois utilisé pour réduire l'encombrement en hauteur de certaines unités de grande puissance ou pour augmenter la réactance magnétisante présentée, en régime déséquilibré, au système homopolaire. [21]

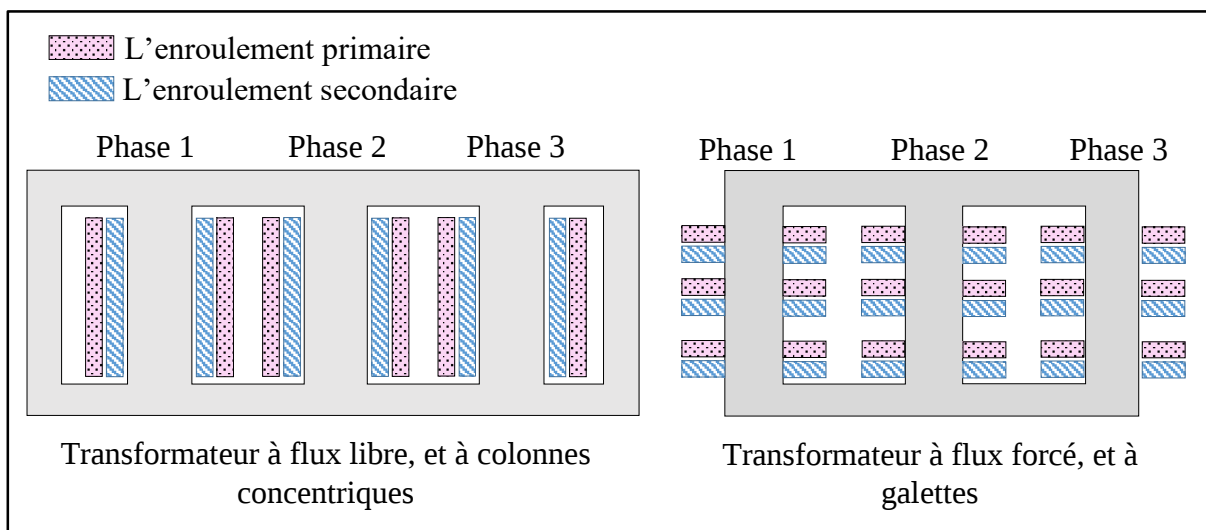


**Figure (I-28) :** Le circuit magnétique d'un transformateur triphasé

Il existe plusieurs choix technologiques essentiels dans le domaine des grandes puissances, pour les circuits magnétique, et un pour l'ensemble de la conception électrique et magnétique :

- circuits magnétiques à flux libre cinq branches, ou flux forcé trois branches.
- Conducteurs en colonnes ou en galettes
- Utilisation d'un transformateur triphasé ou de trois transformateurs monophasés séparés.

La différence de comportement entre transformateurs à flux libre et transformateur à flux forcé est constatable essentiellement lors transitoires électriques, en effet les impédances cycliques qui interviennent alors ont des valeurs différentes [12]. Les deux combinaisons possibles sont présentées par la figure (I.29) :



**Figure (I-29) :** Deux technologies du circuit magnétique

### I.8.1.2 Les enroulements (bobines) :

Chaque noyau porte deux enroulements qu'ils sont l'ensemble des spires concentrique donc fortement couplés : une phase primaire et une phase secondaire. Les bornes haute tension sont repérées par des lettres majuscules (A, B et C), Les bornes basse tension par les minuscules (a, b et c).

Ces différents enroulements sont imbriqués les uns dans les autres avec généralement l'enroulement basse tension à l'intérieur et les enroulements de niveaux de tensions supérieures de façon croissante vers l'extérieur. Les enroulements sont généralement en cuivre isolés papier (en plus de l'huile isolante en fonctionnement). Les sections et les technologies de bobinages ne sont pas identiques pour tous les transformateurs et relèvent des caractéristiques techniques d'un appareil donné. [14]

Selon La figure (I.30) à la droite on peut observer un enroulement seul, avec plusieurs spires qui seront connectées par la suite aux connexions finales du transformateur. Et à la gauche l'emplacement des enroulements dans un noyau magnétique sans culasse supérieure

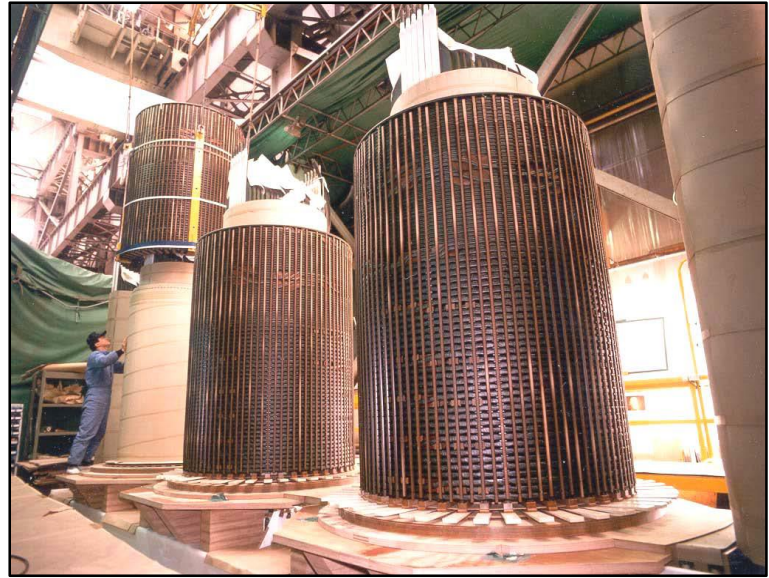


Figure (I-30) : Les enroulements de transformateur

## I.8.2 Caractéristiques d'un transformateur triphasé :

Les caractéristiques essentielles d'un transformateur triphasé sont renseignées et déduites des plaques signalétiques du transformateur. La figure (I.31) représente la plaque signalétique d'un transformateur de la modèle "MINERA TRANSFORMATOR 1000 KVA "



Figure (I-31) : La plaque signalétique d'un transformateur

Selon la plaque signalétique on a :

- L'année de fabrication : 2007
- Sur le numéro du : 416746-02
- Isolement HT : 75-28
- La fréquence : 50Hz
- Tension de court-circuit de 6 %, qu'il aide nous de connaître la protection doit utiliser
- Nature de enroulement : Aluminium
- Refroidissement : (ONAN) Huile Nature Air Nature
- Diélectrique huile : c'est-à-dire les enroulements immergés dans l'huile avec les caractéristiques suivant : masse diélectrique 561kg et la masse à découper 1150 kg
- Température : 40 C°

Aussi on a les informations principales suivant :

## I.8.2.1 Les tensions :

Les tensions primaires et secondaires composées, c'est à dire entre fils de ligne ; si le mode de connexion des enroulements n'est pas fixé on indiquera les valeurs nominales des tensions correspondant à chaque couplage possible. [16]

Selon la figure(I.31) :

La tension primaire : 5500 V

La tension secondaire : 410 V

## I.8.2.2 La puissance assignée :

C'est la valeur conventionnelle de la puissance apparente destinée à servir de référence à l'exploitation du transformateur. Elle est reliée la valeur de l'intensité assignée pour la prise considérée à l'état du système de refroidissement. [13]

La puissance apparente : 1000 kVA

## I.8.2.3 L'intensité assignée :

C'est l'intensité maximale qui peut être délivrée par le transformateur en régime permanent pour les conditions spécifiées.

Elle dépend de la puissance apparente assignée et de la prise de réglage. [13]

Pour notre transformateur :

L'intensité assignée maximale du primaire est : 105 A

L'intensité assignée maximale du secondaire est : 1408.2 A

## I.8.2.4 Le rapport de transformation triphasé :

Le rapport de transformation est une grandeur sans dimension notée par  $m$  aussi souvent désigné par la lettre  $k$ .

Elle représente le facteur de proportionnalité qui existe entre les tensions primaire et secondaire.

La relation obtenue est également valable en régime sinusoïdal et donc en notation complexe, on a :

$$\frac{U_a(t)}{U_A(t)} = \frac{\overline{V_a}}{\overline{V_A}} = \frac{N_a}{N_A} = m.$$

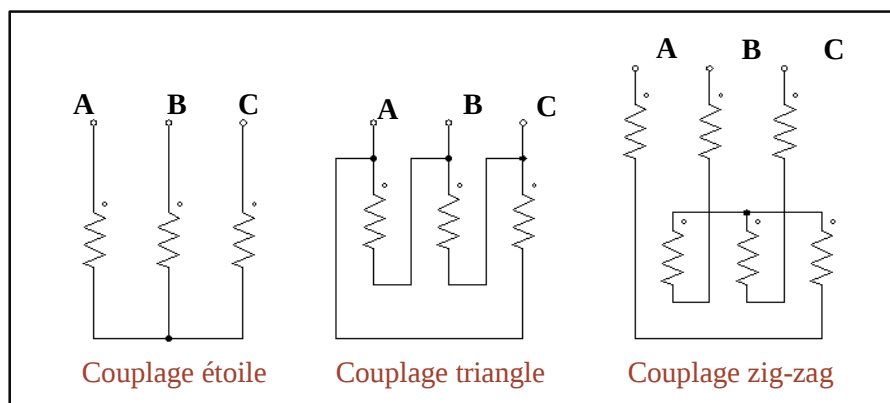
De la valeur du rapport de transformation triphasé on déduit le rapport de transformation par colonne qui dépend du couplage des enroulements. [13]

Le tableau (I.1) présenté la valeur du rapport de transformation pour chacun type du couplage des transformateurs usuels

## I.8.2.5 Le couplage des enroulements :

Comme tout système triphasé, les enroulements primaires et secondaires peuvent être couplés en étoile, en triangle ou en zig-zag. La figure (I.32)

Le couplage zig-zag est obtenu en divisant les trois bobines d'un enroulement en six demi-bobines puis, pour réaliser chaque phase, en mettant en série deux demi-bobines prises sur des noyaux différents et connectées en sens inverse. [21]



**Figure (I-32) :** Les trois différents types des couplages

Le choix des couplages des enroulements d'un transformateur repose sur trois remarques :

- La présence du conducteur neutre dans une distribution basse tension permet de disposer des deux types de tension : la tension simple pour l'usage domestique usuel, le système triphasé de tension pour l'usage artisanal (alimentation force)
- Il est intéressant, coté haute tension, de disposer d'un couplage ayant un neutre et de mettre ce neutre, ainsi que le circuit magnétique et les parties métalliques comme le cuve du transformateur au potentiel de la terre. Ceci permet de réduire les distances d'isolement de bobines haute tension.
- Il faut éviter d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire d'un transformateur. Ceci évite de transmettre intégralement le déséquilibre éventuel des courants d'un côté du transformateur à l'autre. [21]

Donc les utilités des différents couplages comme suit :

- **Couplage étoile-étoile (Yy) :** Ce couplage permet de relier deux parties de réseau avec, au primaire et au secondaire la présence d'un point neutre. Si le neutre est relié sur des charges déséquilibrées, l'équilibre des tensions est assuré, si le neutre n'est pas relié il y a un risque de décalage du point neutre. En dehors de cela, ce couplage permet minimiser les contraintes en tension sur les bobinages qui ne doivent supporter que les tensions simples. [19]
- **Couplage étoile-triangle (Yd et Dy) :** les deux couplages permet le passage d'un réseau triphasé trois fils à un réseau quatre fils ou inversement. Mais cette transformation provoque le déphasage des systèmes de tension secondaire et primaire. L'indice horaire n'est jamais nul pour les deux couplages.

L'utilité principale de ces couplages réside en la création locale d'un point neutre.

- **Couplage triangle-zigzag (Dz0) :** l'indice horaire est nul dans ce couplage, il est permet de passer un réseau trois fils à un réseau quatre fils sans déphasage. La réparation de la charge

pour le bobinage zigzag est meilleure par rapport au cas étoile, mais il est légèrement surdimensionné.

- **Couplage étoile-zigzag (Yz et Zy) :** ces couplages permettent de relier deux réseaux quatre fils en apportant des déphasages plus variés que dans le cadre des couplages Yy. [19]

## I.8.2.6 L'indice horaire :

L'indice horaire indique le déphasage des tensions simples correspondantes  $V_A$  et  $V_a$ ,  $V_B$  et  $V_b$ ,  $V_C$  et  $V_c$  à vide. Dépendant des couplages primaire et secondaire. Ce déphasage  $\theta$  est multiple de  $\frac{\pi}{6}$  alors L'indice horaire sera souvent exprimé en heures pour plus de commodité.

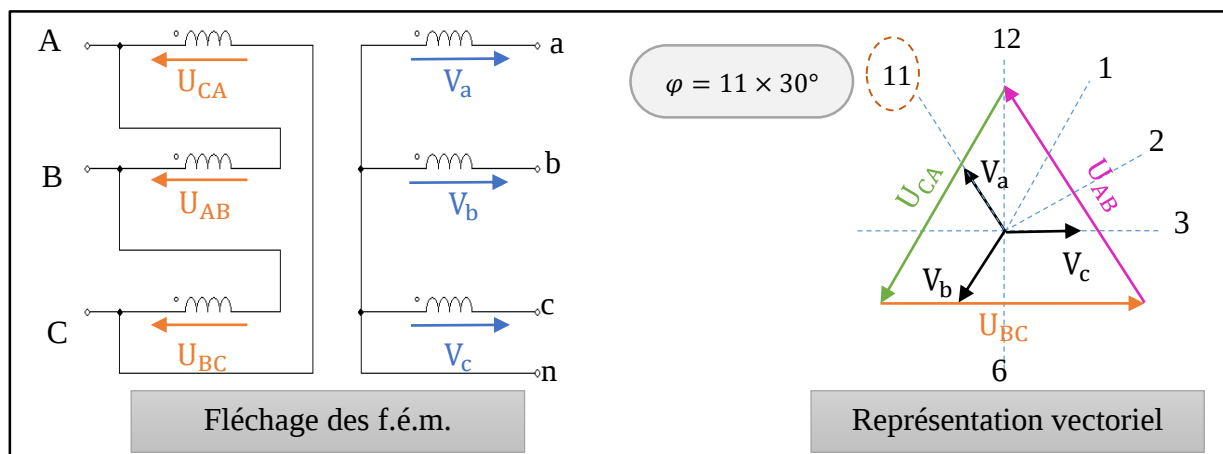
L'indice horaire indique sa valeur :

- Comptée dans le sens horaire.
- En prenant pour origine des phases la tension primaire.
- Par un nombre égal au quotient de  $\theta$  par  $\frac{\pi}{6}$

On peut déduire l'indice horaire par :

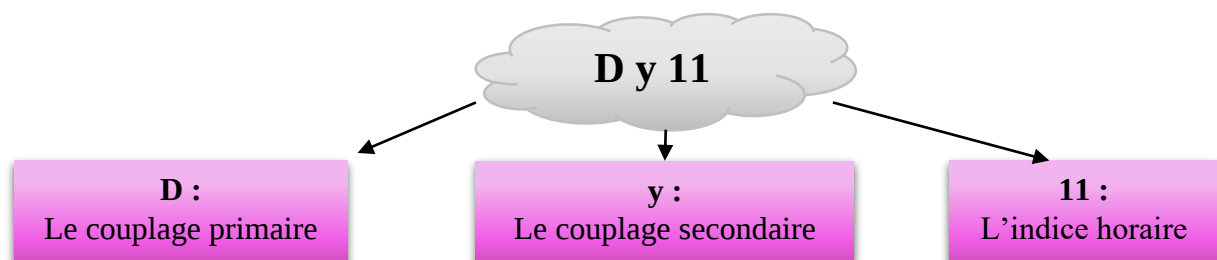
**Calcul théorique :** Sur le diagramme de Fresnel, on comparera la tension secondaire avec la tension primaire de même nom.

**Détermination pratique :** méthode des électriciens : sur le diagramme de Fresnel, le système des trois tensions secondaires a tourné de (l'indice horaire multiplié fois  $30^\circ$ ) par rapport au système de tensions primaires. Les tensions au secondaire formeront un système équilibré direct L'indice horaire pour le transformateur représenté par la figure (I.31) est :



**Figure (I-33) :** L'indice horaire d'un transformateur  $Dy_1$

Pour simplifier la représentation, on donne le transformateur représenté par la figure (I.31) un nom qui résume toutes les caractéristiques.



Avec :

N = neutre sorti côté HTA, n = neutre sorti côté BT

Le tableau (I.1) donne les principaux couplages des transformateurs usuels :

| Symbole     | Schéma des couplages | Rapport De transformation        | Indice horaire             | Diagramme vectoriel |
|-------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| <b>Yy0</b>  |                      | $m = \frac{N_1}{N_2}$            | $\theta = 0$               |                     |
| <b>Yd1</b>  |                      | $m = \frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$   | $\theta = \frac{\pi}{6}$   |                     |
| <b>Yz11</b> |                      | $m = \frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$ | $\theta = \frac{11\pi}{6}$ |                     |
| <b>Dd0</b>  |                      | $m = \frac{N_1}{N_2}$            | $\theta = 0$               |                     |

|             |  |                                |  |
|-------------|--|--------------------------------|--|
| <b>Dy11</b> |  | $m = \frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$ |  |
| <b>Dz0</b>  |  | $m = \frac{2N_1}{3N_2}$        |  |

**Tableau (I-1) :** Les couplages et les caractéristiques des transformateurs triphasés

## I.9 Le système triphasé :

Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, les systèmes industriels sont alimentés par des tensions triphasées. Les raisons qui ont conduit à choisir ce mode de distribution, sont de deux ordres :

- une économie de conducteur pour les lignes, pour une puissance installée donnée ;
- les machines tournantes polyphasées, donc en particulier triphasées, sont plus performantes que leurs homologues monophasées. Les premières machines tournantes triphasées ont été construites dès 1880, dix ans à peine après la naissance des machines à courant continu. Elles sont aujourd'hui prépondérantes dans la production d'énergie électrique et dans la transformation d'énergie électromécanique.

### I.9.1 Systèmes triphasés équilibrés :

Un circuit triphasé est équilibré quand la source et la charge sont toutes deux équilibrées. Une source triphasée est équilibrée lorsque les trois tensions générées sont de même amplitude et déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre [5]

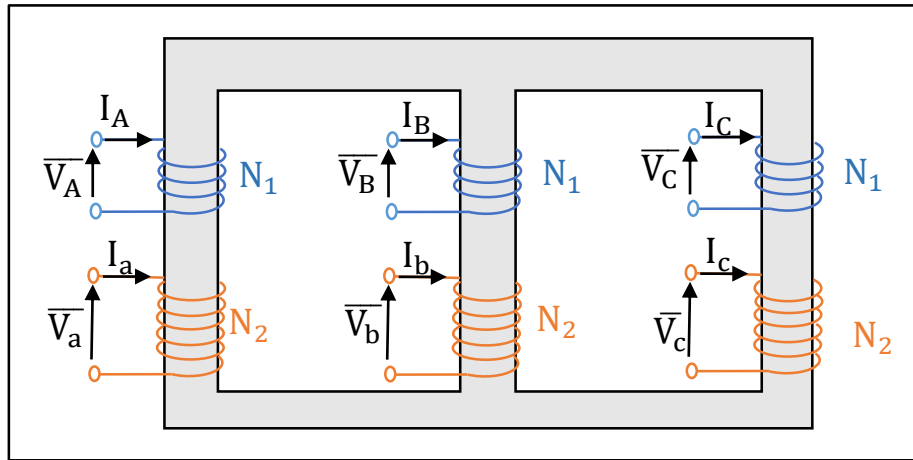
Une source triphasée équilibrée est un ensemble de trois grandeurs sinusoïdales de même nature, de même fréquence, de même amplitude et déphasées entre elles de  $(2\pi/3)$  [18] .

Une charge triphasée est équilibrée lorsque les impédances de chacune des trois phases sont identiques en grandeur et en angle. Il en résulte que dans un circuit équilibré, les trois courants de ligne sont de même amplitude et décalés de 120° l'un par rapport aux autres. [5]

On prend un système triphasé des tensions  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$ , ce système est équilibré si :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_m \cos(\omega t) \\ V_2 &= V_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_3 &= V_m \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

Pour l'étude du transformateur triphasé en régime équilibré, on reprendra les résultats établis dans le cas du transformateur monophasé. Les résultats sont appliqués à chacune des trois colonnes formant le transformateur triphasé. [1]



**Figure (I-34) :** Le circuit magnétique d'un transformateur triphasé en régime équilibré

Tell qu'on suppose que les enroulements sont identiques respectivement au primaire et au secondaire. On a :

- **résistance par phase primaire et secondaire :**  
 $r_A = r_B = r_C = r_1$  ,  $r_a = r_b = r_c = r_2$
- **inductance de fuites primaire et secondaire par phase :**  
 $l_A = l_B = l_C = l_1$  ,  $l_a = l_b = l_c = l_2$
- **F.E.M par phase primaire et secondaire :**  
 $E_A = E_B = E_C = E_1$  ,  $E_a = E_b = E_c = E_2$
- **courant au primaire et secondaire :**  
 $I_A = I_B = I_C = I_1$  ,  $I_a = I_b = I_c = I_2$
- **Tension par phase primaire et secondaire**  
 $V_A = V_B = V_C = V_1$  ,  $V_a = V_b = V_c = V_2$

Donc on a :

## I.9.1.1 Equations de F.m.m :

On prend un transformateur soit couplé en Yy ou Dd comme un exemple :

- a) Cas d'un seul enroulement triphasé secondaire :

$$N_1 \cdot \bar{I}_A - N_2 \cdot \bar{I}_a = N_1 \cdot \bar{I}_{AVr} = \Re \bar{\Phi}_A \dots \dots \dots (I.9)$$

- b) Cas de deux enroulements triphasés au secondaire :

$$N_1 \cdot \bar{I}_A - N_2 \cdot \bar{I}_a - N_2 \cdot \bar{I}_a = N_1 \cdot \bar{I}_{AVr} \dots \dots \dots (I.10)$$

### I.9.1.2 Equations des tensions :

a) Primaire :

$$\bar{V}_1 = r_1 \cdot \bar{I}_1 + j l_1 \omega \cdot \bar{I}_1 + \bar{E}_1 \dots \dots \dots (I. 11)$$

$$V_A = V_{1\max} \cos(\omega t)$$

$$V_B = V_{1\max} \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

$$V_C = V_{1\max} \cos(\omega t - 4\pi/3)$$

b) Secondaire :

$$\bar{V}_2 = -(r_2 + j l_2 \omega) \cdot \bar{I}_2 + \bar{E}_2 \dots \dots \dots (I. 12)$$

$$V_a = V_{2\max} \cos(\omega t)$$

$$V_b = V_{2\max} \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

$$V_c = V_{2\max} \cos(\omega t - 4\pi/3)$$

### I.9.2 Le fonctionnement d'un transformateur triphasé en régime équilibré :

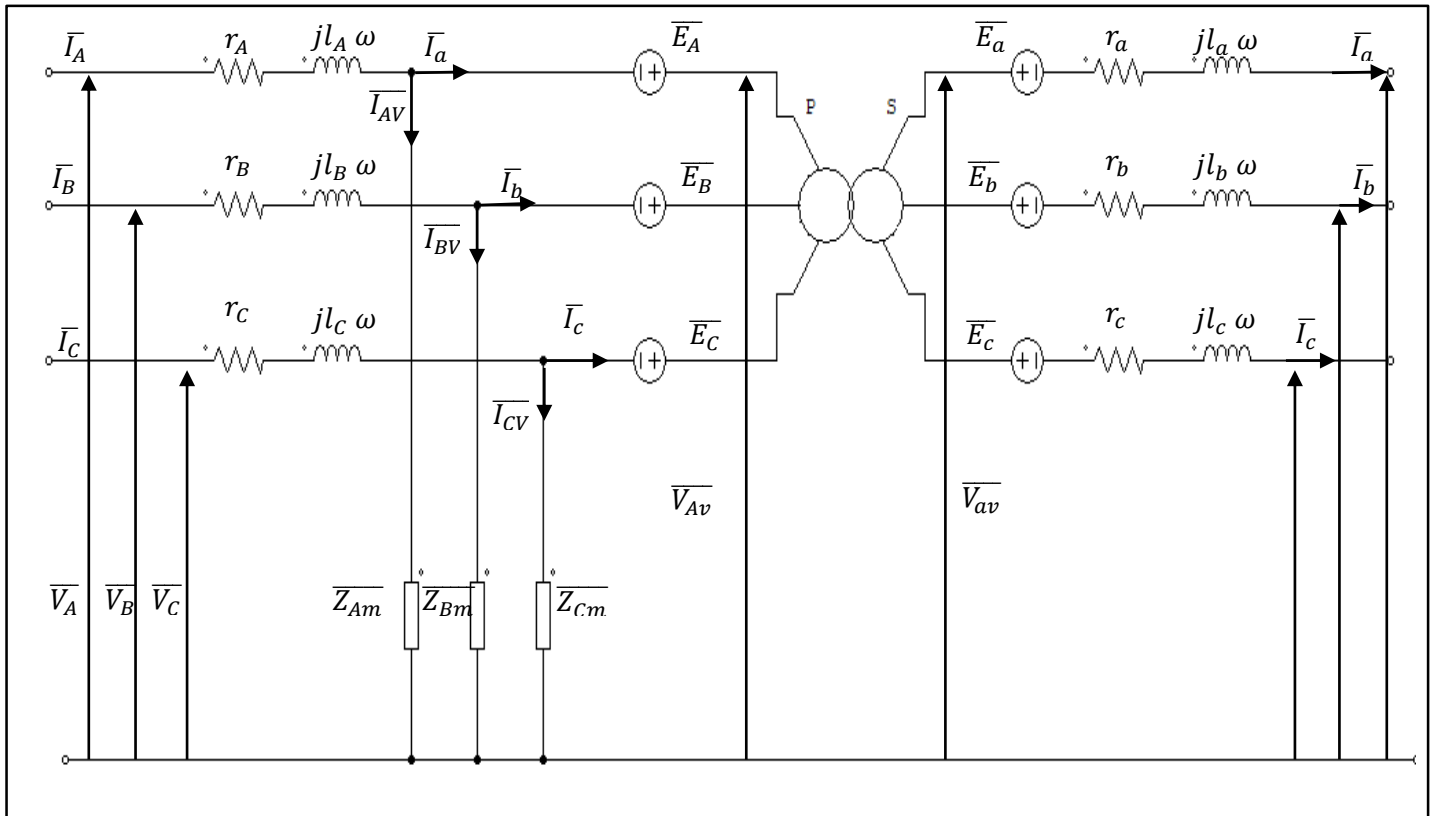
Le schéma d'un transformateur réel ramené au secondaire c'est l'équivalent d'un transformateur parfait ramené au secondaire c'est-à-dire qu'on alimente sous la tension primaire il donne au secondaire la tension secondaire à vide, en série avec un dipôle composé de la résistance et la réactance ramenées au secondaire. Eventuellement on corrige le schéma de ce transformateur en remplaçant le  $R_f$  et le  $X_m$  qu'ils sont en parallèle par l'impédance magnétisante  $Z_m$ . Celle-ci traversé par le courant primaire à vide est consomme les puissances active et réactive correspondant aux pertes à vide.

On gardera la même représentation pour le cas d'un transformateur triphasé.

Si l'on ramène un transformateur au secondaire on peut considérer qu'il est constitué d'un transformateur triphasé parfait présentant le même rapport de transformation et le même indice horaire que le transformateur réel à vide , en série avec dipôle dans chaque phase .

Chaque dipôle met en évidence la chute de tension  $\Delta \bar{V}_a = \bar{V}_{av} - \bar{V}_a$  par phase dans un fonctionnement en charge [21].

Alors on place une impédance magnétisante  $Z_m$  sous chaque tension simple primaire, cette impédance absorbant les pertes soit active au réactive à vide par phase, et les neutres N et n peuvent être réels ou fictifs. Donc le schéma équivalent du transformateur triphasé en régime sinusoïdal équilibré établi en utilisant les grandeurs étiquetées est le suivant :



**Figure (I-35) :** Le schéma équivalent du transformateur triphasé en régime sinusoïdal équilibré

## I.10 Conclusion :

Toutes les études sur les transformateurs confirment l'importance de ces appareils, aussi nous aidera également à comprendre le fonctionnement d'un grand nombre des machines telles que moteurs d'induction, alternateurs, compensateurs synchrones, etc., car ces machines utilisent aussi le principe de l'induction électromagnétique. C'est pourquoi nous n'avons pas réduit les informations disponibles et certains détails ces appareils.

Le système triphasé équilibré est un ensemble de trois grandeurs sinusoïdales de même nature, de même fréquence, de même amplitude et déphasées entre elles de  $(2\pi/3)$ .

Pour étudier le fonctionnement d'un transformateur en régime équilibré on utilise le schéma réel ramené au secondaire qu'il est l'équivalent d'un transformateur parfait ramené au secondaire c'est-à-dire qu'on alimente sous la tension primaire il donne au secondaire la tension secondaire à vide, en série avec un dipôle composé de la résistance et la réactance ramenées au secondaire, en cas monophasé.

En cas triphasé on ramène le transformateur au secondaire on peut considérer qu'il est constitué d'un transformateur triphasé parfait présentant le même rapport de transformation et le même indice horaire que le transformateur réel à vide, en série avec dipôle dans chaque phase.

A pink ribbon banner with a 3D effect, featuring a central rectangular section and two pointed ends that fold over. The text "Chapitre II" is centered on the banner.

# Chapitre II

## Le système triphasé déséquilibré

## **Chapitre II. Le système triphasé déséquilibré**

### **II.1 Introduction :**

Le système triphasé est équilibré, si on peut ramener à un schéma monophasé équivalent rendant simple sa résolution et la détermination théorique de l'ensemble de ses grandeurs électriques, aussi l'application de l'équivalent monophasé se généralise aux lignes, transformateurs et machine électrique au point de pouvoir modéliser de très grandes installations, ou même des réseaux électriques, par des schéma simples.

D'autre part, pour le système déséquilibré tout se complique, il ne reste que quelques cas particuliers dont la résolution est chose facile. A cause de l'absence du schéma équivalent la modélisation simple des circuits est impossible en amont du déséquilibre d'une grande installation.

Ce chapitre présente tout d'abord le système triphasé déséquilibré, et la méthode de composantes symétriques permettant une approche générale de l'ensemble des systèmes triphasés, c'est-à-dire, qu'elle est cette méthode est comment on détermine les composantes symétriques, puis on présente le fonctionnement des transformateurs en régime déséquilibre.

### **II.2 Présentation du système triphasé déséquilibré :**

On dit d'un système triphasé qu'il est déséquilibré si toutes les grandeurs électriques analogues ne sont pas égales d'une phase à l'autre. Dans un système déséquilibré, on ne peut pas appliquer les relations évoquées à l'équilibre. [19]

Dans un circuit déséquilibré, il n'y a la plupart du temps que la charge qui soit déséquilibrée, car une source normale est construite de façon que ses trois phases soient aussi identiques que possible. [5]

L'étude d'un circuit quelconque en régime déséquilibre est très compliquée, mieux encore il existe une méthode mettant à profit ces symétries de façon à permettre un raisonnement basé de schéma monophasé équivalents. Cette méthode représente l'outil le plus utilisé pour les études et les traitements des systèmes triphasés industriels on l'appelle "les composants symétriques".

#### **II.2.1 Les composants symétriques :**

Cette théorie s'applique aux grandeurs vectorielles «V» et «i». Introduite dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, elle permet le calcul des circuits déséquilibrés. C'est une méthode de calcul matriciel. [22]

La théorie des composantes symétrique s'applique tout aussi bien à des vecteurs tournants, tels que des tensions et des courants, qu'à des vecteurs fixes, tels que des admittances. [5]

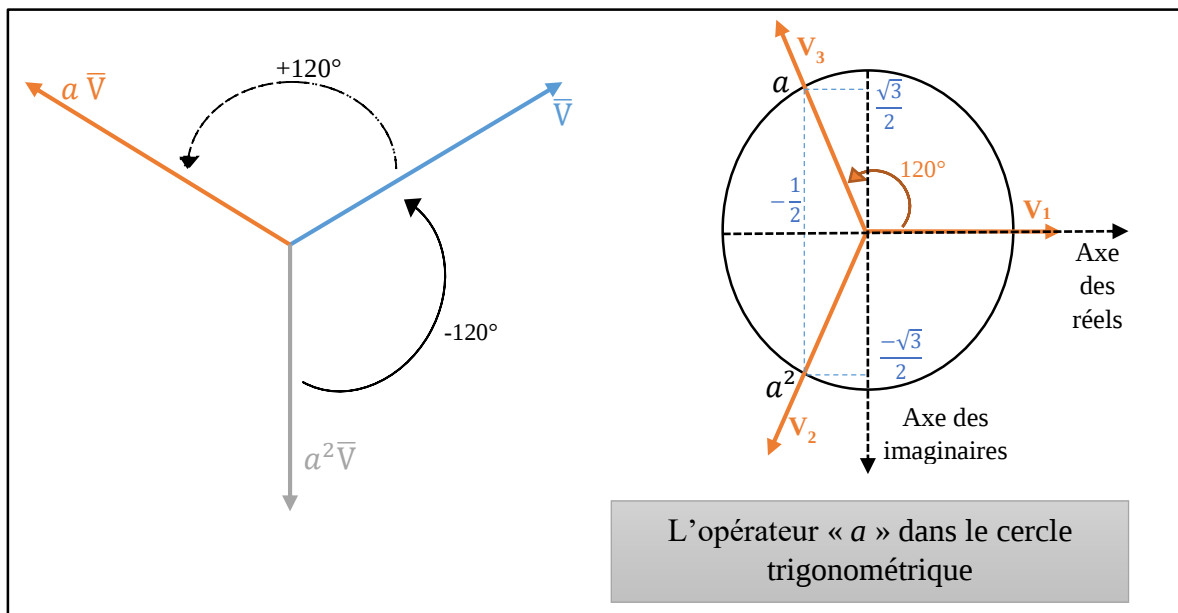
Cette méthode consiste en un changement de base des vecteurs caractéristiques d'un système triphasé. Cette méthode est matricielle et débouche sur la constitution de schéma équivalent simples, l'ensemble des matrices utilisées dans le cadre des composantes symétriques est basé sur l'utilisation de l'opérateur «  $a$  ». [19]

## II.2.2 L'opérateur « $a$ » :

L'opérateur de rotation est un nombre complexe correspondant à une rotation de  $120^\circ$ , dans le plan complexe l'opérateur «  $a$  » est égale à :

$$a = e^{j2\pi/3}$$

Tout vecteurs on nombre complexe par exemple  $\bar{V}$  multiplié par l'opérateur «  $a$  », subit ainsi une rotation de  $120^\circ$ . La figure (II.1)



**Figure (II-1) : L'opérateur «  $a$  »**

Les écritures et les propriétés suivantes sont ainsi racontées de façon assez inégale :

$$a = e^{j2\pi/3} = \cos(2\pi/3) + j \sin(2\pi/3) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j4\pi/3} = \cos(4\pi/3) + j \sin(4\pi/3) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} , a^* \text{ c'est le conjugué de } a$$

$$a^3 = 1 \text{ Car } a^3 = e^{j6\pi/3} = e^{j2\pi} = 1$$

$$a^4 = a , a^5 = a^2 = a^*$$

$$1 + a + a^2 = 0 , \text{ a cause de } (1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = 0)$$

## II.2.3 Le système triphasé déséquilibré et la transformation de Fortescue :

Le raisonnement inverse de la génération d'un système déséquilibré à l'aide de systèmes équilibrés conduit au théorème de " Charles.L.Fortescue ", le pionnier des composantes symétriques. Sous forme générale, ce théorème s'énonce comme suit : Un ensemble non équilibré de  $n$  vecteurs coplanaires, concourants et de même nature, peut être représenté par  $n$  systèmes symétriques de  $n$  vecteurs. [5]

Soit un système déséquilibré, on prend par un exemple les grandeurs sinusoïdales de tensions simples  $\bar{V}_1, \bar{V}_2$  et  $\bar{V}_3$ , pour étudier ce système on applique le principe de décomposition, on peut considérer le système déséquilibré comme la superposition de trois systèmes équilibrés qui sont le direct, l'inverse et l'homopolaire. Le tableau (II.1) :

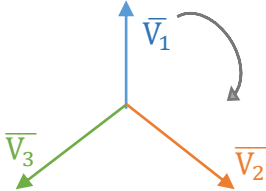
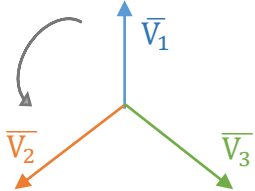
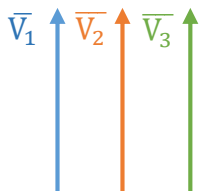
| Les trois systèmes équilibrés                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Le système direct (d)                                                                                                                                                                                                                        | Le système inverse (i)                                                                                                                                                                                                                       | Le système homopolaire (o)                                                                                                  |
| <br>$\bar{V}_1 = V_{\max} \cos(\omega t) (\text{réf})$<br>$\bar{V}_2 = V_{\max} \cos(\omega t - 2\pi/3)$<br>$\bar{V}_3 = V_{\max} \cos(\omega t - 4\pi/3)$ | <br>$\bar{V}_1 = V_{\max} \cos(\omega t) (\text{réf})$<br>$\bar{V}_2 = V_{\max} \cos(\omega t - 4\pi/3)$<br>$\bar{V}_3 = V_{\max} \cos(\omega t - 2\pi/3)$ | <br>$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \bar{V}_3$ |

Tableau (II-1) : Les trois systèmes équilibrés

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{V}_0 + \bar{V}_d + \bar{V}_i \\ \bar{V}_2 = \bar{V}_0 + a^2 \bar{V}_d + a \bar{V}_i \\ \bar{V}_3 = \bar{V}_0 + a \bar{V}_d + a^2 \bar{V}_i \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$a$ : Opérateur de rotation

$\bar{V}_d, a\bar{V}_d, a^2\bar{V}_d$  : Le système direct

$\bar{V}_i, a\bar{V}_i, a^2\bar{V}_i$  : Le système inverse

$\bar{V}_0$  : Le système homopolaire

Les vecteurs  $\bar{V}_0, \bar{V}_d$  et  $\bar{V}_i$  sont les composantes ou les coordonnées symétriques du système réel  $\bar{V}_1, \bar{V}_2$  et  $\bar{V}_3$ .

Le système d'équation peut également être écrit sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \end{bmatrix} \quad (\text{II. 2})$$

Encore :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} = |F| \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II. 3)$$

|F| C'est la matrice de **Fortescue** :

$$|F| = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II. 4)$$

Et la matrice inverse de **Fortescue** :

$$|F|^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II. 5)$$

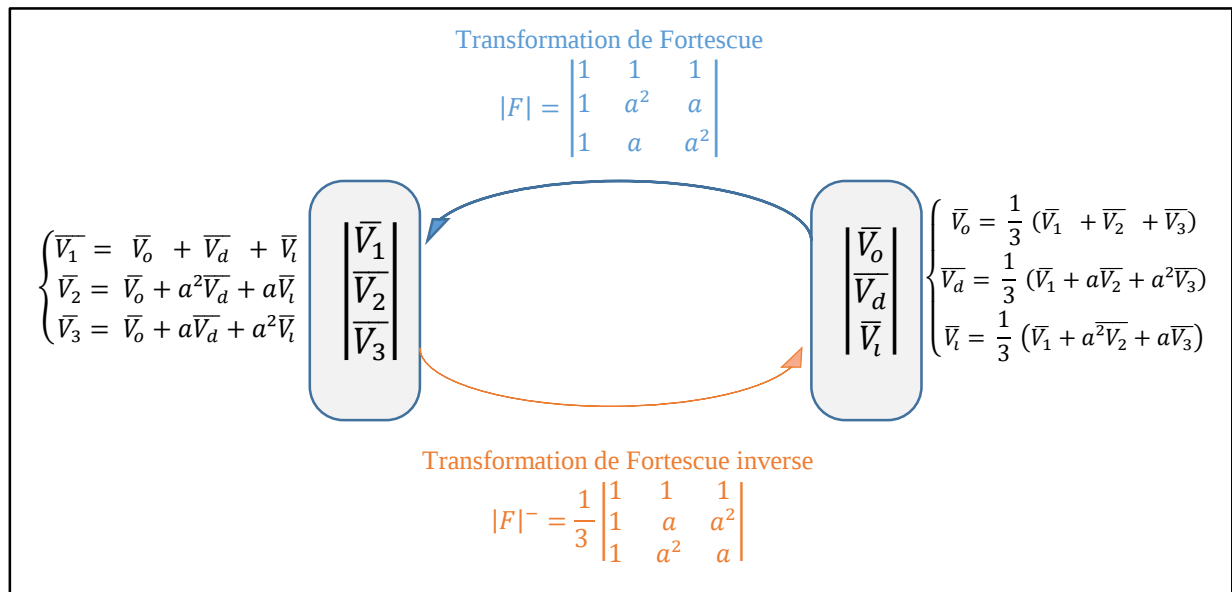
Ces résultats permettent d'écrire le système d'équation inverse :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \end{bmatrix} = |F|^{-1} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II. 6)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix}$$

Alors :

$$\begin{cases} 3\bar{V}_0 = \bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3 \\ 3\bar{V}_d = \bar{V}_1 + a\bar{V}_2 + a^2\bar{V}_3 \\ 3\bar{V}_i = \bar{V}_1 + a^2\bar{V}_2 + a\bar{V}_3 \end{cases} \dots \dots \dots (II. 7)$$



**Figure (II-2) : Les composantes symétriques**

On peut prendre ces résultats des composantes symétriques comme un résultat général pour un système  $q$ phasé quelconque. C'est-à-dire, si on a un système  $q$ phasé déséquilibré, ce système peut être considéré comme la superposition de  $q$  systèmes  $q$ phasés équilibrés qu'ils sont : un système direct d'ordre 1, un système inverse d'ordre 2, ..., un système d'ordre  $q-1$  ou inverse d'ordre 1, un système homopolaire d'ordre  $q$ . [21]

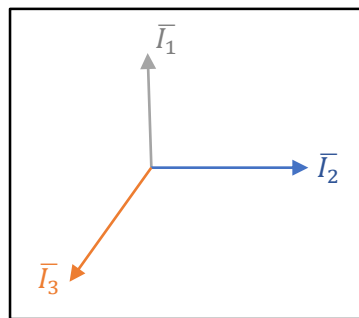
Aussi on peut appliquer la décomposition en composants symétriques soit pour des vecteurs fixes soit pour des vecteurs tournants qu'ils tournent à la même vitesse. Cet outil peut être utilisé sur les représentations complexes des tensions, des courants, aussi des impédances et admittances.

## II.3 Détermination des composants symétriques :

### II.3.1 La détermination directe des composants symétriques :

On prend le cas d'un système des courants triphasé comme un exemple pour déterminer les composants symétriques

Soit un système des courants représenté dans la figure (II.3) :



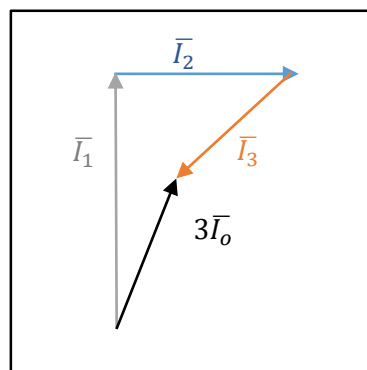
**Figure (II-3) :** Représentation vectorielle d'un système triphasé des courants

Le système des potentiels est identique aux systèmes des courants. On utilise l'opérateur «  $a$  » pour trouver les systèmes suivants :

- **Système homopolaire :**

Selon la figure (II.4) on a :

$$3\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$$



**Figure (II-4) :** Le système Homopolaire

- **Système directe :**

Selon la figure (II.5) on a la composante directe :

$$3\bar{I}_d = \bar{I}_1 + a\bar{I}_2 + a^2\bar{I}_3$$

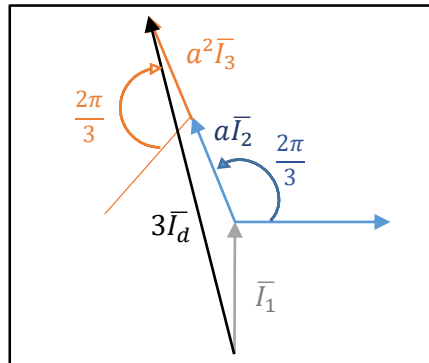


Figure (II-5) : Le système Direct

- **Système inverse :**

Selon la figure (II.6) on a la composante directe :

$$3\bar{I}_i = \bar{I}_1 + a^2\bar{I}_2 + a\bar{I}_3$$

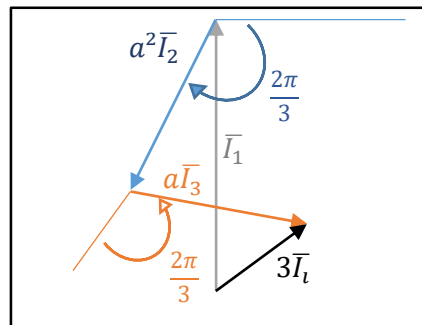


Figure (II-6) : Le système Inverse

- **Reconstitution du système réel :**

Le retour à partir des composants aux courants réels, nous donne :

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = \bar{I}_o + \bar{I}_d + \bar{I}_i \\ \bar{I}_2 = \bar{I}_o + a^2\bar{I}_d + a\bar{I}_i \\ \bar{I}_3 = \bar{I}_o + a\bar{I}_d + a^2\bar{I}_i \end{cases}$$

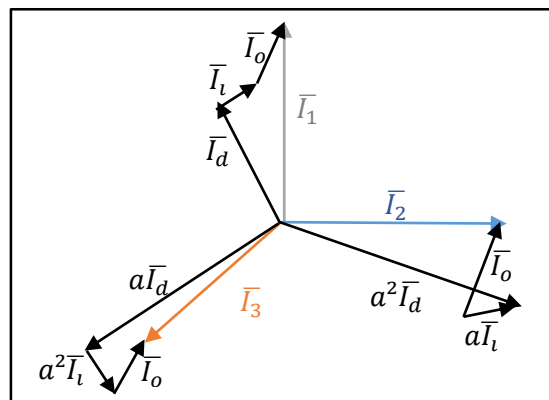


Figure (II-7) : Le retour à partir des composants aux courants réels

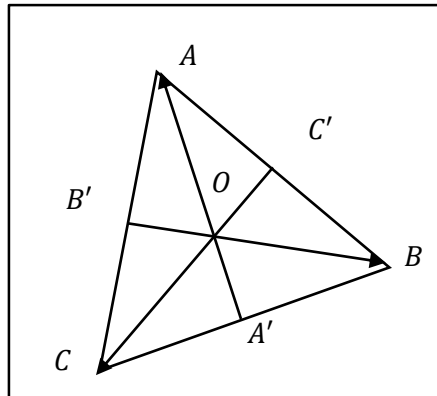
## II.3.2 Méthodes simplifiées pour la détermination des composantes :

- **Composante homopolaire :**

La représentation et la construire de la composante homopolaire est très facile puisqu'elle se déduit de la somme vectorielle :

$$\overline{V}_0 = \frac{1}{3} (\overline{V}_1 + \overline{V}_2 + \overline{V}_3) \dots \dots \dots (II.8)$$

Considérons le système des trois tensions  $\overline{V}_1, \overline{V}_2$  et  $\overline{V}_3$  sont représenté par les vecteurs  $\overline{OA}, \overline{OB}$  et  $\overline{OC}$ . La composante homopolaire est nulle, puisque le point  $O$  soit au point de concours des médianes. Selon la représentation vectorielle suivant et la relation (II.8).



On a :

$$\overline{V}_0 = \frac{1}{3} (\overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC})$$

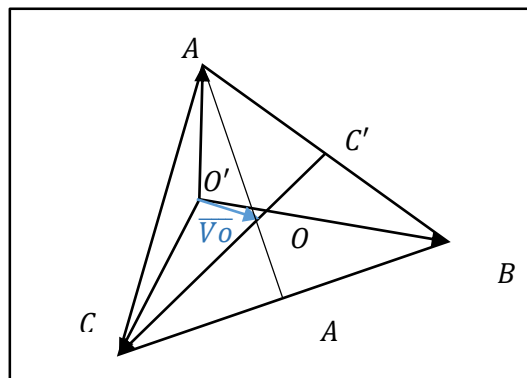
$$\overline{V}_0 = \frac{1}{9} (2\overline{A'A} + 2\overline{B'B} + 2\overline{C'C})$$

$$\overline{V}_0 = \frac{1}{9} (\overline{A'B} + \overline{BA} + \overline{A'C} + \overline{CA} + \overline{B'A} + \overline{AB} + \overline{B'C} + \overline{CB} + \overline{C'A} + \overline{AC} + \overline{C'B} + \overline{BC})$$

Puisque :  $\overline{AB} = -\overline{BA}$ ,  $\overline{BC} = -\overline{CB}$ ,  $\overline{AC} = -\overline{CA}$ ,  $\overline{A'B} = -\overline{B'A}$ ,  $\overline{B'C} = -\overline{C'B}$ ,  $\overline{A'C} = -\overline{C'A}$

$$\overline{V}_0 = 0$$

- Soit le système des tensions  $\overline{V}_1, \overline{V}_2$  et  $\overline{V}_3$  sont représenté par les vecteurs  $\overline{O'A}, \overline{O'B}$  et  $\overline{O'C}$ , si  $O$  est le centre du triangle  $ABC$ .



Selon la représentation vectorielle précédente et la relation (II.8) on a :

$$\overline{V}_0 = \frac{1}{3} (\overline{O'A} + \overline{O'B} + \overline{O'C})$$

$$\overline{V}_0 = \frac{1}{3} (\overline{O'O} + \overline{OA} + \overline{O'O} + \overline{OB} + \overline{O'O} + \overline{OC})$$

Puisque  $\overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC} = 0$

$$\overline{V}_0 = \overline{O'O}$$

- On peut remarquer que la composante homopolaire d'un système triphasé équilibré est nulle dès lors que  $\overline{V}_1 + \overline{V}_2 + \overline{V}_3 = 0$ , c'est-à-dire ; lorsque l'origine des vecteurs correspond au centre de gravité du triangle formé par les sommets, c'est le cas de façon systématique dès lors qu'on considère un système de tension composées. Pour mesurer le composant homopolaire des courants dans le circuit magnétique toroïdal d'un transformateur de courant on fait passer les trois fils de phase dans ce circuit, avec un courant secondaire indiquer  $3\overline{I}_0$

### • Composante direct et inverse :

Pour déterminer les composantes direct et inverse on utilise le principe suivant : tous les systèmes représentés par des vecteurs groupés en étoile "quel que soit le centre de cette étoile", ont les mêmes composantes directes et inverses, si les vecteurs ont mêmes extrémités. C'est-à-dire deux systèmes triphasés composés de vecteurs dont les sommets sont identiques ont les mêmes composantes directes et inverses. Alors, il est préférable de construire ces composantes en considérant le sommet d'un des vecteurs comme origine du système triphasé.

- La figure (II.8) représente un système des courantes  $\overline{I}_1, \overline{I}_2$  et  $\overline{I}_3$  représenté par les vecteurs  $\overline{OA}, \overline{OB}$  et  $\overline{OC}$  respectivement, comparons par un autre système  $\overline{I}_1', \overline{I}_2'$  et  $\overline{I}_3'$  qu'il représenté par les vecteurs  $\overline{O'A}, \overline{O'B}$  et  $\overline{O'C}$ .

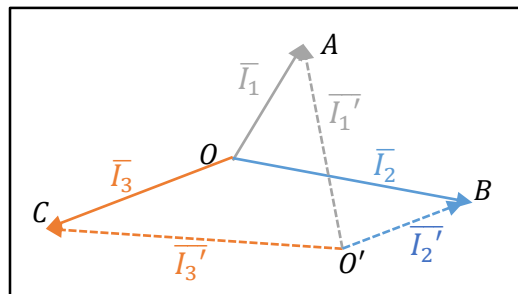


Figure (II-8)

Pour le premier système :

$$\overline{I}_d = \frac{1}{3} (\overline{I}_1 + a \overline{I}_2 + a^2 \overline{I}_3)$$

$$\overline{I}_d = \frac{1}{3} (\overline{OA} + a \overline{OB} + a^2 \overline{OC})$$

Et :

$$\overline{I}_1 = \frac{1}{3} (\overline{I}_1 + a^2 \overline{I}_2 + a \overline{I}_3)$$

$$\overline{I}_1 = \frac{1}{3} (\overline{OA} + a^2 \overline{OB} + a \overline{OC})$$

Pour le second :

$$\overline{I}_d' = \frac{1}{3} (\overline{I}_1' + a \overline{I}_2' + a^2 \overline{I}_3')$$

$$\overline{I}_d' = \frac{1}{3} (\overline{O'A} + a \overline{O'B} + a^2 \overline{O'C})$$

Et :

$$\overline{I}_1' = \frac{1}{3} (\overline{I}_1' + a^2 \overline{I}_2' + a \overline{I}_3')$$

$$\overline{I}_1' = \frac{1}{3} (\overline{O'A} + a^2 \overline{O'B} + a \overline{O'C})$$

Puisque :  $\overline{O'A} = \overline{O'O} + \overline{OA}$  ,  $\overline{O'B} = \overline{O'O} + \overline{OB}$  ,  $\overline{O'C} = \overline{O'O} + \overline{OC}$

On a :

$$\overline{I'_d} = \frac{1}{3} ( \overline{O'O} + \overline{OA} + a \overline{O'O} + a \overline{OB} + a^2 \overline{O'O} + a^2 \overline{OC} )$$

$$\overline{I'_i} = \frac{1}{3} ( \overline{O'O} + \overline{OA} + a^2 \overline{O'O} + a^2 \overline{OB} + a \overline{O'O} + a \overline{OC} )$$

$$\text{Avec : } \overline{O'O}(1 + a + a^2) = 0$$

On peut trouver que :

$$\overline{I'_d} = \frac{1}{3} ( \overline{OA} + a \overline{OB} + a^2 \overline{OC} ) = \overline{I_d}$$

$$\overline{I'_i} = \frac{1}{3} ( \overline{OA} + a^2 \overline{OB} + a \overline{OC} ) = \overline{I_i}$$

- Donc il est possible de déduire la détermination simplifiée suivant :

Soit le système  $\overline{OA}$  ,  $\overline{OB}$  et  $\overline{OC}$  représenté dans la figure (II.9), on peut considérer le nouveau système des vecteurs  $(\overline{CA}, \overline{CB}, 0)$  dont l'origine est le point C, ce système a les mêmes composants direct  $\overline{I_d}$  et inverse  $\overline{I_i}$ .

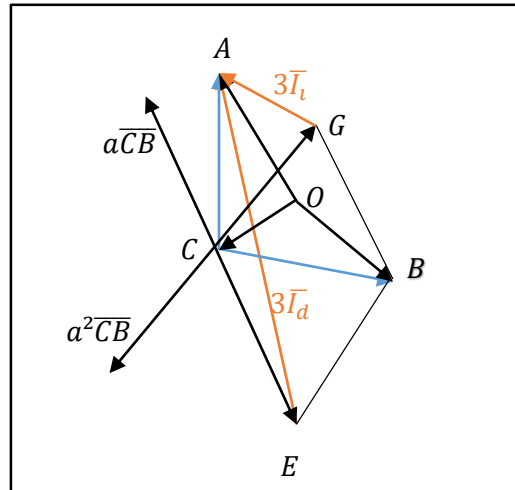


Figure (II-9)

Alors :

$$\overline{I_d} = \frac{1}{3} ( \overline{CA} + a \overline{CB} )$$

$$\overline{I_i} = \frac{1}{3} ( \overline{CA} + a^2 \overline{CB} )$$

Selon la figure (II.9) on a :

$$a \overline{CB} = -\overline{CE} , a^2 \overline{CB} = -\overline{CG}$$

Alors :

$$\overline{I_d} = \frac{1}{3} ( \overline{CA} - \overline{CE} )$$

$$\overline{I_i} = \frac{1}{3} ( \overline{CA} - \overline{CG} )$$

Avec :

$$\overline{CA} - \overline{CE} = -\overline{AC} - \overline{CE} = -\overline{AE} = \overline{EA}$$

$$\overline{CA} - \overline{CG} = -\overline{AC} - \overline{CG} = -\overline{AG} = \overline{AG}$$

On a :

$$\bar{I}_d = \frac{1}{3} \bar{E}\bar{A}$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3} \bar{G}\bar{A}$$

Pratiquement on construit sur le côté BC deux triangles équilatéraux BCG symétriques par rapport à BC,  $\bar{E}\bar{A}$  donne  $3\bar{I}_d$ , et  $\bar{G}\bar{A}$  donne  $3\bar{I}_1$

## II.4 Composants symétriques des grandeurs triphasées :

Les composantes symétriques permettent de raisonner sur les grandeurs électriques des systèmes triphasés à partir d'une nouvelle base profitant des symétries de ces systèmes. Tout comme dans les circuits triphasés classiques, il est nécessaire de connaître les relations de passage des tensions simples aux tensions composées, des courants de ligne aux courants de phase et également de définir les puissances électriques correspondantes.

### II.4.1 Relation entres les composants des tensions simples et des tensions composées :

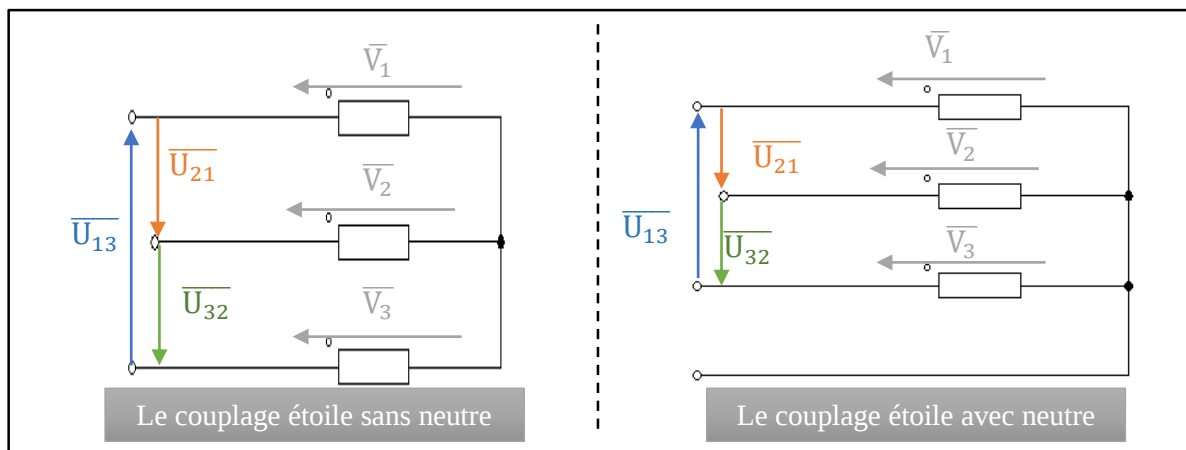
Soit on prend un système de tension simple  $\bar{V}_1, \bar{V}_2$  et  $\bar{V}_3$  :

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{V}_0 + \bar{V}_d + \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 = \bar{V}_0 + a^2\bar{V}_d + a\bar{V}_1 \dots \dots \dots (II.9) \\ \bar{V}_3 = \bar{V}_0 + a\bar{V}_d + a^2\bar{V}_1 \end{cases}$$

Pour le couplage étoile :

En régime équilibré, le potentiel du point (N) est nul, car les trois courants forment un système équilibré, et leur somme vectorielle est nulle. Supposons que le montage soit accidentellement déséquilibré. L'intensité du courant au nœud (N) s'annule nécessairement, mais les tensions aux bornes des dipôles diffèrent. Le système de tensions simples est déséquilibré. Pour parer à ce risque de déséquilibre, on relie le point commun de l'étoile (N) à un quatrième fil de ligne, appelé « fil neutre », pouvant supporter la somme (vectorielle) des trois courants. [22]

La figure (II.10) représente le couplage étoile avec neutre et sans neutre :



**Figure (II-10) : Le couplage étoile pour un circuit triphasé**

Pour notre étude on prend le couplage étoile sans neutre, on peut observer que les trois bornes de sortie des trois charges sont réunies au nœud N, point commun de l'étoile.

Aux bornes d'un des trois dipôles existe une tension appelée « tension simple »  $V_1(t)$ , par exemple, de valeur efficace  $V$ . Dans un dipôle circule le courant de ligne, de valeur efficace  $I$ . [22]

Les trois impédances de charge sont identiques, le système des trois tensions simples est triphasé équilibré. Donc les tensions ne se composent pas en valeurs efficaces mais en valeurs complexes (ou instantanées).

La représentation complexe de chaque tension a pour module la valeur efficace et pour argument, la phase.

On peut exprimer la valeur de la tension  $U_{21}$  par différence de  $V_2$  et  $V_1$ .

Donc les tensions composées ( $\overline{U_{21}}$ ,  $\overline{U_{32}}$ ,  $\overline{U_{31}}$ ) ces relations s'écrivent :

$$\begin{cases} \overline{U_{21}} = \overline{V_2} - \overline{V_1} \\ \overline{U_{32}} = \overline{V_3} - \overline{V_2} \\ \overline{U_{13}} = \overline{V_1} - \overline{V_3} \end{cases} \dots \dots \dots (II.10)$$

On remplace les équations des tensions simples de l'équation (II.9) dans les équations tensions composées de l'équation (II.10):

$$\begin{cases} \overline{U_{21}} = \overline{V_d} + \overline{V_1} - a^2 \overline{V_d} - a \overline{V_1} \\ \overline{U_{32}} = a^2 \overline{V_d} + a \overline{V_1} - a \overline{V_d} - a^2 \overline{V_1} \\ \overline{U_{13}} = a \overline{V_d} + a^2 \overline{V_1} - \overline{V_d} - \overline{V_1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \overline{U_{21}} = (1 - a^2) \overline{V_d} + (1 - a) \overline{V_1} \\ \overline{U_{32}} = (a^2 - a) \overline{V_d} + (a - a^2) \overline{V_1} \\ \overline{U_{13}} = (a - 1) \overline{V_d} + (a^2 - 1) \overline{V_1} \end{cases} \dots \dots \dots (II.11)$$

Tel que la somme des composants homopolaires est forcément nulle, les tensions composées peuvent être décomposées en un système équilibré direct  $\overline{U_d}$ ,  $a^2 \overline{U_d}$ ,  $a \overline{U_d}$  et un système équilibré inverse  $\overline{U_i}$ ,  $a \overline{U_i}$ ,  $a^2 \overline{U_i}$ .

Entre les composantes directes et inverses des deux types de tension on a les relations suivant :

$$\overline{U_d} = (1 - a^2) \overline{V_d} \dots \dots \dots (II.12)$$

$$\overline{U_i} = (1 - a) \overline{V_1} \dots \dots \dots (II.13)$$

Puisque :

$$(1 - a) = \sqrt{3} \cdot e^{-j\pi/6}$$

$$(1 - a^2) = \sqrt{3} \cdot e^{j\pi/6}$$

On peut déduire que :

$$\begin{cases} \overline{U_d} = \sqrt{3} \cdot \overline{V_d} \cdot e^{-j\pi/6} \\ \overline{U_i} = \sqrt{3} \cdot \overline{V_1} \cdot e^{j\pi/6} \end{cases} \dots \dots \dots (II.14)$$

## II.4.2 Relation entres les courants de ligne et les courants de phases :

Lorsqu'une ligne est connectée soit à une charge ou à une source triphasée en triangle. La figure(II.11).

Aux bornes de chaque impédance ( $Z$ ), se trouve une tension composée, de valeur efficace  $U$ . Dans une impédance circule le courant« composé» de valeur efficace  $J$ . Dans un couplage triangle, il n'y a pas de neutre. Ce montage est inadapté en cas de risque de déséquilibre. [22]

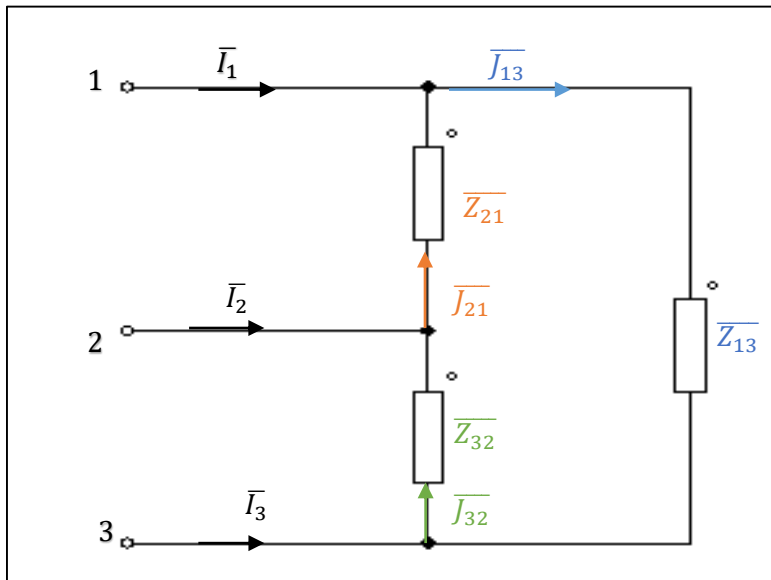


Figure (II-11) : Le couplage triangle d'une charge triphasée

Le système des courants de ligne ( $\bar{I}_1$  ,  $\bar{I}_2$  ,  $\bar{I}_3$ )correspond à un système de courants de phase( $\bar{J}_{21}$  ,  $\bar{J}_{32}$  ,  $\bar{J}_{31}$ ).

$$\begin{cases} \bar{J}_{21} = \bar{J}_0 + \bar{J}_d + \bar{J}_1 \\ \bar{J}_{32} = \bar{J}_0 + a^2 \bar{J}_d + a \bar{J}_1 \dots \dots \dots (II. 14) \\ \bar{J}_{13} = \bar{J}_0 + a \bar{J}_d + a^2 \bar{J}_1 \end{cases}$$

Par la loi des nœuds on a :

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = \bar{J}_{21} - \bar{J}_{13} \\ \bar{I}_2 = \bar{J}_{32} - \bar{J}_{21} \dots \dots \dots (II. 15) \\ \bar{I}_3 = \bar{J}_{13} - \bar{J}_{32} \end{cases}$$

Si on remplace l'équation (II.14) des courants de ligne dans l'équation (II.15) des courants de phase :

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = (1 - a) \bar{J}_d + (1 - a^2) \bar{J}_1 \\ \bar{I}_2 = (a^2 - 1) \bar{J}_d + (a - 1) \bar{J}_1 \\ \bar{I}_3 = (a - a^2) \bar{J}_d + (a^2 - a) \bar{J}_1 \end{cases}$$

Si le neutre n'est pas relié  $\bar{I}_0 = 0$  :

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = \bar{I}_d + \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 = a^2 \bar{I}_d + a \bar{I}_1 \dots \dots \dots (II.16) \\ \bar{I}_3 = a \bar{I}_d + a^2 \bar{I}_1 \end{cases}$$

Entre composantes des deux types de courants, on trouve :

$$\begin{cases} \bar{I}_d = (1 - a) \bar{I}_d \\ \bar{I}_1 = (1 - a^2) \bar{I}_1 \end{cases}$$

Alors :

$$\begin{cases} \bar{I}_d = \sqrt{3} \bar{I}_d e^{-j\pi/6} \\ \bar{I}_1 = \sqrt{3} \bar{I}_1 e^{j\pi/6} \dots \dots \dots (II.17) \end{cases}$$

Il n'y a pas de courant homopolaire car la liaison à un triangle s'effectue forcément par trois fils,  $\bar{I}_0 + \bar{I}_d + \bar{I}_1$  égale alors zéro.[21]

## II.4.3 Puissance électrique et composantes symétriques :

Pour déterminer analytiquement les diverses puissances, on forme la puissance apparente complexe :  $\bar{S} = P + j Q$

Où  $\bar{I}^*$  est le complexe conjugué de  $\bar{I}$ .

Alors :

$$\bar{S} = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* + \bar{V}_2 \bar{I}_2^* + \bar{V}_3 \bar{I}_3^* \dots \dots \dots (II.18)$$

En passant aux composantes symétriques :

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix}^t \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}^* \dots \dots \dots (II.19)$$

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_d \\ \bar{V}_1 \end{bmatrix}^t \cdot |F|^t \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_d \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix}^* \cdot |F|^*$$

La matrice de Fortescue est symétrique, c'est-à-dire que :  $|F|^t = |F|$

D'autre part :

$$|F|^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot |F|^*$$

Ainsi :

$$\bar{S} = 3 \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_d \\ \bar{V}_1 \end{bmatrix}^t \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_d \\ \bar{I}_1 \end{bmatrix}^*$$

$$\bar{S} = 3 \bar{V}_0 \bar{I}_0^* + 3 \bar{V}_d \bar{I}_d^* + 3 \bar{V}_1 \bar{I}_1^* \dots \dots \dots (II.20)$$

D'où, en égalant les parties réelles, les parties imaginaires et les modules.

$$\begin{cases} P = P_o + P_d + P_i \\ Q = Q_o + Q_d + Q_i \end{cases}$$

On trouve :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S = \sqrt{(P_o + P_d + P_i)^2 + (Q_o + Q_d + Q_i)^2}$$

On voit que la conservation des puissances actives et réactives s'applique aux trois systèmes direct, inverse et homopolaire donne le régime réel. [19]

Avec un facteur de puissance est égale à :  $f_p = P/S = \cos \varphi$

Le vecteur tournant dont la projection sur l'axe réel donne la puissance fluctuante, c'est-à-dire cette puissance c'est la partie variable de la puissance instantanée.

$$\bar{P} = \bar{V}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}_2 \bar{I}_2 + \bar{V}_3 \bar{I}_3$$

On peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \bar{P} = & (\bar{V}_o + \bar{V}_d + \bar{V}_1)(\bar{I}_o + \bar{I}_d + \bar{I}_1) \\ & + (\bar{V}_o + a^2 \bar{V}_d + a \bar{V}_1)(\bar{I}_o + a \bar{I}_d + a^2 \bar{I}_1) \\ & + (\bar{V}_o + a \bar{V}_d + a^2 \bar{V}_1)(\bar{I}_o + a^2 \bar{I}_d + a \bar{I}_1) \end{aligned}$$

Alors :

$$\bar{P} = 3\bar{V}_o \bar{I}_o + 3\bar{V}_d \bar{I}_d + 3\bar{V}_1 \bar{I}_1 \dots \dots \dots (II. 20)$$

Cette relation explique que, dans l'étude des procédés de compensation du déséquilibre dû à une charge monophasé par exemple, on puisse prendre l'annulation de la puissance fluctuante comme critère d'équilibre. [21]

## II.5 L'Etude d'un transformateur triphasé en régime déséquilibré :

Les déséquilibres rencontrés dans les circuits triphasés proviennent soit de charges déséquilibrées montées au secondaire des transformateurs de distribution, soit d'un défaut dissymétrique en un point quelconque du réseau, ce défaut soit à cause de l'ouverture d'une ligne, soit y a un court-circuit. [1]

Le rôle du transformateur est très important dans la transmission des déséquilibres car certain couplages transmettent le système homopolaire des courants, d'autre l'arrêtent.

Pour étudier le fonctionnement d'un transformateur selon la méthode des composantes symétriques nous allons établir le schéma monophasé équivalent du transformateur pour chacun des systèmes homopolaire, direct et inverses

On va baser sur le théorème de superposition, on a :

- **Pour le primaire :**

Les tensions :

$$\begin{bmatrix} \overline{V_A} \\ \overline{V_B} \\ \overline{V_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_{10}} \\ \overline{V_{1d}} \\ \overline{V_{11}} \end{bmatrix}; \text{ Alors : } \begin{bmatrix} \overline{V_{10}} \\ \overline{V_{1d}} \\ \overline{V_{11}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_A} \\ \overline{V_B} \\ \overline{V_C} \end{bmatrix}$$

Les courants :

$$\begin{bmatrix} \overline{I_A} \\ \overline{I_B} \\ \overline{I_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{10}} \\ \overline{I_{1d}} \\ \overline{I_{11}} \end{bmatrix}, \text{ alors : } \begin{bmatrix} \overline{I_{10}} \\ \overline{I_{1d}} \\ \overline{I_{11}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_A} \\ \overline{I_B} \\ \overline{I_C} \end{bmatrix}$$

- **Pour le secondaire :**

Les tensions :

$$\begin{bmatrix} \overline{V_a} \\ \overline{V_b} \\ \overline{V_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_{20}} \\ \overline{V_{2d}} \\ \overline{V_{21}} \end{bmatrix}, \text{ alors : } \begin{bmatrix} \overline{V_{20}} \\ \overline{V_{2d}} \\ \overline{V_{21}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_a} \\ \overline{V_b} \\ \overline{V_c} \end{bmatrix}$$

Les courants :

$$\begin{bmatrix} \overline{I_a} \\ \overline{I_b} \\ \overline{I_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{20}} \\ \overline{I_{2d}} \\ \overline{I_{21}} \end{bmatrix}, \text{ alors : } \begin{bmatrix} \overline{I_{20}} \\ \overline{I_{2d}} \\ \overline{I_{21}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_a} \\ \overline{I_b} \\ \overline{I_c} \end{bmatrix}$$

## II.5.1 Le schéma équivalent par phase pour le système homopolaire :

Le système homopolaire de courant ne peut exister dans une partie de réseau que si celle-ci est placée entre deux neutres reliés par un conducteur ou par la terre.

Dans un transformateur triphasé, les composantes homopolaires n'existent que si le transformateur est couplé en étoile (Y) ou en zig-zag (Z).

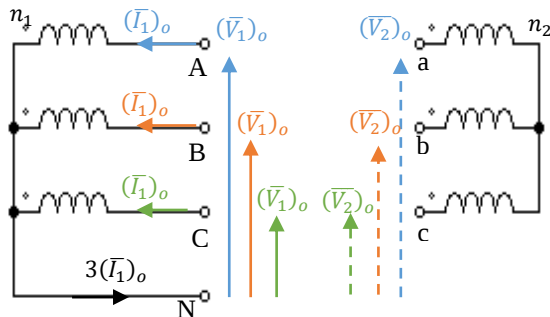
### II.5.1.1 L'influence du couplage des primaires et secondaires :

Pour le choix des couplages primaire et secondaire on peut éviter les courants homopolaire en transmettre d'un côté à l'autre.

On applique un système triphasé homopolaire formé de trois tensions simples  $(\overline{V_1})_o$ , aux bornes primaires d'un transformateur. Considérons les différents cas possibles représentent par le tableau (II.2) :

Transformateur étoile avec neutre – étoile sans neutre

Schéma équivalent

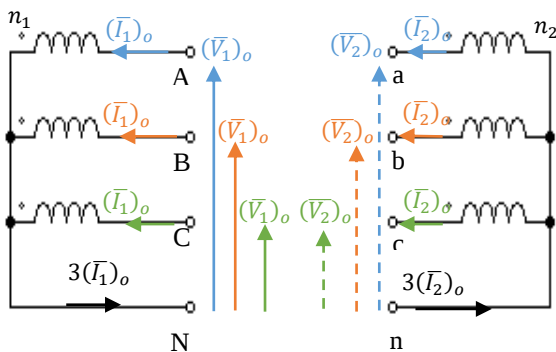


Caractérisé par :

- Le secondaire est un circuit ouvert
- L'impédance primaire c'est l'impédance magnétisante.
- Au secondaire n'y a pas le système homopolaire des courants
- Au secondaire apparaît un système triphasé homopolaire de tension

Transformateur étoile avec neutre – étoile avec neutre

Schéma équivalent



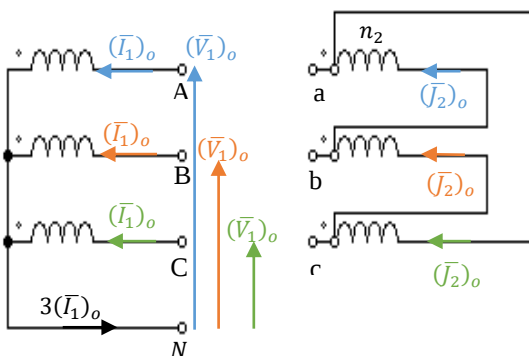
Caractérisé par :

- Il y a compensation des a.t. primaire par les A.t. secondaire
- Si on néglige les a.t. primaire à vide on a :  

$$n_1 (\bar{I}_1)_o \approx n_2 (\bar{I}_2)_o$$
- Les impédances primaire ou secondaire en série avec le transformateur, c'est-à-dire le schéma équivalent est soit ramené au primaire soit ramener au secondaire
- Peut varier l'impédance magnétisante

Transformateur étoile avec neutre – triangle

Schéma équivalent



Caractérisé par :

- Au secondaire n'y a pas le système homopolaire de courants en ligne
- Au secondaire circule un courant  $(\bar{J}_2)_o$  dans le circuit fermé constitué par le triangle
- Il y a compensation des a.t. primaire par les A.t. secondaire :  

$$n_1 (\bar{I}_1)_o \approx n_2 (\bar{J}_2)_o$$

| Transformateur étoile avec neutre – zig-zag avec ou sans neutre                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schéma équivalent                                                               | Caractérisé par :                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Au secondaire les tensions induites <math>(\bar{V}_2)_o/2</math> dans les six demi-bobines sont égales</li> <li>- Dans chaque phase secondaire, la tension résultante est nulle.</li> <li>- Il n'existe pas de système homopolaire de courant.</li> </ul>          |
| Transformateur dont le primaire est constitué d'un couplage zig-zag avec neutre |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Schéma équivalent                                                               | Caractérisé par :                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La résultante des a.t. dans chaque deux demi-bobine est nulle</li> <li>- N'existe pas un système homopolaire de F.m.m primaire.</li> <li>- Au secondaire quel que soit le couplage des phases n'y a pas de système homopolaire de tension et de courant</li> </ul> |

Tableau (II-2) : Les différents cas possibles du couplage d'un transformateur

### II.5.1.2 L'influence du circuit magnétique :

Pour le choix du circuit magnétique qu'on peut donner une valeur plus ou moins élevée à la réactance magnétisante qui souvent est l'impédance présentée par le transformateur au système homopolaire.

Comme dans les schémas monophasés équivalents précédents on placera, dans celui relatif au système homopolaire, sous la tension  $(\bar{V}_1)_o$  une impédance magnétisante  $Z_{mo}$ . Celle-ci est formée de la résistance  $R_{mo}$  dont la consommation représente les pertes dans le fer, en parallèle avec la réactance magnétisante  $X_{mo}$ . Ces deux éléments dépendent du circuit magnétique utilisé. [21]

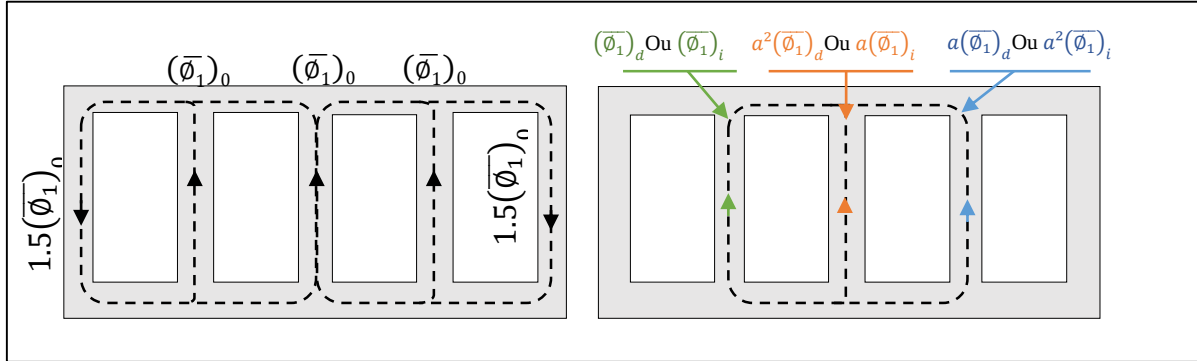
- **Le circuit magnétique est constitué de trois unités monophasées :**

Pour ce cas  $X_{mo} = X_m$ , à flux libre.

Pour un transformateur réel ramené au primaire, le flux de fuite est négligeable par rapport au flux canalisé dans le circuit magnétique. Alors la réactance de fuite équivalente par phase  $N_1 \omega$  est plus inférieure que la réactance magnétisante.

- **Le circuit magnétique est triphasé et possède quatre ou cinq noyaux :**

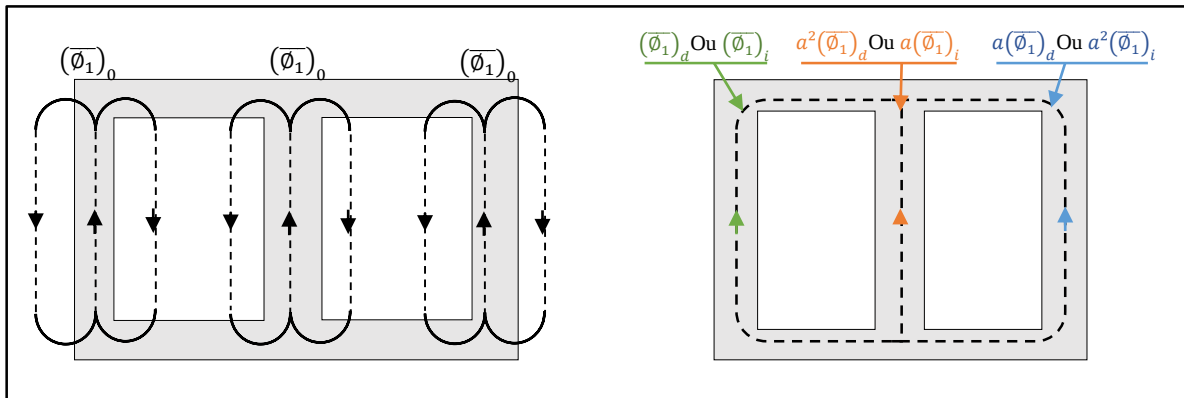
$X_{mo}$  est inférieur à  $X_m$ . Selon la figure (II.12) : Si on alimente par un système homopolaire de tension, on a la réluctance des trajets de chaque flux est plus grande que la réluctance pour le cas d'une alimentation par système direct au inverse de tension.



**Figure (II-12) :** Un circuit magnétique triphasé possède cinq noyaux

- **Le circuit magnétique est triphasé et possède trois noyaux :**

Pour ce cas, à flux forcé, le  $X_{mo}$  est inférieur à  $X_m$ , mais supérieur à  $N_1 \omega$ , Les flux homopolaires doivent refermer par l'air. Quand on alimente le transformateur soit par un système homopolaire de tensions soit par un système direct ou inverse les trajets des flux suivant représenté par la figure (II.13)



**Figure (II-13) :** Un circuit magnétique triphasé possède trois noyaux

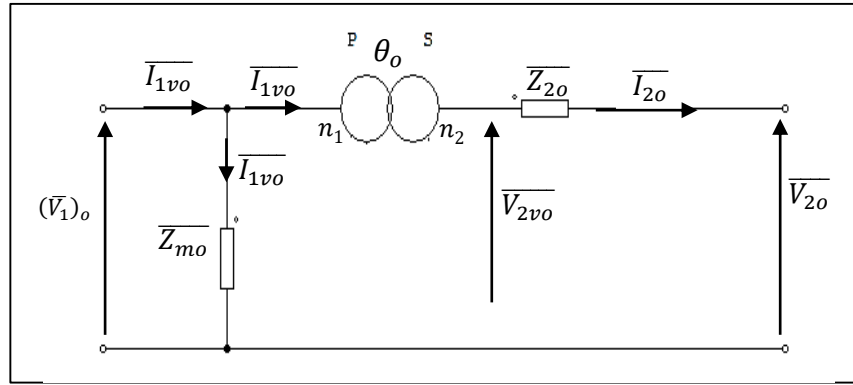
### II.5.1.3 Présentation du schéma équivalent par phase :

Pour présenter le schéma équivalent pour le système homopolaire, et selon le tableau (II.2) on peut considérer les cas suivant :

- Un transformateur étoile avec neutre – étoile avec neutre : la figure (II.14), c'est-à-dire où on trouve un système homopolaire de courants au le primaire et au secondaire du transformateur

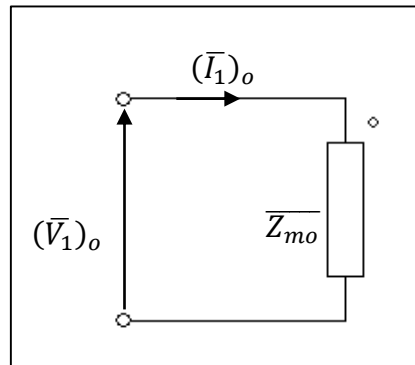
$$\overline{V_{2o}} = \overline{V_{2vo}} - \overline{Z_{2o} \cdot I_{2o}}$$

$$\overline{V_{2vo}} = m_o \overline{V_{1o}} - m_o (\overline{Z_{1o}} \cdot \overline{I_{1o}}) + \overline{V_{n1o}} - \overline{V_{n2o}}$$



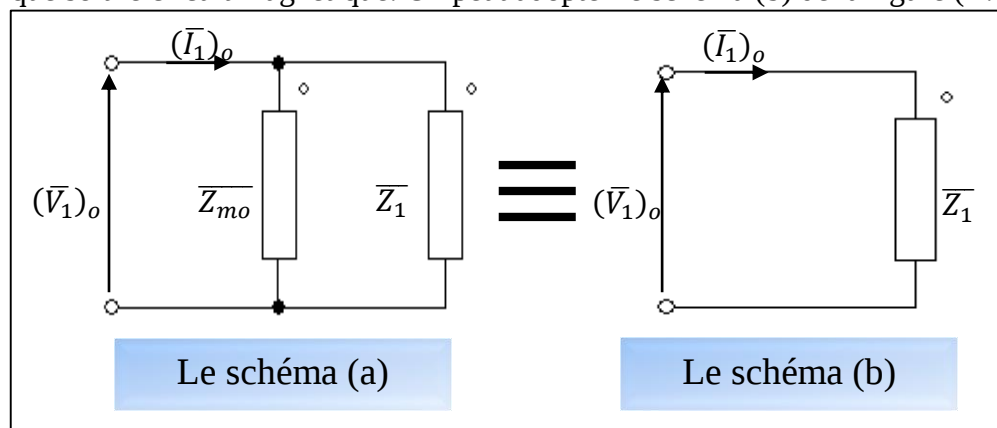
**Figure (II-14) :** Le transformateur étoile avec neutre – étoile avec neutre

- Soit le transformateur étoile avec neutre –étoile sans neutre, soit le transformateur étoile avec neutre-zig-zag avec ou sans neutre : en ce qui concerne le système homopolaire, le transformateur peut être considéré comme fonctionnant à vide, le schéma monophasé se réduit à celui de la figure (II.15) :



**Figure (II-15) :** Le transformateur étoile avec neutre –étoile sans neutre, ou le transformateur étoile avec neutre-zig-zag avec ou sans neutre

- Un transformateur étoile avec neutre – triangle : concerne le système homopolaire, le transformateur peut être considéré comme fonctionnant en court-circuit, le schéma équivalent représenté par le schéma (a) de la figure (II.16). L'impédance magnétisante étant, toujours nettement plus grande que l'impédance équivalente par phase ( $\bar{Z}_1 = R_1 + jN_1\omega$ ) du transformateur ramené au primaire, quel que soit le circuit magnétique. On peut adopter le schéma (b) de la figure (II.16)



**Figure (II-16) :** Un transformateur étoile avec neutre – triangle

- Un transformateur dont le primaire est constitué d'un couplage zig-zag avec neutre :  $\overline{Z'_1}$  est plus faible que  $\overline{Z'_1}$ . Aucune f.c.é.m. n'est induite. Chaque phase ne présente à la tension que son impédance ( $\overline{Z'_1} = R_1 + j\omega l'_1$ ),  $l'_1\omega$  étant la réactance de fuites deux enroulements placés sur le même noyau. La figure(II.17) :

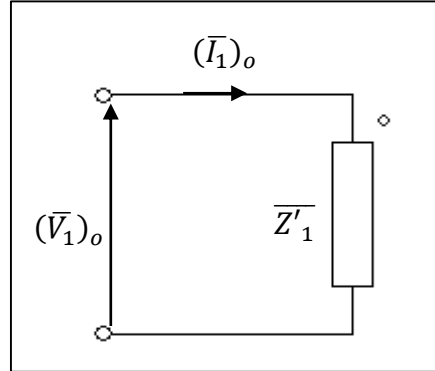


Figure (II-17) : Un transformateur avec un primaire couplé en zig-zag avec neutre

## II.5.2 Le schéma équivalent par phase pour le système direct :

Pour le système direct on utilise, comme en régime équilibré, soit le schéma équivalent ramené au primaire soit le ramené au secondaire.

Si on prend le cas d'un transformateur (Yd1), par exemple, on a ( $\theta = \pi/6$ ). La figure (II.18) :

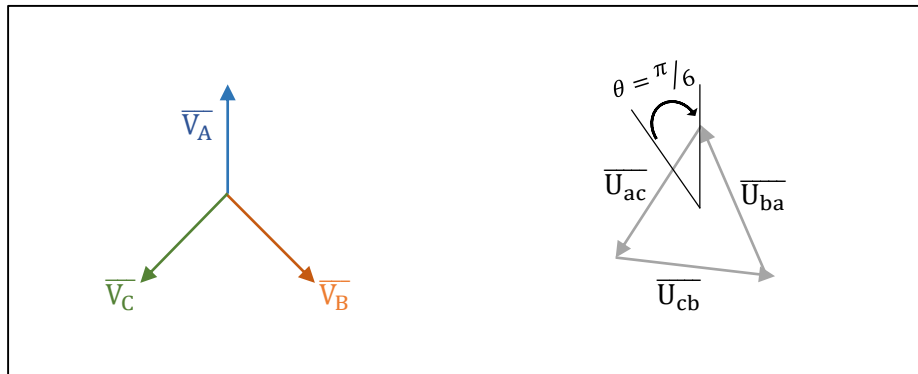


Figure (II-18) : Le diagramme vectoriel du système direct d'un transformateur(Yd1)

Alors on le schéma équivalent pour le système direct représenté par la figure (II.19) :

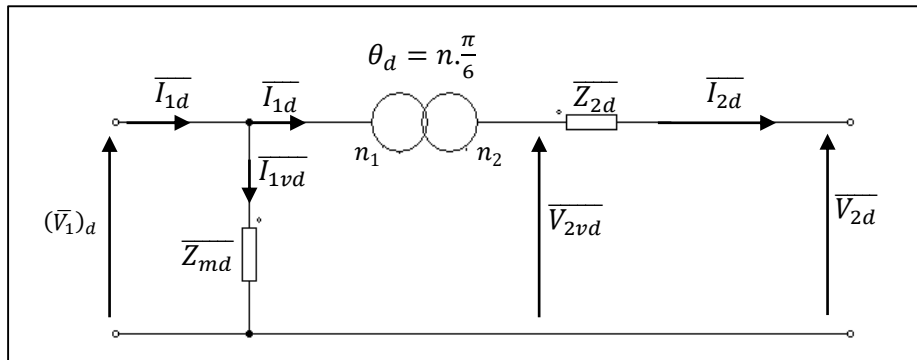


Figure (II-19) : Le schéma équivalent pour le système direct

Puisque :

$$\overline{Z_{2d}} = R_{2d} + jX_{2d}$$

$$m_d = k_c \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

On a:

$$\overline{V_{2d}} = \overline{V_{2vd}} - \overline{Z_{2d}} \cdot \overline{I_{2d}}$$

$$\overline{V_{1d}} = \overline{E_{1d}} + \overline{Z_{1d}} \cdot \overline{I_{1d}}$$

$$\overline{V_{2vd}} = k_d \cdot \overline{V_1} \cdot e^{-j\theta_d}$$

Avec :

$k_c$  : Coefficient liée au couplage des deux enroulements.

## II.5.3 Le schéma équivalent par phase pour le système inverse :

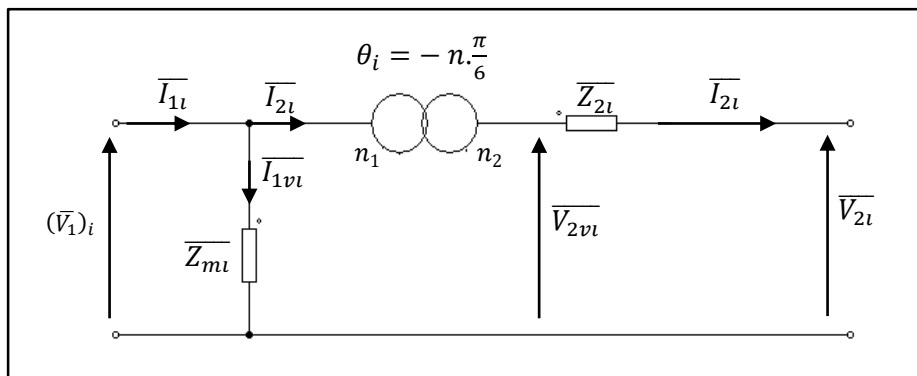
Pour le système inverse, on peut utiliser aussi l'un des deux schémas soit le ramené au primaire soit le ramené au secondaire, mais le déphasage  $\theta$  est inversé on remarque que les grandeurs  $\overline{Z_m}$ ,  $m$ ,  $R_2$  et  $N_2\omega$  ou  $R_1$  et  $N_1\omega$  sont indépendantes de l'ordre de succession des phases.

On prend le même exemple président du transformateur on montre que pour le système inverse ( $\theta = -\pi/6$ ). La figure (II.20) :



**Figure (II-20) :** Le diagramme vectoriel du système inverse d'un transformateur(Yd1)

Donc on peut déterminer le schéma équivalent pour le système inverse qu'il représenté par la figure (II.21) :



**Figure (II-21) :** Le schéma équivalent par phase pour le système inverse

Puisque :

$$\overline{Z}_{2i} = R_{2i} + jX_{2i}$$

$$m_i = m_d = k_c \cdot (n_2/n_1)$$

$$\theta_i = -\theta_d = -n \cdot (\pi/6)$$

On a :

$$\overline{V}_{2vi} = k_d \cdot \overline{V}_{1i} \cdot e^{-j\theta_i}$$

$$\overline{V}_{2i} = \overline{V}_{2vi} - \overline{Z}_{2i} \cdot \overline{I}_{2i}$$

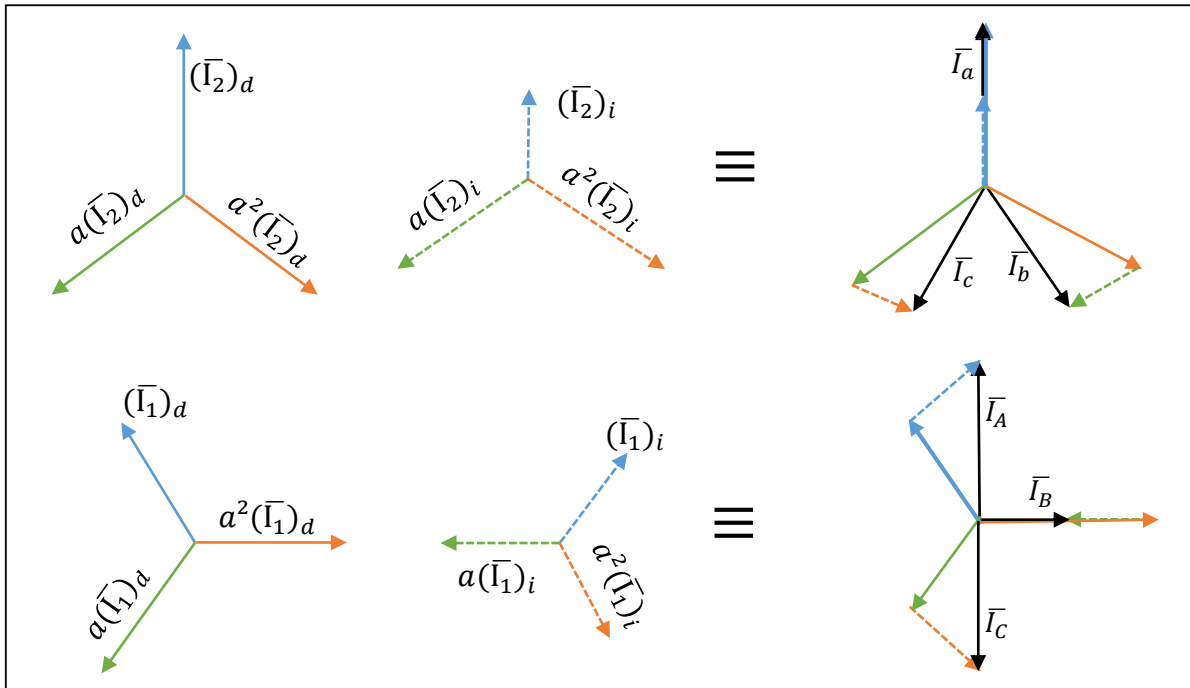
$$\overline{V}_{1i} = \overline{E}_{1i} + \overline{Z}_{1i} \cdot \overline{I}_{1i}$$

Finalement pour les systèmes directs et inverses l'inversion de  $\theta$  peut conduire à des diagrammes vectoriels très différents des courants primaires et secondaires même en l'absence du système homopolaire.

Pour le même exemple de transformateur (Yd1) on suppose qu'on déjà connu les systèmes directs et inverses des courants secondaires. On a déterminé les systèmes triphasés des courants réels secondaires et primaires en prenant un rapport de transformation ( $m = 1$ ) et en négligeant les courants primaires à vide :

$$\begin{cases} \overline{I}_A = (\overline{I}_1)_d + (\overline{I}_1)_i \\ \overline{I}_B = a^2(\overline{I}_1)_d + a(\overline{I}_1)_i \\ \overline{I}_C = a(\overline{I}_1)_d + a^2(\overline{I}_1)_i \end{cases} \quad \begin{cases} \overline{I}_a = (\overline{I}_2)_d + (\overline{I}_2)_i \\ \overline{I}_b = a^2(\overline{I}_2)_d + a(\overline{I}_2)_i \\ \overline{I}_c = a(\overline{I}_2)_d + a^2(\overline{I}_2)_i \end{cases}$$

On peut construire le diagramme vectoriel des systèmes directs et inverses du courant secondaire et primaire. Comme représenté par La figure (II.22)



**Figure (II-22) :** Le diagramme vectoriel des systèmes directs et inverses du courant secondaire et primaire

### II.6 Conclusion :

On dit que le transformateur est en régime déséquilibré s'il alimente une charge déséquilibrée ou s'il existe un défaut, en amont, au primaire. Les régimes déséquilibrés s'étudient par la méthode de Fortescue et les composantes symétriques. Le problème concerne surtout les composantes homopolaires, car vis-à-vis des composantes directes et inverses, le transformateur triphasé a un comportement identique à un transformateur équilibré. La composante homopolaire du courant est un courant alternatif monophasé, et le transformateur triphasé n'est pas conçu pour fonctionner en monophasé.

Un couplage triangle ne transmet pas les courants homopolaires. Un système de composantes homopolaires de courant ne peut exister dans une portion de réseau que si celle-ci est comprise entre deux points neutres reliés entre eux.

Cette étude théorique nous a permis de connaître d'une façon profonde le fonctionnement des transformateurs triphasés en régime déséquilibré.

A pink ribbon banner with a 3D effect, featuring a central rectangular section and two pointed ends that fold over. The banner is centered horizontally and contains the chapter title in a bold, black, serif font.

# **Chapitre III**

## **Étude analytique sur le courant magnétisant**

## Chapitre III : Étude analytique sur le courant magnétisant

### III.1 Introduction :

Le présent chapitre présente une étude analytique du le courant magnétisant. Pour se faire le chapitre est composé de trois parties; dans la première partie on donne les caractéristique physiques du transformateur utilisé dans notre travail qui est de marque «KARCAGI ALT. TECHNIKA » alors que la deuxième partie fait l'objet d'une simulation du cham magnétique d'une phase de notre transformateur à l'aide du logiciel "COMSOL Multiphysics" Finalement la troisièmes partie concerne l'étude de la courbe d'aimantation et le courant magnétisant aussi bien monophasé que triphasé.

### III.2 Description du transformateur « KARCAGI ALT. TECHNIKA » 1kVA :

Pour faire notre travail on utilise un le transformateur de laboratoire de génie électrique de faculté de technologie université de M'sila, ce transformateur est présenté par sa plaque signalétique dans la figure (III.1).

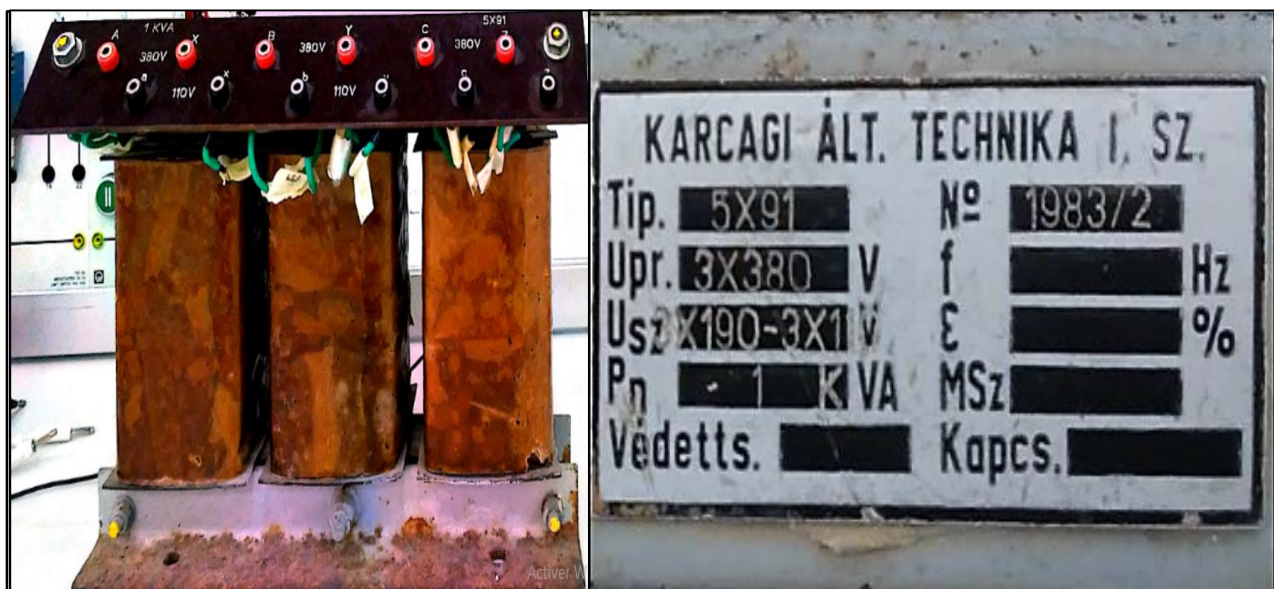


Figure (III-1) : Transformateur triphasé utilisé et sa plaque signalétique

### III.2.1 Les Dimensions réelles des enroulements :

Pour déterminer l'épaisseur du noyau on a utilisé un pied cannelé comme présenté par la figure (III.2) :



Figure (III-2) : L'épaisseur du noyau

La section de la colonne présente une forme carrée, ainsi que les sections de la culasse et de la colonne sont égales.

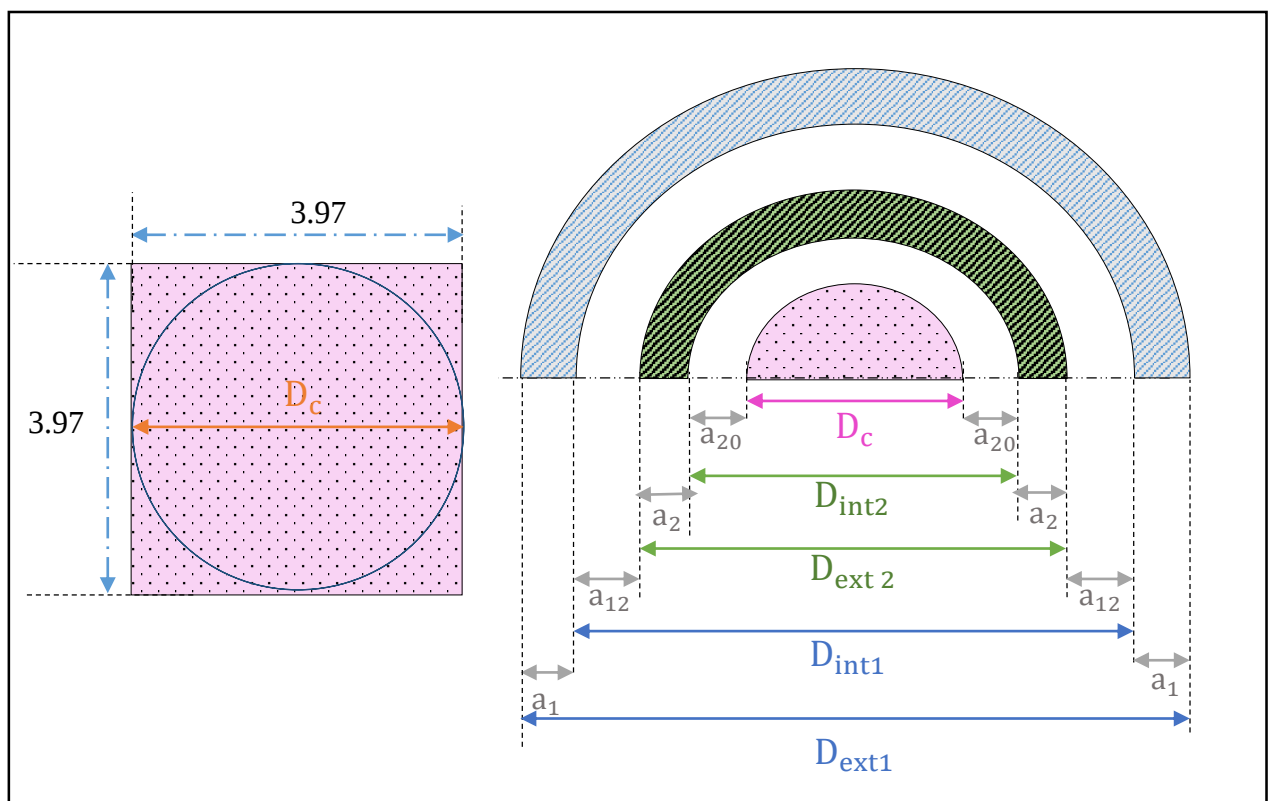


Figure (III-3) : Dimensions de la section de colonne et d'une phase du transformateur  
Les dimensions de la figure suivant est en [cm]

• **Le diamètre intérieur de l'enroulement secondaire ( $D_{int2}$ ) :**

$$D_{int2} = D_c + 2 a_{20}$$

-  $a_{20}$ : Distance entre la colonne et l'enroulement secondaire, elle est donnée par le tableau suivant :

|              |          |     |           |     |         |           |    |
|--------------|----------|-----|-----------|-----|---------|-----------|----|
| $U_n[kV]$    | $\leq 1$ | 3   | 6         | 10  | 15      | 20        | 35 |
| $a_{20}[cm]$ | 0.5      | 1.2 | 1.2 à 1.5 | 1.8 | 1.8 à 2 | 2.1 à 2.5 | 3  |

**Tableau (III-1) :** Distance entre la colonne et l'enroulement secondaire en fonction de la tension nominale

Tell que  $a_{20} = 0.5 \text{ cm}$

$$D_{int2} = 4.97 \text{ cm}$$

• **Le diamètre extérieur de l'enroulement secondaire ( $D_{ext2}$ ) :**

$$D_{ext2} = D_{int2} + 2 a_2$$

$a_2$ : Epaisseur de l'enroulement secondaire.

$$a_2 = K_{a_2} \times \sqrt[4]{S_c}$$

$K_{a_2}$  : Coefficient dépendant de la tension nominale.

$$\begin{cases} K_{a_2} = 0.55; \text{ Pour } U_n \leq 35 \text{ kV} \\ K_{a_2} = 0.45; \text{ Pour } U_n \leq 110 \text{ kV} \end{cases}$$

$S_c$  : C'est la puissance apparente par colonne, on a trois colonne donc :

$$S_c = S_n / 3$$

$$S_c = 0.333 \text{ kVA}$$

$$a_2 = 0.417 \text{ cm}$$

$$\text{Alors : } D_{ext2} = 5.805 \text{ cm}$$

• **Le diamètre intérieur de l'enroulement primaire ( $D_{int1}$ ) :**

$$D_{int1} = D_{ext2} + 2 a_{12}$$

-  $a_{12}$  : Largeur du canal de fuite principal ; elle est choisie en fonction de la tension la plus élevée du transformateur ; sa valeur est donnée par le tableau suivant :

|              |          |   |          |        |          |          |      |        |
|--------------|----------|---|----------|--------|----------|----------|------|--------|
| $U_n[kV]$    | $\leq 3$ | 6 | 10       | 15     | 20       | 35       | 110  | 220    |
| $a_{12}[kV]$ | 0.6      | 1 | 0.8--1.2 | 1--1.5 | 1.2--1.8 | 2.1--2.7 | 6--8 | 13--22 |

**Tableau (III-2) :** Largeur du canal de fuite principal en fonction de la tension nominale

On peut prend  $a_{12} = 0.6 \text{ cm}$

$$D_{int1} = 7.005 \text{ cm}$$

- **Le diamètre extérieur de l'enroulement primaire ( $D_{\text{ext } 2}$ ) :**

$$D_{\text{ext } 1} = D_{\text{int } 1} + 2 a_1$$

-  $a_1$ : Epaisseur de l'enroulement primaire.

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \times \sqrt[4]{S_c}$$

|             |            |            |            |              |
|-------------|------------|------------|------------|--------------|
| $S_c$ [kVA] | <100       | 100 à 500  | 750 à 5600 | 7500 à 31500 |
| $U_n$ [kV]  | $\leq 10$  | 10         | 35         | -            |
| k           | 0.6 -- 0.8 | 0.4 -- 0.6 | 0.4 -- 0.5 | 0.44 -- 0.46 |

**Tableau (III-3) : Le facteur k**

Puisque  $K=0,6$  ;  $\frac{a_1+a_2}{3} = 0.45$

$$a_1 = 0.95 \text{ cm}$$

$$D_{\text{ext } 1} = 8.905 \text{ cm}$$

- **Section de la colonne :**

$$A_{co} = 15.7609 \text{ cm}^2$$

- **Nombre de spires d'enroulement secondaire :**

Le nombre de spire d'enroulement secondaire, exprimé par la relation suivant :

$$N_2 = \frac{U_{ph2}}{U_{sp}}$$

Avec :

$U_{ph2}$  : la tension nominale dans l'enroulement secondaire  $U_{ph2} = 63.5 \text{ V}$

$U_{sp}$  : la tension de spire, Sa valeur est la même pour les deux enroulements car ces derniers sont embrassés par le même flux principal. Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{sp} = \pi \sqrt{2} \times f \times B_c \times A_{co}$$

$$U_{sp} = 0.79 \text{ V}$$

Alors :

$$N_2 = 80 \text{ Spires}$$

- **Nombre des spires d'enroulement primaire :**

$$m = \sqrt{3} \times \frac{N_2}{N_1}$$

$$N_1 = N_2 \times \frac{\sqrt{3}}{m}$$

$$N_1 = 460 \text{ Spires}$$

### III.2.2 Les Dimensions réelles du noyau :

Les caractéristiques géométriques du noyau du notre transformateur représenté par le tableau suivant :

| Désignation           | Valeur     |
|-----------------------|------------|
| Hauteur du noyau      | 26 [cm]    |
| Largeur du noyau      | 27 [cm]    |
| Hauteur de la fenêtre | 18.06 [cm] |
| Largeur de la fenêtre | 7.545 [cm] |

Tableau (III-4) :Caractéristiques géométriques du noyau du transformateur

- **Calcul des longueurs effectives du chemin de flux magnétique :**

On représente la forme et les caractéristiques géométriques du noyau par la figure (III.4). Les longueurs  $l_1$ ,  $l_2$ , et  $l_3$  sont les longueurs effectives des colonnes :

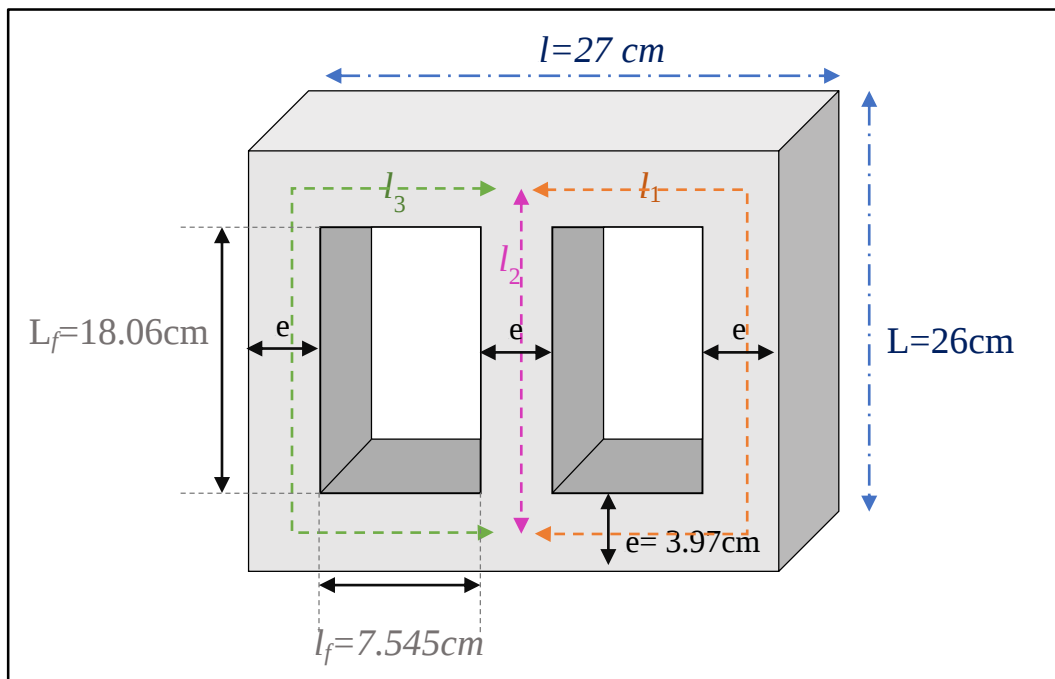


Figure (III-4) : Les caractéristiques géométriques du noyau

On peut déterminer les longueurs effectives des branches du noyau, on doit réduire l'ensemble des colonnes et des culasses tridimensionnelles à un ensemble de colonnes et des culasses monodimensionnelles.

Donc, les colonnes et les culasses sont présentées comme une ligne virtuelle passant au centre des branches.

Pour notre transformateur, il existe sur le noyau deux chemins de passage pour le flux magnétique, l'un c'est le chemin de la colonne centrale, et l'autre c'est le chemin des colonnes externes.

Selon la figure (III.4) on peut déterminer la longueur effective de la branche centrale et celle des branches externes comme suit :

- Pour la branche centrale :

$$l_2 = \left( L - 2 \times \frac{e}{2} \right)$$

$$l_2 = 22.03 \text{ cm}$$

- Pour les branches externes : on obtient  $l_1 = l_3$

$$l_1 = 2 \times \left( \frac{l}{2} - \frac{e}{2} \right) + \left( L - 2 \times \frac{e}{2} \right)$$

$$l_1 = 45.06 \text{ cm}$$

- **Section de la culasse :**

On a déjà vu que la section du culasse est de la colonne sont égaux.

$$A_{cu} = A_{co}$$

$$A_{cu} = 15.7609 \text{ cm}^2$$

## III.2.3 Calcul de la puissance triphasée :

Le transformateur électrique est comme tous les machine électrique, il a des pertes diminuent la puissance pendant le fonctionnement du transformateur, qu'ils sont :

- **Pertes dans le noyau :**

Des pertes dans le circuit magnétique sont appelées pertes fer ou encoure perte à vide. Les performances en termes de diminution des pertes à vide des transformateurs, sont conditionnées par la tôle magnétique utilisée, la géométrie du circuit magnétique et son mode d'assemblage. [23]

- **Pertes dans les bobinages :**

Les pertes dans les bobinages ont différents origines :

- Pertes joule due au courant de charge transitant dans les enroulements : ces pertes sont faciles à calculer. Il suffit de connaître les résistances  $R$  des enroulements mesurées en continu. [23] Souvent, la perte due à l'effet Joule est négligeable puisque, à partir d'un petit  $R$ , le courant magnétisant ne dépasse pas de 3 % à 8 % le courant nominal du transformateur (2 % pour le courant watté ( $I_{fe}$ ) et 1-6 % pour le courant déwatté ( $I_{\phi}$ )) [2]

La formule de ces pertes est :  $P_j = \sum R \times I_{eff}^2$

- Pertes par courants de Foucault dues au flux de fuite sur chaque brin isolé : ces pertes sont liées à l'effet de peau et à l'effet de proximité qui se manifestent dans les conducteurs soumis au flux de fuit alternatif.

Pertes Joule par courants de circulation dues aux différences de flux de fuite vus par les différents brins d'une spire, qui sont connectés aux extrémités, et qui génèrent des boucles de courant à travers ces brins. [23]

Puisque la puissance consommée par le noyau du transformateur représente les pertes fer, On peut déduire les pertes due au noyau selon la courbe de la figure (III.5). Cette courbe représente les pertes fer en fonction de l'induction maximale. Pour notre transformateur on peut déduire l'induction maximale selon la loi de Boucherot sa valeur est  $1.36 \times 10^{-4} \text{ T}$ . La puissance triphasée dans le noyau magnétique est égale à 120.6W

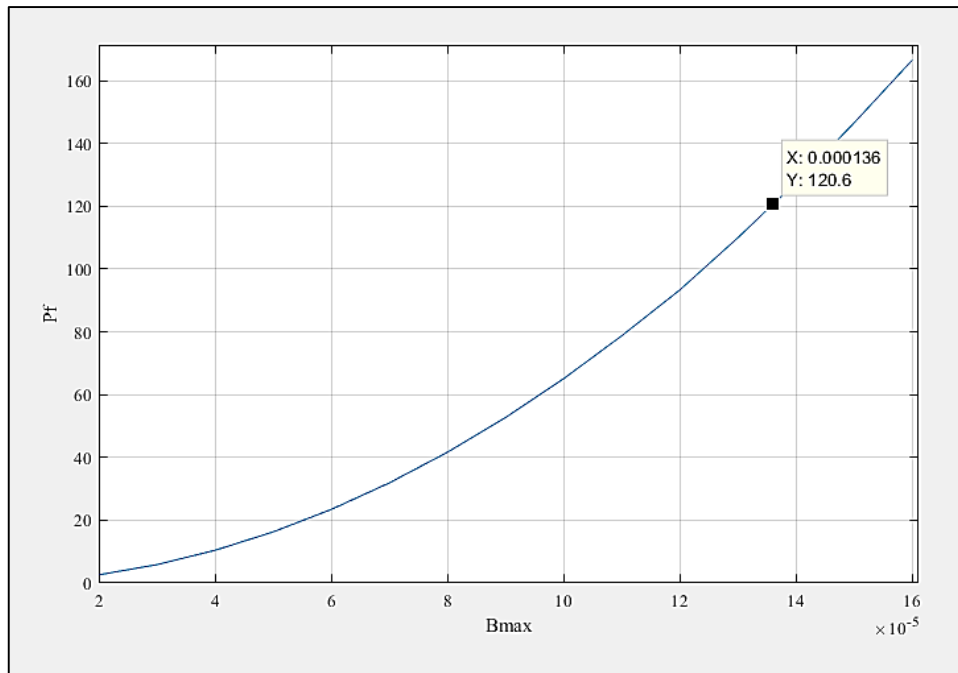


Figure (III-5) : Courbe des pertes fer en fonction de l'induction maximale

### III.3 La distribution du champ magnétique :

Comme c'est connu que le transformateur triphasé est la composition de trois transformateurs monophasés, on peut minimiser l'étude en une seule phase. Cette étude numérique est réalisée par le logiciel de «COMSOL Multiphysics» dans la version récente 5.4 Edition de 2015, pour observer la distribution du champ magnétique sur une phase de notre transformateur.

Comme première étape dans cette étude numérique on commence par la réalisation du modèle géométrique et l'attribution des dimensions et matériaux de chaque partie. Cette réalisation est illustrée à la figure (III.6) ou on définit les caractéristiques de la phase, et les sections calculées précédemment.

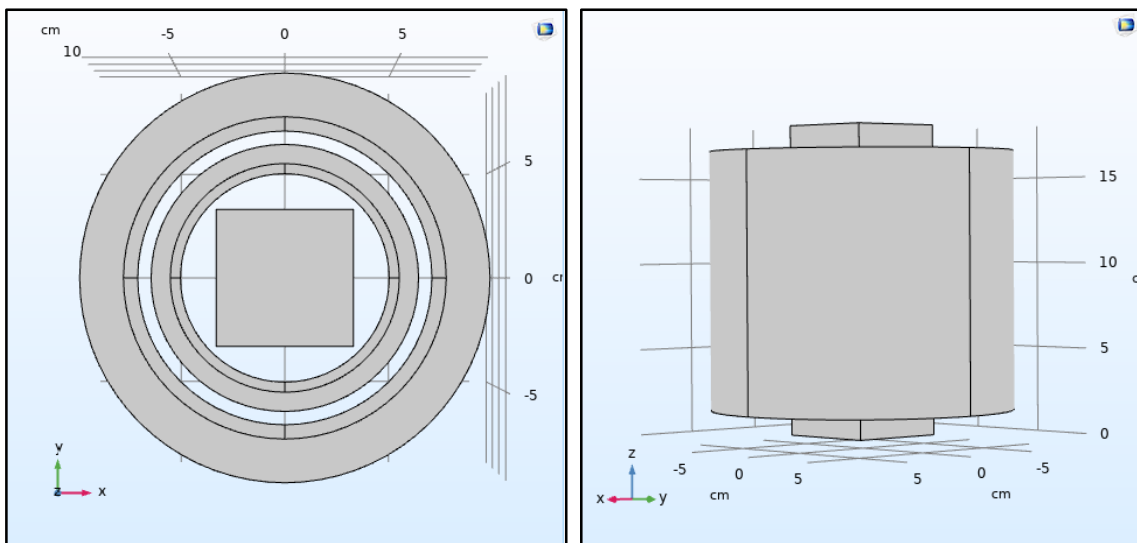
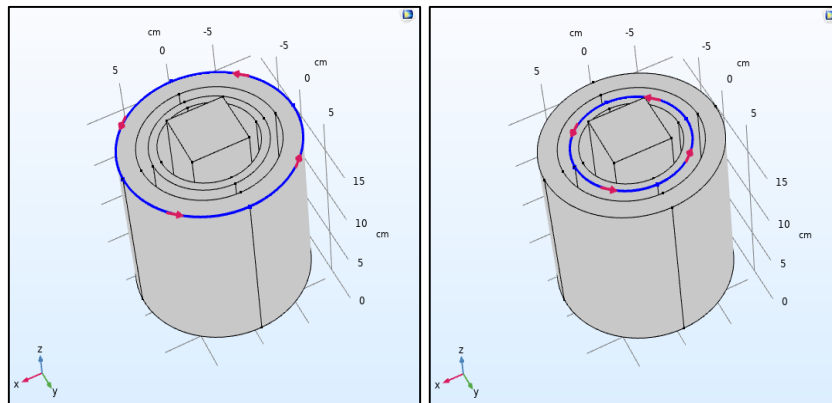


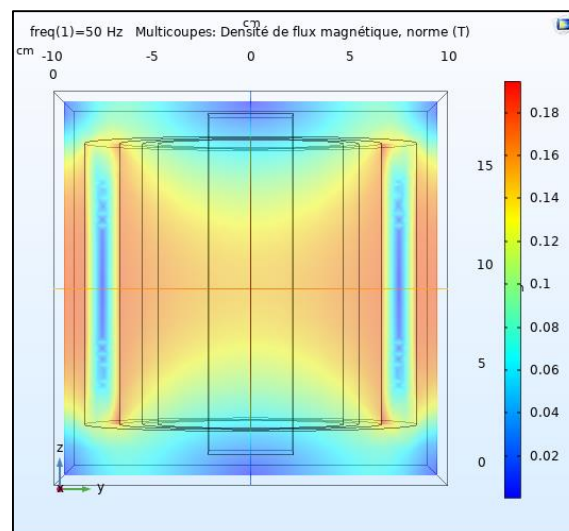
Figure (III-6) : Réalisation d'une phase du transformateur par COMSOL

Les directions des A.t des enroulements primaires et secondaire sont représentées comme suivant :



**Figure (III-7) :** Directions des A.t des enroulements primaires et secondaire

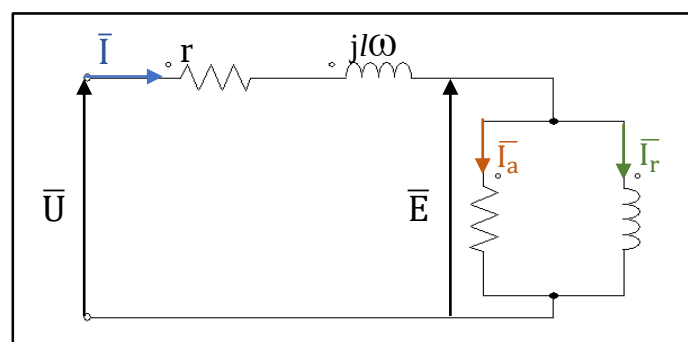
La simulation numérique d'une phase a donné la distribution du champ magnétique, figure(III.8) :



**Figure (III-8) :** Champ magnétique d'une phase de transformateur

### III.4 Le courant magnétisant :

Le schéma équivalent dans la figure (III.9), sous la tension «E» on trouve en parallèle une résistance et une réactance.

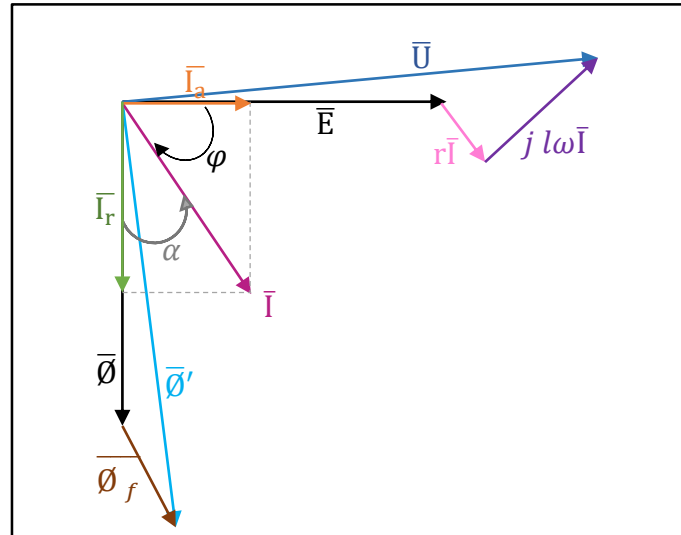


**Figure (III-9) :** Le schéma équivalent du circuit magnétisant

La résistance est traversée par la composante active du courant « $I_a$ » et consomme une puissance active (  $E \times i_a$ ) représente les pertes fer.

La réactance est traversée par la composante réactive ou le courant de magnétisation « $I_r$ » et consomme la puissance réactive (  $E \times i_r$ ) qu'il appelée la puissance magnétisante. C'est la puissance nécessaire pour installer le flux dans le circuit magnétique.

La tension « $\bar{E}$ » étant prise comme origine des phases, on obtient le diagramme vectoriel général de fonctionnement dans la figure suivante :



**Figure (III-10) :** Le diagramme vectoriel général de fonctionnement du circuit magnétisant

Compte tenu de cela, les relations suivantes peuvent être représentées vectoriellement, selon la figure (III.10), on a :

$$i = i_r + i_a$$

$$N \times \bar{I}_r = R \times \bar{\Phi}$$

Dans lesquelles :

$i_r$  : La composante réactive du courant, par rapport à « $\bar{E}$ »

$i_a$  : La composante active du courant, par rapport à « $\bar{E}$ »

Avec :  $\bar{E} = j N \omega \bar{\Phi}$

De plus les pertes par hystérésis valent (  $E \times i_a$ )

Et :

$\alpha$  : L'angle d'avance hystérétique.

$\varphi$  : Le déphasage arrière de «  $\bar{I}$  » sur « $\bar{U}$  », il est très voisin mais néanmoins inférieur à  $(\pi/2)$

## III.4.1 Méthode générale de la détermination de courant magnétisant :

La méthode générale pour déduire le courant magnétisant consiste à plusieurs étapes, qu'ils sont :

- Tout d'abord on doit déterminer le flux magnétique, pour calculer le flux magnétique avec une tension appliquée connue, on peut déduire l'équation suivante :

$$\Phi = \frac{1}{N} \int_0^t e \, dt \dots \dots \dots (III. 1)$$

• Alors on peut calculer la densité du flux magnétique B à la colonne correspondant à l'enroulement alimenté, à condition de connaître la section correspondant à chaque branche. à partir de l'équation :

$$B = \frac{\Phi}{A} \dots \dots \dots (III. 2)$$

La section A est souvent considérée comme étant la section moyenne du noyau, on néglige le flux de fuite. La raison est que la perméabilité des noyaux est considérablement supérieure à celle de l'air, le champ passe majoritairement dans le noyau. [2]

• Puis on peut déterminer l'intensité du champ H à partir de la courbe d'aimantation respective et de la densité de flux B.

En fait, la densité de flux B est utilisée pour déterminer l'intensité du champ magnétique H, à l'aide de la courbe d'aimantation. La force magnétisante F peut ensuite être déterminée, qui est elle-même égale à l'intensité du champ magnétique multipliée par la longueur effective du parcours fermé du flux [9].

Si B est uniforme tout au long du chemin du flux, la force magnétisante, F, égale à  $(H \times l)$ , sachant que la force magnétique est égale à une intégrale de (H) sur (l), (l) étant la longueur du chemin du flux. [5]

• Finalement on peut déduire le courant magnétisant à l'aide de la force magnétisante F, si le nombre de tours d'enroulements est connu, selon l'équation suivante :

$$I = \frac{F}{N} \dots \dots \dots (III. 3).$$

À cause de la symétrie, pour les enroulements sur les deux branches externes du noyau les courants magnétisants doivent être identiques. En ce qui suit, on fait détailler la méthode de calcul.

## III.4.2 La courbe d'aimantation :

Si l'on suppose que le flux ( $\Phi$ ) est fonction sinusoïdale du temps, à cause du phénomène d'hystérésis et de la saturation du circuit magnétique, le courant (i) est périodique mais non sinusoïdale. La tension (e) et par suite le flux ( $\Phi$ ) ne peuvent être fonctions sinusoïdale du temps. Cependant, dans une bobine à noyau de fer, la résistance et le flux de fuite du bobinage sont réduits ;  $(e = N \frac{d\Phi}{dt})$  diffère peu de (u). On peut admettre, avec une bonne approximation, que « e » et «  $\Phi$  » sont comme « u » des fonctions sinusoïdales du temps. «  $\Phi$  » est en quadrature arrière par rapport à « e ». [21]

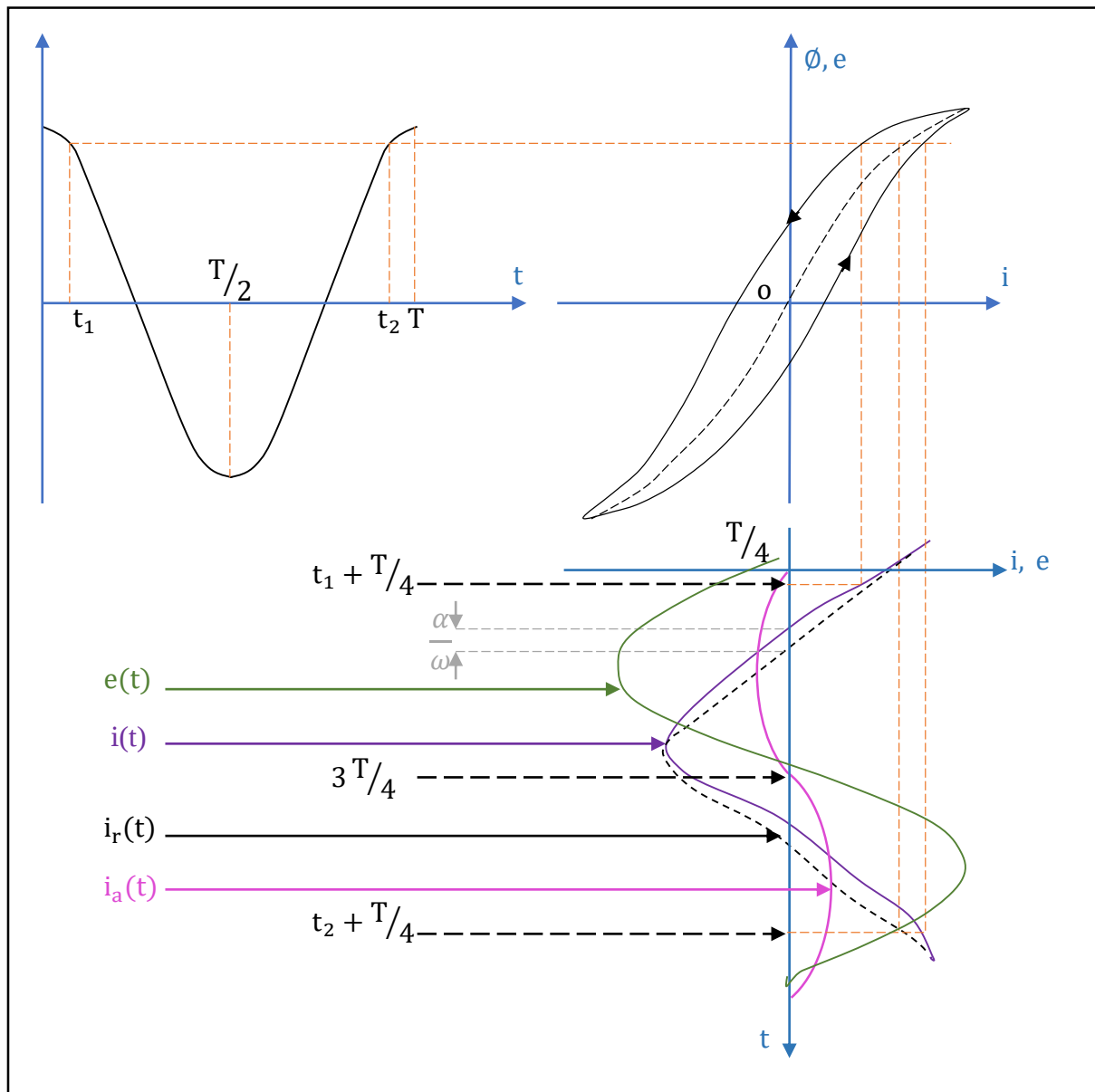
Par la figure (III.11) on représente la construction graphique de la courbe « i (t) » déduit par les deux courbes « e (t) » et «  $\Phi$  (t) ». Selon cette construction on peut observer que la valeur de « e » obtenue de façon croissante ou décroissante n'a pas une même valeur de « i ».

Si le cycle d'hystérésis était réduit à la courbe de première aimantation, les alternances du courant seraient symétriques par rapport à  $(t = T/4)$  et à  $(t = 3T/4)$ . Si «  $i_r$  » désigne ce courant s'annulant en même temps que le flux, la valeur moyenne de la puissance (e.  $i_r$ ). Le dédoublement de la courbe «  $\Phi$  (i) » rend impossible cette symétrie et donne au courant « i » un retard par rapport à « e » plus petit que  $(\pi/2)$  et égal à  $(\frac{\pi}{2} - \alpha)$ . La valeur moyenne non nulle de (e. i) correspond aux pertes par hystérésis.

Tel que la différence  $(i - i_r = i_a)$  n'existe donc que si le matériau magnétique est pourvu d'hystérésis. Le courant «  $i_a$  » s'annule en même temps que la tension « e ».

Les ampères tours de la bobine peuvent donc être décomposés en :

- Les ampères tours ( $N.i_a$ ) qui compensent la force magnétomotrice antagoniste due à l'hystérésis.
- Les ampères tours ( $N.i_r$ ) qui créent le flux «  $\emptyset$  »



**Figure (III-11) :** La constriction graphique de la courbe «  $i(t)$  » par les deux courbes «  $e(t)$  » et «  $\emptyset(t)$  »

### III.4.3 Détermination des courbes d'aimantation du transformateur Dy :

Les courbes d'aimantation de chaque colonne doivent être déterminées par des essais à vide monophasés indépendants sur chacune des trois colonnes.

On utilise une seule configuration d'essai pour les deux types de branches. Pour compenser la forme du noyau, nous varions la tension de façon à ce que le flux magnétique soit identique dans les trois colonnes. Cette variation de tension compense la différence de l'aire de section et

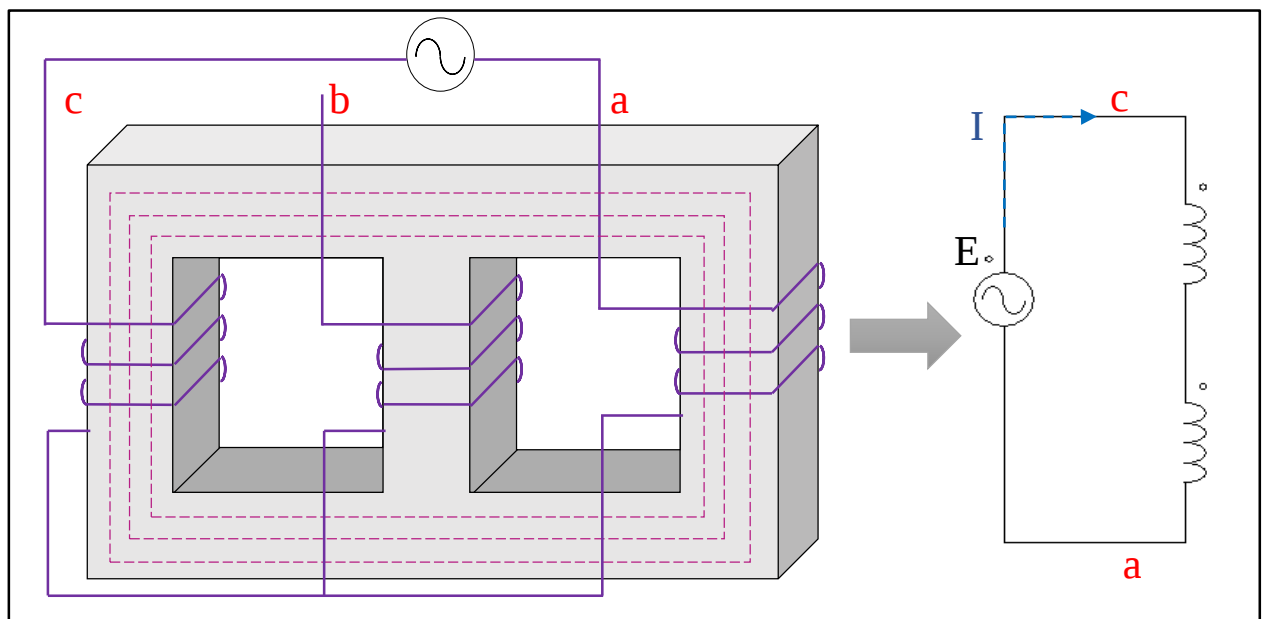
de la longueur effective des branches du noyau. Ainsi, nous déterminons deux courbes de magnétisation indépendantes pour les branches externes et centrale.

### III.4.3.1 Détermination de la courbe d'aimantation des colonnes externes :

Il est bien connu que l'alimentation des deux enroulements en série par leurs tensions nominales besoin une tension nominale pour chaque enroulement ; c'est-à-dire il est nécessaire deux fois de la tension nominale.

Donc on doit choisir une côté soit la coté Delta soit la coté (Y), qu'elle nous permet de mis en série deux enroulements ; c'est-à-dire on compare la valeur de la tension nominale de source d'alimentation avec deux fois de la tension nominale des deux enroulements pour chaque côté. Par exemple pour notre transformateur Il est à noter que les enroulements du côté Delta (côté primaire) ont une tension nominale de (380 V) ; donc, pour alimenter les deux enroulements en série à leurs tensions nominales, nous avons besoin de (380 V+380 V=760 V). Puisque notre source d'alimentation est limitée à (450 V), et donc il est impossible d'alimenter deux enroulements en série à leurs tensions nominales. Alors le côté Delta n'a pas donc été choisi pour l'alimentation

Sachant que la tension nominale aux bornes de chaque enroulement du côté secondaire (Y) est égale à (110 V), nous avons appliqué une tension de ( $E=220$  V), comme illustré à la figure (III.12) représente la configuration destinée à obtenir la courbe d'aimantation sur les colonnes externes et le schéma électrique équivalent :



**Figure (III-12) :** Configuration destinée à obtenir la courbe d'aimantation sur les colonnes externes et le schéma électrique équivalent

### III.4.3.2 Détermination de la courbe d'aimantation de la colonne centrale :

Si on a une différence du l'aire des sections effective entre la colonne centrale est les bronches externes, les courbes d'aimantation de ces bronches ne sont pas identiques. La détermination de la courbe d'aimantation de la colonne centrale possède les deux méthodes suivant :

- L'une c'est l'application de la tension nominale aux bornes l'enroulement centrale, pour cette méthode ne peut pas maintenir l'uniformité de la densité du flux tout au long du parcours du champ magnétique. Au même temps pour appliquer cette méthode on

doit suivre quelques hypothèses pour connaître le «H» et le «B» aux bornes de la colonne centrale. il existe certains erreurs, on peut diminuer par connaître la répartition transversale du flux magnétique. Mais la mesure directement de la répartition transversale du flux magnétique est difficile

- L'autre c'est la même méthode utilisée pour déterminer la courbe d'aimantation des colonnes externes c'est-à-dire on applique une tension inférieure à la double de la tension nominale sur deux enroulements des colonnes externes connectés en série. la diminution de la tension dans cette méthode compense l'aire de la section légèrement plus grande à la colonne centrale.

On peut éviter les erreurs potentielles provenant des différents patrons de champ de fuite sous deux configurations différentes.

On peut observer pour les deux méthodes précédentes, que la deuxième méthode est la plus précise.

## III.4.4 Détermination analytique des courants magnétisants monophasés du transformateur $Dy_1$ :

Pour calculer le courant magnétisant dans un essai monophasé, Le transformateur est considéré comme une configuration d'essais à vide, c'est-à-dire une seule phase est alimentée, par exemple, le côté y est ouvert et on alimente une seule phase du côté D ; les autres enroulements sont ouverts.

Étant donné que les courbes d'aimantation des branches externes sont identiques, leurs courants magnétisants sont également identiques, mais s'ils sont différents de celui de la branche centrale. La raison se trouve dans la différence entre les courbes d'aimantation des branches externes et celle de la branche centrale. [2]

### III.4.4.1 Le courant magnétisant des branches externes :

Donc pour déterminer le courant magnétisant pour les enroulements sur les branches externes on fait le calcul soit sur la branche externe à droite ou la branche externe à gauche.

Si on fait l'étude de courant magnétisant pour les enroulements sur la branche externe à droite, on peut distinguer le circuit représenté par la figure (III.13)

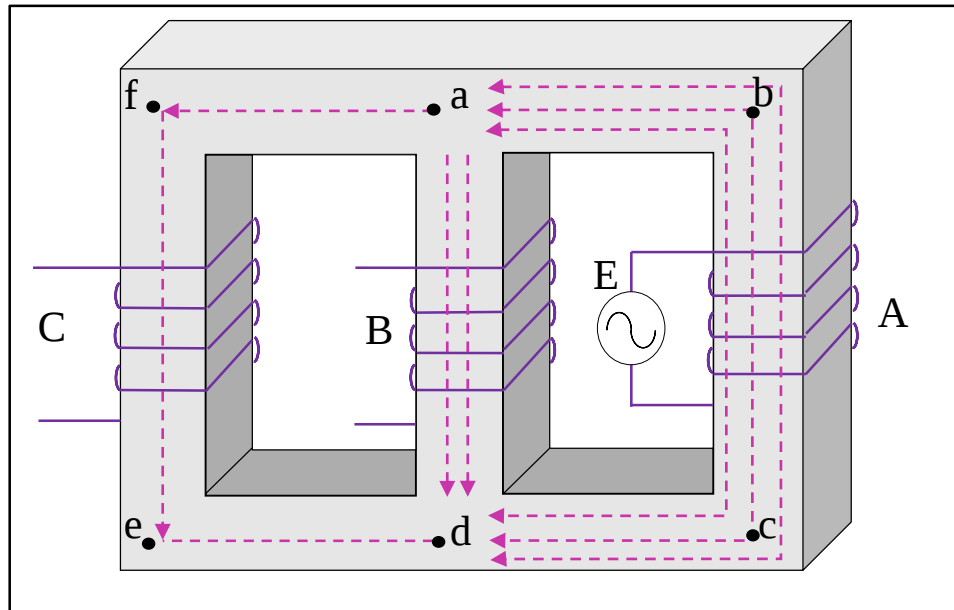
Selon la loi des nœuds magnétiques, lorsqu'on alimente un enroulement sur une branche externe, les forces magnétisantes aux bornes de la branche centrale et de la branche externe non alimentée (à gauche) sont essentiellement égales [5].

On a vu que le calcul de courant magnétisant nécessite la détermination de la force magnétique (F), qu'elle déduit par l'intégrale du champ magnétique (H) sur un parcours fermé de (l), alors que :

$$F = \int H dl$$

A ce cas le parcours fermé du flux doit être formé par la branche à droite et la branche centrale, comme on peut conclure que la force magnétique totale ( $F_{\text{totale}}$ ) c'est la somme de la force magnétique centrale ( $F_c$ ) et la force magnétique à droite ( $F_d$ ).

$$F_{\text{totale}} = F_c + F_d$$



**Figure (III-13) :** Circuit destiné à obtenir le courant magnétisant monophasé de la branche droite.

Selon la figure (III.13) on a :

$$F_{\text{totale}} = H_{\text{abcd}} \times l_1 + H_{\text{ad}} \times l_2 \dots \dots \dots \text{(III.5)}$$

Avec :

$H_{\text{abcd}}$ ; C'est l'intensité du champ magnétique sur la branche à droit [At/m]

$H_{\text{ad}}$ ; C'est l'intensité du champ magnétique sur la branche central [At/m]

$l_1, l_2$  et  $l_3$ ; sont les longueurs effectives des colonnes

Selon l'équation (III.5), la détermination de la force magnétisante  $F$  nécessite la connaître des deux intensités du champ magnétique  $H_{\text{abcd}}$  et  $H_{\text{ad}}$ , puis on doit trouver la répartition de la densité du flux  $B$  dans les branches soit par la méthode de calcul, ou la méthode du mesure. D'autre part la méthode de calcul est très laborieuse et complexe a cause de :

- cette méthode basée sur la géométrie des noyaux
- la géométrie des noyaux est variée à l'une de l'autre.
- la variation des sections au long du parcours du flux, puisque y une déférence entre la section des culasses et la section des colonnes

Alors il est plus mieux l'utilisation de la méthode du mesure, au début on doit mesurer les tensions aux bornes des enroulements qui ne sont pas alimentés ; c'est-à-dire les enroulements secondaires. Puis on peut calculer les flux dans les branches respectives.

Il est évident que le calcul de la répartition de la densité du flux magnétique  $B$  requiert la connaissance exacte des tensions aux bornes des enroulements, y compris de leurs harmoniques. [2]

Par conséquence on peut déterminer les deux densités du flux magnétique de la branche central et la branche à droit selon les deux équations (III.2) et (III.3)

En fin on peut trouver les intensités magnétiques,  $H_{\text{abcd}}$ ,  $H_{\text{ad}}$ , à partir desquelles les forces magnétisantes se calculent.

Pour la branche à droite, le courant magnétisant ( $I_d$ ) est égal :

$$I_d = F_{\text{totale}} / N_1$$

### III.4.4.2 Le courant magnétisant de la branche central :

La méthode de calcul du courant magnétisant des branches centrale c'est la même méthode de calcul pour les branches externes, mais à cette partie on doit alimenter l'enroulement sur la branche central, comme on a représenté par la figure (III.14), donc on doit déduire les tensions aux bornes des enroulements au secondaire sur les branches externes pour calculer la répartition du flux dans le noyau.

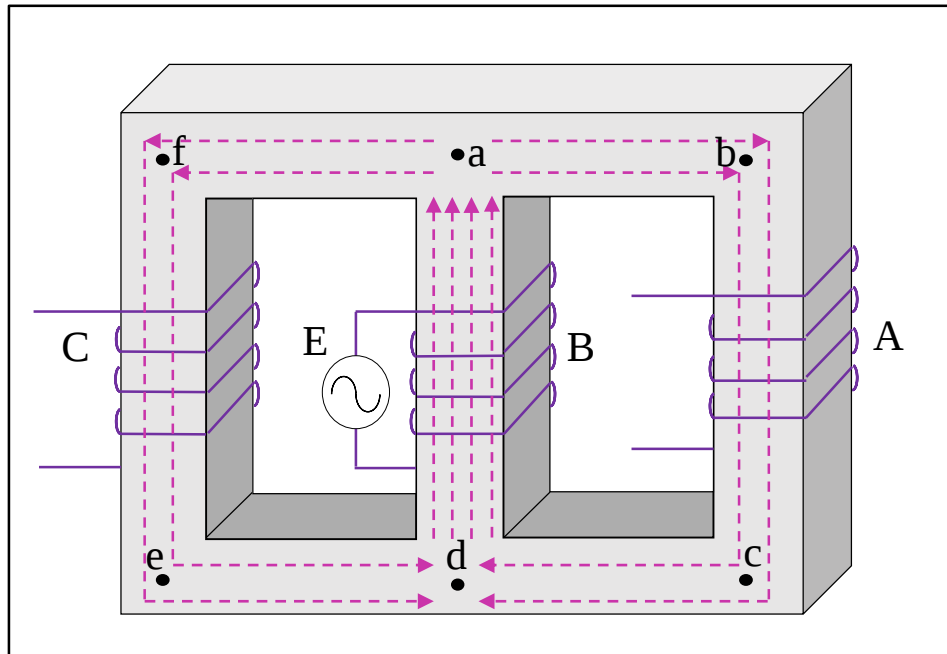


Figure (III-14) : Circuit destiné à obtenir le courant magnétisant monophasé de la branche central.

### III.4.5 Détermination analytique des courants magnétisants triphasés du transformateur $Dy_1$ :

A travers cette parité on présente la détermination du courant magnétisant triphasé c'est-à-dire on fait l'étude du courant magnétisant pour les deux côtés du notre transformateur, à partir les relations utilisés pour la configuration d'un système triphasé soit couplé en étoile soit couplé en triangle. Donc il est nécessaire de suivre la méthode pour indiquer les composants symétriques des courants magnétisants monophasés. Puis on choisit le côté du transformateur, qu'il permet de déterminer les courants qui nous intéressent, donc on peut décrire les équations des courants magnétiques.

#### III.4.5.1 Le courants magnétisants vus du côté y d'un transformateur Dy sans neutre :

Pour déduire le courant magnétisant vus du côté (y) d'un transformateur (Dy) sans neutre on peut proposer l'hypothèse de : "Les courants de ligne dans cette configuration se trouvent en omettant le composant homopolaire des trois courants magnétisants monophasés".

A cette configuration les courants de phase et de ligne n'ont pas un composant homopolaire, la figure suivant présenté un circuit équivalent qui assure l'absence des courants homopolaires dans les lignes. Selon la figure (III.15) on peut observer :

$I_0$  ; Courant de séquence homopolaire.

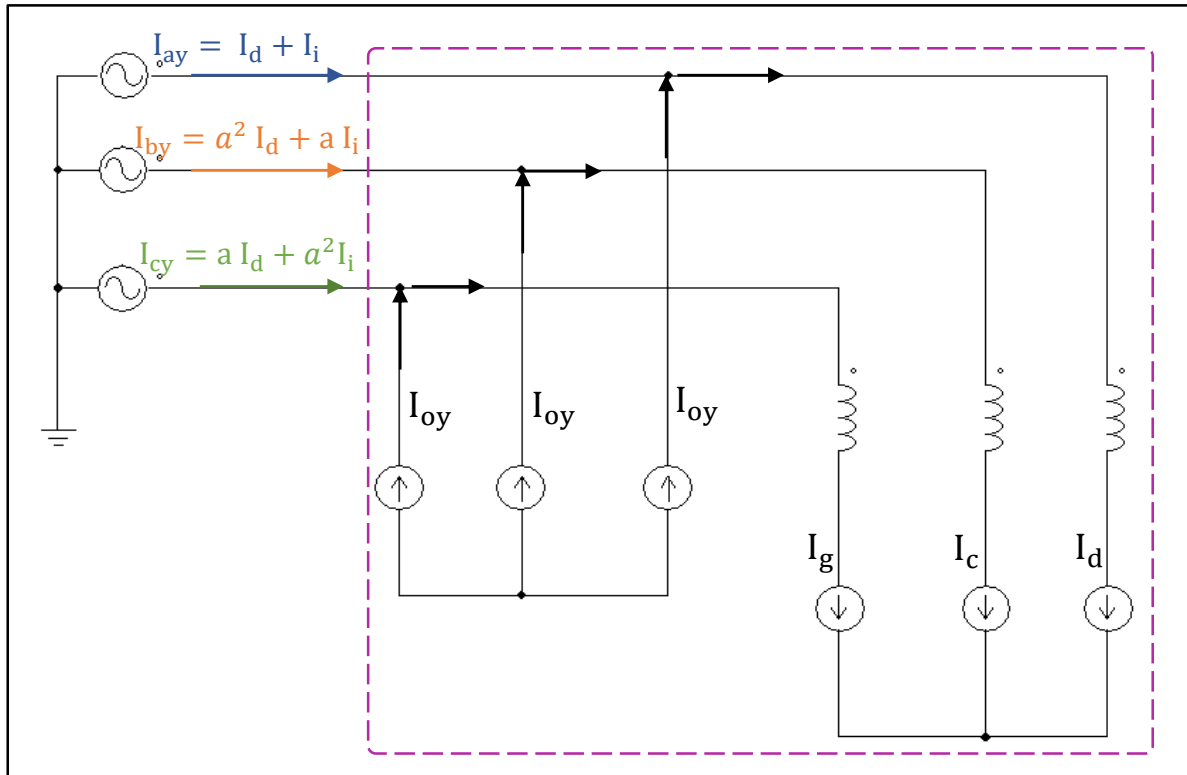
$I_c$  ; Courant magnétisant de la branche centrale.

$I_d$  ; Courant magnétisant de la branche à droite.

$I_g$  ; Courant magnétisant de la branche à gauche.

Alors chacune des paires de courant  $I_o$  et  $I_{c, g, d}$  correspond à une des phases (ainsi qu'à une des colonnes de noyau).

Ce circuit implique que l'énergie magnétique associée aux courants homopolaires est accumulée en dehors de noyau



**Figure (III-15) :** Le circuit équivalent pour obtenir les courants magnétisants triphasés du côté secondaire (y).

Il y a un flux correspondant au courant homopolaire c'est le flux de fuit, on peut remarquer que dans le point commun des phases il existe un courant ( $I_n$ ) égale à trois fois le courant de séquence homopolaire ; c'est-à-dire :  $I_n = 3 I_o$

Si on a :

- Les courant magnétisants obtenus par trois essais monophasés du côté (y) : ( $I'_{ay}$ ,  $I'_{by}$  et  $I'_{cy}$ )
- Les séquences directe, inverse et homopolaire des courants magnétisants obtenus par les trois essais monophasés du côté (y) sont : ( $I_{oy}$ ,  $I_{dy}$  et  $I_{iy}$ )

On peut déduire ( $I_{ay}$ ,  $I_{by}$  et  $I_{cy}$ ) qu'ils sont les trois courants magnétisants triphasés de ligne et de phase du côté y (sans neutre) du transformateur à l'étude :

$$\begin{cases} I_{ay} = I_{dy} + I_{iy} + I_{oy} \\ I_{by} = a^2 I_{dy} + a I_{iy} + I_{oy} \\ I_{cy} = I_{dy} + a^2 I_{iy} + I_{oy} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{ay} = I_{dy} + I_{iy} \\ I_{by} = a^2 I_{dy} + a I_{iy} \dots \dots \dots (III. 6) \\ I_{cy} = I_{dy} + a^2 I_{iy} \end{cases}$$

Alors on peut associer les trois composants symétriques des courants magnétisants aux trois composants du flux.

A cause de la configuration « y » sans neutre le flux correspondant au composant homopolaire ne génère pas un courant dans les enroulements de côté secondaire, c'est-à-dire que pour cette configuration, il est impossible de mesurer le courant de phase et des lignes dans les enroulements, puis que le flux correspondant au composant homopolaire ne peut pas passer dans les branches du noyau magnétique. Alors il se manifeste comme une induction on peut le considérer un flux de fuit, qu'il ne passant pas dans le noyau.

Mais c'est le contraire dans le côté Delta une connexion étoile avec neutre, on s'attend à ce que toutes les séquences, directe, inverse et homopolaire, de courant de phase et de ligne existent.

### III.4.5.2 Les courants magnétisants vus du côté D d'un transformateur Dy :

Tell que le côté primaire du transformateur couplé en triangle, les tensions au borne les enroulements de ce côté sont des tensions composé. Donc Pour la côté D de transformateur on doit déterminer les courants magnétisants triphasés (courant de phase), qu'ils sont ( $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  et  $I_{CA}$ ). On a déjà déterminé les courants magnétisants « monophasés » vus du côté Delta.

D'une part, nous trouvons que les courants magnétisants monophasés vus des côtés y et Delta ont un composant de séquence homopolaire. D'autre part le contraire pour le courant de ligne au côté Delta, il ne peut jamais avoir un composant homopolaire.

On prend :

Les composants direct et inverse des courants magnétisants monophasés vus du côté Delta

$$(I_{dD}, I_{iD}) : I_{dD} = \frac{1}{m} I_{dy}, \text{ et } I_{iD} = \frac{1}{m} I_{iy}$$

$$\begin{cases} I_{AB} = I_{dD} + I_{iD} \\ I_{BC} = a^2 I_{dD} + a I_{iD} \dots \dots \dots (III. 7) \\ I_{CA} = I_{dD} + a^2 I_{iD} \end{cases}$$

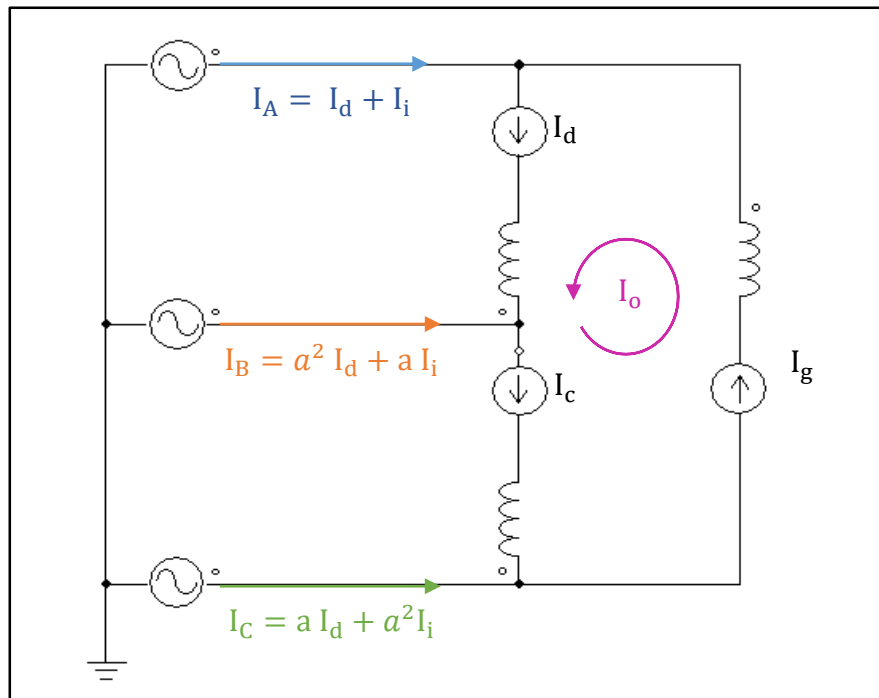
Alors on peut calculer les courants de ligne par :

$$\begin{cases} I_A = I_{CA} - I_{BC} \\ I_B = I_{AB} - I_{CA} \\ I_C = I_{BC} - I_{AB} \end{cases}$$

Les trois courants magnétisants triphasés de ligne au côté Delta :

$$\begin{cases} I_A = \frac{\sqrt{3}}{m} (I_{dy} \angle -30 + I_{iy} \angle +30) \\ I_B = \frac{\sqrt{3}}{m} (a^2 \times I_{dy} \angle -30 + a \times I_{iy} \angle +30) \dots \dots \dots (III. 8) \\ I_C = \frac{\sqrt{3}}{m} (a \times I_{dy} \angle -30 + a^2 \times I_{iy} \angle +30) \end{cases}$$

On peut observer l'absence des composant homopolaire dans les courants de ligne ( $I_A$ ,  $I_B$ , et  $I_C$ ) Le courant homopolaire circule dans les phases, comme le présenté par la figure (III.16) :



**Figure (III-16) :** Le circuit équivalent pour obtenir les courants magnétisants triphasés du côté Delta.

Alors on peut déduire les courants magnétisants triphasés des phases du côté Delta qu'ils sont : ( $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ , et  $I_{CA}$ )

$$\begin{cases} I_{AB} = \frac{1}{m} (I_{dy} + I_{iy}) + I_{od} \\ I_{BC} = \frac{1}{m} (a^2 \times I_{dy} + a \times I_{iy}) + I_{od} \dots \dots \dots (III. 9) \\ I_{CA} = \frac{1}{m} (a \times I_{dy} + a^2 I_{iy}) + I_{od} \end{cases}$$

### III.5 Conclusion :

L'étude présentée par ce chapitre concerne le calcul du courant magnétisant dans un transformateur «Dy», ce courant qui représente aussi la composante réactive du courant à vide sert spécialement à l'excitation du circuit magnétique,

Pour le régime linéaire la forme du courant magnétisant est une valeur admissible, puisque n'y a pas des contraintes pour ce régime, mais il est sinusoïdale si le régime transitoire à cause de la variation d'inductance du transformateur,

Pour la détermination des courants magnétisants il est nécessaire de connaître la courbe d'aimantation B en fonction de H.

Après la détermination de cette courbe, on peut déduire les courants magnétisants pour chaque enroulement bobiné sur les colonnes. Aussi les densités du flux magnétique doivent être connues, elles sont calculées à partir de la tension d'alimentation des enroulements et de la section du noyau dans laquelle circule le flux.



# Chapitre IV

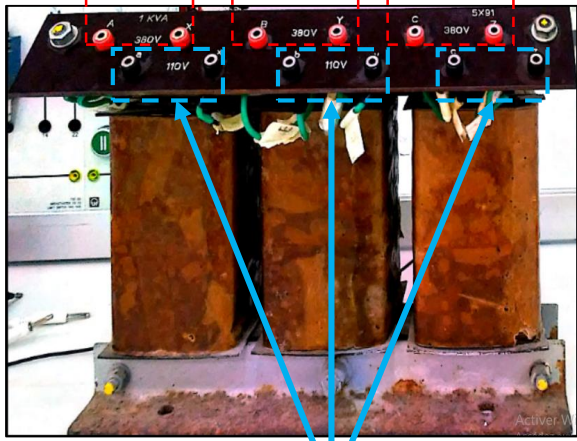
## L'étude expérimentale et numérique d'un transformateur triphase

## Chapitre IV : L'étude expérimentale et numérique d'un transformateur triphasé

### IV.1 Introduction :

Pour ce chapitre on va voir l'étude expérimentale de la modèle du transformateur triphasé utilisé à notre travail. Nous avons mis en œuvre cette expérience dans le laboratoire d'électrotechnique de la faculté de technologie du m'sila, on utilisant les matériaux existants donc nous avons besoin de ce laboratoire. Nous décrirons cette expérience en détail dans ce chapitre. C'est pourquoi nous avons présenté ce chapitre en trois étapes fondamentales, le premier c'est l'essai à vide du transformateur, le deuxième c'est l'essai en court-circuit, finalement dans l'étape troisième on donne tous les paramètres de notre transformateur par la présentation du schéma équivalent totale.

### IV.2 Description du matériel de l'expérience :

| Le transformateur triphasé                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Les deux bornes d'entrée et de sorti des trois bobines primaires (A, B et C)</p>  <p>Les deux bornes d'entrée et de sorti des trois bobines primaires (A, B et C)</p> | <p>Ce transformateur est de la marque de «KARCAGI ALT.TECHNIKA »</p> <p>C'est un transformateur triphasé, contient des trois colonnes.</p> <p>La puissance nominale :</p> <p><math>S_n = 1\text{kVA}</math></p> <p>les tensions primaires et secondaires sont :</p> <p><math>V_1 = 380\text{V}</math></p> <p><math>V_2 = 110\text{V}</math></p> <p>Tous les paramètres de ce transformateur plus détaillé dans le troisième chapitre</p> |

## L'autotransformateur



Pour l'alimentation on utilise un autotransformateur avec une sortie triphasé sa tension varié entre 0 et 450v et un courant maximum de 8A par phase.

## Les appareils des mesures



Deux wattmètres



Voltampère mètre



Multimètre

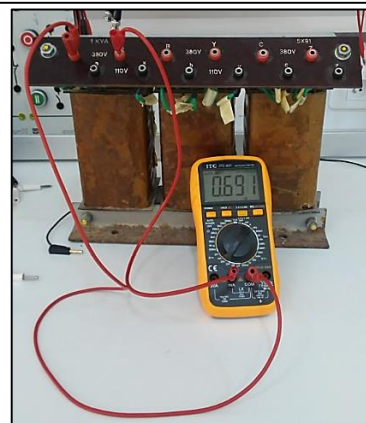
- pour déterminer la puissance active totale dans la coté primaire on a suivi la méthode de deux wattmètres, donc On doit utiliser deux wattmètres.
- On utilise un voltmètre et ampèremètre pour mesurer les courants et les tensions pendant les essais.
- Le multimètre utiliser pour mesuré les résistances et les inductances primaire et secondaire.

**Tableau (IV-1) :** Les appareils de mesure utilisés pour l'étude expérimentale

Il est possible de déterminer de façon pratique les éléments intervenant dans le schéma équivalent en pratiquant deux essais, à savoir « l'essai à vide » et « l'essai en court-circuit ». Avant de commencer ces deux essais, on utilise un multimètre pour déterminer les résistances et les inductances des bobines primaires et secondaires de notre transformateur, comme indiqué sur la figure ci-dessous :

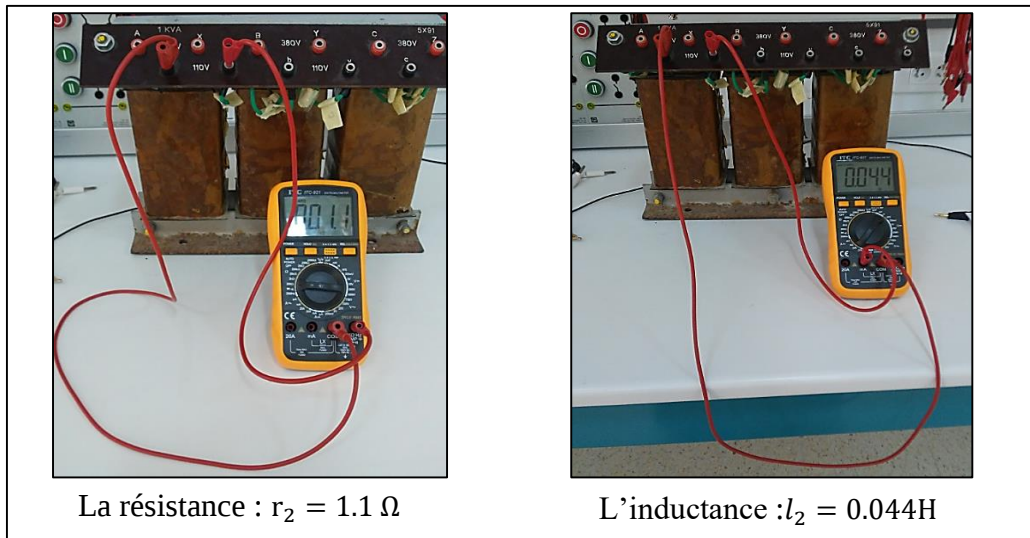


La résistance :  $r_1 = 6.5 \Omega$



L'inductance :  $l_1 = 0.691H$

**Figure (IV-1) :** Mesure de la résistance et l'inductance d'enroulement primaire



**Figure (IV-2) :** Mesure de la résistance et l'inductance d'enroulement secondaire

A notre étude expérimentale on utilise le montage (Dy) pour le transformateur,

### IV.3 Identification et modélisation du transformateur triphasé :

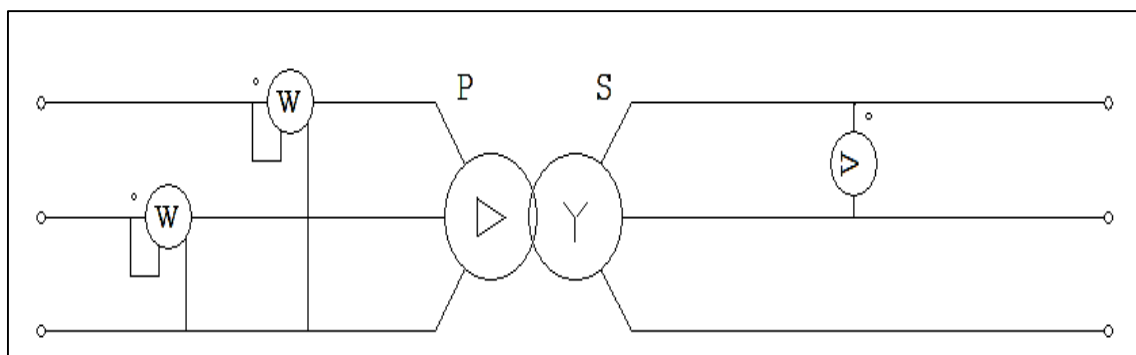
Afin de modélisé le transformateur triphasé utilisé, des essais expérimentaux sont effectués

#### IV.3.1 Essai à vide :

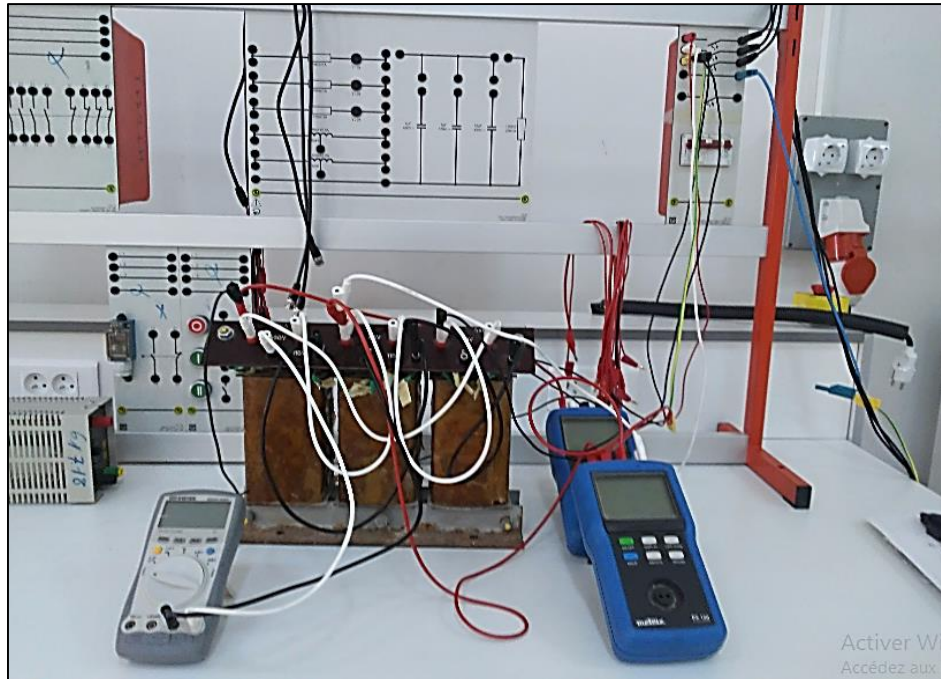
L'essai à vide est effectué afin de déterminer les paramètres de branche excitants du circuit équivalent, la perte à vide, le courant à vide excitant et facteur de puissance à vide. Alors que l'un des enroulements est ouvert, une tension nominale est appliquée à l'autre enroulement. [24]

Pendant cet essai le transformateur n'étant connecté à aucune charge et alimenté par le primaire sous tension nominale, il est possible de mesurer la puissance active  $P_{1v}$  pour la coté primaire, et la tension  $V_{2v}$  pour la coté secondaire.

On réalise le montage suivant :



**Figure (IV-3) :** Le schéma du montage de l'essai à vide



**Figure (IV-4) :** La réalisation du montage de l'essai à vide dans laboratoire

Après l'alimentation du la primaire par la tension nominale 380V :

L'indication du premier wattmètre :  $P_{W1} = 65.5W$

L'indication du deuxième wattmètre :  $P_{W2} = 57.9W$

L'indication du voltmètre :  $U_{2V} = 116.4v$

- Donc on peut déduire :

- La puissance active primaire à vide  $P_{1V}$ :

$$P_{1V} = \frac{1}{3}(P_{W1} + P_{W2})$$

$$P_{1V} = 41.3W$$

- Le facteur de puissance  $\cos \varphi$  :

$$P_{1V} = V_1 \times I_{1V} \times \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{1V}}{V_1 \times I_{1V}}$$

$$\cos \varphi = 0.748$$

- La puissance apparente à vide  $S_{1V}$ :

$$S_{1V} = \frac{P_{1V}}{\cos \varphi}$$

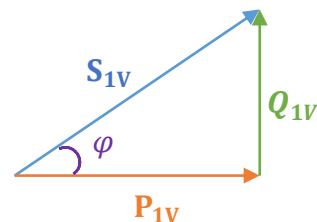
$$S_{1V} = 55.06 \text{ VA}$$

- La puissance réactive à vide  $Q_{1V}$ :

$$Q_{1V} = \sqrt{(S_{1V})^2 - (P_{1V})^2}$$

$$Q_{1V} = 36.06 \text{ VAR}$$

Au même temps, la puissance réactive est égale a :  $Q_{1V} = V_1 \times I_{1V} \times \sin \varphi$



$$Q_{1V} = 36.57 \text{ VAR}$$

- La résistance équivalent aux pertes fer  $R_f$ :

$$P_{1V} = P_f + P_j = (R_f \times (I_{1va})^2) + (r_1 \times (I_{1v})^2)$$

Le terme  $(r_1 \times (I_{1v})^2)$  est négligeable, tel que  $(I_{1v})^2$

$$P_{1V} \approx P_f = (R_f \times (I_{1va})^2)$$

$$R_f = \frac{P_{1V}}{(I_{1va})^2} = \frac{(V_1)^2}{P_{1V}}$$

$$R_f = 1176.75 \Omega$$

- Le courant primaire à vide active  $I_{1va}$ :

$$P_{1V} = R_f \times (I_{1va})^2$$

$$I_{1va} = \sqrt{P_{1V}/R_f}$$

$$I_{1va} = 0.186A$$

Au même temps, le courant primaire à vide active  $I_{1va}$ :

$$I_{1va} = I_{1v} \times \cos \varphi_{1v}$$

$$I_{1va} = 0.186A$$

- Le courant primaire à vide réactive  $I_{1vr}$ :

$$I_{1vr} = I_{1v} \times \sin \varphi_{1v}$$

$$I_{1va} = 0.167 A$$

- La réactance magnétisant  $X_m$ :

$$R_f \times I_{1va} = X_m \times I_{1vr}$$

$$X_m = \frac{R_f \times I_{1va}}{I_{1vr}}$$

$$X_m = 1316.97 \Omega$$

- L'inductance magnétisant  $l_m$ :

$$X_m = \omega l_m$$

$$l_m = \frac{X_m}{\omega}$$

$$l_m = 4.19H$$

Au même temps :

$$l_m = \frac{(V_1)^2}{\omega \times \sqrt{(S_{1v})^2 - (P_{1v})^2}}$$

$$l_m = 4.21H$$

- La réactance primaire  $X_p$ :

$$X_p = \frac{(V_1)^2}{\sqrt{(V_1 \times I_{1V})^2 - (P_f)^2}}$$

$$X_p = 1332.93 \, \Omega$$

- La puissance magnétisante :

$$Q_{1V} = \text{puissance magnétisante} + (\omega l_1 \times I_{1V}^2)$$

Si on néglige le terme  $(\omega l_1 \times I_{1V}^2)$ , tel que  $(I_{1V}^2)$  très faible.  
puissance magnétisante  $\approx Q_{1V} \approx 85.67 \, \text{VAR}$

puissance magnétisante  $\approx 85.67 \, \text{VAR}$

Au même temps, puissance magnétisante  $\approx Q_{1V} = X_m \times (I_{1Vr})^2$

puissance magnétisante =  $36.72 \, \text{VAR}$

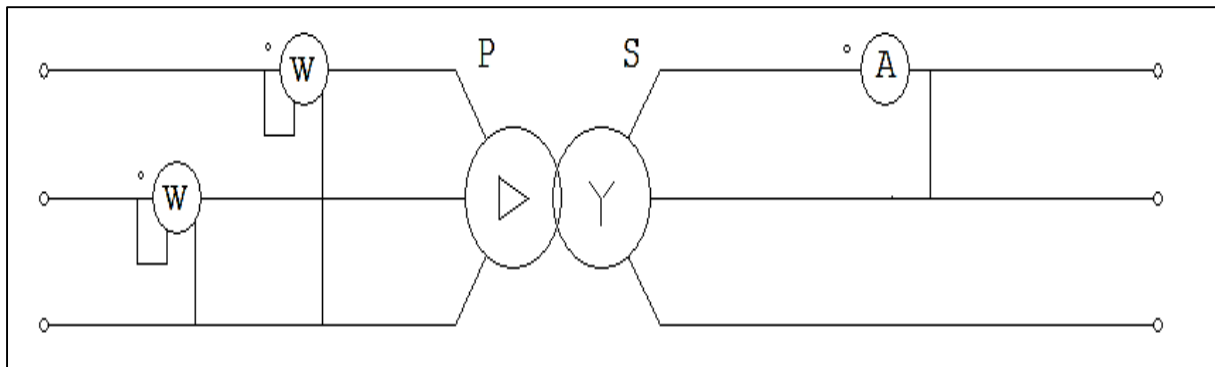
- La chute de tension  $\Delta V_2$ :

$$\Delta U_2 = U_{2V} - U_2$$

$$\Delta U_2 = 6.2 \, \text{V}$$

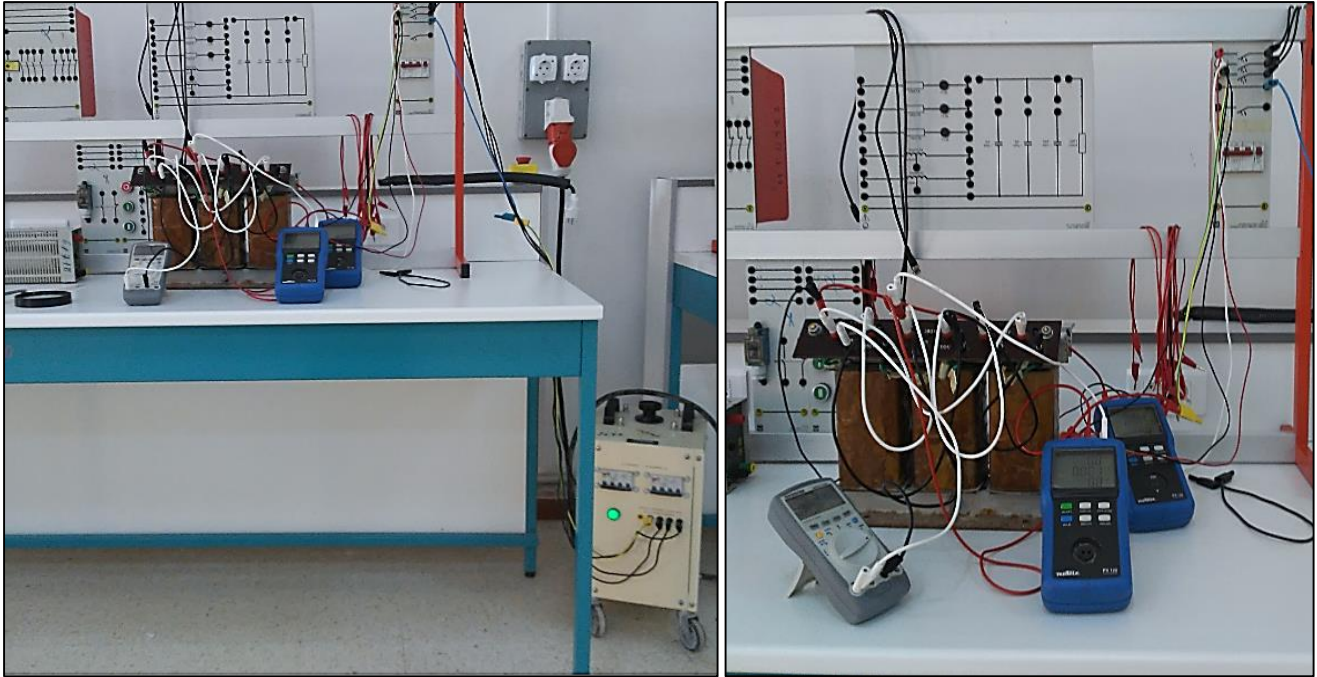
## IV.3.2 L'essai en court-circuit :

Par l'essai en court-circuit du transformateur, les pertes de cuivre du transformateur peuvent être obtenues. Il est effectué en mettant en circuit la borne secondaire de transformateur, puis appliquant une tension réduite au côté primaire. [25]



**Figure (IV-5) :** Schéma du montage d'essai en court-circuit

A l'essai en court-circuit on réalise le montage de la figure suivant, à l'aide de l'autotransformateur on alimente notre transformateur sous une tension très réduite. Dans cet essai les pertes fer sont négligeables et la puissance absorbée représente pratiquement les pertes par l'effet de joule.



**Figure (IV-6) :** La réalisation de l'essai en court-circuit dans laboratoire

$$I_{1cc} = 1.559 \text{ A} ; U_{1cc} = 37.2 \text{ V}$$

Le premier wattmètre affiché :

$$P_{W1} = 27.5 \text{ W} ;$$

Le deuxième wattmètre affiché :

$$P_{W2} = 66.5 \text{ W} ;$$

L'ampère affiché :

$$I_{2cc} = 5.15 \text{ A}$$

- Donc on peut déduire :

- La puissance primaire de court-circuit  $P_{1cc}$ :

$$P_{1cc} = \frac{1}{3} (P_{W1} + P_{W2})$$

$$P_{1v} = 31.33 \text{ W}$$

- La résistance secondaire  $R_s$ :

$$P_{1cc} = P_f + P_j = (R_f \times (I_{1va})^2) + (R_s \times (I_{2cc})^2)$$

Le terme  $(R_f \times (I_{1va})^2)$  est négligeable.

$$P_{1cc} \approx P_j = (R_s \times (I_{2cc})^2)$$

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{(I_{2cc})^2}$$

$$R_s = 1.181 \Omega$$

- L'impédance secondaire  $Z_s$ :

$$Z_s = m \times \frac{V_{1cc}}{(I_{2cc})^2}$$

$$Z_s = 1.25 \Omega$$

- La réactance secondaire  $X_s$

$$X_s = \sqrt{(Z_s)^2 - (R_s)^2}$$

$$X_s = 0.412 \Omega$$

- L'inductance secondaire  $l_s$  :

$$l_s = \frac{X_s}{\omega}$$

$$l_s = 0.00138H$$

Au même temps :

$$l_s = m^2 \times \frac{\sqrt{(S_{1cc})^2 - (P_{1cc})^2}}{\omega \times (I_{1cc})^2}$$

Avec :

$$S_{1cc} = V_{1cc} \times I_{1cc}$$

$$S_{1cc} = 33.47 \text{ VA}$$

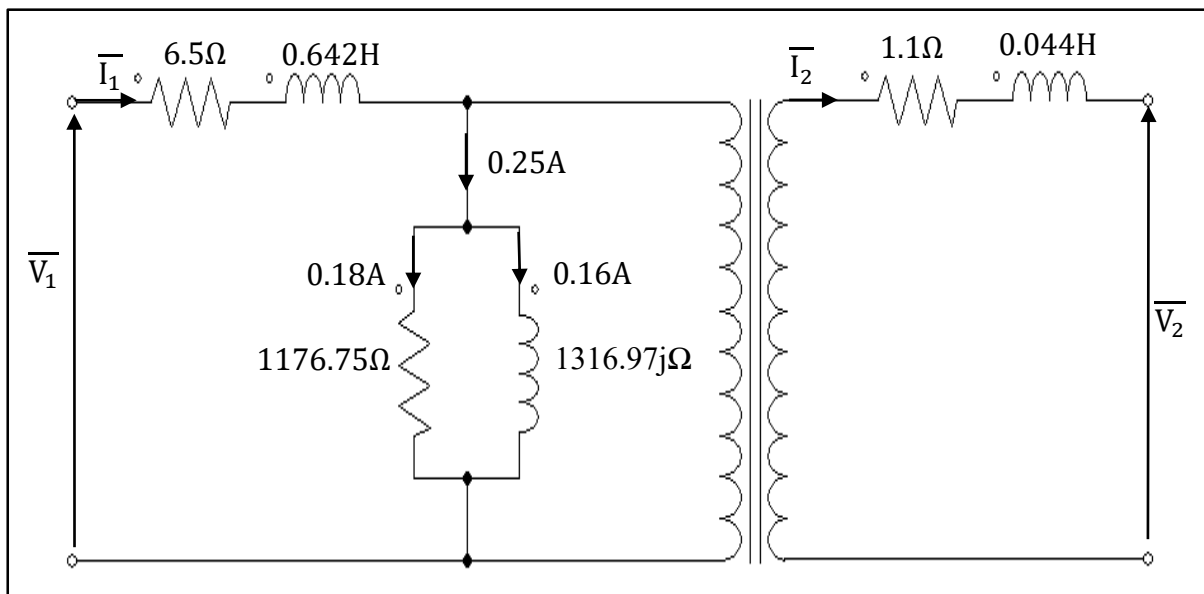
$$l_s = 0.00140H$$

On peut recalculer la tension  $V_{1cc}$  :

$$V_{1cc} = \frac{\sqrt{(R_s)^2 - (\omega l_s)^2}}{m} \times I_{2n}$$

$$V_{1cc} = 21.49 \text{ V}$$

Finalement le schéma équivalent d'une phase de transformateur utilisé pour notre travail représenté par la figure (IV.7) :



**Figure (IV-7) : Schéma équivalent d'une phase de transformateur**

## IV.4 Simulation du transformateur par MATLAB :

### IV.4.1 Essai à vide :

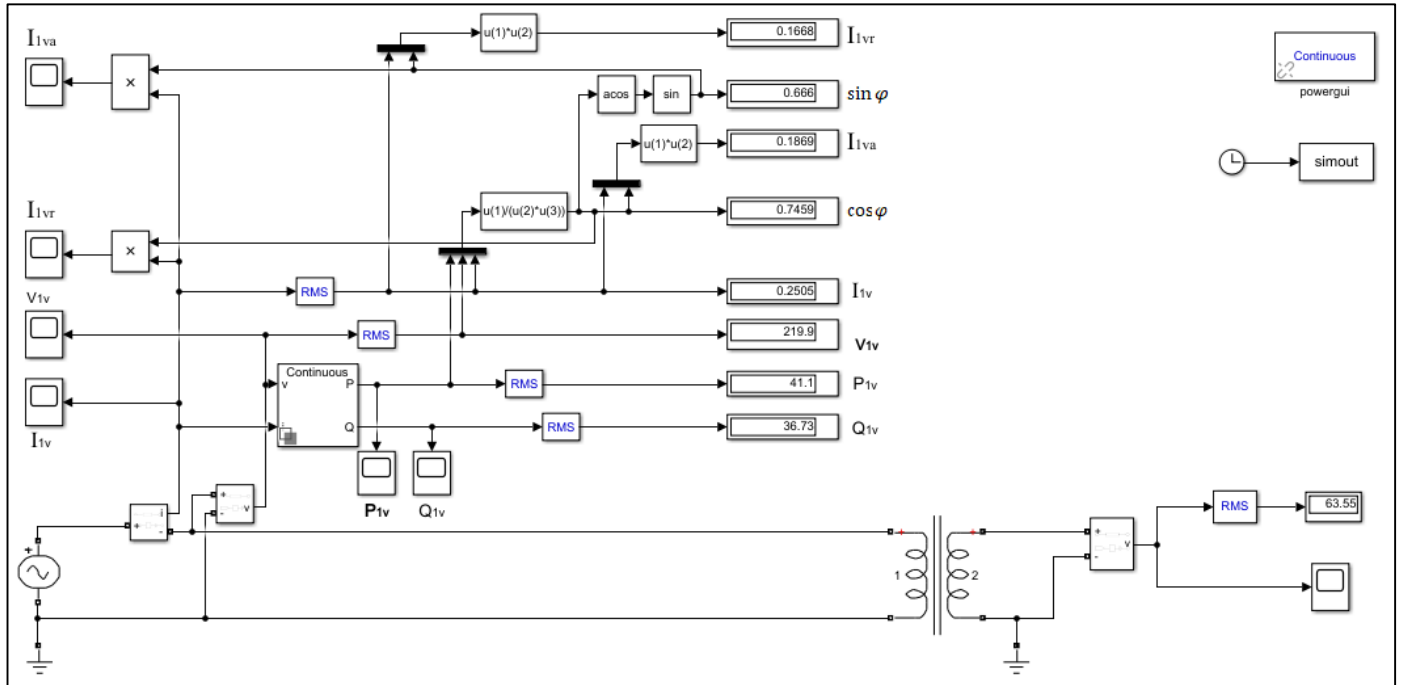
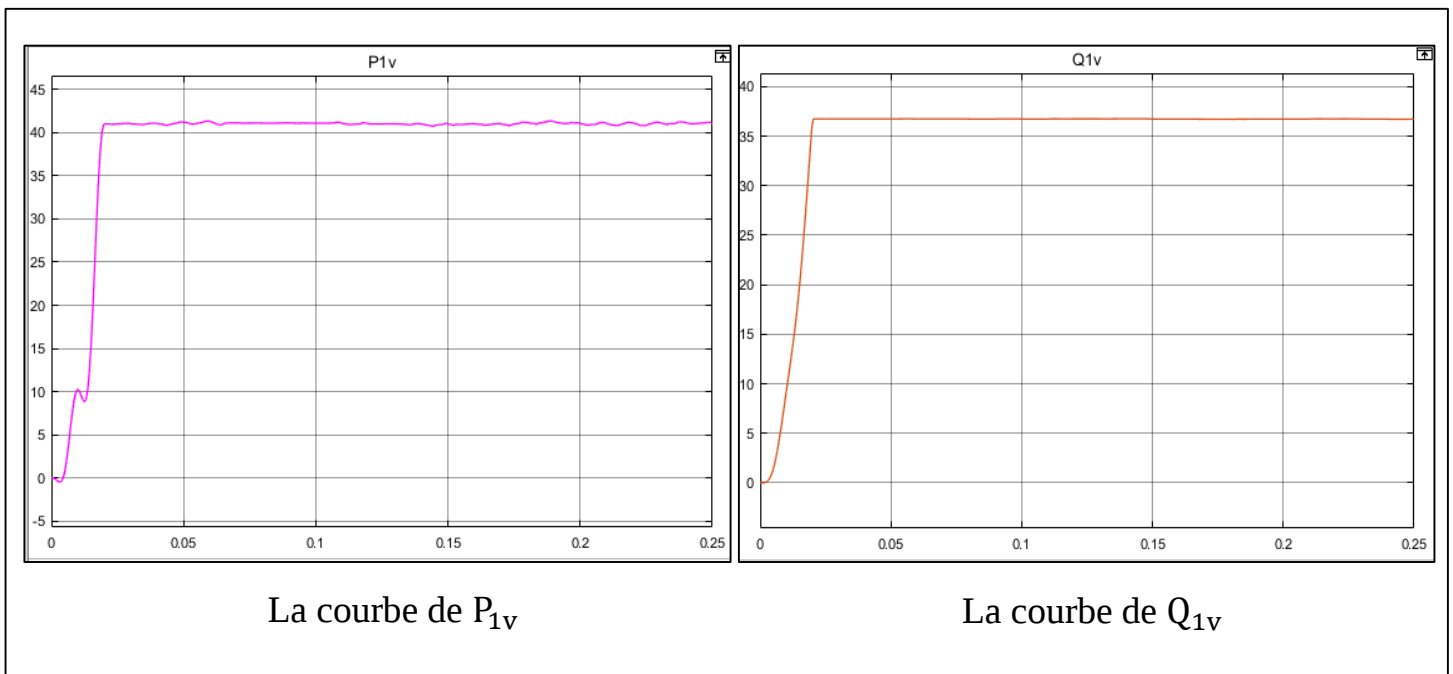


Figure (IV-8) : Le schéma bloc de l'essai à vide

On peut obtenir les courbes suivant :



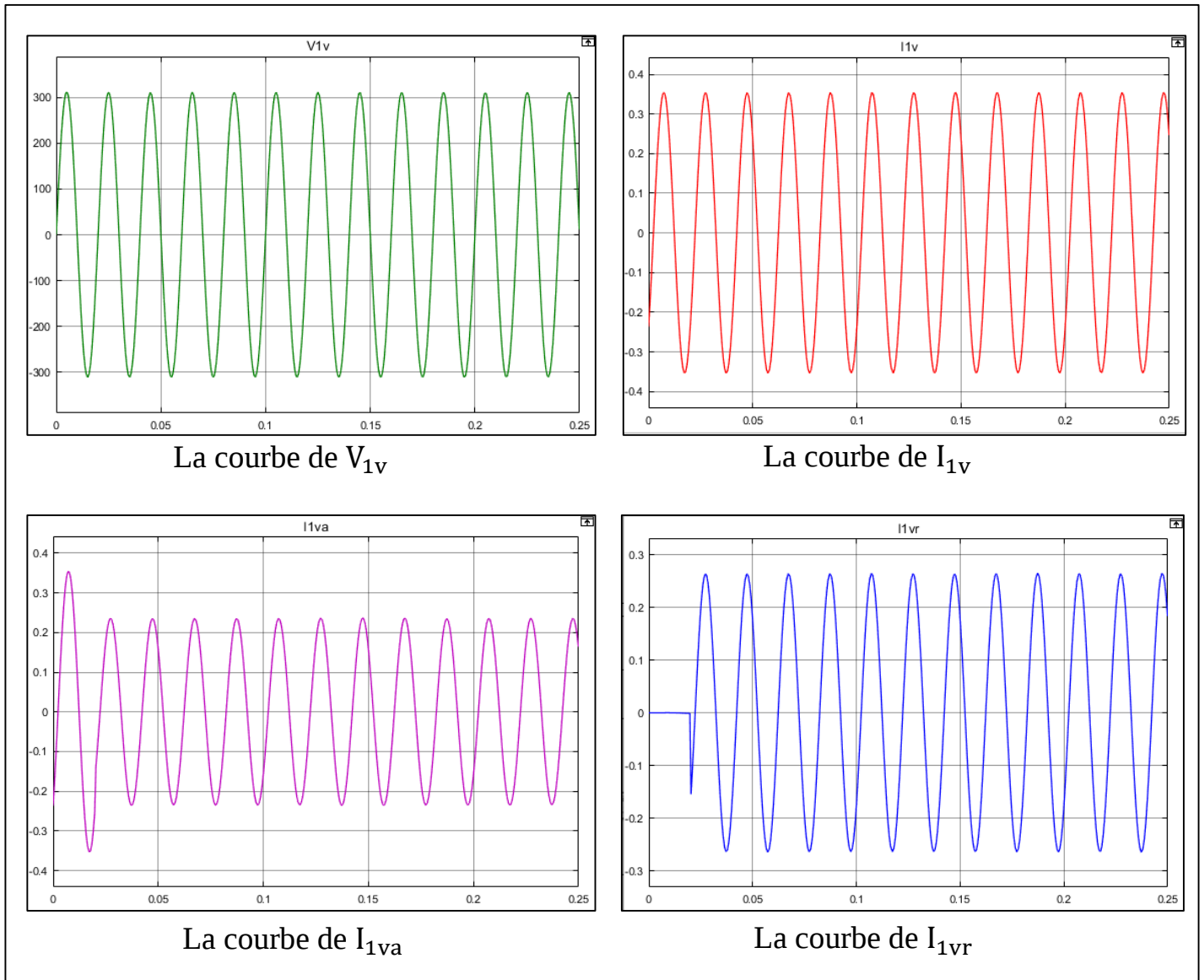
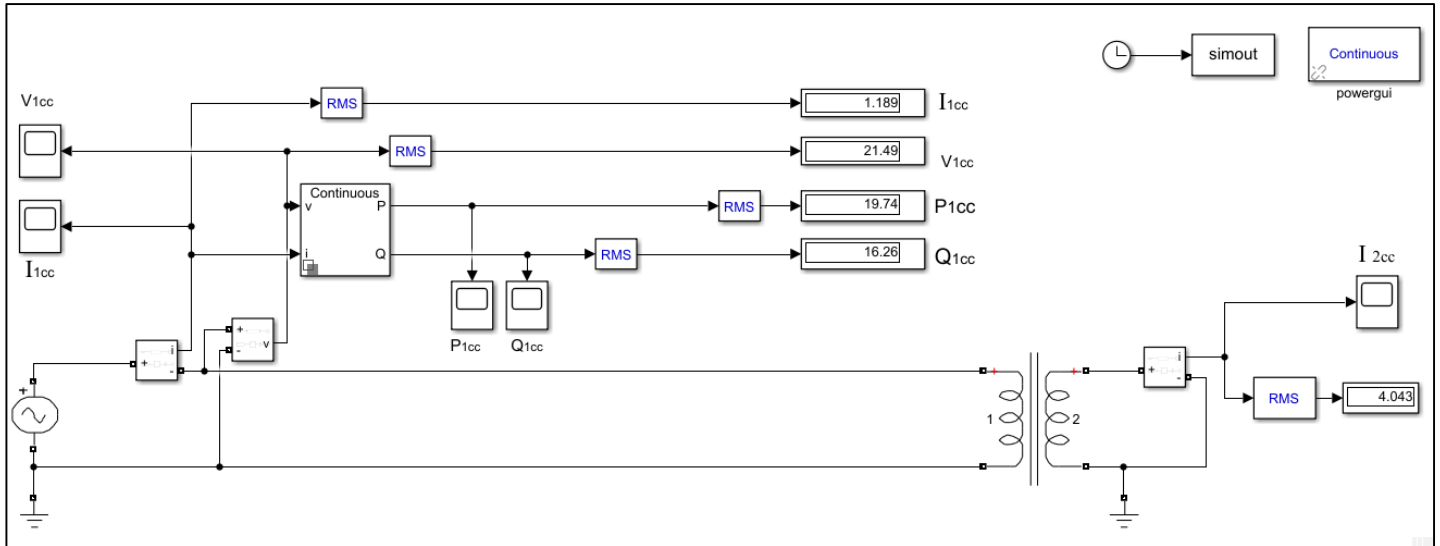


Figure (IV-9) : Les courbes obtenues selon l'essai à vide

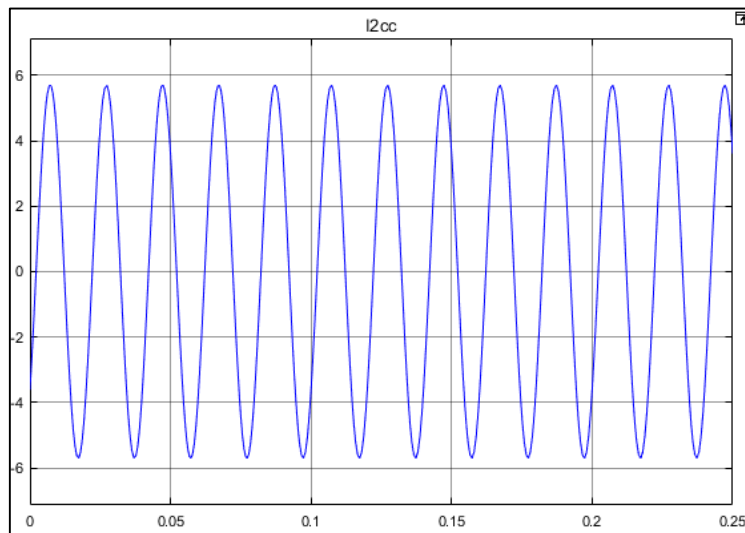
#### IV.4.2 Essai en court-circuit :

Le test de court-circuit du transformateur est une méthode importante pour l'étude des caractéristiques du transformateur. La méthode de simulation pour l'essai de court-circuit du transformateur est utile pour étudier le principe de fonctionnement et caractéristique des transformateurs. MALAB / Simulink est l'un des logiciels les plus populaires dans ce domaine. Certaines applications telles que le modèle et simuler le comportement dynamique des contacteurs électromécaniques à courant alternatif, l'intégration de MATLAB pour conceptualiser la relation entre les modèles mathématiques abstraits et les situations pratiques, en utilisant des exercices spécialement conçus sur la protection contre la foudre des sous-stations dans l'enseignement du cours haute tension à MATLAB modélisation des réseaux électriques sur l'analyse transitoire, la modélisation des surtensions d'un transformateur [25]



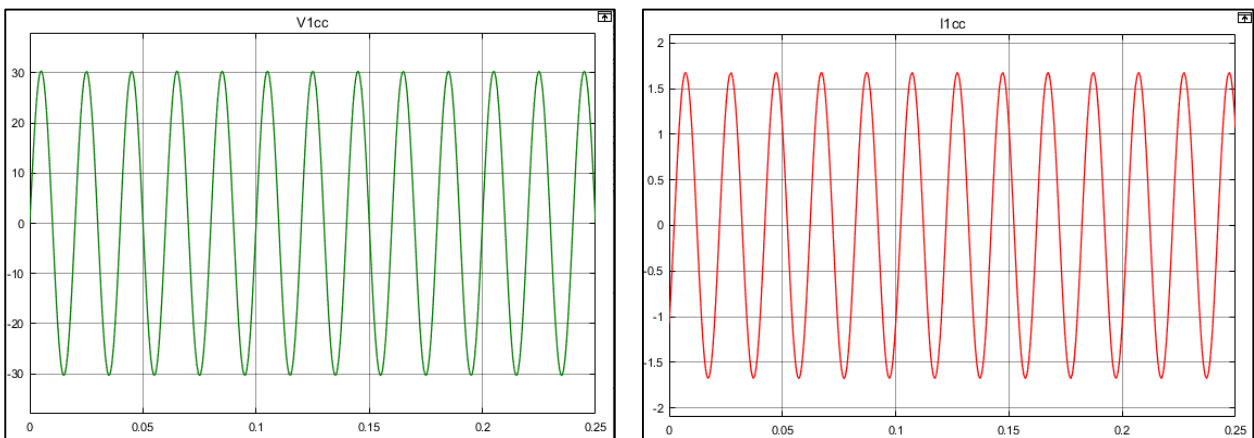
**Figure (IV-10) :** Le schéma bloc de l'essai en court-circuit

Au première lieu on peut reléve la courbe de courant secondaire de court circuit :



**Figure (IV-11) :** La courbe de ( $I_{2cc}$ )

Aussi on peut relever les courbes suivant :



**Figure (IV-12) :** Les courbes de ( $V_{1cc}$ ) et ( $I_{1cc}$ )

### IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a réalisé une étude expérimentale basée sur deux essais à savoir l'essai à vide et en court-circuit, ces deux essais permettent d'identifier le transformateur triphasé utilisé à ce travail. A partir des mesures obtenues nous avons réalisé tous le calcul sur une phase pour déduire les caractéristiques de ce transformateur. Par la suite nous avons validé notre étude par une simulation numérique pour valider le calcul effectué, pour cela nous avons utilisé le logiciel de MATLAB/Simulink, selon les résultats expérimentales et les résultats numériques nous en avons permis de conclure que le modèle réalisé est assez fiable et précis.

# Conclusion général

## Conclusion général

Le transformateur est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur efficace d'un signal alternatif en maintenant la fréquence et la forme de l'onde inchangées. Et comme tous les machines, les transformateurs sont soumis à plusieurs contraintes, alors les tests périodiques des transformateurs sont essentiels. L'un des méthodes électriques le plus courants du testes, c'est la mesure de rapport de transformation et le courant magnétisant, qui permet d'identifier les courts circuits entre les spires.

Dans le travail présenté par ce mémoire, nous avons mis à l'esprit les méthodes de la détermination du courant magnétisant. Ce courant et à partir du schéma équivalent du transformateur montre que le courant magnétisant c'est le courant qu'excite le circuit magnétique, donc il représente la composante réactive du courant à vide.

Dans une première partie, nous sommes intéressés au fonctionnement des transformateurs électriques dans les systèmes triphasés soit en régime équilibré soit en régime déséquilibré ou l'étude devient plus compliquée.

On peut conclure que l'étude du fonctionnement d'un transformateur en régime équilibré utilise le schéma réel ramené au secondaire qu'il est l'équivalent d'un transformateur parfait ramené au secondaire c'est-à-dire qu'on l'alimente sous la tension primaire il donne au secondaire la tension secondaire à vide, en série avec un dipôle composé de la résistance et la réactance ramenées au secondaire, en cas monophasé. Au même temps on peut réaliser le même travail pour le cas triphasé.

Le transformateur devient en régime déséquilibré s'il alimente une charge déséquilibrée ou s'il existe un défaut, en amont, au primaire. L'étude du transformateur dans ce cas fait appel à une transformation vers les composantes symétriques à l'aide de la transformation de Fortescue. Ce transformateur devient l'équivalent de trois transformateurs triphasés équilibrés directe, inverse et homopolaire.

Notre étude a comporté aussi le calcul du courant magnétisant dans un transformateur «Dy», ce courant qui représente aussi la composante réactive du courant à vide sert spécialement à l'excitation du circuit magnétique,

Pour le régime linéaire la forme du courant magnétisant est une valeur admissible, puisque n'y a pas des contraintes pour ce régime, mais il est sinusoïdale si le régime transitoire à cause de la variation d'inductance du transformateur.

Dans la dernière partie on a enrichir notre travail par une partie expérimentale qui concerne l'identification du modèle du transformateur et la détermination du schéma équivalent d'une phase, pour ce faire deux essais sont effectués qui sont l'essai à vide et l'essai en court-circuit. Ensuite un calcul par phase est effectué pour déduire les caractéristiques de ce transformateur. On clôture notre travail par une partie numérique qui comporte d'une part une simulation du

champ magnétique en utilisant le logiciel Comsol multiphysics dans sa version récente et d'autre part on a reproduit les deux essais par Simulink sous MATLAB. La comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation a montré la précision de notre calcul analytique et elle a abouti à un schéma équivalent est précis. Aussi on peut utiliser le logiciel Comsol multiphysics pour visualiser les courbes des courants et des tensions primaire et secondaire pour les deux essais.

A L'issue de cette étude on a enrichir nos connaissances par une valeur ajoutée en matière de transformateurs triphasés et de l'étude de régime déséquilibré ainsi une simulation numérique intéressante vu l'importance des logiciels utilisés.

# Les références

## Les références

- [1] A. CHOUCHOU, *cours sur le transformateur*, M'sila: Département de génie électrique de M'sila, 2017-2018.
- [2] Z. Amini, «Mesures et identification des paramètres de diverses configurations de transformateurs triphasés et étude des courants magnétisants,» Diss. École Polytechnique de Montréal, 2011.
- [3] P. TIXADOR, *ENERGIE ELECTRIQUE*, Ecole Nationale Supérieure de l'Energie, l'Eau et l'Environnement, Ecole Grenoble, 2010.
- [4] W. T. , *Électrotechnique*. 3. éd., Québec: Presses de l'Université Laval, 2000.
- [5] P. Bouchard, *Electrotechnique*, Presses inter Polytechnique, 1999.
- [6] T. SMAIL, " *Modélisation des éléments non linéaire* ", département d'électronique, Université de Batna, 2005.
- [7] GAULARD, «Dessapt,» 2000-2007. [En ligne]. Available: <http://dspt.perso.sfr.fr/GAULARD.htm>.
- [8] A. .. YAHIOUI, *Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance: Cas du courant d'appel*, UNIVERSITE FERHAT ABBAS—SETIF , 2012.
- [9] S. Chapman, *Electric Machinery Fundamenta*, Singapore: McGraw-Hill, 1985.
- [10] A. LEFEVRE, *Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs: Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires*, Doctoral dissertation. L'université de Nantes , 2006.
- [11] M. MEZIANI, *Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance*, Diss. Université Mouloud Mammeri , 2011.
- [12] J.-P. Fanton, *Génie électrique*, Cours, Ecole centrale Paris , 2004 (2003).
- [13] M. Lambert, *les transformateurs électrique*, DUNOD, mars 2016.
- [14] J. Sanchez, *Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance*, : Diss . l'université de GRENOBLE, 2011.

- [15] A.-P. D. F. a. P. L. Chamaret, « "Histoire et avenir du transformateur de traction dans le matériau roulant ferroviaire." », 2019.
- [16] C. CHEVASSU, "*Machines électriques: cours et problèmes.*", Ecole Nationale Supérieure Maritime, 2011.
- [17] S. L. Herman, Alternating Current Fundamentals, Cengage Learning, 2011.
- [18] P. Mayé, Aide-mémoire Composants électroniques-5e édition, 2014-2015: Dunod.
- [19] L. . Lasne, Electrotechnique et énergie électrique-2e éd, Dunod, juin 2013.
- [20] D. . Sator-Namane, Machines à courant alternatif: machines asynchrones et synchrones, convertisseurs électromécaniques, Ellipses, 2010.
- [21] G. & N. F. Séguier, Electrotechnique industrielle, Technique et documentation, 1977.
- [22] D. Gaude, ÉLECTROTECHNIQUE.
- [23] C. Guérin, «Détermination des pertes par courants de Foucault dans les cuves de transformateurs. Modélisation de régions minces et prise en compte de la saturation des matériaux magnétiques en régime harmonique,» polytechnique de GRENOBLE, 26-09- 1994.
- [24] C. O. N. SAFFET AYASUN, «Transformer Tests Using MATLAB/Simulink and Their Integration Into Undergraduate Electric Machinery Courses,» Received 15 March 2005; accepted 29 December 2005.
- [25] W. G. H. W. Wang Lidia, «Short-Circuit Test Simulation System of Transformer with Shunt Capacitor under Different Frequency Source,» 2012.