

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques
Présenté par :

NAITI Ahmed Bilel

OOUAKAS Djamel

Thème:

**Etude et simulation de la protection
d'un transformateur de puissance
contre les défauts internes et externes**

Soutenu publiquement

Le:

Devant le jury :

M ^r AYAD Ahmed Nour El islam	MCA	Président	UKM Ouargla
M ^r ROUIBAH Tahar	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r BOUKAROURA Abdelkader	MAB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022



Remerciements

Nous remercions notre dieu le Grand-Puissant de nous avoir donné la patience, la volonté et le courage

de mener à terminer ce mémoire


Nous adressons un remerciement spécial à Monsieur

TAHAR ROUIBAH (Enseignant au département de Génie électrique de l'université KASDI MERBAH – Ouargla) d'avoir accepté de nous encadrer, de son intérêt constant qui nous a guidé dans notre travail, et de ses conseils au cours de ce mémoire.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant

D'évaluer notre travail.

Enfin, nous visions une salutation à tous les enseignants et le personnel du Faculté des Sciences Appliquées Génie électrique, sans oublier les étudiants de master électrotechnique





Dédicace

*Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mon
père et ma mère qui m'ont soutenu pour
me permettre d'atteindre tous mes objectifs et qui trouvent
ici toute ma gratitude et ma gratitude. À toute ma famille
sans exception. à tous mes amis. À mes frères, toute ma
famille, mes tantes, à tous mes professeurs du primaire
jusqu'à maintenant, et à tous nos professeurs du
département de génie électrique. À tous mes amis(es)...*

Ahmed Bilel NAITI





Dédicace

*Je dédie cet acte humble principalement à ma mère et ma
famille qui m'ont soutenu pour cela, et me permettent
d'accomplir tous mes succès et de trouver ici toute ma
gratitude et ma gratitude.*

À tous mes amis sans exception

*Tous mes amis. À mes frères, à toute ma famille, à tous
ceux qui m'ont enseigné et contribué à mon développement
scientifique depuis le début... Merci.*

Djamel OUKAS



Sommaire

Listes de figures.....	I
Listes de tableaux.....	III
Listes des symboles.....	IV
Introduction générale	1

Chapitre 1 : généraliste sur le transformateur de puissance

I. Introduction.....	3
II. Transformateurs de puissance	3
II.1 Définition	3
II.2 Principe de fonctionnement	3
III. Types de transformateurs classiques	4
III.1 Transformateur de distribution et de puissance	4
III.2 Autotransformateur	5
III.3 Transformateurs de mesure	5
III.3.1 Transformateur de tension (TT)	5
III.3.2 Transformateur de courant (TC)	5
IV. Couplage des enroulements	4
V. Défauts dans les transformateurs de puissance	7
V.1 Les contraintes	8
• Contraintes électriques	8
• Contraintes thermiques	8
• Contraintes mécaniques	8
• Contraintes environnementales	8
V.2 Les différents types de défauts.....	8
V.2.1 Défauts externes	8
V.2.1.1 Court-circuit	8
V.2.1.2 Perturbation haute tension dans le transformateur de puissance	9
a) Surtension transitoire	9
b) Fréquence d'alimentation surtension	9
V.2.1.3 Sous effet de fréquence dans le transformateur de puissance	10
V.2.1.4 La surcharge	10
V.2.2 Défauts internes dans le transformateur de puissance	10

V.2.2.1 Défauts de terre.....	11
V.2.2.2 Les fuites d'huile.....	11
V.2.2.3 Défaut entre spires	12
V.2.2.4 La dégradation de l'isolation	12
V.2.2.5 Défauts entre phases	13
V.2.2.6 Défaut de base dans le transformateur de puissance	13
V.3 Les défaillances du transformateur et leurs causes	13
V.3.1 Défaillance avec arrêt forcé.....	14
V.3.2 Défaillance avec arrêt programmé	14
VI. Système d'isolation dans les transformateurs de puissance	14
VI.1 L'huile.....	14
VI.2 Le papier.....	15
VII. Refroidissement.....	15
VIII. Conclusion.....	17

Chapitre 2 : Philosophie de la protection différentielle

I. Introduction:	18
II. Système de protection:	18
II.1 Définition et rôle de la protection :.....	18
II.2 Constitution d'un système de protection :	18
II.3 Qualités principales d'un système de protection :	19
III. Les différents types de la protection d'un transformateur de puissance :	19
III.1 Protections contre les défauts internes	20
III.1.1 Protection par relais du BUCHOLZ :.....	20
III.1.2 Protection masse cuve:	21
III.1.3 La protection thermique :	22
III.1.4 Protection par indicateur de température Huile :	22
III.1.5 Protection par indicateur de température Enroulement (image thermique) :.....	23
III.2 Protections contre les défauts externes	23
III.2.1 Protection des surtensions	23
a. Eclateur	23
b. Parafoudre	24
III.2.2 Protection à maximum de courante phase :	24
a. Protection à maximum de courant coté HTB	24
b. Protection à maximum de courant coté HTA	24
III.2. 3 Protection neutre MT	24
III.2.4 Protection terre résistante	25
III.2.5 Protection différentielle	25

III.2.5.1 Principe de fonctionnement de (Relais différentiels F87T)	26
III.2.5.2 Schéma de protection différentielle conventionnel	26
III.2.6 Les difficultés de protection différentielle.....	29
a. Courant d'appel magnétisant	29
b. Faux déclenchement dû aux caractéristiques TC :.....	29
c. Faux déclenchement dû au changeur de prises :.....	30
IV. Relais différentiel en pourcentage	30
IV.1 Définition :	30
IV.2 Fonctionnement du relais différentiel en pourcentage :.....	31
V. Relais différentiel numérique	32
VI. Conclusion :.....	33

Chapitre 3 : Application et analyse des résultats de simulation

I. Introduction	34
II. Protection du transformateur par relais différentiel conventionnel	34
II.1 Modèle de simulation	34
II.2 Résultats et discussion	36
II.2.1 Sans défaut (fonctionnement normal).....	36
II.2.2 Défauts sans temporisation	37
II.2.3 défauts avec temporisation	41
III. Protection différentielle numérique	45
III.1. Simulation d'un transformateur à vide	47
III.1.1 Relais différentiel conventionnel	47
III.1.2 Relais différentiel numérique	49
III.2 Simulation d'un transformateur chargé avec un défaut interne	50
III.3 Simulation d'un transformateur chargé avec un défaut triphasé.....	53
IV. Simulation d'un transformateur à vide où le rapport entre le courant harmonique et le courant différentiel est inférieur à 0,3	54
IV.1 Schéma de protection différentielle numérique	54
V. Conclusion	57
Conclusion générale	58
Références bibliographiques	60
Résumé	

Liste de figures

Chapitre 1 : généraliste sur la transformateur de puissance

Figure I.1 circuit électromagnétique simple	4
Figure I.2 Transformateur de puissance GRTE 220Kv/60Kv	4
Figure I.3 Autotransformateur	5
Figure I.4 Transformateurs de mesure TT et TC	6
Figure I.5 Couplage de primaire.....	7
Figure I.6 Couplage de secondaire	7
Figure I.7 types de court-circuit.....	9
Figure I.8 Explosion du transformateur de puissance centrale de la sous-station de central électrique	10
Figure I.9 Fuite d'huile de transformateur	11
Figure I.10 Allumage entre spires, par court-circuit	12
Figure I.11 Schéma du mécanisme de la dégradation huile/papier	12
Figure I.12 Exemple de défaut de base endommagé dans un transformateur de puissance	13
Figure I.13 Aéroréfrigérant.....	16
Figure I.14 Radiateurs sur un transformateur	16

Chapitre 2 : Philosophie de la protection différentielle

Figure II.1 Chaîne de protection.....	18
Figure II.2 Schéma bloc de travée transformateur 220/60 Kv	20
Figure II.3 Relais Buchholz	21
Figure II.4 Protection de masse cuve.....	22
Figure II.5 Manomètre.....	22
Figure II.6 Principe de fonctionnement d'indicateur de température d'huile	23
Figure II.7 Principe de fonctionnement d'indicateur de température d'enroulement	23
Figure II.8 Protection différentielle pour un transformateur de puissance.....	28
Figure II. 9 La relation entre la tension phase à phase et la tension phase à neutre et le déphasage entre eux dans les transformateurs connectés Y-Dou D-Y	28
Figure II.10 Relais différentiel en pourcentage	31
Figure II.11 Relais différentiel biaisé ou en pourcentage	31
Figure II.12 Relais différentiel numérique-GRTE Quartier Hassi Messaoud.....	32

Chapitre 3 : Application et analyse des résultats de simulation

Figure III.1	Modèle Simulink du transformateur triphasé avec sa protection.....	35
Figure III.2	Schéma du sous-système de relais différentiel conventionnel	36
Figure III.3	Tension secondaire sans défaut.....	36
Figure III.4	Courant secondaire sans défaut.....	37
Figure III. 5	Signal de sortie de relais différentiel.....	37
Figure III. 6	Courant au défaut monophasé	38
Figure III. 7	Tension au défaut monophasé	38
Figure III. 8	Courant au défaut biphasé	39
Figure III. 9	Tension au défaut biphasé	39
Figure III. 10	Courant au défaut triphasé.....	40
Figure III. 11	Tension au défaut triphasé	40
Figure III. 12	Signal de sortie de relais différentiel sans temporisation	41
Figure III. 13	Signal de sortie de relais différentiel avec temporisation	41
Figure III. 14	Courant au défaut monophasé	42
Figure III. 15	Tension au défaut monophasé	42
Figure III. 16	Courant au défaut biphasé	43
Figure III. 17	Tension au défaut biphasé	43
Figure III. 18	Courant au défaut triphasé.....	44
Figure III. 19	Tension au défaut triphasé	44
Figure III. 20	Organigramme du schéma de relais différentiel numérique proposé	46
Figure III. 21	Circuit de modélisation du transformateur triphasé à vide	47
Figure III. 22	courant d'appel des trois phases	48
Figure III. 23	Signal de sortie relais différentiel conventionnel.....	48
Figure III. 24	signal de sortie du relais différentiel numérique	49
Figure III. 25	Courant fondamental et du 2-ème harmonique.....	49
Figure III. 26	Circuit de modélisation du transformateur triphasé chargé.....	50
Figure III. 27	Courants secondaires	50
Figure III. 28	Courant différentiel et courant de réglage.....	51
Figure III. 29	Signal de sortie de relais différentiel conventionnel	52
Figure III. 30	Signal de sortie de relais différentiel numérique	52
Figure III. 31	Courants primaires	53
Figure III. 32	Courants secondaires	53
Figure III. 33	Signal de sortie de relais différentiel conventionnel	53
Figure III. 34	Signal de sortie de relais différentiel numérique avec temporisation.....	54

Figure III. 35 Modèle Matlab/Simulink du système proposé	55
Figure III. 36 Contenu du bloc de relais différentiel.....	55
Figure III. 37 Le contenu du bloc comparateur	55
Figure III. 38 Formes d'onde des courants d'appel des trois phases	56
Figure III. 39 Résultats du comparateur d'amplitude	56
Figure III. 40 Résultat du comparateur harmonique la 2e harmonique et la composante fondamentale.....	57
Figure III. 41 Signal de sortie de relais différentiel numérique	57

Liste de tableaux

Chapitre 1 : généraliste sur la transformateur de puissance

Tableau I.1 Représentation du différent couplage d'un transformateur.....	6
Tableau I.2 Nature du vecteur de refroidissement.....	16
Tableau I. 3 Nature de la circulation du diélectrique	16
Tableau I. 4 Type de refroidissements.....	17

Chapitre 3 : Application et analyse des résultats de simulation

Tableau III.1 Paramètres principaux du transformateur	35
---	----

Liste des symboles

Symbole	Définition
I	Le courant
V	La tension
Φ	Flux
a	Exposant de région de flux
f	La fréquence
T	Le temps
I_{cc}	Le courant de court-circuit
I_{n2}	Le courant nominal du transformateur côté moyenne tension
I_{n1}	Le courant nominal du transformateur côté haute tension
I_r	Le courant de réglage
I_2	Le courant côté secondaire
I_1	Le courant côté primaire
N_1	Nombre de spires côté primaire
N_2	Nombre de spires côté secondaire
V_1	La tension côté premier
V_2	La tension côté secondaire
I_a, I_b, I_c	Le courant de phase a, b, c
V_a, V_b, V_c	La tension de phase a, b, c
I_d	Le courant différentiel
I_f	Le courant fondamentale
I_h	Le courant d'harmoniques
I_{h2}	Le courant d'harmonique d'ordre 2
V_{an}	La tension entre phase a et neutre
V_{ab}	La tension phase a et phase b
Z_d, Z_h	Les impédances directe et homopolaire
R_n, R_{def}	Résistance de mise à la terre du neutre, Résistance de défaut



Introduction générale



Introduction générale

Un réseau électrique comporte l'ensemble d'équipements électriques générateurs, transformateurs, lignes, postes de livraison qui constituent une chaîne élémentaire pour la gestion de l'énergie électrique. Le transformateur est l'un des équipements les plus coûteux d'un système d'énergie électrique qui nécessite une surveillance continue et une réponse de protection rapide [7].

Le coût associé à la réparation des dommages au transformateur est assez élevé. De plus, un arrêt imprévu du transformateur peut être coûteux et économiquement inutile. En conséquence, des exigences élevées sont imposées au système de protection du transformateur de puissance. La protection est une question à traiter de vue économique, en considérant la probabilité d'un type de défaut, les conséquences de sa manifestation éventuelle (perte de production, coût de remise en état, dommage au matériel) et le coût de l'efficacité des protections destinées à l'empêcher ou à les limiter. La fiabilité du transformateur pourra être renforcée par un bon plan de protection et supervision. Pour lequel différents types de protection et les schémas de surveillance sont développés depuis de nombreuses années. La protection doit être fiable et rapide afin de déconnecter le transformateur le plus rapidement possible, dans les délais, pour limiter les conséquences. La surveillance du transformateur de puissance peut être également utilisée pour détecter les conditions anormales pouvant entraîner le développement de défaut [2].

La protection différentielle est l'une des méthodes les plus utilisées pour protéger les transformateurs de puissance contre les défauts internes. Il est obtenu par la comparaison de la somme des courants primaires à la somme des courants secondaires. L'écart de ces courants ne doit pas dépasser une valeur I_0 pendant un temps supérieur à T_0 , au-delà il y a déclenchement.

Généralement, trois difficultés principales handicapent la protection différentielle classique. Ils incitent le relais différentiel à déclencher un faux signal de déclenchement sans qu'il n'existe de défaut. Ces complications doivent être surmontées pour que le relais différentiel fonctionne correctement [18]:

- Courant d'appel magnétisant lors de la mise sous tension initiale,
- Inadéquation et saturation des TC,
- Le rapport de transformation change en raison du changeur de prises.

Les relais numériques sont mis en application pour protéger la majorité des éléments du réseau électrique. Un relais numérique très performant assure la protection du transformateur de puissance, il regroupe plusieurs protections sous forme d'éléments à réglage différent, tel que la protection différentielle, surintensité de phase et surexcitation. Notre étude porte sur l'étude de la protection des transformateurs de puissance à l'aide d'un algorithme rapide et efficace qui isole le transformateur lors d'un défaut pour éviter les dommages [18].

Pour bien mener ce travail de master, nous avons élaboré un plan d'étude divisé en trois chapitres comme suit:

Le premier concerne une description de leur fonctionnement, leurs différents types et leurs éléments principaux.

Le deuxième a été consacré pour l'étude des différents types de protection des transformateurs de puissance et les composants d'un système de protection. Finalement le troisième chapitre simulation et résultat afin de conclure notre travail par une conclusion générale.



Chapitre I

**Généralités sur le transformateur de
puissance**



I. Introduction

Dans le domaine de l'énergie électrique, le transformateur est l'élément principal en raison de son rôle important dans la liaison des différents réseaux électriques.

Dans ce premier chapitre, nous recommandons quelques notions utiles sur les transformateurs, nous commençons d'abord par expliquer le transformateur et son principe de fonctionnement, ensuite, nous présentons leurs différents types et donnons un bref aperçu de l'installation du couplage de la bobine, et après cela, nous présentons les différents défauts qui peuvent endommager le transformateur, et nous déterminerons également la défaillance des transformateurs et leurs causes, et enfin, le système d'isolation et de refroidissement des transformateurs apparaît.

II. Transformateurs de puissance :

II.1 Définition :

Le transformateur de puissance est un appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et de courant alternatifs en un autre système de tension et de courant généralement de valeurs différentes et à la même fréquence dans le but de transmettre de l'énergie électrique, norme CEI 600761[1].

II.2 Principe de fonctionnement :

En vertu de la loi de FARADAY, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable. Φ 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.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, 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, la fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire, le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique.

La Figure1 montre un simple transformateur ayant deux enroulements, que le nombre de spires de l'enroulement primaire soit N et celui du secondaire soit N_2 , 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, dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux sont négligées, le rapport du nombre des spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine le rapport de transformation du transformateur [2].

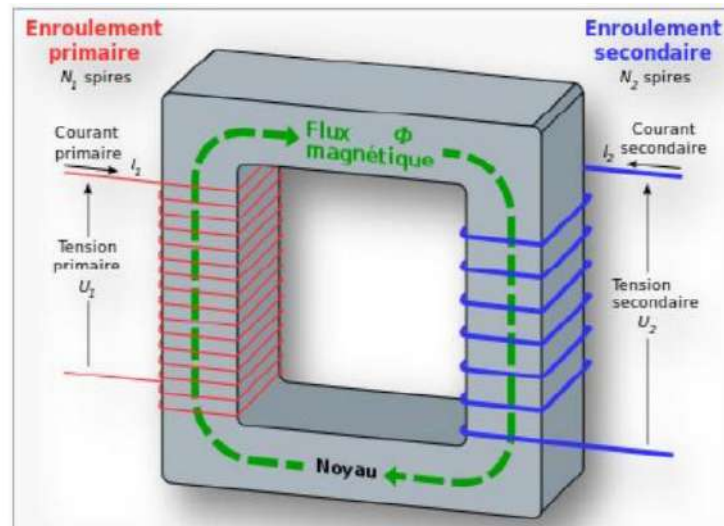


Figure I.1 circuit électromagnétique simple [2].

III. Types de transformateurs classiques

III.1 Transformateur de distribution et de puissance :

Le transformateur est une machine électromagnétique statique destiné à transformer un courant alternatif primaire en un autre courant secondaire de même fréquence ayant dans le cas général d'autres caractéristiques en particulier, une autre tension et un autre courant [3].

Couramment les transformateurs de distribution sont ceux qui abaissent la tension du réseau principalement 20 kV, pour l'adapter à l'utilisateur final, en général 400 V triphasé en Algérie, les puissances des transformateurs de distribution sont de l'ordre de plusieurs kVA, l'essentiel d'autres transformateurs électriques situés sur le réseau haut tension seront des transformateurs de puissance Figure I.2, les puissances et tensions de ces transformateurs peuvent aller jusqu'à plusieurs centaines de MVA et plusieurs centaines de kV [2].



Figure I.2 Transformateur de puissance GRTE 220Kv/60Kv.

III.2 Autotransformateur :

Cet appareil présente l'avantage d'un dimensionnement plus faible que celui d'un transformateur, à puissance traversant égale, il se distingue du transformateur par le fait qu'il existe un point commun aux enroulements primaire et secondaire, étant donné qu'il n'y a plus d'isolation galvanique entre les enroulements primaire et secondaire, tout défaut se manifestant sur un réseau se propage immédiatement sur le second, dans la présente étude sur le diagnostic de défauts, les autotransformateurs de puissance seront assimilés aux transformateurs de puissance dont la construction et le fonctionnement sont très proches [2].



Figure I.3 Autotransformateur [2].

III.3 Transformateurs de mesure :

Destiné à alimenter des appareils de mesure, des compteurs, des relais et autres appareils analogues. Ils sont utilisés pour permettre la mesure de la tension ou du courant quand ceux-ci ont une valeur trop élevée pour être mesurée directement. Ils doivent transformer la tension ou le courant de manière proportionnelle et sans déphasage.

III.3.1 Transformateur de tension (TT) :

Selon la définition donnée par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), un transformateur de tension est un « transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro, pour un sens approprié des connexions » [4].

III.3.2 Transformateur de courant (TC) :

Les transformateurs de courant sont utilisés pour fournir l'information aux « relais » de protection et de mesure du courant, de la puissance, de l'énergie.

Pour cela ils doivent délivrer un courant secondaire proportionnel au courant primaire qui les traverse. Ils doivent donc être adaptés aux caractéristiques du réseau : tension, fréquence et courant, ils sont soit

montés de manière séparée sur un isolateur propre (Figure I.4), soit placés dans les dômes des traversées des transformateurs de puissance [4].



Figure I.4 Transformateurs de mesure TT et TC-GRTE 220 Kv.

IV. Couplage des enroulements :

Dans les transformateurs triphasés, chaque phase contient ses propres enroulements, il est alors nécessaire de connecter les trois phases, c'est-à-dire chaque élément monophasé, entre elles pour former un système triphasé, la manière dont ces phases sont connectées ensemble est appelée couplage.

Les coupleurs sont modulaires et comportent un symbole indiquant le mode de connexion électrique, et un indicateur de temps indiquant le déphasage de la tension entre les bornes primaire et secondaire de la phase A, les symboles d'appairage habituels sont :

- ✓ Couplage étoile : Y, avec point neutre sorti (YN), ou inaccessible en service (Y).
- ✓ Couplage triangle : D
- ✓ Couplage en zigzag : Z, avec point neutre sorti (ZN), ou non (Z)

Les symboles sont toujours présentés partant du niveau de tension le plus élevé (en majuscule) vers les niveaux de tensions les plus faibles par ordre décroissant (en minuscules) [6].

Tableau I.1 Représentation du différent couplage d'un transformateur.

	Couplage		
	Etoile Y	Triangle D	Zigzag Z
Cote HT	Y	D	Z
Cote BT	y	d	b

- Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle (D) :

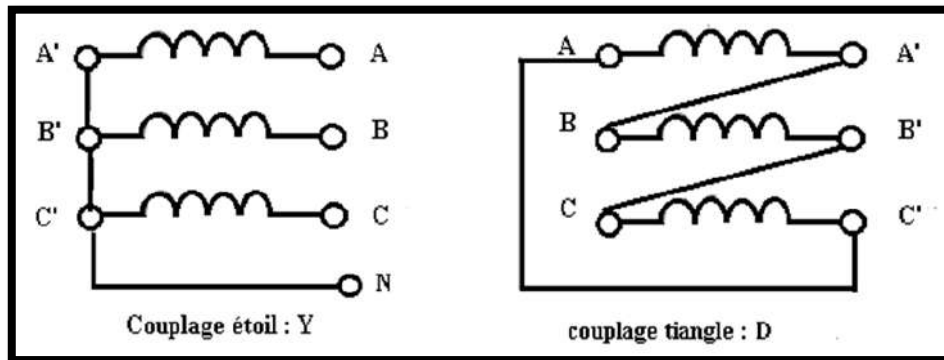


Figure I.5 Couplage de primaire [14].

- Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle (d) et zigzag (z) :

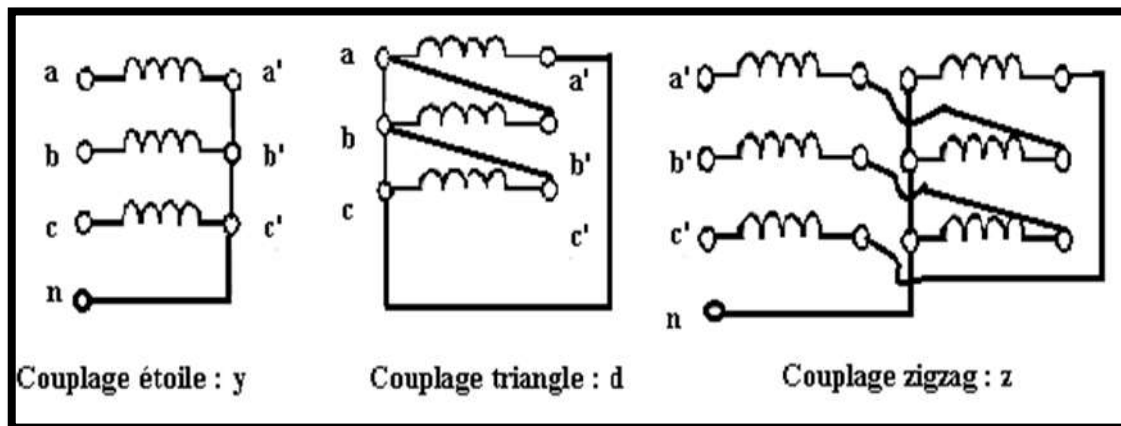


Figure I.6 Couplage de secondaire [14].

V. Défauts dans les transformateurs de puissance :

Les transformateurs sont dimensionnés pour résister aux contraintes de fonctionnement, conformément aux normes en vigueur, certaines contraintes pourraient être à l'origine des dysfonctionnements qui impacteraient non seulement les performances, mais aussi la durée de vie des transformateurs, avant de présenter les différentes contraintes auxquelles les transformateurs peuvent être soumis, les défauts et défaillances qui peuvent s'en suivre, donnons quelques définitions [6].

- Contrainte :** Une contrainte est une obligation à respecter qui valide le bon fonctionnement d'un dispositif, elle peut être évaluée par une valeur seuil à respecter.
- Défaut :** Un défaut est une modification accidentelle affectant un fonctionnement normal d'un dispositif, il peut s'observer par des symptômes qui sont des signes qui révèlent leur état (nature).

- c) **Défaillance** : Caractéristique d'un dispositif qui ne remplit plus avec l'efficacité prescrite, une partie ou la totalité de ses fonctions ou rôles, elle se matérialise donc par une rupture de service, conséquence d'un ou plusieurs défauts.

V.1 Les contraintes :

En fonctionnement normal ou lors d'un défaut, les transformateurs sont soumis à des contraintes électriques, mécaniques, thermiques et environnementales.

- **Contraintes électriques** : Les transformateurs doivent résister aux tensions de fonctionnement mais aussi aux tensions de chocs comme celles de la foudre ou des surtensions de manœuvres. Toute sa partie interne notamment l'isolation diélectrique est donc soumise à des champs électriques qui peuvent induire des défauts.
- **Contraintes thermiques** : Pendant l'exploitation du transformateur, des pertes internes provoquées par des courants de charges, qui augmentent sa température, sont enregistrées, les hautes températures provoquent l'accélération de la dégradation des matériaux isolants ;
- **Contraintes mécaniques** : On peut citer le transport d'un site à un autre, les tremblements de terre ou les défauts de court-circuit qui mettent à l'épreuve la structure du transformateur.
- **Contraintes environnementales** : Les conditions atmosphériques, la foudre, la poussière sont autant de situations qui peuvent altérer le bon fonctionnement du transformateur [7].

V.2 Les différents types de défauts

De manière générale, sont distingués sur un transformateur, des défauts externes et des défauts internes.

V.2.1 Défauts externes :

Les défauts externes peuvent se résumer dans les surcharges du réseau et les courts-circuits qui se produisent sur le terminal du transformateur ou les lignes alimentant les jeux de barres de poste GIS.

V.2.1.1 Court-circuit :

Le court-circuit peut se produire dans deux ou trois phases du système d'alimentation électrique, le niveau de courant de défaut est toujours suffisamment élevé, elle dépend de la tension qui a été court-circuitée et de l'impédance du circuit jusqu'au point de défaut, la perte de cuivre du transformateur d'alimentation en défaut est brusquement augmentée, cette perte croissante de cuivre provoque un échauffement interne dans le transformateur, un courant de défaut important produit également de fortes contraintes mécaniques dans le transformateur, les contraintes mécaniques maximales se produisent pendant le premier cycle du courant de défaut symétrique, la figure I.7 montre les types de court-circuit [8].

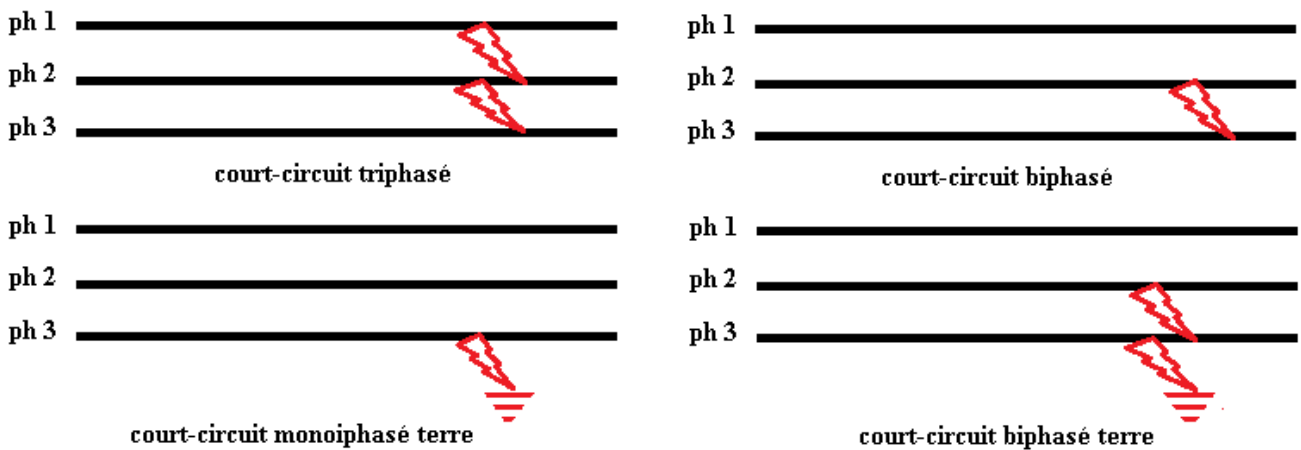


Figure.I.7 types de court-circuit.

V.2.1.2 Perturbation haute tension dans le transformateur de puissance

La perturbation à haute tension dans le transformateur de puissance est divisée en deux types,

- Surtension transitoire
- Fréquence d'alimentation surtension

a) Surtension transitoire : Une surtension haute tension et haute fréquence peut survenir dans le système d'alimentation en raison de l'une des causes suivantes,

- Masse d'arc si le point neutre est isolé.
- Opération de commutation de différents équipements électriques.
- Impulsion de foudre atmosphérique.

Quelles que soient les causes d'une surtension, il s'agit après tout d'une onde progressive ayant une forme d'onde haute et raide et ayant également une fréquence élevée, cette onde se propage dans le réseau du système d'alimentation électrique, en atteignant le transformateur de puissance, elle provoque une rupture de l'isolation entre les spires adjacentes à la borne de ligne, ce qui peut créer un court-circuit entre les spires [8].

b) Fréquence d'alimentation surtension : Il peut toujours y avoir un risque de surtension du système en raison d'une déconnexion soudaine d'une charge importante, bien que l'amplitude de cette tension soit supérieure à son niveau normal, la fréquence est la même que dans des conditions normales, une surtension dans le système provoque une augmentation de la contrainte sur l'isolation du transformateur. Comme nous le savons, la tension

$$v = 4.44\phi . f . T \Rightarrow va\phi \quad (\text{I.1})$$

Une tension accrue provoque une augmentation proportionnelle du flux de travail, cela provoque donc une augmentation de la perte de fer et une augmentation proportionnellement importante du courant magnétisant, le flux d'augmentation est détourné du noyau du transformateur vers d'autres parties

structurelles en acier du transformateur, les boulons à noyau qui transportent normalement peu de flux peuvent être soumis à une grande composante de flux détournée de la région saturée du noyau le long. Dans de telles conditions, le boulon peut être rapidement chauffé et détruire sa propre isolation ainsi que l'isolation de l'enroulement [8].

V.2.1.3 Sous effet de fréquence dans le transformateur de puissance

Comme, tension

$$v = 4,44\Phi \times f \times T \Rightarrow v \propto \Phi \quad (\text{I.2})$$

car le nombre de tours dans le bobinage est fixe.

Donc,

$$v \propto \Phi / f \quad (\text{I.3})$$

A partir de cette équation, il est clair que si la fréquence diminue dans un système, le flux dans le cœur augmente, les effets sont plus ou moins similaires à ceux de la surtension.

V.2.1.4 La surcharge :

La surcharge c'est l'augmentation de l'intensité de 1 à 10 dans le circuit due à un grand nombre de récepteurs, par exemple

Elle peut être due à une augmentation du nombre de charges alimentées simultanément ou à une augmentation de la puissance absorbée par une ou plusieurs charges. il en résulte une surintensité de longue durée qui entraîne une surchauffe préjudiciable à la résistance des isolateurs et à la longévité du transformateur.

V.2.2 Défauts internes dans le transformateur de puissance

Les défauts internes sont des défauts qui se produisent à l'intérieur du transformateur, en raison de la complexité de l'appareil, la confirmation visuelle de ce type de défaut reste complexe et peut provoquer l'explosion du transformateur



Figure.I.8 Explosion du transformateur de puissance centrale de la sous-station de central électrique[15]

V.2.2.1 Défauts de terre

1. Défauts dans un enroulement en étoile connecté avec un point neutre mis à la terre via une impédance
Dans ce cas, le courant de défaut dépend de la valeur de la résistance de mise à la terre et est également proportionnel à la distance du point de défaut au point neutre, car la tension au point dépend du nombre d'enroulements au neutre et du point de défaut. Si la distance entre le point de faille et le point neutre est plus grande, alors le nombre de tours sous cette distance est également plus grand. Par conséquent, la tension entre le point neutre et le point de défaut est élevée, ce qui entraîne un courant de défaut plus élevé.

2. Défauts dans un bobinage connecté en étoile avec un point neutre solidement mis à la terre

Dans ce cas, l'impédance de mise à la terre est idéalement nulle, le courant de défaut dépend de la réactance de fuite de la partie de l'enroulement qui rencontre le point défectueux et le point neutre du transformateur, le courant de défaut dépend également de la distance entre le point neutre et le point de défaut dans le transformateur, comme indiqué dans le cas précédent, la tension entre ces deux points dépend du nombre de tours d'enroulement rencontrés par un point et un point neutre défectueux, ainsi, dans un enroulement connecté en étoile avec le point neutre solidement mis à la terre, le courant de défaut dépend de deux facteurs principaux : premièrement, la réactance de fuite de l'enroulement rencontre un point et un point neutre défectueux, et ensuite la distance entre le point défectueux et le point neutre, mais la réactance de fuite de l'enroulement varie de manière complexe avec la position du défaut dans l'enroulement, on voit que la réactance décroît très rapidement pour le point de défaut s'approchant du neutre et que, par conséquent, le courant de défaut est le plus élevé pour le défaut près du neutre [8].

V2.2.2 Les fuites d'huile :

Le transformateur possède de nombreux joints en caoutchouc, typiquement en bas de cuve, à la base des bornes, aux raccords de la réfrigération, dans le temps, ces joints peuvent se dégrader, se durcir, et provoquer des fuites [7].



Figure I.9 Fuite d'huile de transformateur [7].

V.2.2.3 Défaut entre spires :

Transformateur de puissance connecté avec extra électrique système de transmission à haute tension, est très susceptible d'être soumis à une tension d'impulsion élevée et de forte amplitude, frontale et haute fréquence en raison d'une surtension fulgurante sur la ligne de transport. Les contraintes de tension entre les spires de l'enroulement deviennent si importantes qu'elles ne peuvent pas supporter la contrainte et provoquer une défaillance de l'isolation entre les spires en certains points, en outre, les enroulements BT sont sollicités en raison de la surtension transférée, un très grand nombre de défaillances du transformateur de puissance sont dues à un défaut entre les tours, un défaut entre les tours peut également se produire en raison d'efforts mécaniques entre les tours générés par un court-circuit externe [8].

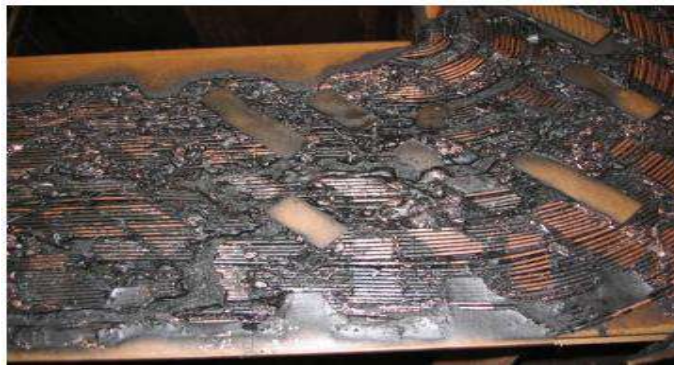


Figure I.10 Allumage entre spires, par court-circuit [14].

V.2.2.4 La dégradation de l'isolation :

En fonctionnement, l'isolation du transformateur est soumise aux contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales, le papier et l'huile interagissent pour produire des composés extractibles et utilisés dans le diagnostic des défauts, la figure I.11 ci-après illustre le mécanisme de dégradation interactive entre le papier et l'huile.

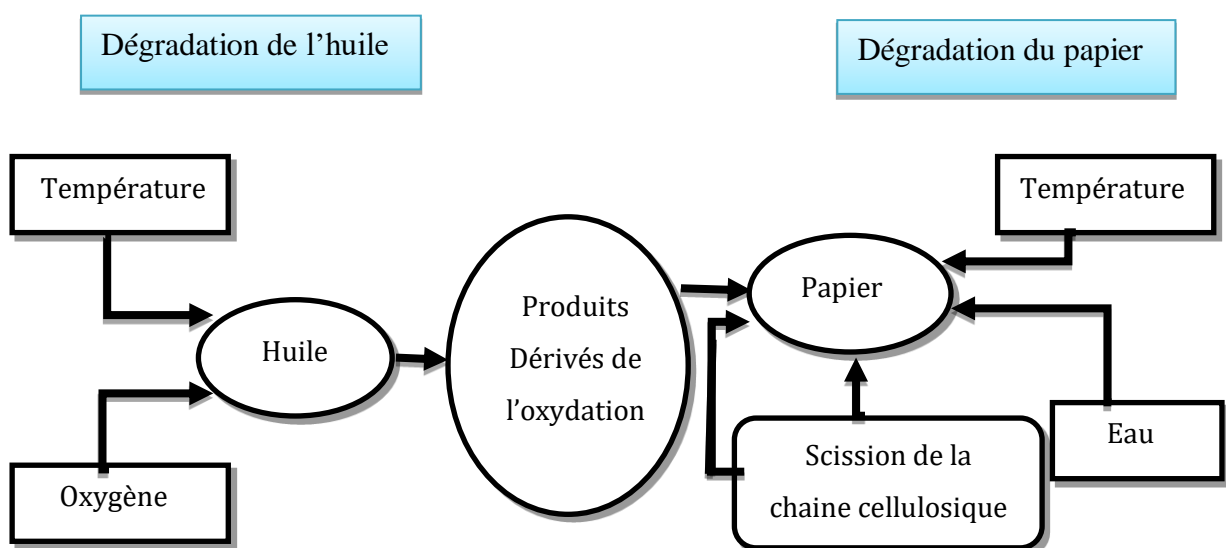


Figure I.11 Schéma du mécanisme de la dégradation huile/papier [7].

V.2.2.5 Défauts entre phases

Les défauts phase à phase dans le transformateur sont rares, si un tel défaut se produit, il en résultera un courant important pour le fonctionnement du relais de surintensité instantané côté primaire ainsi que du relais différentiel.

V.2.2.6 Défaut de base dans le transformateur de puissance

Dans n'importe quelle partie du noyau, la stratification est endommagée, ou la stratification du noyau est pontée par tout matériau conducteur qui provoque un courant de Foucault suffisant pour s'écouler, de sorte que cette partie du noyau devient surchauffée, parfois, l'isolation des boulons (utilisée pour serrer la stratification du noyau) échoue, ce qui permet également à un courant de Foucault suffisant de circuler à travers le boulon et de provoquer un échauffement excessif, cette défaillance de l'isolant dans le laminage et les boulons à noyaux provoque un échauffement local important, bien que ces échauffements locaux entraînent une perte de cœur supplémentaire, mais ne puissent créer aucune modification notable du courant d'entrée et de sortie dans le transformateur, ces défauts ne peuvent donc pas être détectés par le schéma de protection électrique normal, cela est souhaitable pour détecter la condition de surchauffe locale du noyau du transformateur avant que tout défaut majeur ne se produise, une surchauffe excessive entraîne la dégradation de l'huile isolante du transformateur avec dégagement de gaz, ces gaz s'accumulent dans le relais Buchholz et actionnent Buchholz alarme [8].



Figure I.12 Exemple de défaut de base endommagé dans un transformateur de puissance [5].

V.3 Les défaillances du transformateur et leurs causes

La défaillance d'un transformateur peut être considérée comme un événement non désiré qui se produit, entraînant ainsi la rupture de service d'une ou de plusieurs fonctions du transformateur, c'est donc, d'après la référence [9], la fin de la capacité d'un transformateur à exécuter sa fonction spécifiée, dans

l'étude de la fiabilité du transformateur de puissance, il est souvent difficile de distinguer les défaillances majeures et mineures, par conséquent, les termes suivants sont donnés

- Défaillance avec arrêt forcé.
- Défaillance avec arrêt programmé et défaut.

V.3.1 Défaillance avec arrêt forcé : C'est la défaillance d'un transformateur qui nécessite un retrait immédiat du service, ceci est réalisé soit automatiquement, soit dès que les opérations de commutation peuvent être effectuées.

V.3.2 Défaillance avec arrêt programmé : C'est la défaillance pour lequel un transformateur a été délibérément mis hors service à un moment choisi par l'action de l'opérateur.

Analyse de la défaillance : C'est un examen logique et systématique d'un élément ou de son diagramme pour identifier et analyser la probabilité, les causes et les conséquences d'une défaillance potentielle et réelle.

Cause de défaillance : Ce sont les circonstances pendant la conception, la fabrication ou l'utilisation qui ont entraîné une défaillance.

Mode de défaillance : C'est la manière dont la défaillance se produit. Les modes de défaillance généralement classés comme électriques, mécaniques, thermiques ou par contamination

Le transformateur étant un système complexe, constitué d'un ensemble de composantes ; la défaillance de certaines composantes va entraîner celle du transformateur. Soumis à des contraintes d'exploitation, les défaillances pouvant survenir sont multiples. Plusieurs études ont été faites sur la fiabilité du transformateur [10], [11].

VI. Système d'isolation dans les transformateurs de puissance

Le système d'isolation de transformateur de puissance se compose essentiellement d'une huile hydrocarbonée (huile végétale, huile ester synthétique, huile silicone) et d'un isolant solide (cellulose (papier) vernis ou polyester).

VI.1 L'huile

L'huile est un composant important des transformateurs de puissance, dans les transformateurs immergés, l'huile joue deux rôles :

- **Isolation électrique** : elle se comporte comme un diélectrique entre les parties actives et non actives, dans ce cas, elle est soumise à des contraintes de tenue diélectrique de nature électrique et thermique.
- **Refroidissement** : Le refroidissement s'effectue à travers la circulation de l'huile en circuit fermé, des parties actives (enroulements) vers une source de refroidissement à laquelle elle transfère des calories ; ce qui lui procure un caractère caloporteur, l'huile majoritairement

utilisée dans les transformateurs de puissance est l'huile minérale issue du pétrole, on rencontre aussi de plus en plus de l'huile végétale (transformateur Végéta).

Les caractéristiques de l'huile qui doivent rigoureusement être observées pour qu'elle joue ses deux rôles sont :

- ✓ Conductibilité thermique (élevée) ;
- ✓ Chaleur massique (élevée) ;
- ✓ Viscosité faible et bas point d'écoulement pour assurer sa circulation ;
- ✓ Tenue diélectrique (rigidité électrique élevée) ;
- ✓ Stabilité dans le temps (oxydation, décomposition) ;
- ✓ Point éclair ou point d'inflammabilité élevée.

La connaissance de ces caractéristiques permet d'identifier certains défauts du transformateur, qui laissent des traces dans l'huile, l'huile se comporte alors dans une certaine mesure comme la mémoire du fonctionnement du transformateur, à cet effet, l'huile joue un autre rôle, celui d'outil de diagnostic. L'huile permet également de protéger l'isolation solide du transformateur, elle remplit les pores du papier mais aussi les vacuoles d'air (cause des décharges partielles) qui sont inévitablement présentes dans et entre les couches de papier enroulé sur les fils de cuivre, elles augmentent ainsi la rigidité électrique du papier [7].

VI.2 Le papier

Le papier possède des caractéristiques diélectriques excellentes, il a de bonnes caractéristiques mécaniques et électriques dues à la longueur et à la diversité des fibres qui le composent.

Utilisé dans les zones où règne un fort champ électrique pour renforcer l'isolation de l'huile, le papier a typiquement une constante diélectrique deux fois plus élevée que celle de l'huile

Dans le transformateur, il intervient seul ou combiné dans l'isolation de la manière suivante :

- ✓ Papier seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plot de commutation par exemple) ;
- ✓ Couche solide (papier ou carton), par exemple dans le cas de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement ;
- ✓ Isolation mixte (combinaison de lames de diélectriques liquides et de barrière d'isolant solide), pour assurer l'isolation entre deux enroulements concentriques de tension différente [7].

VII. Refroidissement

Dans les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, le refroidissement s'effectue via cette huile circulant en circuit fermé de la partie active, siège des pertes, vers une source froide à laquelle il abandonne des calories [5].

Celle-ci peut être :

- Directement la surface de la cuve pour les petites puissances.
- Des aéroréfrigérants (Figure I.13) qui sont constitués de nombreux tubes à ailettes ventilés.
- Des radiateurs (Figure I.14) permettant un échange par convection naturelle avec l'air ambiant.
- Des hydro réfrigérants forçant un échange avec un circuit d'eau séparé.



Figure I.13 Aéroréfrigérant [5].



Figure I.14 Radiateurs sur un transformateur [5].

Les Tableaux (I.2-I.3 et I.4) ci-dessous présentent la nature du vecteur de refroidissement et la nature de la circulation du diélectrique et les différents types de réfrigération, accompagnés des symboles internationaux applicables :

Tableau I.2 Nature du vecteur de refroidissement.

Nature du vecteur de refroidissement	symbole
Huile minérale	O
Eau	W
Air	A

Tableau I.3 Nature de la circulation du diélectrique.

Nature de la circulation du diélectrique	symbole
Naturelle	N
Forcée	F
Forcée et dirigée dans les enroulements	D

Tableau I.4 Type de refroidissements.

Type de refroidissements le plus courants	Symbole
Transformateurs à circulation naturelle d'huile et d'air	O.N.A.N
Transformateurs à circulation naturelle d'huile et ventilation forcée d'air	O.N.A.F
Transformateurs à circulation forcée d'huile et d'air	O.F.A.F
Transformateurs à circulation forcée d'air et circulation dirigée d'huile	O.D.A.F
Transformateurs à circulation forcée d'huile d'eau	O.F.W.F
Transformateurs à circulation forcée d'eau et circulation dirigée d'huile	O.D.W.F
Transformateurs secs à refroidissement naturel dans l'air	A.N
Transformateurs secs à ventilation forcée d'air	A.F

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué des informations générales sur les transformateurs électriques et leurs différents types, nous avons également discuté de divers défauts qui réduisent l'efficacité des transformateurs de puissance, ensuite, nous avons présentés la défaillance des transformateurs et leurs causes. Enfin, nous avons également abordé le système d'isolation et de refroidissement des transformateurs de puissance.



Chapitre II

**Philosophie de la protection
différentielle**



I. Introduction:

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructure permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs, le transformateur de puissance est utilisé pour réduire les pertes générées dans les lignes, il existe des défauts qui causent le dysfonctionnement du transformateur, donc il en résulte des conséquences défavorables.

Dans ce chapitre, nous étudierons la protection différentielle des transformateurs des puissances, comment les modéliser au sein de l'installation électrique, et comment étudier leurs évolutions lors de défauts électriques de natures diverses.

II. Système de protection:

II.1 Définition et rôle de la protection :

Le système de protection électrique désigne l'ensemble des appareils de surveillance et de protection assurant la stabilité d'un réseau électrique, ces systèmes de protection permettent d'éviter les conséquences des incidents qui peuvent être dangereux pour les personnes et pour le matériel, pour cela, ils doivent :

- Assurer la protection des personnes contre tout danger électrique.
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles est soumise matériel [12].

II.2 Constitution d'un système de protection :

Le système de protection se compose d'une chaîne constituée des éléments suivants :

- Capteurs de mesure de courant et de tension fournissant les informations de mesure nécessaire à la détection des défauts.
- Relais de protection, chargé de la surveillance permanente de l'État électrique du réseau, jusqu'à l'élaboration des ordres d'élimination des parties défectueuses et leur commande par le circuit de déclenchement.
- Organes de coupure dans leur fonction d'élimination de défaut : disjoncteurs, interrupteurs, fusibles [12].

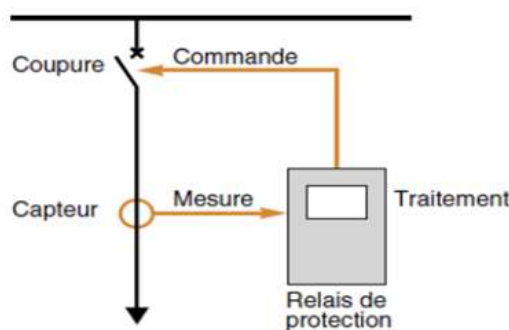


Figure II.1 Chaîne de protection [12].

II.3 Qualités principales d'un système de protection :

Pour qu'un système de protection accomplisse convenablement sa mission, il doit présenter les qualités suivantes :

- **Rapidité** : pour éviter l'augmentation de la zone perturbée.
- **Sensibilité** : doit détecter la moindre variation des paramètres de l'élément surveillé.
- **Fiabilité** : un système de protection doit être précis dans ces décisions.
- **Sélectivité** : isoler seulement l'élément en défaut [12].

III. Les différents types de la protection d'un transformateur de puissance :

Tout transformateur est équipés de capteurs et d'un appareillage permettant de détecter tout défaut grave et de protéger contre les conséquences éventuelles qui peuvent survenir, ces capteurs provoquent une signalisation et commandent le disjoncteur amont.

- Le relais Buchholz.
- Capteur de défaut ventilation.
- Capteur de niveau d'huile bas.
- Soupape de surpression.
- Temps de passage trop long au niveau des gradins du changeur de prise.
- Détection du défaut de fonctionnement du moteur de commande.
- Les capteurs de température.

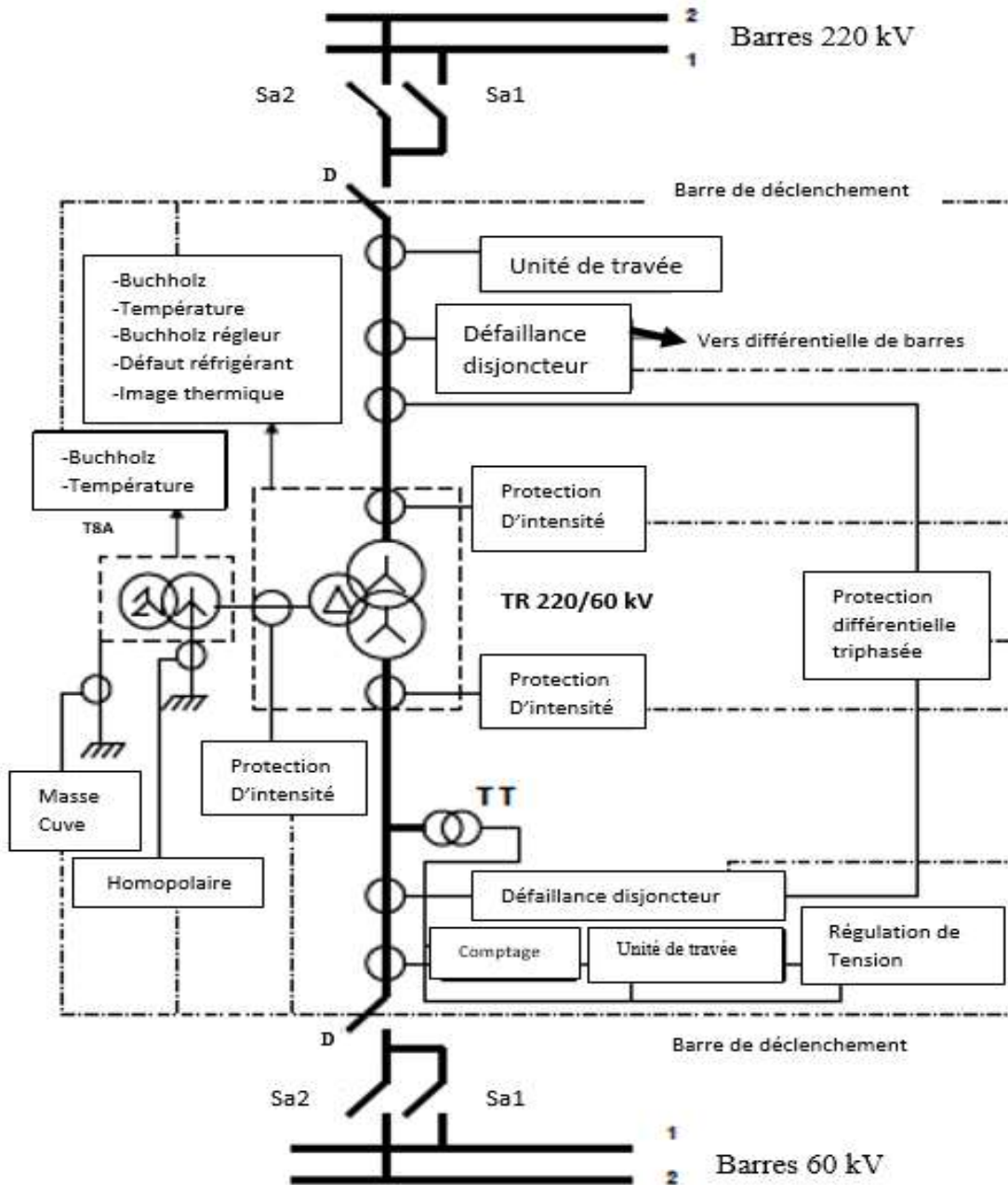


Figure II.2 Schéma bloc de travée transformateur 220/60 Kv.

III.1 Protections contre les défauts internes :

III.1.1 Protection par relais du BUCHOLZ :

Dans le domaine de la distribution et de la transmission l'électricité, un relais Buchholz est un dispositif de sécurité monté sur les transformateurs et inductances de puissance à bain d'huile, le relais Buchholz est utilisé sur ce type de systèmes comme dispositif de protection sensible aux événements qui se produisent lors d'un défaut diélectrique (défaut d'isolement) à l'intérieur de l'équipement, il protège le transformateur des défauts internes, placé entre le principal réservoir et le conservateur.

Quand un arc électrique ou une surchauffe se développe à l'intérieur des enroulements, il y a dégagement de gaz par vaporisation de l'huile, ce phénomène précède un changement dans les valeurs électriques, courant ou tension, de l'appareil, un relais Buchholz réagit à ce dégagement de gaz et protège ainsi le transformateur de potentiels dégâts

Le relais Buchholz (Figure II.3) est installé sur tous les transformateurs de puissance immergés dans l'huile entre le haut de la cuve et le conservateur, tout accident interne important se traduit par :

- Un dégagement de gaz, qui fait descendre un flotteur et active une alarme (1er stade).
- Un mouvement d'huile important en partie supérieure de la cuve, où se place le relais, qui fait basculer un flotteur et provoque le déclenchement du transformateur (2ème stade) [5].

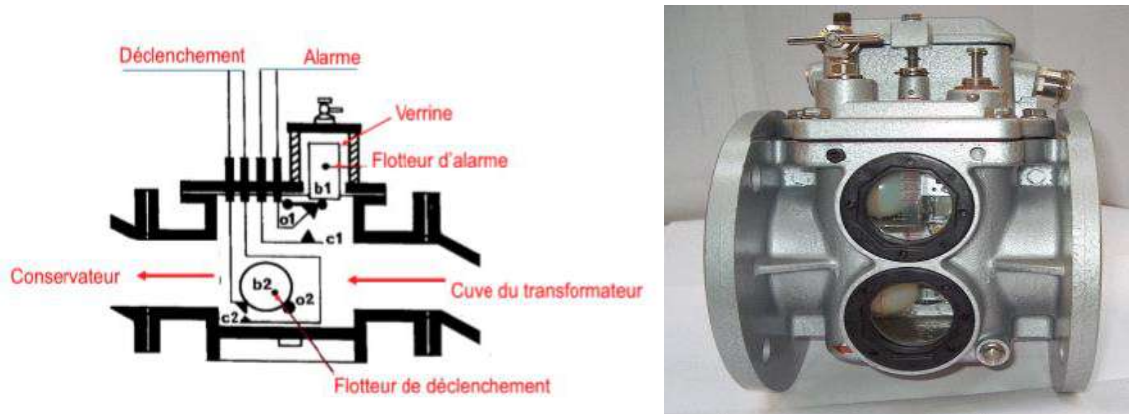


Figure II.3 Relais Buchholz [5].

Le relais Buchholz peut être équipé des capteurs suivants :

- Capteur de volume de gaz – série NM.
- Capteur de température.
- Capteur d'humidité et de température.

Ces capteurs assurent la surveillance permanente de la formation de gaz, de la teneur en humidité de l'huile et de la température. Ceci permet de détecter des défauts dans les transformateurs.

III.1.2 Protection masse cuve:

Une protection rapide, détectant les défauts internes au transformateur, est constituée par le relais de détection de défaut à la masse de cuve (Figure II.4), pour se faire, la cuve du transformateur, ses accessoires, ainsi que ses circuits auxiliaires doivent être isolés du sol par des joints isolants, la mise à la terre de la cuve principale du transformateur est réalisée par une seule connexion courte qui passe à l'intérieur d'un TC tore qui permet d'effectuer la mesure du courant s'écoulant à la terre.

Tout défaut entre la partie active et la cuve du transformateur est ainsi détecté par un relais de courant alimenté par ce TC, ce relais envoie un ordre de déclenchement instantané aux disjoncteurs primaires et secondaires du transformateur [13].

Lors du contrôle de l'isolement de la cuve de terre, l'intervenant doit avoir un régime de réquisition, le transformateur doit être balisé afin qu'aucun personnel ne touche la cuve de celui-ci.

La protection masse cuve protège les transformateurs contre les défauts :

- entre l'enroulement HT (coté réseau) et la cuve du transformateur,
- le contournement ou le claquage d'une borne, etc.

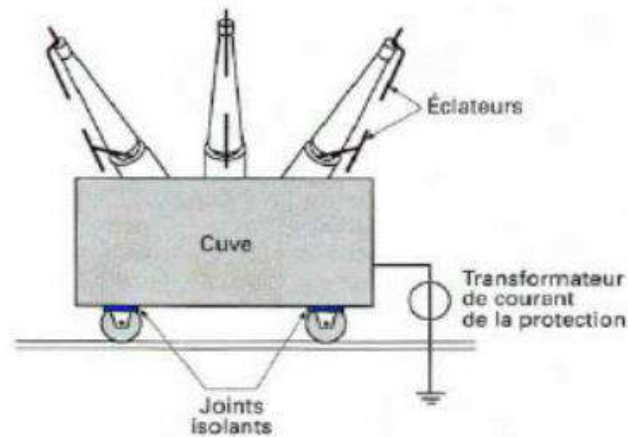


Figure II.4 Protection de masse cuve [13].

III.1.3 La protection thermique :

Elle est utilisée pour protéger les transformateurs de puissance contre les surcharges, pour détecter l'existence d'une surcharge, elle fait une estimation de l'échauffement des bobines primaire et secondaire à protéger à partir de la mesure du courant [14].



Figure II.5 Manomètre [14].

III.1.4 Protection par indicateur de température Huile :

A l'aide d'une sonde immerger dans la cuve pour détecter la température d'huile du transformateur est connecté à un indicateur cet indicateur (Figure II.6) équipé de deux contacte réglable un pour l'alarme est l'autre pour le déclenchement [15].

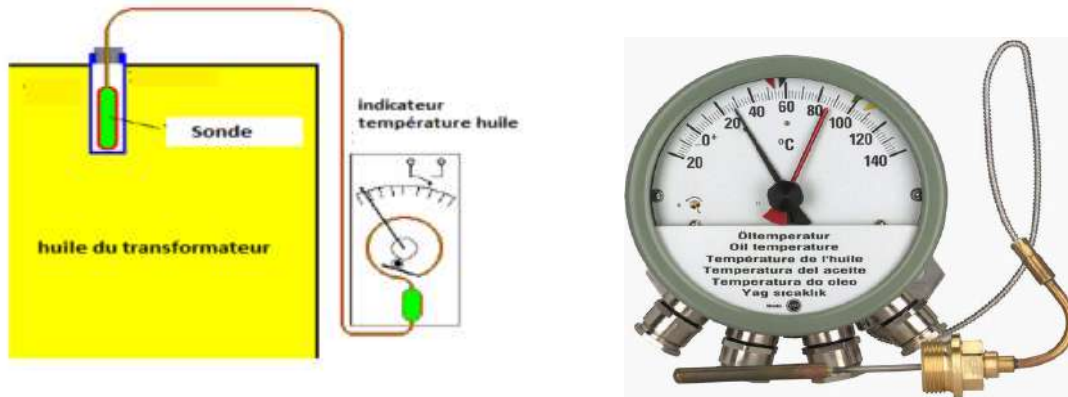


Figure II.6 Principe de fonctionnement d'indicateur de température d'huile [15].

III.1.5 Protection par indicateur de température Enroulement (image thermique) :

Le principe de cette protection c'est le même que la protection par température huile seulement La sonde thermométrique de cette protection provoquée par une résistance chauffante placée autour de cette sonde est alimentée par un courant proportionnel à la charge du transformateur (Figure II.7), ce courant est fourni par un transformateur de courant Buching (TC TOR) placé sur la traversée de la phase 4 l'enroulement dont on veut mesurer la température, l'indicateur est doté par quatre contacts deux contacts pour l'alarme et déclenchent les deux autre contacts pour démarrer le système de refroidissement (les ventilateurs ou les pompe selon le type de refroidissement) [15].

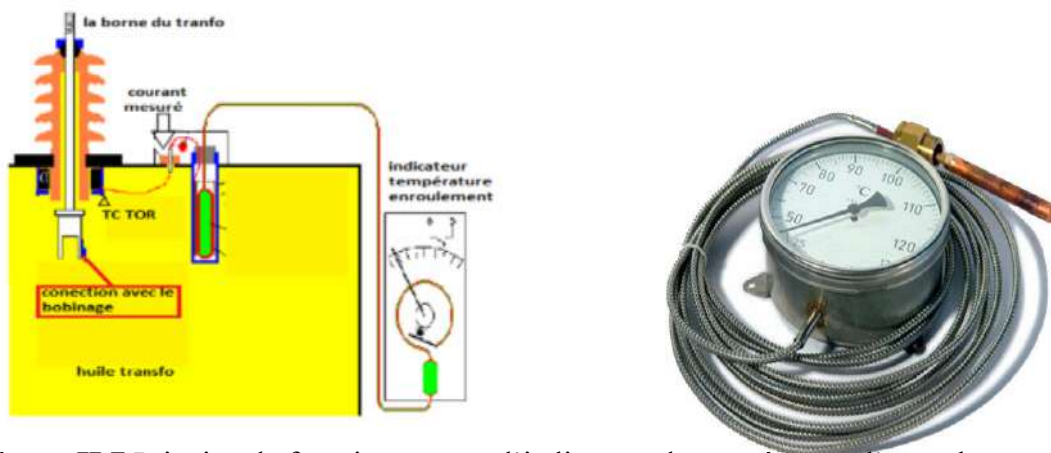


Figure II.7 Principe de fonctionnement d'indicateur de température d'enroulement [15].

III.2 Protections contre les défauts externes :

III.2.1 Protection des surtensions :

La protection contre les surtensions a pour but de maintenir la continuité du service et réduire à un niveau acceptable les risques que courent les individus ainsi le matériel. Pour cela on utilise des protections comme les parafoudres, éclateurs ...etc [17].

a. Eclateur : est un dispositif simple constitué de deux électrodes dans l'air. La limitation de tension aux bornes est effectuée par l'amorçage d'intervalle d'air.

b. Parafoudre : permettent de se débarrasser de ce comportement néfaste car ils présentent un comportement réversible. Ce sont des résistances fortement non-linéaires qui présentent une diminution importante de leur résistance interne au-dessus d'une certaine valeur de tension aux bornes.

III.2.2 Protection à maximum de courante phase :

Le transformateur HTB/HTA sera en général protégé par deux protections à maximum de courant, Protection coté haute tension (HTB) et Protection coté moyenne tension (HTA) [13].

a. Protection à maximum de courant coté HTB :

C'est une protection contre les surcharges du transformateur et constitue, dans les limites de son réglage, une réserve aux protections maximum de courant coté HTA, un seuil d'intervention à temps constant, et devra être réglée comme suit :

$$I_{réglage} = 2I_{n1} \quad (\text{II.1})$$

avec :

$$\text{temps} = 2,5\text{sec}$$

I_{n1} : est le courant nominal du transformateur côté HT. [13]

b. Protection à maximum de courant coté HTA :

C'est une protection contre les surcharges du transformateur et constitue, dans les limites de son réglage, une réserve aux protections de ligne MT. Elle sera à un seuil d'intervention à temps constant, et devra être réglée comme suit :

$$I_{réglage} = (1,3 - 1,4)I_{n2} \quad (\text{II.2})$$

avec :

$$\text{temps} = 2,0\text{sec}$$

I_{n2} : est le courant nominal du transformateur côté MT.

-Le choix du temps d'intervention est déterminé aussi bien par l'impératif d'assurer la sélectivité avec la protection de la ligne MT que par la nécessité de permettre la surcharge du transformateur durant de courts laps de temps, suffisants à l'accomplissement des transferts de charge. [13]

III.2. 3 Protection neutre MT :

Ce relais est prévu pour assurer la protection de la liaison reliant les bornes du transformateur et les barres MT contre les défauts à la terre. Il réalise aussi le secours du seuil homopolaire des protections des départs MT. Le réglage de cette protection est choisi inférieur au courant de réglage homopolaire du départ MT le plus bas réglé :

$$I_r = 0.95 \times IRH \quad (\text{II.3})$$

Avec : $T = TMT + \Delta T$

- ✓ IRH : le courant du départ le plus bas réglé.
- ✓ TMT : Temporisation la plus élevée sur les départs MT.

L'action de cette protection est instantanée. Son seuil de fonctionnement est choisi égal à 5 % du courant de défaut monophasé au primaire du transformateur (coté HT). [16]

$$I_r = 0.05 \times I_{CCMONO} \quad (\text{II.4})$$

avec : $T = 0 \text{ Sec}$.

III.2.4 Protection terre résistante:

Cette protection est assurée par un relais de courant monophasé à temps constant inséré dans le circuit de neutre du transformateur. Elle protège les départs aériens de moyenne tension contre les défauts à la terre très résistants. Sa gamme de réglage est choisie de telle façon à pouvoir régler l'image d'un courant de 5A vu au primaire des TC. [16]

Le fonctionnement de la protection (après 5 Sec) informe l'exploitant pour procéder à la recherche du départ en défaut en déclenchant manuellement, un à un, les départs MT.

$$I_{R,HT} = 5 \text{ A} \quad T = 5 \text{ Sec}$$

La relation qui donne le courant de court-circuit monophasé à la terre est :

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times U}{2 \times Z_d \times Z_h + 3 \times (R_n + R_{def})} \quad (\text{II.5})$$

avec :

U : La tension du réseau.

Z_d, Z_h : Respectivement les impédances directe et homopolaire.

R_n : Résistance de mise à la terre du neutre MT du transformateur.

R_{def} : Résistance de défaut

III.2.5 Protection différentielle :

La protection différentielle est obtenue par la comparaison de la somme des courants primaires à la somme des courants secondaires. L'écart de ces courants ne doit pas dépasser une valeur I_0 pendant un temps supérieur à T_0 , au-delà il y a déclenchement.

Une protection différentielle est une protection électrique qui consiste à comparer le courant entrant et le courant sortant d'un appareil. Si les deux sont différents, la protection conclut à une fuite à l'intérieur de l'appareil et commande son retrait du réseau électrique, on parle de « déclenchement ». La protection différentielle est une protection très répandue. Elle sert à protéger en particulier les jeux de barres, les générateurs et les transformateurs.

Cette protection s'utilise :

- Pour détecter des courants de défaut inférieurs au courant nominal,

- Pour déclencher instantanément puisque la sélectivité est basée sur la détection et non sur la temporisation. [14]

III.2.5.1 Principe de fonctionnement de (Relais différentiels F87T) :

La particularité de la protection différentielle dans le transformateur c'est qu'elle doit s'adapter aux conditions de fonctionnement, ou le courant primaire est différent du secondaire et le déphasage entre les phases qui est dû aux types de couplages, ces deux facteurs importants sont pris en considération et le relais est adapté à ces deux conditions de fonctionnement en effectuant le réglage approprié.

Le relais ne peut pas mesurer les courants réels traversant le transformateur, on utilise deux transformateurs de courant pour donner une image parfaite et réduite des courants primaires et secondaires, étant donné que le courant primaire est supérieure à celui au secondaire, la différence des courants à l'état normale, n'est plus nulle (ΔI), pour résoudre cette contrainte, des transformateur de courant à rapport différent sont utilisés.

Cela maintient le courant mesuré (courant différentielle) proche du zéro en fonctionnement normal, par contre lors d'un défaut entre les TC, ou la présence d'un déséquilibre du courant, les deux courants seront différents « courant différentiel », l'élément différentiel calcul cette différence est la compare avec les conditions de fonctionnement programmées afin de provoquer un déclenchement,

Le fonctionnement de la protection différentielle du transformateur doit faire face aux différentes contraintes durant le fonctionnement normal du système, ou on doit éviter toute déclenchement intempestif de l'élément, les contraintes en question sont :

- Courant d'enclenchement.
- Saturation transitoire de noyau.
- Mode de couplage de transformateur.
- Rapport de transformation différent.
- Inexactitude inhérente au TC. [5]

III.2.5.2 Schéma de protection différentielle conventionnel :

Ce schéma est basé sur le principe que la puissance d'entrée du transformateur de puissance sous conditions normales est égale à la puissance de sortie. Dans des conditions normales, aucun courant ne circulera dans la bobine de courant du relais différentiel. Chaque fois qu'un défaut se produit, à l'intérieur de la zone protégée, l'équilibre actuel n'existera plus et les contacts de relais se fermeront et émettront un signal de déclenchement pour faire fonctionner certains disjoncteurs (CB) afin de déconnecter l'équipement/pièce. [18]

Les valeurs nominales des transformateurs de courant sont sélectionnées avec soin pour correspondre à la puissance les courants nominaux des transformateurs auxquels ils sont connectés ainsi que le côté secondaire des TC les courants sont égaux. Cependant, le problème est que les ratios TC disponibles sur

le marché ont cotes standards. Ils ne sont pas disponibles exactement comme les notes souhaitées. Par conséquent, les valeurs nominales primaires des TC sont généralement limitées à celles des TC à rapport standard disponibles.

Généralement, le côté primaire du transformateur de courant n'a qu'un seul tour (1) et le côté secondaire à de nombreuses spires en fonction du rapport de transformation (N) du TC, ce qui est sélectionné pour correspondre aux valeurs nominales du transformateur de puissance. Étant donné que le rapport de transformation de transformateurs est le rapport entre le nombre de tours du côté primaire et le nombre des virages du côté secondaire. Par conséquent, le rapport de transformation du transformateur de courant primaire est $\frac{1}{N_1}$ et le rapport de transformation du transformateur de courant côté secondaire est $\frac{1}{N_2}$.

Le secondaire le courant du TC situé du côté primaire du transformateur de puissance est

$$I_1 = \frac{I_P}{N_1} \quad (\text{II.6})$$

Avec

I_P : Le courant côté primaire du transformateur de puissance,

I_1 : Le courant côté primaire de TC_1

N_1 : Le nombre de spires du côté primaire de TC_1

De la même manière pour le TC situé au secondaire du transformateur de puissance, le

Le courant secondaire du TC est :

$$I_2 = \frac{I_S}{N_2} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

I_S : Courant côté secondaire du transformateur de puissance,

I_2 : Courant côté secondaire de TC_2 .

N_2 : Nombre de spires côté secondaire de TC_2 .

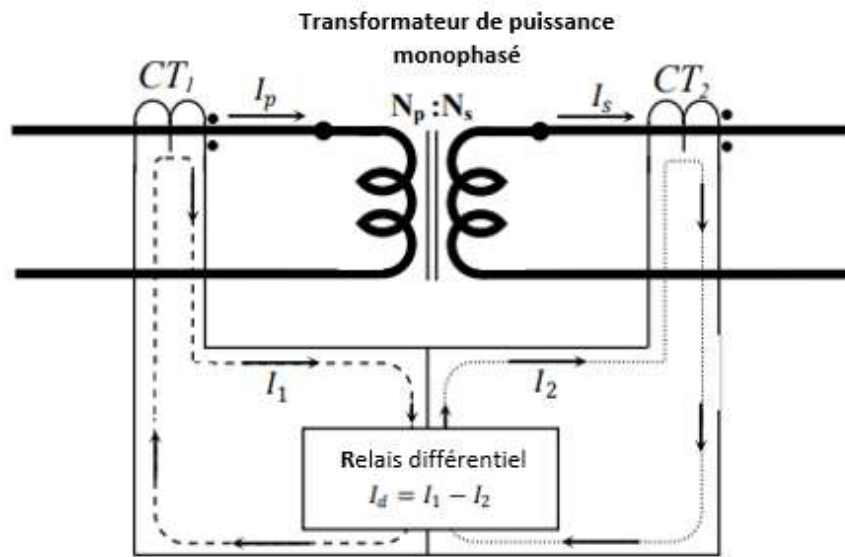


Figure II.8 Protection différentielle pour un transformateur de puissance [18].

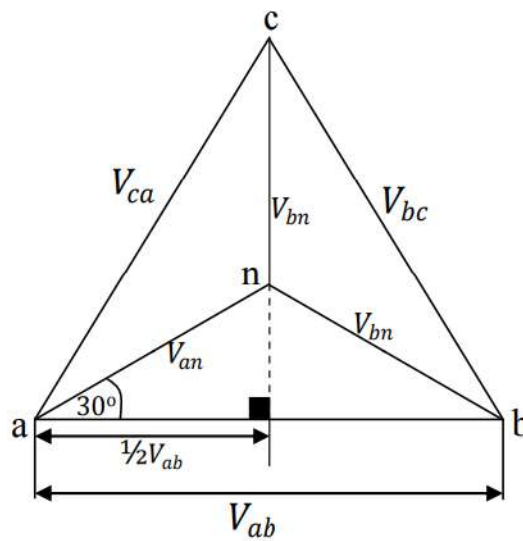


Figure II.9 La relation entre la tension phase à phase et la tension phase à neutre et le déphasage entre eux dans les transformateurs connectés Y-D ou D-Y [18].

$$\frac{V_{ab}}{2} = V_{an} \cos 30^\circ \tag{II.8}$$

$$\frac{V_{ab}}{2} = V_{an} \frac{\sqrt{3}}{2} \tag{II.9}$$

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} \tag{II.10}$$

III.2.6 Les difficultés de protection différentielle :

Généralement, trois difficultés principales handicapent la protection différentielle classique. Ils incitent le relais différentiel à déclencher un faux signal de déclenchement sans qu'il n'existe de défaut. Ces complications doivent être surmontées pour que le relais différentiel fonctionne correctement:

- Courant d'appel magnétisant lors de la mise sous tension initiale,
- Inadéquation et saturation des TC,
- Le rapport de transformation change en raison du changeur de prises [18].

a. Courant d'appel magnétisant :

Ce phénomène, l'appel magnétisant transitoire ou le courant d'excitation, se produit du côté primaire du transformateur chaque fois que le transformateur est allumé (alimenté) et que la valeur instantanée de la tension n'est pas à 90° , à ce moment, le premier pic du l'onde de flux est supérieure au pic du flux à l'état d'équilibre, ce courant apparaît comme un défaut interne et il est détecté comme un courant différentiel par le relais différentiel, la valeur du premier pic du courant magnétisant peut atteindre plusieurs fois le pic du courant à pleine charge, l'amplitude et la durée du courant d'appel magnétisant sont influencées par de nombreux facteurs, certains de ces facteurs sont :

- La valeur instantanée de la forme d'onde de tension au moment de la fermeture du disjoncteur,
- La valeur du flux magnétisant résiduel (rémanent),
- Le signe du flux magnétisant résiduel,
- Le type de tôles de fer utilisées dans le noyau du transformateur,
- La densité de flux de saturation du noyau du transformateur,
- L'impédance totale du circuit d'alimentation,
- La taille physique du transformateur,
- La capacité maximale de transport de flux des tôles à noyau de fer,
- Le niveau de tension d'alimentation d'entrée,

L'effet du courant d'appel sur le relais différentiel est un faux déclenchement du transformateur sans aucun type de défaut existant, à partir du principe de fonctionnement du relais différentiel, le relais compare les courants provenant des deux côtés du transformateur de puissance comme expliqué ci-dessus, cependant, le courant d'appel ne circule que du côté primaire du transformateur de puissance. Ainsi, le courant différentiel aura une valeur significative en raison de l'existence de courant d'un seul côté, par conséquent, le relais doit être conçu pour reconnaître que ce courant est un phénomène normal et pour ne pas se déclencher à cause de ce courant [18].

b. Faux déclenchement dû aux caractéristiques TC

Les performances des relais différentiels dépendent de la précision des TC à reproduire leurs courants primaires dans leur côté secondaire, dans de nombreux cas, les principales caractéristiques nominales des

TC, situés sur les côtés haute tension et basse tension du transformateur de puissance, ne correspondent pas exactement aux courants nominaux du transformateur de puissance, en raison de cet écart, une discordance des TC se produit, ce qui crée à son tour un petit courant différentiel faux, en fonction de la quantité de cette discordance. Parfois, cette quantité de courant différentiel est suffisante pour faire fonctionner le relais différentiel, par conséquent, une correction du rapport des TC doit être effectuée pour surmonter cette inadéquation des TC en utilisant des TC interposés de prises multiples.

Un autre problème auquel peut se heurter le parfait fonctionnement des TC est le problème de saturation, lorsque la saturation se produit sur un ou tous les TC à différents niveaux, un faux courant différentiel apparaît dans le relais différentiel, ce courant différentiel pourrait provoquer un dysfonctionnement du relais différentiel, la composante continue du courant côté primaire pourrait produire le pire cas de saturation du TC, dans lequel, le courant secondaire contient un décalage continu et des harmoniques supplémentaires [18].

c. Faux déclenchement dû au changeur de prises :

Le changeur de prise en charge (OLTC) (On-Load Tap-Changer) est installé sur le transformateur de puissance pour contrôler automatiquement la tension de sortie du transformateur, cet appareil est nécessaire partout où il y a de fortes fluctuations de la tension du réseau électrique, le rapport de transformation des TC peut être adapté à un seul point de la plage de changement de prise, par conséquent, si l'OLTC est modifié, le courant de déséquilibre circule dans la bobine de fonctionnement du relais différentiel. Cette action provoque des discordances de TC, ce courant sera considéré comme un courant de défaut qui oblige le relais à déclencher un signal de déclenchement

IV. Relais différentiel en pourcentage :

IV.1 Définition :

Le relais différentiel en pourcentage est défini comme le relais qui fonctionne sur la différence de phase de deux quantités électriques similaires ou plus. C'est la forme avancée du relais de protection différentielle. La seule différence entre eux est la bobine de retenue. Le relais différentiel en pourcentage consiste en une bobine de retenue destinée à résoudre les problèmes liés aux différences de rapport de courant pour la valeur élevée d'un courant de court-circuit externe.

Le système de différentiel en pourcentage consiste en une bobine de retenue connectée au fil pilote comme indiqué dans la figure ci-dessous et le courant induit dans les deux TC le traverse. La bobine de commande se situe entre le point médian de la bobine de retenue [19].

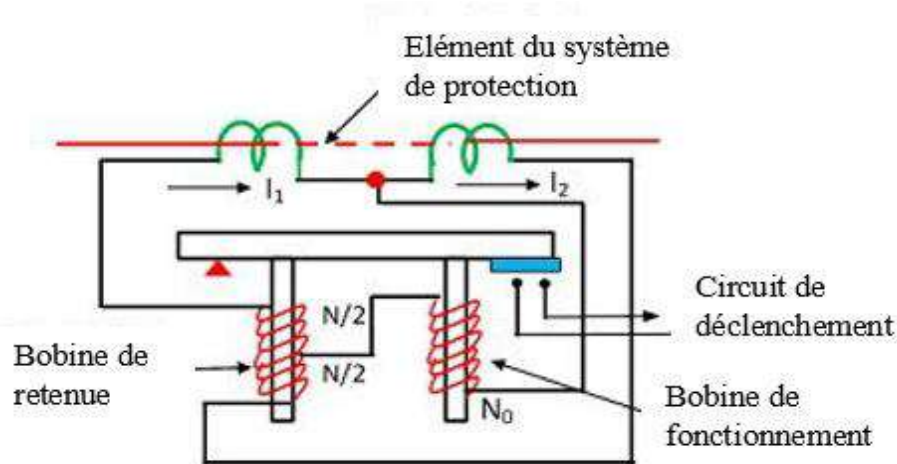


Figure II.10 Relais différentiel en pourcentage [19].

La bobine de retenue contrôle la sensible caractéristique du relais. Il limite les déclenchements indésirables du transformateur dus au courant de déséquilibre. La bobine de retenue limite également les harmoniques dans le courant d'appel.

IV.2 Fonctionnement du relais différentiel en pourcentage :

Le couple dû à la bobine de retenue empêche la fermeture du circuit de déclenchement alors que le couple dû à la bobine de commande tend à fermer les contacts du circuit de déclenchement. Dans des conditions de fonctionnement normales et dans des conditions de charge, le couple développé par la bobine de retenue est supérieur au couple de la bobine de travail. Ainsi, le relais reste inopérant.

En cas de défaillance interne, le fonctionnement le couple dépasse le couple de retenue, les contacts du circuit de déclenchement sont fermés pour ouvrir le disjoncteur.

Le couple de retenue peut être ajusté en faisant varier le nombre de tours de la bobine de retenue. [19]

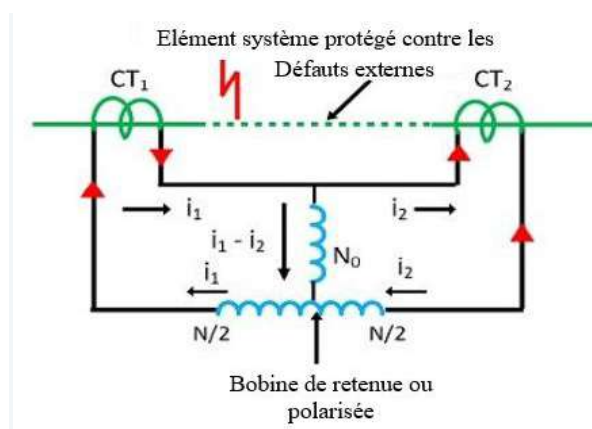


Figure II.11 Relais différentiel biaisé ou en pourcentage [19].

Le courant différentiel nécessaire pour utiliser ce relais est une quantité variable, due à l'effet de la bobine de retenue. Le courant différentiel dans la bobine en fonctionnement est proportionnel à $(I_1 - JE_2)$, et la bobine de retenue est proportionnelle à $(I_1 - JE_2)/2$ car le courant de fonctionnement est connecté au point milieu de la bobine de retenue. Pour les défauts externes, à la fois j_1 et moi_2 augmenter et donc augmenter le couple de retenue, ce qui empêche le mauvais fonctionnement.

V. Relais différentiel numérique :

Des dizaines d'algorithmes numériques ont été développés et utilisés en utilisant la puissance de calcul d'un ordinateur. La meilleure façon de juger de la supériorité d'un algorithme est sa précision et sa rapidité. Selon la norme IEEE, la protection du transformateur doit être effectuée dans les 100 millisecondes. Dans le scénario de nombreux algorithmes disponibles ayant une vitesse de fonctionnement de 10 fois, le DDP a une vitesse comprise entre 1 et 15 ms en utilisant des transformations Fast Fourier Cet algorithme a été adapté pour augmenter sa vitesse.



Figure II.12 Relais différentiel numérique-GRTE Quartier Hassi Messaoud.

Le relais différentiel numérique utilise l'algorithme qui reconnaît le contenu harmonique dans le courant magnétique et normal et agit en conséquence, créant ainsi l'action de protection.

L'amplitude des harmoniques diminue progressivement et dans la FFT le signal se décompose en un ensemble de termes sinus et cosinus donné par :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} C_k \cos(kwt) + S_k \sin(kwt) \quad (\text{II.11})$$

avec :

a_0 : est la composante DC de $f(t)$.

C_k, S_k : sont les coefficients cosinus et sinus de les fréquences présentes dans $f(t)$ respectivement.

Les formes discrètes des coefficients C_K , S_K sont exprimé dans les équations suivantes :

$$C_k = \frac{2}{N} + \sum_{n=0}^{\infty} x(n) \cos\left(\frac{2kwt}{N}\right) \quad (\text{II.12})$$

$$S_k = \frac{2}{N} + \sum_{n=0}^{\infty} x(n) \sin\left(\frac{2kwt}{N}\right) \quad (\text{II.13})$$

Les coefficients harmoniques de Fourier peuvent être exprimés comme :

$$F(k) = \sqrt{S_k^2 + C_k^2} \quad (\text{II.14})$$

avec :

F_K : est le coefficient harmonique K^{TH} pour $k = 1, 2, \dots, N$.

$x(n)$: est le signal $f(t)$ sous sa forme discrète.

FFT produit exactement les mêmes résultats que la DFT cependant, FFT est beaucoup plus rapide que la DFT, où la vitesse de calcul est le facteur principal de ce processus [20].

FFT Abréviation de Fast Fourier transformer, c'est un algorithme mathématique en informatique qui permet d'accélérer les conversions faites par DFT (Discrète Fourier Transformer). Il aide à réduire les complexités de l'informatique.

DFT est une abréviation de Discrète Fourier transformer, c'est un algorithme mathématique qui aide à traiter les signaux numériques en calculant le spectre d'un signal de durée finie [21].

VI. Conclusion :

Le transformateur nécessite d'être protégé efficacement de façon la plus complète possible pour le prémunir des défauts qui peuvent provoquer sa mise hors tension et son endommagement. Il est bien évident que l'installation de matériel de protection adéquate est nécessaire mais cela reste insuffisant si n'est réalisée de façon judicieuse pour éviter les déclenchements.

Dans ce chapitre nous avons donné les différentes techniques de la protection des transformateurs de puissance, aussi les difficultés de protection différentielle conventionnelle.



Chapitre III

**Application et analyse des résultats de
simulation**



I. Introduction

Un transformateur de puissance est principalement protégé contre les défauts internes à l'aide d'une protection différentielle conventionnelle qui est sensible et une technique de compensation rapide. Mais reste la protection numérique mieux que la protection conventionnelle.

Dans ce chapitre nous allons procéder à l'exécution de notre simulation du groupe transformateur de pour analyser la protection d'un transformateur, modélisé dans le chapitre précédent en utilisant deux méthodes de protection. La première est une protection conventionnelle. La deuxième est une protection numérique. Dans la dernière phase de notre analyse nous allons faire une comparaison entre eux.

II. Protection du transformateur par relais différentiel conventionnel

II.1 Modèle de simulation

L'ensemble du système Simulink, comme le montre la Figure III.1, consiste en un transformateur élévateur de 200 MVA, 11 kV / 33 kV, 50 Hz connecté à une alimentation de 500 MVA, une charge résistive de 150 MW, côté 33 kV. Chaque phase du transformateur est constituée de deux enroulements connectés en étoile avec un neutre mis à la terre.

Les blocs utilisés pour simuler le modèle de transformateur de puissance triphasé ainsi que le schéma du système de protection dans le programme Matlab/Simulink.

Les paramètres détaillés de simulation sont les suivantes :

- Les alternateurs et le réseau équivalent sont représentés par des blocs *Three-phase Source*.
- Les transformateurs sont représentés par des blocs *Three-Phase Transformer (Two Windings)*.
- Les lignes de transport sont modélisées par des blocs *Distributed Parameters Line*. Les paramètres des lignes sont:
 - $R1 = 0.01273 \Omega/\text{km}$ $R0 = 0.3864 \Omega/\text{km}$
 - $L1 = 0.9337e-3 \text{ H}/\text{km}$ $L0 = 4.1264e-3 \text{ H}/\text{km}$
 - $C1 = 12.74e-9 \text{ F}/\text{km}$ $C0 = 7.751e-9 \text{ F}/\text{km}$
- Les charges sont représentées par des blocs *Three-Phase Parallel RLC Load*

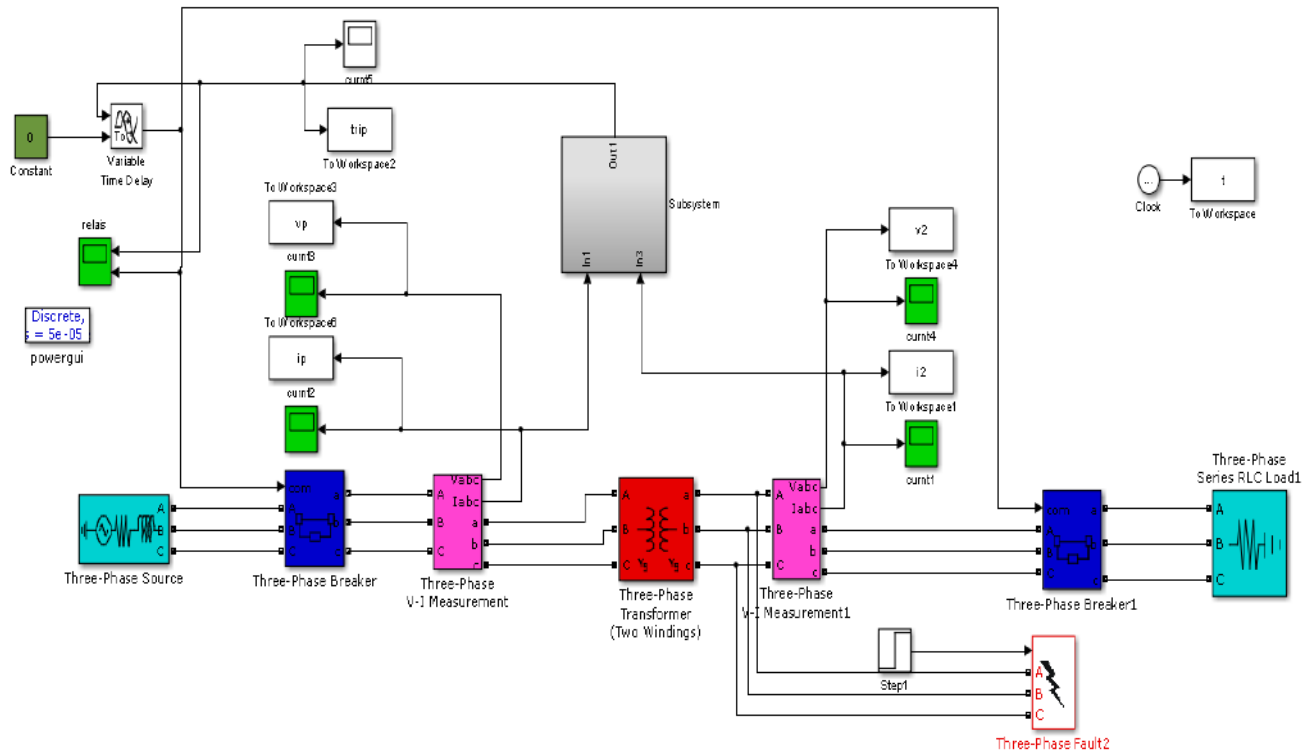


Figure III.1 Modèle Simulink du transformateur triphasé avec sa protection.

Le Tableau 1 montre les principaux paramètres du transformateur de puissance utilisé dans la simulation

Tableau III.1: Paramètres principaux du transformateur

Couplage du transformateur	Y/Y
Puissance nominale	200MVA
Rapport de tension	11KV/33KV
Fréquence nominale	50Hz
Résistance d'enroulement primaire / phase	0.002 pu
Inductance d'enroulement primaire / phase	0.08 pu
Résistance d'enroulement secondaire /phase	0.002 pu
Inductance d'enroulement secondaire /phase	0.08 pu
Résistance à la magnétisation	500.02 pu

La Figure III.2 ci-dessous montre le schéma du sous-système de relais différentiel conventionnel dans le programme MATALAB Simulink.

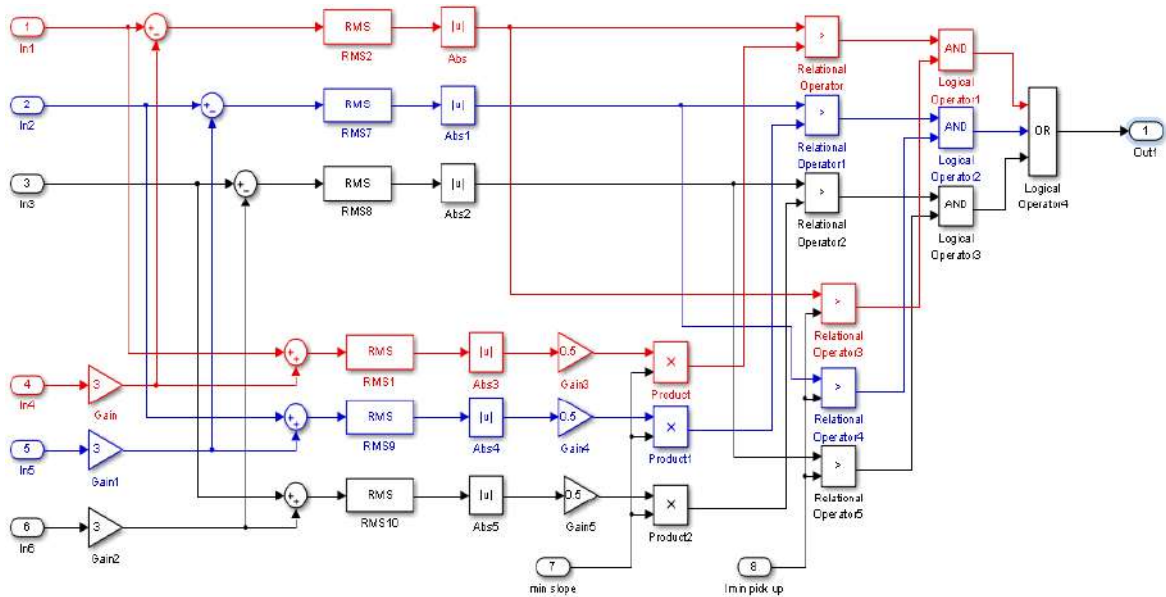


Figure III.2 Schéma du sous-système de relais différentiel conventionnel

II.2 Résultats et discussion

II.2.1 Sans défaut (fonctionnement normal) : Les résultats de simulation des tensions et des courants pour secondaire sont représentés sur les Figures (III.3 –III.4)

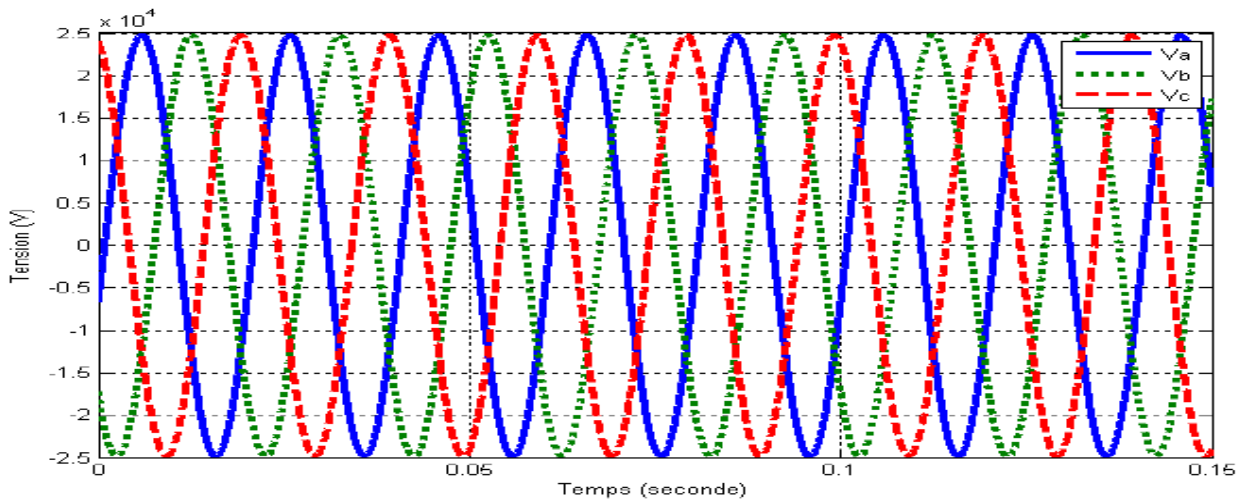


Figure III.3 Tension secondaire sans défaut

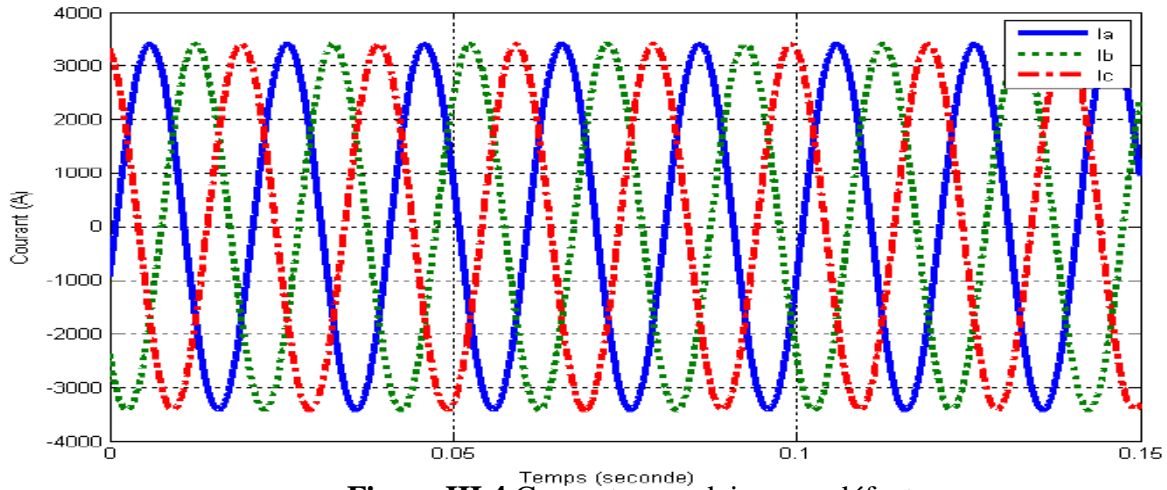


Figure III.4 Courant secondaire sans défaut

Dans le fonctionnement normal, aucun défaut ne s'est produit, la tension et le courant secondaires sont aux valeurs de fonctionnement désignées en fonction du rapport de rotation du transformateur Figures (III.4 et III.3).

II.2.2 Défaits sans temporisation :

Le signal de sortie du relais différentiel lorsqu'un défaut s'est produit au temps 0,05 (sec) est donné sur la figure (III.5).

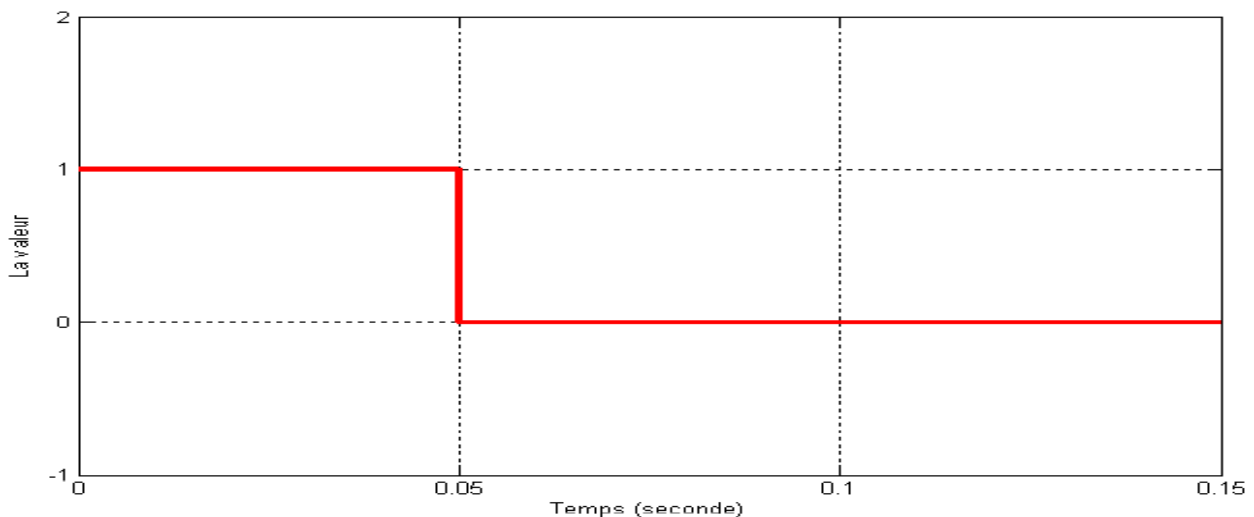


Figure III.5 Signal de sortie de relais différentiel

En cas de défaut sans temporisation, lorsqu'un défaut s'est produit à 0,05 sec comme indiqué sur la figure (III.5), un signal de déclenchement délivré par le relais différentiel pour actionner le disjoncteur directement.

II.2.2.1 Défaut monophasé :

Les signaux de courant et tension du défaut monophasé du relais sont illustrés à la figures (III.6-III.7).

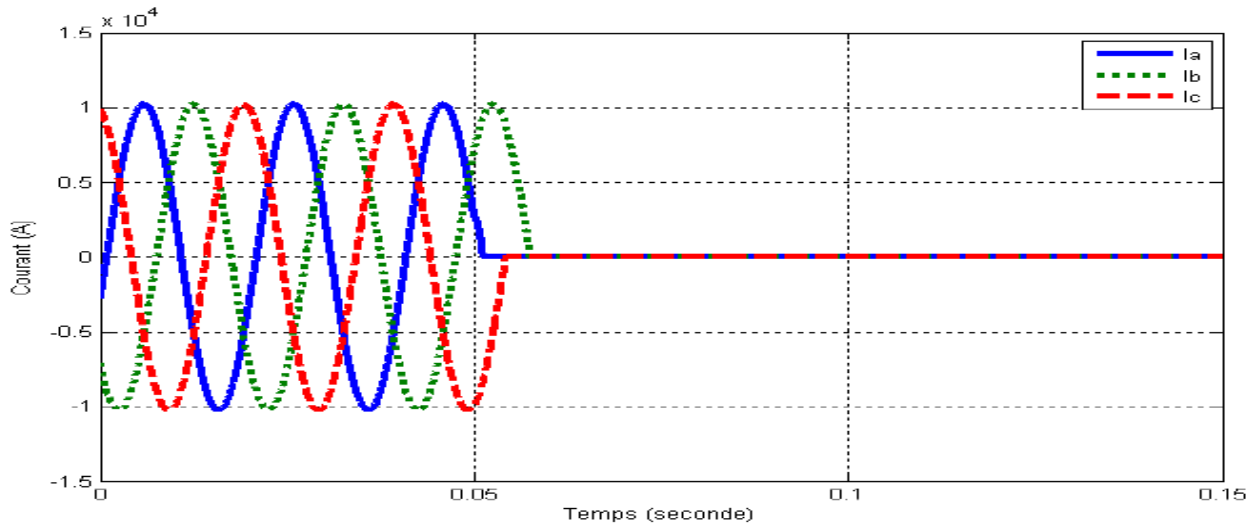


Figure III.6 Courant au défaut monophasé

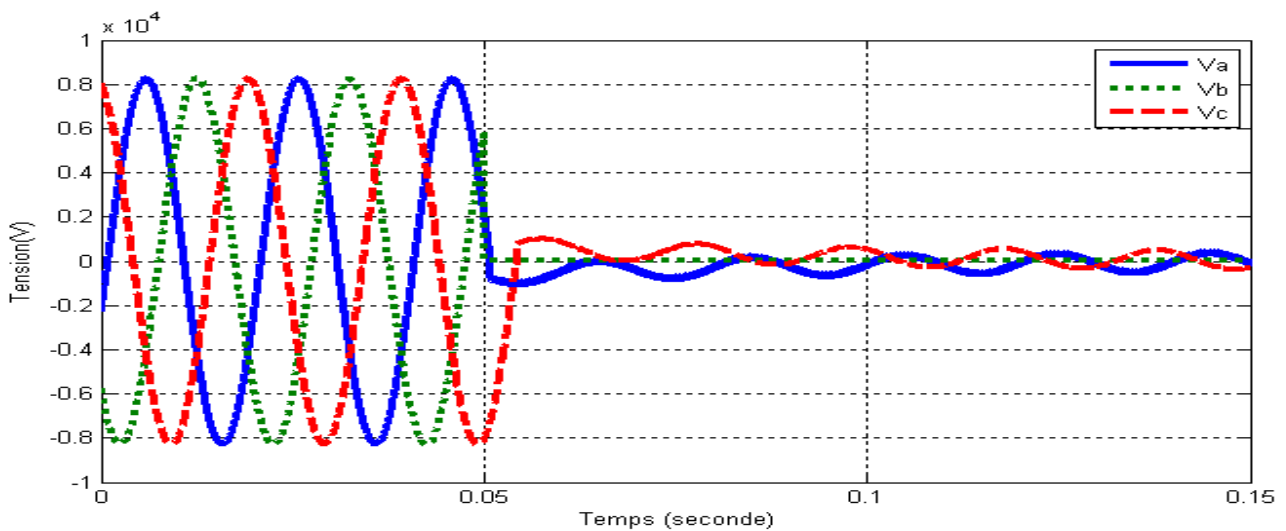


Figure III.7 Tension au défaut monophasé

En cas de défaut monophasé sans temporisation, lorsqu'un défaut survient dans les 0,05 sec comme illustré à la Figure (III.5), le signal de déclenchement est délivré par le relais différentiel pour actionner directement le disjoncteur. Lorsque le disjoncteur est ouvert, la valeur du courant sera nulle après le moment du défaut et la tension nulle également dans la phase dans laquelle le défaut s'est produit et diminue dans les deux autres phases comme indiqué sur les figures (III.6 et III.7).

II.2.2.2 Défaut biphasé :

Les signaux de courant et tension du défaut biphasé du relais sont illustrés à la figures (III.8-III.9)

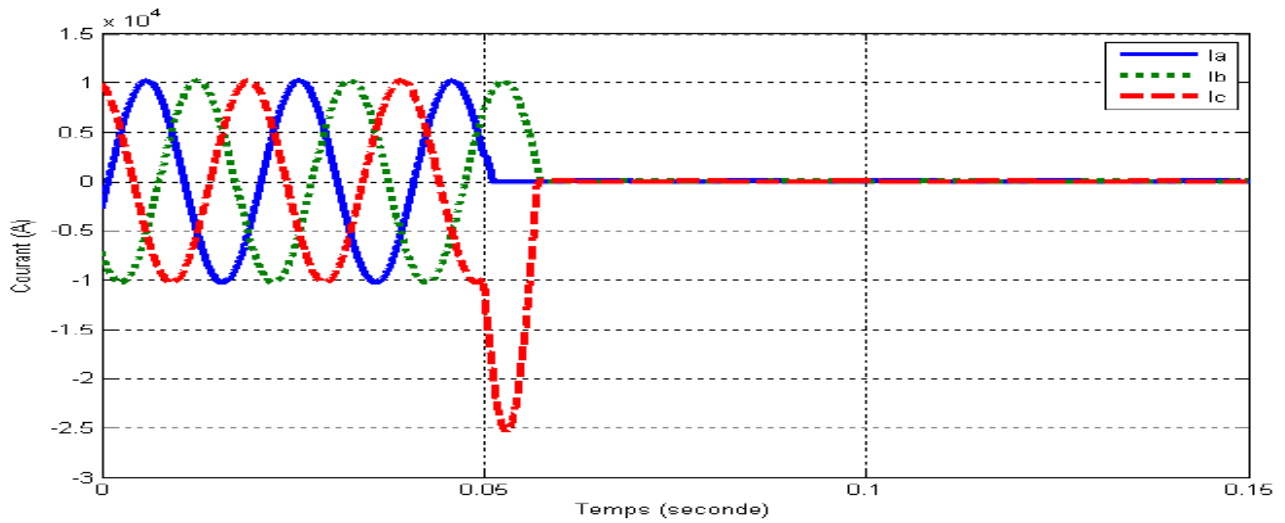


Figure III.8 Courant au défaut biphasé

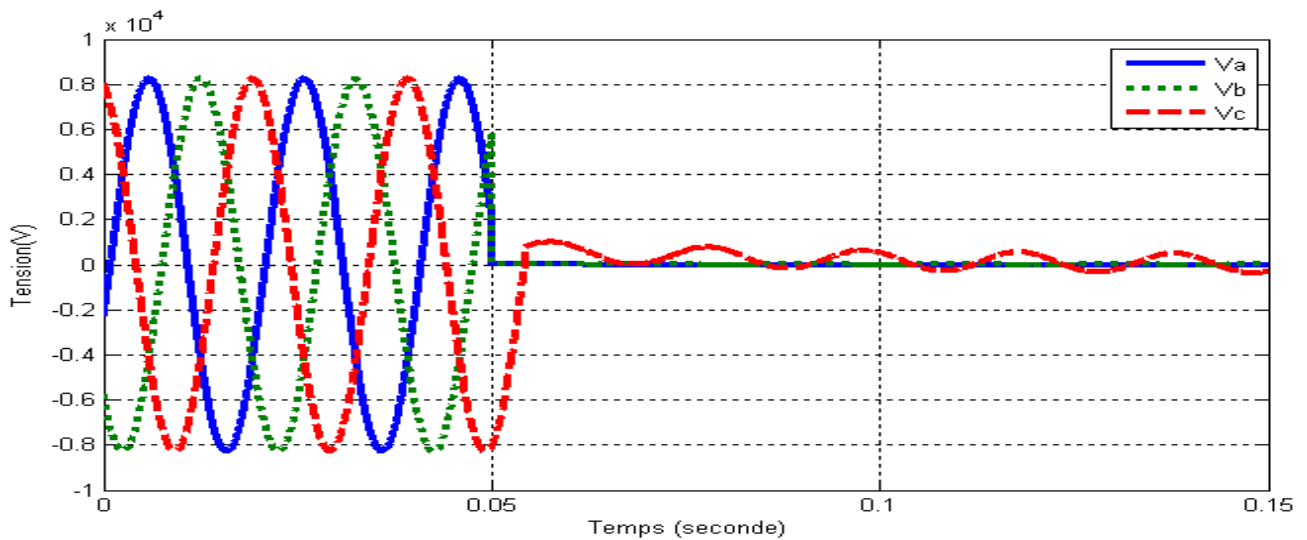


Figure III.9 Tension au défaut biphasé

Dans le cas d'un défaut biphasé sans temporisation, lorsqu'un défaut survient dans les 0,05 sec comme illustré à la Figure (III.5), le signal de déclenchement est délivré par le relais différentiel pour actionner directement le disjoncteur. Lorsque le disjoncteur est ouvert, le courant sera nul après le moment du défaut et la tension sera également nulle dans les deux phases dans lesquelles le défaut s'est produit et diminuera dans l'autre phase comme indiqué dans les figures (III.8 et III.9).

II.2.2.3 Défaut triphasé :

Les signaux de courant et tension du défaut triphasé du relais sont illustrés à la figure (III.10-III.11)

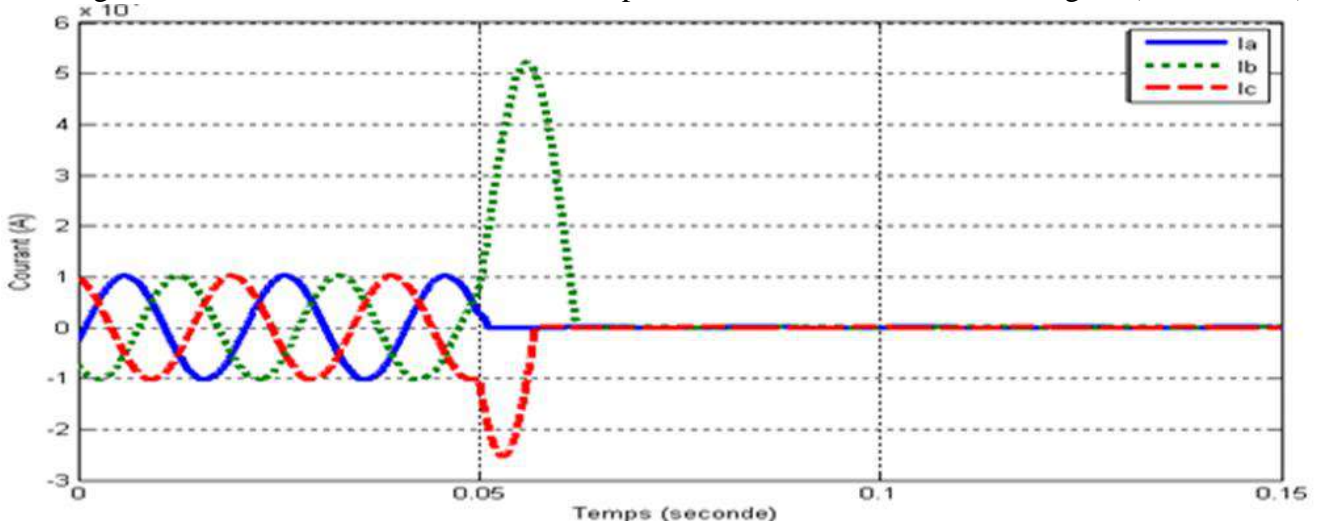


Figure III.10 Courant au défaut triphasé

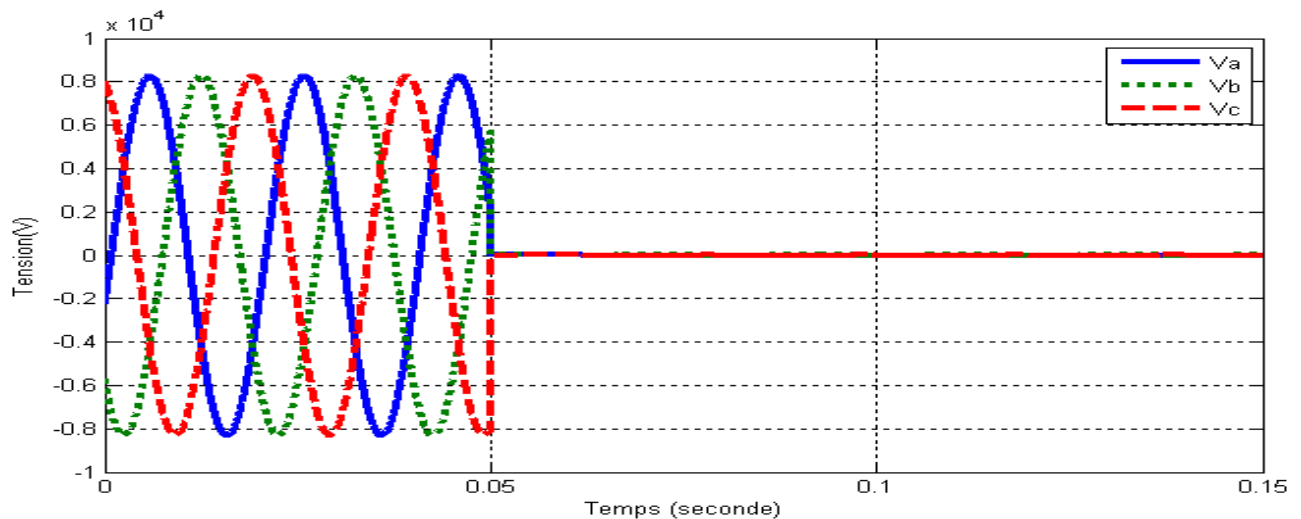


Figure III.11 Tension au défaut triphasé

Dans le cas d'un défaut triphasé sans temporisation, lorsqu'un défaut survient dans les 0,05 sec comme indiqué sur la Fig. (III.5), le signal de déclenchement est délivré par le relais différentiel pour actionner directement le disjoncteur. Lorsque le disjoncteur est ouvert, le courant sera nul après le temps de défaut et la tension sera également nulle comme indiqué sur les figures (III.10 et III.11).

II.2.3 défauts avec temporisation :

La figure (III.12) montre le signal de sortie du relais différentiel lorsque l'erreur de temps est de 0,05 sec, La figure (III.13) montre le signal de sortie d'un disjoncteur avec le même temps de défaut avec une temporisation de 0,03 sec.

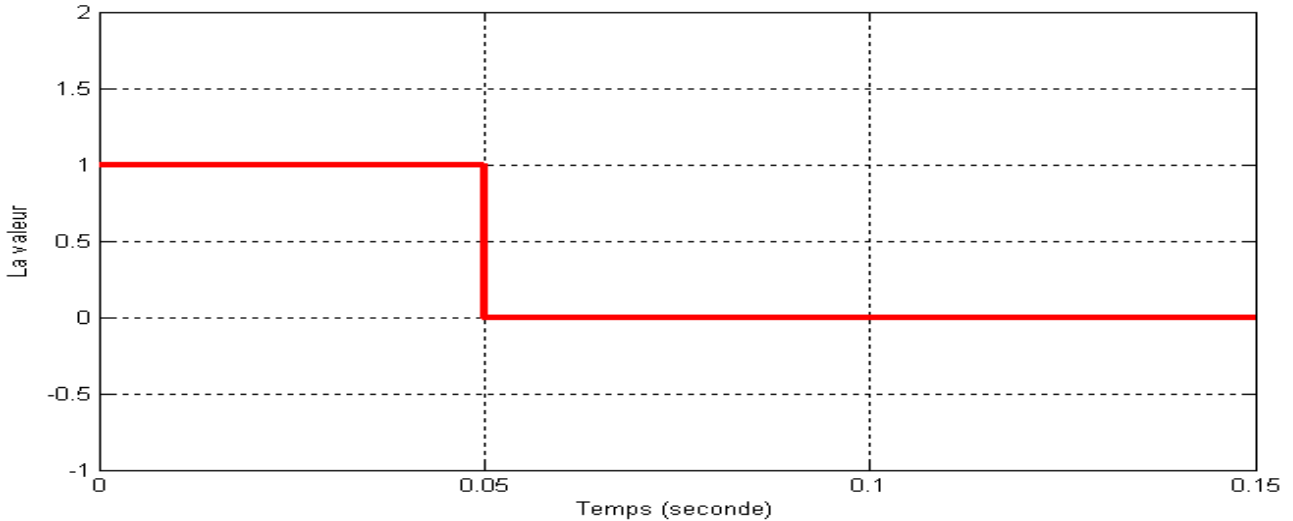


Figure III.12 Signal de sortie de relais différentiel sans temporisation.

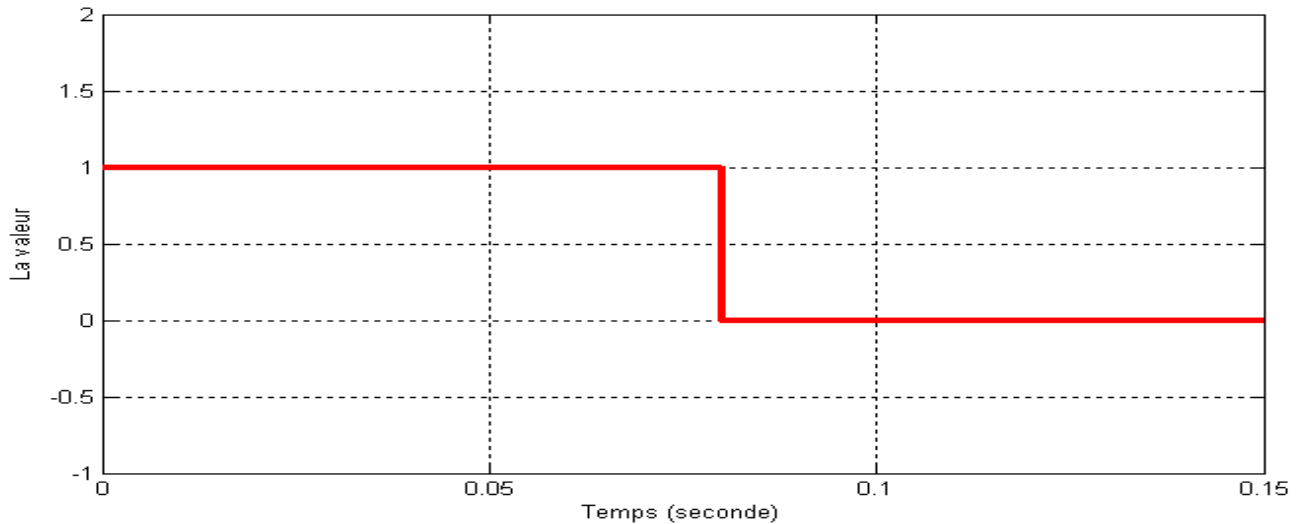


Figure III.13 Signal de sortie de relais différentiel avec temporisation

Si un défaut survient, avec une temporisation, lorsqu'un défaut survient en 0,05sec, le signal de déclenchement est délivré par le relais différentiel pour actionner le disjoncteur après 0,03sec à partir du temps de défaut, comme le montrent les Figures (III.12 et III.13).

II.2.3.1 Défaut monophasé :

Les signaux de courant et tension du défaut monophasé du relais sont illustrés à la figures (14-15).

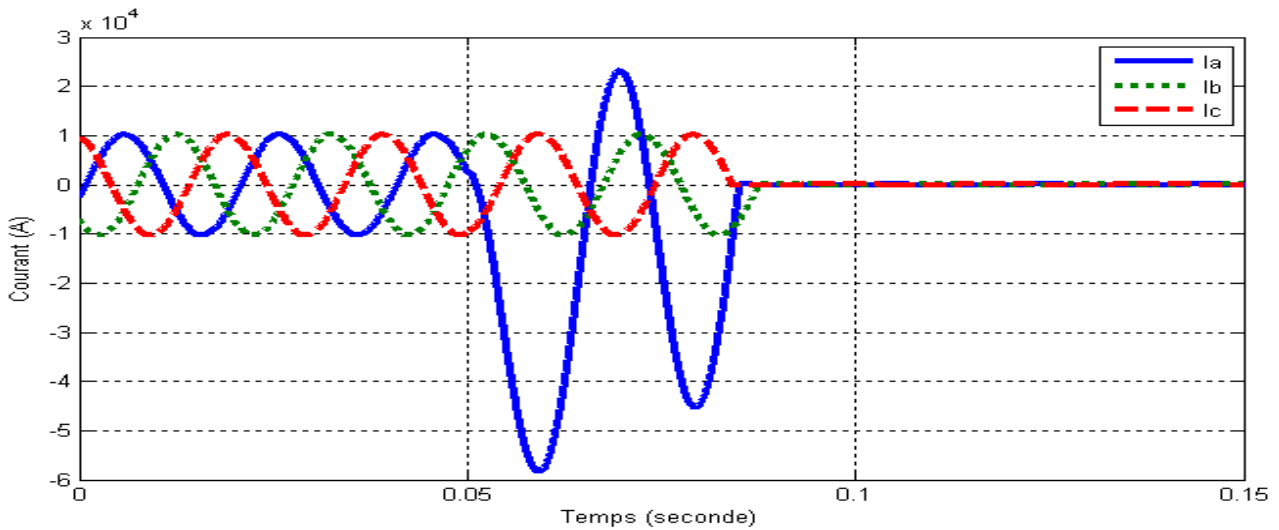


Figure III.14 Courant au défaut monophasé

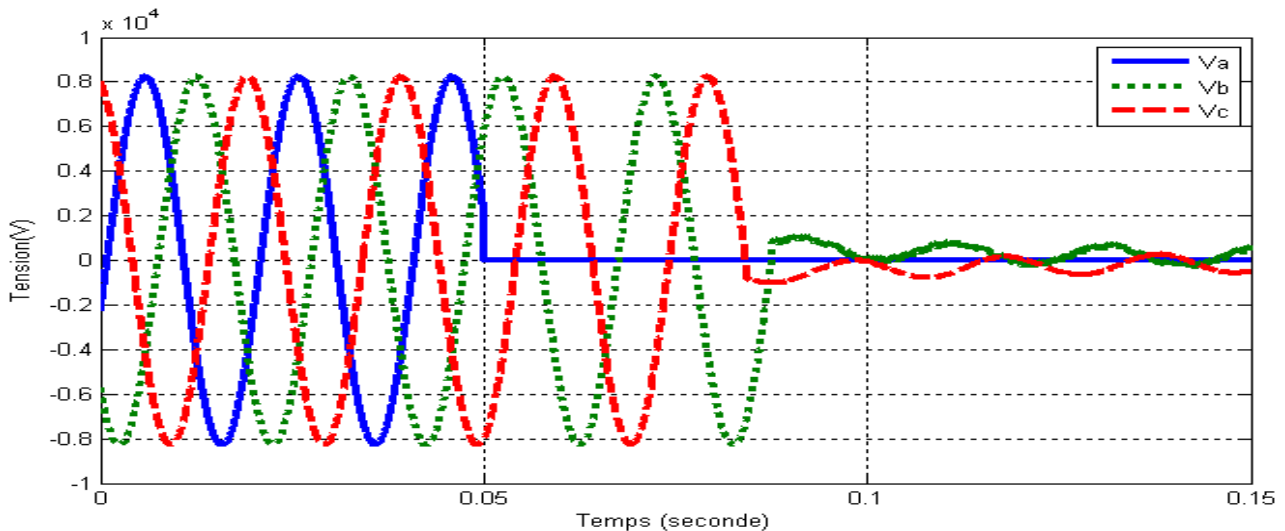


Figure III.15 Tension au défaut monophasé

Dans le cas d'un défaut monophasé avec temporisation, lorsqu'un défaut survient en 0,05 sec, le signal de déclenchement est délivré par le relais différentiel pour actionner le disjoncteur Après 0,03 secondes à partir de temps du défaut figures (III.12 et III.13). Le signal actuel est transmis du régime permanent au régime transitoire Dans la phase où un défaut s'est produit et il y a une tension nulle dans la même phase, Puis Lorsque le disjoncteur est ouvert, le courant sera nulle et la tension chute comme indiqué sur les figures (III.14 et III.15).

II.2.3.2 Défaut biphasé :

Les signaux de courant et tension du défaut biphasé du relais sont illustrés à la figures (III.16-III.17).

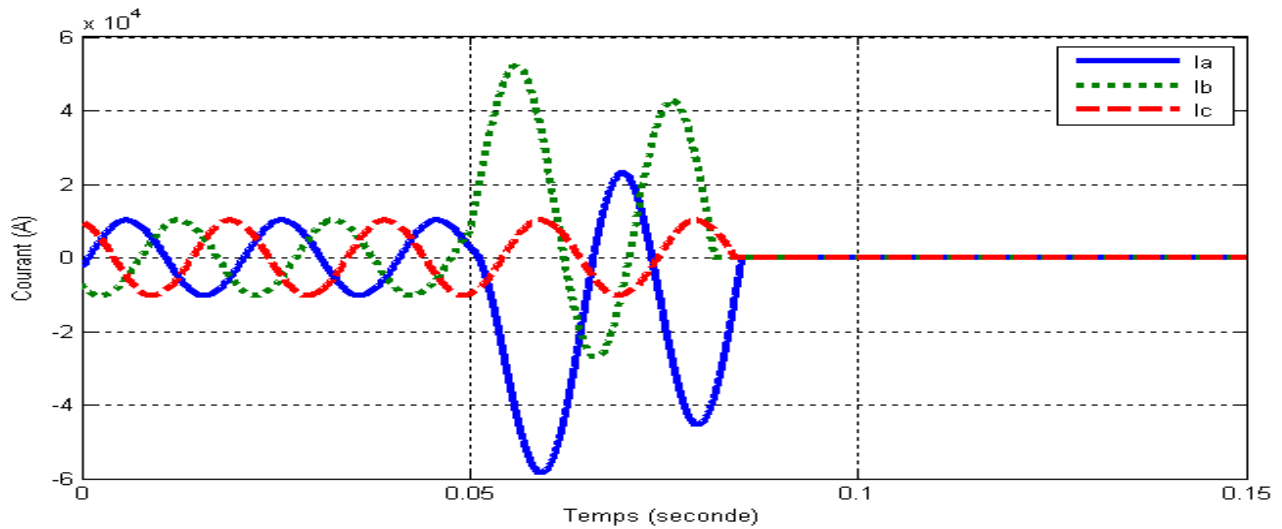


Figure III.16 Courant au défaut biphasé

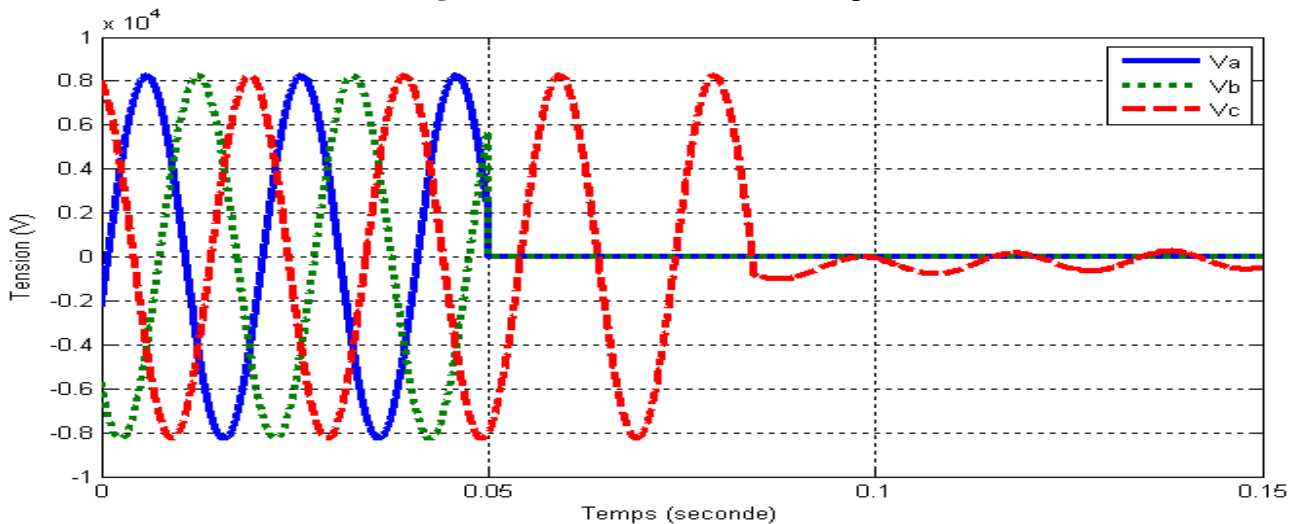


Figure III.17 Tension au défaut biphasé

Dans le cas d'un défaut biphasé avec temporisation, lorsqu'un défaut survient en 0,05 sec, le signal de déclenchement est délivré par le relais différentiel pour actionner le disjoncteur. Après 0,03 sec à partir de temps du défaut (figures III.12 et III.13). Le signal actuel est transmis du régime permanent au régime transitoire dans les deux phases où un défaut s'est produit et il y a une tension nulle dans les mêmes phases. Puis lorsque le disjoncteur est ouvert, le courant sera nul et la tension chute comme indiqué sur les figures (III.14 et III.15).

II.2.3.3 Défaut triphasé :

Les signaux de courant et tension du défaut triphasé du relais sont illustrés à la figures (III.18-III.9).

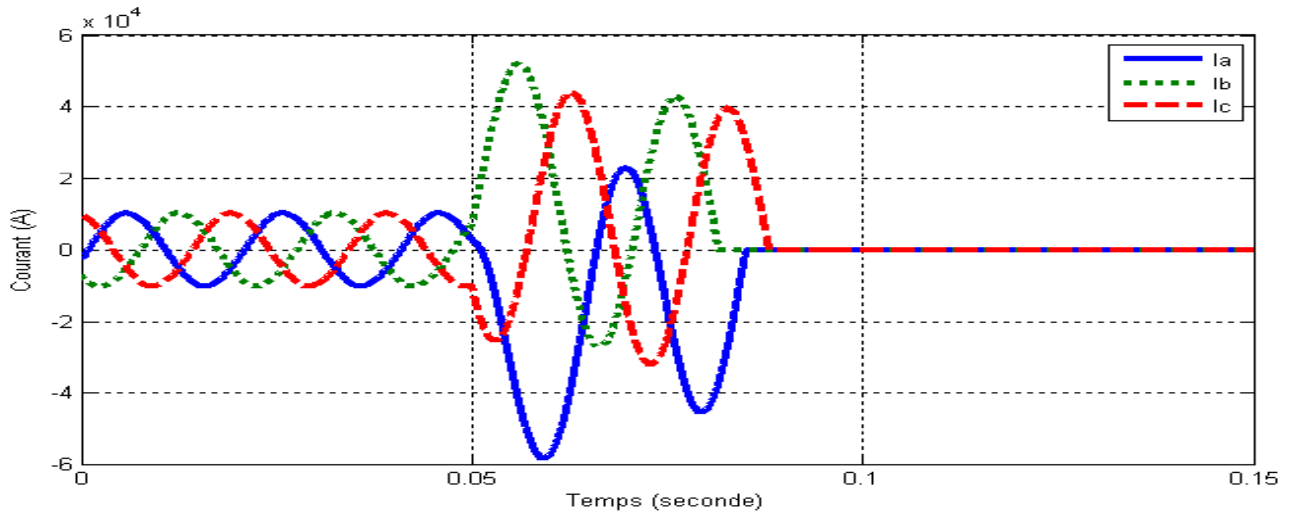


Figure III.18 Courant au défaut triphasé

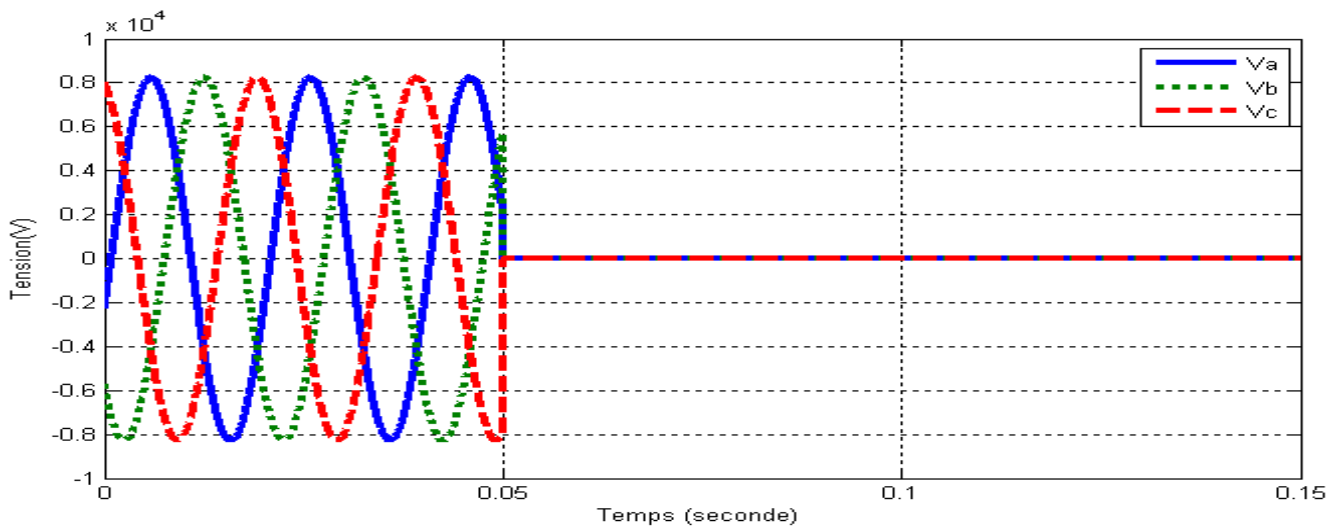


Figure III.19 Tension au défaut triphasé

Dans le cas d'un défaut triphasé avec temporisation, lorsqu'un défaut survient en 0,05 sec, le signal de déclenchement est délivré par le relais différentiel pour actionner le disjoncteur. Après 0,03 sec à partir de temps du défaut figures (III.12 et III.13). Le signal actuel est transmis du régime permanent au régime transitoire dans les trois phases où un défaut s'est produit et il y a une tension nulle dans les mêmes phases. Puis Lorsque le disjoncteur est ouvert, le courant sera nulle comme indiqué sur les figures (III.18 et III.19).

III. Protection différentielle numérique :

Ce schéma de notre modèle global de simulation est identique au schéma global utilisé précédemment, cependant on a modifié le relai différentiel conventionnel par un relai différentiel numérique.

Le bloc de la protection différentielle numérique a été réalisé en faisant une approche de son mode de fonctionnement, Le contenu de chaque bloc montré sur des figures (III.21) à (III.26).

La figure (III.20) illustre l'organigramme de l'algorithme de technique logique à base de transformée de Fourier numérique conçu. Dans cet algorithme, les courants de sortie des TC subissent deux processus d'analyse, un processus de comparaison d'amplitude et un processus de calcul de contenu harmonique. La comparaison d'amplitude entre les valeurs RMS des courants de sortie des TC ($| Id1 - Id2 |$) se trouve à gauche de l'organigramme et le calcul harmonique se trouve à droite de l'organigramme[18].

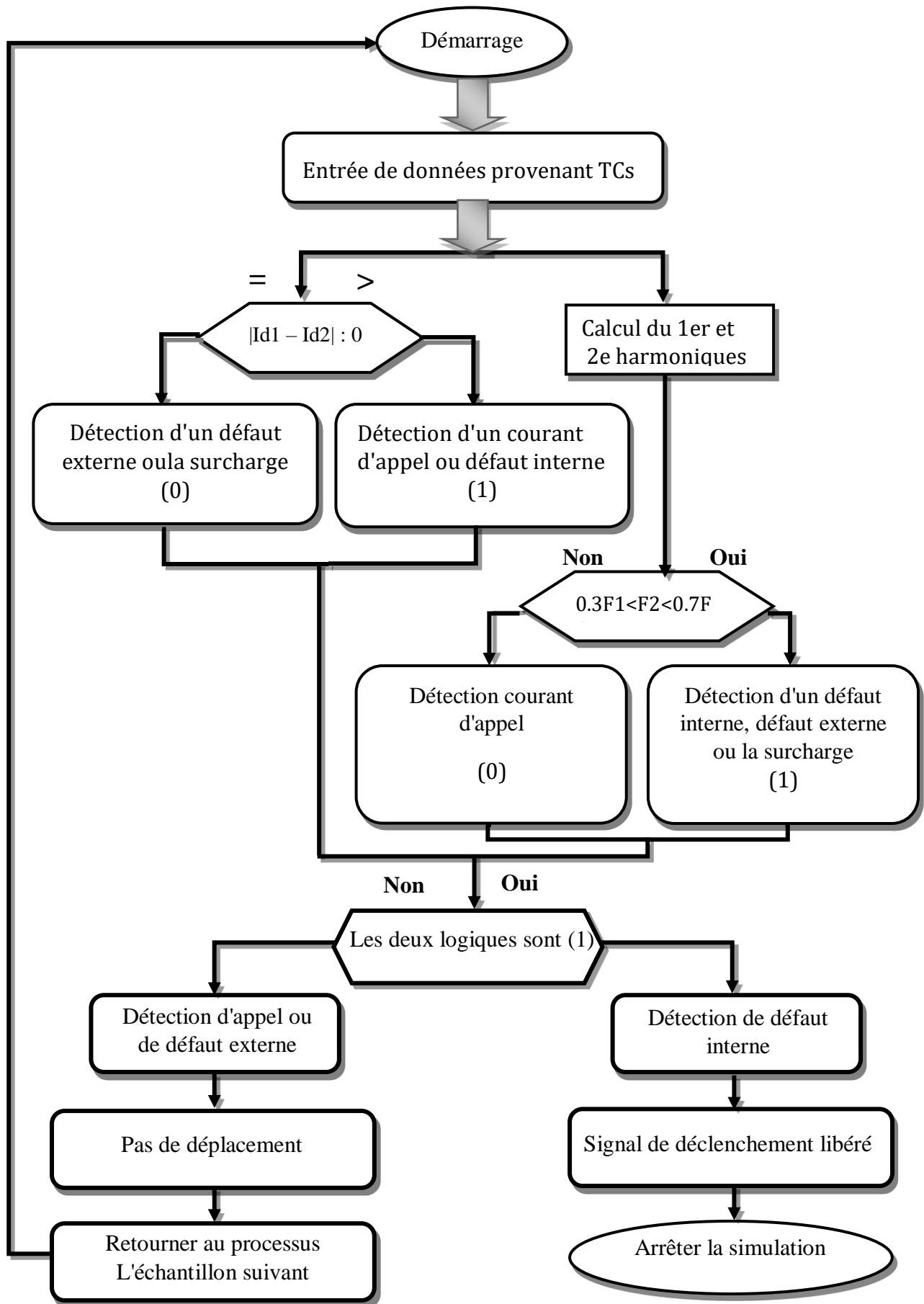


Figure III.20 Organigramme du schéma de relais différentiel numérique[18].

Le modèle de la protection différentielle est exécuté pour les cas suivants :

- Simulation d'un transformateur à vide pour voir le Courant d'appel magnétisant.
- Simulation d'un transformateur chargé avec un défaut triphasé interne
- Simulation d'un transformateur chargé avec un défaut externe

III.1. Simulation d'un transformateur à vide :

Dans un premier temps, nous avons fait un test pour voir le courant de flux magnétisant qui est le problème de protection traditionnel pour cela en modélisant le transducteur à vide sur le logiciel Matlab/Simulink.

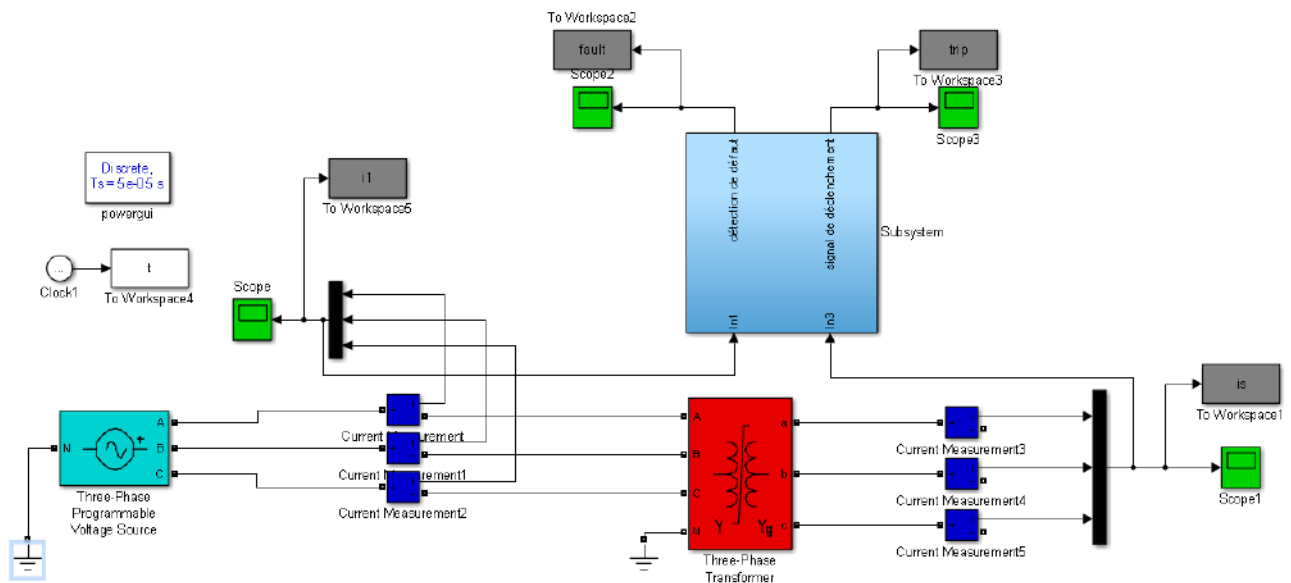


Figure III.21 Circuit de modélisation du transformateur triphasé à vide

La figure (III.21) montre une simulation d'un système de relais différentiel numérique. Pour un transformateur à vide triphasé 225 kVA, 60 Hz (2400V/600V). Avec relais différentiel numérique. Afin de développer un relais différentiel classique pour surmonter les pannes lorsque le courant circule dans un transformateur de puissance triphasé.

III.1.1 Relais différentiel conventionnel :

La figure III.22 montre le courant d'appel du transformateur triphasé utilisé dans la simulation.

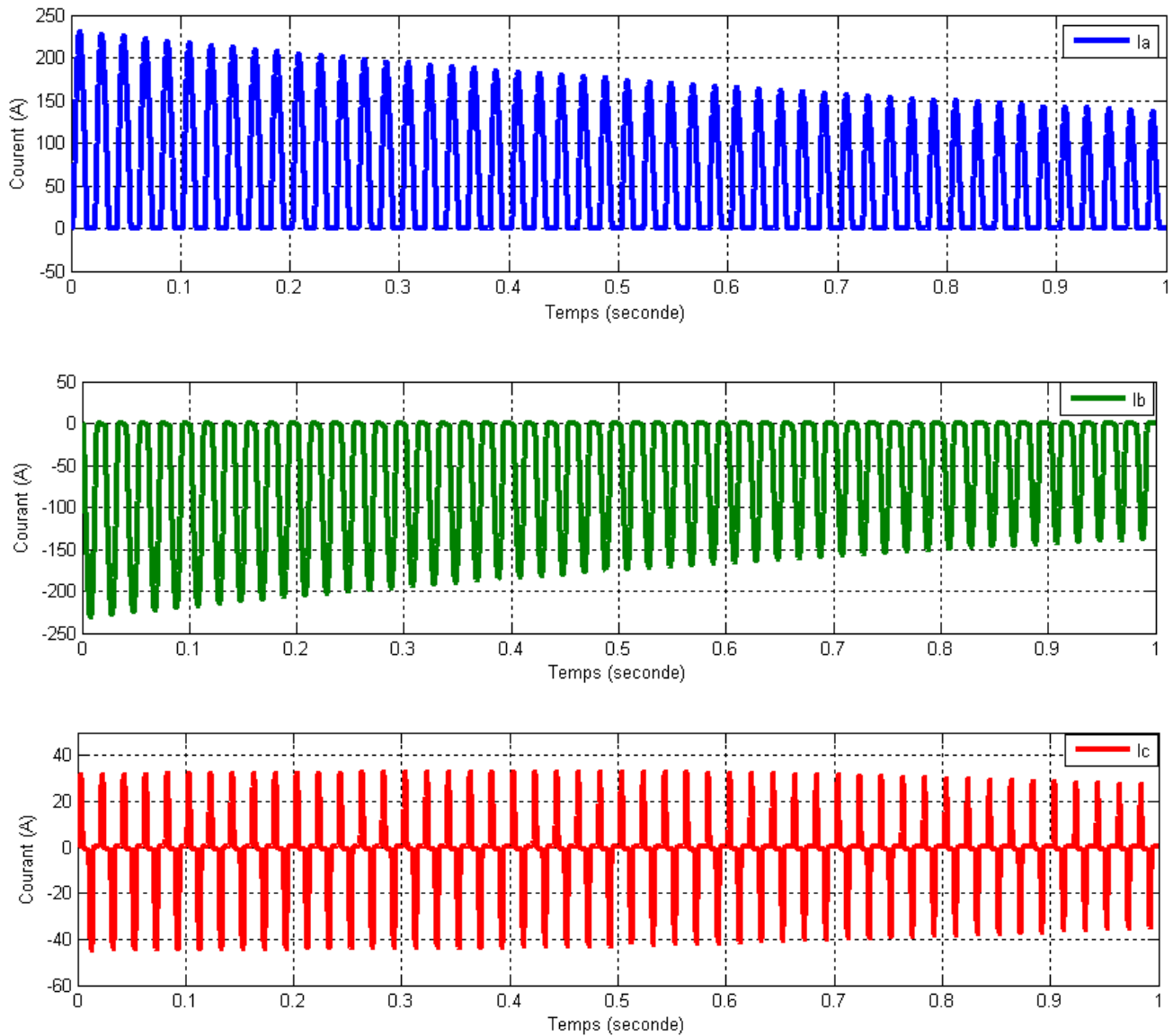


Figure III.22 Courants d'appel des trois phases.

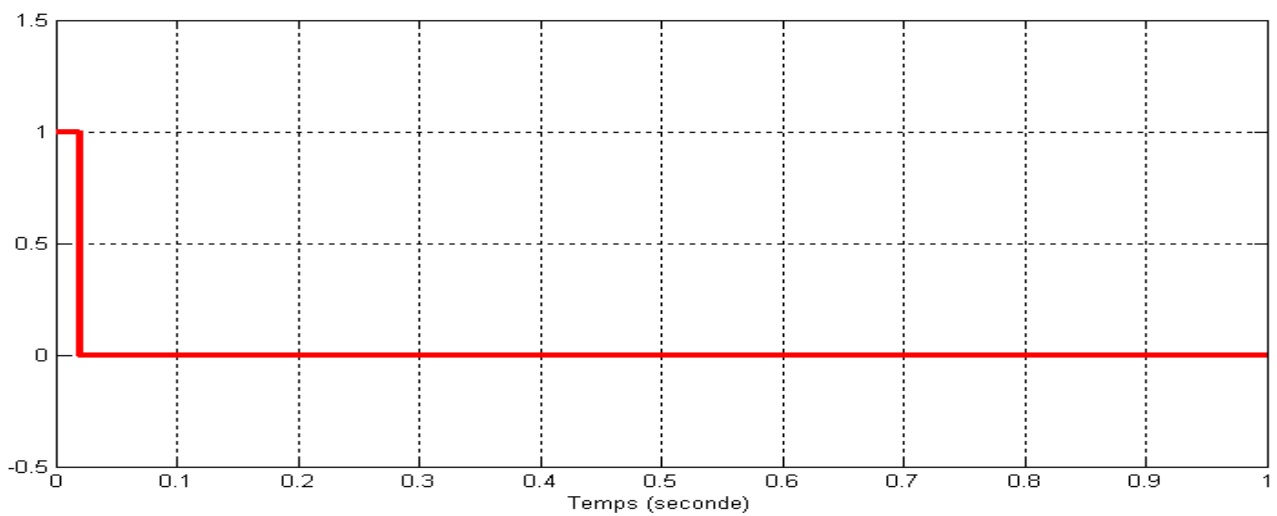


Figure III.23 Signal de sortie relais conventionnel

Le courant d'appel de la figure III.22 provoque un dysfonctionnement du relais différentiel, comme illustré à la figure III.23, Le transformateur entre d'abord en service, le relais envoie un signal au disjoncteur pour ouvrir et couper le courant directement. Sa signification est une condition normale du transformateur, mais un relais différentiel conventionnel l'a détecté comme une condition de défaut.

III.1.2 Relais différentiel numérique :

La figure III.24 montre le signal de sortie du relais différentiel numérique et la figure III.25 montre le signal du courant fondamental et du courant 2-ème harmonique.

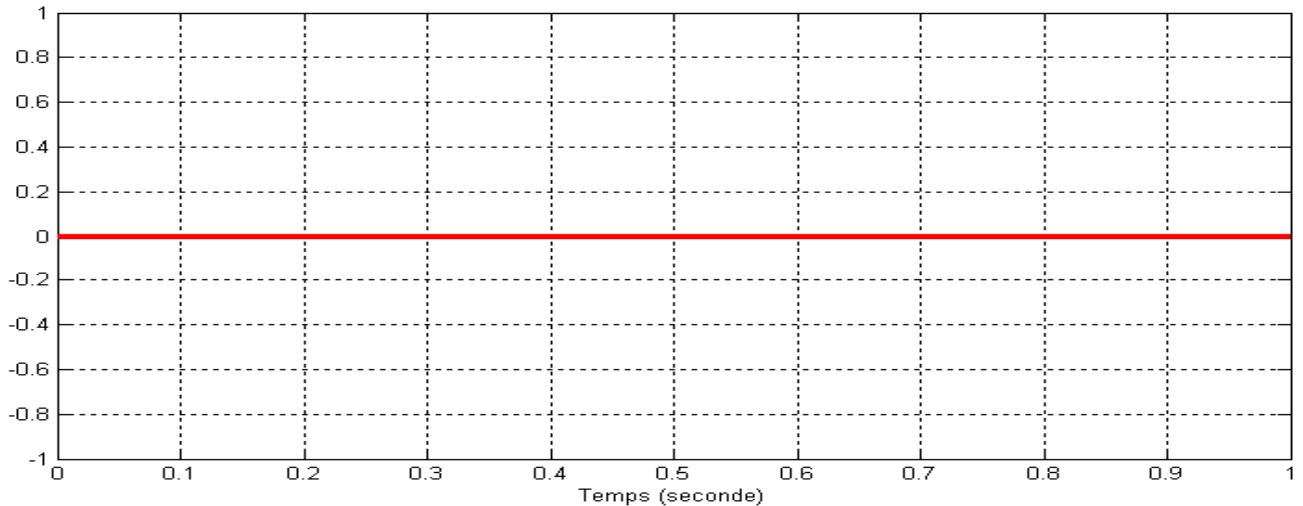


Figure III.24 signal de sortie du relais différentiel numérique

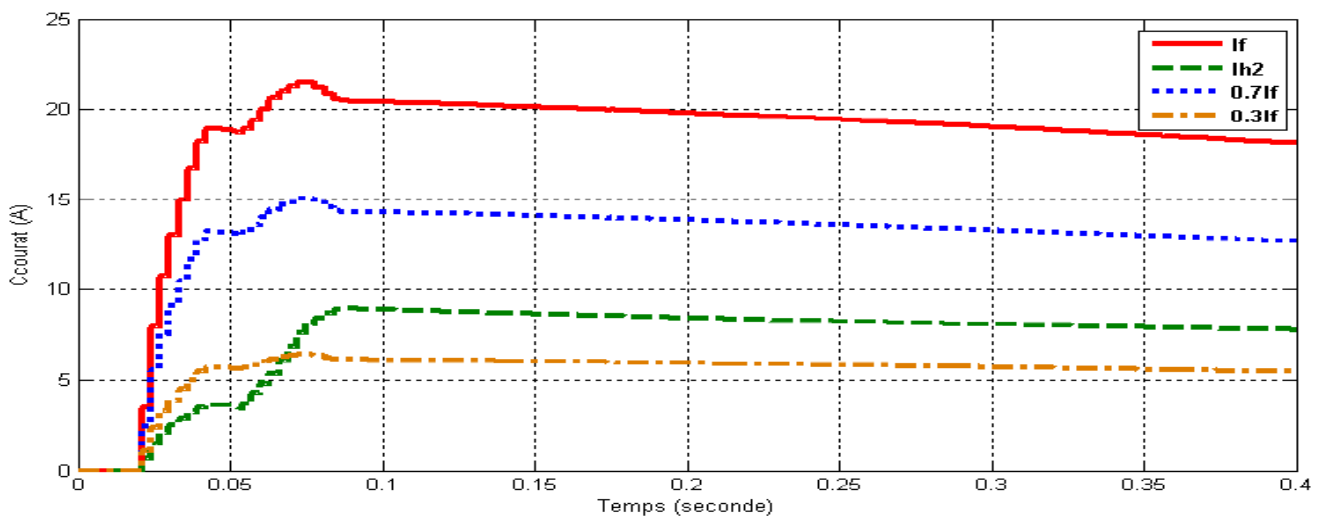


Figure III.25 Courant fondamental et du 2-ème harmonique.

Le relais différentiel n'a pas envoyé de signal de déclenchement au disjoncteur Figure III.24. Bien qu'il existe un courant d'appel de la figure III.22, grâce à la partie analyse harmonique, il compare le courant principal et le courant harmonique. Figure III.25. Puisque $0,3F1 < F2 < 0,7F1$, il s'agit d'un état de courant de flux et non d'un état de défaut comme indiqué dans l'organigramme ci-dessus Figure III.20.

Ainsi, nous avons évité le mauvais fonctionnement du relais au courant d'appel par le relais différentiel numérique.

III.2 Simulation d'un transformateur en chargé avec un défaut interne :

Ce test est effectué après la mise sous tension du transducteur en allumant CB1 à 0,03 s et CB2 à 0,05 s depuis le début de la simulation pour voir l'effet de la charge sur le fonctionnement du relais conçu.

La figure III.26 suivante montre le schéma de processus de la protection du transformateur de puissance chargé utilisant un relais différentiel numérique qui peut résoudre le problème causé par la surcharge du transformateur dans la protection différentielle conventionnelle. Par comparaison logique, comme le montre l'organigramme ci-dessus de la figure III.20.

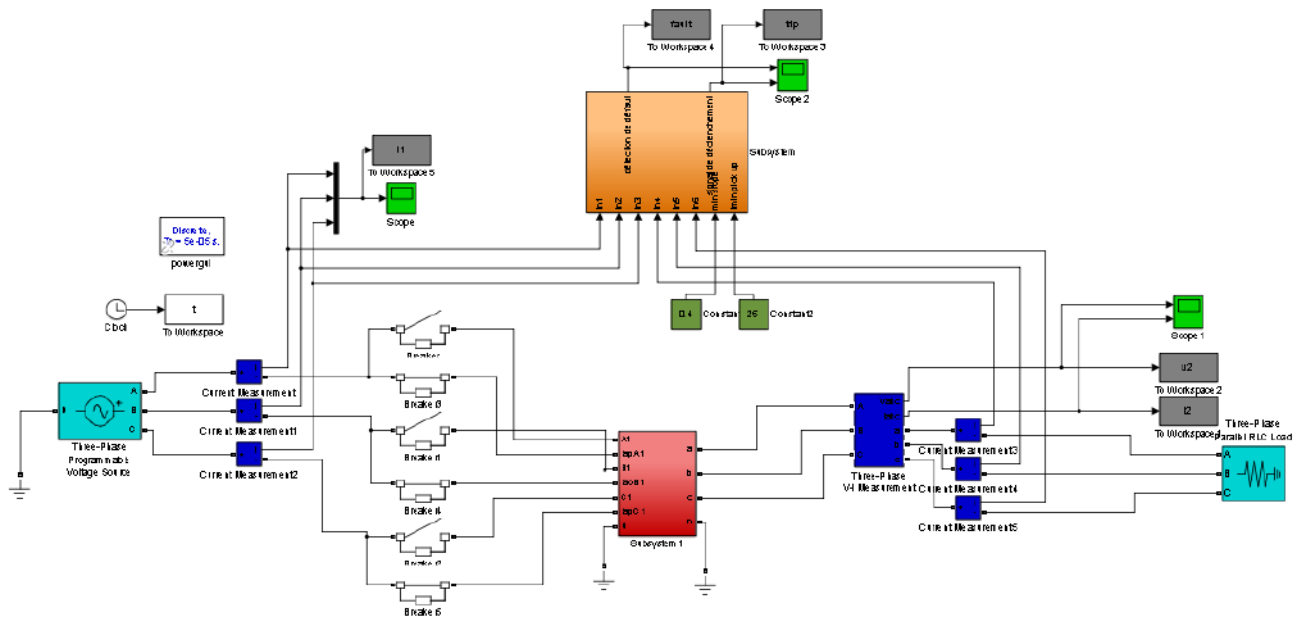


Figure III.26 Circuit de modélisation du transformateur triphasé chargé

La Figure III.27 montre les courants secondaires du transformateur en cas de surcharge. La Figure III.28 montre le courant différentiel et le courant de réglage

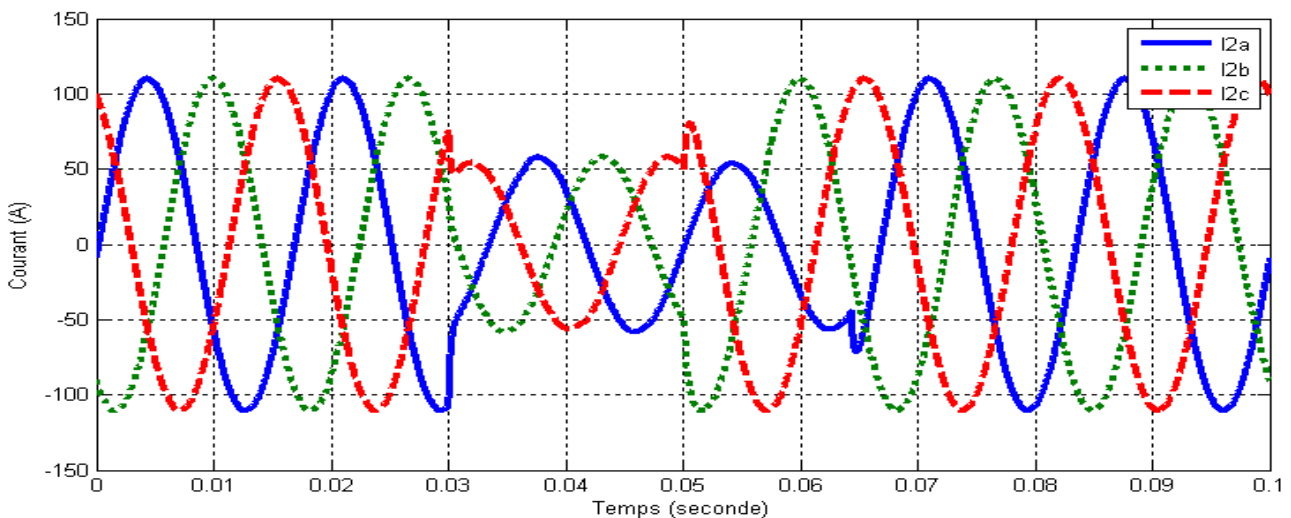


Figure III.27 Courants secondaires.

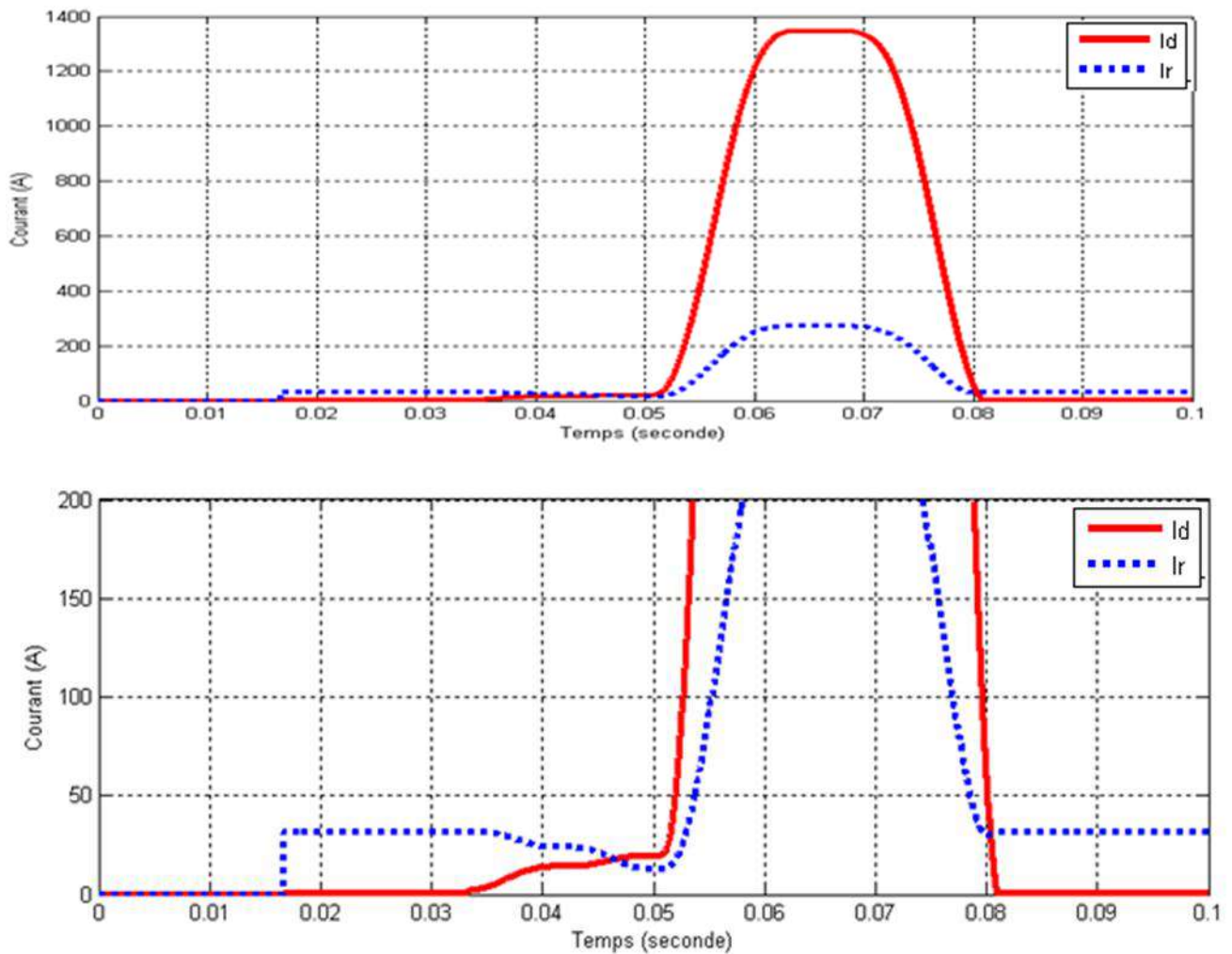


Figure III.28 Courant différentiel et courant de réglage.

Dans le cas d'une surcharge, on remarque que les courants secondaires diminuent au moment de l'ouverture et de la fermeture de CB1 et CB2 (0,05-0,03) comme le montre la figure III.27, ce qui entraîne une augmentation du courant différentiel I_d supérieur au courant de réglage I_s (Figures III.28). C'est ce qui a provoqué le mauvais fonctionnement du relais différentiel conventionnel, car il a détecté la condition de surcharge comme une condition de défaut. Alors que le relais différentiel numérique a pu analyser correctement l'état de la surcharge comme indiqué dans l'Organigramme (Figure III.20), et n'a pas envoyé le signal de déclenchement au disjoncteur pour couper l'alimentation. Les figures (III.29 et III.30) ci-dessous montrent le comportement des signaux de sortie des relais différentiels conventionnels et numériques en cas de surcharge, respectivement.

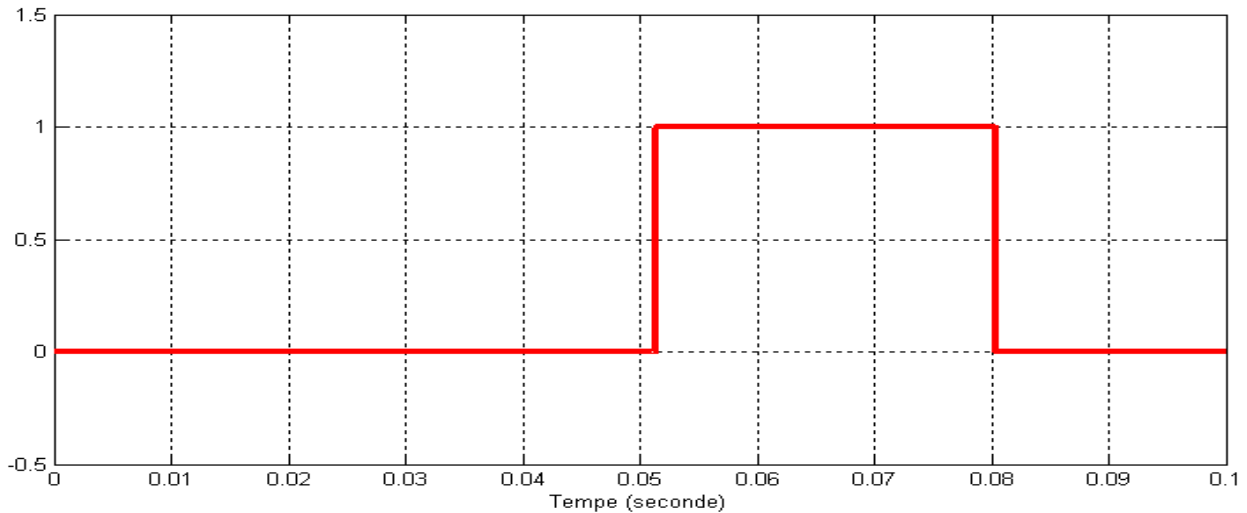


Figure III.29 Signal de sortie de relais différentiel conventionnel

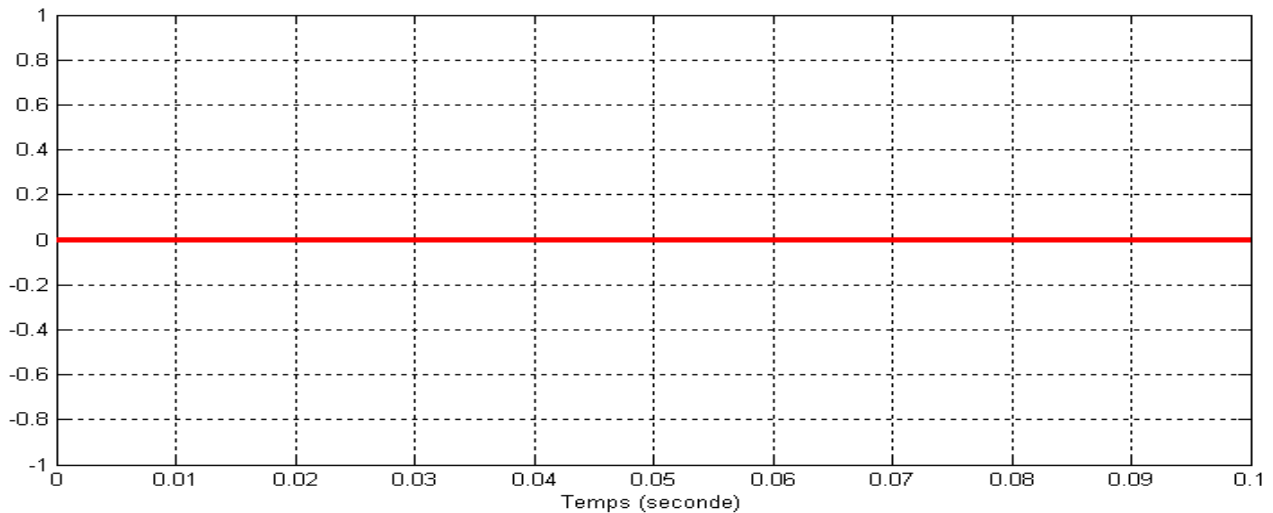


Figure III.30 Signal de sortie de relais différentiel numérique.

III.3 Simulation d'un transformateur chargé avec un défaut triphasé

Dans cette partie, on applique un défaut triphasé interne pour tester la sécurité de la protection numérique. Après la fermeture de CB1 à 0,02 seconde et CB2 à 0,04 seconde, un défaut interne est créé à 0,06 seconde.

Sur le même système, le programme Matlab/Simulink illustré à la figure III.26, nous ajoutons le bloc défaut et sélectionnons un défaut triphasé et effectuons la simulation

Les figures (III.31 et III.32) montrent les courants primaire et secondaire d'un transducteur chargé avec une erreur ajoutée de 0,06 s. Les figures (III.33 et III.34) montrent le traitement des relais différentiels conventionnels et numériques respectivement, dans ce cas

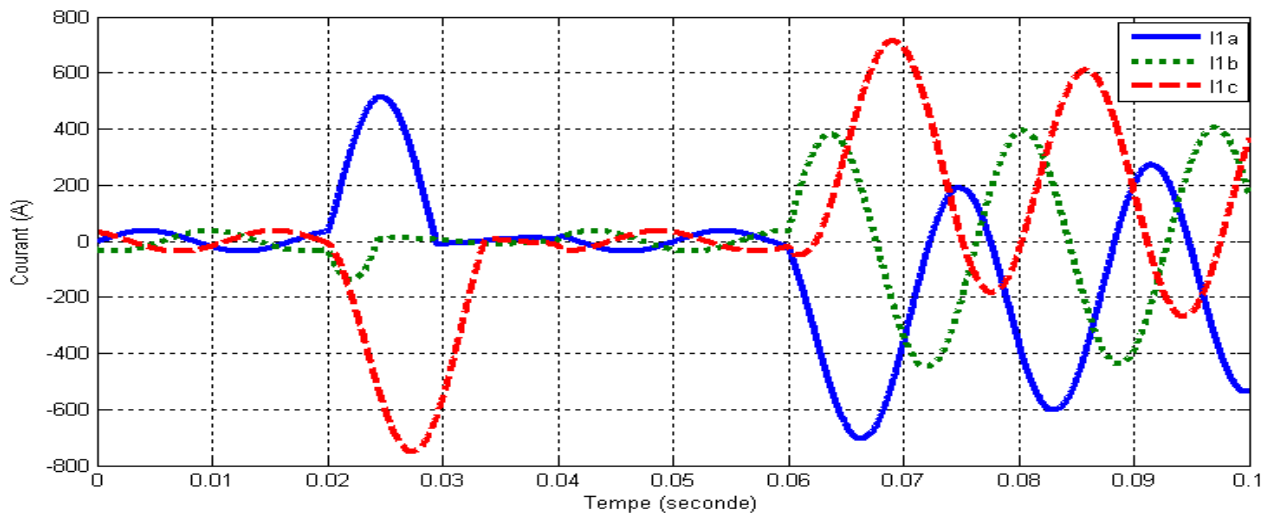


Figure III.31 Courants primaires

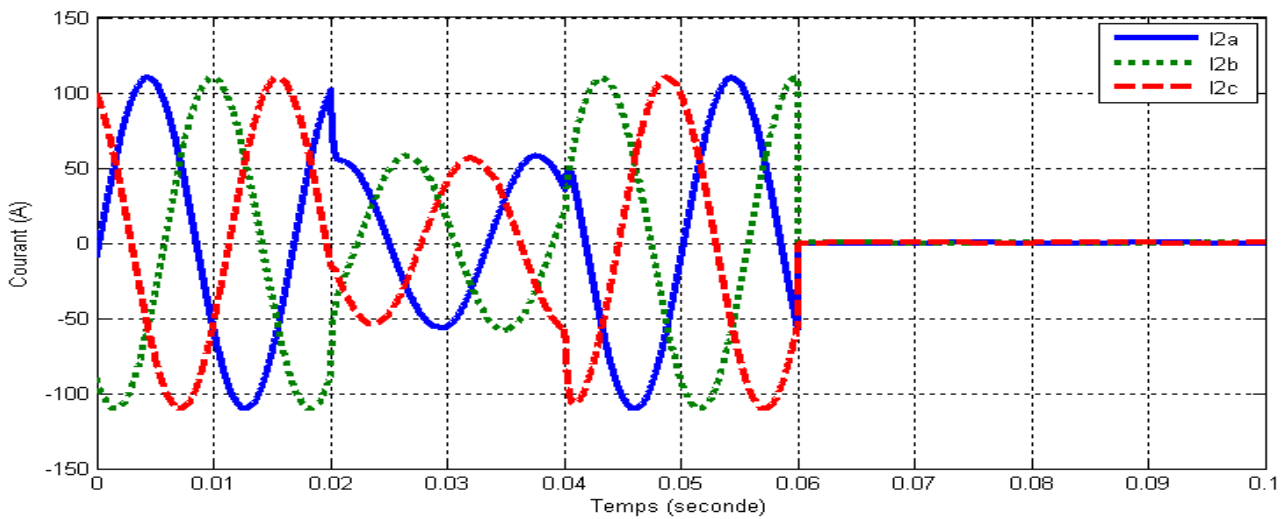


Figure III.32 Courants secondaires

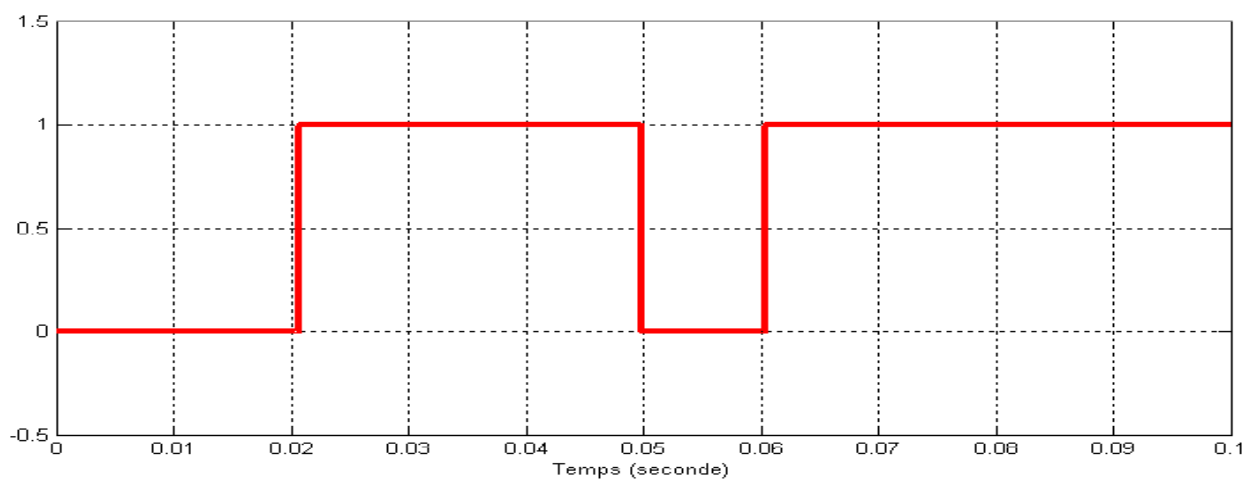


Figure III.33 Signal de sortie de relais différentiel conventionnel.

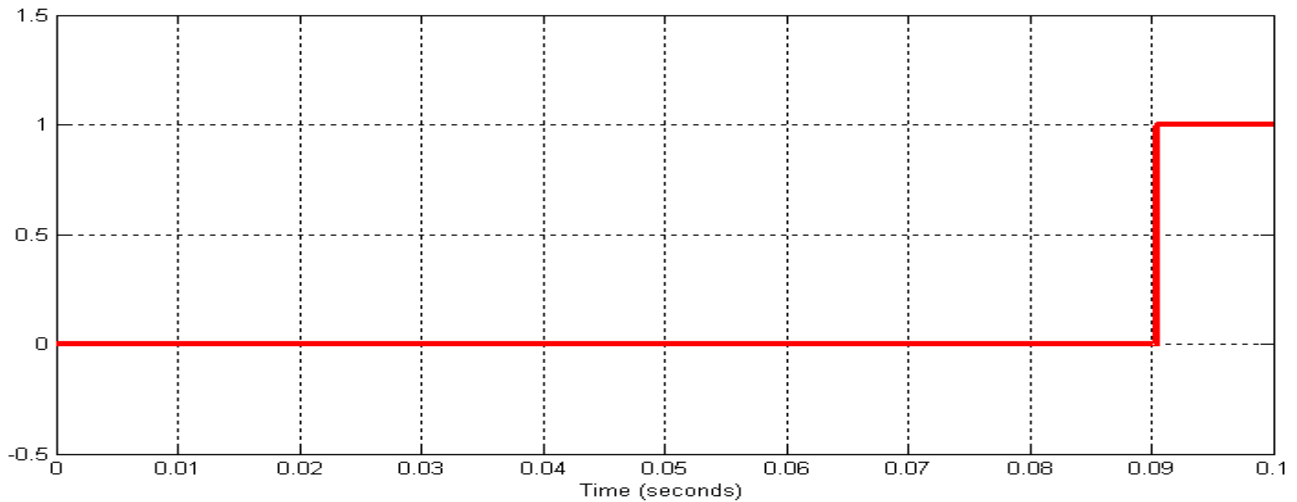


Figure III.34 Signal de sortie de relais différentiel numérique avec temporisation.

Dans le cas d'une augmentation de la charge du transformateur de puissance avec l'ajout d'un défaut triphasé, les courants primaire et secondaire sont représentés sur les figures (III.31 et III.32). Comme cela peut provoquer l'augmentation de la charge et le défaut de fonctionnement du signal de déclenchement du relais différentiel traditionnel, il n'a donc pas réussi à identifier la solution au défaut et à la condition de surcharge Figure (III.33). Quant au relais différentiel numérique, il a réussi à faire la différence entre la condition de surcharge et n'envoie pas le signal de déclenchement, et la condition de défaut, il envoie donc le signal de déclenchement pour ouvrir le disjoncteur différentiel Figure (III.34).

IV Simulation d'un transformateur à vide où le rapport entre le courant harmonique et le courant différentiel est inférieur à 0,3 :

Nous protégerons le transformateur à l'aide d'une protection différentielle numérique contre le Courant d'appel magnétisant provoquant un défaut dans le transformateur. Dans ce cas, le courant harmonique est supérieur à $0,7I_F$ ou inférieur à $0,3I_F$.

Nous allons simuler ce cas à l'aide du graphique suivant. Voir la conductivité du relais différentiel numérique

IV.1 Schéma de protection différentielle numérique :

Cette implémentation se fait à l'aide de l'environnement Matlab/Simulink. La figure III.35 montre le système d'alimentation simulé construit dans l'environnement Matlab/Simulink. Dans lequel un transformateur de puissance triphasé, 200 MVA, 60 Hz, (735/315) kV, Y/D est utilisé dans ce système. Le contenu de chaque bloc conçu est illustré dans des figures séparées III.36 et III.37.

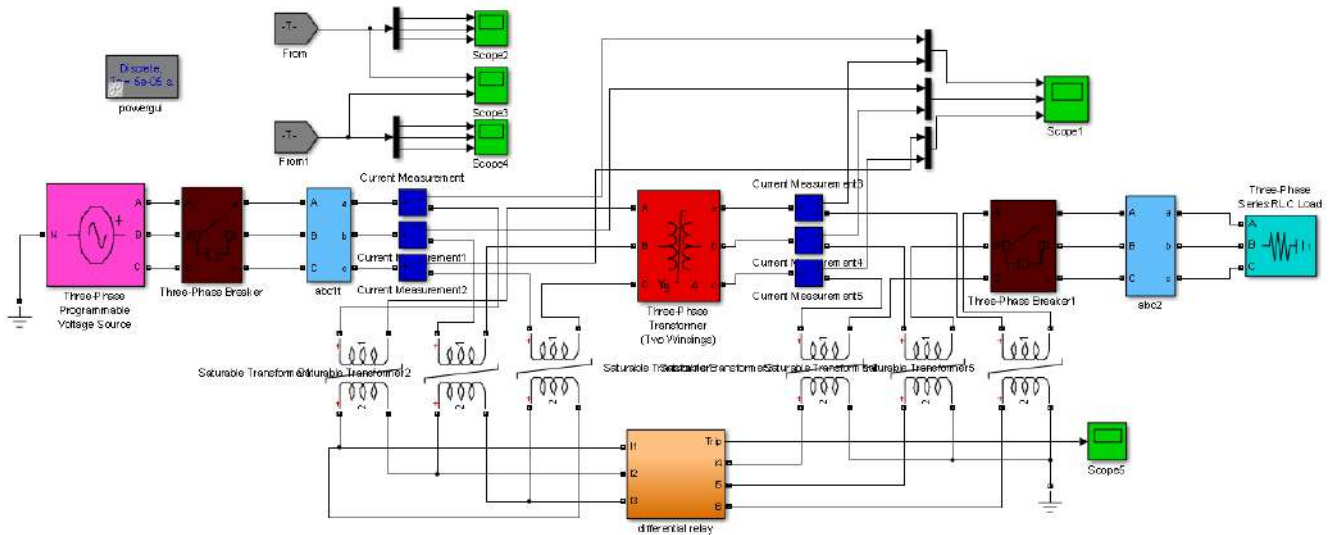


Figure III.35 Modèle Matlab/Simulink du système proposé.

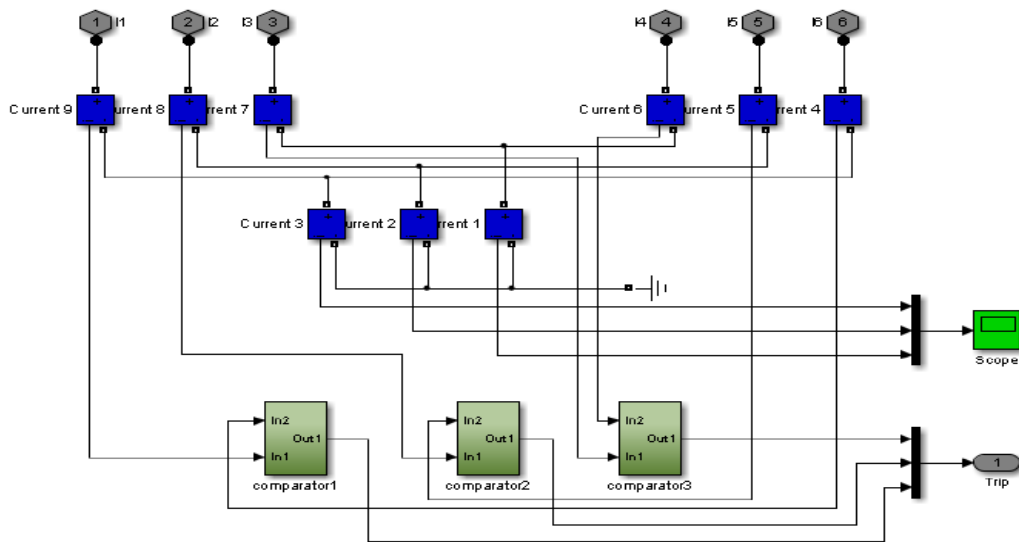


Figure III.36 Contenu du bloc de relais différentiel.

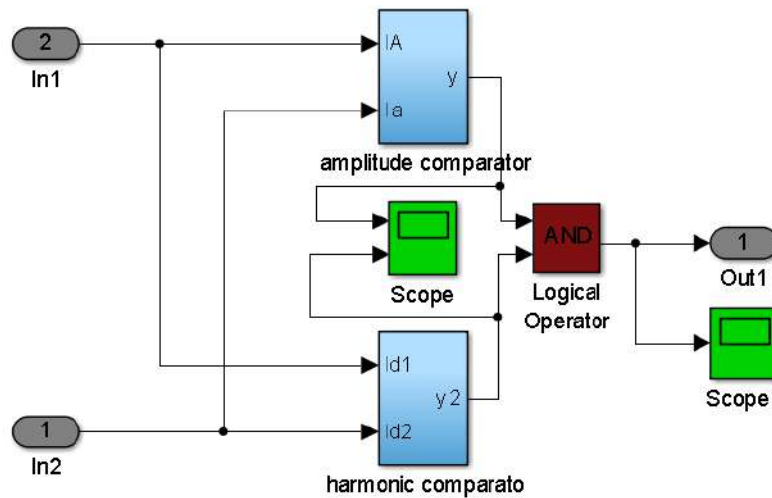


Figure III.37 Le contenu du bloc comparateur.

Dans cette section de simulation, lorsque le côté primaire CB1 est fermé à 0,1 s, seul le courant d'appel circule dans le circuit primaire du transformateur de puissance et aucun courant ne traverse le transformateur de puissance vers le côté secondaire, comme illustré à la Figure III.35. le comparateur d'harmoniques montre sur la Figure III.38 que la valeur de la 2e harmonique est inférieure à 0,3 de la composante fondamentale.

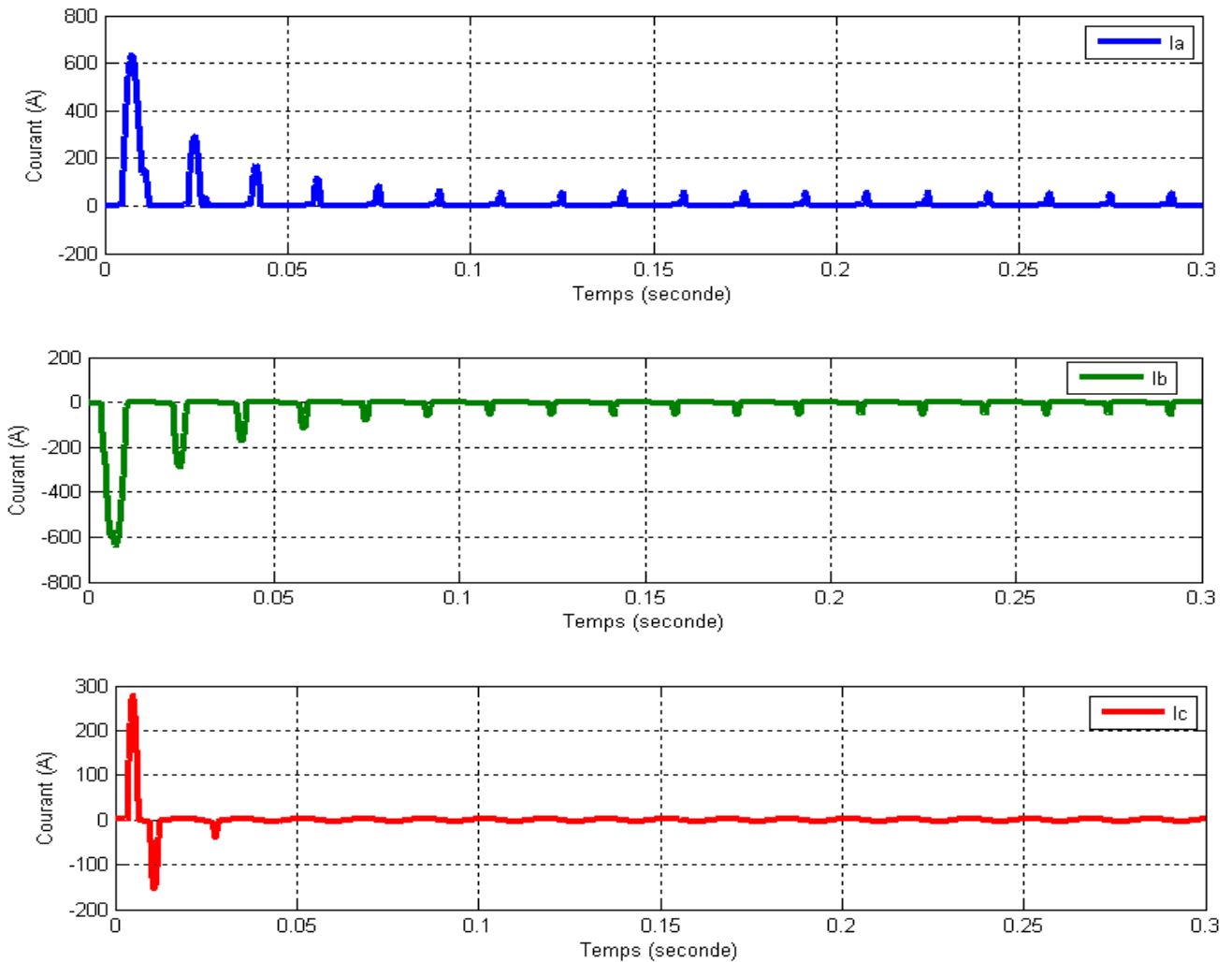


Figure III.38 Formes d'onde des courants d'appel des trois phases.

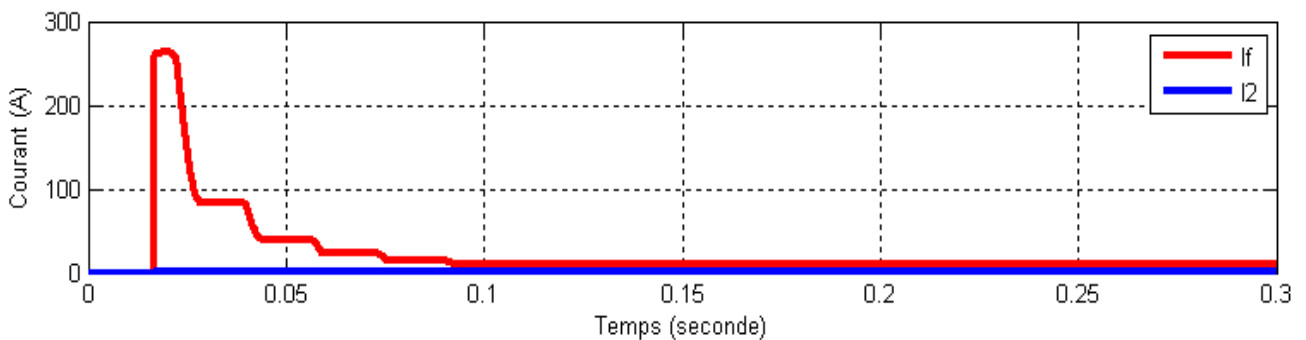


Figure III.39 Résultats du comparateur d'amplitude.

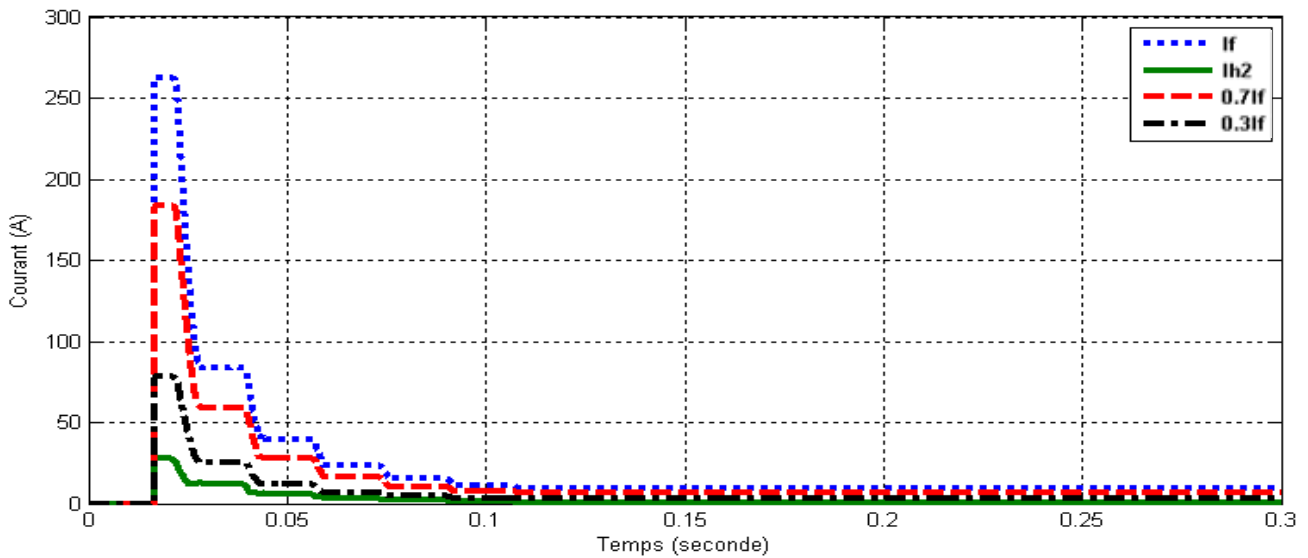


Figure III.40 Résultat du comparateur harmonique la 2e harmonique et la composante fondamentale

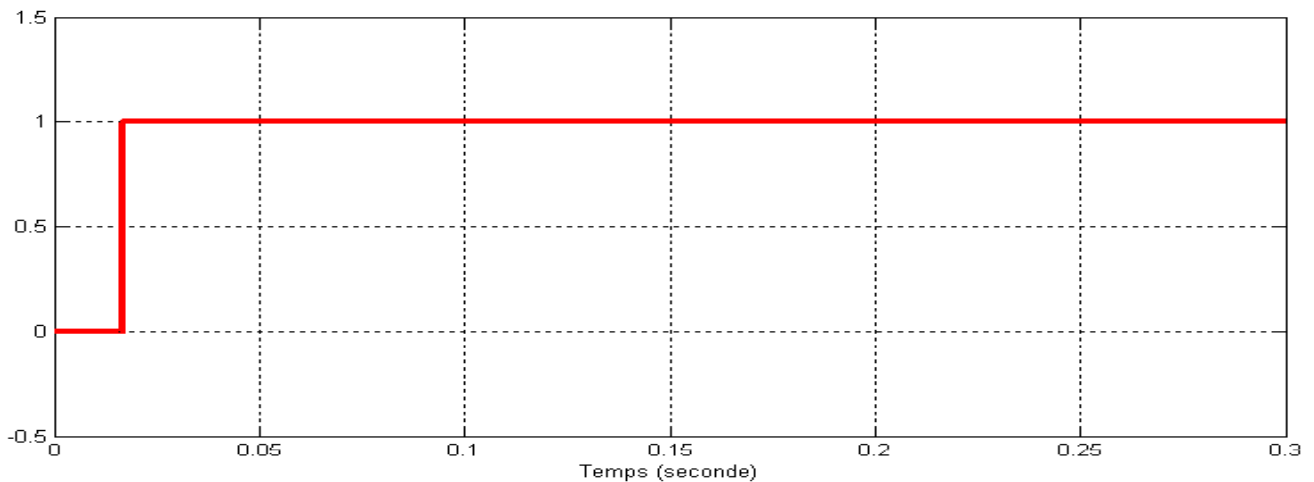


Figure III.41 Signal de sortie de relais différentiel numérique.

Sur la Figure III.38 on remarque que le courant ne respecte pas la condition ($0.3F_1 < F_2 < 0.7F_1$) selon l'Organigramme de la Figure III.20. Il s'agit d'un cas de défaut interne au transformateur. Le relais différentiel numérique envoie le signal de déclenchement au disjoncteur différentiel pour couper l'alimentation directement, comme illustré à la Figure III.34.

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la protection différentielle des transformateurs contre les défauts internes et externes à l'aide de la protection différentielle. Nous avons comparé les relais différentiels traditionnels avec les relais différentiels numériques, où nous avons constaté que les relais différentiels numériques donnent plus d'efficacité et sont plus précis pour distinguer les conditions de défaut, les états de courant de flux magnétique et les conditions de surcharge.



Conclusion générale



Conclusion générale

La protection du réseau électrique est assurée par les relais qui surveillent en permanence les éléments du système d'énergie électrique. Il nous a paru nécessaire de donner assez d'informations sur les différents éléments qui composent un système de protection. Ces éléments sont très importants, très sensibles et doivent être bien choisis et bien réglés afin d'assurer une protection efficace contre les différents types d'anomalies qui peuvent survenir sur le réseau électrique [18].

Une protection différentielle est simple et offre la meilleure protection contre les défauts de phase et de terre du transformateur de puissance. Il est relativement simple à mettre en oeuvre, mais elle présente des limites en raison de sa faible sécurité. Pour éliminer ces inconvénients, la protection différentielle conventionnelle a été développée en protection différentielle numérique en de nombreuses techniques et davantage de calculs [14].

Le but de ce travail de master est était d'étudier les différentes stratégies de protections de transformateurs contre les défauts interne ou externe qui peuvent affecter la stabilité des réseaux électriques et interrompre la continuité de service et engendrer des pertes financières importantes pour les industriels et des désagréments pour consommateurs. en comparant entre les relais différentielles conventionnels et numériques les résultats obtenus sont très encourageants en terme de sensibilité et de rapidité ainsi qu'en terme de fiabilité.

Le premier chapitre présente les différents types de transformateurs de puissance et leur fonctionnement dans le réseau électrique, ainsi que de distinguer les différents défauts reçus par le transformateur de puissance, leur degré de gravité et la l'étendue des dommages qui pourraient lui être causés.

Le chapitre 2, comporte des détails sur la philosophie de la protection des transformateurs de puissance, nous avons également abordé la protection de différents types et approfondi les relais différentiels. Et la manière d'intervenir pour protéger le relais.

Le troisième chapitre, consacré à la simulation avec le logiciel de simulation Matlab-Simulink afin de faire une analyse complet sur la protection différentielle conventionnelle et numérique pour la protection des transformateurs de puissance, il rassemble la philosophie et les résultats de la simulation, une approche de fonctionnement de la protection différentielle a été proposé, les deux modèles de simulation sont exécuté pour des différents cas de fonctionnement, les résultats de simulation montre une performance de la protection différentielle, elle assure une grande sensibilité aux défauts internes et une stabilité durant les défauts externes.

Ensuite nous avons fait une comparaison entre la protection différentielle conventionnelle et la protection différentielle numérique pour analyser la différence entre les deux protections utilisées précédemment pour voir la meilleure méthode de protection. Donc, nous avons conclu que la protection différentielle numérique est plus rapide et précise que la protection différentielle conventionnelle.

En perspective de ce travail, nous espérons que ce modeste travail de master malgré que le domaine de la protection des transformateurs de puissance est vaste et présente beaucoup de paramètres, soit un bon guide pour nos successeurs et qu'ils utilisent des techniques de l'intelligence artificielle tels que les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques pour réaliser un détecteur, classifieur et localisateur des défauts dans les lignes de transmission d'énergie électrique.

Références bibliographies

- [1] T. Zar,K.Myint ,P.Ayem « Modelling and Simulation of Protection for Power Transformer at Primary Substation by Using Differential Protection » International Journal of Science and Engineering Applications Volume 7 ,2018.
- [2] A.Demane , A.Alili « Amélioration de la protection d'un transformateur de puissance » Université Mohamed Boudiaf M'sila,2018
- [3] Mr. REKIK BADRI, «Etude et modélisation des défauts des transformateurs de puissance» , Université Badji Mokhtar , ANNABA, 2008
- [4] S.Djaouti,M.Serradj, «Etude de la protection d'un transformateur principal 533MVA» Université SAAD DAHLAB de BLID,2016
- [5] J.Sanchez « Aide au diagnostic de d'efauts des transformateurs de puissance » DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE Français. 2 Jul 2014.
- [6] M,López-Fernández ,H. B.Ertan ,J. Turowski « Transformers: analysis, design, and measurement»Boca Raton : CRC Press, 2013
- [7] S.Eke«Stratégie d'évaluation de l'état des transformateurs : esquisse de solutions pour la gestion intégrée des transformateurs vieillissants» THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON opérée au sein de l'Ecole centrale de Lyon Université de Lyon, Français,2018.
- [8] Internal and external faults in power transformer, <https://www.electrical4u.com/external-and-internal-faults-in-transformer>
- [9] IEEEStandar.« IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation, Analysis, and Reporting for Power Transformers and Shunt Reactors ». IEEE Std C57.125-2015 (Revision of IEEE Std C57.125-1991). Décembre 2015. p. 1-84.
- [10] J.Jagers,S.Tenbohlen« Evaluation of transformer reliability data based on national and utility statistics ». In : 16th International Symposium on High Voltage Engineering , 2009.
- [11] Cigré. « An international survey on failures in large power transformers ». In : e-cigré ELT_088.
- [12] S.Yacine ,C.Madjid, G.Farid. « ETUDE DES PROTECTIONS D'UN DEPART» , Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou,2013
- [13] Z.Mohamed, «Étude des protections des réseaux», UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE,2010
- [14] Omrani Aouatef, «Protection et maintenance», Université Mohamed Khider de Biskra,2019.
- [15] T.Abdelhak , «Protection d'un Transformateur de Puissance», Université Mohamed Khider de Biskra,2019.

- [16] M.Bouakouk, R.Hadjebar,« Diagnostic des transformateurs », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2014
- [17] A.Alaoua., A.Arezki ,A.Belaid , «Protection d'un transformateur MT/BT», Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou.2010
- [18] A.Aktaibi, A.Rahman , «Digital Differential Protection of Power Transformer Using Matlab»,Memorial University of Newfoundland, Canada
- [19] illustrationprize ,<https://illustrationprize.com/fr/629-percentage-differential-relay.html>
- [20] MA Rahman, A. Gangopadhyay, "Simulation numérique des courants d'appel magnétisants dans les transformateurs triphasés", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.
- [21] [Difference Between FFT and DFT \(With Table\) – Ask Any Difference](#)

Résumé

Le transformateur de puissance est l'équipement le plus cher en énergie électrique système nécessitant une surveillance continue et une réponse de protection rapide.

Le relais différentiel est généralement utilisé dans le schéma de protection des transformateurs de puissance.

Cette protection compare la différence de courants entre les transformateurs côtés primaires et secondaires, avec lesquels un signal de déclenchement au circuit disjoncteur est affirmé. Cependant, lorsque les transformateurs de puissance sont alimentés, le courant d'appel magnétisant est présent et en raison de sa grande amplitude, le relais mal-fonctionne. Pour éviter les dysfonctionnements, des méthodes tournant autour du fait que le relais doit être capable de faire la distinction entre l'appel magnétisant courant et le courant de défaut doivent être étudiés

Dans ce mémoire, nous apprendrons les erreurs et les défauts qui causent la perturbation des transformateurs de puissance, qui se répètent constamment, ainsi que les solutions qui peuvent résoudre le problème auquel le transformateur est confronté.

Et étudier la protection du transformateur sous ses différentes formes et types, et connaître le principe de son fonctionnement.

Enfin, une simulation du système de protection de relais différentiel pour le transformateur dans le réseau électrique, à l'aide du programme MATLAB, et comment il peut protéger le transformateur de puissance des défauts internes et externes auxquels il est exposé, en le commentant et en recherchant un moyen pour le développer à l'avenir.

Abstract

Power transformer is the most expensive equipment in electric power system requiring continuous monitoring and fast protection response.

The differential relay is generally used in the protection scheme of power transformers.

This protection compares the difference in currents between the primary and secondary side transformers, with which a trip signal to the circuit breaker is asserted. However, when the power transformers are energized, the magnetizing inrush current is present and due to its large amplitude, the relay malfunctions, to avoid malfunctions, methods revolving around the fact that the relay must be able to distinguish between the magnetizing inrush current and the fault current must be studied.

In this dissertation, we will learn the errors and faults that cause the disturbance of power transformers, which are constantly repeated, as well as the solutions that can solve the problem that the transformer is facing, and study the protection of the transformer in its various forms and types, and know the principle of its operation finally, a simulation of the differential relay protection system for the transformer in the power grid, using the MATLAB program, and how it can protect the power transformer from internal and external faults to which it is exposed, commenting on it and looking for a way to develop it in the future.

ملخص

محولات الطاقة هي أعلى المعدات في نظام الطاقة الكهربائية وتتطلب مراقبة مستمرة واستجابة الحماية بسرعة. يستخدم المرحل التفاضلي بشكل عام في مخطط حماية محولات الطاقة.

تقارن هذه الحماية الفرق في التيارات بين المحولات الجانبية الأولية والثانوية، والتي يتم من خلالها تأكيد إشارة الرحلة إلى قاطع الدائرة. ومع ذلك، عندما يتم تنشيط محولات الطاقة، يكون تيار التدفق الممغنط موجودًا وبسبب اتساعه الكبير، يحدث خلل في الترحيل. لتجنب الأعطال، يجب التحقيق في الأساليب التي تدور حول حقيقة أن المرحل يجب أن يكون قادرًا على التمييز بين تيار التدفق الممغنط وتيار العطل. سنتعرف في هذه المذكرة على الأخطاء والأعطال التي تسبب اضطراب محولات الطاقة والتي تتكرر باستمرار وكذلك الحلول التي يمكن أن تحل المشكلة التي يواجهها المحول.

ودراسة حماية المحول بمختلف أشكالها وأنواعها ومعرفة مبدأ تشغيلها. وأخيرًا محاكاة لنظام حماية التتابع التفاضلي للمحول في شبكة الكهرباء باستخدام برنامج ما طلاب و حماية محول الطاقة من الأعطال الداخلية والخارجية التي يتعرض لها والعمل من أجل تطوير هذه الحماية في المستقبل