

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة أكلي محند أولحاج البويرة



UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ — BOUIRA  
UAMO (ALGERIE)

Faculté des sciences et sciences appliquées.

## Mémoire MASTER 2

Présenté au département de Génie Electrique.

Pour obtenir le diplôme

**De Master En**  
**Ingénierie de l'énergie électrique et transport**

Réalisé par:

KHELIFI cherifa

DJADI Hassiba

Thème

***Etude de réduction de courant d'appel dans les transformateurs  
par une manœuvre contrôlée***

Soutenue le 09/2017 devant la commission d'examen composée de :

YAHIOU abdelghani

Encadreur

SAOUDI kamel

Président

MOUASSA souhil

Examineur

MADI saida

Examineur

## REMERCIEMENTS

---

### REMERCIEMENTS

*Le plus grand Merci revient à dieu qui lui seul nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous aidé à réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions vivement notre encadreur Mr. Yahiou abd elghani. Qui a été présent et très actif tout au long de ce travail, n'hésitant pas à prendre sur son temps pour nous aidons du début jusqu'à la rédaction du mémoire.*

*Nous souhaitons aussi exprimer nous plus sincères remerciements à chacun des membres du jury qui, malgré leurs responsabilités, ont bien voulu nous consacrer du temps :*

*1-saoudi kamel*

*2-mouassa souhil*

*3-madi saida*

*Un grand Merci A tous les enseignants de la faculté sciences et science appliquée de bouira .*

*Un grand merci a toute notre famille et plus particulièrement nous parents, pour n'avoir soutenue et aidée tout au long de nos études.*

*Enfin nous remercions toute personne de prés ou de loin qui a participe pour rendre ce travail réalisable et présentable.*

**KHELIFI & DJAADI**

*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail  
aux être qui me sont les plus chers.*

*A mes chers parents qui m'ont toujours encouragé  
symbole de tendresse pour leur sacrifice estimable*

*~que dieu garde ~.*

*A mes chers frères et mes sœurs.*

*A tous les enfants de ma famille.*

*A ma famille et à tous mes amis.*

*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail  
aux être qui me sont les plus chers.*

*À mes chers parents qui m'ont toujours encouragé symbole  
de tendresse pour leur sacrifice estimable*

*~que dieu garde ~.*

*À ceux qui ont rempli ma vie avec l'amour et les  
encouragements :*

*Mon mari: Karim*

*À mes chers frères et mes sœurs.*

*À tous les enfants de ma famille.*

*À ma famille et à tous mes amis.*

## Sommaire

Remerciement.....	II
Dédicaces.....	III
Sommaire.....	V
Liste des figure.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des acronymes et symboles.....	X
Introduction générale.....	1
Chapitre 01 Généralités sur le transformateur et leur modélisation	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Invention.....	4
1.3. Transformateur.....	6
1.3.1. Principe de fonctionnement.....	6
1.3.2. Transformateur idéal.....	7
1.3.2.1. Fonctionnement à vide du transformateur idéal .....	7
1.3.2.2. Fonctionnement en charge du transformateur idéal .....	9
1.3.3. Transformateur réelle.....	10
1.3.4. Essais et propriétés du transformateur.....	10
1.3.4.1. Essai à vide.....	10
1.3.4.2. Essai en court-circuit.....	11
1.3.5. Constitution générale de transformateur.....	11
1.3.5.1 Circuit magnétique.....	11
1.3.5.2. Circuit électrique.....	13
1.4. Type de transformateur.....	13
1.4.1 Transformateur de puissance.....	13
1.4.2 Transformateur monophasé.....	15
1.4.2.1. Schéma électrique équivalent.....	15
1.4.3. Transformateur triphasé.....	17
1.4.3.1. Couplages.....	17
1.4.3.2. Rapport de transformation.....	19
1.4.4. Transformateurs à colonnes.....	19

1.4.5. Transformateur cuirassée.....	20
1.4.6. Transformateur de tension.....	20
1.4.7. Transformateur de courant.....	20
1.5. Modélisation des transformateurs.....	20
1.5.1. Transformateur monophasé linéaire sans saturation.....	21
1.5.2. Transformateur monophasé avec saturation.....	22
1.6. Conclusion.....	23
Chapitre 02 courants d'appel dans le transformateur	
2.1. Introduction.....	24
2.2. Définition de Courant d'appel.....	24
2.3. Caractéristiques du courant d'appel .....	26
2.4. Causes du courant d'appel.....	27
2.5. Effets du courant d'appel.....	28
2.6. Méthodes pour réduire les courants d'appel transitoires.....	29
2.7. Relation du flux résiduel et du courant l'appel.....	30
2.7.1. Flux résiduel.....	30
2.7.2. Formation de courant d'appel.....	31
2.8. Manœuvre contrôlée prenant en compte le flux résiduel.....	33
2.9. Manœuvre contrôlée.....	34
2.10. Conclusion.....	36
Chapitre 03 Minimisation du courant d'appel par une commande	
3.1. Introduction.....	37
3.2. Mesure du courant d'appel dans le transformateur monophasé.....	37
3.2.1. Matériel utilisés.....	37
3.3. Simulation du courant d'appel.....	38
3.4. Cas aléatoire (sans commande).....	40
A-Mesure (Pratique) .....	40
B-Simulation.....	40
3.5. Minimisation du courant d'appel par le point sur l'onde de la tension (Avec commande).....	41
3.5.1 Premier cas : disjoncteur commandée par le point optimal .....	41
3.5.1.1. Procédure de mesure du courant d'appel avec commande.....	41

A-Mesure (Pratique) .....	43
B-Simulation.....	44
3.5.2. Deuxième cas : disjoncteur commandée dans le point $v(t) V_{\max}$ .....	45
3.6. Conclusion.....	47
Conclusion général.....	49

# Liste des figures

---

Figure 1.1 .Transformateur de Faraday.....	4
Figure 1.2 .Transformateur cuirassé, conçu par Uppenborn suivant les brevets de 1885 des ingénieurs Ganz.....	5
Figure 1.3.Transformateur à colonne de 1885. Plus vieil exemplaire du transformateur moderne de l'usine Ganz.....	5
Figure 1.4.Transformateur de Stanley de 1886 avec un entrefer ajustable.....	6
Figure 1.5. Circuit électromagnétique simple.....	6
Figure 1.6. Circuit équivalent du transformateur idéal.....	7
Figure 1.7. Le transformateur à vide.....	8
Figure 1.8. Circuit équivalent du transformateur à vide.....	9
Figure 1.9. Le transformateur en charge.....	9
Figure 1.10. Circuit équivalent du transformateur idéal.....	9
Figure 1.11. Essai à vide du transformateur.....	10
Figure 1.12. Essai en court-circuit du transformateur.....	11
Figure 1.13. Circuit magnétique a colonne.....	12
Figure 1.14. circuit magnétique forme cuirassée.....	13
Figure 1.15. Schéma électrique équivalent d'un transformateur.....	15
Figure 1.16. Le circuit électrique et magnétique du transformateur.....	17
Figure 1.17. Le transformateur parfait modifie la forme de l'énergie électrique.....	17
Figure 1.18. Transformateurs triphasés.....	18
Figure 1.19. Les différents couplages.....	19
Figure 1.20. Transformateur à colonnes.....	20
Figure 1.21. Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence sans saturation .....	22
Figure 1.22. Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec pertes fer, sans saturation.....	23
Figure 1.23. Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec saturation.....	23
Figure 2.1.L'état d'équilibre des flux et courant et de la tension de magnétisation.....	26



Figure 2.2. Illustration du courant magnétisant d'appel.....	26
Figure 2.3. courant d'appel transitoire typique lors du passage dans un transformateur à l'instant où $E = 0$ .....	27
Figure 2.4. Dérivation de la forme d'onde actuelle du courant d'appel de la courbe de saturation d'excitation.....	29
Figure 2.5. caractéristique de magnétisation maximale et gamme de flux résiduels Accessibles.....	32
Figure 2.6. Flux magnétique $\Phi$ et courant d'appel $I$ ( $\Phi_{Res} = 0.1$ p.u. et $t_{fermer} = 3$ ms).....	33
Figure 2.7. Temps de fermeture optimale pour la stratégie monophasée.....	35
Figure 2.8. Séquence d'ouverture schématique.....	36
Figure 2.9. Séquence de fermeture schématique.....	37
Figure 3.1. Photo de montage en laboratoire.....	39
Figure 3.2. Montage de la simulation.....	41
Figure 3.3. Courant d'appel expérimental.....	41
Figure 3.4. Courant d'appel Simulation.....	42
Figure 3.5. Procédure de mesure du courant d'appel avec commande.....	43
Figure 3.6. Alimentation optimale pour éliminer l'asymétrie du flux de noyau.....	43
Figure 3.7. Courant d'appel Pratique.....	45
Figure 3.8 .Courant d'appel (simulation).....	46
Figure 3.9 . résultat expérimental.....	47
Figure 3.10 . résultat de simulation.....	47

# Liste des tableaux

---

Tableau 1.1 Les différents couplages.....	20
Tableau 2.2 Rapport de transformation.....	20

# Liste des acronymes et symboles

---

BT : basse tension

E : force électromotrice

( $E_1$  et  $E_2$ ) Tensions à vide idéaux primaire et secondaire

HT : haut tension

( $I_1$  et  $I_2$ ) Courants primaire et secondaire

( $I_0$ ) Courant à vide

( $L_1$  et  $L_2$ ) Inductance de fuites des enroulements primaire et secondaire

MT : moyenne tension

m : rapport de transformation

( $N_1$  et  $N_2$ ) Nombre de spires des enroulements primaire et secondaire

P : puissance active

Q : puissance réactive

$R_1 R_2$  : Les résistances du primaire et secondaire respectivement.

R : reluctance

( $R_C$ ) Pertes fer

t : temps

T : période

$T_{arc}$  : temps d'amorçage

$T_{cont}$  : délai de synchronisation intentionnelle

$T_{contact}$  : intervalle de temps compris entre le début du mouvement du circuit de fermeture du disjoncteur et le moment du toucher des contacts  $t_{contact}$ .

$T_{fermeture}$  : intervalle de temps compris entre le début du mouvement du circuit de fermeture du disjoncteur et l'instant où le courant commence à s'écouler, donc l'instant de fermeture réelle  $t_{fermeture}$ .

THT : très haut tension

$T_m$  : intervalle entre l'instant où le courant commence à s'écouler  $t_{fermeture}$  et le passage par zéro de tension suivant

# Liste des acronymes et symboles

---

$T_{ouverture}$ : intervalle entre le début du mouvement de la bobine d'ouverture et la séparation des contacts  $t_{séparation}$

$T_{préarc}$ : temps de pré-amorçage

$t_s$  : Temps de saturation

$T_w$ : intervalle de temps d'attente utilisé par le contrôleur pour les calculs internes

$NT_{zéro}$  : intervalle de temps requis en relation avec le passage à zéro

$(V_1 \text{ et } V_2)$  Tension primaire et secondaire

$\omega$  : pulsation angulaire

$X$  : réactance

$(X_m)$  Réactance magnétisante

$Z_C$  : impédance capacitive

$Z_L$  : impédance inductive

$\phi$  : Flux magnétique

$\eta$  : rendement

$\theta$  : La phase

$\emptyset$  : Flux résiduel.

$\emptyset_m$  : Flux de magnétisation.

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'énergie électrique c'est l'énergie la plus consommée et la plus utiliser dans différents Secteur de consommation avec plusieurs variétés de tension (HT, BT, THT, MT....) et cette énergie est distribué à partir des postes électriques. L'appareil qui a un rôle pour compléter cette distribution est le transformateur.

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 différents, mais de même fréquence [1]. Cet appareil n'effectue donc qu'un transfert d'énergie par voie électromagnétique. Il comporte deux enroulements montés sur un circuit magnétique feuilleté, l'un est dit "Primaire" reçoit de la puissance active de la source et l'autre dit "Secondaire" fournit de la puissance active au circuit d'utilisation. Le transformateur peut fonctionner en abaisseur ou en élévateur. Le transformateur est un élément important dans les systèmes de transport et de distribution dans les réseaux électriques [5].

Le transformateur de puissance peut être soumis à des transitoires dues à la manœuvre des disjoncteurs. La fermeture non contrôlée de disjoncteur sur un transformateur à vide peut engendrer des courants possédant une composante continue élevée appelés "courant d'appel", l'amplitude de ces courants peut atteindre la valeur maximale du courant de court-circuit [1].

Les causes principales de ces courants sont la valeur du flux rémanent qui est généralement présent dans le noyau lors de la mise hors tension d'un transformateur de puissance, et la saturation du noyau de fer. Ces courants peuvent provoquer des contraintes électriques et mécaniques importantes dans le transformateur [1].

Les manœuvres de disjoncteurs dans les réseaux électriques à haute tension sont les sources de perturbations en fonction de la charge commutée (réactance, condensateur, transformateur, lignes de transmission). Ces phénomènes physiques bien connus (surtensions, courants d'appels) se compliquent toutefois du fait de la complexité des réseaux de transport d'énergie et de leur interconnexion. Les perturbations engendrées ne restent en aucun cas localisées, mais contraignent souvent l'exploitant à dimensionner un réseau

# Introduction générale

---

complet, ce qui induit un coût important. Ainsi, dans le cas des réseaux à très haute tension, au delà de 362kV, l'isolation des lignes et des postes est déterminée par la tenue en surtension de manœuvres et non plus par le choc de foudre [2].

Il existe plusieurs solutions pour contrôler les transitoires de manœuvres, comme les résistances et les inductances de pré-insertion à l'ouverture et la fermeture, qui permettent de limiter les courants et les tensions, les parafoudres qui limitent les surtensions, et enfin la solution dite « contrôlée » qui permet de choisir l'instant optimal en fonction de la tension réseau pour ouvrir ou fermer le disjoncteur [2]. Cette dernière méthode a fait l'objet de ce mémoire fin d'étude

La méthode de contrôle du courant d'appel est basée sur le moment optimal choisit avec tenir compte de la valeur de la tension au moment de fermeture en fonction de la valeur du flux rémanent pour réaliser ce travail on a besoin de 3 chapitres suivant :

Le chapitre 01 expose une étude théorique détaillée de transformateur ainsi que les différents types et leur modélisation.

Le chapitre 02 présente quelque notion sur le courant d'appel : définition, caractéristiques, cause de courant d'appel leur effet sur le transformateur ainsi que les manières de minimisation, pour obtenir en bonne fonctionnement de transformateur.

Le chapitre 03 est consacré pour étudier le courant d'appel dans le régime aléatoire ainsi que le régime commandé pour la courant d'appel il y a une comparaison entre les résultats expérimentaux de la simulation.

**1.1. Introduction**

Dans des nombreuses applications industrielles, il est nécessaire de modifier la présentation de l'énergie électrique. Lorsque cette modification consiste à transformer la valeur efficace des courants ou des tensions à fréquence constante .on utilise très souvent un transformateur [3].

Le transformateur est une machine électrique statique à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation. Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique et des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence et nombre de phases) de l'énergie électrique à courant alternative[4][5]. Cet appareil est d'un emploi absolument universel, en effet il transforme les signaux de sources de tension et de courant sinusoïdaux en signaux de même fréquence mais de valeurs efficaces généralement différentes. L'absence de mouvement est d'ailleurs à l'origine de leur excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport de l'énergie électrique (les transformateurs de puissance TP)[4].

La modélisation des transformateurs de la puissance à traditionnellement occupé beaucoup d'attention durant des années, pour leur importances dans les systèmes de puissance, le grand intérêt porté à l'étude de ces dernier ont permit de réaliser un développement remarquable. Dans le domaine de la conversion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique [4] [5].

Dans ce qui suit, une étude théorique détaillée de transformateur ainsi que les déférents types et leur modélisation sera présentée dans ce chapitre.

## 1.2. Invention

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur véhiculant un courant générait un champ magnétique. Quelques années plus tard, en 1830, Josef Henry donna corps aux notions d'induction et de self-induction. Entre les mois d'aout et de novembre 1831 l'anglais Michael Faraday procéda a une série d'expériences avec un appareil constitué d'un anneau de fer et d'enroulements de fil de cuivre isolé.

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

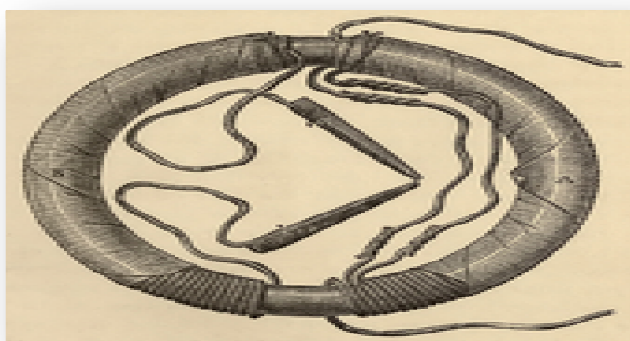


Figure 1.1. Transformateur de Faraday.

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 *Lucien 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). On finit alors par admettre 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. 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 » ! *Gaulard* attaque, perd ses procès, est ruiné, et finit ses jours dans un asile d'aliénés [7].



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.

Ainsi, en 1885, les Hongrois *Károly Zipernowsky*, *Miksz Déry* et *Otto Titus Bláthy* mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest. Aux USA, W. Stanley développe des transformateurs [7].

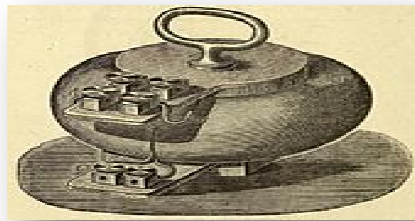


Figure1.2. Transformateur cuirassé, conçu par Uppenborn suivant les brevets de 1885 des ingénieurs Ganz.



Figure1.3. Transformateur à colonne de 1885. Plus vieil exemplaire du transformateur moderne de l'usine Ganz.

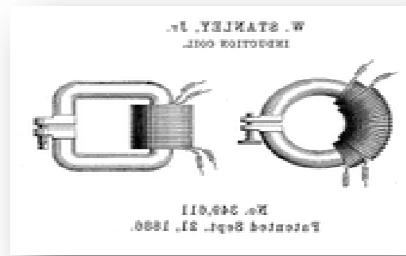


Figure 1.4. Transformateur de Stanley de 1886 avec un entrefer ajustable.

### 1.3. Transformateur

#### 1.3.1. Principe de fonctionnement d'un transformateur

Le principe de fonctionnement d'un transformateur est basé sur 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 [5].

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative  $U_1$ , il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire  $U_2$ . La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire  $I_2$ . Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique comme il est montré dans la figure (1.5) [5].

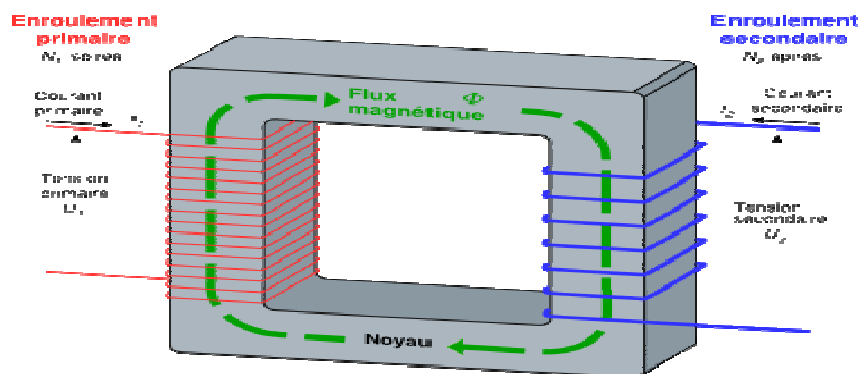


Figure 1.5. Circuit électromagnétique simple [5].

La figure (1.5) montre un simple transformateur de deux enroulement, que le nombre de spires de l'enroulement primaire soit  $N_1$  et tel que tours dans l'enroulement secondaire soit  $N_2$ [5].

### 1.3.2. Transformateur idéal

Un transformateur idéal ou parfait est un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances [5].

Le rapport de transformation d'un transformateur est donné par l'équation suivante :

$$\text{Soit : } v_1 \cdot i_1 = v_2 \cdot i_2 \qquad \text{On tire : } m = \frac{v_{02}}{v_{01}} = \frac{i_{1cc}}{i_{2cc}} \qquad (1.1)$$

Le circuit équivalent du transformateur idéal est donné dans la Figure (1.6) :

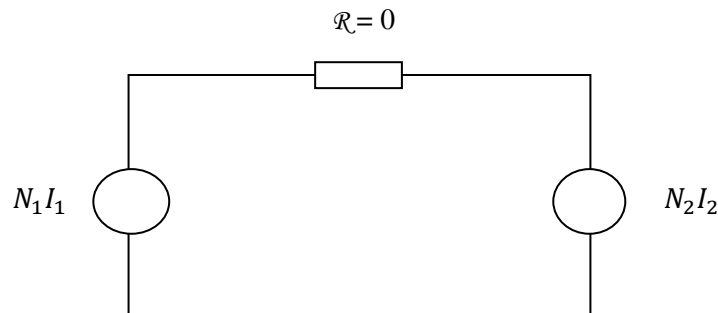


Figure 1.6. Circuit équivalent du transformateur idéal.

Selon le circuit précédent, on peut déduire une autre définition du rapport de transformation d'un transformateur en fonction de membre de spire d'enroulement, comme suit :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \mathcal{R} \varphi = 0 \qquad (1.2)$$

#### 1.3.2.1. Fonctionnement à vide du transformateur idéal

Le fonctionnement à vide du transformateur est obtenu lorsqu'on ne branche aucune charge au secondaire. Ceci nous donne le circuit suivant [10] :

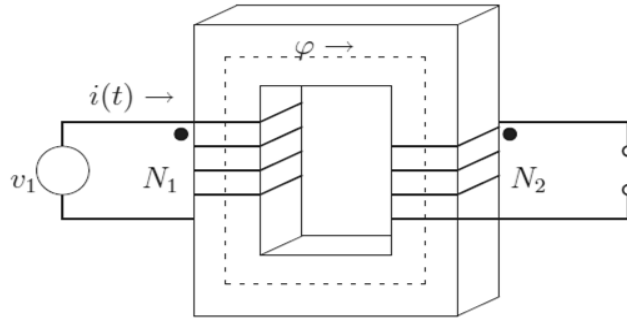


Figure 1.7. Le transformateur à vide[10].

Dans ce cas, on obtient la relation suivante [10] :

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1.3)$$

Qu'on peut réarranger pour obtenir :

$$\phi = \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \quad (1.4)$$

Le Flux magnétique total couplé au secondaire est proportionnel au nombre de tours  $N_2$  [10] :

$$\phi_{t2} = N_2 \phi = N_2 \left\{ \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \right\} \quad (1.5)$$

La force électromotrice induite dans la bobine secondaire est donnée par la loi de Faraday[10] :

$$e_2 = \frac{d\phi_{t2}}{dt} = \frac{N_2}{N_1} \frac{d}{dt} \left\{ \int v_1 dt \right\} \quad (1.6)$$

( $e_2$  représente la tension aux bornes du noyau, entre les deux bornes de l'enroulement. Si la résistance du fil de cuivre est nulle,  $e_2 = v_2$ ). La force électromotrice induite dans le primaire est [10]:

$$e_1 = \frac{d\phi_{t1}}{dt} = \frac{d}{dt} \{n_1 \phi\} = \frac{d}{dt} \left\{ N_1 \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \right\} = v_1 \quad (1.7)$$

On obtient donc [10]:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.8)$$

On définit le rapport de transformation  $m$  comme étant le rapport du nombre de tours du transformateur. Donc [10]:

$$m = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.9)$$

Le circuit équivalent du transformateur à vide est (Figure 1.8)[10] :

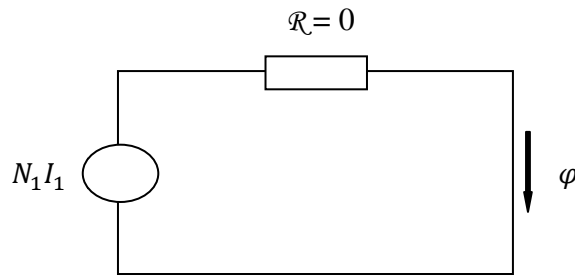


Figure.1.8. Circuit équivalent du transformateur à vide .

Le flux magnétique  $\emptyset$  est différent de zéro mais la force magnétomotrice de la bobine au primaire est nulle, puisque  $N_1 I_1 = \mathcal{R} \emptyset = 0$ . Le courant dans la bobine au primaire est nul.

### 1.3.2.2. Fonctionnement en charge du transformateur idéal

Lorsqu'on branche une charge au secondaire, avec une source sinusoïdale, on obtient le circuit suivant (Figure.1.9)[10].

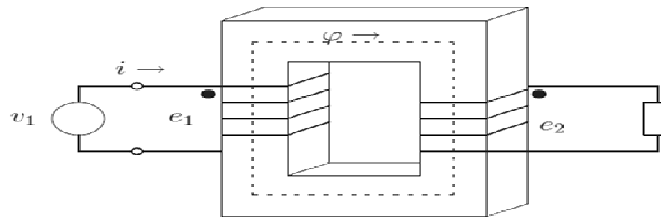


Figure.1.9. Le transformateur en charge [10].

On obtient le circuit équivalent suivant (Figure.1.10)[10].

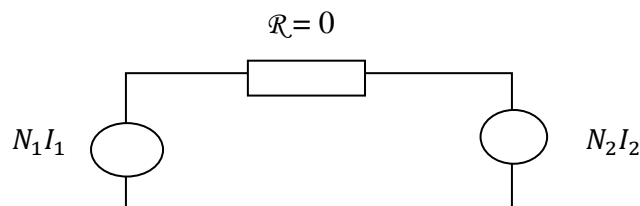


Figure.1.10. Circuit équivalent du transformateur idéal

La réluctance est nulle parce que la perméabilité est infinie. Donc, on obtient [10] :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \mathcal{R} \emptyset = 0 \tag{1.10}$$

D'ou on retrouve [10] :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \tag{1.11}$$

La puissance instantanée est [10]:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \tag{1.12}$$

### 1.3.3. Transformateur réelle

Les pertes dans un transformateur sont divisées en 3 catégories :

- les pertes dans le circuit magnétique : « pertes fer » ou « pertes à vide ».
- les pertes dans les enroulements : « pertes cuivre »
- les pertes par fuites magnétiques.

La somme des deux dernières est appelée « pertes en charge ».

Les premières sont à diviser en pertes par courants de Foucault dans le circuit magnétique et en pertes par hystérésis. Elles augmentent avec la fréquence et la tension. Les pertes cuivre sont les pertes par effet Joule dans les enroulements. Les fuites magnétiques sont dues au fait que la résistance magnétique du circuit magnétique n'est pas fini, une partie du flux est donc perdue. Elles causent également des pertes par courants de Foucault dans les enroulements et la cuve [11].

### 1.3.4. Essais et propriétés du transformateur

Les paramètres du schéma équivalent doivent être déterminés par des essais expérimentaux. On peut effectuer des mesures directement sous tensions et courants minimaux. Il est préférable de séparer les essais, ce qui permet de travailler à puissance réduite [4].

#### 1.3.4.1. Essai à vide

La figure suivant (1.11) représente un schéma de réalisation de essai a vide du transformateur

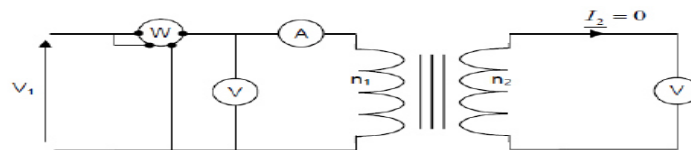


Figure. 1.11. Essai à vide du transformateur[4].

Le secondaire étant vide ( $I_2 = 0$ ), on mesure  $V_1, V_2 = V_{20}, P_1$  et  $I_1$  (Figure. 1.11). On peu déduire:

$$RF = \frac{V_{eff}^2}{P} = \frac{P}{I_F^2} = \frac{V_{eff}}{I_F} \tag{1.13}$$

$$X_1 = L_1 \omega = \frac{V_{eff}^2}{Q} = \frac{Q}{I_0^2} = \frac{V_{eff}}{I_0} \tag{1.14}$$

### 1.3.4.2. Essai en court-circuit

Le secondaire est mis en court-circuit par un ampèremètre ; le primaire doit être alimenté sous une tension réduite  $V_{1CC}$ , sinon on risque la destruction du transformateur sous l'effet conjugué des efforts mécaniques dus aux forces de Laplace entre conducteurs et de l'élévation de température due à l'effet Joule (Figure. 1.12). On règle généralement  $V_{1CC}$  pour obtenir un courant  $I_{2CC}$  égal à  $I_{2\text{nominal}}$  [4].

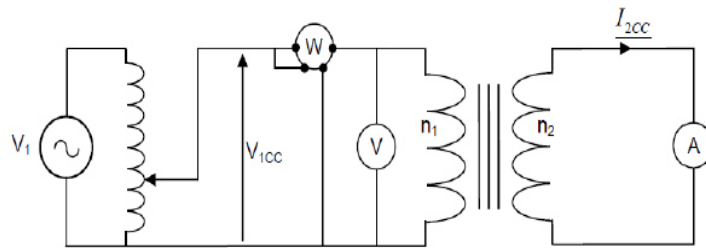


Figure. 1.12. Essai en court-circuit du transformateur [4].

On en déduit [4] :

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} \quad (1.15)$$

$$L_{S\omega} = \frac{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1} V_{1cc}\right)^2 - (R_s I_{2cc})^2}}{I_{2cc}} \quad (1.16)$$

## 1.3.5. Constitution générale de transformateur

### 1.3.5.1 Circuit magnétique

Le rôle du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique  $\Phi$  [Wb] et de présenter le minimum de pertes par Hystérésis et par courant de Foucault.

Pour augmenter la perméabilité magnétique et donc la diminution de la f.e.m et du courant nécessaire pur maintenir le flux voulu ; on utilise un acier spéciale : l'acier au silicium (à grains orientés).

Pour diminuer les pertes par courants de foucault on utilise des tôles isolées les unes des autres (circuit magnétique feuilleté) :

- Par phosphatation

- Par vernis synthétique

Ce circuit peut avoir différentes formes:

Soit à 2 colonnes formées par un empilage de tôles décalées (couche 1 puis couche 2 et ainsi de suite)

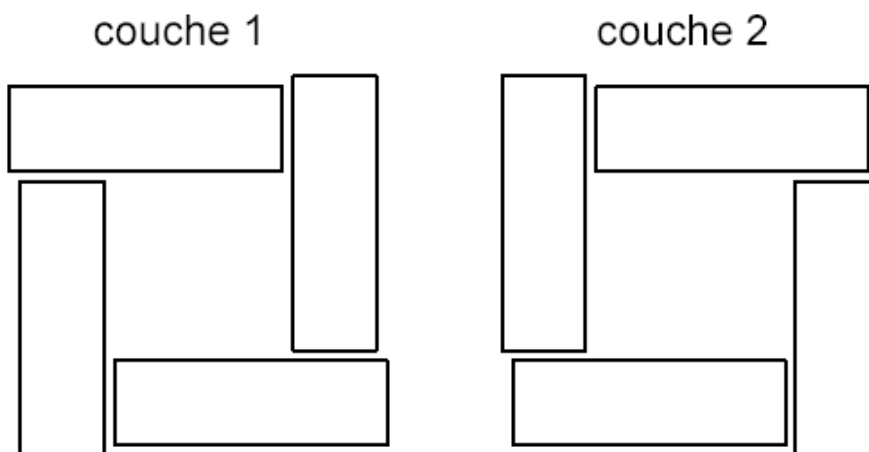


Figure 1.13. Circuit magnétique a colonne

Soit de forme cuirassée, c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux magnétique  $\Phi$  [Wb] se referme par chacun des côtés qui forment la cuirasse

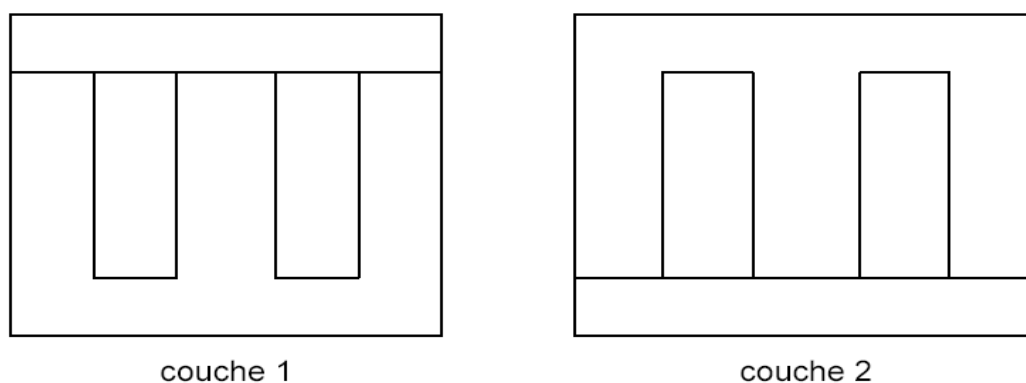


Figure1.14. circuit magnétique forme cuirassée

La forme des tôles, selon les dimensions du circuit magnétique, peut être en E, en U, en L, en C ou en I, l'assemblage s'effectuant toujours en croisant les joints.

Le circuit magnétique est constitué de trois colonnes en général alignées et de deux culasses qui assurent la fermeture du circuit [12].



**1.3.5.2. Circuit électrique**

Pour les transformateurs de base tension et faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en file de cuivre émaillée, chaque couche étant isolée de la suivante par du papier. Pour les appareils à haute tension et grande puissance, les bobines, quelques fois fractionnées en galettes, sont constitués par du fil rond ou méplat isolé au carton imprégné et séparées par des isolants tels que fibre, mica,...etc. [13].

On distingue trois dispositions principales des bobines sur les noyaux :

**a-bobinage concentrique simple**

Le bobinage basse tension est enroulé sur le noyau et après isolement et recouvert par le bobinage haut tension.

**b-bobinage concentrique double**

La moitié de bobinage haute tension et enroulée sur le noyau et isolée, puis en enroule le bobinage haut tension et en isole et en fin, en termine par la deuxième moitié du bobinage basse tension. Autrement dit, le bobinage haut tension est en sandwich entre les deux moitiés basse tensions.

***c-bobinage à galette***

Les bobinages hauts et bas sont fractionnés et constitués par des couronnes ou galettes qui sont enfilées alternativement sur les noyaux.

Parfois pour les transformateurs à fort intensité, les bobinages sont calés à l'aide de ressort permettant de légers déplacement dans le cas de fortes actions électrodynamiques.

**1.4. Type de transformateur**

Les transformateur se différent selon leurs fonctionnement, à Leurs construction et utilisation

**1.4.1 Transformateur de puissance**

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence,

dans le but de transmettre la puissance électrique». Sa principale utilité est de réduire les pertes dans les réseaux électriques, il peut être monophasé ou triphasé et recevoir divers couplages : étoile, triangle et zig-zag.

On retrouve les transformateurs de puissance dans différents types d'applications : dans les réseaux de transport, de distribution électriques, dans les usines en amont de fours électriques notamment et dans les trains. Chacun répondant à des contraintes et des usages très différents. La CEI divise les transformateurs de puissance en trois catégories en fonction de la puissance apparente : jusqu'à 2055 kVA en triphasé ou 388 kVA en monophasé on parle de « transformateur de distribution », au-delà et jusqu'à 055 MVA en triphasé (8838 MVA en monophasé) « Transformateur de moyenne puissance », au-delà de 055 MVA « Transformateur de grande puissance ». Les transformateurs de distribution sont très nombreux dans le monde, et ceux de grande puissance sont moins utilisés [14].

De nombreux aspects sont à prendre en compte pour leur conception : circuit magnétique enroulements, conducteurs, isolation, cuve, système de refroidissement. Par ailleurs, le transformateur est indissociable d'autres composants qui doivent être conçus en même temps comme le changeur de prises, les traversées isolées, les protections et leurs capteurs. Le transformateur doit être capable de résister sans dommage à la fois aux aléas du réseau électrique : surtensions, court-circuit, courants d'enclenchement et surcharges ; et aux autres contraintes mécaniques liées à des conditions météorologiques diverses. Le transport est également un élément critique.

Les protections permettent de détecter les défauts électriques trop importants et de déconnecter le transformateur du réseau afin d'en assurer la sécurité. De par leur rôle stratégique dans le réseau, les transformateurs sont l'objet d'une surveillance accrue. Afin d'en assurer une bonne maintenance sans nuire à leur disponibilité de nombreuses techniques de diagnostics, faisant appel à du traitement du signal, ont été mises au point.

De nombreux types de transformateurs de puissance existent. Ils ont chacun leurs particularités. Par conséquent, il y a de nombreux fabricants entrepris complexe, assistée de nos jours par les outils informatiques. Elle est validée après la fabrication du transformateur par une phase de test, qui vérifie aussi la qualité de l'ensemble de transformateurs, même si le marché est dominé par quelques gros acteurs.

### 1.4.2 Transformateur monophasé

Le transformateur monophasé est constitué par 2 parties primaires et secondaires. Dans la pratique les enroulements sont imbriqués l'un dans l'autre pour améliorer le rendement du transformateur [15].

#### 1.4.2.1. Schéma électrique équivalent

Un transformateur réel, monophasé, peut être électriquement modélisé par la figure 1.13

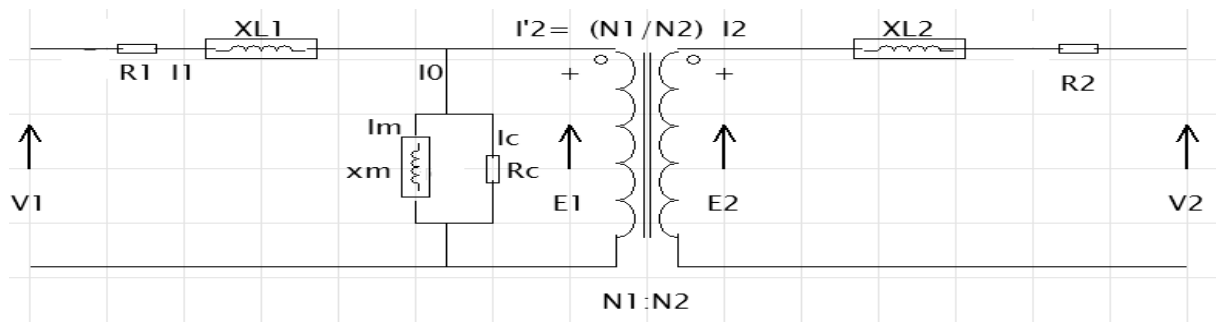


Figure. 1.15. Schéma électrique équivalent d'un transformateur

Soit une impédance  $Z$  soumise à une tension monophasée de valeur efficace

$V$  et traversée par un courant efficace/alors :

L'impédance est soumise à  $V$  et appelle  $I$  :

$V$  et  $I$  sont déphasés de  $\varphi$  elle dépend de  $Z$   $\cos \varphi$  est appelé le facteur de puissance l'impédance consommé (ou dissipe) une puissance active.

$$P=V_I \cos \varphi(\text{W}) \text{ watt}$$

L'impédance consomme une puissance réactive.

$$Q=VI \sin \varphi(\text{VAR}) \text{ Volt Ampère Réactif}$$

On définit une puissance apparente.

$$S=VI \text{ de sorte que}$$

$$S_2=P_2 +Q_2 (\text{VA})$$

➤ le rapport de transformation est donné par :

$$m = \frac{V_2}{V_1}$$

Si  $m>1$   $V_1 < V_2$  Transformateur élévateur

Si  $m<1$   $V_1 > V_2$  transformateur abaisseur

Si  $m = 1$   $V_1 = V_2$  Transformateur d'isolement

**a. Circuits électrique et magnétique du transformateur**

Le transformateur en général est constitué de deux parties essentielles :

- La partie électrique qui correspond le bobinage.
- La partie magnétique qui concerne le noyau.

Les deux parties on peut les interprètes schématiquement comme montre la figure1.16

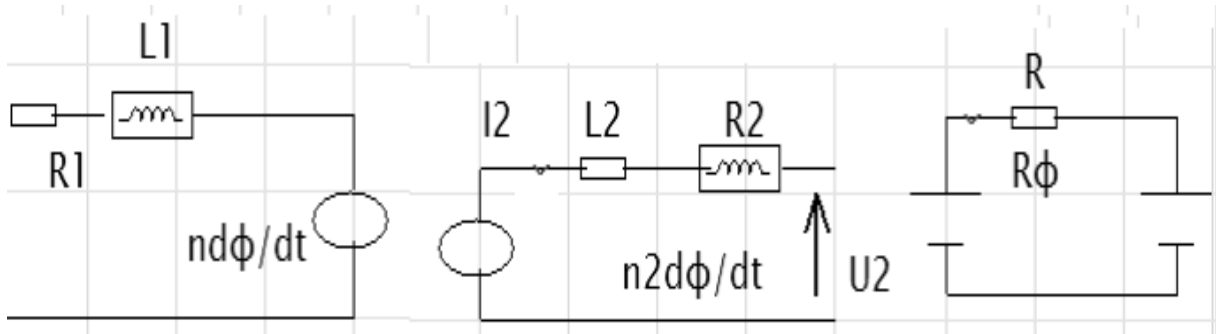


Figure.1.16. Le circuit électrique et magnétique du transformateur

$$U_1 - R_1 I_1 - L_1 dI_1/dt - n_1 d\phi/dt = 0 \tag{1.17}$$

$$n_2 d\phi/dt - R_2 I_2 - L_2 dI_2/dt - U_2 = 0 \tag{1.18}$$

**b. Transformation d'énergie**

Le transformateur parfait modifie la forme de l'énergie électrique et rien d'autre c'est-à-dire pas de conversion énergétique (e. g pas d'échauffement) aucune pertes  $\eta = 100\%$

$\eta$ :le Rendement comme indiquée dans la figure (1.17)

$$P_2 = P_1,$$

$$I_2 = 0,$$

$$I_1$$

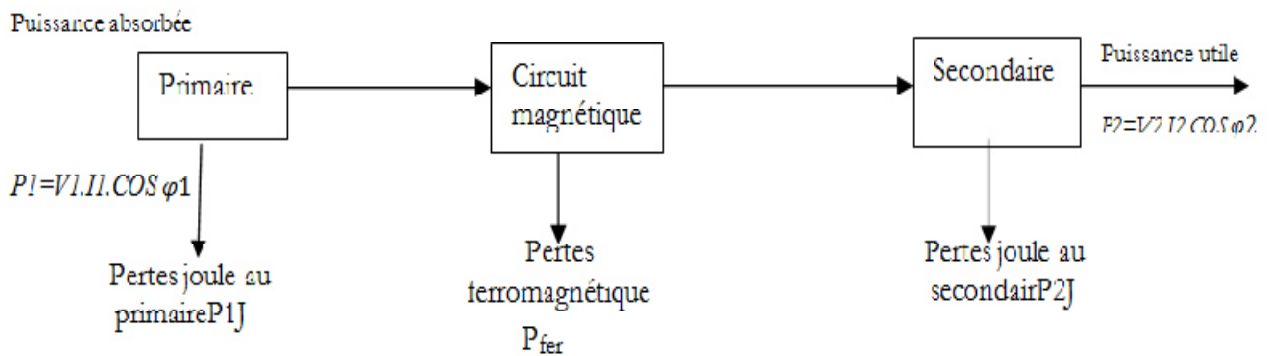


Figure.1.17 Le transformateur parfait modifie la forme de l'énergie électrique.

$$\eta = \frac{P - P_{J1} - P_{J2} - P_{fer}}{p_1} * 100\%$$

### 1.4.3. Transformateur triphasé

Un transformateur monophasé est destiné seulement à un système monophasé. Mais le transport ou la distribution de l'électricité se fait en triphasé. Le circuit magnétique d'un tel transformateur triphasé comporte ordinairement trois colonnes disposées dans un même plan. Chaque colonne porte un enroulement primaire et un enroulement secondaire et peut être considérée comme un transformateur monophasé. Les trois enroulements, primaires et secondaires, sont connectés en étoile, en triangle ou en zig-zag de sorte que le transformateur comporte trois bornes primaires et trois bornes secondaires seulement [16].

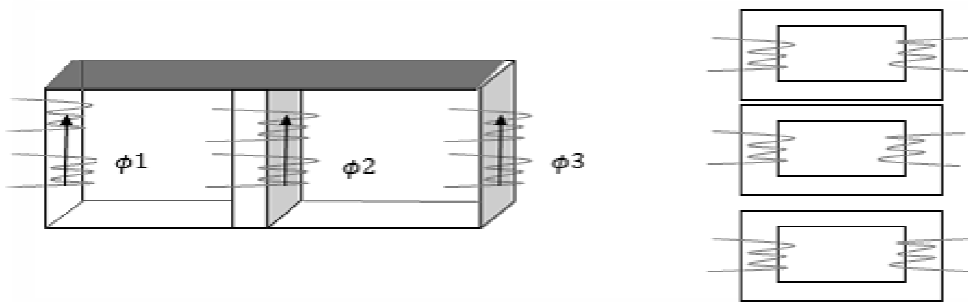


Figure.1.18. Transformateurs triphasés

#### 1.4.3.1. Couplages

Comme tout récepteur triphasé, le primaire pourra être couplé en étoile (Y) ou en Delta (D). Le secondaire, quant à lui, peut être couplé en étoile (y) ou en Delta (d), mais également en Zigzag (z).

Comme nous l'avons fait en monophasé, rappelons que les transformateurs en plus grand nombre sont de type « abaisseur » [17].

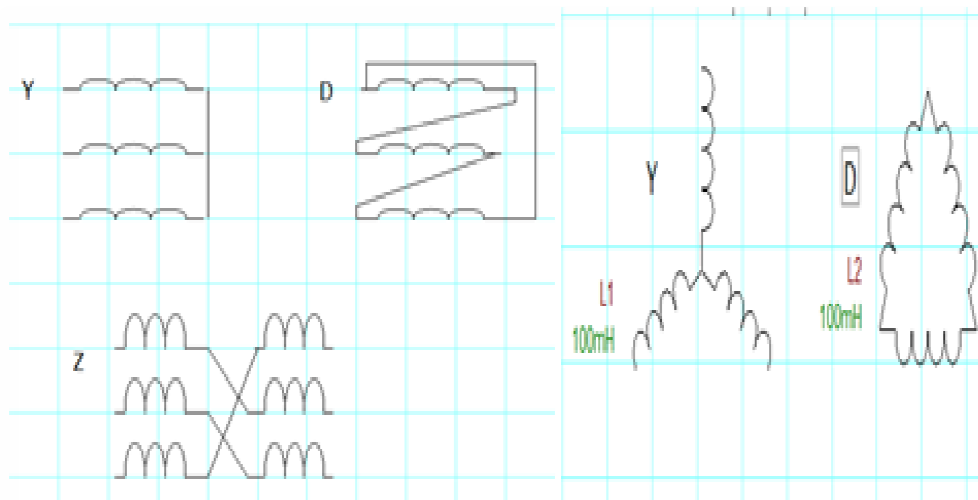


Figure .1.19. Les différents couplages

Il y a donc, en principe, deux possibilités au primaire et trois au secondaire (le Zigzag primaire n'est pas fréquent)

Tableau.1.1.Les différents couplages

Primaire	Secondaire	Y	Δ
Yétoile		Yy	Δy
Δtriangle		Yd	Δd
Zigzag		Yz	Δz

Les couplages : Étoile-étoile, Triangle-étoile et Étoile-Zigzag sont les couplages normalisés. Les critères généraux qui permettent de justifier tel ou tel autre couplage s'appuient sur le fait que : Aux très hautes tensions, il vaut mieux utiliser un couplage étoile afin de réduire la tension supportée par chaque bobine. Pour les très forts courants, le montage triangle est préférable afin de réduire le courant par bobine. Le montage triangle est à éviter au secondaire afin d'éviter les courants de circulation dus à une légère dissemblance des bobines. Lorsque la charge risque d'être déséquilibrée, il vaut mieux utiliser un Yyn (l'indice n signifiant que le neutre est disponible) si  $I_N < 10\% I$  ; un Yzn si le déséquilibre est plus fort un Dyn pour les très forts déséquilibres et un poids de cuivre limité [17].

### 1.4.3.2. Rapport de transformation

Les tables suivant represent le rapport de transformation de transformateur triphasée

Tableau .1.2 .Rapport de transformation

Primaire Secondaire	Y	$\Delta$
$\Delta$ étoile	$\frac{ns}{np}$	$\sqrt{3} \frac{ns}{np}$
Y <i>triangle</i>	$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{ns}{np}$	$\frac{ns}{np}$
Zigzag	$\sqrt{3} \frac{ns}{np}$	$3 \frac{ns}{np}$

### 1.4.4. Transformateurs 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 généralement de sections circulaires 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[13][18], cette manière plus simple et utilisées pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances .les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique et dit à flux forcés

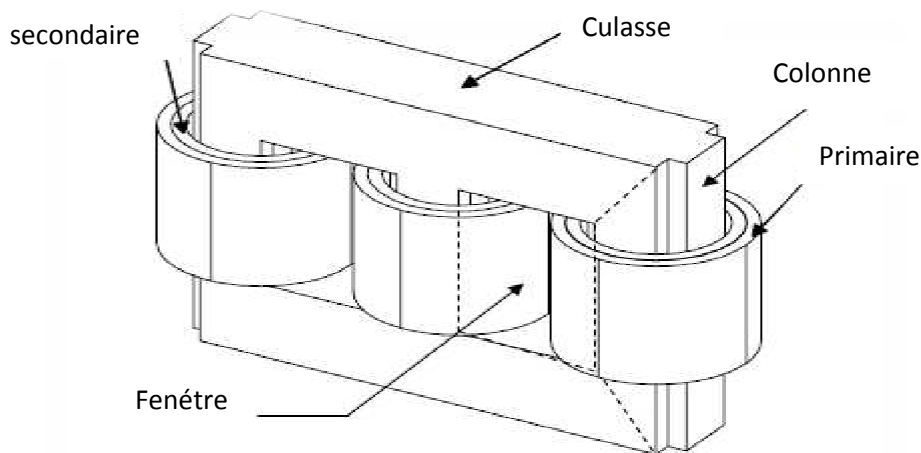


Figure.1.20. Transformateur à colonnes

### **1.4.5. Transformateur cuirassée**

Pour ce type de transformateur , le circuit magnétique entour complètement l'enroulement des deux cotés la cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellence rigidité mécanique associée à une grande compacité ces transformateur sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition , ou les surtensions transitoires sont fréquentes , pour cela des écrans sont utilisés à fin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages[19].

### **1.4.6. Transformateur de tension**

Les transformateurs de tension 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 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 TT est branché en parallèle avec le circuit dont on veut connaître la tension. Leur construction diffère très peu de celle des transformateurs conventionnels de puissance. Cependant, leur puissance nominale est généralement faible (inférieure à 500 VA). Les transformateurs de tension installés sur les lignes HT sont toujours raccordés entre une ligne et le neutre. Cela élimine la nécessité d'utiliser deux grosses bornes de porcelaine, une des deux extrémités de l'enroulement étant reliée à la terre [4].

### **1.4.7. Transformateur de courant**

Un transformateur de courant est un appareil utilisé pour la mesure de forts courants électriques. Il sert à faire l'adaptation entre le courant élevé circulant dans un circuit électrique (jusqu' à quelques milliers d'ampères) et l'ampèremètre, qui lui est prévu pour mesurer des courants de l'ordre de 1 Ampère [20].

## **1.5. Modélisation des transformateurs**

Comme pour tout composant d'un réseau électrique, sa modélisation dépend du type de Phénomène à étudier, c'est-a-dire de la gamme de fréquences concernée.

Il est connu que l'impédance des composantes inductives augmente avec la fréquence, alors que, inversement, l'impédance des composantes capacitives diminue avec la fréquence :



$$Z_l = \omega * L$$

$$Z_c = \frac{1}{\omega * c}$$

Ainsi, avec l'augmentation de la fréquence considérée, l'importance des composantes inductives s'amenuise et celle des composantes capacitatives croit. Autrement dit, à basse fréquence,  $\omega'$  est très grand, le composant capacitif peut être considéré comme un circuit ouvert.

### 1.5.1. Transformateur monophasé linéaire sans saturation

Un transformateur présente un comportement non linéaire dû principalement à la caractéristique de l'inductance. Lorsque le fonctionnement du transformateur se situe dans la zone linéaire de cette caractéristique, alors la modélisation devient simple. Celle-ci se traduit par un schéma équivalent où l'on représente ses impédances linéaires et son rapport de transformation  $m$ . L'impédance linéaire est composée, pour chaque enroulement, d'une inductance modélisant le flux magnétique de fuite et d'une résistance modélisant les pertes par effet Joule et les pertes supplémentaires [21]. Il faut aussi ajouter une branche parallèle pour représenter l'inductance de magnétisation. On a donc le schéma classique suivant dans la figure 1.19

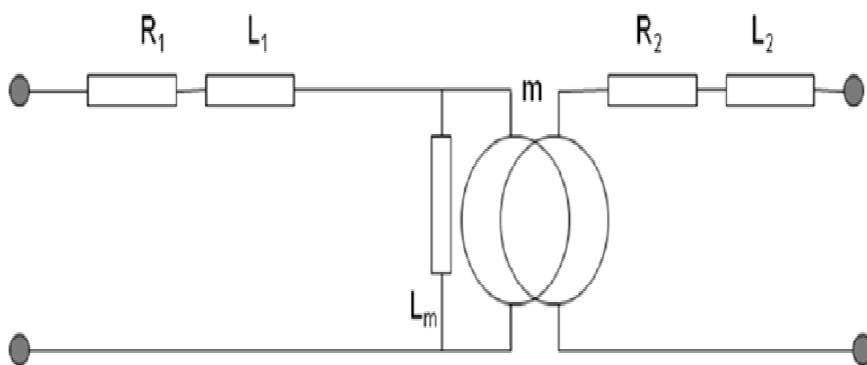


Figure.1.21. Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence sans saturation [2]

Il existe éventuellement des pertes à vide, nous pouvons les représenter au moyen d'une résistance  $R_m$  en parallèle [2] :

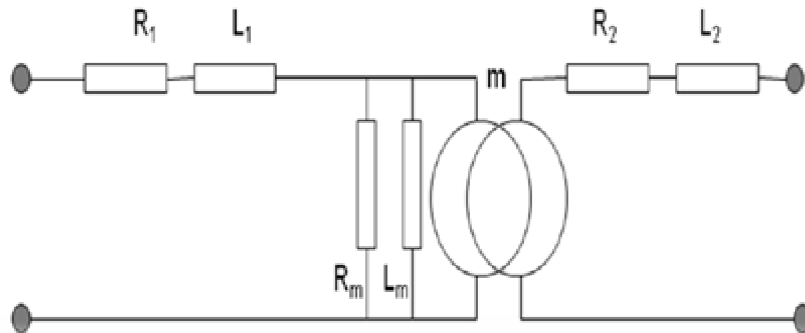


Figure.1.22. Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec pertes fer, sans saturation [2].

### 1.5.2 .Transformateur monophasé avec saturation

L'enclenchement et le ré-enclenchement avec flux rémanent font que la zone de fonctionnement non-linéaire du transformateur est sollicitée.

La caractéristique de saturation donnée par une courbe du flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant est représentée par une inductance non-linéaire (Figure.1.21)[2].

Notons que l'inductance non linéaire peut être placée indifféremment côté primaire ou côté secondaire tant que le rapport de transformation est respecté [2].

Ce modèle étant le circuit de base, pour disposer d'un modèle général adapté à tous les phénomènes qui peuvent apparaître dans notre cas d'étude, nous sommes amenés à faire des études plus précises afin de compléter le schéma [2].

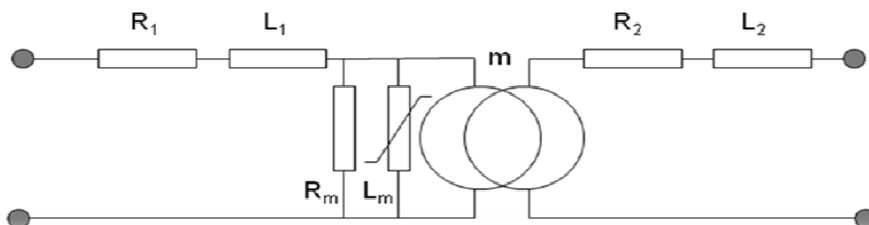


Figure. 1.23. Modélisation d'un transformateur monophasé en basse fréquence avec saturation[2].

A partir de ce modèle, il est possible de retrouver la forme du courant d'appel par un calcul analytique. Soient  $v_p$ ,  $v_s$  les tensions au primaire et au secondaire,  $i$  le courant au primaire et  $\varphi$  le flux traversant la bobine. Quand le transformateur est alimenté du côté primaire avec côté secondaire à vide, soit  $v_p = v_m(\sin \omega t + \theta_0)$  avec  $\omega$  la pulsation angulaire,  $V_m$  la tension de source nominale en valeur crête et  $\theta_0$  la phase initiale, l'équation décrivant le comportement du noyau saturable est [2]:

$$V_P = R_1 i(t) + L_1 \frac{d(i)}{dt} + \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad \text{Tapez une équation ici.}$$

(1.19)

$$V_P = R_1 i(t) + L_1 \frac{d(i)}{dt} + \frac{d\varphi(t)}{di} \frac{d(i)}{dt}$$

Dans le cas où la résistance de magnétisation est très grande, le courant dans le noyau du transformateur peut être approximé par le courant au primaire  $i$ .  $d\varphi(t)/dt$  peut être ainsi représenté par une inductance égale à la pente de la fonction  $\varphi(i)$ . L'équation (1.20) peut être réécrite comme :

$$V_P = R_1 i(t) + L_1 \frac{d(i)}{dt} + L_{\text{noyau}}(\varphi) \frac{d(i)}{dt} \quad (1.20)$$

$$L_{\text{noyau}}(\varphi) = \begin{cases} L_m & \text{pour } t \leq t_S \\ L_S & \text{pour } t > t_S \end{cases} \quad (1.21)$$

## 1.6. Conclusion

Ce chapitre avait pour but de rappeler quelques généralités et notions de base sur un transformateur : définition, principe de fonctionnement, nous avons vu la méthode pour calculer les paramètres du modèle à partir de l'essai à vide et celui en court-circuit, constitution, les différents types, ainsi que la modélisation électrique énergétique du transformateur ensuite nous avons étudié le courant d'appel dans le chapitre

## 2.1. Introduction

Il existe plusieurs solutions pour contrôler les transitoires de manœuvres, comme les résistances et les inductances de pré-insertion à l'ouverture et la fermeture, qui permettent de limiter les courants et les tensions, les parafoudres qui limitent les surtensions, et enfin la solution dite « contrôlée » qui permet de choisir l'instant optimal en fonction de la tension réseau pour ouvrir ou fermer le disjoncteur

La qualité de l'énergie électrique est un objet essentiel. L'un des problèmes de qualité d'énergie sont les harmoniques générés au Connexion du transformateur avec le réseau électrique [22]. Cette connexion provoque un courant d'appel [23] dans l'enroulement primaire du transformateur, ce qui conduit à des champs magnétiques puissants et la dégradation des propriétés d'isolation d'enroulement [24]. Pratiquement, le courant d'appel élevé conduit à un déclenchement du disjoncteur.

Ce chapitre présente quelque notion sur le courant d'appel : définition, caractéristiques, cause de courant d'appel leur effet sur le transformateur ainsi que les manières de minimisation, pour obtenir en bonne fonctionnement de transformateur

## 2.2. Définition de Courant d'appel (courant d'enclenchement)

Quand un transformateur est hors service, un flux résiduel demeure dans le noyau dû aux propriétés du matériel de noyau. Le flux résiduel est de (50 à 90) % du flux de fonctionnement maximum, ils dépendent du type d'acier de noyau. Quand la tension est réappliquée au transformateur. Afin de maintenir ce niveau de flux dans le noyau qui peut être bien dans la gamme de saturation de l'acier de noyau, le transformateur peut débiter un courant au dessus du courant nominale de transformateur. Selon la conception de transformateur l'importance du courant d'appel actuelle peut être de 3.5 à 10 fois du courant nominale. La forme d'onde du courant d'appel est semblable une onde sinusoïdale mais en grande partie de travers à la direction positive ou négative. Ce courant d'appel peut faire fonctionner des relais et des fusibles destinés à la protection dans le système près du transformateur. Les approximations convenables du courant d'appel exigent les informations détaillées concernant la conception de transformateur, qui peut être fournie par le fabricant mais ne sont pas en général à la disposition de l'ingénieur technico commercial. Les

Valeurs réelles pour le courant d'appel dépendent de la forme de la tension-source, et les opérations de commutation se produisent [5].

Dans des conditions d'état stable normales, le courant magnétisant nécessaire pour produire le flux nécessaire est relativement faible, généralement moins de 1% de la valeur nominale voir la figure (2.1)[5].

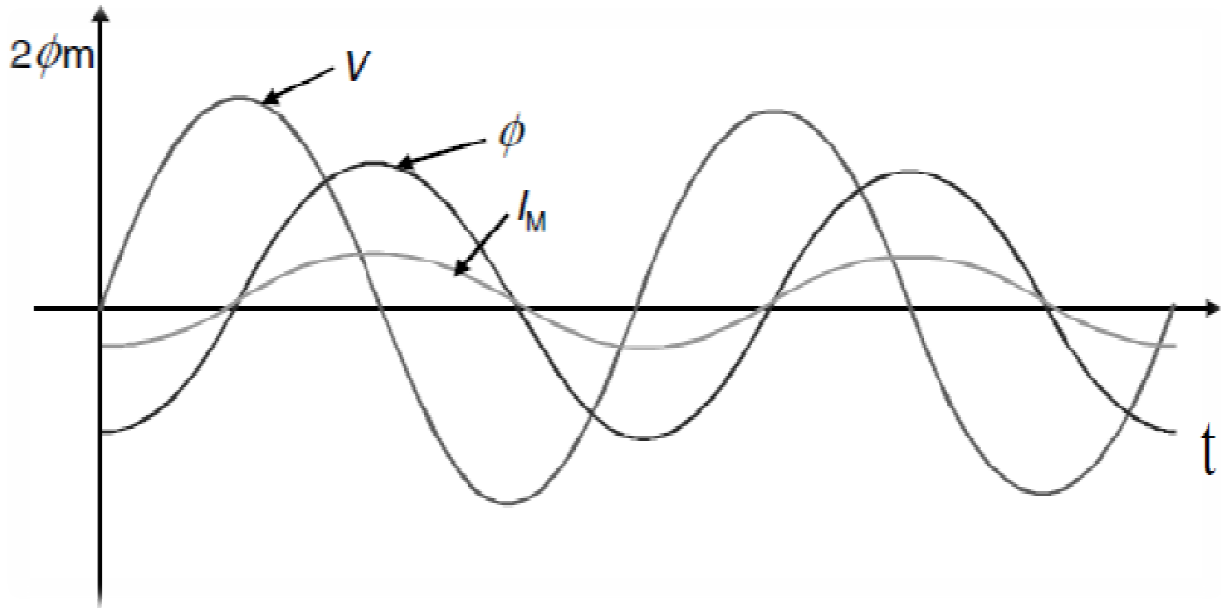


Figure.2.1.L'état d'équilibre des flux et courant et de la tension de magnétisation[5].

Si le transformateur active à une tension zéro puis la demande de flux pendant le cycle de tension de la première moitié peut être aussi haute que deux fois le flux maximum normal.

Ceci fait circuler un courant unidirectionnel excessif, visé pendant que le courant magnétisant d'interrupteur voient figure (2.2)[5]

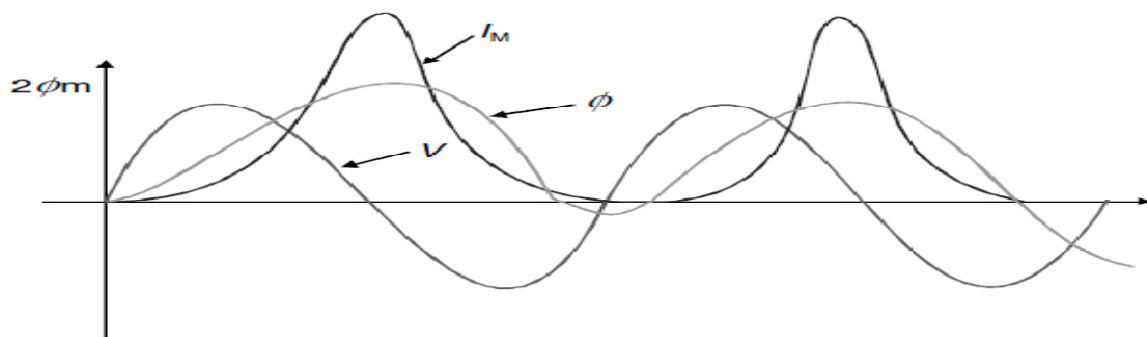


Figure.2.2. Illustration du courant magnétisant d'appel[5].

Une analyse de cette forme d'onde Prouvera qu'elle contient une proportion élevée du deuxième harmonique et dure plusieurs cycles. Le flux résiduel peut augmenter le courant encore plus, la valeur de crête atteinte 2,8 fois de la valeur nominale [5].

La caractéristique magnétisante est non linéaire, l'enveloppe de ce courant n'est pas strictement exponentielle. Dans certains cas, on l'a observé changer toujours jusqu'à 30s après avoir branché voient figure (2.3) est donc important de se rendre compte de ce phénomène passer en considérant la protection différentielle des transformateurs, qui seront discutés plus tard[5].

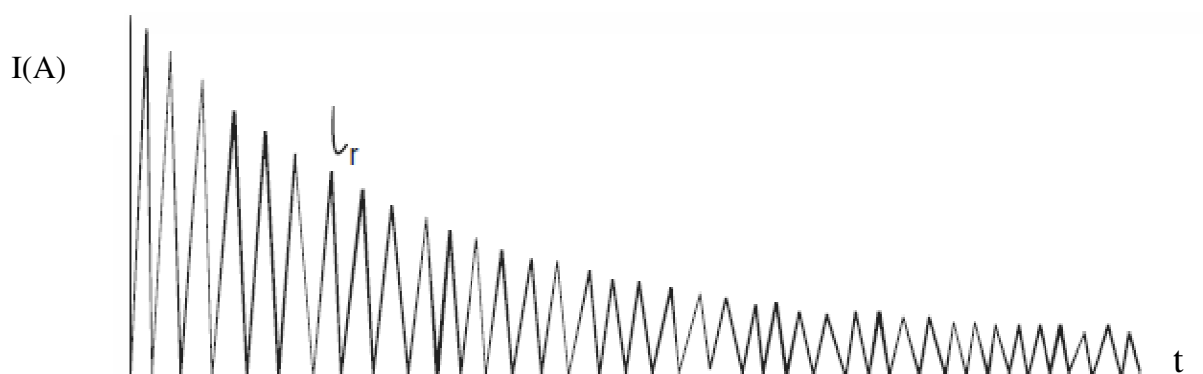


Figure.2.3. courant d'appel transitoire typique lors du passage dans un transformateur à l'instant où  $E = 0$ [5].

### 2.3. Caractéristiques du courant d'appel

Le traitement analytique présenté dans la section 2.7.1 et dans la section 3.3 a quantifié les flux de noyau maximaux vis-à-vis du flux de noyau résiduel et le moment de l'excitation. Physiquement, le phénomène se manifeste comme une quantité significative de flux étant conduit en dehors du noyau du transformateur saturé, ce qui rend la structure du noyau magnétique se comporter, essentiellement, comme un système de noyau d'air. L'asymétrie de courant d'appel résultant et son composant unidirectionnel associé (décalage DC) pourraient être soit de polarité, en fonction du moment de l'excitation du point-sur-onde et / ou des niveaux résiduels de flux du noyau [ ].

L'énergie du transformateur du côté de l'enroulement du HT a été une pratique courante au noyau des années [26] étant donné que, généralement, l'enroulement HT a une inductance de fuite plus élevée, enroulé de manière concentrique autour de l'enroulement LV à un rayon

moyen plus large. La non linéarité magnétique du noyau du transformateur entraînant des oscillations successives d'impédance effective entre les caractéristiques du noyau d'air et du noyau de fer est la source même du contenu harmonique du courant d'appel.

La durée des courants d'appel est basée sur la résistance de la source et les pertes du transformateur [27], c'est-à-dire avec une résistance élevée aux sources et des pertes, un amortissement supplémentaire est introduit dans le phénomène transitoire et la durée du courant d'appel est raccourcie. Sur la base de ces remarques, il n'est pas inhabituel que les transformateurs de production / sous-station prévoient un phénomène de courant d'appel assez sévère et plus durable.

#### **2.4. Causes du courant d'appel**

Il ya plusieurs facteurs qui commandent l'importance et la durée du courant d'appel [28]:

1. Flux résiduel
2. Commutation instantanée de la tension d'alimentation
3. Taille et évaluation du transformateur
4. Matériau du noyau du transformateur
5. Concevoir des valeurs du transformateur
6. Condition en d'excitation du transformateur :
  - A. Excitation initiale.
  - B. Excitation de récupération de mesure de défense.
  - C. Appel bienveillante dans des transformateurs parallèles.

Cependant, l'inductance n'est pas linéaire et la saturation peut lui a compté se produire puisque des transformateurs sont habituellement conçus pour fonctionner près de la zone de la courbe de saturation dans des conditions normales. La prise du flux deux fois à son maximum normal causera la saturation, exigeant un courant très grand. Même ce n'est pas le pire cas Supposent que le transformateur active au zéro absolu sur la l'onde de tension avec un flux résiduel de  $\Phi$  max.

Dans ce cas, la saturation sera encore plus grande. Des courants d'excitation aussi grande que fois la normale ne sont pas inhabituelles pour une telle condition outre l'onde

actuelle seront pleinement compensés de l'axe du temps. La façon dont la saturation provoque une grave accumulation de courant d'excitation est illustré sur la figure (2.4), la courbe de saturation de gauche montre le courant d'excitation nécessaire pour fournir un niveau donné de flux. Pour chaque point sur l'onde de flux commençant à la valeur résiduelle de flux Une valeur du courant peut être trouvée de la courbe de saturation et être tracée sur l'axe de temps [5].

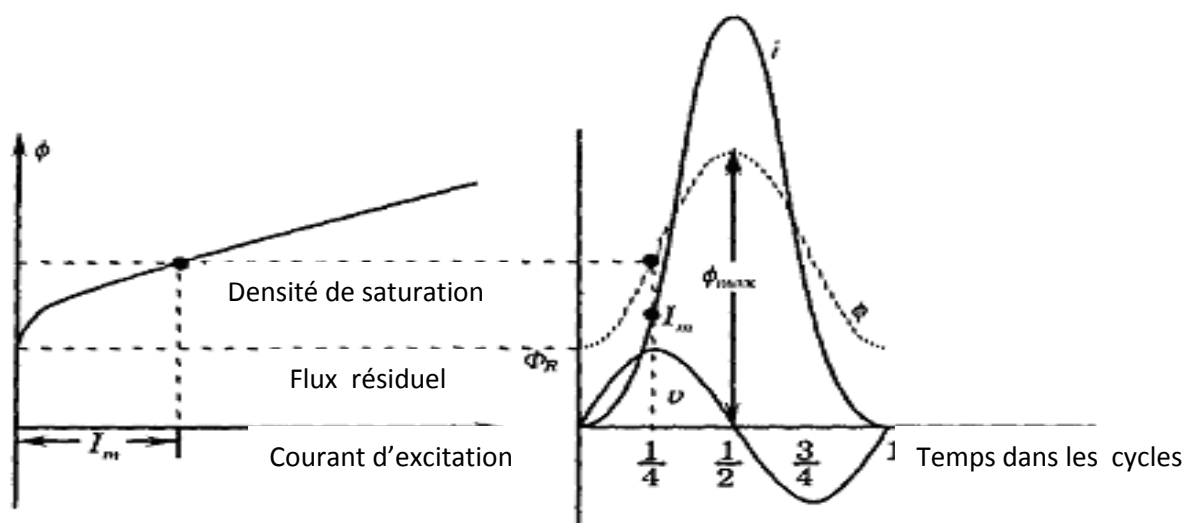


Figure.2.4. Dérivation de la forme d'onde actuelle du courant d'appel de la courbe de saturation d'excitation [5].

## 2.5. Effets du courant d'appel

Les courants d'appel transitoires de transformateur peuvent dépasser le courant nominal et peuvent atteindre la valeur considérée du courant de court-circuit du transformateur de puissance. L'amplitude se dégrade très lentement et atteint son courant magnétisant équilibré après quelques secondes. Les courants d'appel transitoires ayant une composante élevée de courant continue et étant riches en harmoniques de 1ère et 2ème ordre [29] agit sur la qualité de puissance et peuvent déclencher les relais de protection. A cause de ces transitoires, des forces énormes surgissent dans les enroulements de transformateur de puissance [30] qui peuvent réduire leur durée de vie et par suite ces courants d'appel sont très néfastes pour ces composants surtout que l'on sait qu'ils sont très chers et très importants dans les systèmes électro-énergétiques.



## 2.6. Méthodes pour réduire les courants d'appel transitoires

Le phénomène des courants d'appel des transformateurs transitoires a d'abord été publié par Fleming dans 1892 [31]). De toute façon, jusqu'en 1988, la seule méthode pour réduire les courants d'appel était l'installation des résistances d'insertion. Ce n'est cependant pas la meilleure solution car d'une part, il doit être inclus dans la conception du disjoncteur et nécessiter beaucoup de maintenance et de l'autre ils réduisent simplement les courants d'appel mais n'influent pas sur la cause du phénomène.

En 1988, Moraw et al. A introduit le premier concept abordant la cause des courants d'appel [32]. Avec la stratégie appelée "commutation contrôlée point-sur-onde", le transformateur est alimenté par phase sur le pic de tension correspondant. En supposant un flux résiduel nul dans le noyau du transformateur, le moment de l'excitation est optimal et aucun courant d'appel transitoire va se poser. Même si des améliorations utiles dans la réduction des courants d'appel de transitoire peut être réalisé avec ce simple algorithme, il existe un inconvénient : l'hypothèse de flux résiduel nul est uniquement vrai, si le transformateur est dés excité sans charge et si il n'y a pas de coupure de courant ainsi que le transformateur n'a pas de couplage magnétique entre le Phases (par exemple, trois transformateurs monophasés sans enroulement tertiaire delta, à cinq pattes et Transformateurs en forme de coquille).

Des études ultérieures ont amélioré le concept de Moraw . De sorte que l'inconvénient pourrait être enlevé. Enfin une méthode beaucoup plus souple appelée «commutation contrôlée Compte le flux résiduel "a été présenté par Brunke et Fröhlich [33]. Aujourd'hui c'est le plus approche prometteuse, car elle peut être utilisée dans chaque cas de commutation et pour tout élément de base et configuration d'enroulement des transformateurs de puissance. Si le flux résiduel est connu exactement

Le courant d'appel transitoire sera complètement éliminé. Malgré ces résultats, l'algorithme est a peine déployé dans les sous-stations [34], en utilisant un capteur de tension supplémentaire

En théorie et avec des simulations, le concept de Brunke et Fröhlich fonctionne parfaitement et tous les transitoires sont éliminés. En revanche, les sous-stations réelles ne se composent pas de composants idéaux et souffrent de conditions réelles telles que la dispersion

du temps de fermeture, les écarts de mesure et le bruit de signal de sorte que la performance de la stratégie diminue.

## 2.7. Relation du flux résiduel et du courant l'appel

Avant que le courant d'appel transitoire peut être analysé, le précédent de mise hors tension doit être examiné. Au cours de ce processus, le flux résiduel va à une certaine valeur qui est important pour la prochaine mise sous tension du transformateur de puissance

### 2.7.1. Flux résiduel

À la recherche à un seul transformateur monophasé et de négliger les fuites et d'autres flux d'air magnétique ainsi que la résistance de la bobine, le noyau magnétique  $\Phi$  noyau est le flux liés à la tension de bobine  $U_{bobine}$  par l'équation (2.1).

$$U_{bobine} = N_{bobine} \times \frac{d\phi_{noyau}(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Lorsque le transformateur hors tension sans charge de l'état d'équilibre, le courant sera interrompue à l'instant de ouvrez le flux résiduel  $\Phi_{Res}$  est calculée à l'aide de l'équation (2.1) :

$$\phi_{Res} = \frac{1}{N_{bobine}} \int^{T_{ouvrir}} U_{bobine}(t) dt \quad (2.2)$$

Avec 
$$U_{bobine} = U_0 \sin(\omega_0 t) \quad (1.3)$$

Et en supposant que l'état d'équilibre, l'équation (1.2) devient :

$$\phi_{Res} = -\phi_0 \cos(\omega_0 t_{ouvrir}) \quad (1.4)$$

Étant donné que le courant magnétisant des transformateurs est souvent plus petit que le courant de coupe de le disjoncteur de courant, le courant sera interrompu avant son passage à zéro de naturel et de temps d'ouverture ouvrez de l'équation (2.4) peut prendre une valeur quelconque. En conséquence, le flux résiduel peut atteindre n'importe quelle valeur comprise

entre -1 p.u. et 1 p.u.. Parce qu'aucune courbe de magnétisation n'est en mesure de dépasser le maximum caractéristique de magnétisation donné par les propriétés du matériau de noyau, le flux résiduel va diminuer la marge de la portée entre les deux points de la flux résiduel maximale  $\pm\Phi_{Res}$ , max. Dans les sous-stations réelles, le flux résiduel accessible maximal est encore réduit à une valeur d'environ 0,9 p.u .En raison de transitoires lors de la désactivation (Boucle de micro hystérésis)[35], comme on peut le voir sur la figure 2.5.

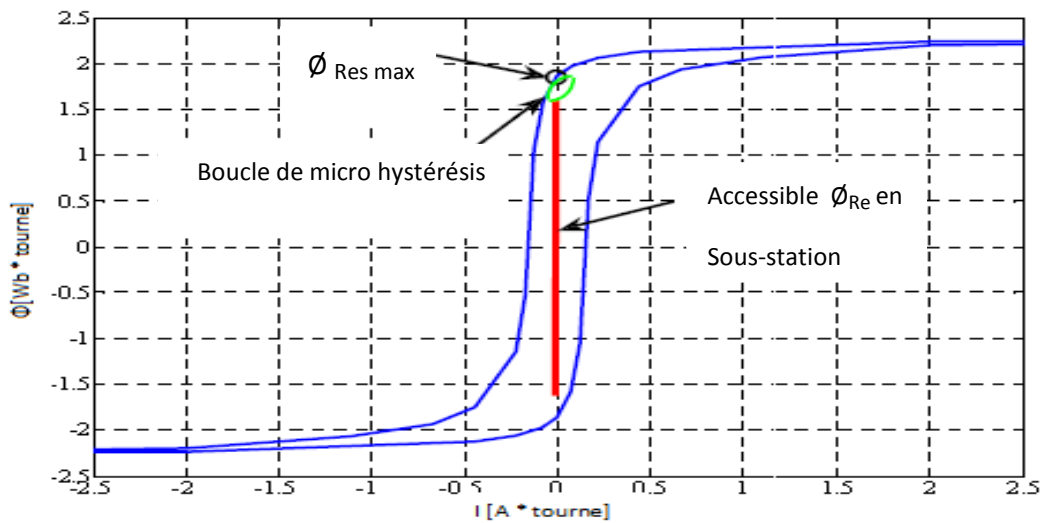


Figure 2.5.caractéristique de magnétisation maximale et gamme de flux résiduels

Accessibles

### 2.7.2. Formation de courant d'appel

Si un transformateur est alimenté à un instant aléatoire, il est possible qu'aucun appel de courant d'appel se produit, mais la plupart du temps des courants d'appel transitoires surgiront. Cela se produit parce que les courants d'appel dépendent non seulement de l'instant de l'excitation, mise sous tension, mais aussi sur le flux résiduel de la précédente de mise hors tension.

En utilisant les équations (2.1) et (2.3), le flux magnétique pendant la première période d'activation peut être calculé en négligeant analytiquement les effets d'amortissement pertes de noyau, résistance à l'enroulement :

$$\Phi_{noyau}(t) = \frac{1}{N_{bobine}} \int_{t_{fermer}}^t U_{bobine}(t) dt + \Phi_{Res} \quad (2.5)$$

$$\Phi_{noyau}(t) = -\Phi \cos(\omega_0 t) + \Phi_0 \cos(\omega_0 t_{fermer}) + \Phi_{Res} \tag{2.6}$$

Plus tard, l'influence de l'amortissement devient plus importante et diminue vers zéro.  $\Phi_{fermer}$   
 Quand  $\Phi_{fermer}$  atteint zéro, le phénomène transitoire est terminé et le courant de magnétisation évoluera. En ce qui concerne l'équation (2.5), il est facile de voir qu'un passage à zéro de tension positive avec un flux résiduel de 0,9 p.u. respectivement au passage à zéro de tension négative avec un flux résiduel de 0,9 p.u. donnera lieu à la plus grande valeur de l' $\Phi_{fermer}$   
 Une valeur de 2,9 p.u. Respectivement -2,9 p.u. Est bien au-dessus du point de saturation de la caractéristique de magnétisation maximale. Ainsi le noyau du transformateur est entraîné en saturation et peut être considéré comme une inductance de l'air-noyau qui conduit à des courants d'appel élevés (figure 2.6).

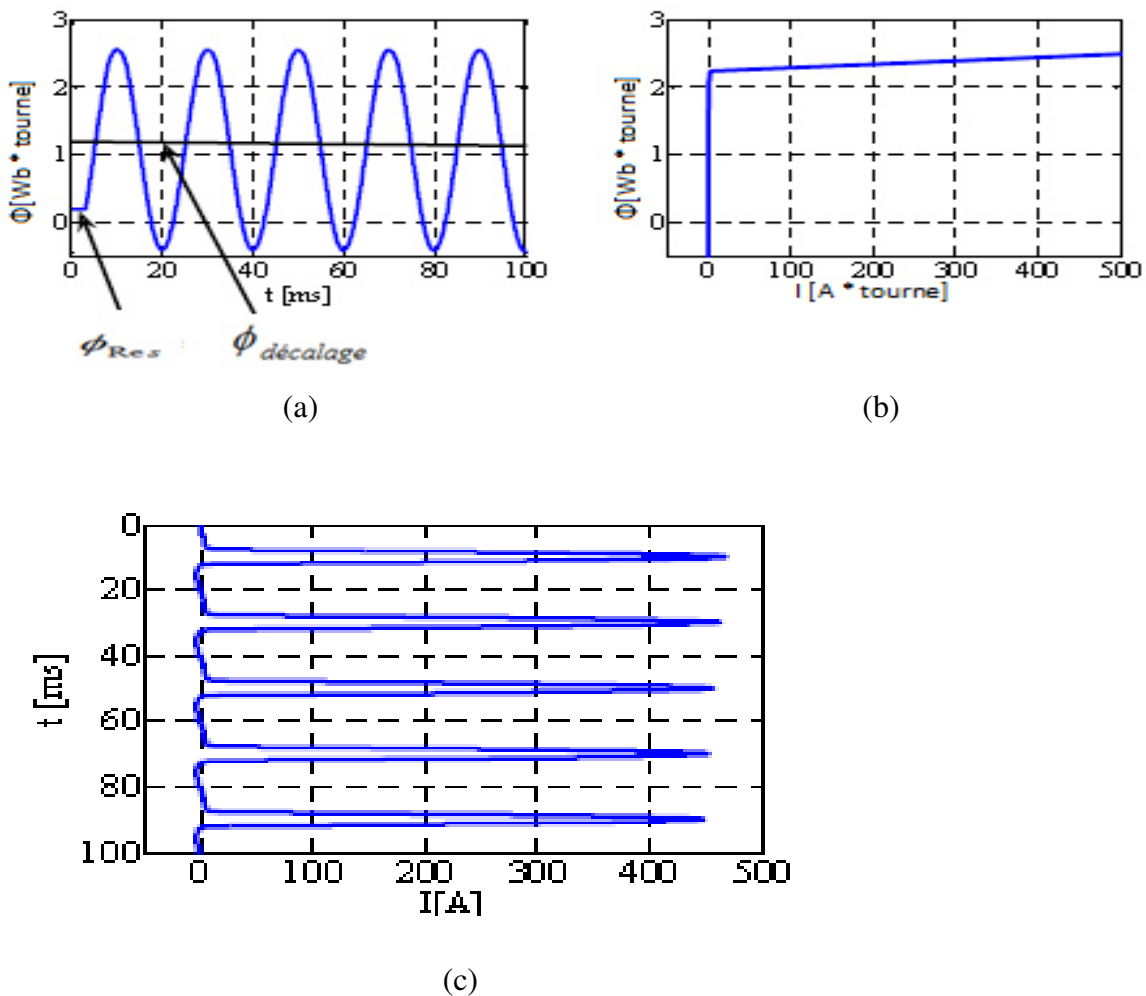


Figure 2.6. Flux magnétique  $\Phi$  et courant d'appel  $I$  ( $\Phi_{Res} = 0.1$  p.u. et  $t_{fermer} = 3$  ms)

### 2.8. Manœuvre contrôlée prenant en compte le flux résiduel

Comme mentionné ci-dessus, la stratégie de commutation contrôlée en prenant en compte les flux résiduel peut être utilisée pour différentes configurations du transformateur. Il n'y a pas une seule stratégie "à plusieurs fins"; il existe de nombreuses stratégies pour différentes configurations de transformateur, les systèmes de mesure et configuration des disjoncteurs [36]. Sauf pour la stratégie de fermeture simultanée, la méthode Pour la première phase à alimenter est toujours la même et sera bientôt discuté dans cette section. Aucun courant d'appel transitoire n'apparaîtra si le moment optimal de l'alimentation est respecté.

En supposant l'état stationnaire et un disjoncteur pratiquement fermé, le flux noyau magnétique virtuel. Correspond à l'intégrale de la tension de source pratiquement appliqué sur le transformateur. Ce flux magnétique virtuel est appelé flux potentiels ( $\Phi_{pot}$ ).

À l'instant d'excitation optimal  $t_{opt}$ , le flux prospectif doit être égal au flux résiduel (voir la figure 2.7) et l'équation (2.6) Peut-être réécrit comme suit:

$$\Phi_{décalage}(t_{opt}) = \Phi_0 \cos(\omega_0 t) + \Phi_{Res} = 0 \quad (2.6)$$

À L'instant d'excitation optimal sans considérer le pré-saisie des disjoncteurs réels peut

Soit calculé comme suit:

Si  $\Phi_{Res} < 0$  :

$$t_{opt} = -\frac{1}{\omega_0} \arccos\left(\frac{\Phi_{Res}}{\Phi_0}\right) \quad (2.7)$$

Sino 
$$t_{opt} = \frac{1}{\omega_0} \left[ \arccos\left(\frac{\Phi_{Res}}{\Phi_0}\right) + 1 \right] \quad (2.8)$$

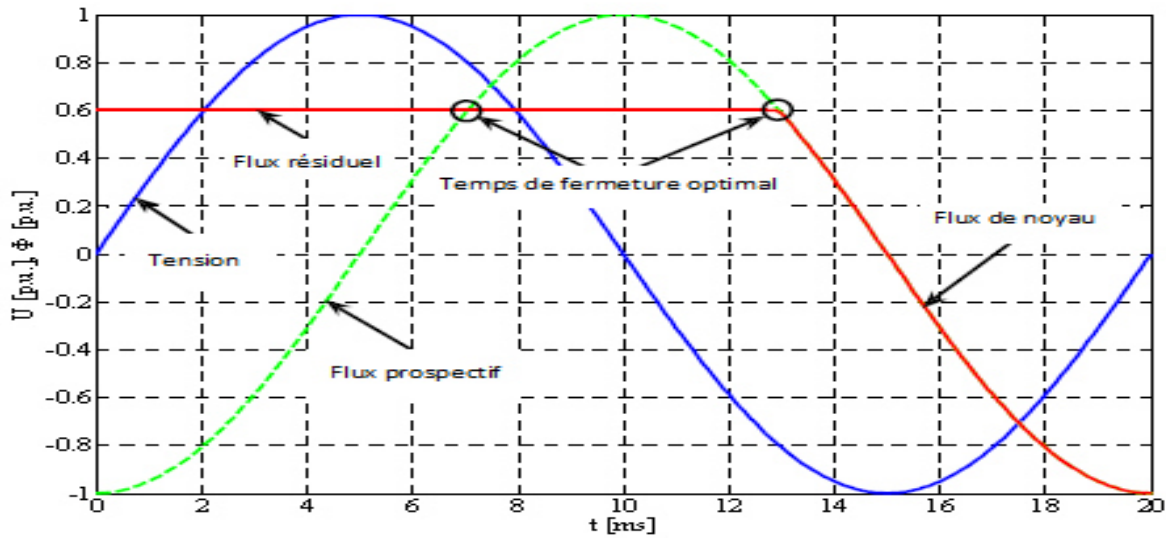


Figure .2.7. Temps de fermeture optimale pour la stratégie monophasée

## 2.9. Manœuvre contrôlée

Il y a deux types de manœuvre du disjoncteur : l'ouverture et la fermeture. Le terme « ouverture contrôlée » fait référence à la technique du contrôle de la séparation des contacts de chaque pôle d'un disjoncteur en relation avec l'angle de phase du courant et de ce fait le contrôle des temps d'arc afin de minimiser les contraintes sur les composants du réseau de puissance. Le temps d'arc est l'écart de temps entre la séparation des contacts et l'instant réel où le courant est nul. De manière similaire, les contraintes peuvent être minimisées par l'utilisation de la « fermeture contrôlée » afin d'optimiser l'instant de fermeture en relation avec la forme d'onde de la tension du réseau. Le délai total  $T_{\text{total}}$  introduit par le contrôleur peut être exprimé comme la somme du délai d'attente et du délai de synchronisation de phase[2].

$$T_{\text{total}} = T_w + T_{\text{cont}} \quad (2.9)$$

Pour l'ouverture contrôlée,

$$T_{\text{cont}} = NT_{\text{zéro}} - T_{\text{arc}} - T_{\text{ouverture}} \quad (2.10)$$

Pour la fermeture contrôlée,

$$T_{\text{cont}} = NT_{\text{zéro}} - T_m - (T_{\text{contact}} - T_{\text{préarc}}) \quad (2.11)$$

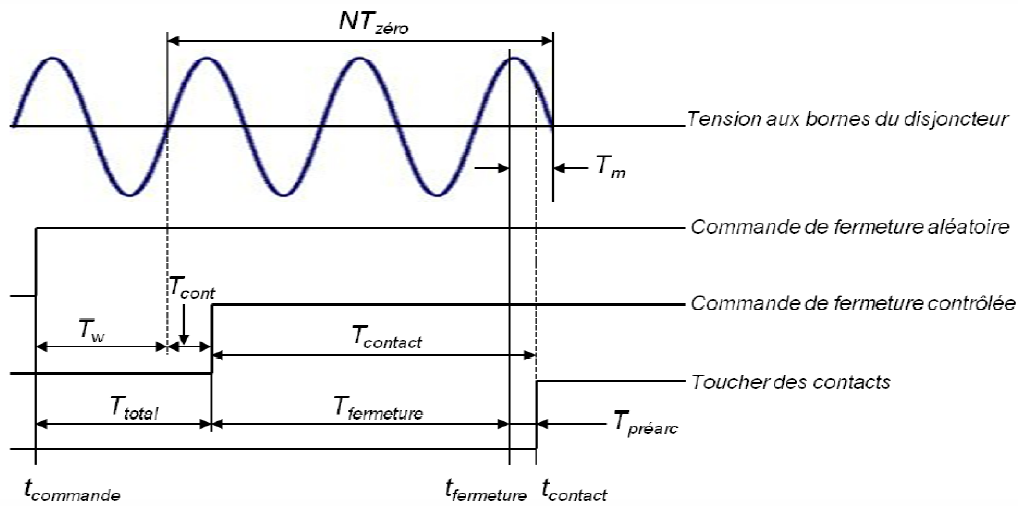


Figure.2.8. Séquence d'ouverture schématique[2]

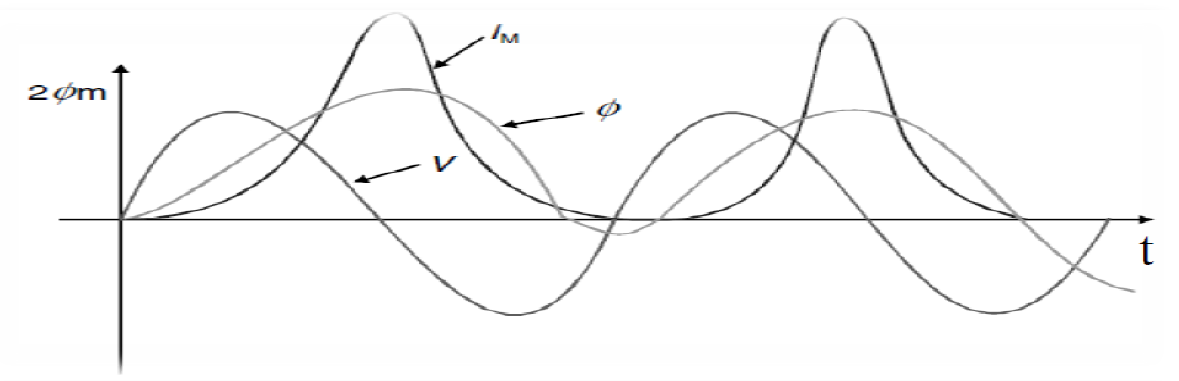


Figure.2.9. Séquence de fermeture schématique[2]

Nous pouvons ainsi définir respectivement les séquences de temps schématiques pour une mise hors ou sous tension, données par les figures 2.8 et 2.9. En pratique, il est plus courant de faire des fermetures contrôlées car les ouvertures ne sont pas toujours accessibles par les utilisateurs surtout en cas d'ouverture par protection[2].

Les disjoncteurs employés pour la manœuvre contrôlée peuvent être configurés pour une manœuvre indépendante des phases ou, de manière alternative, ils peuvent être « manœuvrés de manière groupée » par un seul mécanisme de commande avec ou sans décalage mécanique fixé entre les pôles. Les disjoncteurs unipolaires et tripolaires sont utilisés sur les réseaux triphasés de haute tension [2] .

### **2.10. Conclusion**

Ce chapitre avait pour l'étude de quelques notions sur le courant d'appel dans le transformateur : définition, caractéristiques, les causes de ces phénomènes et on parle encore sur l'influence et leur effets ainsi que la manière de minimisation, ensuite en va essayer de simuler avec un modèle de transformateur et en compare les résultats expérimentaux de simulation sur le courant d'appel avec y l'autre résultat dans le chapitre prochains



### **3.1. Introduction**

L'étude de transformateurs de puissance à traditionnellement occupé beaucoup d'attention durant des années, pour leur importances dans les systèmes de puissance, le grand intérêt porté à l'étude de ces dernier on premier de réaliser un développement remarquable dans le domine de conversion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Les défauts qui se produisant dans le réseau électrique causent des distorsions en courant et tension (harmonique) qui à leur tour affectent le transformateur de puissance. .Le flux magnétique à l'intérieur du noyau de transformateur est directement proportionnel à la tension appliquée et inversement proportionnel à la fréquence de système. La surtension et ou la sous fréquence des conditions qui peuvent produire des niveaux de flux qui saturent le noyau de transformateur. Ces conditions de fonctionnement anormales peuvent exister dans n'importe quelle partie du système électrique, ainsi n'importe quel transformateur peut être exposé à l'excitation. Au-dessus de l'excitation d'un transformateur de puissance est un cas typique de saturation. du noyau qui produit les harmoniques impairs dans le courant d'excitation

### **3.2. Mesure du courant d'appel dans le transformateur monophasé**

Les essais expérimentaux sont réalisés au laboratoire réseaux électriques - département électrotechnique - université de Sétif 1

La figure 3.1 montre une photo montage utilisée pour mesurer le courant d'appel en utilisant dans le montage une transformateur monophasée de 2KVA , un source du courant continue et du tension alternatif(AC) , les formes d'onde acquises peuvent être sauvegardées dans un format excel de la boite d'acquisition ,les courants du cote HT sont mesures avec les capteurs de courants (pince ampère-métrique TTi).Ces capteurs ont un courant maximal mesure de 20A et de celui de sortie de100mA. Les tensions du cote haute tension est mesurée a l'aide des capteurs de tension qui peuvent mesurer une tension maximale a leur primaire égale a 600V. Une carte de commande pour l'ouverture et la fermeture de disjoncteur a été utilisée [1]. Et les résultats sont affichés sur le micro ordinateur

#### **3.2.1. Matériel utilisés**

- 1- Source du courant alternatif (AC);
- 2- Source du courant continu (DC);

- 3- Capteur de tension et de courant ;
- 4- Transformateur de test ( $N_s = 330, N_p=37$ ) ;
- 5- Carte d'acquisition dSPACE ;
- 6- Commutateur (Switch) ;
- 7- Micro ordinateur ;

Dans ce cas on utilise un transformateur monophasé comme il est montré dans le banc d'essai de la figure 3.1

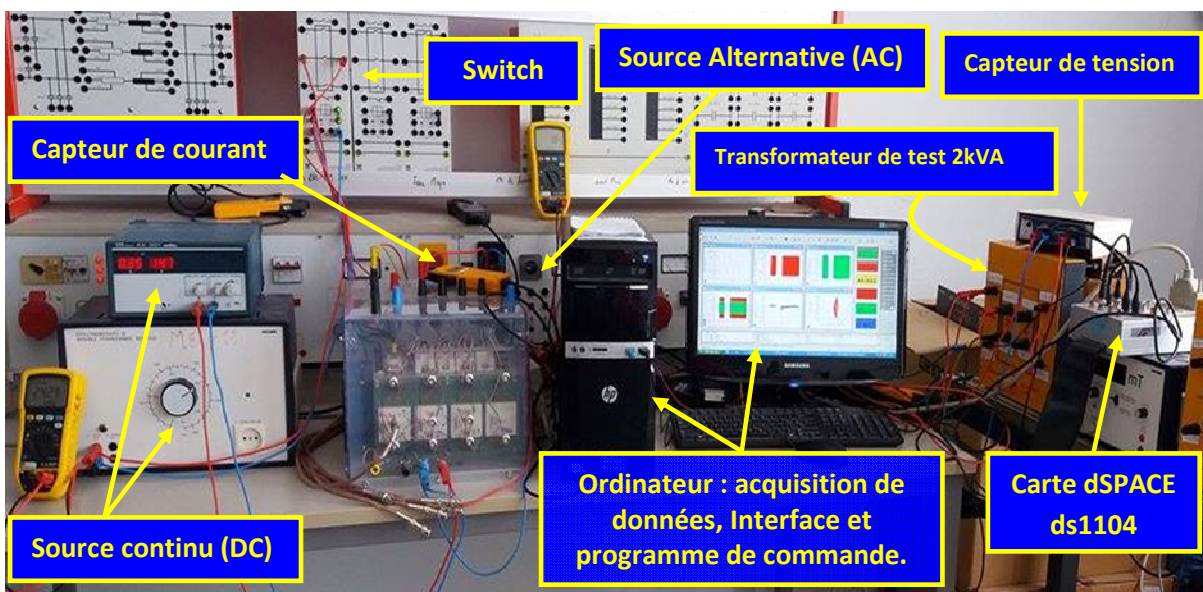


Figure 3.1. Photo de montage en laboratoire

### 3.3. Simulation du courant d'appel

Nous devons considérer un modèle pour le courant d'appel dans le transformateur monophasé par utilisation de technique d'atténuation, le courant d'appel étudié dans MATLAB simulink. Ici transformateur monophasé ayant une puissance nominale de 2 KVA, 220V / 25 V, 50 Hz, connecté à une source d'alimentation comme le montre la figure 3.2.

Comme nous avons déjà mentionnée dans le chapitre 2 sur le courant d'appel on applique la Méthodes pour réduire les courants d'appel transitoires suivant le développement de ces équations :

Le noyau magnétique  $\Phi$  noyau est le flux liés à la tension de bobine  $U_{\text{bobine}}$  par l'équation (3.1).

$$U_{bobine} = N_{bobine} \frac{d\phi_{noyau}(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Lorsque le transformateur hors tension sans charge de l'état d'équilibre, le courant sera interrompue à l'instant de ouvrez le flux résiduel  $\Phi_{Res}$  est calculée à l'aide de l'équation (3.1) :

$$\phi_{Res} = \frac{1}{N_{bobine}} \int^{T_{ouvrir}} U_{bobine}(t) dt \quad (3.2)$$

Avec 
$$U_{bobine} = U_0 \sin(\omega_0 t) \quad (3.3)$$

Et en supposant que l'état d'équilibre, l'équation (3.2) devient :

$$\phi_{Res} = -\phi_0 \cos(\omega_0 t_{ouvrir}) \quad (3.4)$$

En utilisant les équations (3.1) et (3.3), le flux magnétique pendant la première période d'activation peut être calculé en négligeant analytiquement les effets d'amortissement pertes de noyau, résistance à l'enroulement :

$$\begin{aligned} \phi_{noyau}(t) &= \frac{1}{N_{bobine}} \int_{t_{fermer}}^t U_{bobine}(t) dt + \phi_{Res} \\ &= -\phi_0 \cos(\omega_0 t) + \phi_0 \cos(\omega_0 t_{fermer}) + \phi_{Res} \end{aligned} \quad (3.5)$$

À l'instant d'excitation optimal  $T_{opt}$ , le flux prospectif doit être égal au flux résiduel et l'équation (3.6) Peut-être réécrit comme suit:

$$\phi_{décalage}(t_{opt}) = \phi_0 \cos(\omega_0 t) + \phi_{Res} = 0 \quad (3.6)$$

Donc le temps optimal pour réduire le courant d'appel, est donnée par :

Si  $\phi_{Res} < 0$  :

$$t_{opt} = -\frac{1}{\omega_0} \arccos\left(\frac{\phi_{Res}}{\phi_0}\right) \quad (3.7)$$

d Sino 
$$t_{opt} = \frac{1}{\omega_0} \left[ \arccos\left(\frac{\phi_{Res}}{\phi_0}\right) + 1 \right] \quad (3.8)$$

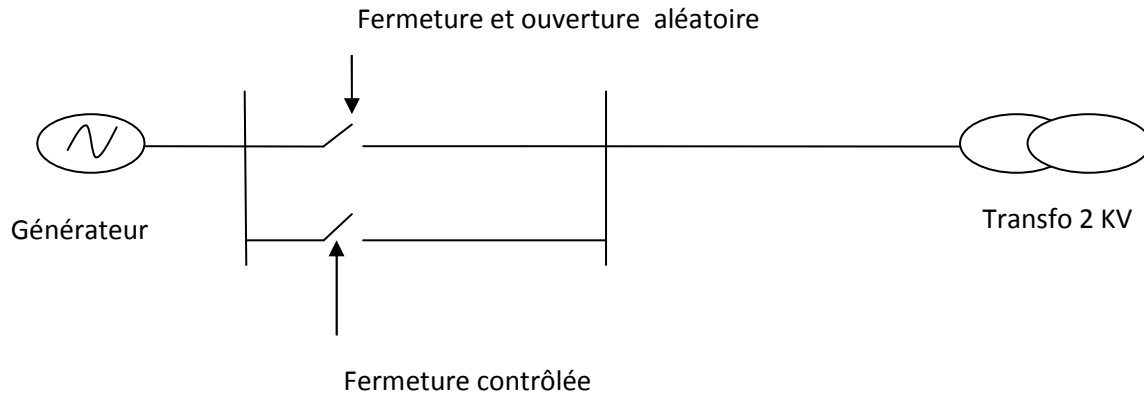


Figure 3.2. Montage de la simulation

### 3.4. Cas aléatoire (sans commande)

Il n'existe aucune commande dans cette partie, donc le transformateur est mis sous tension directement sans prendre en considération l'atténuation du courant d'appel:

#### A-Mesure (Pratique)

La valeur de courant d'appel mesurée peut atteindre 46 A, puis elle va diminuer en fonction du temps.

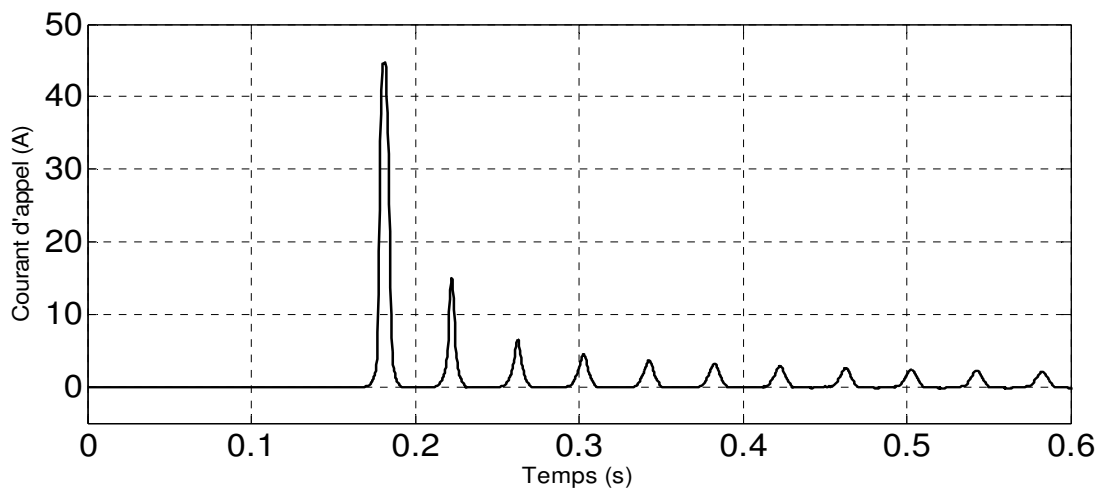


Figure 3.3. Courant d'appel expérimental.

#### B-Simulation

La valeur de courant d'appel de simulation atteint 45 A, puis elle va diminuer en fonction du temps.

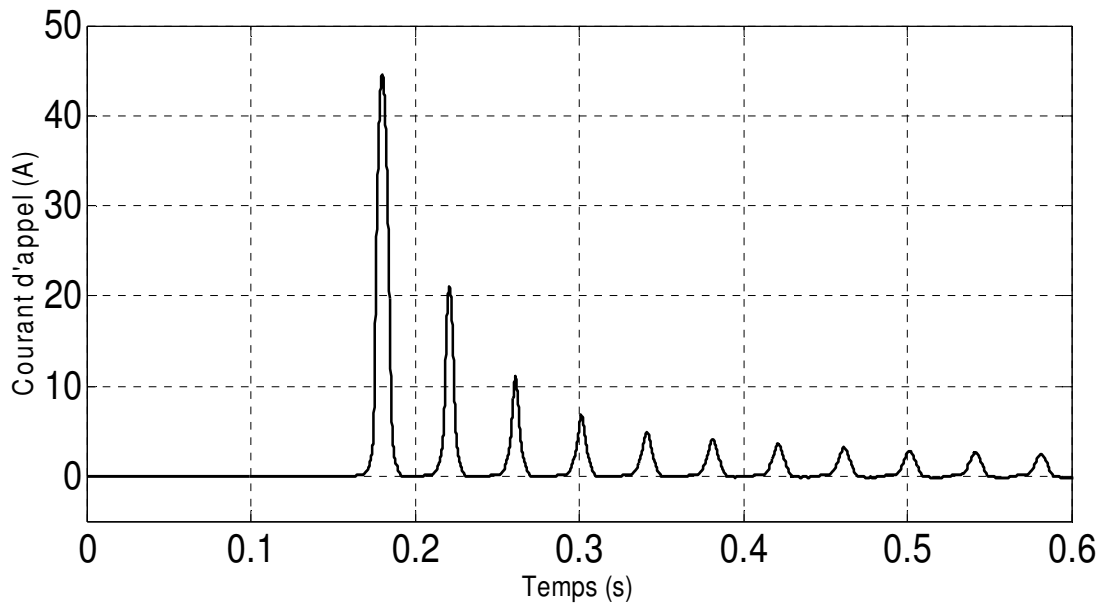


Figure 3.4. Courant d'appel Simulation

D'après ces résultats on conclut que la première crête du courant d'appel a une valeur plus importante que les autres. Le courant d'appel a une composante continue. Il atteindra son régime permanent après une certaine durée. Les deux cas expérimental et de simulation et presque superposés et similaires.

### 3.5. Minimisation du courant d'appel par le point sur l'onde de la tension (Avec commande)

Ici on introduit la commande présentée dans ce mémoire, donc le transformateur est mis sous tension avec la prise en considération de l'atténuation du courant d'appel

#### 3.5.1 Premier cas : disjoncteur commandé par le point optimal

##### 3.5.1.1. Procédure de mesure du courant d'appel avec commande

La figure 3 montre la Procédure de l'essai, le disjoncteur ferme et le système marche aléatoirement un bon moment nous avons vu un courant d'appel aléatoire puis le disjoncteur ouvre, la deuxième fermeture est contrôlée par la commande donc la mise sous tension du transformateur en fonction du flux rémanent et d'autres paramètres fonctionne et ferme le disjoncteur.

Pour assurer que la commande fonctionne normalement et correctement on fait plusieurs exécutions pour la même commande dont le principe est montré dans la figure 3.5

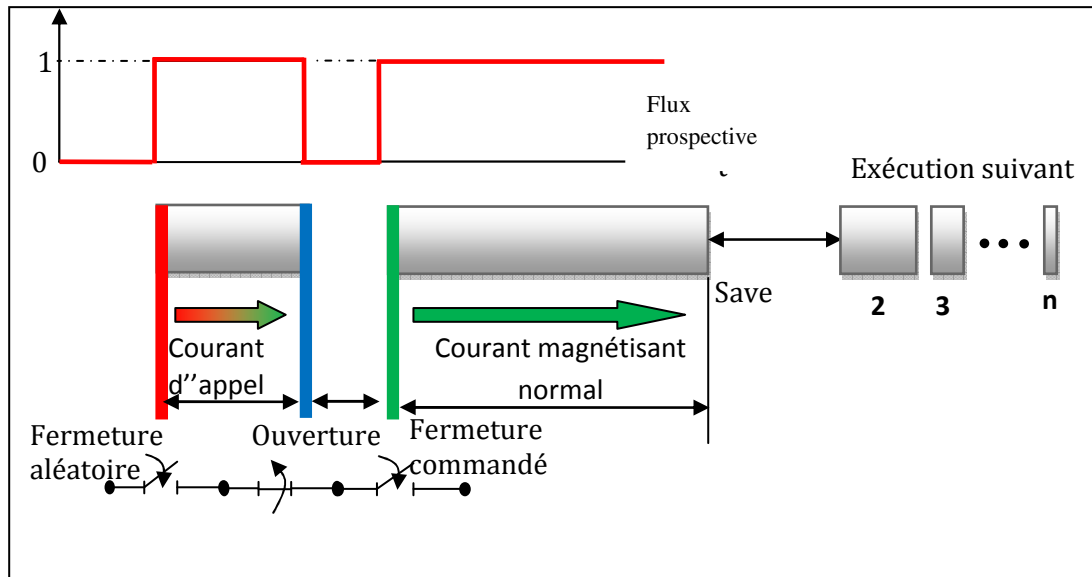


Figure 3.5 Procédure de mesure du courant d'appel avec commande

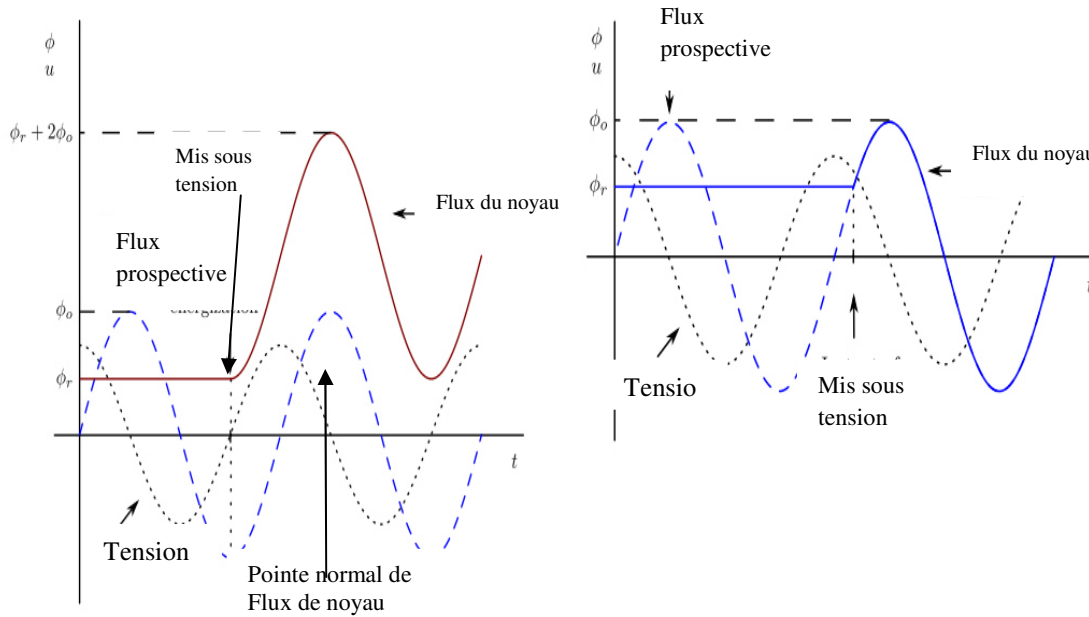


Figure (a)

figure (b)

Figure 3.6 Alimentation optimale pour éliminer l'asymétrie du flux de noyau

Lorsqu'un transformateur est active, la grandeur instantanée du flux de noyau à l' instant de l'excitation est le flux résiduel. la quantité de décalage du flux sinusoïdal généré par l'application de tension d'pend du point de l'onde de tension ou le transformateur est sous

tension. Ceci est illustré à la figure a. Le flux de noyau de crête peut donc atteindre une valeur de  $2\phi_{normal} + \phi_{résiduel}$

Pour le cas le plus grave présenté à la figure( a), où l'excitation était un zéro de tension, le flux de noyau de point est supérieur à deux fois plus élevé que le flux de noyau de pointe normal. Le noyau a été dans la saturation. Ces résultats de saturation asymétrique dans le transitoire de courant d'appel typique caractérisé par un contenu harmonique élevé et un composant à courant continu. Bien que le fermenteur de disjoncteur aient été utilisés pour réduire ces transitoires, la seule façon de supprimer ces transitoires est d'éviter la saturation du noyau. Cela peut être accompli par contrôle l'instant mis sous tension

Dans le cas d'une fermeture contrôlée de disjoncteur, optimale le point d'excitation est à l'instant où la tension de source est égale à la tension de charge piégée sur le condensateur. Pour le cas de fermeture contrôlée de transformateur, la charge piégée a un parallèle dans le flux résiduel. Donc le principe de base éliminer l'asymétrie du flux noyau, le flux induit à l'instant de l'excitation doit être égal le flux résiduel. Il n'y a évidemment aucun flux induit avant l'alimentation, mais la tension de source a la possibilité de créer un flux induit. Si la tension de source est considérée comme virtuelle source de flux, puis l'instant optimal pour alimenter un transformateur est lorsque le flux prospectif est égal au flux résiduel. Ce principe est présenté à la figure(b) il fournit la stratégie de base pour fermeture contrôlée sur les transformateur monophasés

### **A-Mesure (Pratique)**

La figure 3.7 la courbe de courant d'appel à l'instant du fermenteur de disjoncteur où elle est arrivée la valeur de 46A c'est très élevé, puis elle va diminuées jusqu'à 1A dans le période [0-1.1sec] à l'instant 1.1sec le disjoncteur été ouvrir jusqu'à 1.6sec, dans ce période la valeur de courant d'appel égal 0A. cette à l'instant 1.6s on ferme le disjoncteur mais avec l'utilisation de la commande ici courant d'appel ne paraisse pas

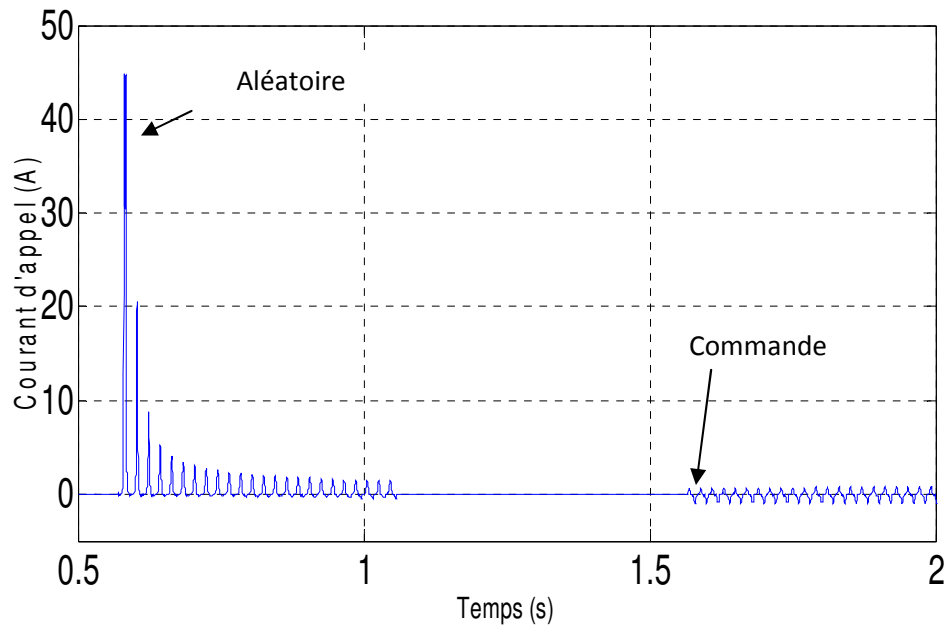


Figure3.7 Courant d'appel Pratique

### B-Simulation

La mise sous tension des transformateurs avec une fermeture peut générer des courants d'appel très importants. Dans le but d'éviter cela, il est nécessaire de contrôler le disjoncteur pour choisir l'instant optimal en fonction de la tension du réseau qui permet d'ouvrir et/ou de fermer le disjoncteur.

la stratégie de la fermeture contrôlée a un champ d'application plus large. Comme la valeur du flux résiduel (rémanent) doit être introduite dans le calcul de l'instant de fermeture, il est nécessaire de pouvoir mesurer ou estimer correctement cette valeur.

La figure 3.8 montre la courbe de courant d'appel à l'instant de la fermeture de disjoncteur où elle est arrivée la valeur de 45A c'est très élevé, puis elle va diminuer jusqu'à 1A dans la période [0-1.1sec], à l'instant 1.1sec le disjoncteur a été ouvert jusqu'à 1.6sec, dans ce période la valeur de courant d'appel égal 0A. cette à l'instant 1.6s on ferme le disjoncteur mais avec l'utilisation de la commande ici courant d'appel ne paraît pas



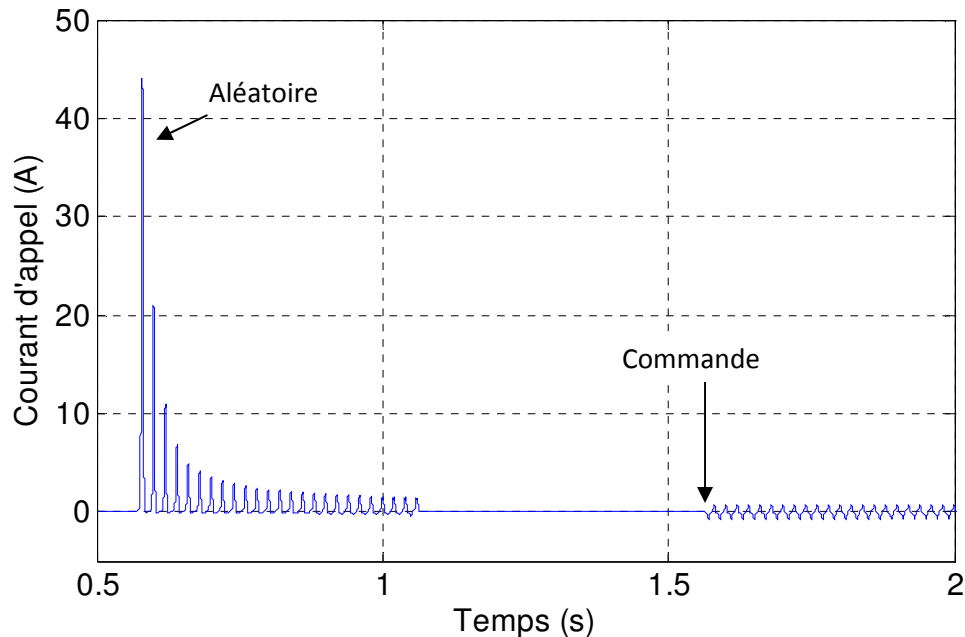


Figure3.8 Courant d'appel (simulation).

D'après cette étude, on peut conclure que les résultats expérimental et de simulation et presque superposée et similaire. En pratique le contrôle de courant d'appel du transformateur n'est pas toujours accessible. La stratégie de fermeture contrôlée en tenant compte du flux résiduel

### 3.5.2. Deuxième cas : disjoncteur commandée dans le point $v(t) = v_{\max}$

Dans ce cas nous avons choisir le point de fermeture et d'ouverture commandée du disjoncteur à l' instant  $v(t) = v_{\max}$  pour réduire le courant d'appel qui introduit dans le transformateur.

On remarque que a l'instant de mise sous tension d'un transformateur un amplitude du courant d'appel attendre une valeur négative maximale puis il introduit dans le régime permanent ,après l'ouverture de disjoncteur l'amplitude de courant d'appel prendre la valeur 0 .

Dans Le but d'éviter cela nous avons contrôlé la fermeture et l'ouverture de disjoncteur à l'instant  $v(t) = v_{\max}$

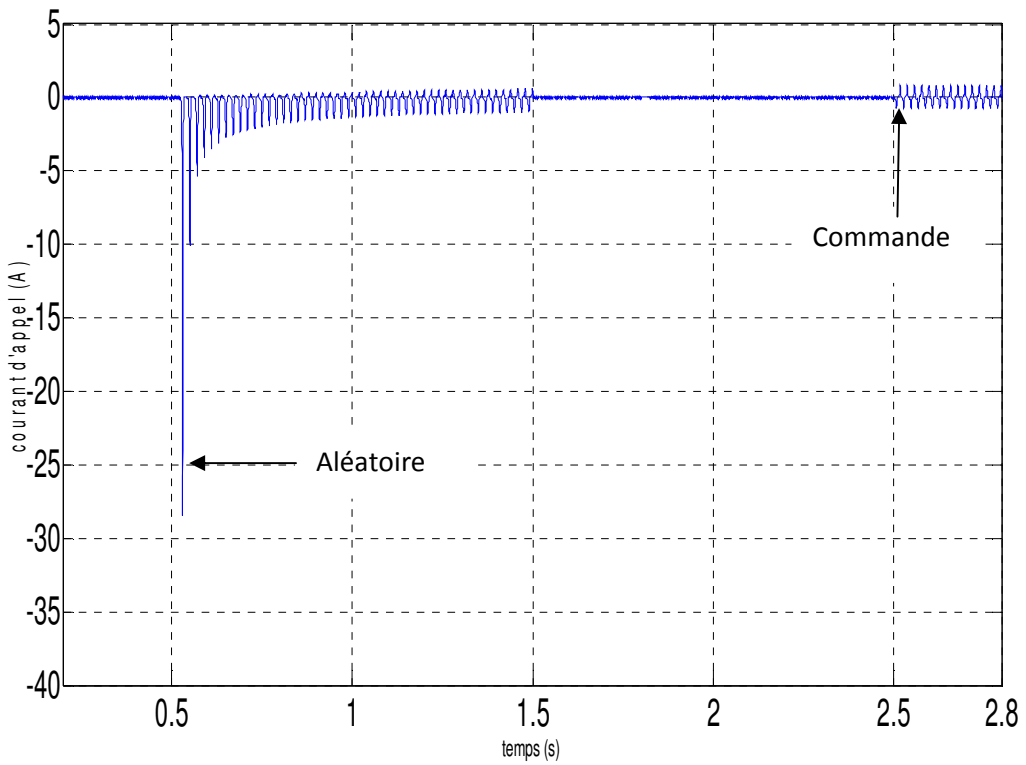


Figure 3.9 : résultat expérimental

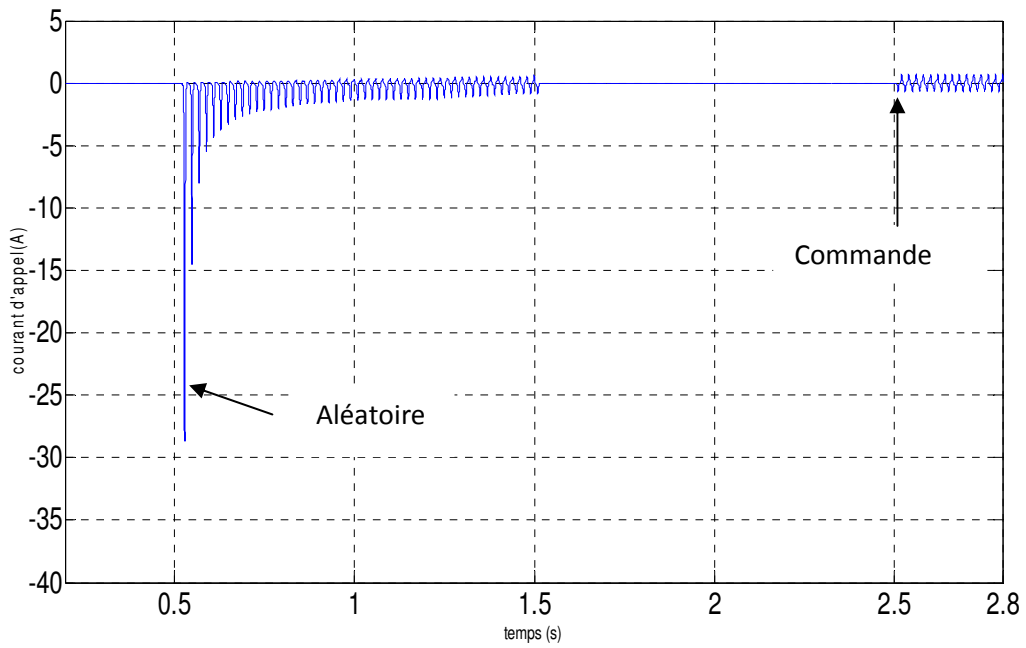


Figure 3.10 : résultat de simulation

Nous pouvons constater que les résultats de simulation du phénomène d'enclenchement de transformateur a vide sont presque similaires avec ceux acquis expérimentalement ,ce qui nous donne un aspect de bonne fonctionnement du commande développé dans ce mémoire

**Conclusion**

Ce chapitre consacré étudier et analyser le courant d'appel suite à l'enclenchement des transformatrices puissances. Nous utilisons méthode de choser le point optimal commander le disjoncteur pour minimiser le courant d'appel en suit en fait la comparaison entre le résultat expérimental et de la simulation

L'étude a révélée que l'amplitude de courant d'appel dépend essentiellement sur :

- Le point sur l'onde de tension a laquelle le transformateur est alimente.
- Le flux résiduel dans le noyau du transformateur et son signe.



### Conclusion général

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre la puissance électrique».

Lorsqu'il est mis sous tension de façon aléatoire, un transformateur de puissance est exposé à des courants d'appel élevés qui peuvent causer des surtensions temporaires considérables et imposer des contraintes mécaniques importantes aux enroulements. Afin d'éviter ces problèmes, une nouvelle solution a été mise au point et validée avec succès : le système de manœuvre contrôlée des transformateurs (SMCT), qui détermine le moment approprié de mise sous tension du transformateur en fonction du flux rémanent et d'autres paramètres.

Le système de manœuvre contrôlée des transformateurs (SMCT) vise à réduire au minimum le risque de saturation d'un transformateur de puissance à la mise sous tension, évitant ainsi les courants d'appel excessifs, les perturbations sur le réseau et la dégradation prématurée des équipements.

Dans ce mémoire on fait quelque notion et généralité sur le transformateur : définition, principe de fonctionnement, nous avons vu la méthode pour calculer les paramètres du modèle à partir de l'essai à vide et celui en court-circuit, constitution, les différents types, ainsi que la modélisation électrique énergétique du transformateur

Ensuite on a été développée quelque notion sur le courant d'appel : définition, caractéristiques, les causes de ces phénomènes et on parle encore sur l'influence et leurs effets ainsi que les manières de minimisation, ensuite on va essayer de simuler avec un modèle de transformateur et on compare les résultats expérimentaux de simulation sur le courant d'appel nous avons été fait une étude de courant d'appel par utilisation du transformateur monophasé de 2kva et on a été appliquée la méthode de manœuvre contrôlée pour minimiser l'amplitude de courant d'appel, pour assurer un bon fonctionnement de transformateur.

Dans ce travail une comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation a été faite. Le banc de mesure est fonctionnel et peut participer à l'évolution du département en matière de travaux pratiques.

L'étude a révèlè aussi que l'amplitude de courant d'appel dépend essentiellement sur :

- Le point sur l'onde de tension a laquelle le transformateur est alimente.
- Le flux résiduel (rémanent) dans le noyau du transformateur et son signe.

- [1] YAHIOU Abdelghani, "Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : Cas du courant d'appel", Mémoire de Magister En Electrotechnique ,Option Réseaux électriques, Soutenu le 21/06/2012
- [2] Tian. LIU, "Manœuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent", Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », 7 Juillet 2011
- [3] Leplus François, " Modélisation numérique des transformatrices monophasées et triphasées applications aux montages redresseurs et gradateur ", L'université des sciences et techniques de lille fladres artois, 1989
- [4] Imadeddine harzelli, "contribution a la modélisation par la méthodes des volumes finis d'un transformateur de courant" , Magister en :Electrotechnique.,Université mohamed khaidr biskra.02 octobre 2014 .
- [5] Beboukha abd errazak , ghilani .moussa, " Modélisation et simulation de la protection différentielle dans le transformateur de puissance ", Université d'EL-Oued- Faculté des Sciences et de Technologie, 23-24 Juin 2014.
- [6] Toufik SMAIL " Modélisation des éléments non linéaire ", Mémoire de magister, département d'électronique, Université de Batna, 2005.
- [7] Rekik badri, "etude et modelisation des defauts detransformateurs de puissance ", UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA -Faculté Sciences de l'ingénieur, 2008
- [8] Rahal. Samir , Gouadma .fateh ,"Effets des harmoniques sur les transformateurs de puissance en régime transitoire et sous protection numérique", UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF -Faculté de Technologie -Département d'électrotechnique, 27/06/2012.
- [9] Chelali .abdelhak, " Génération d'harmoniques par transformateur de puissance sous condition de saturation ", UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF -Faculté de Technologie -Département d'électrotechnique.,17/06/2015
- [10] Gabriel Cormier, " chapitre08-transformateur ", GEN1153.
- [11] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance)
- [12] <http://maphysiqueappliquee.free.fr> , chapitre03-Le transformateur
- [13] LEFEVRE.A, "Contrebutions a la modélisation électriques , électromagnétique et thermique des transformateurs ",Ecole polytechnique de Nantes , 2006.
- [14] U.A. Bakshi & M.V. Bakshi, ***Protection & Switchgear***
- [15] Meddour. Nacera, "Etude et diagnostic du transformateur de puissance Pendant les défauts de court circuit internes ", UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF -Faculté de Technologie -Département d'électrotechnique, 16/06/2015
- [16] T. WILDI, G. SYBILLE " Electrotechnique", Département de Boeck Université, 4e édition, 2005.
- [17] M.Garnero .toulos et VAR institute universitaire de technologie. P4et 5.Vol10
-

- [18] MARTIN.J, HAITHCOTE, C ENG, EIEEE, "The J and P Transformer book ,A Partial Technology of Power transformer",Twelfth edition Newnes,1998
- [19] MEZARI NAOUEL, "diagnostic des transformateurs de puissance",mémoire de magister en electrotechnique, option machine électrique.
- [20] Mr. BOUDIAF tarer / Mr. LAKHLEF abdelhak , "Protection des transformateur de puissance et leur identification paramétrique en vue du diagnostic de leurs défauts ", Département d'Electrotechnique. Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Algérie, 2008/2009.
- [21] V. COSTAN, " Convertisseurs Parallèles Entrelacés : Etude des Pertes Fer dans les Transformateurs Inter-cellules", Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, octobre 2007.
- [22] Holcomb, J. F, " Distribution transformer magnetizing inrush current" , *Trans. AIEE Part III Power Appar. Syst.*, Vol. 80,No. 57, pp. 697–702, December 1961.
- [23] Al-Othman, A. K., and El-Naggar, K. M., " A new digital dynamic algorithm for detection of magnetizing inrush current in transformers", *Electr. Power Compon. Syst.*, Vol. 37, No. 4, pp. 355–372, March 2009.
- [24] Chiesa, N., and Høidalen, H. K., "Novel approach for reducing transformer inrush currents: Laboratory measurements, analytical interpretation and simulation studies", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 25, No. 4, pp. 2609–2616, October 2010
- [25] Anthony F. Sleva, " Protective Relay principle",2016
- [26] Blume, L.F., et al, "Transformer Magnetizing Inrush Currents and Influence on System Operation", AIEE Transactions, vol.63, pp 366-375, 1944
- [27] Westinghouse, "Applied Protective Relaying", Westinghouse Electric Corp., United States Library of Congress card no. 76-8060, pp 8-2, 8-5, 1976
- [28] Asim Kumar Sil, "Modelling, Simulation and Experimental Study on Inrush Current of a Single Phase Transformer",Master of electrical engineering,2009.
- [29] Lin C. E., Cheng C. L., Huang C. L., Yeh J. C.: " Investigation of Magnetising Inrush Current in transformers. Part II – Harmonic Analysis" , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp.255 – 263, Jan 1993
- [30] Steurer M., Fröhlich K.: " The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.1, pp. 155 – 160, Jan2002.
- [31] Fleming J. A.: Experimental Researches on Alternate Current Transformers; Journal of the IEE, Vol. 21, Sec. VIII (1892), pp. 677 – 685
-



- [32] Moraw G., Richter W., Hutegger H., Wögerbauer J.: Point-on-Wave Controlled Switching of High Voltage Circuit Breakers, CIGRÉ Session 1988
- [33] Brunke J. H.; Fröhlich K. J.: Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 2 (April 2001), pp. 276 – 280
- [34] Mercier A., Portales E., Filion Y., Salibi A.: Transformer Controlled Switching taking into Account the Core Residual Flux – A real Case Study, CIGRÉ Session 2002, No.13-201
- [35] CIGRÉ Working Group A3.07: Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers – Guidance for further Applications including unloaded Transformer Switching, Load and Fault Interruption and Circuit-Breaker Uprating, CIGRÉ Broschure No. 263
- [36] Brunke J. H.: Elimination of Transient Inrush Currents when Energizing Unloaded Power Transformers, Doctoral Dissertation no. 12791, ETH Zurich, 1998
-

## Résumé

Les transitoires d'appel peuvent avoir des effets très indésirables sur les transformateur et sont dus à une asymétrie de flux de noyau pendant l'excitation. Ces courants d'appel peuvent atteindre des amplitudes très élevées, riches en harmonique qui peuvent endommager le transformateur lui-même avec un mal fonctionnement du dispositif de protection. Plusieurs méthodes sont utilisées pour réduire leur amplitude, telles que des résistances série, une réduction de flux résiduel et un disjoncteur contrôlé. La sélection de l'une de ces méthodes est une décision qui doit tenir compte de la rentabilité et de la facilité de mise en œuvre.

Ce mémoire de master s'inscrit dans le cadre d'investiguer une manœuvre contrôlée c.-à-d. la relation entre le moment de fermeture du disjoncteur et la valeur sur l'onde de la tension. De voir est ce que cette technique peut réduire sensiblement les courants d'appel, en comparant avec l'excitation aléatoire. Pour évaluer l'efficacité de l'approche technique il est possible d'utiliser des modèles de noyau de transformateur de différentes caractéristiques magnétiques.

## ملخص

يمكن أن يكون لعابري المكالمة تأثيرات غير مرغوب فيها على المحول، ويرجع ذلك إلى عدم تناظر التدفق الأساسي أثناء الإثارة، ويمكن أن تصل هذه التيارات الداخلة إلى سعة عالية جداً، غنية بالتناغمات التي يمكن أن تلحق الضرر بالمحول حتى مع وجود خلل في جهاز الحماية. وتستخدم عدة طرق للحد من اتساعها، مثل المقاومات سلسلة، والحد من تدفق المتبقية وقاطع الدائرة تسيطر عليها. اختيار إحدى هذه الطرق هو قرار يجب أن يأخذ في الاعتبار الربحية وسهولة التنفيذ

هذه الرسالة الماجستير هي جزء من التحقيق من مناورة تسيطر عليها

العلاقة بين وقت إغلاق قاطع الدائرة والقيمة على موجة الجهد. لنرى ما هي هذه التقنية يمكن أن تقلل بشكل كبير التيارات من الدعوة، مقارنة مع الإثارة العشوائية. لتقييم فعالية النهج التقني فمن الممكن استخدام نماذج المحولات الأساسية من الخصائص المغناطيسية المختلفة