



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux électriques

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Djelloul Oumhani

Le : 04/06/2025.

Simulation d'un système de protection à max de courant directionnel

;;;

Jury :

Pr.	Ghoggal Adel	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	Cheriet Ahmed	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Boussabeur Mohamed Tayeb	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024/2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux électriques

Réf. :

Simulation d'un système de protection à max de courant directionnel

Le : 04/06/2025

Présenté par :

Djelloul Oumhani

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. Cheriet Ahmed

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Remerciement

Après avoir remercié le dieu le tout puissant qui nous a donné la volonté, la santé et la patience.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon professeur encadrant Cheriet Ahmed

pour son accompagnement constant, ses précieux conseils et son soutien tout au long de cette recherche de fin d'études. Son expertise, sa disponibilité et sa bienveillance ont été déterminants dans la réalisation de ce travail.

Je remercie sincèrement les professeurs membres du comité de discussion d'avoir accepté de consacrer de leur temps pour discuter de ma recherche de fin d'études.

Je tiens également à remercier tous les enseignants de mon département de génie électrique (électrotechnique) à Biskra, qui ont toujours donné le meilleur d'eux-mêmes afin de m'assurer une formation de qualité.

Djelloul Oumhani.

Dédicace

Je dédie ce travail

*À celui dont je porte le nom avec fierté, à celui qui a
récolté des épines de mon Seigneur pour m'ouvrir la
voie du savoir, mon cher père,
Monsieur. DJelloul larafi*

*À la main invisible, au cœur tendre et à celui qui
prie sincèrement, ma chère mère,
Madame. Nouari Fouzia*

*À ceux avec qui j'ai renforcé mon soutien, et ils
étaient des sources dont je pouvais boire jusqu'à mes
meilleurs et purs jours, mon frère Hamma et mes
soeurs Selma et Loudjain*

*À ceux que j'ai voulu assister à mon diplôme, mon
cher grand-père Djelloul Hamma, ma chère grand-
mère Bernaui Salima, et mon cher oncle Masawi
Abdel Salam, que Dieu ait pitié de vous et vous fasse
habiter dans ses vastes jardins*

*À ma chère grand-mère, Nouari Fatima, que Dieu
prolonge ta vie*

*À ma compagne, amie de l'âme et sœur que ma mère
n'a pas mise au monde, Youssra Adissa*

À la famille et aux amis, chacun en son nom

Djelloul Oumhani.

Résumé

La thématique générale repose sur la protection des réseaux électriques qui attache à diminuer le nombre des perturbations, limiter leur durée, et à accélérer au maximum la reprise du service normale. Parmi les protections les plus utilisées dans les réseaux électriques, on trouve la protection à maximum de courant directionnel. Notre travail est consacré principalement à la simulation d'une protection à maximum de courant directionnel par le logiciel SIMULINK de MATLAB. Cette protection est appliquée à un réseau électrique composé de deux lignes, soumis à un court-circuit, afin d'évaluer leur efficacité.

Les mots clés : protection à max de courant directionnelle,, inversion du courant,simulation.

Abstract

The general theme is based on the protection of electrical networks, aiming to reduce the number of disturbances, limit their duration, and accelerate the restoration of normal service as much as possible. Among the most commonly used protection systems in electrical networks is directional overcurrent protection. Our work is primarily dedicated to the simulation of directional overcurrent protection using MATLAB's SIMULINK software.

The proposed protection is applied to an electrical network consisting of two lines subjected to a short circuit, in order to evaluate their effectiveness.

Key Words: directional overcurrent protection, current reversal, simulation.

الملخص

يعتمد الموضوع العام على حماية الشبكات الكهربائية ، التي ترتبط بتقليل عدد الاضطرابات ، وتحديد مدتها ، وتسريع استئناف الخدمة العادية قدر الإمكان . من بين الحماية الأكثر استخداماً في الشبكات الكهربائية الحماية عند الحد الأقصى للتيار الاتجاهي. عملنا مخصص بشكل أساسي لمحاكاة الحماية مع أقصى تيار اتجاهي من خلال برنامج SIMULINK من MATLAB . تم تطبيق هذه الحماية على شبكة كهربائية مكونة من خطين، معرضة لقصر كهربائي، من أجل تقييم مدى فعاليتها.

الكلمات المفتاحية :أقصى حماية اتجاهية للتيار، انعكاس التيار، المحاكاة.

LISTE DES MATIERES

Liste des matières	I
Liste de figures	IV
Liste des tableaux.....	X
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques	
I.1 Introduction	2
I.2 Définition d' un réseau électrique.....	2
I.3 Types des réseaux électriques	3
I.3.1 Réseaux radial	3
I.3.2 Réseaux bouclé.....	4
I.3.3 Réseaux maillée.....	4
I.4 Niveaux de tension	5
I.5 Regimes du neutre	6
I.5.1 Schema IT.....	6
I.5.2 Schema TT.....	6
I.5.3 Schema TN	7
I.6 Qualité de l' énergie électrique.....	8
I.6.1 Qualité de la tension.....	8
I.6.1.1 Amplitude	8
I.6.1.2 Fréquence.....	9
I.6.1.3 Forme d'onde.....	9
I.6.2 Qualité du courant.....	9
I.7 La stabilité d' un réseau électrique	10
I.7.1 Stabilité de l'angle du rotor	10
I.7.2 Stabilité de fréquence.....	10
I.7.3 Stabilité de Tension.....	10
I.8 Conclusion	11
CHAPITRE II : Les défauts dans le réseau électrique	

II.1 Introduction.....	13
II.2 Les courts- circuits	13
II.2.1 Définition d'un défaut de court-circuit	13
II.2.2 Origines d'un défaut de court-circuit	13
II.2.3 Les types de défauts dans le réseau électrique	14
II.2.4 Classification des courts-circuits selon la durée	15
II.2.5 Conséquences des défaut de court-circuit	15
II.3 Les surcharges.....	16
II.3.1 Définition d'une surcharge.....	16
II.3.2 Origines d'une surcharge	17
II.3.3 Conséquences d'une surcharge	17
II.4 Les surtensions	17
II.4.1 Définition d'une surtension.....	17
II.4.2 Origines d'une surtension	17
II.4.2.1 Surtension à fréquence industrielle	17
II.4.2.2 Surtensions causées par défaut d'isolement.....	18
II.4.2.3 La rupture de continuité de neutre	18
II.4.2.4 Surtension de manœuvre	18
II.4.2.5 Surtension atmosphériques	18
II.5 Les oscillations	20
II.5.1 Définition d'une oscillation.....	20
II.5.2 Origines des oscillations	20
II.5.3 Conséquences des oscillations	21
II.3 Conclusion	21

CHAPITRE III : Le système de protection

III.1 Introduction.....	23
III.2 Description d'un système de protection	23
III.2.1 Schéma synoptique d'un système de protection.....	23
III.2.2 Réducteurs de mesure.....	24
III.2.2.1 Transformateur de courant.....	25
III.2.2.2 Transformateur de tension	25
III. 2.3 Relais.....	26
III. 2.3.1 Principes de fonctionnement des relais de protection	26
III.2.3.2 Les types des relais	27
III.2.3.3 Relais de mesure de courant.....	30
III.2.3.4 Relais de mesure de tension	31
III.2.3.5 Relais de mesure d'impédance.....	31
III.2.3.6 Relais de mesure de puissance	31
III.2.3.7 Relais directionnel	31
III.2.3.8 Relais différentiel.....	32
III.2.4 Disjoncteur.....	32
III.3 Fonction de protection.....	33
III.3.1 Protection à max de courant.....	34
III.3.2 Protection à max de courant directionnel.....	36
III.3.3 Protection à min d'impédance (de distance).....	38
III.3.4 Protection contre les défauts à la terre.....	39
III.3.5 Protection différentielle	39
III.3.6 Protection à max de tension.....	40
III.3.7 Protection contre les surcharge	40
III.4 Conclusion.....	41

CHAPITRE IV: Simulation et résultats

IV.1 Introduction	43
IV.2 Environnement de simulation Similink/Matlab	43
IV.3 Simulation d'une protection à max de courant	44
IV.3.1 Description du circuit	44
IV.3.2 Simulation état normal	45
IV.3.3 Simulation avec défaut de court-circuit.....	47
IV.3.4 Simulation avec protection	50
IV.3.4.1 Relais de protection à maximum de courant.....	50
IV.3.4.2 Calcul du seuil de déclenchement	51
IV.3.4.3 Schéma de simulation	51
IV.4 Simulation d'une protection à max de courant directionnelle	55
IV.4.1 Description du circuit	55
IV.4.2 Simulation état normal	55
IV.4.3 Simulation avec défaut de court-circuit.....	58
IV.4.4 Simulation avec protection	61
IV.4.4.1 Relais de protection à max de courant directionnel.....	61
IV.4.4.2 Calcul du déphasage(θ).....	62
IV.4.4.3 Schéma de simulation	62
IV.5 Application.....	67
IV.5.1 Description de l'application.....	67
IV.5.2 Schéma de simulation de l'application	67
IV.5.3 Résultats de la simulation.....	68
IV.5.3.1 Défaut de court-circuit à ligne 1.....	68
IV.5.3.2 Défaut de court-circuit à ligne 2.....	72

IV.6 Conclusion.....	77
CONCLUSION GENERALE.....	79
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1. Schéma du réseau de transport	2
Figure I.2. Schéma du réseau radial.....	3
Figure I.3. Schéma du réseau bouclé	4
Figure I.4. Schéma du réseau maillé.....	5
Figure I.5. Niveaux de tension normalisés	5
Figure I.6. Schéma IT	6
Figure I.7. Schéma TT	7
Figure I.8. Schéma TNC et le schéma TNS	8
Figure I.9. Classification de la stabilité d'un réseau électrique	11

CHAPITRE II

Figure II.1. différents types du court-circuit	14
Figure II.2. Coup de foudre direct	19
Figure II.3. Coup de foudre direct	19

CHAPITRE III

Figure III.1. Constitution d'un système de protection	24
Figure III.2. Transformateur de courant type tore	25
Figure III.3. Schéma électrique simplifié du transformateur de tensions.....	26
Figure III.4. Retardement de (TT) entre phase et terre	26
Figure III.5. Raccordement de (TT) entre phase	26
Figure III.6. Relais électromagnétique.....	28
Figure III.7. Le disjoncteur	33

Figure III.8. Schéma synoptique d'une protection à max de courant	35
Figure III.9. Protection à temps indépendant	35
Figure III.10. Protection à temps dépendant	36
Figure III.11. Schéma synoptique d'une protection à max de courant directionnelle	36
Figure III.12. Réseau à double alimentation affecté par un court-circuit	37
Figure III.13. Schéma protection à min d'impédance	38
Figure III.14. Schéma de la protection différentielle	40

CHAPITRE IV

Figure IV .1. Schéma synoptique du circuit étudié	44
Figure IV .2. Schéma représente la simulation du circuit en état sain	45
Figure IV.3. Tension de la source.....	45
Figure IV.4. Courant de la source.....	46
Figure IV.5. Tension de la charge	46
Figure IV.6. Courant de la charge	47
Figure IV.7. Schéma de simulation du réseau avec défaut.....	47
Figure IV.8. éléments crier le court-circuit.....	48
Figure IV.9. Tension de la source.....	48
Figure IV.10. Courant de la source.....	49
Figure IV.11. La tension de la charge.....	49
Figure IV.12. Courant de charge	50
Figure IV.13. Schéma synoptique d'une protection à max de courant	51
Figure IV.14. Schéma Simulink /Matlab du relais à maximum de courant.....	51
Figure IV.15. Schéma de simulation d'un système de protection à max de courant	52
Figure IV.16. La tension de la source.....	52

Figure IV.17. Le courant de la source.....	53
Figure IV.18. La tension de la charge.....	53
Figure IV.19. Le courant de la charge	54
Figure IV.20. Signal de commande du disjoncteur	54
Figure IV .21. Schéma synoptique du circuit état sain.....	55
Figure IV .22. Schéma représente la simulation du circuit en état sain.....	56
Figure IV.23. Tension de la source.....	56
Figure IV.24. Courant de la source.....	57
Figure IV.25. Tension de la charge.....	57
Figure IV.26. Courant de la charge.....	58
Figure IV.27. Schéma de simulation du réseau avec défaut	59
Figure IV.28. Tension de la source.....	59
Figure IV.29. Courant de la source.....	60
Figure IV.30. Tension de la charge.....	60
Figure IV.31. Courant de la charge.....	61
Figure IV.32. Schéma synoptique d'une protection à max de courant directionnel	62
Figure IV.33. Schéma de simulation du mesurer l'angle (θ).....	62
Figure IV.34. Schéma de simulation d'une protection à max de courant directionnelle.....	63
Figure IV.35. Tension de la source	64
Figure IV.36. Courant de la source	64
Figure IV.37. Tension de la charge	65
Figure IV.38. Courant de la charge	65
Figure IV.39. Signal de commande du disjoncteur	66
Figure IV.40. Le déphasage (θ).....	66

Figure IV .41. Deux lignes avec système de protection directionnel	67
Figure IV.42. Schéma simulink de l'application.....	68
Figure IV.43. Courant de la protection (P1).....	68
Figure IV.44. Courant de la protection (P2).....	69
Figure IV.45. Courant de la charge	69
Figure IV.46. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P1).....	70
Figure IV.47. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P2)	70
Figure IV.48. Courant de la protection (P3).....	71
Figure IV.49. Courant de la protection (P4).....	71
Figure IV.50. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P3).....	72
Figure IV.51. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P4).....	72
Figure IV.52. Courant de la protection (P3).....	73
Figure IV.53. Courant de la protection (P4).....	73
Figure IV.54. Courant de la charge	74
Figure IV.55. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P3).....	74
Figure IV.56. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P4).....	75
Figure IV.57. Courant de la protection (P1).....	75
Figure IV.58. Courant de la protection (P2).....	76
Figure IV.59. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P1).....	76
Figure IV.60. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P2)	77

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE IV

Tableau IV .1. Les principaux éléments utilisés dans ce mémoire.....	44
--	----

INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes de protection électrique sont essentiels pour la sécurité et la performance des réseaux électriques. Ils reposent sur des principes de détection rapide et d'isolement sélectif des défauts. L'objectif principal d'un système de protection consiste alors à détecter et isoler rapidement les équipements défectueux pour maintenir le reste du système en fonctionnement.

L'arrivée de la protection directionnelle a résolu le problème du déclenchement intempestif des disjoncteurs, bien évidemment la solution est faite par la combinaison entre les deux fonctions de protections, à savoir la protection à max de courant et celle directionnelle. La protection directionnelle permet de discriminer la partie du réseau en défaut mieux que ne le fasse une protection à maximum de courant seule. Elle est nécessaire en cas de défaut en présence de plusieurs sources, s'il existe une boucle fermée ou une ligne en parallèle, afin de protéger contre le l'inversion du sens de d'écoulement d'énergie électrique. Les deux fonctions principales d'une protection directionnelle sont :

- Détection de surintensité : le système surveille le courant et déclenche une alarme ou une coupure si le courant dépasse un seuil prédéfini.
- Détection directionnelle : il détermine si le courant de défaut circule dans le sens amont ou aval, ce qui permet de localiser précisément la zone à isoler.

Ce travail est consacré principalement à la proposition d'un modèle de simulation d'une protection à max de courant directionnelle à l'aide de l'environnement Simulink/Matlab. Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre rappelle la définition d'un réseau électrique, les différents régimes de neutre, ainsi que les qualités de l'énergie électrique.

Le deuxième chapitre rappelle les différents types de défauts dans le réseau électrique.

Le troisième chapitre est consacré au concept général de la protection du réseau électrique et ses différents éléments, avec la fonction de protection et la sélectivité.

Le quatrième chapitre a concerné la simulation de différents systèmes de protection en particulier à max de courant directionnelle. Dans ce chapitre, nous avons étudié une application très connue constituée d'une charge alimentée par une source à travers deux lignes électriques indépendantes.

CHAPITRE I

Généralités sur les réseaux électriques



I.1 Introduction

Les réseaux électriques constituent des ensembles d'infrastructures énergétiques destinés à transporter l'énergie électrique depuis les centres de production jusqu'aux consommateurs. Les entreprises responsables de la production et de la distribution de l'électricité poursuivent plusieurs objectifs essentiels :

- Garantir au client la puissance nécessaire.
- Assurer une tension stable.
- Respecter les normes de sécurité.
- Prévenir les répercussions des perturbations générées par un utilisateur sur les autres en choisissant des dispositifs de protection appropriés.

Ces critères sont indispensables à la fois pour le bon fonctionnement du réseau et pour préserver la qualité du service. Dans ce chapitre, on va présenter des généralités sur les réseaux électriques, les Qualité de l'énergie électrique et La stabilité d'un réseau électrique. Puis, nous allons aborder l'Instabilité de tension et Régimes du neutre pour assurer le bon fonctionnement des réseaux électriques.

I.2 Définition d'un réseau électrique

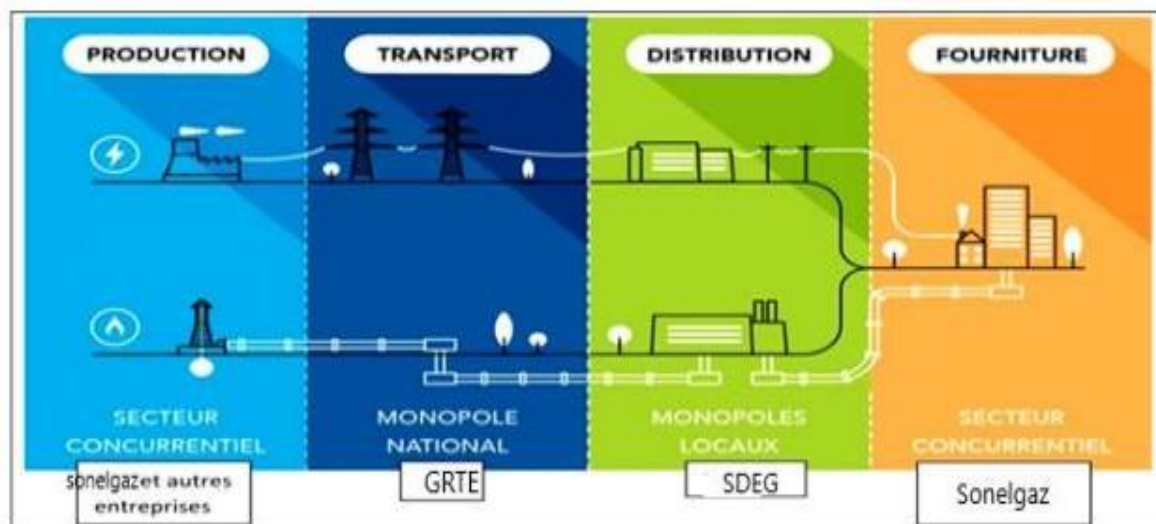


Figure I.1. Schéma du réseau de transport.

Le réseau électrique désigne l'infrastructure reliant la production d'électricité aux usages finaux. Il assure le transport de l'énergie électrique et constitue l'élément central des systèmes électriques, qui englobent la production, le transport, la distribution et la consommation. Ce

réseau est principalement composé de lignes électriques de différentes tensions, interconnectées via des postes électriques. Ces derniers jouent un rôle essentiel dans la répartition de l'électricité et l'adaptation de sa tension à l'aide de transformateurs. Par ailleurs, un réseau électrique doit garantir la gestion dynamique de l'ensemble du processus, de la production à la consommation, en appliquant des réglages destinés à maintenir la stabilité du système.[1]

I.3 Types des réseaux électriques

I.3.1 Réseaux radial

Un réseau radial issu d'un poste d'alimentation se compose de plusieurs artères, chacune se ramifiant progressivement. Cette configuration permet l'existence de points communs entre différentes artères, rendant ainsi le réseau *bouclable* mais non *bouclé* en exploitation normale. En effet, un appareil de coupure est systématiquement installé à ces points communs et maintenu en position ouverte en régime normal. Cette disposition autorise la réalimentation d'une zone en cas d'incident sur une artère.

Les réseaux radiaux présentent une structure simple, pouvant être surveillée et protégée par un appareillage de commande également simple. Ils représentent la solution la moins coûteuse parmi les configurations de distribution.

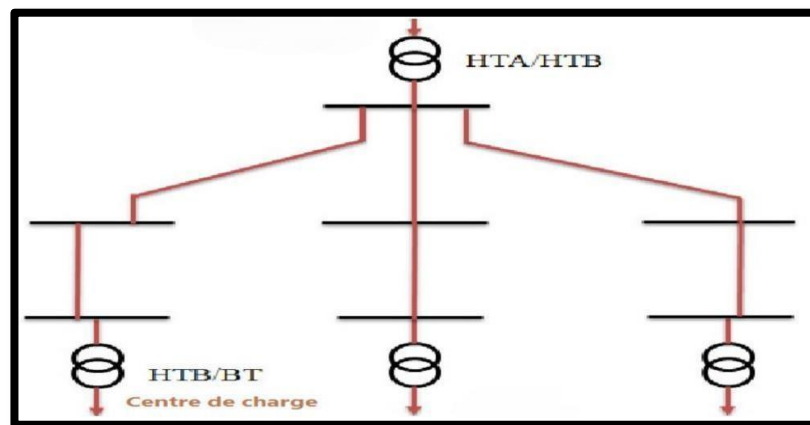


Figure I.2. Schéma du réseau radial.

I.3.2 Réseaux bouclé

Les réseaux bouclés sont alimentés simultanément par plusieurs sources. Les postes de distribution y sont raccordés en coupure d'artère, ce qui permet d'assurer la continuité de service en cas d'interruption sur une section du réseau.

La présence de plusieurs sources en parallèle renforce la sécurité d'alimentation, notamment en cas de défaillance d'un transformateur ou d'une anomalie sur une boucle. Dans ce dernier cas, le tronçon défectueux est isolé, scindant temporairement la boucle en deux parties distinctes.

Il en résulte une structure plus complexe que celle des réseaux radiaux. De surcroît, la commande et la protection de ce type de réseau exigent des dispositifs plus élaborés. Cette configuration est également plus coûteuse, car elle nécessite au minimum deux cellules de départ supplémentaires.

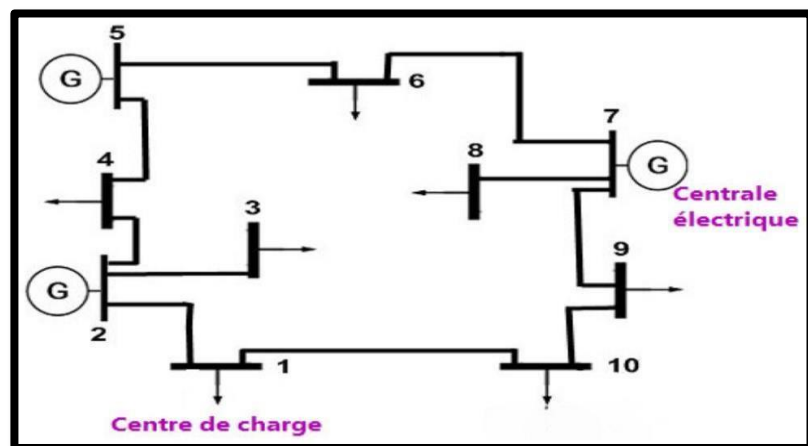


Figure I.3. Schéma du réseau bouclé.

I.3.3 Réseaux maillée

Il s'agit de réseaux dans lesquels toutes les lignes sont bouclées, formant une structure analogue aux mailles d'un filet. De plus, le nombre de sources pouvant injecter de l'énergie en parallèle peut atteindre plusieurs dizaines. Cette architecture requiert que l'ensemble des tronçons de ligne soit dimensionné pour supporter des surcharges permanentes. Elle impose également l'installation, à chaque extrémité, d'appareils de coupure permettant leur isolement en cas de défaillance.

Ce type de configuration assure une sécurité d'alimentation accrue, mais cela engendre un coût nettement plus élevé.[2]

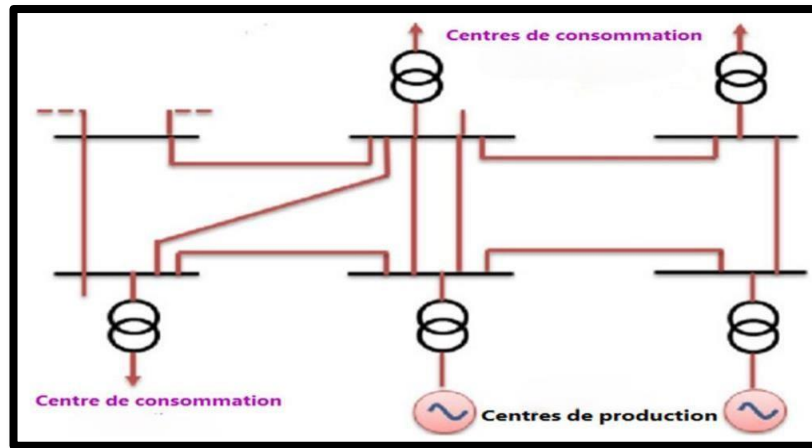


Figure I.4. Schéma du réseau maillé.

I.4 Niveaux de tension

Les tensions normalisées selon la CEI : La nouvelle norme CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définit les niveaux de tension alternative comme suit :

HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV.

HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.

BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.

BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V

TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.

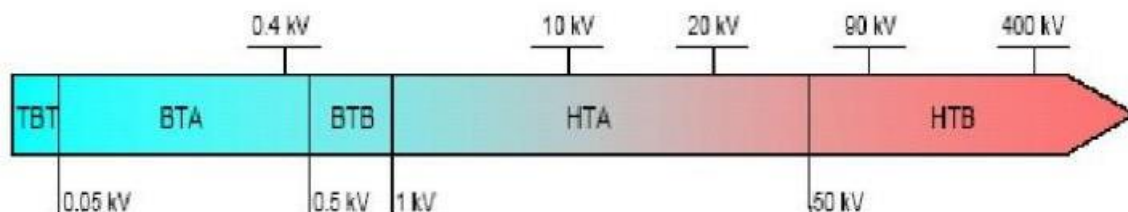


Figure I.5. Niveaux de tension normal.

Nous prendrons par convention dans ce qui suit :

- HTB désignera la Haute Tension HT.
- HTA désignera la Moyenne Tension MT.
- BTB et BTA désignerons le domaine de la Basse Tension BT. [3]

I.5. Régimes du neutre

Dans une installation en Haute ou Basse tension, le neutre peut être relié ou non à la terre, ce qui définit le régime du neutre. Ce régime joue un rôle essentiel dans un réseau. En cas de défaut d'isolement ou de contact accidentel d'une phase avec la terre, les niveaux du courant de défaut, des tensions de contact et des surtensions dépendent directement du mode de raccordement du neutre à la terre. [4]

I.5.1 Schéma IT

Le schéma IT, également connu sous le nom de neutre isolé, est représenté par la figure I.6 Dans ce système, le neutre est soit isolé, soit relié à la terre par une impédance élevée (indiqué par la lettre I). Les masses des récepteurs sont interconnectées, soit en totalité, soit par groupes, chaque groupe étant relié à une prise de terre (indiqué par la lettre T). Certaines masses peuvent également être mises à la terre de manière indépendante. [4]

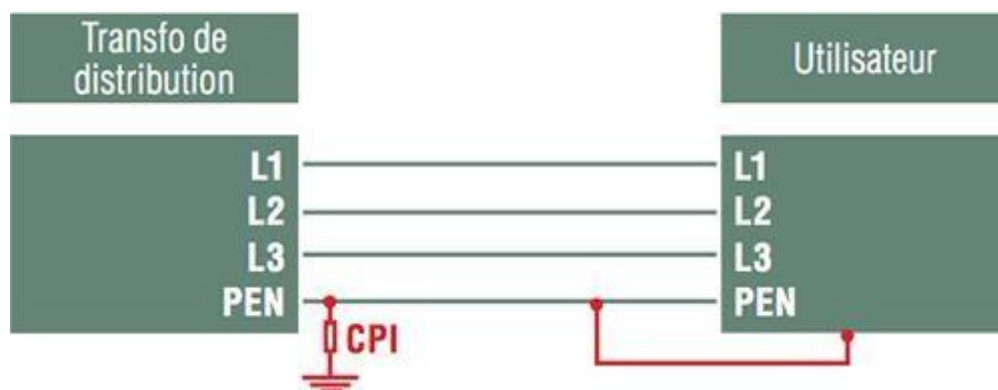


Figure I.6 .Schéma IT

I.5.2 Schéma TT

Le point neutre est directement mis à la terre (première lettre T). Figure 1.7 les masses des récepteurs peuvent être interconnectées de différentes manières (ensemble, par groupes ou individuellement) et sont également reliées à la terre (deuxième lettre T). La protection est

assurée par des dispositifs différentiels résiduels, et toutes les masses protégées par un même dispositif doivent être connectées à une prise de terre commune. [4]

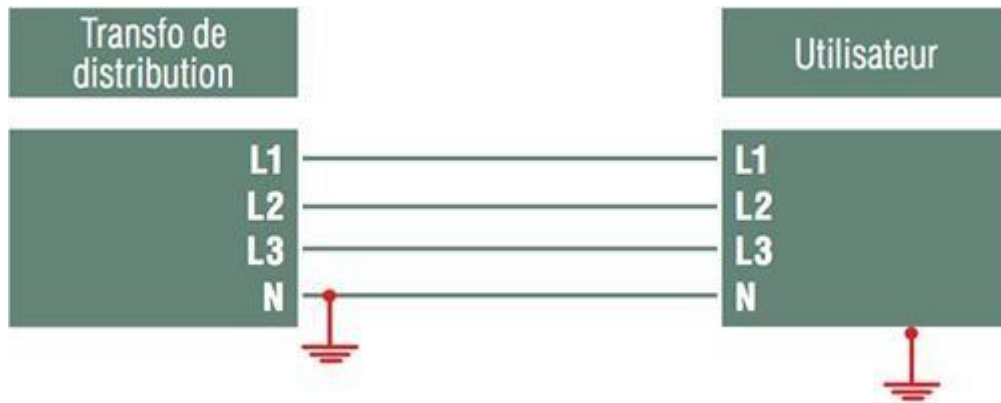


Figure I.7. Schéma TT.

I.5.3 Schéma TN

Le point neutre est directement mis à la terre (lettre T). Les masses des récepteurs sont connectées au conducteur de neutre (lettre N). Il existe deux types de schémas selon que le conducteur de protection du neutre (N) et le conducteur de protection (PE) soient combinés ou distincts.

- Lorsque ces conducteurs sont réunis en un seul appelé PEN, le schéma est désigné par la lettre C et nommé Figure I.8
- Lorsque ces conducteurs sont séparés, le schéma est identifié par la lettre S et appelé TNS. Figure I.8 [4]

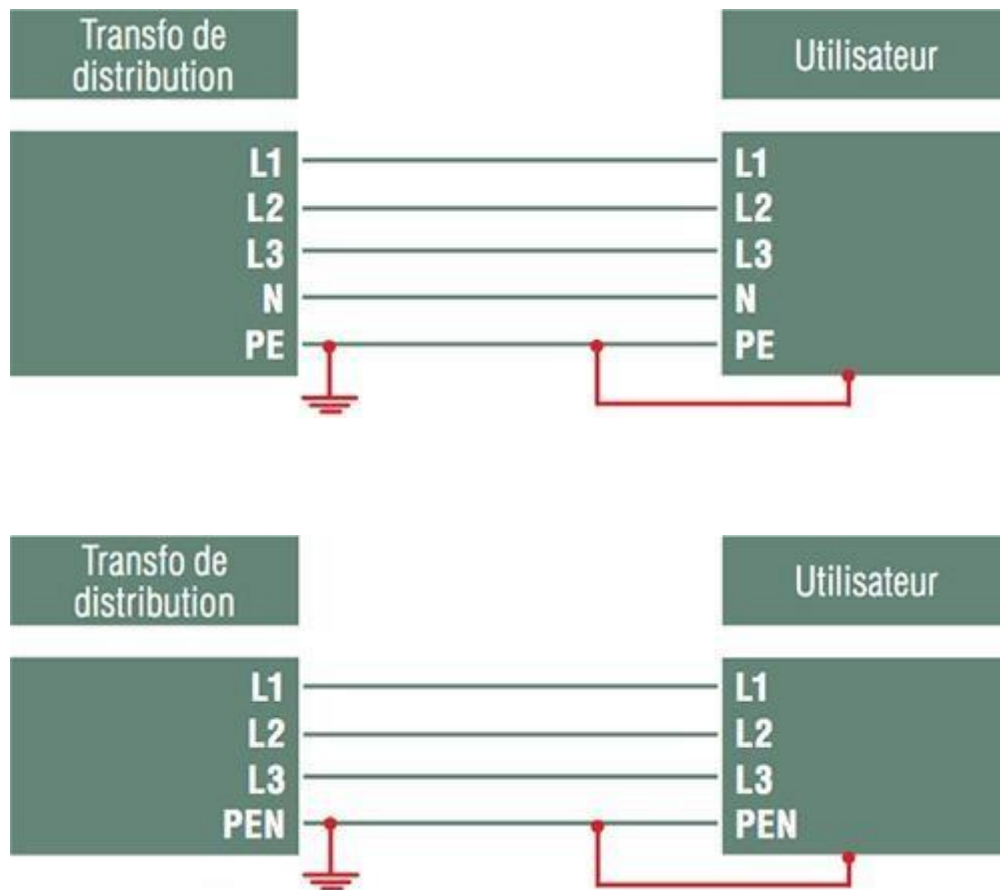


Figure I.8. Schéma TNC et le schéma TNS.

I.6 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe.

I.6.1 Qualité de la tension

En pratique, l'énergie électrique distribuée se manifeste sous la forme d'un système alternatif triphasé, caractérisé par quatre éléments fondamentaux : l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la symétrie.

I.6.1.1 Amplitude

L'amplitude de la tension joue un rôle essentiel dans la qualité de l'électricité et constitue l'un des premiers engagements contractuels du fournisseur d'énergie. En général, elle doit être maintenue dans une plage de $\pm 10\%$ autour de sa valeur nominale. Idéalement, les trois tensions d'un système triphasé ont une amplitude identique et constante. Toutefois, divers phénomènes perturbateurs peuvent altérer cette amplitude.

Selon l'ampleur des variations, on distingue deux grandes catégories de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions, qui entraînent des fluctuations importantes de l'amplitude, souvent causées par des courts-circuits et pouvant gravement affecter les équipements électriques.
- Les variations de tension, caractérisées par des écarts inférieurs à 10 % de la valeur nominale. Ces perturbations résultent généralement de charges fluctuantes ou de modifications dans la configuration du réseau.

I.6.1.2 Fréquence

Dans des conditions idéales, les trois tensions d'un réseau électrique sont alternatives, sinusoïdales et présentent une fréquence stable de 50 ou 60 Hz selon le pays. Toutefois, des variations de fréquence peuvent survenir en raison de pertes significatives de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires, de son passage en réseau séparé ou encore d'un défaut entraînant une chute de tension et une diminution de la charge.

Ces variations restent généralement faibles (inférieures à 1 %) et n'affectent pas le bon fonctionnement des équipements électriques et électroniques. Dans les pays européens où les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 impose que la fréquence mesurée sur une période de 10 secondes soit maintenue dans une plage de ± 1 % autour de 50 Hz pendant 99 % de l'année et dans une plage de -6 % à +4 % en permanence. Il est important de noter que les réseaux autonomes peuvent être soumis à des fluctuations de fréquence bien plus importantes.

I.6.1.3 Forme d'onde

La symétrie d'un système triphasé se définit par l'égalité des amplitudes des trois tensions ainsi que par le respect de leurs déphasages relatifs. Lorsqu'un écart apparaît dans l'un de ces paramètres, on parle alors de déséquilibre du système.

I.6.2 Qualité du courant

La qualité du courant fait référence aux écarts entre les courants réels et leur forme idéale. Elle est définie par les mêmes quatre paramètres que la qualité de la tension : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans un système idéal, les trois courants conservent une amplitude et une fréquence constantes, sont déphasés de $2\pi/3$ radians les uns par rapport aux autres et adoptent une forme sinusoïdale parfaite.

Toutefois, le terme « qualité du courant » est peu utilisé, car celle-ci dépend fortement de la qualité de la tension et des caractéristiques des charges connectées. Pour cette raison, l'expression « qualité de l'énergie électrique » est généralement assimilée à la « qualité de la tension ». C'est cette approche qui sera retenue dans la suite de ce document, où la qualité de l'énergie fera exclusivement référence à celle de la tension. [5]

I.7 La stabilité d'un réseau électrique

I.7.1 Stabilité de l'angle du rotor

La stabilité de l'angle du rotor correspond à la capacité des machines synchrones d'un réseau électrique interconnecté à maintenir leur synchronisme après une perturbation. Elle repose sur l'aptitude à préserver ou rétablir l'équilibre entre les couples électromagnétiques et mécaniques agissant sur le rotor de chaque machine synchrone. En d'autres termes, un système est considéré comme instable si l'écart d'angle entre deux générateurs interconnectés augmente indéfiniment ou si l'oscillation transitoire induite par une perturbation ne s'atténue pas suffisamment durant la période d'évaluation.[6] [7]

I.7.2 Stabilité de fréquence

Un réseau électrique est considéré comme stable en fréquence lorsque celle-ci reste quasiment identique en tout point du système. Elle est mesurée et réglée avec précision afin d'être maintenue dans une plage acceptable après une perturbation. L'instabilité de la fréquence résulte principalement d'un déséquilibre entre la puissance produite et celle consommée. En d'autres termes, certaines perturbations peuvent provoquer un déséquilibre global entre production et consommation d'énergie, entraînant ainsi une variation de la fréquence.[8]

I.7.3 Stabilité de Tension

La stabilité de la tension désigne la capacité d'un réseau électrique à conserver des niveaux de tension acceptables sur chaque jeu de barres après une perturbation. Divers événements, tels qu'une défaillance d'une ligne de transport ou d'un générateur, d'importante Variations de charge ou des modifications de la configuration du réseau, peuvent entraîner une diminution progressive et incontrôlable de la tension, pouvant conduire à un effondrement généralisé du réseau électrique. [8]

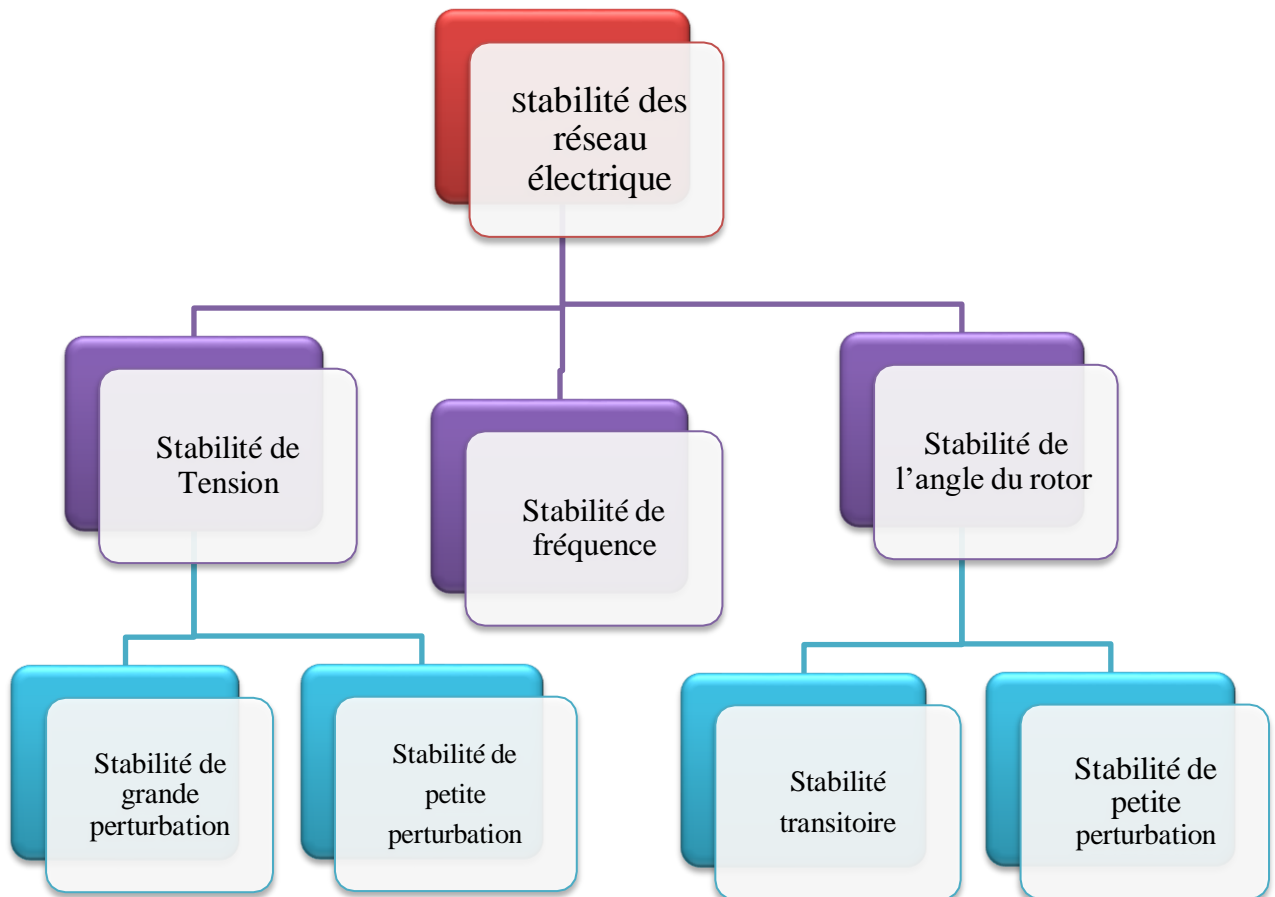


Figure I.9. Classification de la stabilité d'un réseau électrique.

I.8 Conclusion

Les réseaux électriques constituent l'infrastructure essentielle pour la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, avec une complexité croissante liée à la diversité des configurations et des niveaux de tension. Une compréhension approfondie de leur structure et de leur fonctionnement est fondamentale pour garantir la stabilité, l'efficacité et la qualité de l'alimentation électrique. Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition générale des réseaux électriques ainsi que leurs principales typologies, en abordant également les niveaux de tension et les systèmes de neutre. Nous avons ensuite traité la notion de la qualité de l'énergie électrique, tant pour le courant que pour la tension, en incluant également les aspects liés à la stabilité et à l'instabilité du réseau électrique.

CHAPITRE II

Les défauts dans le réseau électrique



II.1 Introduction

Les réseaux électriques, dont la taille et la complexité ne cessent de croître avec le temps, resteront toujours exposés à des défaillances de leurs composants. En cas de panne électrique, il est essentiel d'isoler et de déconnecter le composant défectueux du reste du système électrique afin de limiter les dommages à l'ensemble de la structure intégrée. Cette intervention doit être rapide, précise et assurée par un système de protection intelligent et automatisé. Ce chapitre présente l'état actuel des recherches dans le domaine de la détection des défauts, en offrant un aperçu des différents types de défauts, ainsi que des diverses méthodes employées pour les détecter et les localiser.

II.2 Les courts - circuits

II.2.1 Définition d'un défaut de court-circuit

Un court-circuit survient lorsqu'un contact involontaire se produit entre deux conducteurs de polarité opposée. Cela génère une décharge de courant bien plus élevée que la normale, appelée courant de court-circuit.

Un court-circuit peut résulter de plusieurs facteurs, tels qu'une origine mécanique, climatique ou interne.[8]

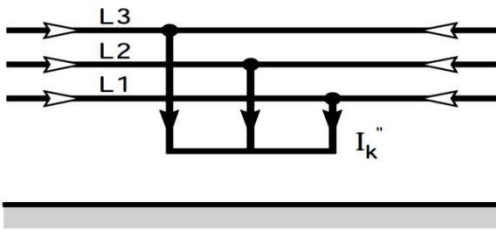
II.2.2 Origines d'un défaut de court-circuit

Les différents éléments des réseaux sont conçus, fabriqués et entretenus de manière à assurer un équilibre optimal entre coût et risque de défaillance. Toutefois, ce risque n'est pas nul, et des incidents ou anomalies peuvent perturber le fonctionnement des installations.

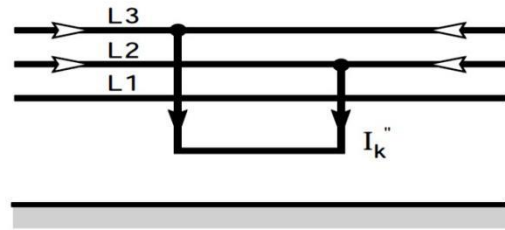
- Les lignes aériennes sont vulnérables aux phénomènes météorologiques, tels que la foudre et les tempêtes. Certaines zones, comme les régions montagneuses, sont particulièrement exposées à la foudre, qui est responsable de 60 à plus de 80 % des défauts selon les niveaux de tension.
- Les câbles souterrains subissent des agressions externes, notamment causées par des engins de terrassement, entraînant systématiquement des défauts permanents.
- Les équipements des réseaux et des postes contiennent des isolants solides, liquides ou gazeux placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants se détériorent avec le temps, provoquant des défauts d'isolement qui peuvent aboutir à des courts-circuits.[9]

II.2.3 Les types de défauts dans le réseau électrique

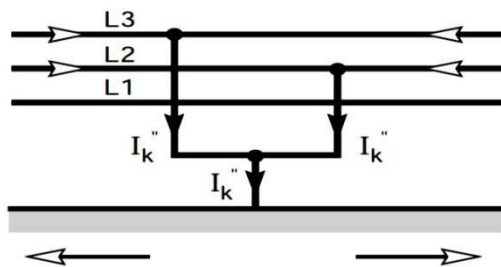
a) court-circuit triphasé symétrique



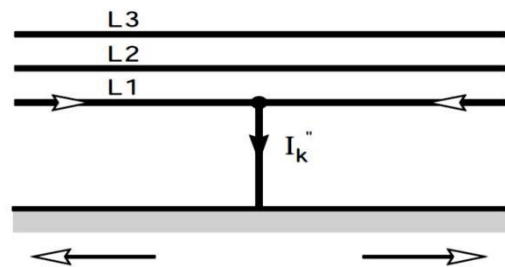
b) court-circuit entre phases, isolé



c) court-circuit entre phases, avec mise à la terre



d) court-circuit phase-terre





 courant de court-circuit,
 courants de court-circuit partiels dans les conducteurs et la terre.

Figure II.1. différents types du court-circuit.

Un court-circuit dans les réseaux électriques peut être :

Monophasés :(Figure II.1.d) entre une phase du réseau avec liaison à la terre qui représente la majorité des cas avec 80 %.

Biphasés:(Figure II.1.b, c) représente 15 % des cas et qu'il est entre deux phases du réseau avec ou sans liaison à la terre.

Triphasés :(Figure II.1.a) représente le moindre présent avec 5 % seulement des cas, mais le plus dangereux car il est celui provoquant généralement les courants les plus élevés qu'il est entre les trois phases du réseau avec ou sans liaison à la terre.

II.2.4 Classification des courts-circuits selon la durée

- **Courts-circuits auto-extincteurs** : c'est ceux qui disparaissent spontanément en des temps très courts sans provoquer de discontinuités dans la fourniture d'énergie électrique.
- **Courts-circuits fugitifs** : Les courts-circuits fugitifs nécessitent une coupure très brève du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dixièmes de seconde).
- **Courts-circuits permanents** : Ces courts-circuits ne disparaît pas après le déclenchement des protections plusieurs fois ce qui provoque un déclenchement définitif, où l'intervention du personnel d'exploitation est indispensable pour la localisation du défaut et remise en service de la partie concernée.
- **Courts-circuits semi-permanents** : Ce sont des courts-circuits qui persistent pendant un certain temps, mais-disparaissent spontanément après un ou plusieurs déclenchements des protections. Contrairement aux défauts permanents, ils ne nécessitent pas systématiquement l'intervention du personnel d'exploitation, car le système peut retrouver un fonctionnement normal sans localisation manuelle du défaut.[11]

II.2.5 Conséquences des courts-circuits sur les réseaux électriques

Les effets néfastes des courts-circuits sont particulièrement redoutés sur les réseaux électriques à très haute tension (THT), alimentés par des groupes générateurs de forte puissance. Les courts-circuits polyphasés survenant à proximité des centrales de production entraînent une réduction du couple résistant (C_r) des machines, provoquant une rupture de l'équilibre entre ce dernier et le couple électromagnétique (C_m). Si ces défauts ne sont pas éliminés rapidement, ils peuvent compromettre la stabilité des groupes synchrones, allant jusqu'à engendrer un fonctionnement hors synchronisme, préjudiciable aux équipements.[10]

Les temps d'élimination des courts-circuits sur les réseaux THT sont généralement limités à 100 à 150 millisecondes, afin de préserver la stabilité et l'intégrité des installations.[11]

Cependant, les conséquences indésirables d'un court-circuit peuvent affecter diverses parties du réseau, en fonction de la nature du défaut, de sa durée, de son emplacement, ainsi que de l'intensité du courant de défaut. Parmi ces effets, on distingue :

- Dégradation thermique au point de défaut : L'apparition d'un arc électrique peut entraîner la détérioration des isolants, la fusion des conducteurs, des risques d'incendie ainsi que des dangers pour les personnes par surchauffe induite par les pertes Joule.
► Remède : Dimensionnement adéquat des conducteurs.[12]
- Efforts électrodynamiques (forces de Laplace) : Ces forces, proportionnelles au carré du courant de défaut, peuvent déformer ou arracher les câbles, jeux de barres et dispositifs de fixation.
► Remède : Dimensionnement mécanique approprié et espacement optimal entre conducteurs.[12]
- Chutes de tension importantes, compromettant la qualité de l'alimentation.
- Mise hors service partielle ou totale du réseau, en fonction de l'architecture du réseau et de la sélectivité des protections.
- Surtensions transitoires : Générées par les manœuvres de disjoncteurs ou les défauts à la terre, elles peuvent entraîner une élévation de la tension du neutre.
► Remède : Contrôle de l'impédance de mise à la terre et dimensionnement adapté des conducteurs.[12]
- Risque électrique pour les personnes, notamment en cas de défaut d'isolement à la terre.
► Remède : Mise en œuvre de liaisons équipotentielle des masses et des prises de terre.[12]
- Perturbations électromagnétiques dans les circuits de commande et de contrôle, affectant le fonctionnement du système.
► Remède : Séparation physique entre circuits de puissance et circuits de contrôle.[12]

II.3 Les surcharges

II.3.1 Définition d'une surcharge

Au sens général, le mot surcharge désigne l'élévation de l'intensité de 1 à 10 In d'un circuit due par exemple à une Surabondance des récepteurs. Ses conséquences peuvent provoquées l'échauffement lent et progressif des parties actives, des masses métalliques, et des isolants.

II.3.2 Origines d'une surcharge

La surcharge d'un appareil se manifeste par un courant dépassant le courant admissible. Les principales causes de surcharge sont :

- les courts-circuits.
- les pointes de consommation.
- l'enclenchement de charges importantes.

Les surcharges entraînent d'importantes chutes de tension sur le réseau et accélèrent le vieillissement des équipements.[18]

II.3.3 Conséquences d'une surcharge

L'augmentation de la puissance appelée se traduit par un accroissement du courant absorbé, ce qui induit une élévation de la température au sein de l'installation, dépassant les limites thermiques admissibles en régime normal. Cette surchauffe accélère la dégradation des matériaux isolants, pouvant conduire à leur claquage diélectrique et à l'apparition de défauts d'isolement. Par ailleurs, les surcharges prolongées engendrent des chutes de tension significatives sur le réseau et contribuent au vieillissement prématuré des équipements électriques, affectant ainsi la fiabilité et la durée de vie du système.[18]

II.4 Les surtensions

II.4.1 Définition d'une surtension

Une surtension correspond à une élévation de la tension dépassant la plage nominale, avec une variation d'environ 10 %.[16]

II.4.2 Origines d'une surtension

II.4.2.1 Surtension à fréquence industrielle

Les surtensions à fréquence industrielle (50 Hz ou 60 Hz) sont très souvent provoquées par :

- Un défaut à la terre.
- Une rupture du conducteur neutre.
- Un dysfonctionnement du régulateur de tension d'un alternateur ou du régulateur de charge d'un transformateur.

Ces surtensions, de longue durée (allant de quelques secondes à plusieurs minutes), sont peu amorties.

II.4.2.2 Surtensions causées par défaut d'isolement

Dans un réseau triphasé à neutre isolé ou imposant, la mise à la terre d'une phase entraîne une élévation de la tension des deux autres phases par rapport à la terre, atteignant 1,732 fois leurs valeurs normales.

II.4.2.3 La rupture de continuité de neutre

Les réseaux de distribution sont généralement triphasés, tandis que de nombreux équipements sont monophasés. Selon les besoins spécifiques des abonnés en basse tension, des déséquilibres de tension peuvent apparaître. Le cas le plus critique reste la rupture du conducteur neutre, pouvant entraîner une élévation de potentiel préjudiciable pour des appareils conçus pour fonctionner sous une tension simple, qui se retrouvent alors soumis à une tension proche de la tension composée. [17]

II.4.2.4 Surtension de manœuvre

Des surtensions transitoires peuvent survenir lors de la mise hors circuit d'une charge inductive, comme un transformateur à vide, des inductances ou des inductances alimentées par un transformateur, même lorsque le courant à interrompre ne dépasse pas une centaine d'ampères.

- Lorsque la puissance du réseau d'alimentation est élevée par rapport à celle du transformateur à connecter, il domine le système, limitant ainsi l'apparition de surtensions lors de l'enclenchement. En revanche, si le réseau d'alimentation a une puissance limitée, l'intensité élevée du courant d'enclenchement provoque une perturbation, et la tension aux bornes du transformateur ne retrouve un état stable qu'après une série d'oscillations transitoire.
- Ferro-résonance ce phénomène oscillatoire résulte de l'interaction entre la capacité d'un réseau et une inductance non linéaire, notamment celle d'un transformateur à vide. Il peut engendrer des surtensions, soutenues ou non, sur des réseaux à forte capacitance, comme les câbles armés, ce qui risque d'endommager aussi bien les transformateurs que les câbles eux-mêmes. [17]

II.4.2.5 Surtension atmosphériques

Le courant généré par un coup de foudre augmente rapidement en l'espace de 1 μ s à 10 μ s jusqu'à atteindre une valeur crête habituelle, puis diminue progressivement. Des études

Indiquent que 50 % des coups de foudre dépassent une valeur crête de 45 kA.

Lors de la conception des lignes, la réduction du nombre de coups de foudre nécessite de prendre en compte plusieurs facteurs, notamment la hauteur des pylônes, le nombre et l'emplacement des fils de garde, la quantité de disques isolateurs par chaîne, ainsi que l'impédance des pylônes et leur impédance par rapport à la terre. [18]

- **Coups de foudre directs**

Les coups de foudre directs frappent fréquemment un conducteur d'une ligne de transport, entraînant l'injection dans la ligne d'une onde de courant atteignant plusieurs dizaines de kA.

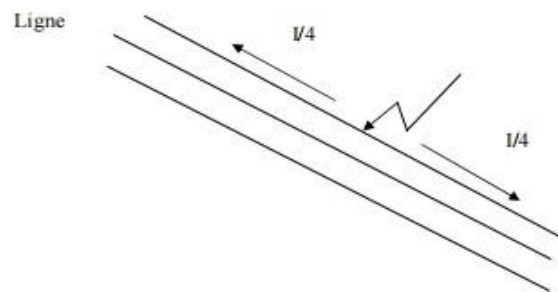


Figure II.2. Coup de foudre direct

- **Coups de foudre indirects**

Les coups de foudre indirects frappent généralement le pylône ou le fil de garde, provoquant une élévation de la tension de la structure métallique du pylône par rapport à la terre.

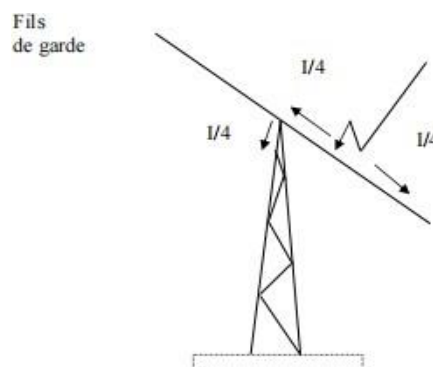


Figure II.3. Coup de foudre direct

Les surtensions, qui sollicitent l'isolation du poste en particulier celle des transformateurs dépendent à la fois de la conception de la ligne et de la configuration du réseau. [17]

II.5 Les oscillations

II.5.1 Définition d'une oscillation

Les oscillations de la tension et du courant résultent des variations plus ou moins rapides de la charge, qui influencent directement la vitesse de rotation (donc la fréquence) des machines de production d'énergie électrique. Étant directement liées à la mécanique des machines électriques, ces oscillations sont appelées phénomènes transitoires électromécaniques.

II.5.2 Origines des oscillations

- **Interactions dynamiques multi-échelles** : Les oscillations peuvent émerger de l'interaction entre générateurs, charges, lignes de transmission et convertisseurs de puissance, chaque composant ayant ses propres dynamiques temporelles. L'intégration massive de convertisseurs électroniques de puissance, notamment avec les énergies renouvelables, introduit de nouveaux modes d'oscillation, notamment les oscillations sous-synchrones.
- **Contraintes structurelles et topologiques** : La structure du réseau, notamment la présence de cycles avec un nombre impair de nœuds inhibiteurs et des connexions suffisamment fortes, est un facteur déterminant pour l'apparition d'oscillations dans les réseaux multi-populations³.
- **Résonance et couplage** : Les oscillations peuvent être favorisées par la résonance sous-seuil des composants et la présence de jonctions électriques (gap jonctions), qui ensemble déstabilisent l'état stationnaire et favorisent l'émergence d'oscillations synchrones à l'échelle du réseau¹.
- **Transitions dynamiques** : Un réseau peut passer d'un état asynchrone à un état oscillatoire collectif lorsque la connectivité ou l'équilibre excitation/inhibition atteint un certain seuil, déclenchant des oscillations soutenues par la dynamique de relaxation vers un point focal macroscopique

II.5.3 Conséquences des oscillations

Les oscillations non maîtrisées peuvent entraîner une dégradation de la qualité de l'énergie, des défaillances d'équipements, voire l'instabilité du système électrique. La compréhension des origines et des mécanismes de ces oscillations est donc cruciale pour le développement de modèles adaptés, de méthodes d'analyse avancées et de stratégies de contrôle coordonnées pour garantir la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques modernes.[18]

II.6 Conclusion

Les défauts sur le réseau électrique et les problèmes résultant, sont la conséquence de l'utilisation croissante de dispositifs à semi-conducteurs non linéaires et des autres équipements à base d'électronique de puissance. Ce type de charges causent la déformation de la tension, et génèrent des courants harmoniques à forte intensité, qui peuvent avoir comme conséquence le dysfonctionnement, voire même engendrer la destruction du matériel électronique sophistiqué. Dans ce chapitre nous avons étudié les types de défauts dans le réseau électrique et les raisons de son apparition et dans le chapitre suivant, nous étudierons les systèmes de protection permettant d'éviter tous les défauts.

CHAPITRE III

Le système de protection



III.1 Introduction

La protection constitue un élément fondamental du réseau électrique, étant une fonction indispensable pour garantir la stabilité du système ainsi que la continuité adéquate du service. Il existe une diversité de dispositifs de protection, chacun étant conçu pour remplir un rôle spécifique au sein du système électrique.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'identification des différents types de protection ainsi que leur rôle respectif. Nous avons également décrit les éléments constitutifs d'un système de protection. Par ailleurs, les notions de fonction de protection et de sélectivité des protections ont été abordées afin de souligner l'importance de la coordination entre les dispositifs de protection pour assurer une réponse efficace et localisée aux défauts.

III.2 Description d'un système de protection

Les fonctions de protection sont assurées par des relais ou des appareils multifonctions. À l'origine, les relais de protection étaient de type analogique et se limitaient généralement à une seule fonction. Aujourd'hui, la technologie numérique est la plus répandue. Elle permet de concevoir des fonctions de protection de plus en plus sophistiquées, un même appareil étant désormais capable de remplir plusieurs rôles. C'est pourquoi on parle désormais d'appareils multifonctions.

Un système de protection remplit trois fonctions principales :

- ✓ protéger l'ensemble du système afin de maintenir la continuité de l'alimentation.
- ✓ limiter les dommages et les coûts de réparation en cas de défaillance.
- ✓ garantir la sécurité du personnel.[19]

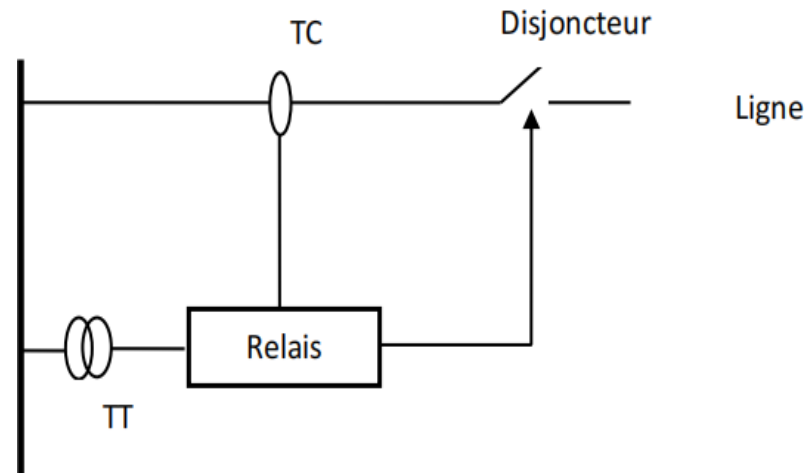
III.2.1 Schéma synoptique d'un système de protection

Quelle que soit la technologie utilisée, le système de protection se compose de trois éléments fondamentaux :

- Des capteurs ou réducteurs de mesure qui abaissent les valeurs à surveiller à des niveaux utilisables par les protections.
- Un système de relais de protection (Relais).
- Un appareillage de coupure (un ou plusieurs disjoncteurs).

La figure III.1 présente un exemple de système de protection pour une ligne haute tension (HT). L'extrémité opposée de la ligne est également équipée d'un système de protection

similaire, permettant de sécuriser la ligne en provoquant l'ouverture du disjoncteur situé à cette extrémité. En cas de défaut, les deux relais doivent intervenir, entraînant l'ouverture des deux disjoncteurs et la mise hors service de la ligne.



La figure III.1. Constitution d'un système de protection.

Les relais de protection sont reliés aux transformateurs afin de recevoir les signaux d'entrée, ainsi qu'aux disjoncteurs pour transmettre les ordres d'ouverture ou de fermeture. Ainsi, en cas de défaut, le rôle du disjoncteur est d'éliminer le défaut, tandis que celui du système de relais de protection est de le détecter. En haute tension (HT), les relais sont installés dans des sous-stations.[20]

Le temps d'élimination de défauts comprend :

- Le temps de fonctionnement des protections (détection du défaut).
- Le temps d'ouverture des disjoncteurs (élimination du défaut).

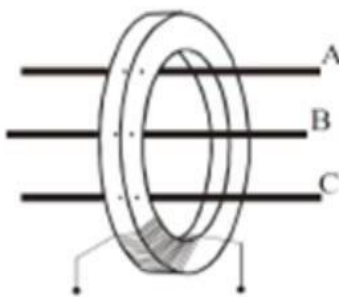
III.2.2 Réducteurs de mesure

Pour des raisons de dimensionnement et de coût, les relais de protection sont conçus pour fonctionner avec des courants et des tensions de faible valeur. Par ailleurs, afin de garantir la Sécurité des opérateurs, une séparation galvanique doit être établie entre le réseau surveillé, soumis à une tension élevée, et le circuit de mesure, de tension réduite et mis à la terre en un point. Cette séparation est assurée à l'aide de transformateurs de courant (TC) et de transformateurs de tension (TT). Pour assurer une protection efficace contre les défauts, la précision constitue la caractéristique essentielle d'un transformateur de mesure.

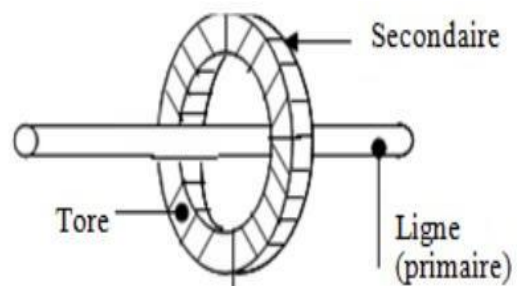
III.2.2.1 Transformateur de courant

Du point de vue électrique, les TC Figure III.2 ont plusieurs rôles :

- Délivrer à leur secondaire une image fidèle de l'intensité qui circule dans la ligne Concernée.
- Assurer l'isolement galvanique entre la ligne et les circuits de mesure et de protection.
- Protéger les circuits de mesure et de protection de toute détérioration lorsqu'un défaut survient sur la ligne.



Mesure courant homopolaire.



Mesure courant phase.

Figure III.2. Transformateur de courant type tore.

Les transformateurs de courant utilisés permettent de réduire des courants de plusieurs milliers d'ampères à des valeurs standards de sortie, généralement 5 A ou 1 A. En situation de défaut, le courant traversant le transformateur augmente considérablement, ce qui rend son choix déterminant pour assurer le bon fonctionnement du relais.

À partir de cette image du courant, le relais génère un ordre de déclenchement selon le type de protection qu'il met en œuvre et les paramètres prédéfinis, tels que les seuils et les temporisations. Cet ordre est ensuite envoyé à un ou plusieurs dispositifs de coupure (disjoncteur, contacteur, interrupteur). Selon le type de protection à assurer, les transformateurs de courant (TC) sont associés et utilisés selon différents schémas ; ils peuvent être installés de manière indépendante ou intégrés directement au disjoncteur.[21]

III.2.2.2 Transformateur de tension

Le transformateur de tension se compose de deux enroulements, primaire et secondaire reliés par un circuit magnétique. Les connexions peuvent être effectuées soit entre deux phases soit entre une phase et la terre.[8]

Un transformateur de tension a pour rôle de fournir, au secondaire, une tension proportionnelle à celle appliquée au primaire. Par conséquent, le rapport entre la tension primaire et la tension secondaire reste constant. De plus, la tension secondaire est indépendante de la charge.[13]

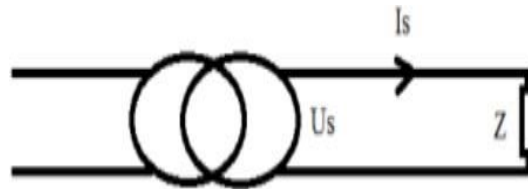


Figure III.3. Schéma électrique simplifié du transformateur de tensions

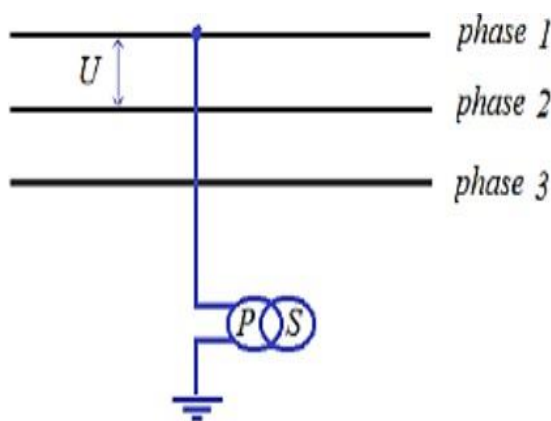


Figure III.4. Retordement de (TT)

entre phase et terre.

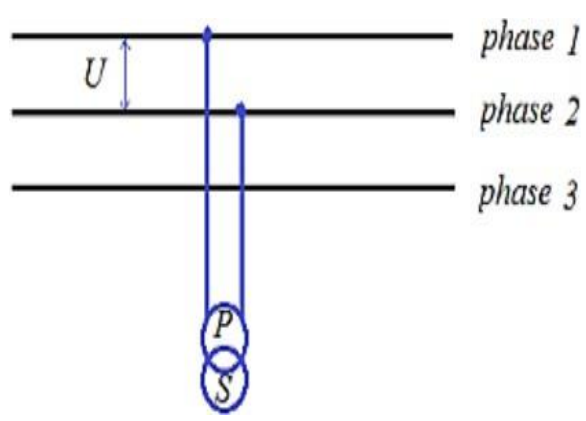


Figure III.5. Raccordement de (TT)

entre phase.

III.2.3 Relais

III.2.3.1 Principe de fonctionnement des relais de protection

L'ensemble des paramètres d'un réseau électrique peut être utilisé pour assurer sa surveillance et détecter d'éventuels défauts. Les mesures les plus couramment exploitées sont celles du courant et de la tension. En général, lorsqu'un défaut de court-circuit survient, on observe une augmentation du courant et une chute de la tension. La variation de ces deux grandeurs entraîne également celle d'autres paramètres, permettant ainsi de mesurer des grandeurs plus complexes, telles que :

- Le déphasage, obtenu par la comparaison des phases.
- La puissance apparente, calculée comme le produit du courant par la tension.
- Les puissances active et réactive, dérivées de la puissance apparente et du déphasage.
- L'impédance, déterminée par le rapport entre la tension et le courant.
- La composante homopolaire, obtenue par addition des phases, et la composante inverse.

Déterminée à l'aide de circuits déphaseurs. Le fonctionnement d'un relais repose sur la détection de ces variations à l'intérieur de sa zone de protection. Chaque relais est défini par les grandeurs d'entrée auxquelles il réagit. La majorité des relais de protection utilisés dans les réseaux électriques sont présentés ci-dessous.[23]

III.2.3.2 Les types des relais

- **Relais électromagnétiques**

Ce type de relais repose sur le principe de fonctionnement d'un disque d'induction mis en mouvement par des bobines, elles-mêmes alimentées par des grandeurs électriques issues du réseau, via des transformateurs de courant et de tension. La limite d'action du disque sur le mécanisme de déclenchement est déterminée par un ressort de rappel réglable, permettant de définir des seuils de fonctionnement (points de réglage).

Les équipements électromécaniques se présentent comme des systèmes intégrant des fonctions essentielles telles que la détection de seuils et la temporisation. Ils présentent l'avantage d'une grande robustesse, d'un fonctionnement autonome (sans nécessité de source d'énergie auxiliaire) ainsi que d'une faible sensibilité aux perturbations électromagnétiques. Ces relais se distinguent par leur fiabilité et leur solidité, ce qui explique le faible niveau d'entretien requis. Leur performance dans des environnements industriels sévères est largement reconnue. Toutefois, bien que leur maintenance soit réduite, un contrôle régulier est recommandé, la fréquence des inspections devant être adaptée aux conditions d'exploitation.

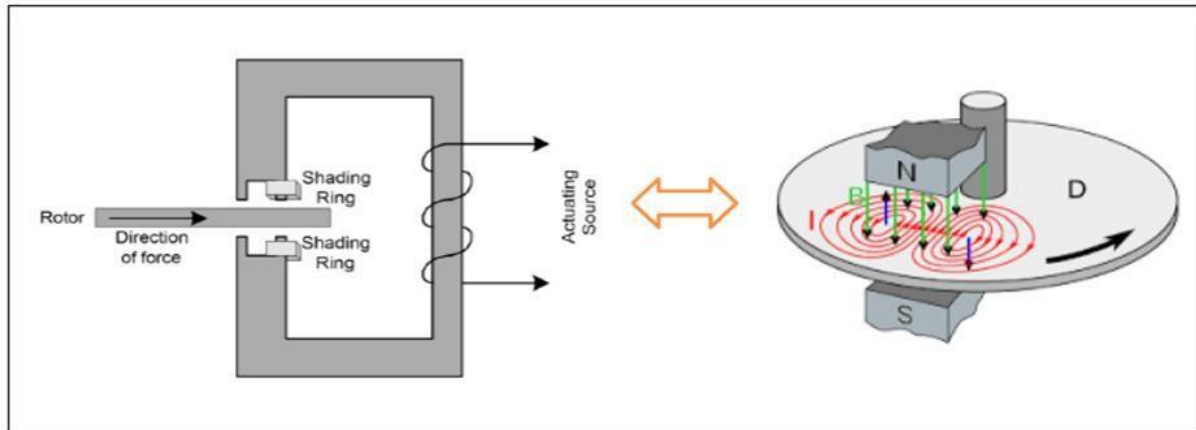


Figure III.6. Relais électromagnétique.

Malgré leur large diffusion, ces dispositifs présentent plusieurs inconvénients notables :

- Le risque de défaillance entre deux intervalles de maintenance.
- Une précision limitée, liée à leur sensibilité aux conditions environnementales et aux phénomènes d'usure mécanique.
- Une difficulté à obtenir un réglage précis pour les faibles courants de court-circuit,
- Un coût de fabrication relativement élevé.
- Des performances limitées, restreignant leur usage à des fonctions élémentaires, en nombre réduit et sans possibilité de redondance fonctionnelle.

• Relais électronique

L'évolution de l'électronique, notamment à partir des années 1970, a conduit à l'introduction de dispositifs de protection basés sur des composants électroniques discrets et des relais statiques. Ces systèmes reposent sur la conversion des grandeurs électriques du réseau, mesurées via des transformateurs de courant et de tension, en signaux électriques de faible amplitude. Ces signaux sont ensuite comparés à des valeurs de référence prédéfinies (points de réglage) à l'aide de circuits de comparaison.

Les signaux issus de ces circuits de comparaison permettent de générer des temporisations qui pilotent des relais de sortie assurant le déclenchement de l'appareillage de protection. Le fonctionnement de ces dispositifs nécessite généralement une source d'alimentation auxiliaire en courant continu.

Parmi les avantages notables de ces protections électroniques, on peut citer :

- Une précision accrue dans les mesures, permettant notamment la détection des faibles courants de court-circuit.
- Une architecture modulaire, dans laquelle chaque unité assure une fonction élémentaire plusieurs modules pouvant être associés pour constituer une fonction de protection complète.

Cependant, ces systèmes présentent également plusieurs limitations :

- Le risque de défaillance entre deux périodes de tests en l'absence de surveillance continue de leur bon fonctionnement .
- Une consommation énergétique relativement élevée en mode veille.
- Une sécurité opérationnelle limitée, notamment en raison de l'absence de fonctions d'autodiagnostic ou d'autocontrôle.

- **Relais numérique**

L'émergence de la technologie numérique dans le secteur de la protection électrique remonte au début des années 1980, coïncidant avec les avancées majeures dans le domaine des microprocesseurs et des dispositifs de mémoire. L'intégration de circuits numériques dans les équipements de protection a marqué une étape décisive dans l'évolution des systèmes de protection des réseaux électriques.

Les dispositifs de protection numérique reposent sur la conversion des grandeurs électriques mesurées issues des transformateurs de courant et de tension en signaux numériques de faible amplitude. Cette numérisation permet l'application de techniques avancées de traitement du signal, autorisant la décomposition des signaux en vecteurs caractéristiques. Ces vecteurs sont ensuite exploités par des algorithmes de protection adaptés aux fonctions requises.

Ces équipements sont généralement dotés d'une interface utilisateur locale, sous forme d'un afficheur à cristaux liquides (LCD), facilitant la surveillance et la configuration sur site. Fonctionnant à l'aide d'une alimentation auxiliaire, ils se distinguent par une précision élevée une grande sensibilité et une rapidité de réponse accrue.

Parmi les fonctionnalités innovantes qu'ils offrent, on peut citer :

- L'intégration multifonctionnelle, permettant la mise en œuvre de plusieurs logiques de protection au sein d'un seul dispositif.

- La capacité de traitement et de stockage des données.
- L'enregistrement des perturbations transitoires sur le réseau (pétrographie).
- Le diagnostic automatisé de l'état des composants du système, tels que les disjoncteurs.

Ces dispositifs intègrent également des mécanismes d'autotest et d'autosurveillance renforçant leur fiabilité opérationnelle tout en réduisant la fréquence et la durée des interventions de maintenance.

Outre leurs fonctions de protection, ces équipements embarquent des fonctionnalités complémentaires qui optimisent leur utilisation. Grâce aux interfaces de communication série, ils peuvent être configurés via un micro-ordinateur et intégrés à un système de supervision et de contrôle, aussi bien à l'échelle locale que centrale. Enfin, leur architecture permet l'implémentation d'approches issues de l'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones artificiels ou la logique floue, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle génération de protections intelligentes et adaptatives.[18]

III.2.3.3 Relais de mesure de courant

Un équipement de protection est généralement constitué de plusieurs fonctions élémentaires de mesure, appelées relais de mesure. Ces relais doivent être capables de réaliser des mesures précises et fiables, même en présence de régimes transitoires perturbateurs affectant les courants et les tensions lors de l'apparition d'un court-circuit.

Les relais de courant permettent de mesurer un courant ou une combinaison de courants (direct, inverse, ou homopolaire). Il en existe une grande diversité, qui se distingue selon la nature de la grandeur mesurée et le type de temporisation utilisé :

- Mesure de la valeur instantanée, de la valeur de crête, de la valeur moyenne ou de la valeur efficace.
- Mesure effectuée sur une demi-alternance, sur deux demi-alternances consécutives, sur la moyenne de plusieurs demi-alternances, ou selon un pourcentage.
- Détection instantanée ou temporisée.

III.2.3.4 Relais de mesure de tension

Les relais de tension peuvent être conçus pour détecter soit un maximum, soit un minimum de tension. La mesure peut porter sur une valeur instantanée, une valeur de crête, ou éventuellement une valeur moyenne. Ce type de relais est généralement temporisé. Les mesures peuvent concerner différents types de tensions : tensions simples, tensions composées, ainsi que les composantes directes, inverses ou homopolaires.

Dans certains cas, afin de rendre ces relais insensibles aux variations globales du niveau de tension du réseau, la mesure est effectuée en comparant la tension entre phase et neutre avec la tension composée entre phases, en quadrature. Par exemple, on peut comparer la tension simple V à la tension composée U , en identifiant les phases par A, B, C et le neutre par N.

III.2.3.5 Relais de mesure d'impédance

Le relais d'impédance surveille en continu les grandeurs d'une même phase afin d'évaluer l'impédance du réseau sur cette phase. Cette évaluation est généralement effectuée sur les trois phases, soit entre phase et neutre, soit entre phases. Elle peut également s'appuyer sur les composantes symétriques, telles que les tensions et courants directs, inverses ou homopolaires. Pour analyser le fonctionnement de ce type de relais, l'utilisation du diagramme des impédances (R, X) s'avère particulièrement utile, car il permet de représenter directement la grandeur mesurée par le relais.

III.2.3.6 Relais de mesure de puissance

La mesure de la puissance dans un réseau triphasé peut être réalisée de plusieurs façons :

- À l'aide de relais de puissance active ou réactive, en configuration monophasée ou triphasée.
- Au moyen de relais dits à angle, dans lesquels l'angle θ intervenant dans la mesure est déterminé par un raccordement spécifique des grandeurs de tension (V) et de courant (I). Par exemple, le relais peut être alimenté par le courant de la phase A et la tension entre les phases A et B.

III.2.3.7 Relais directionnel

Ce type de relais représente aujourd'hui une excellente opportunité pour optimiser à la fois un rôle essentiel dans de nombreuses applications liées aux relais de protection.

Ce type de protection s'appuie sur les grandeurs de courant, de tension, ainsi que sur le sens de circulation de l'énergie. Il intervient uniquement lorsque deux conditions sont réunies : le dépassement d'un seuil de courant ou de puissance, et la propagation de l'énergie dans une direction prédéfinie.

Les protections directionnelles sont particulièrement utiles sur les portions du réseau où le sens de l'écoulement de l'énergie peut varier, notamment en cas de court-circuit entre phases ou de défaut à la terre (défaut monophasé). Elles constituent un complément efficace aux protections à maximum de courant, en assurant une meilleure sélectivité et une isolation plus précise de la zone affectée par le défaut.

III.2.3.8 Relais différentiel

La protection différentielle constitue un principe de protection couramment utilisé pour les transformateurs, les moteurs et les générateurs. Elle consiste à mesurer la différence de courant entre deux transformateurs de courant (TC), l'un installé en amont et l'autre en aval de la partie du réseau à surveiller (par exemple un moteur, un transformateur ou un jeu de barres), dans le but de détecter et d'isoler rapidement tout défaut interne.

Ce système repose sur la comparaison entre le courant entrant et le courant sortant d'un élément. Si une différence est détectée entre ces deux courants, cela indique la présence d'un défaut, et le relais doit intervenir. Toutefois, pour que l'activation du relais soit justifiée, cette différence mesurée doit être suffisamment significative pour être attribuée à un défaut réel.[22]

III.2.4 Disjoncteurs

Les disjoncteurs ont la capacité d'ouvrir et de fermer un circuit en toutes circonstances. Ils peuvent être associés à divers types de relais et systèmes de protection, afin d'assurer de manière optimale l'élimination des défauts apparaissant dans les circuits qu'ils surveillent. Ils permettent également la remise en service automatique de ces circuits lorsque les défauts sont de nature fugitive ou ont été éliminés par un autre dispositif.

Le disjoncteur est ainsi l'appareil de protection par excellence, alliant intelligence et pleine capacité d'intervention.

Il existe une grande variété de disjoncteurs, notamment en haute tension, classés selon la technologie utilisée pour l'extinction de l'arc électrique :

- Coupure dans l'air.

- Coupure dans l'huile.
- Coupure dans l'air comprimé.
- Coupure dans l'hexafluorure de soufre (molécule SF_6).
- Coupure dans le vide.
- Coupure statique.[23]

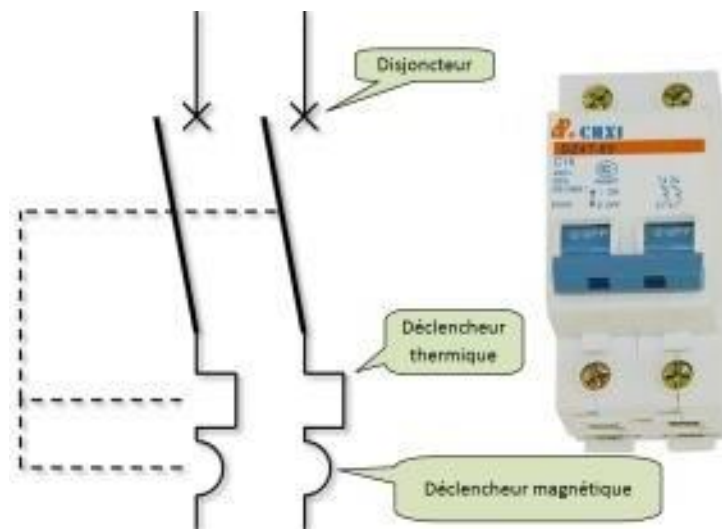


Figure III.7. Le disjoncteur.

III.3 Fonctions de protection

Les relais de protection sont des dispositifs conçus pour surveiller en permanence les grandeurs électriques d'un réseau, telles que le courant, la tension, la fréquence, l'impédance, la puissance, etc. Ils comparent ces grandeurs à des seuils prédéfinis et déclenchent automatiquement une action (comme l'ouverture d'un disjoncteur) ou émettent une alarme dès que l'une de ces grandeurs dépasse les limites fixées.

Le rôle principal des relais de protection est de détecter toute anomalie pouvant survenir sur un réseau électrique, telles qu'un court-circuit, une perte d'isolement, une variation de tension, ou encore un dysfonctionnement d'une machine.

Les dispositifs de protection visent plusieurs objectifs :

- Assurer la sécurité des personnes en les protégeant contre les dangers liés aux défauts électriques.

- Préserver l'intégrité du matériel, car un court-circuit triphasé sur un jeu de barres moyenne tension peut faire fondre jusqu'à 50 kg de cuivre en une seconde, l'arc électrique pouvant atteindre une température centrale de plus de 10 000 °C.
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles sont exposées les installations électriques (jeux de barres, câbles, lignes, enroulements de machines et transformateurs de puissance).
- Protéger les installations voisines (systèmes de commande, télécommunications, télésurveillance) contre les défauts propagés à travers l'environnement immédiat ou la structure métallique, en réduisant les tensions induites.
- Préserver la stabilité et la continuité de service du réseau électrique.

Il existe deux grandes catégories de relais de protection :

- Les relais autonomes, qui ne nécessitent aucune alimentation auxiliaire, car l'énergie nécessaire à leur fonctionnement est directement prélevée sur le circuit surveillé.
- Les relais à alimentation auxiliaire, qui fonctionnent grâce à une source de tension continue ou alternative indépendante du circuit surveillé.[25]

III.3.1 Protection à max de courant

Ce relais est connecté aux trois phases à l'aide de trois transformateurs de courant (TC), un par phase. Ces transformateurs assurent à la fois l'isolement et l'adaptation du courant aux besoins du circuit de protection. Le courant image, prélevé sur les TC, est redressé puis converti en tension grâce à l'insertion d'une résistance. Ainsi, le détecteur reçoit trois tensions d'entrée qui l'alimentent.

Dès que la valeur crête d'un des signaux dépasse un seuil de référence, le détecteur qui fonctionne également comme un comparateur enclenche une temporisation. À l'issue de cette temporisation, les actions suivantes sont exécutées :

- Alarme de deuxième niveau (signalisation accompagnée d'une sonnerie en salle de commande).
- Transmission d'un signal vers l'EMS (Enregistreur de Manœuvres et de Signalisation).
- Déclenchement du disjoncteur.[26]

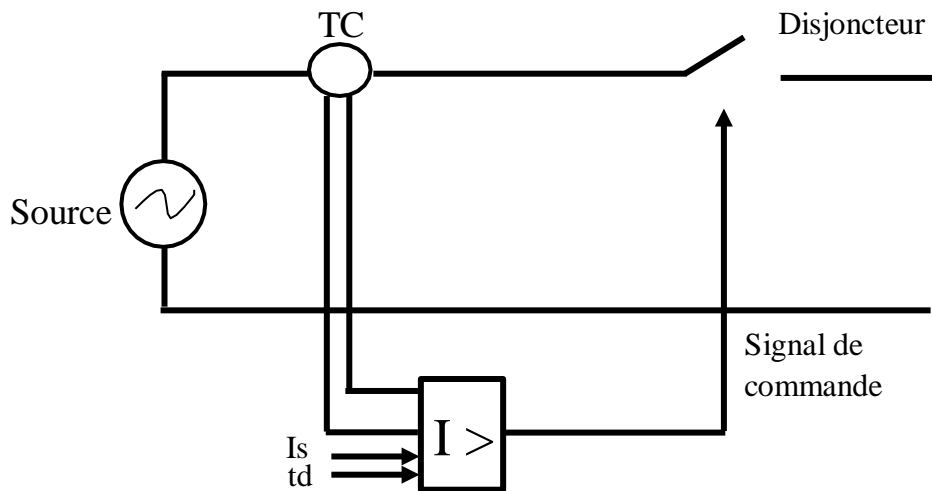


Figure III.8. Schéma synoptique d'une protection à max de courant.

La temporisation est constante, elle est indépendante de la valeur du courant mesuré. Le seuil du courant et la temporisation sont généralement réglables par l'utilisateur Figure III.7.

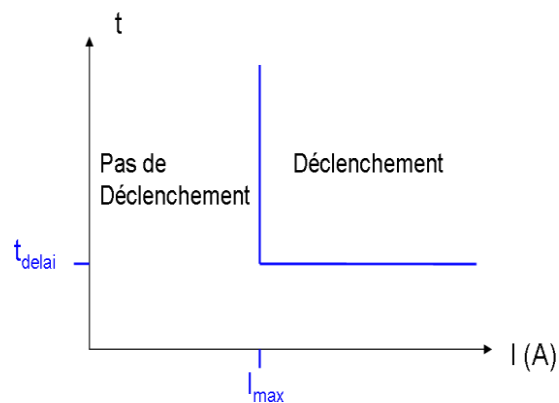


Figure III.9 Protection à temps indépendant.

La temporisation dépend du rapport entre le courant mesuré et le seuil de fonctionnement. Plus le courant est élevé et plus la temporisation est faible Figure III.9

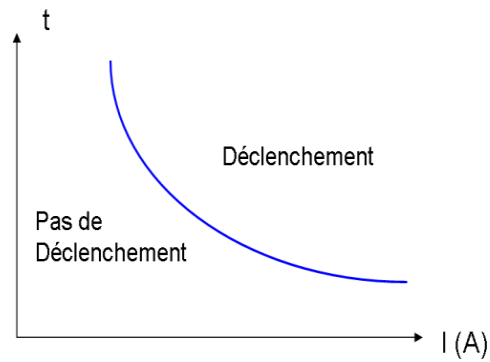


Figure III.10 Protection à temps dépendant.

III.3.2 Protection à max de courant directionnel

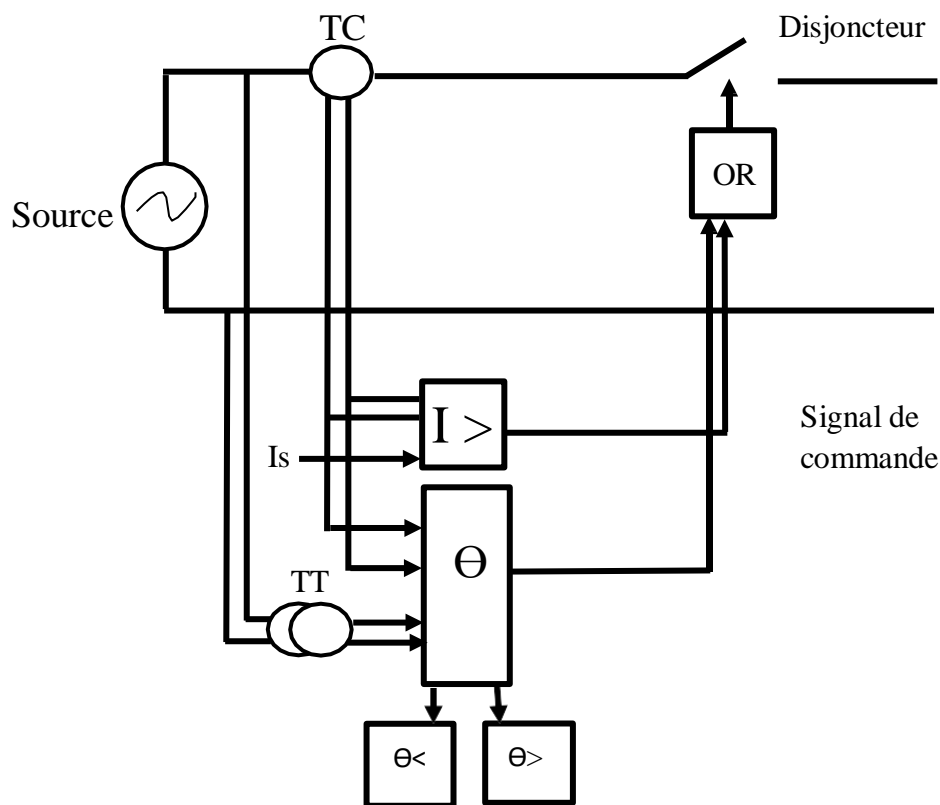


Figure III.11. Schéma synoptique d'une protection à max de courant directionnelle.

Ce dispositif de protection assure deux fonctions essentielles : d'une part, la protection de l'installation contre les surintensités, et d'autre part, la détection de la direction du courant (à partir de la mesure du déphasage entre la tension et le courant). Le schéma synoptique de cette

protection est représenté par la Figure III.11. Afin de mieux comprendre son rôle et son principe de fonctionnement, l'examen de la l'exemple de la Figure III.12 s'avère utile.

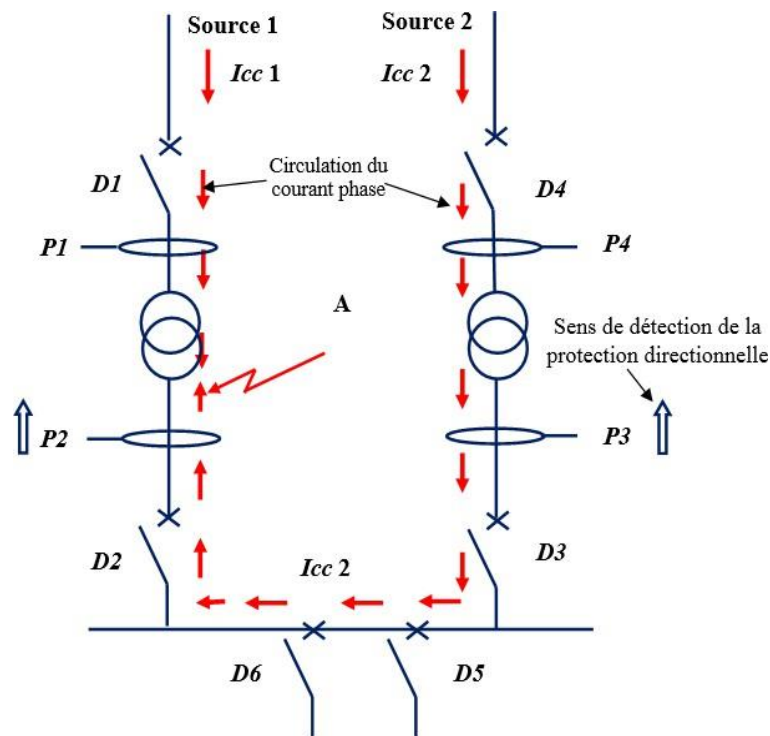


Figure III.12. Réseau à double alimentation affecté par un court-circuit.

Considérons l'installation illustrée par le schéma ci-dessous, dans laquelle :

- P1 et P4 sont des relais de protection à maximum de courant de phase non directionnels.
- P2 et P3 sont des relais de protection à maximum de courant de phase directionnels.
- Icc1 et Icc2 représentent les courants de court-circuit alimentés respectivement par les sources 1 et 2.

En présence d'un défaut au point A, les deux courants de court-circuit Icc1 et Icc2 sont générés simultanément. Dans ce contexte, les quatre dispositifs de protection P1, P2, P3 et P4 sont traversés par une surintensité.

Cependant, pour éliminer le défaut tout en maintenant l'alimentation des départs non affectés, seuls les disjoncteurs D1 et D2 doivent être ouverts. Pour atteindre cet objectif, des relais directionnels à maximum de courant de phase sont installés en P1 et P2.

Le fonctionnement du système de protection s'opère comme suit :

- Le relais P3 ne déclenche pas, car le courant qui le traverse est orienté dans un sens opposé à sa zone de détection.
- En revanche, le relais P2 est sollicité, car le courant circulant dans sa direction est conforme à sa polarisation. Ce relais déclenche ainsi l'ouverture du disjoncteur D2, interrompant le courant I_{cc2} .
- Un système d'interverrouillage ou d'inter-déclenchement provoque simultanément l'ouverture du disjoncteur D1, entraînant la coupure du courant I_{cc1} .
- Le relais P4, bien que traversé par le courant de défaut, ne se déclenche pas immédiatement en raison d'un temporisateur intégré.
- De ce fait, la portion de réseau en défaut est efficacement isolée, tout en assurant la continuité de service sur les autres tronçons.

III.3.3 Protection à min d'impédance (de distance)

La protection à minimum d'impédance est une forme de protection de distance utilisée dans les réseaux électriques pour détecter les défauts (courts-circuits) sur des lignes, transformateurs ou générateurs. Elle fonctionne en mesurant localement la tension et le courant, puis en calculant l'impédance apparente entre le point de mesure et le défaut. Si cette impédance mesurée est inférieure à une valeur de référence prédéfinie (correspondant à la zone protégée), la protection déclenche et ordonne l'ouverture du disjoncteur pour isoler la partie en défaut [28].

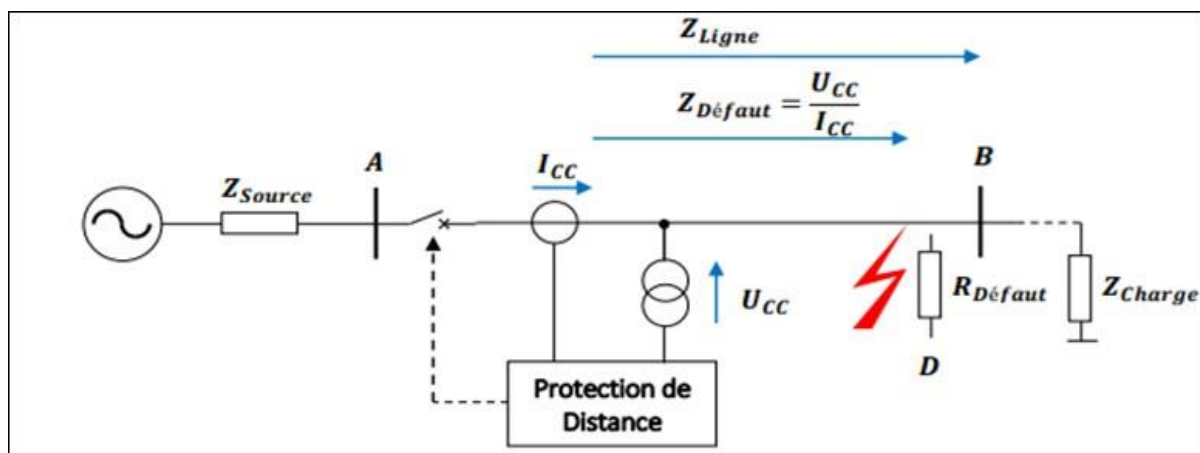


Figure III.13. Schéma protection à min d'impédance.

III.3.4 Protection contre les défauts à la terre

La protection contre les défauts à la terre a pour objectif de détecter rapidement les courants de défaut entre une phase et la terre, puis d'isoler la partie concernée afin de limiter les dommages aux équipements et de garantir la sécurité du réseau électrique. Les méthodes et technologies employées varient en fonction du type de réseau, de la configuration de la mise à la terre, ainsi que de la présence éventuelle de sources renouvelables ou d'onduleurs. Voici certaines méthodes :

- Protection restreinte contre les défauts à la terre (REF).
- Protection basée sur les ondes transitoires et les ondelettes.
- Relais de surintensité de terre et coordination adaptative.
- Protection transitoire pour réseaux non mis à la terre ou compensés.
- Protection centralisée et filtrage du courant de séquence zéro.[31]

III.3.5 Protection différentielle

La protection différentielle repose sur la comparaison entre la somme des courants au primaire et celle des courants au secondaire. L'écart entre ces deux sommes ne doit pas dépasser une valeur seuil pendant une durée supérieure, faute de quoi un déclenchement est déclenché. La protection différentielle du transformateur est une protection principale, tout aussi essentielle que les protections internes du transformateur. Elle bénéficie d'une sélectivité absolue et doit, en plus, faire preuve d'une grande stabilité face aux défauts extérieurs. Son principe de fonctionnement repose sur la comparaison des courants entrants et sortants du transformateur. Cette protection est utilisée pour :

- Détecter des courants de défaut inférieurs au courant nominal,
- Déclencher de manière instantanée, puisque la sélectivité repose sur la détection du défaut et non sur une temporisation.

La stabilité de la protection différentielle correspond à sa capacité à rester insensible en l'absence de défaut interne à la zone protégée, même en présence d'un courant différentiel. Ce type de courant peut être causé par :

- Le courant d'aimantation du transformateur,
- Le courant capacitif des lignes,

- Les courants d'erreur dus à la saturation des capteurs de courant.[27]

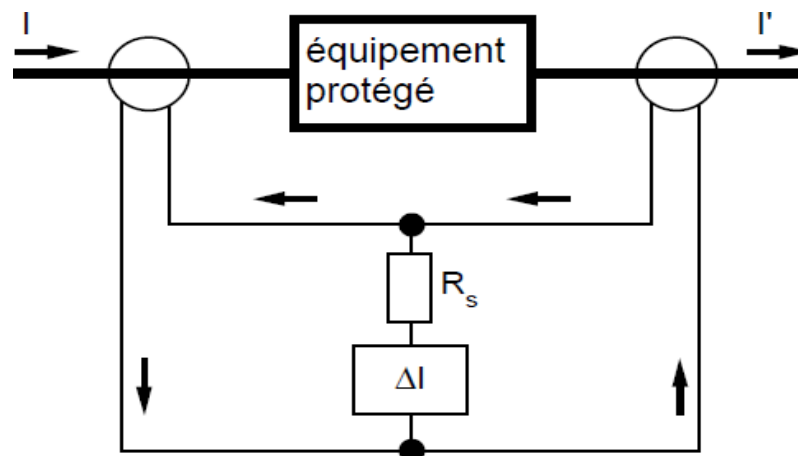


Figure III.14. Schéma de la protection différentielle.

III.3.6 Protection à max de tension

Le relais utilisé est de type à temps constant. Il est raccordé au jeu de barres par l'intermédiaire de trois transformateurs de tension, montés en série sur leurs secondaires. La tension ainsi obtenue est redressée puis comparée à une valeur de référence. Si cette tension dépasse le seuil prédéfini, le détecteur active une temporisation. À l'issue de cette temporisation, les actions suivantes sont déclenchées :

- Alarme de deuxième niveau (avec signalisation et sonnerie en salle de commande),
- Transmission d'un signal vers l'EMS (Enregistreur de Manœuvres et de Signalisation).

[26]

III.3.7 Protection contre les surcharges

La protection contre les surcharges a pour objectif de prévenir les dommages aux équipements électriques et électroniques en régulant le courant ou la puissance en cas de surcharge ou de court-circuit. Elle joue un rôle crucial dans la fiabilité et la sécurité des systèmes électriques, notamment les onduleurs, transformateurs, micro-réseaux, haut-parleurs et ascenseurs. Il est détecté par les éléments suivants :

Limitation du courant ou de la puissance : Les dispositifs de protection identifient les situations de surcharge ou de courant excessif, puis réduisent la sortie de courant ou de

puissance afin de préserver les composants.

Déclenchement automatique : Lorsqu'une surcharge est détectée, des relais ou des dispositifs de coupure interrompent automatiquement l'alimentation du circuit ou de l'équipement, évitant ainsi toute surchauffe ou détérioration.

Répartition de la charge : Pour les transformateurs, une répartition automatique de la charge entre plusieurs unités empêche qu'un seul appareil soit surchargé, limitant ainsi les risques de surchauffe ou de panne.

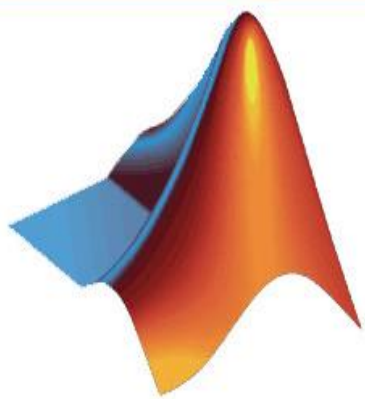
Surveillance en temps réel : Grâce à des capteurs et des systèmes de contrôle, la charge est constamment surveillée, permettant une intervention immédiate dès qu'un dépassement des seuils prédéfinis est constaté.[29]

III.4 Conclusion

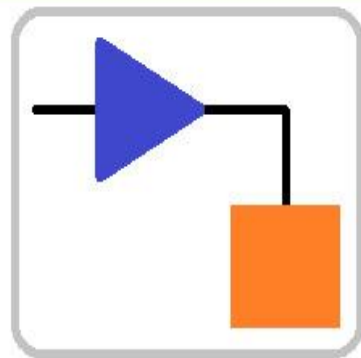
Dans ce chapitre, nous avons défini la protection des réseaux électriques, en présentant un aperçu des principaux relais de protection utilisés pour assurer la continuité du service. Les éléments constitutifs d'un système de protection ont également été évoqués, ainsi que les fonctions de protection destinées à sécuriser les réseaux électriques.

CHAPITRE IV

Simulation et résultats



+



MATLAB
SIMULINK[®]

IV.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre consiste à simuler plusieurs schémas à savoir un réseau électrique dans l'état sain et sans aucun système de protection, un réseau avec défaut de court-circuit et un réseau avec le système de protection à max courant et enfin un réseau avec le système de protection à max courant directionnelle. Dans tous les schémas, les grandeurs électriques à savoir la tension et le courant sont calculées et analysées. En outre, il existe d'autres grandeur telles que le seuil de coupure (I_{seul}) et déphasage(θ). La connaissance de cette dernière grandeur est primordiale pour la définition d'un système de protection à max courant directionnelle qui fait l'objet du présent travail.

IV.2 Environnement de simulation Simulink/Matlab

MATLAB est une suite d'outils intégrés conçue pour répondre aux besoins variés du calcul scientifique. Il s'agit d'un environnement complet de programmation et de simulation, structuré autour de plusieurs modules, notamment :

- Une large collection de bibliothèques de fonctions spécialisées, appelées Tool boxés.
- Simulink, un environnement puissant dédié à la modélisation par schémas-blocs et à la simulation de systèmes dynamiques, qu'ils soient linéaires ou non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs spécialisés, connues sous le nom de Block sets.
- Et divers autres modules tels qu'un compilateur, un générateur de code en langage C, entre autres.

Simulink constitue une plate-forme de modélisation et de simulation multi-domaine pour les systèmes dynamiques. Il offre une interface graphique intuitive ainsi qu'un ensemble de bibliothèques de blocs de modélisation permettant un design précis et une simulation efficace des systèmes. L'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

Les principaux éléments de Simulink/Matlab utilisés dans ce mémoire sont :



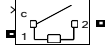
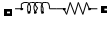


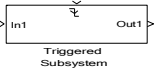

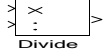
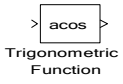

	Source.
	Interrupteur idéal (pour réaliser le court-circuit).
	Disjoncteur (élément de coupure).
	Brache RL série.
	Timer.
	Comparateur.
	Trigger.
	Gain.
	Diviseur.
	Fonction inverse de cos.
	Fonction signe.

Tableau IV .1. Les principaux éléments utilisés dans ce mémoire.

IV.3 Simulation d'une protection à max de courant

IV.3.1 Description du circuit

La figure. IV.1 représente une description d'un circuit électrique sans aucun système de protection et sans aucun défaut, dont ces éléments constitutifs sont :

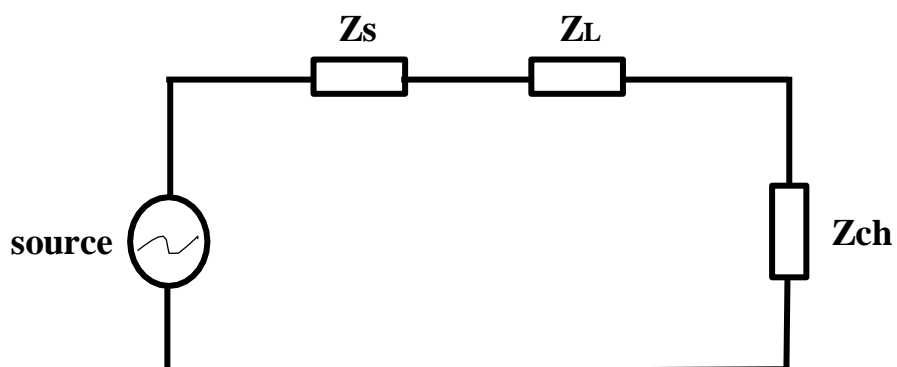


Figure IV .1. Schéma synoptique du circuit étudié.

Source : $V_{\text{eff}} = 220\text{V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $Z_s = 1\ \Omega$,

Ligne : $Z_L = 1\ \Omega$.

Charges : $Z_{\text{ch}} = 80\ \Omega$.

IV.3.2 Simulation état normal

La figure IV .2représente le schéma du la simulation du circuit en état sain (sans défaut sans protection).

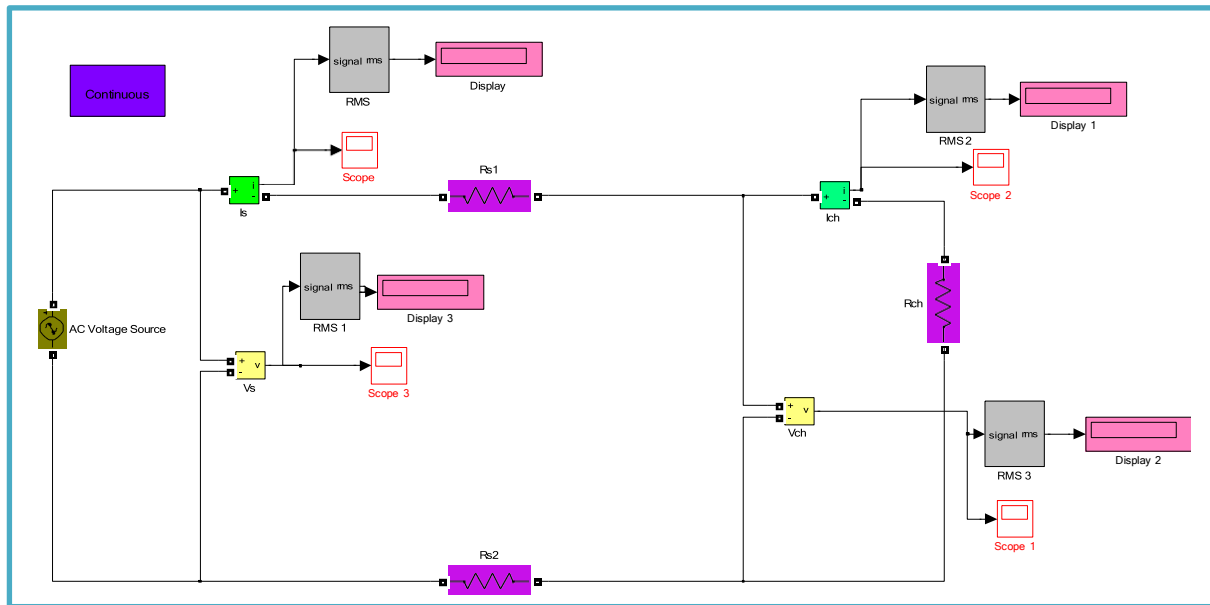


Figure IV .2. Schéma représente la simulation du circuit en état sain.

Les courbes suivantes représentent les résultats de la simulation.

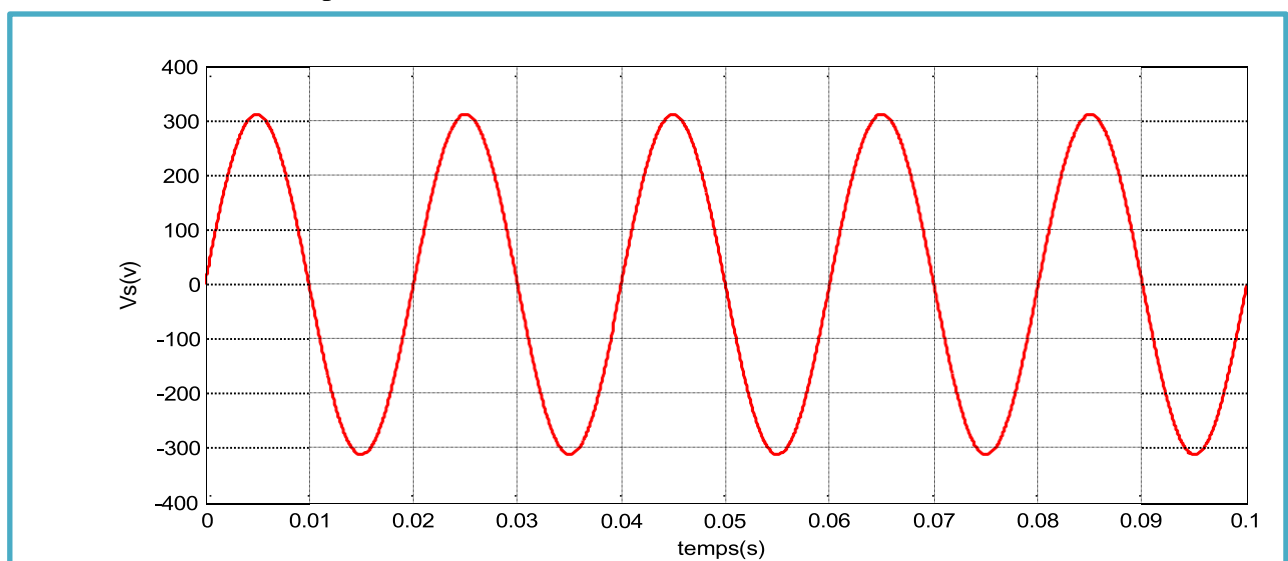


Figure IV.3. Tension de la source.

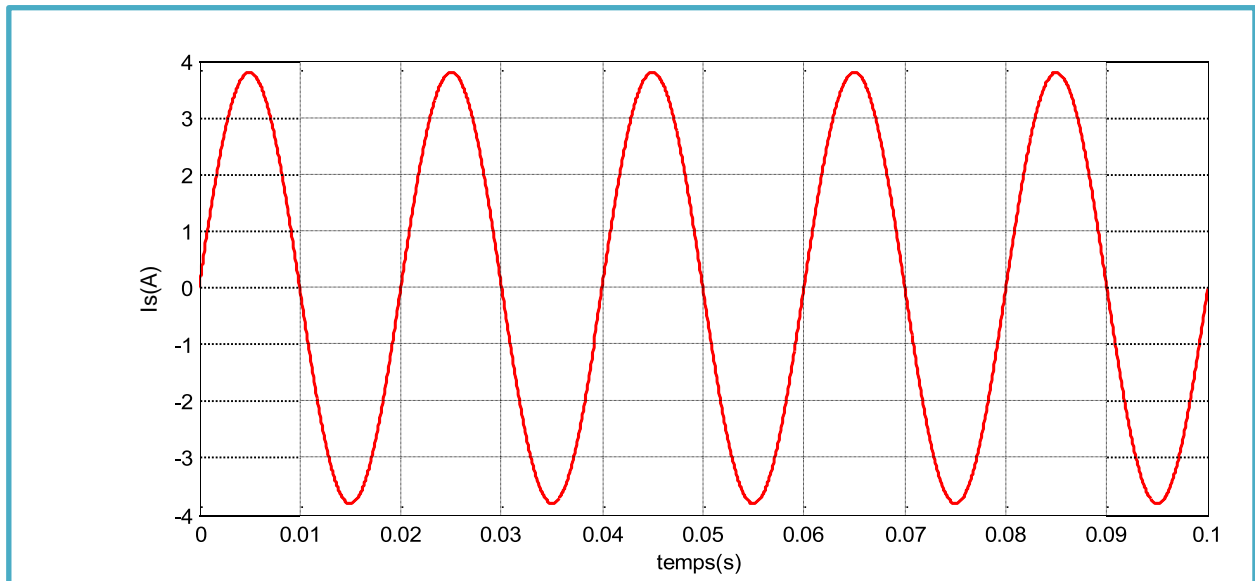


Figure IV.4. Courant de la source.

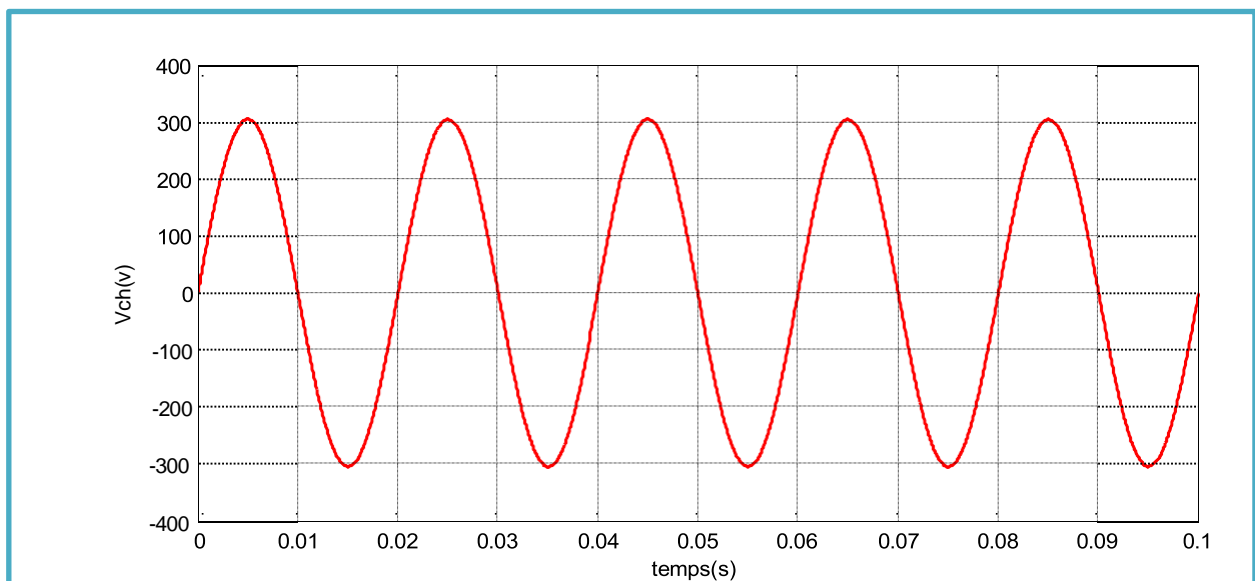


Figure IV.5. Tension de la charge.

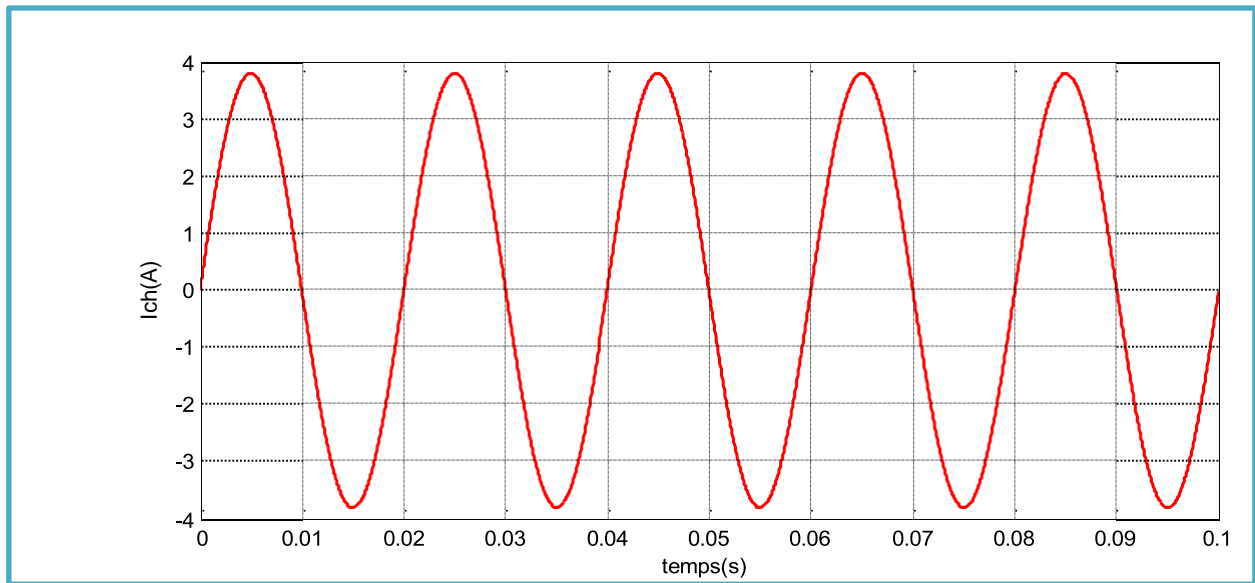


Figure IV.6. Courant de la charge.

D'après les résultats de simulation obtenues on observe les valeurs efficaces des tensions et des courants :

- $V_{\text{Seff}} = 220\text{V}$, $I_{\text{Seff}} = 2.682\text{A}$
- $V_{\text{Cheff}} = 214.5\text{V}$, $I_{\text{Sch}} = 2.682\text{A}$

IV.3.3 Simulation avec défaut de court-circuit

Dans cette partie nous avons étudié à l'aide de l'environnement SIMULINK /MATLAB la conséquence de défaut de court-circuit le schéma de simulation est montré sur la figure IV.7

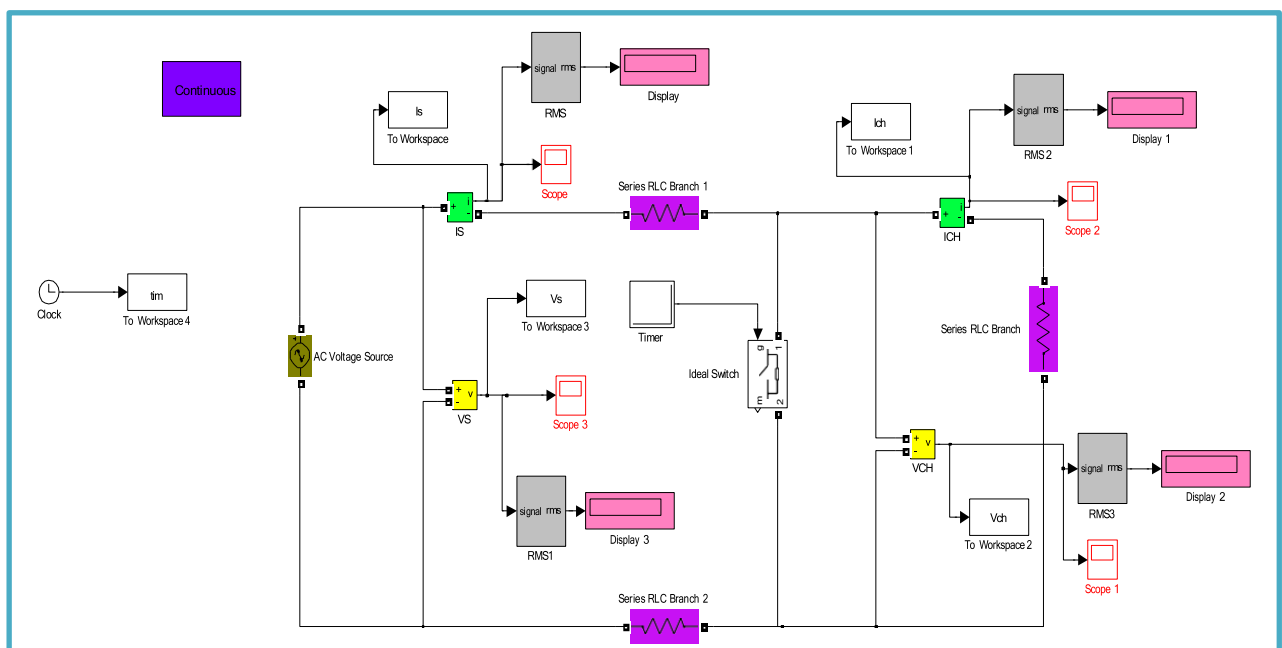


Figure IV.7. Schéma de simulation du réseau avec défaut.

Nous avons ajouté les deux éléments idéal switch et timer vers le circuit pour crier le court-circuit qui apparaît à l'instant $t_{cc} = 0.05$ s c'est ce que montre la figure IV.8.

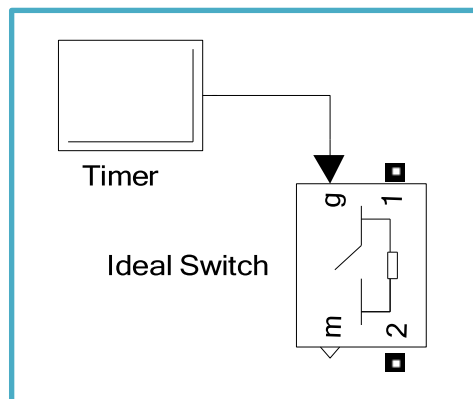


Figure IV.8. Élément de court-circuit.

Les courbes suivantes représentent les résultats de la simulation :

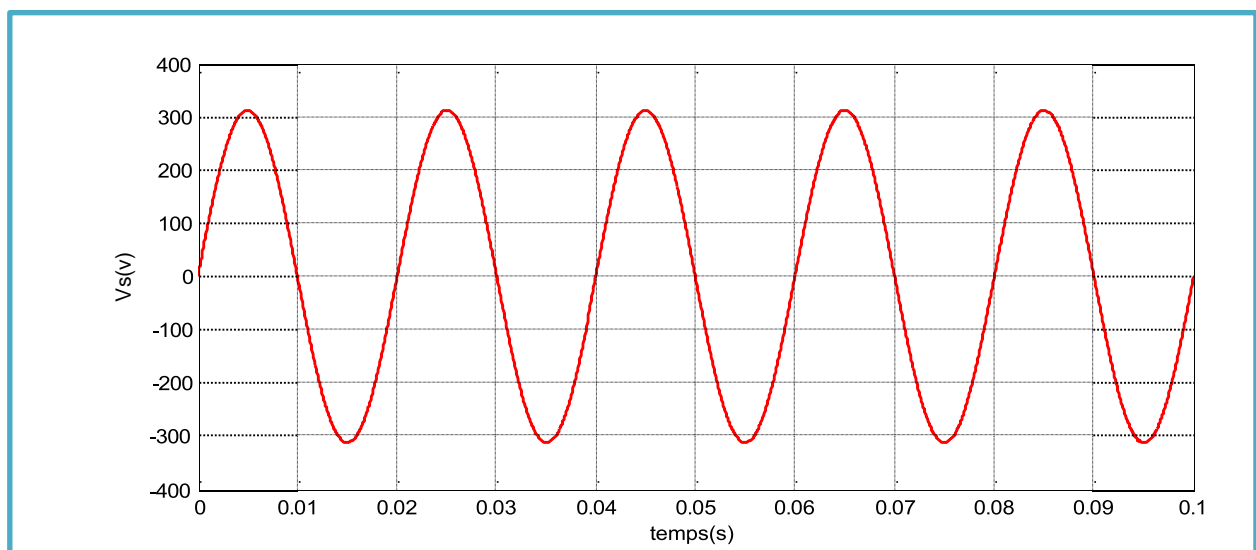


Figure IV.9. Tension de la source.

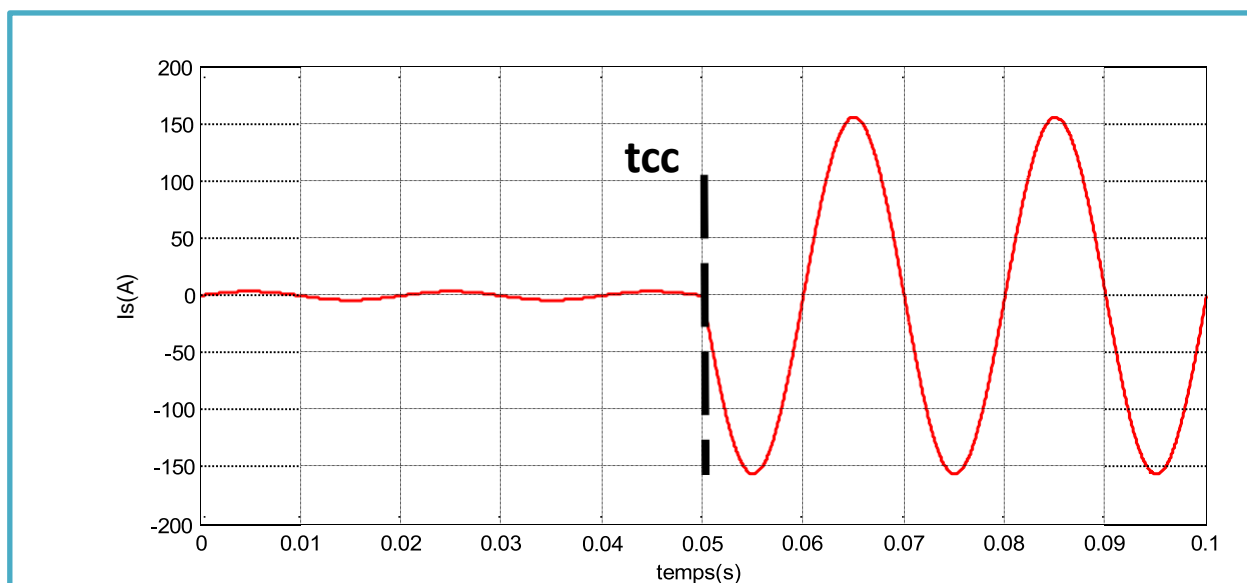


Figure IV.10. Courant de la source.

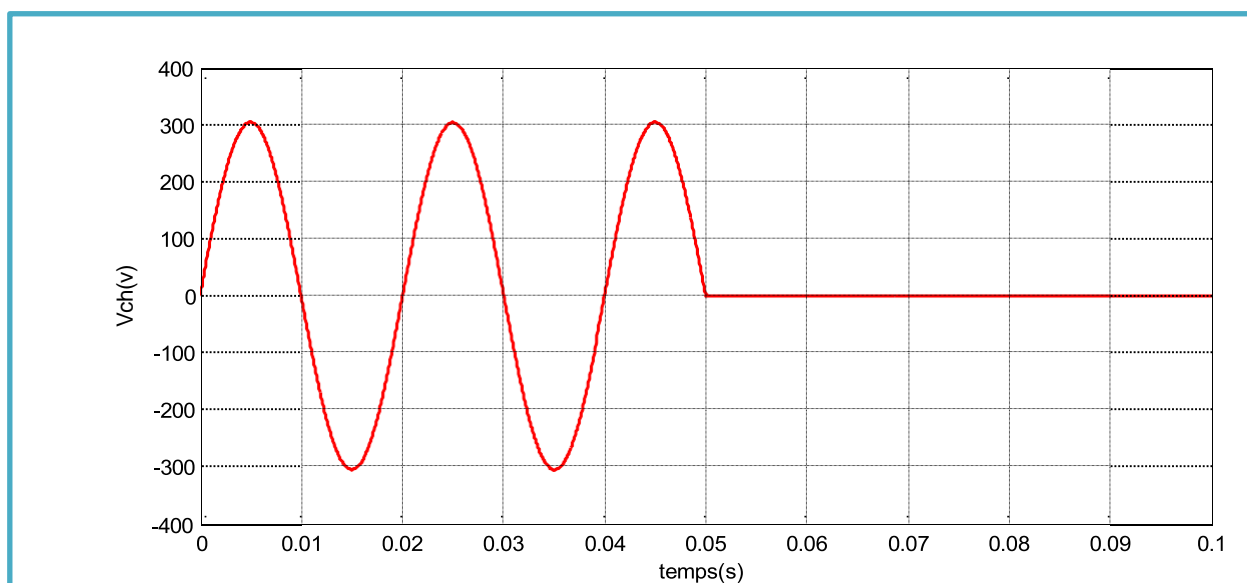


Figure IV.11. La tension de la charge.

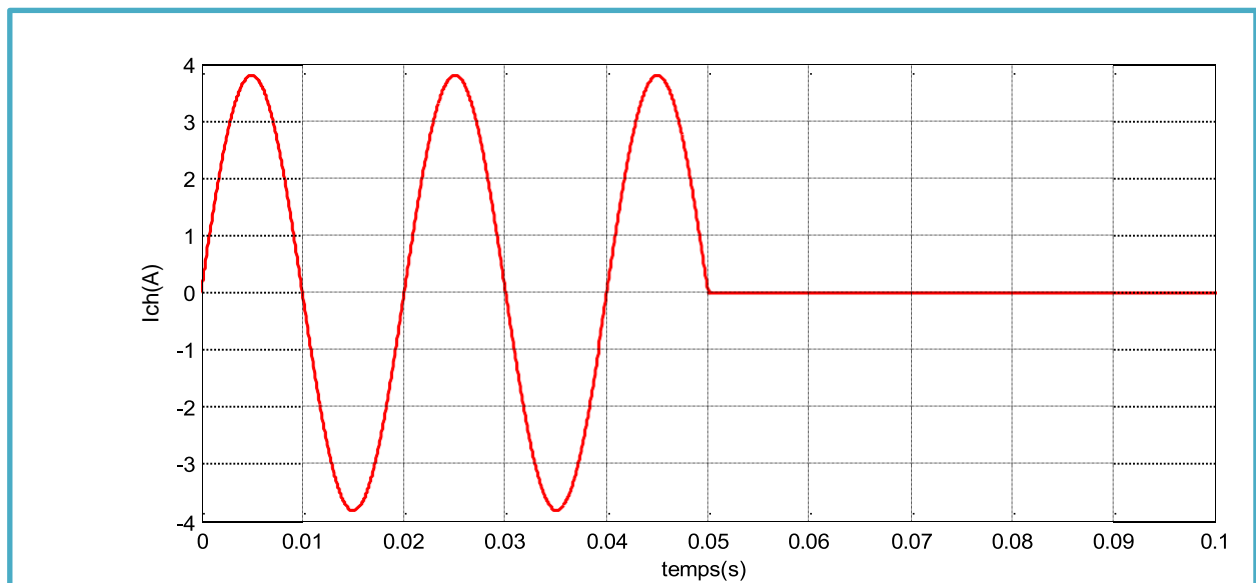


Figure IV.12. Courant de charge.

Les valeurs efficaces des tensions et des courants :

- $V_{Seff} = 220V$, $I_{Seff_cc} = 109.9 A$
- $V_{Cheff} = 0.1099V$, $I_{Cheff_cc} = 0.0013A$

D'après les résultats obtenus on observe deux phases :

La première phase représente l'état normal du circuit, c'est-à-dire que le courant dans le circuit est le courant nominal $I = 2.68A$.

La deuxième phase (à partir de l'instant $t_{cc} = 0.05s$) représente le courant de court-circuit $I_{cc} = 109.9A$.

IV.3.4 Simulation avec protection

IV.3.4.1 Relais de protection à maximum de courant

Dans ce travail, réalisé à l'aide de l'environnement Simulink/Matlab, un exemple de court-circuit monophasé, parmi les plus connus et les plus fréquents dans les réseaux électriques, a été étudié. Il est important de noter que la protection à maximum de courant a pour objectif de protéger contre ce type de défaut. Cette protection est composée principalement d'un transformateur de courant (élément de mesure), d'un relais à maximum de courant (élément de surveillance et de contrôle), ainsi que d'un disjoncteur (élément de coupure). Ce

Le système doit être capable de détecter le courant de court-circuit et d'envoyer un ordre de déclenchement au disjoncteur afin d'assurer la protection.

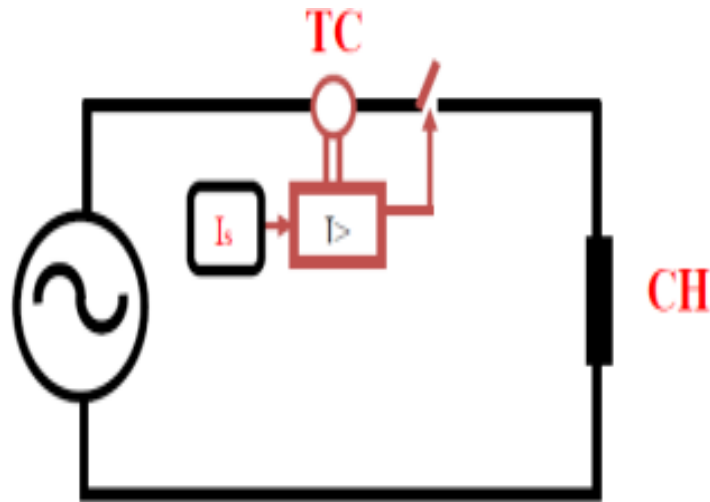


Figure IV.13. Schéma synoptique d'une protection à max de courant.

IV.3.4.2 Calcul du seuil de déclenchement

La caractéristique principale de ce type de protection réside dans son seuil de déclenchement. En effet, le courant seuil est déterminé par la formule $I_{\text{seuil}} = 0.8 I_{\text{ccmin}}$. Le courant de court-circuit minimal (I_{ccmin}) est $I_{\text{ccmin}} = 109 \text{ A}$, alors $I_{\text{seuil}} = 87.2 \text{ A}$.

IV.3.4.3 Schéma de simulation

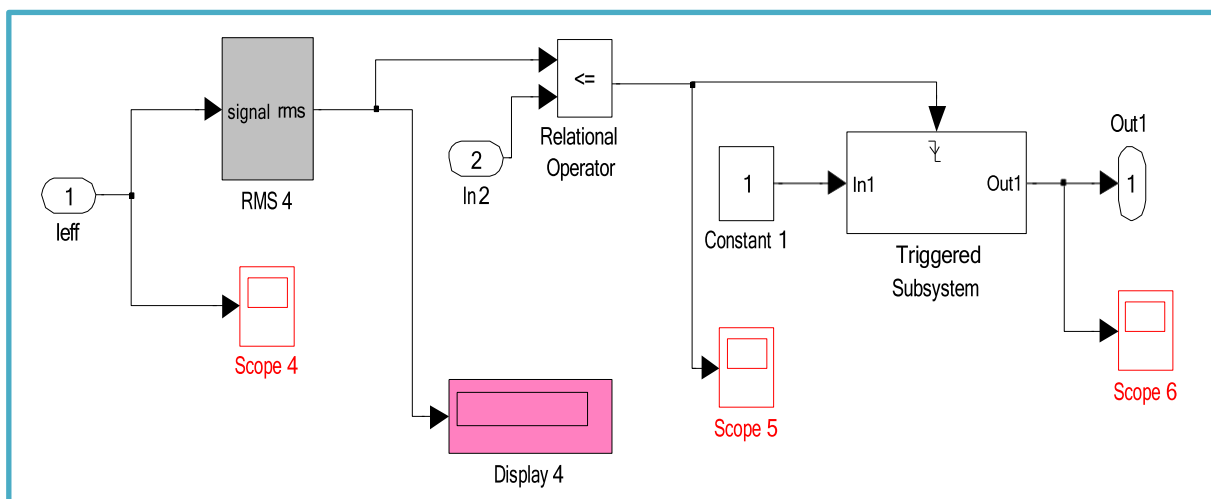


Figure IV.14. Schéma Simulink /Matlab du relais à maximum de courant.

Le schéma Simulink/Matlab présenté dans ce mémoire figure IV.14 est principalement composé d'un élément de comparaison, appelé «relational operator», dont le rôle est de comparer le courant mesuré au seuil prédéfini. Il comprend également un composant « trigger » chargé d'envoyer un signal de déclenchement au disjoncteur lorsque la valeur du courant sur la ligne dépasse le seuil établi.

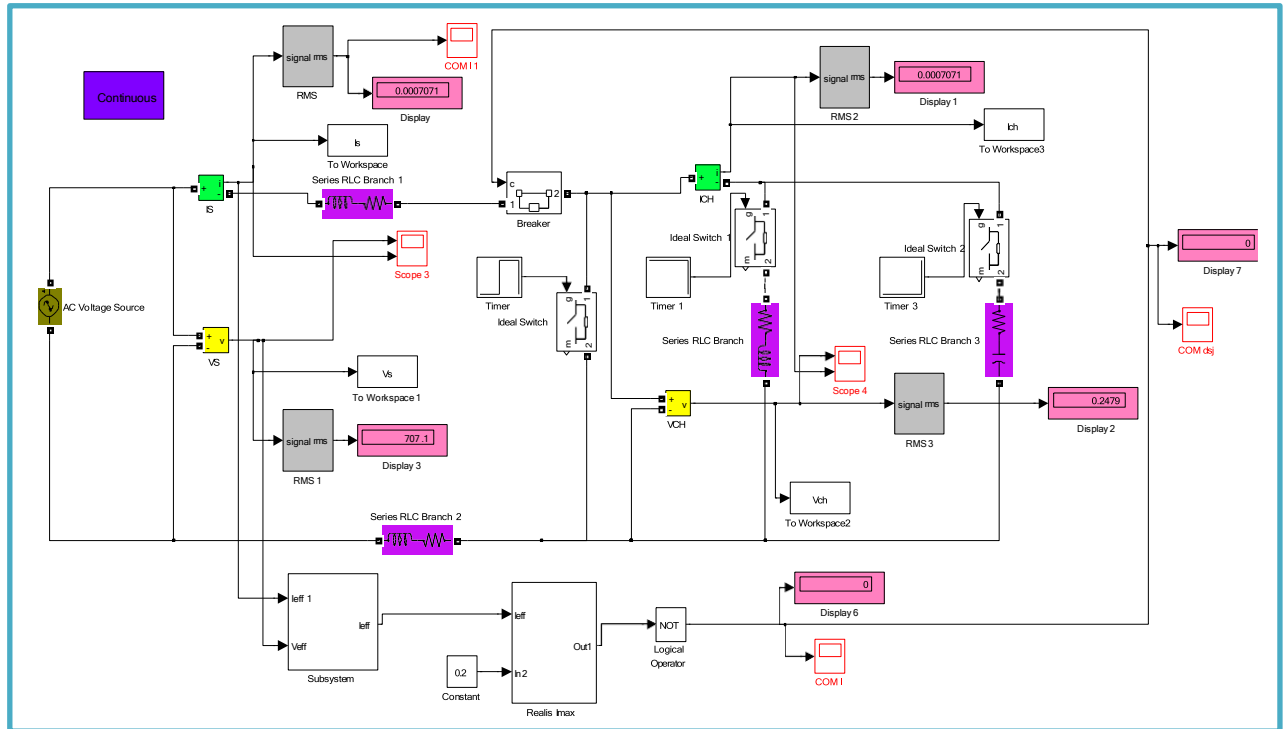


Figure IV.15. Schéma de simulation d'un système de protection à max de courant.

Les courbes suivantes représentent les résultats de la simulation :

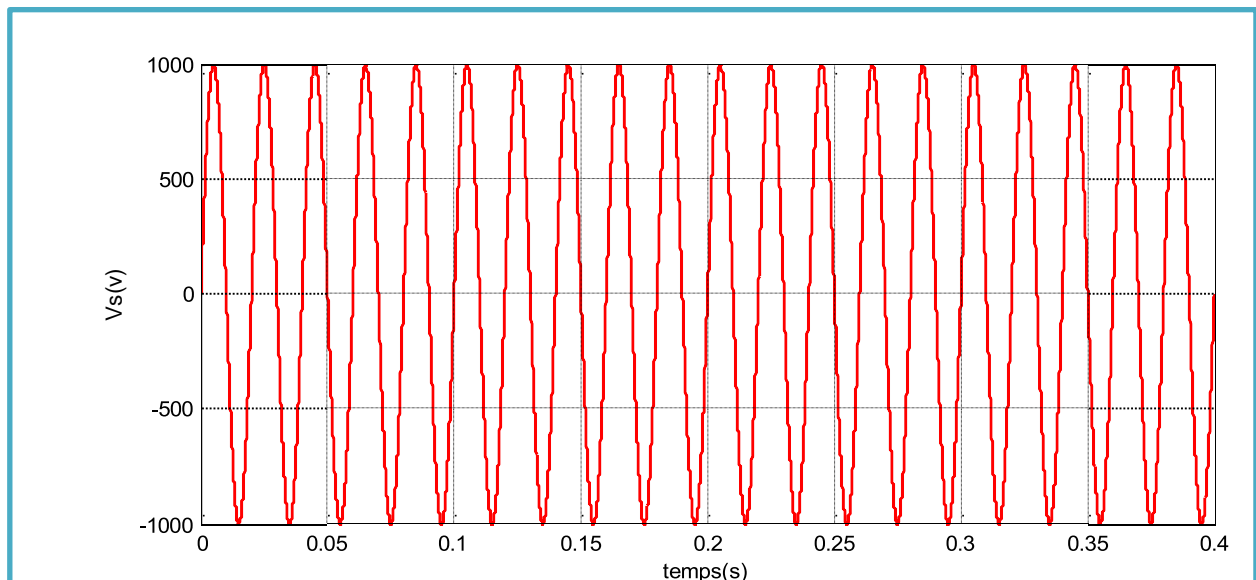


Figure IV.16. La tension de la source.

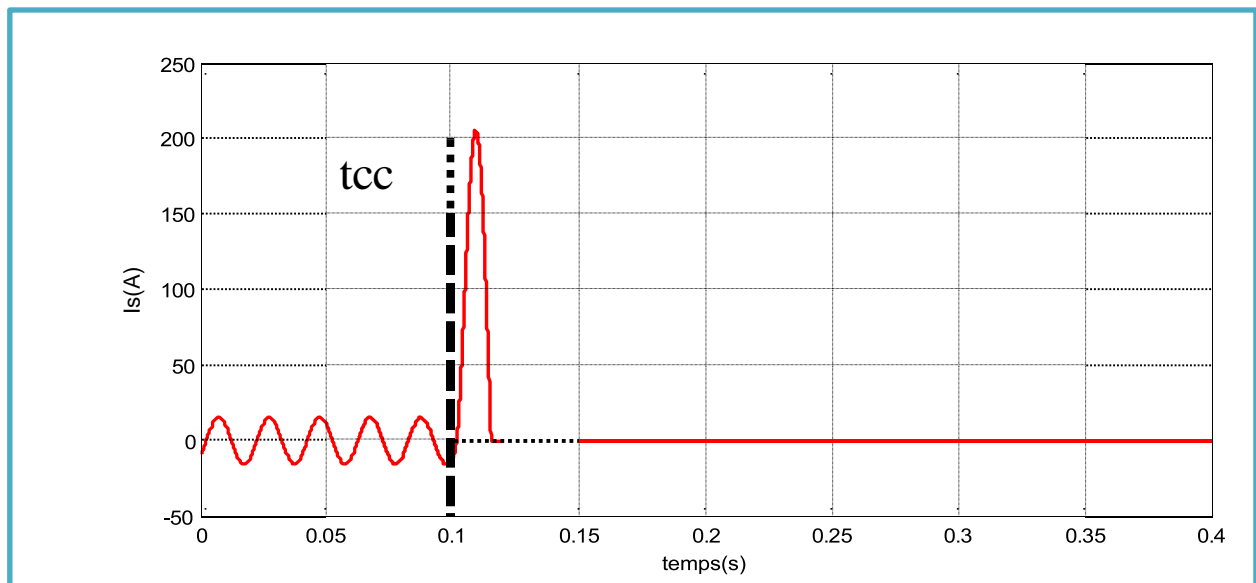


Figure IV.17. Le courant de la source.

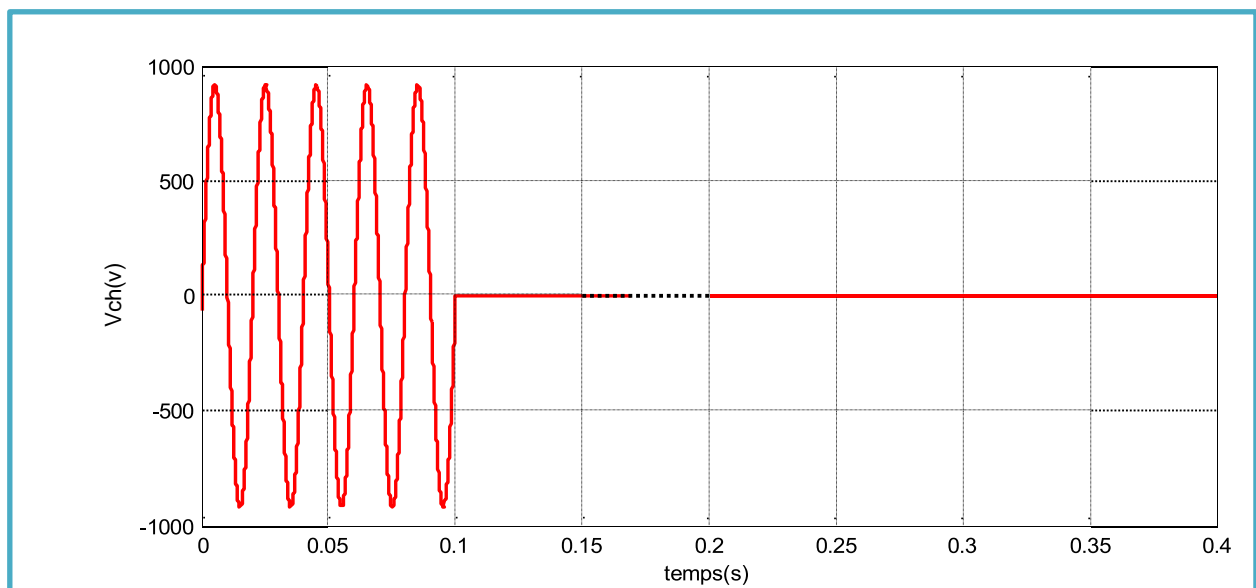


Figure IV.18. La tension de la charge.

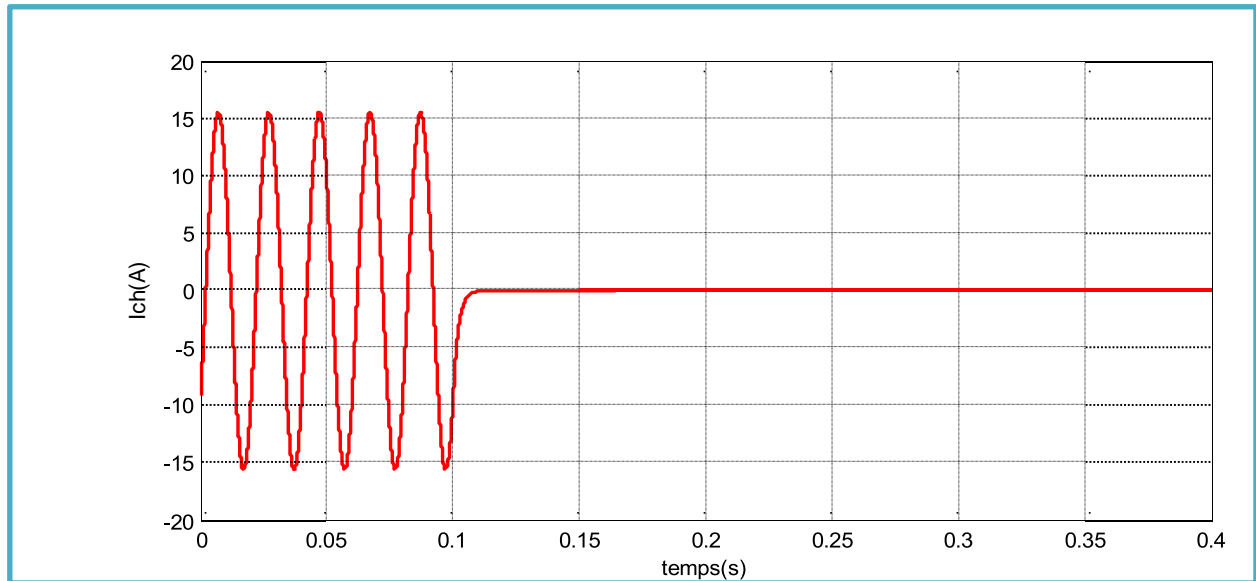


Figure IV.19. Le courant de la charge.

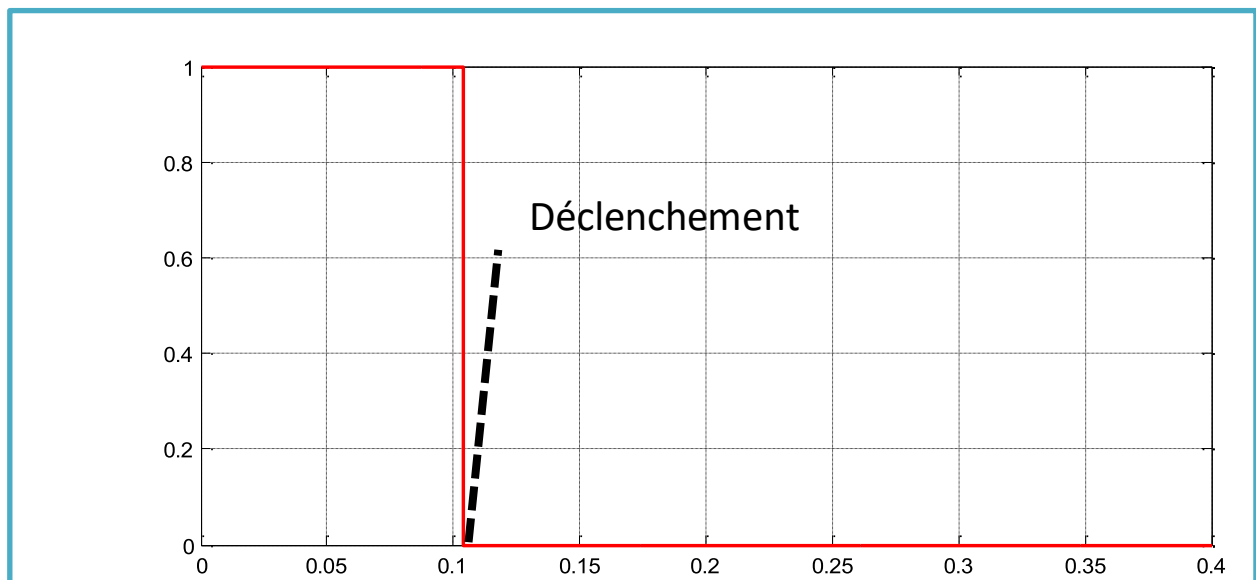


Figure IV.20. Signal de commande du disjoncteur.

Les valeurs efficaces des tensions et des courants :

- $V_{Seff} = 707.1V$, $I_{Seff_cc} = 0.0007071 A$
- $V_{Cheff} = 0.2479V$, $I_{Cheff_cc} = 0.0007071 A$

D'après les résultats obtenus on observe trois phases :

La première phase représente l'état normal du circuit , c'est-à-dire que le courant dans le circuit est le courant nominal $I=2.68A$.

La deuxième phase (à partir de l'instant $t_{cc}=0.1s$) représente le courant de court-circuit

$I_{cc}=0.0007071A.$

La troisième phase (à partir de l'instant $t_{cc}=0.15s$) représente la coupure de disjoncteur.

IV.4 Simulation d'une protection à max de courant directionnelle

IV.4.1 Description du circuit

La figure. IV.21 représente une description d'un circuit électrique sans aucun système de protection et sans aucun défaut. Dont ces éléments constitutifs sont :

Source : $V_{eff} = 220V$, $f = 50\text{ Hz}$, $Z_s = 1+j0.0628\ \Omega$.

Ligne : $Z_L = 1+j6.28\Omega$.

Charges : $Z_{ch1} = 0.5-j31.84\ \Omega$, $Z_{ch2} = 50+j31.4\ \Omega$.

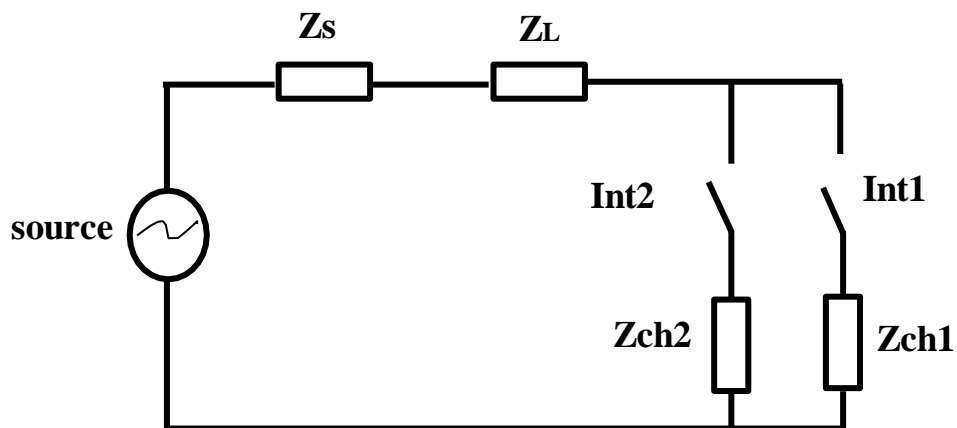


Figure IV .21. Schéma synoptique du circuit état sain.

IV.4.2 Simulation état normal

La figure IV.18 représente le schéma du la simulation du circuit en état sain (sans défaut sans protection).

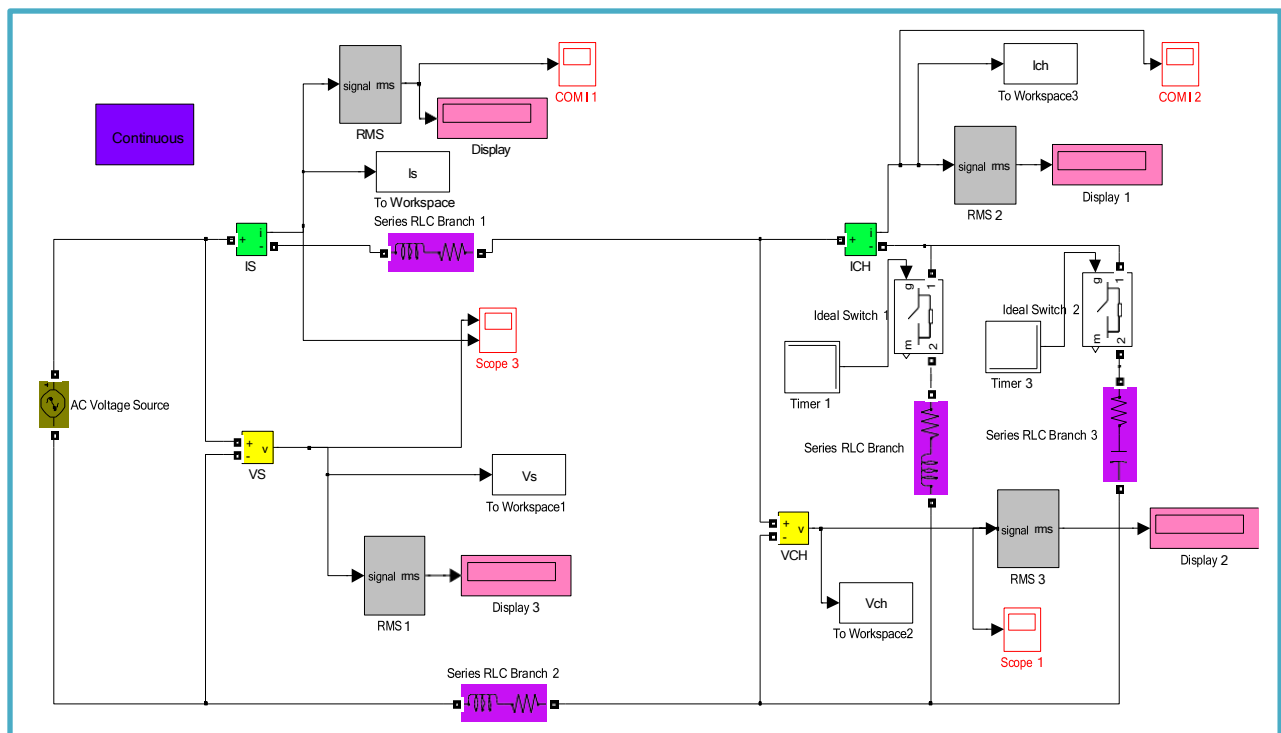


Figure IV .22. Schéma représente la simulation du circuit en état sain.

Dans cette simulation on a remplacé la charge 1 par une autre faible charge (charge 2) pour inverser le sens d'écoulement de la puissance.

Les courbes suivantes représentent les résultats de la simulation :

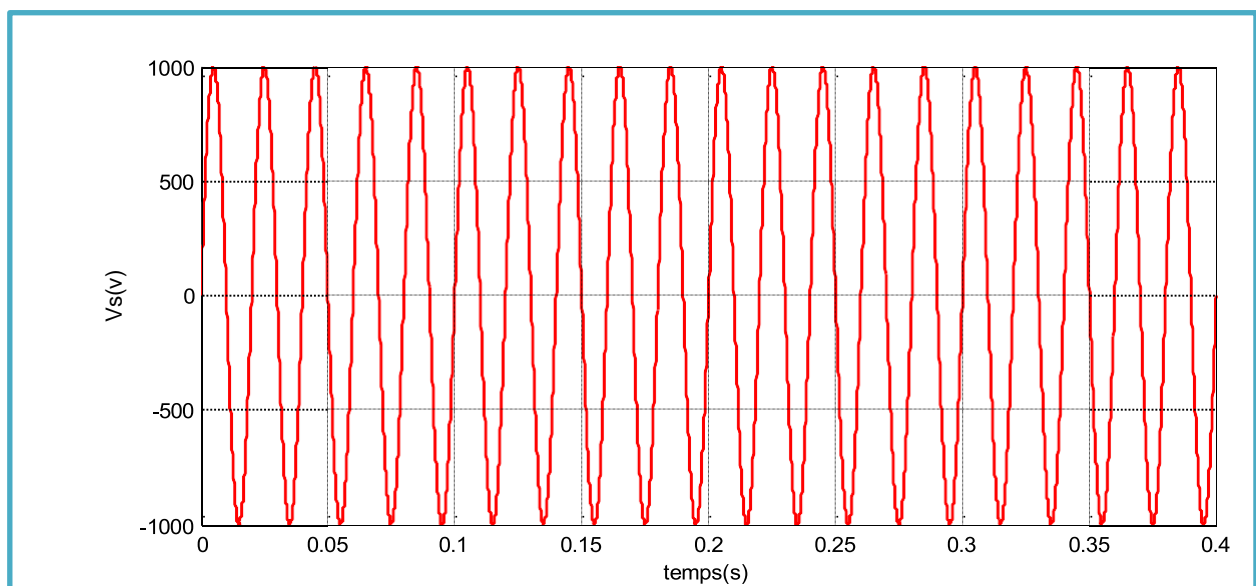


Figure IV.23. Tension de la source.

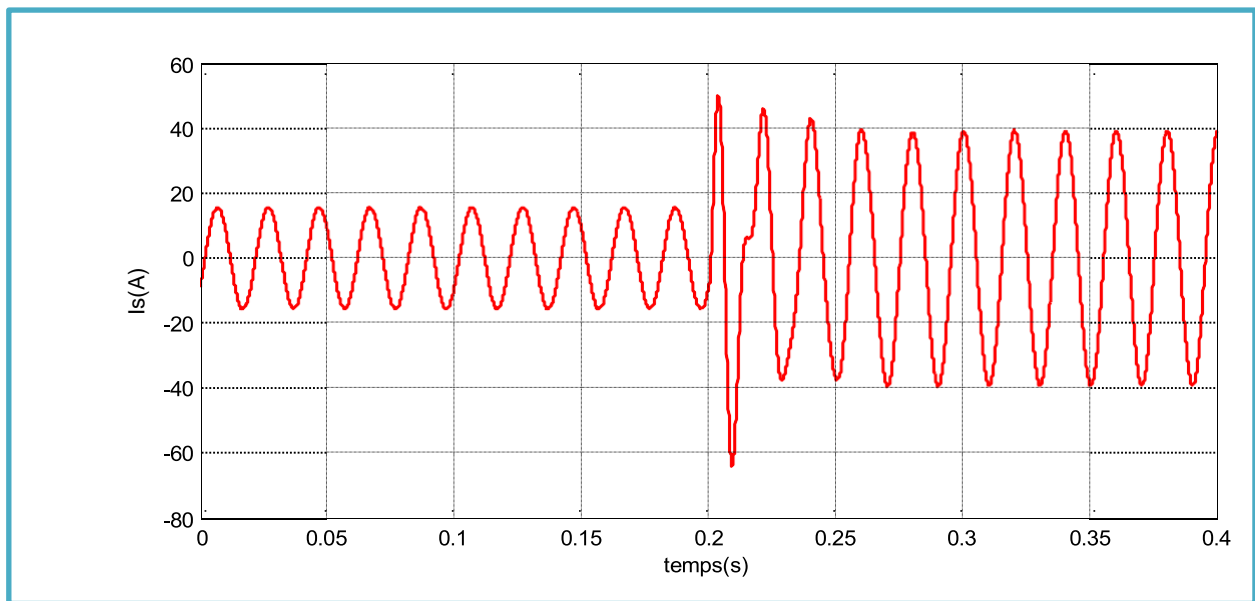


Figure IV.24. Courant de la source.

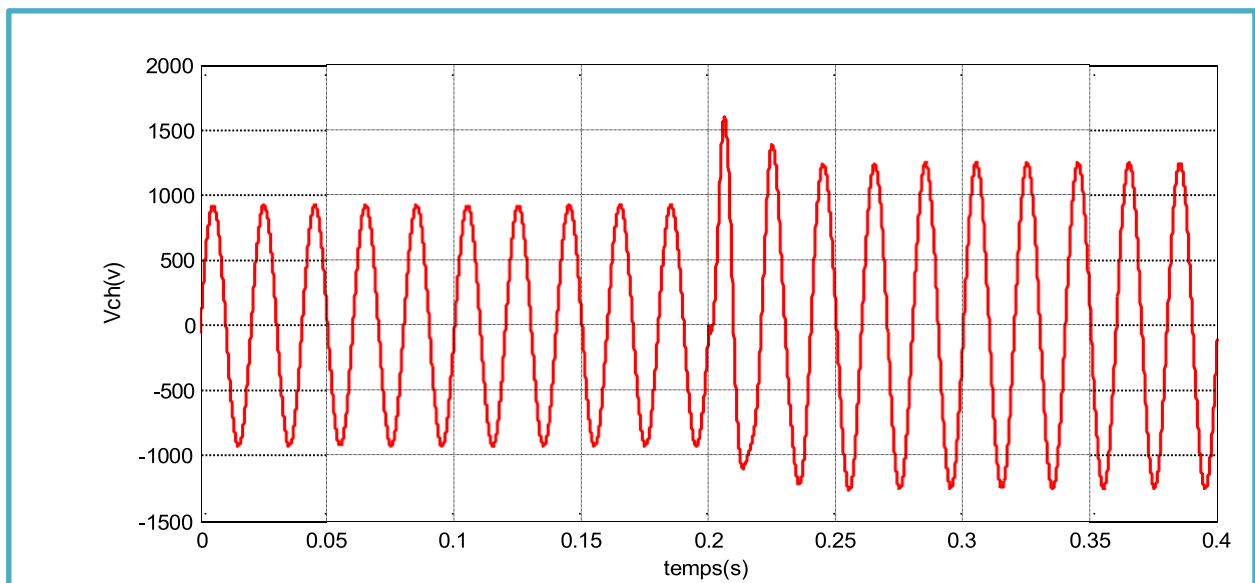


Figure IV.25. Tension de la charge.

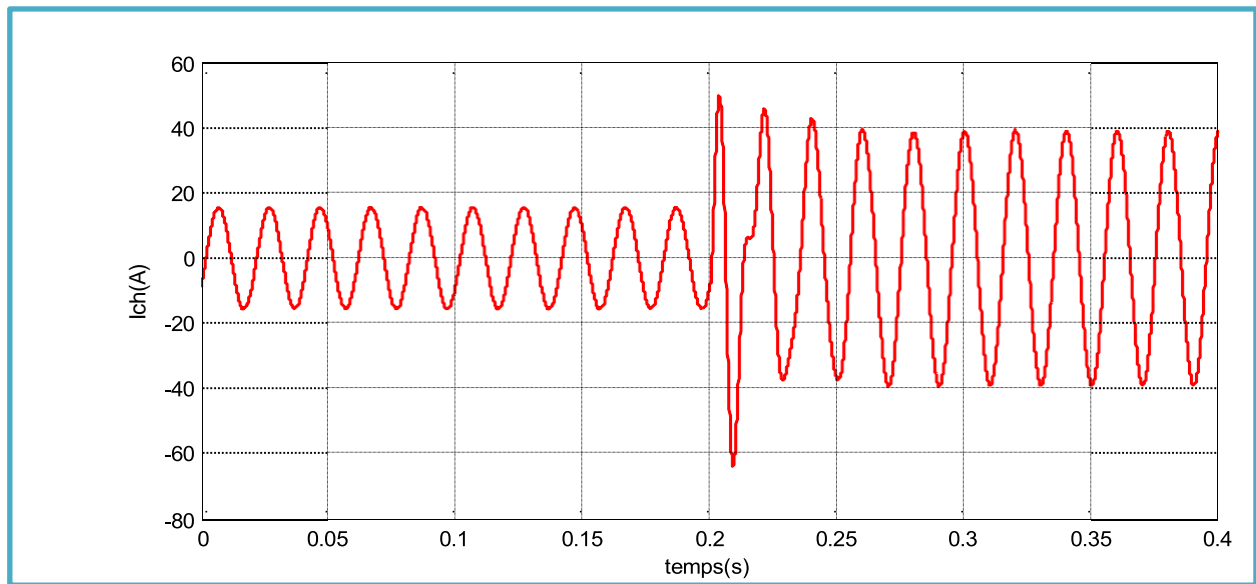


Figure IV.26. Courant de la charge.

D'après les résultats de simulation obtenues on observe les valeurs efficaces des tensions et des courants :

- $V_{\text{Seff}} = 707.1\text{V}$, $I_{\text{Seff}} = 27.62\text{A}$
- $V_{\text{Cheff}} = 879.1\text{V}$, $I_{\text{Seff}} = 27.62\text{A}$

D'après les résultats obtenus on observe trois phases :

La première phase représente l'état normal du circuit, le courant dans le circuit est le courant nominal $I = 2.68\text{A}$.

La deuxième phase (à partir de l'instant $t = 0.2\text{s}$) représente l'inversion du sens d'écoulement du courant.

La troisième phase (à partir de l'instant $t_{\text{cc}} = 0.25\text{s}$) représente la coupure de la deuxième charge après l'inversion du sens d'écoulement du courant.

IV.4.3 Simulation avec défaut de court-circuit

Dans cette partie nous avons étudié à l'aide de l'environnement SIMULINK /MATLAB la conséquence de défaut de court-circuit le schéma de simulation est montré sur la figure IV.27

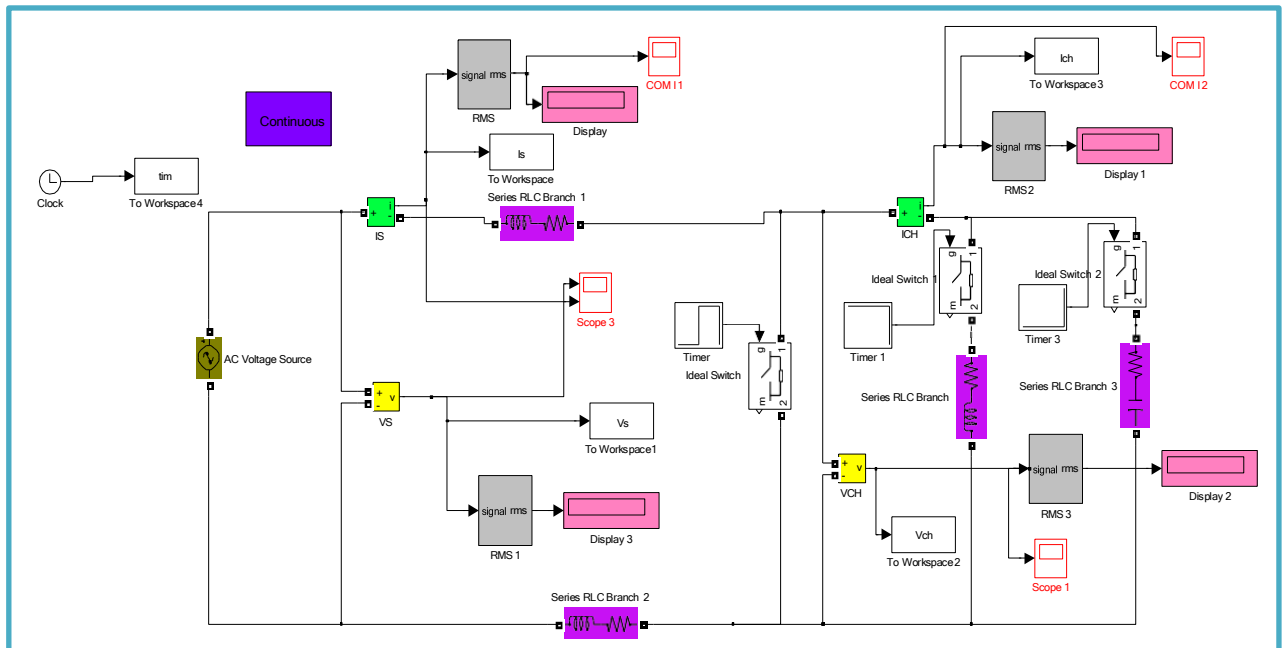


Figure IV.27. Schéma de simulation du réseau avec défaut.

Dans cette simulation on a remplacé la charge 1 par une autre faible charge (charge 2) pour inverser le sens d'écoulement de la puissance. Pour ce faire, on a court-circuité la première charge à l'aide du « **Breaker 1** ». Le branchement de la deuxième charge est assuré par le « **Breaker 2** » à l'instant $t=0.1s$ et $t=0.2s$

Les courbes suivantes représentent les résultats de la simulation :

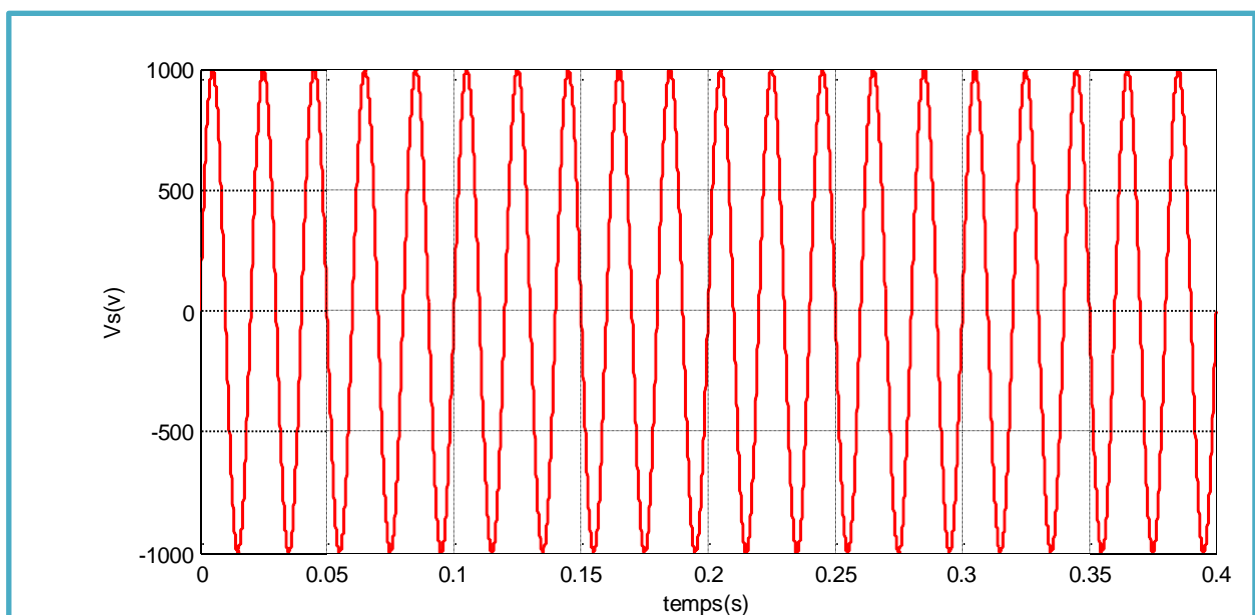


Figure IV.28. Tension de la source.

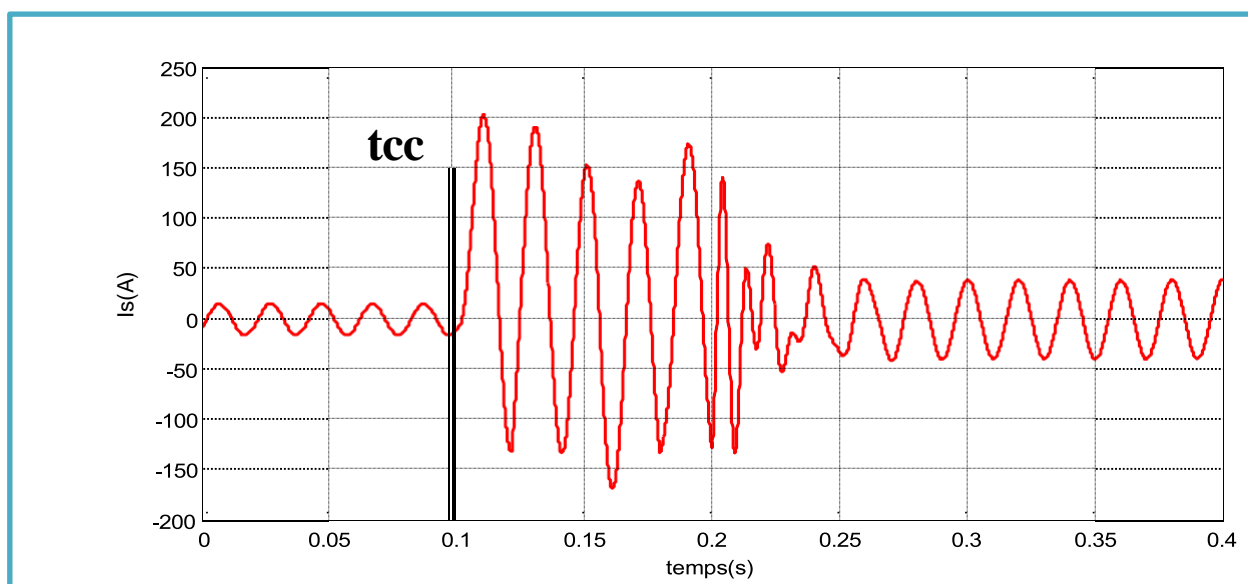


Figure IV.29. Courant de la source.

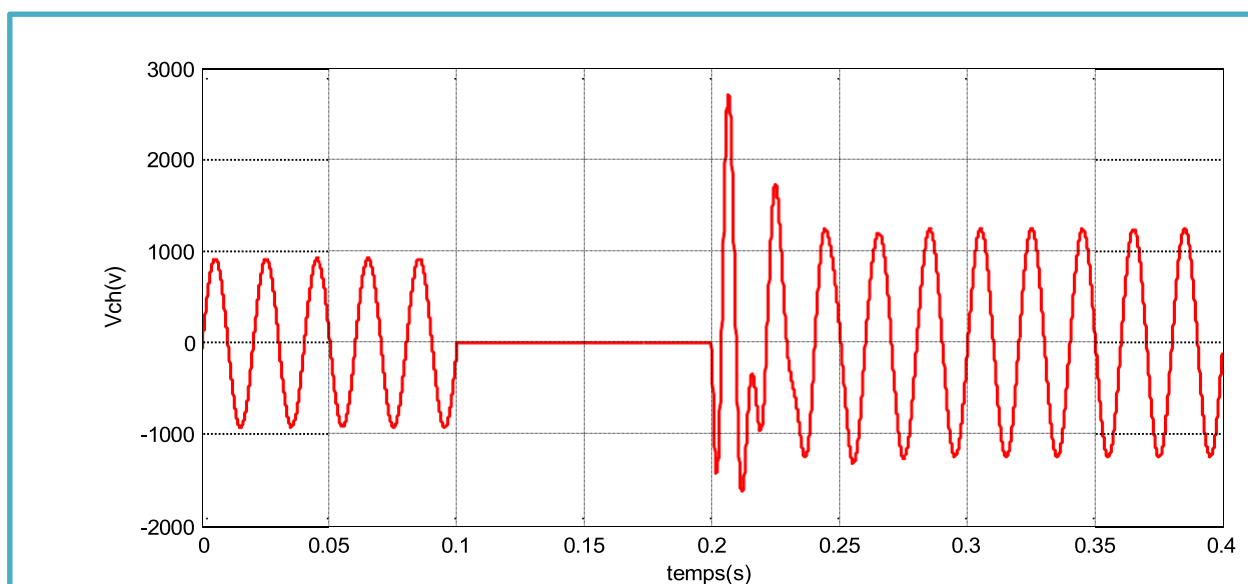


Figure IV.30. Tension de la charge.

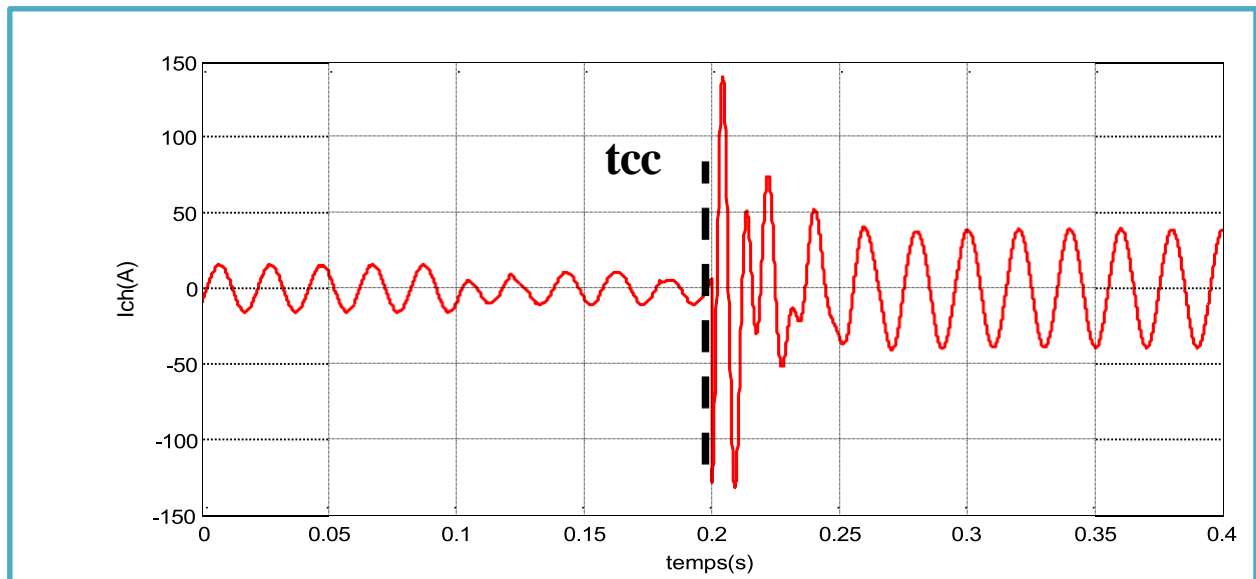


Figure IV.31. Courant de la charge.

D'après les résultats de simulation obtenues on observe les valeurs efficaces des tensions et des courants :

- $V_{\text{Seff}} = 707.1\text{V}$ $I_{\text{Seff_cc}} = 0.001401\text{A}$
- $V_{\text{Cheff}} = 1210\text{V}$ $I_{\text{Seff_cc}} = 0.01333\text{A}$

D'après les résultats obtenus on observe trois phases :

La première phase représente l'état normal du circuit cad le courant dans le circuit est le courant nominal $I = 2.68\text{A}$.

La deuxième phase (à partir de l'instant $t = 0.2\text{s}$) représente le courant de court-circuit $I_{\text{cc}} = 0.001401\text{A}$.

La troisième phase (à partir de l'instant $t_{\text{cc}} = 0.25\text{s}$) représente la coupure de la deuxième charge après inversion du sens d'écoulement du courant.

IV.4.4 Simulation avec protection

IV.4.4.1 Relais de protection à max de courant directionnel

Ce type de protection surveille simultanément deux grandeurs le courant et le sens d'écoulement de l'énergie (θ). Son déclenchement se produit soit lorsque le courant dépasse un seuil prééglé, soit en cas d'inversion du sens d'écoulement de l'énergie.

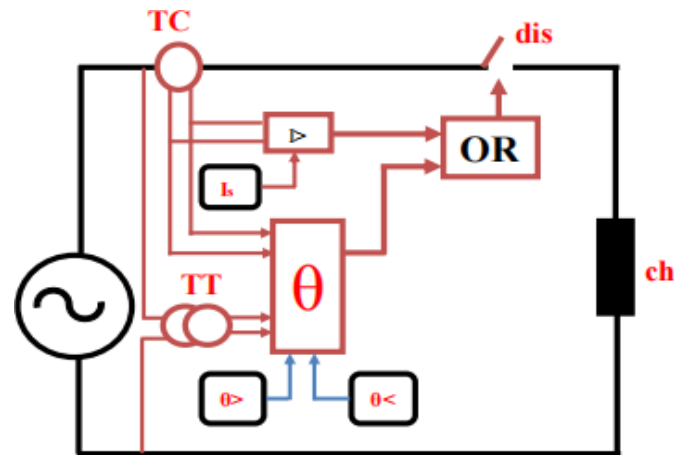


Figure IV.32. Schéma synoptique d'une protection à max de courant directionnel.

Ce dernier schéma regroupe les deux systèmes précédemment évoqués au sein d'un unique système global. Une porte « OR » permet l'association des deux relais :

Le relais directionnel et le relais de maximum de courant. Les conditions de fonctionnement sont les suivantes :

- Dépassement du seuil de courant.
- Inversion du déphasage (franchissement d'une fourchette prédéfinie).

IV.4.4.2 Calcul du déphasage(θ)

La caractéristique principale de ce type de protection réside dans son mesurer l'angle (θ).

IV.4.4.3 Schéma de simulation

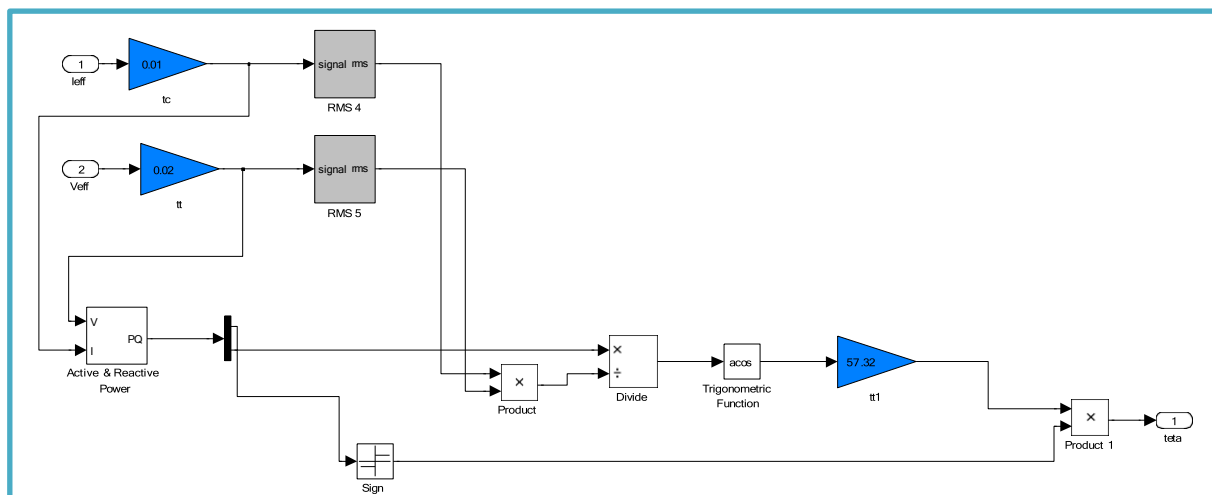


Figure IV.33. Schéma de simulation de la mesure de l'angle (θ).

Les caractéristiques de la simulation sont :

Source : $V_{\text{eff}} = 220\text{V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $Z_s = 1 + j0.0628\ \Omega$

Ligne : $Z_L = 1 + j6.28\ \Omega$.

Charges : $Z_{ch1} = 0.5 + j31.84\ \Omega$, $Z_{ch2} = 50 + j31.4\ \Omega$

L'instant d'apparition du court-circuit est $t_{cc} = 0.06\text{s}$

Le rapport du transformateur de courant est $1/100$.

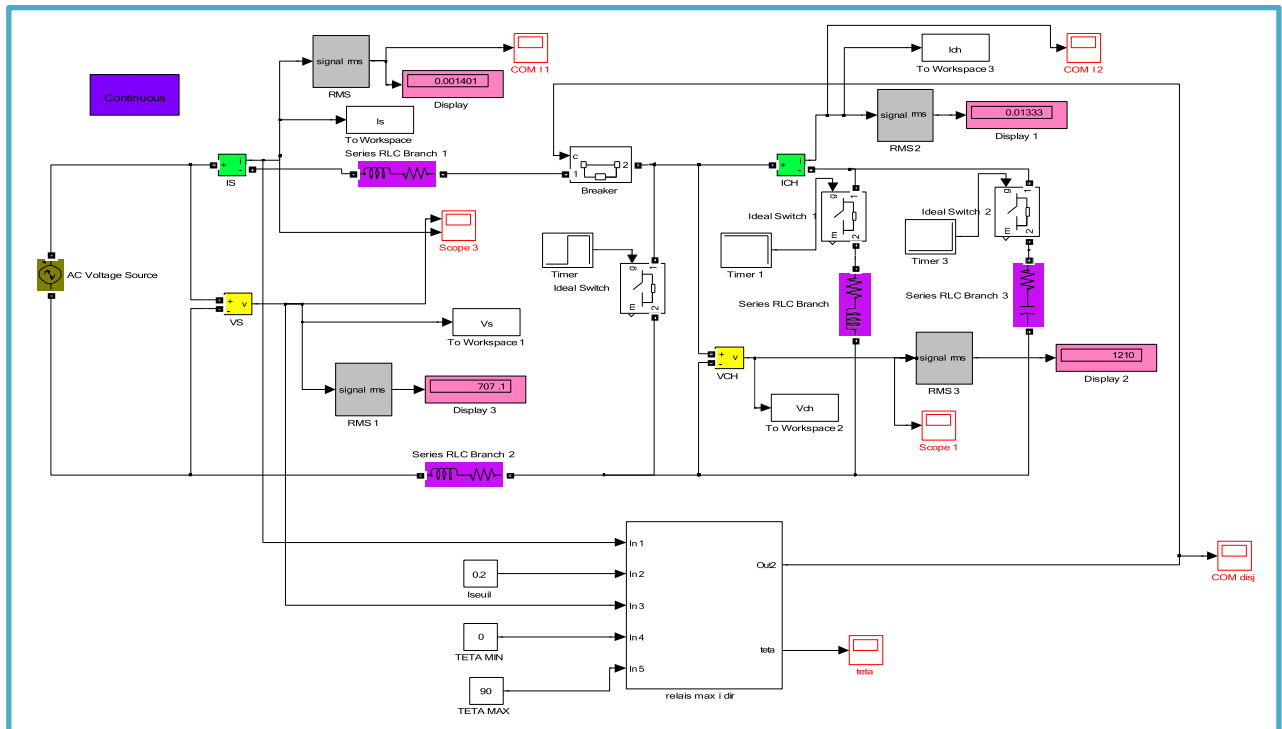


Figure IV.34. Schéma de simulation d'une protection à max de courant directionnelle.

Les courbes suivantes représentent les résultats de la simulation :

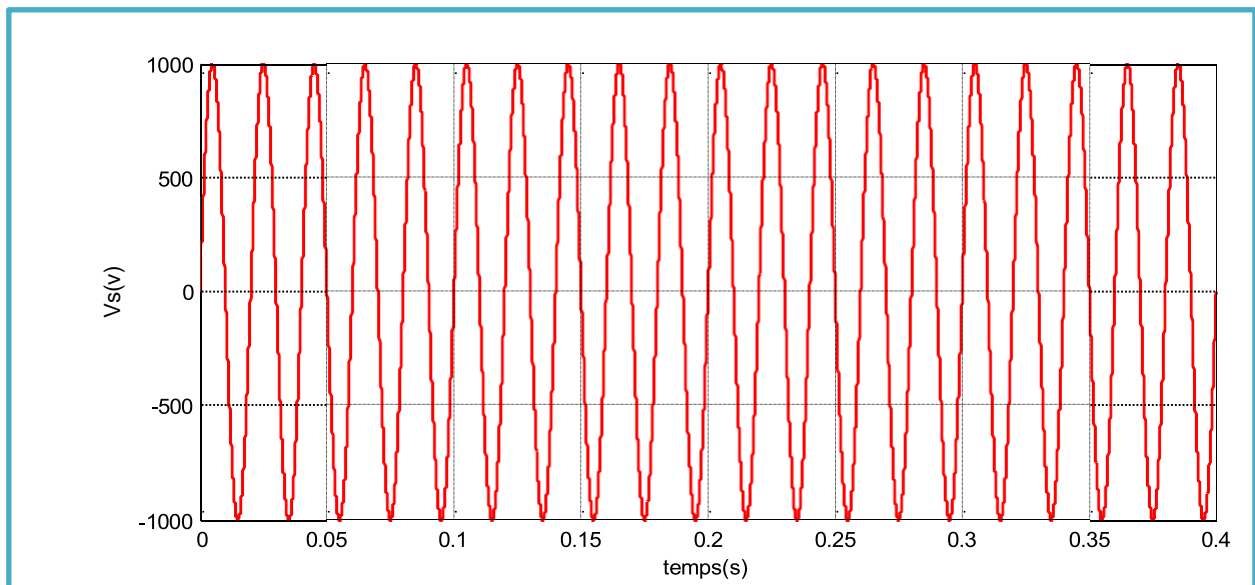


Figure IV.35. Tension de la source.

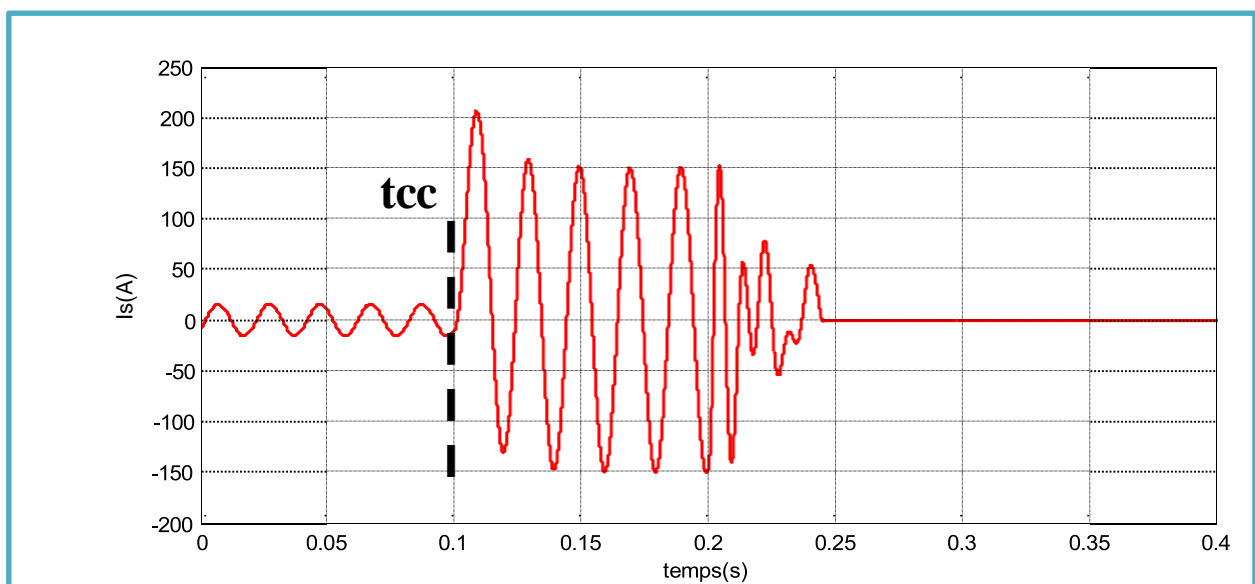


Figure IV.36. Courant de la source.

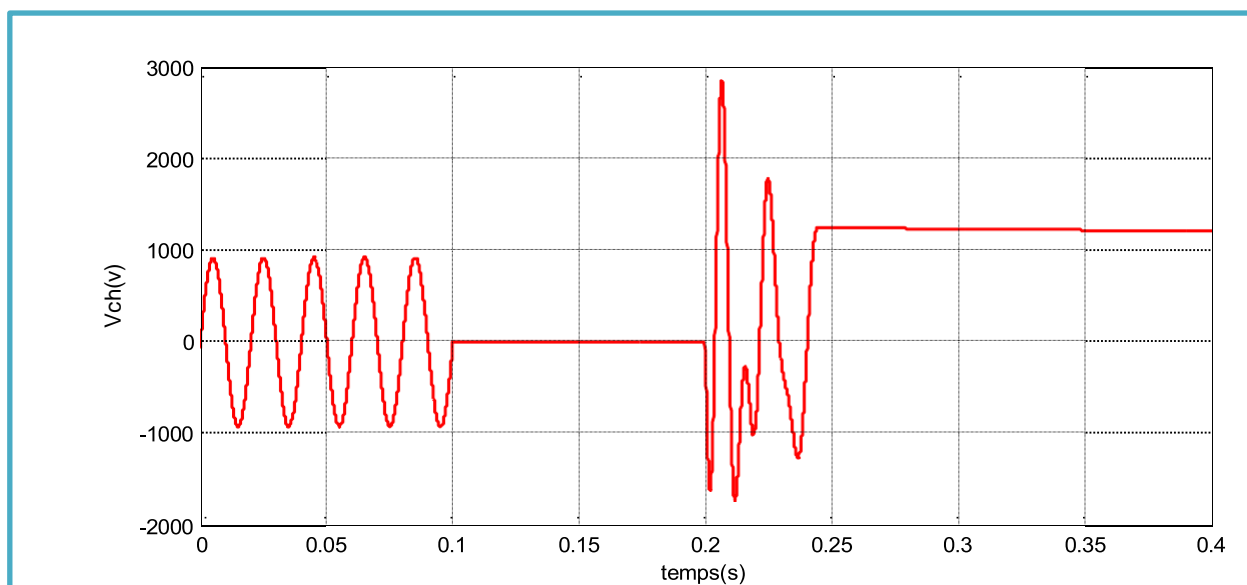


Figure IV.37. Tension de la charge.

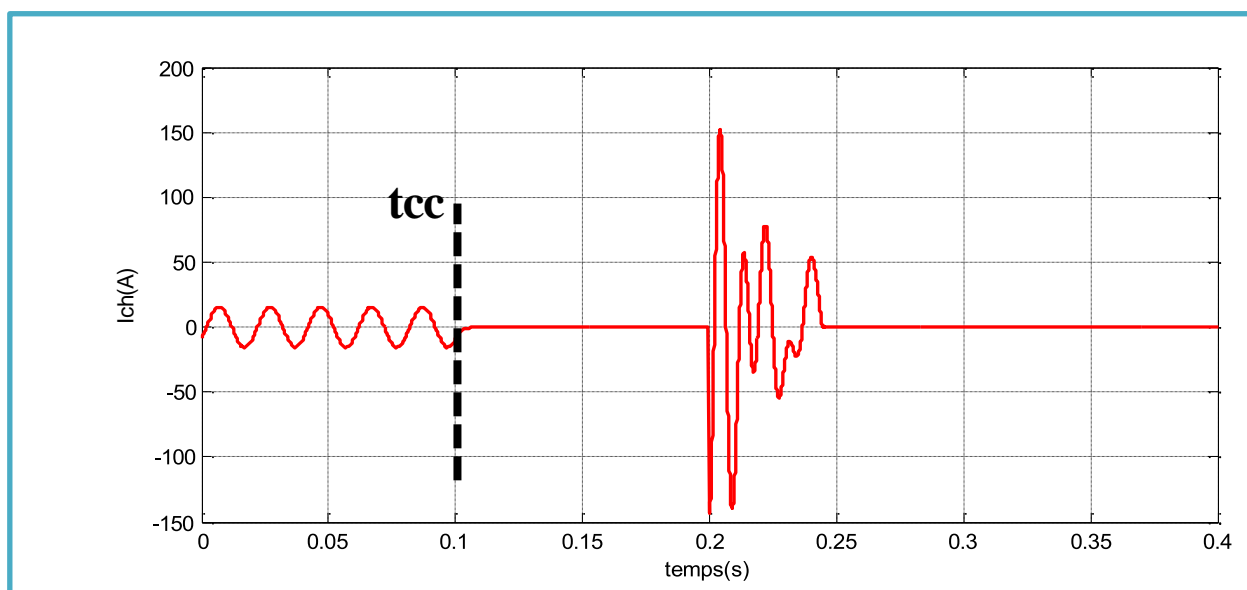


Figure IV.38. Courant de la charge.

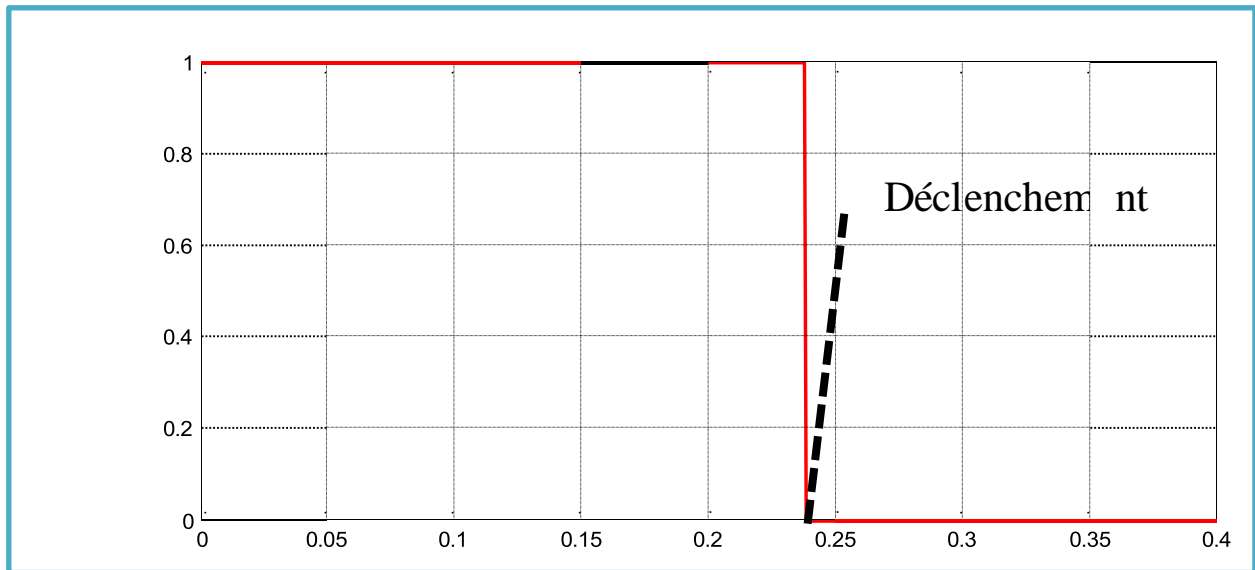
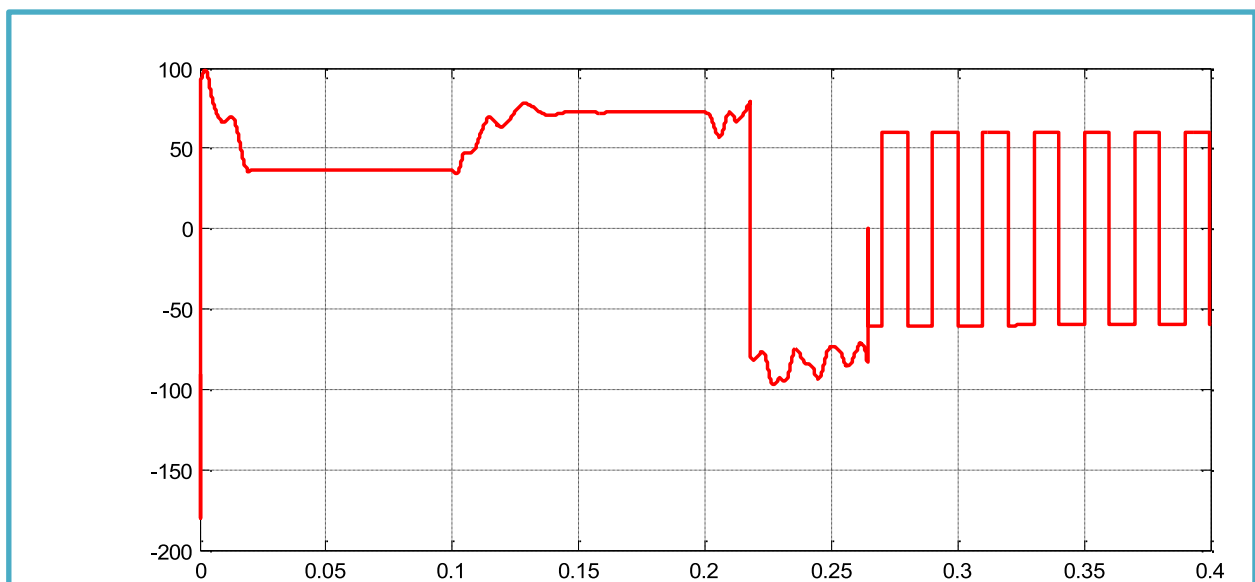


Figure IV.39. Signal de commande du disjoncteur.

Figure IV.40. Le déphasage (θ).

D'après les résultats de simulation obtenues on observe les valeurs efficaces des tensions et des courants :

- $V_{\text{Seff}} = 707.1\text{V}$, $I_{\text{Seff_cc}} = 0.001401\text{A}$
- $V_{\text{Cheff}} = 1210\text{V}$, $I_{\text{Seff_cc}} = 0.01333\text{A}$

D'après les résultats obtenus on observe trois phases :

La première phase représente l'état normal du circuit cad le courant dans le circuit est le courant nominal $I = 2.68\text{A}$.

La deuxième phase (à partir de l'instant $t=0.2s$) représente le courant de court-circuit $I_{cc}=0.001401A$.

La troisième phase (à partir de l'instant $t_{cc}=0.25s$) représente la coupure par le disjoncteur.

Nous remarquons également que le déphasage (θ) a changé de signe, ce qui signifie l'inversion du sens d'écoulement du courant.

IV.5 Application

IV.5.1 Description de l'application

La figure. IV.41 représente le schéma unifilaire de l'application considérée. Le circuit est constitué de deux lignes :

- La ligne 1 : protégée par deux protections P1 et P2

P1 : protection à max courant.

P2 : protection à max courant directionnelle.

- La ligne 2 : protégée par deux protections P3 et P4

P3 : protection à max courant.

P4 : protection à max courant directionnelle.

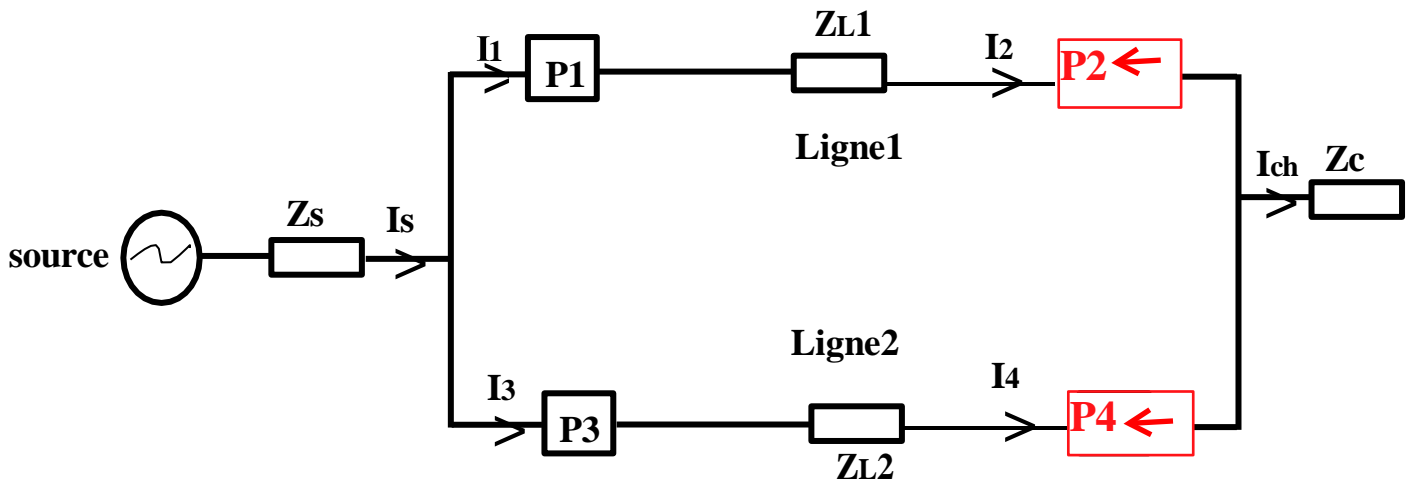


Figure IV .41. Deux lignes avec système de protection directionnel.

L'objectif de cette application est : ligne 1 est considérée comme ligne de secours pour la ligne 2. Et également la ligne 2 est une ligne secours pour la ligne 1.

IV.5.2 Schéma Simulink de l'application

Figure IV .42 représente le schéma simulation du circuit électrique à deux lignes avec deux types de système de protection , à max courant ordinaire et celui à max courant directionnel.

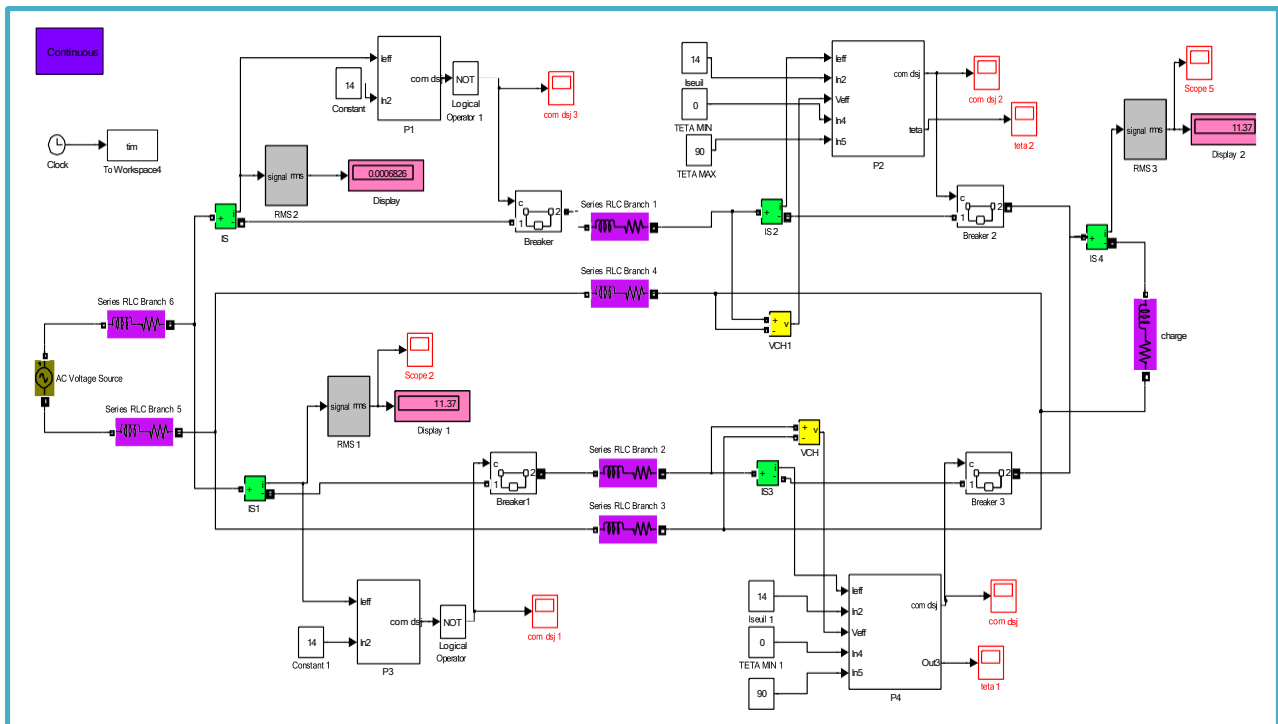


Figure IV.42 Schéma simulink de l'application.

IV.5.3 Résultats de la simulation

IV.5.3.1 Défaut de court-circuit dans la ligne 1

Première ligne avec défaut de court-circuit. Les résultats de la simulation sont :

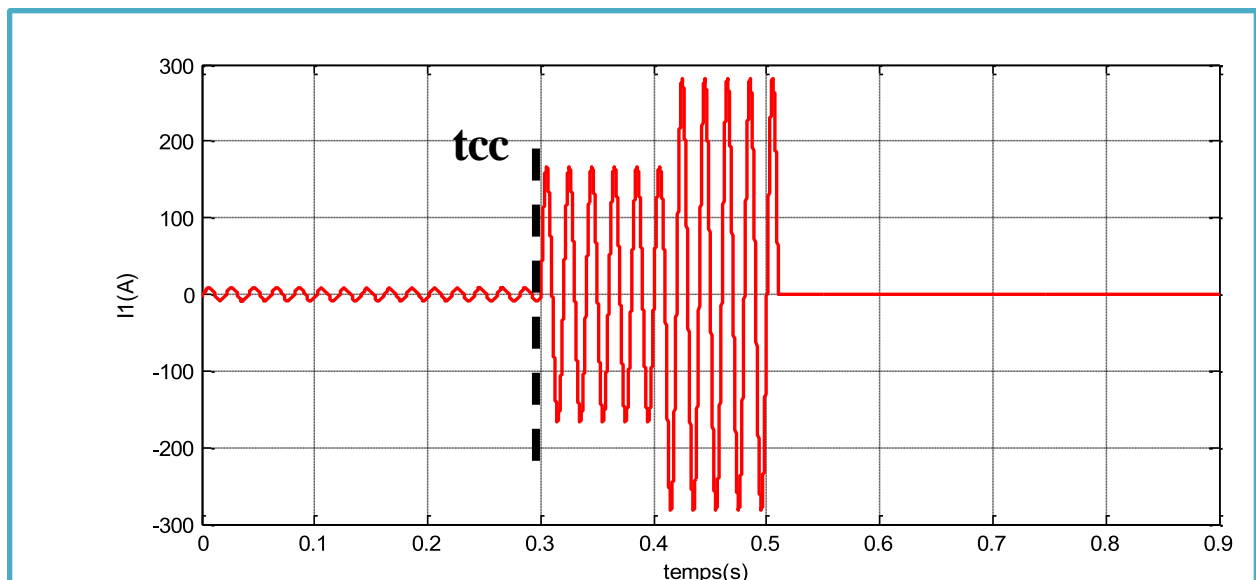


Figure IV.43. Courant de la protection (P1).

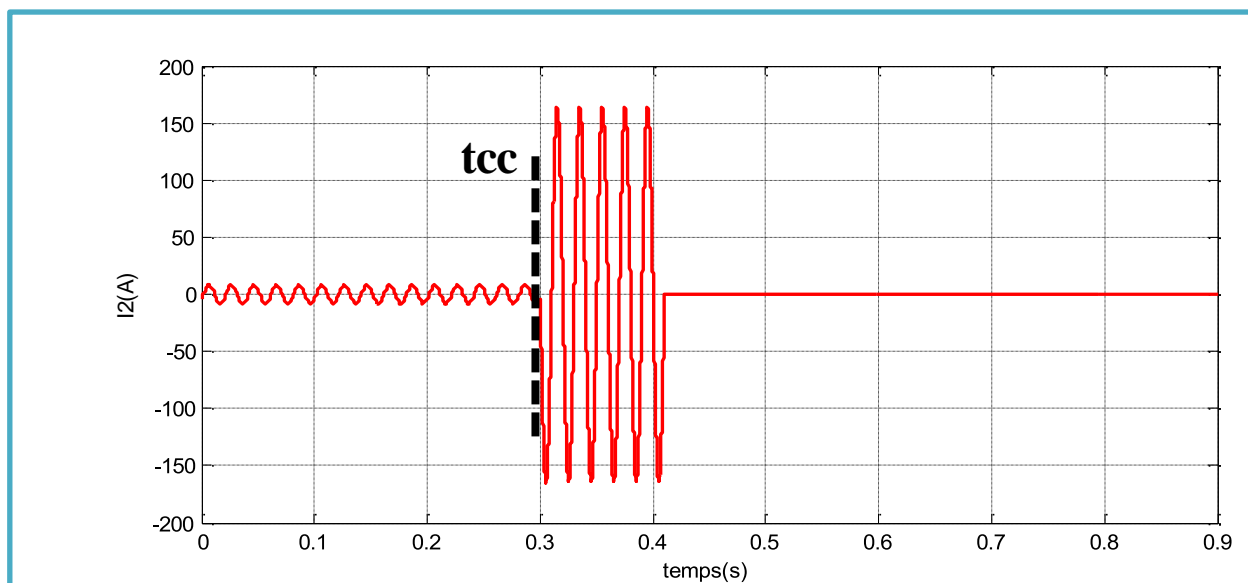


Figure IV.44. Courant de la protection (P2).

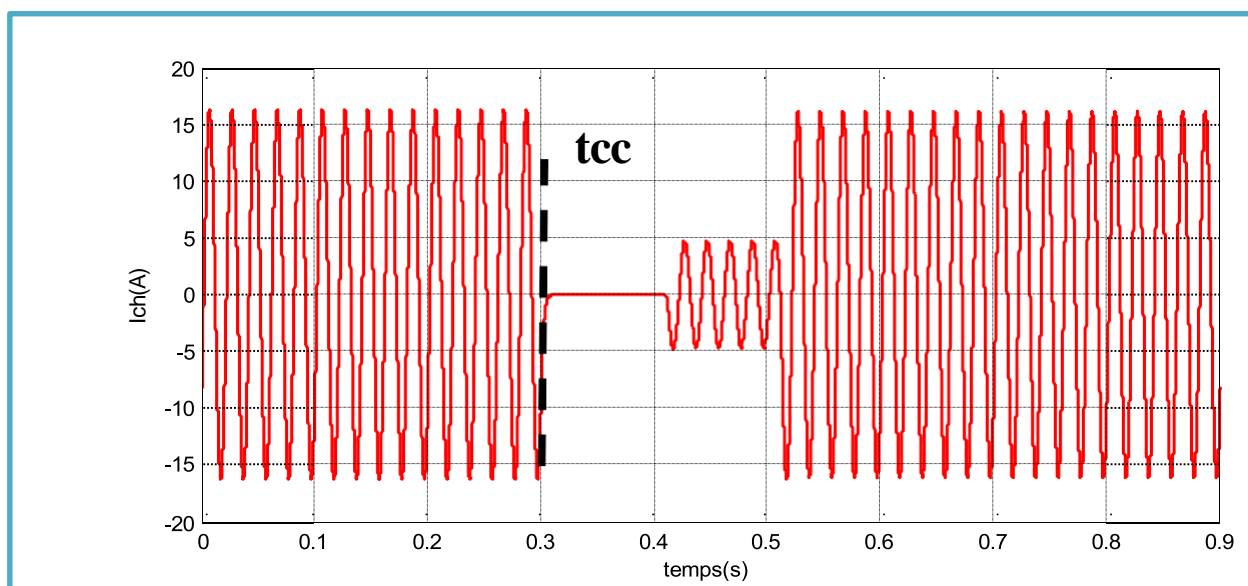


Figure IV.45. Courant de la charge.

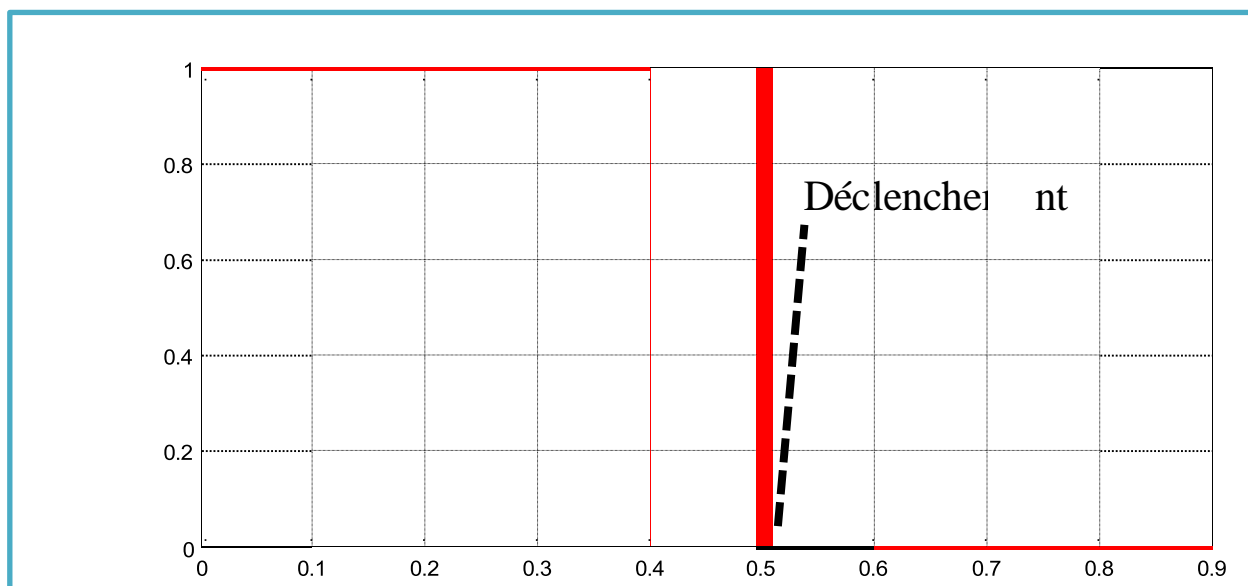


Figure IV.46. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P1).

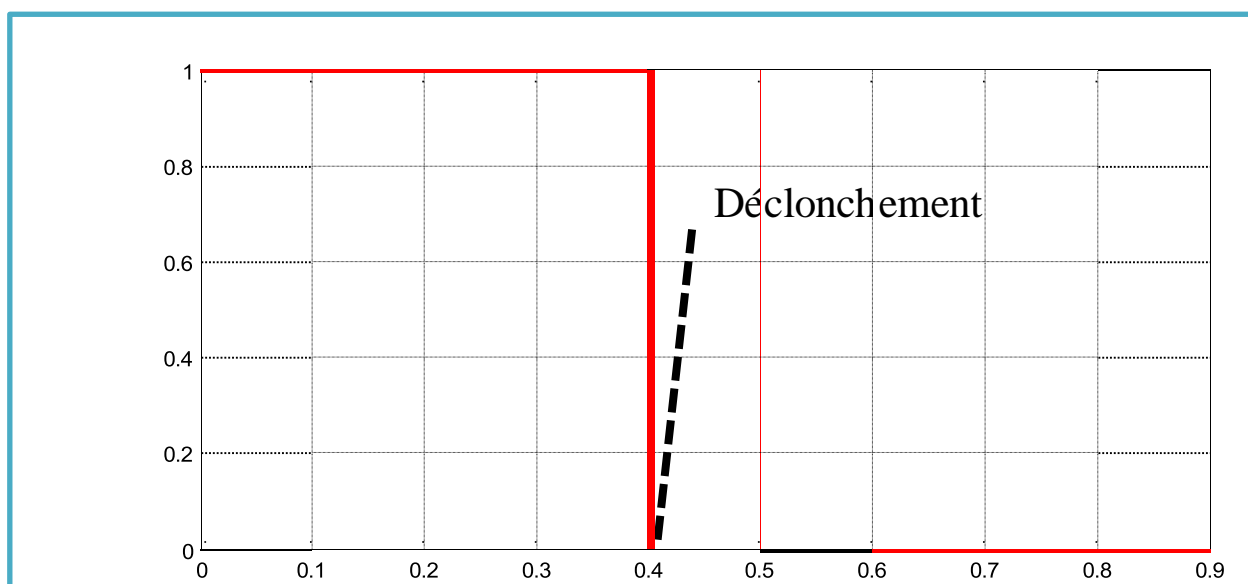


Figure IV.47. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P2).

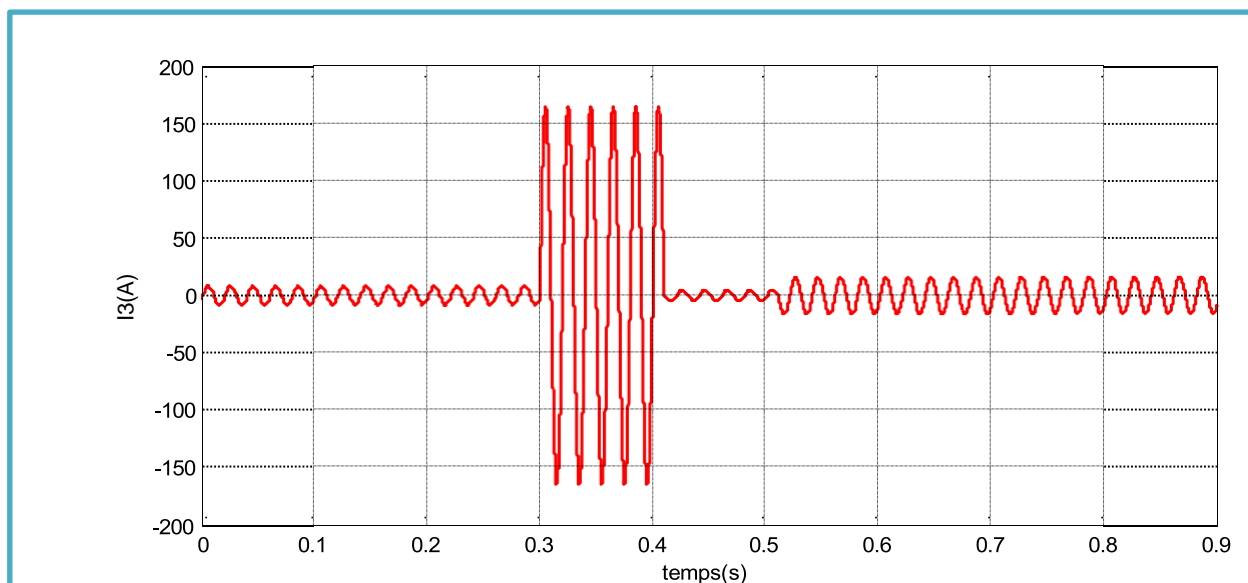


Figure IV.48. Courant de la protection (P3).

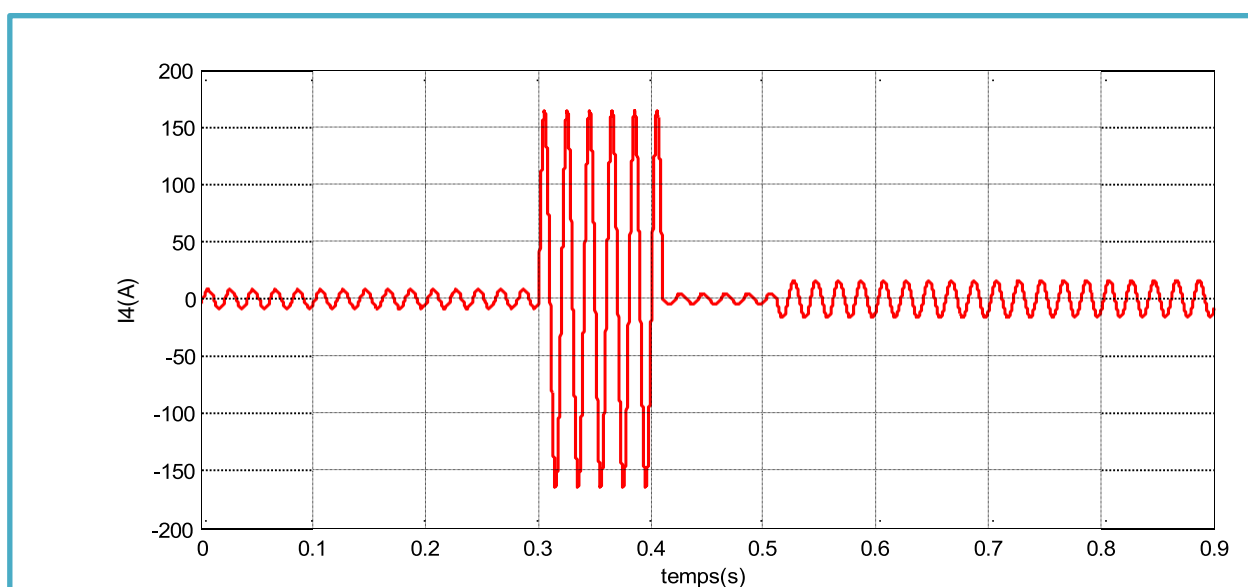


Figure IV.49. Courant de la protection (P4).

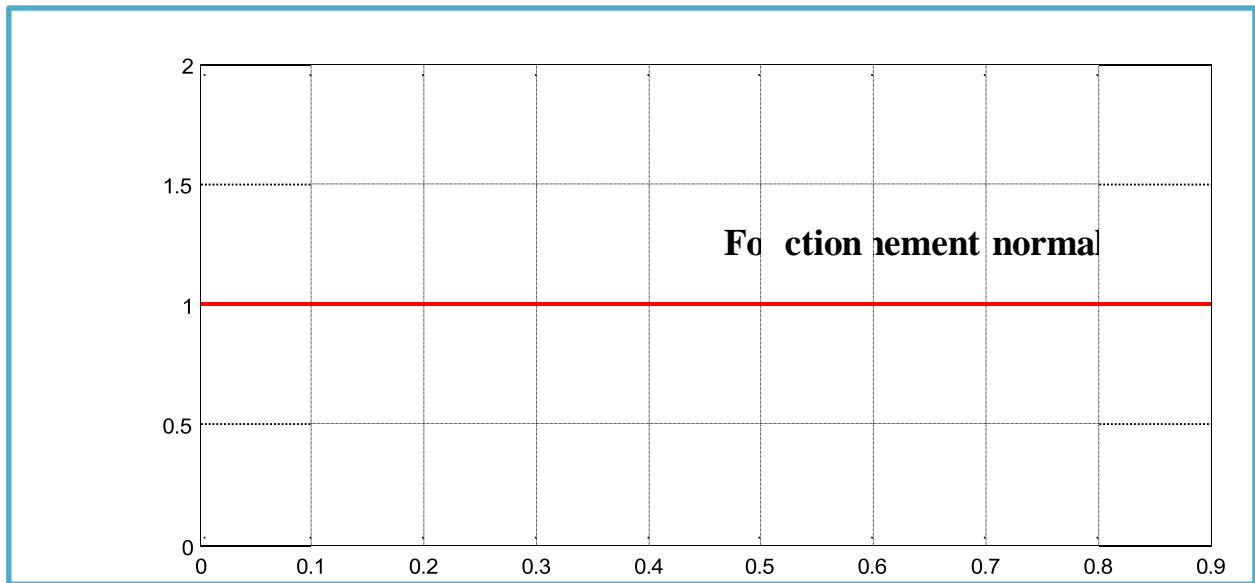


Figure IV.50. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P3).

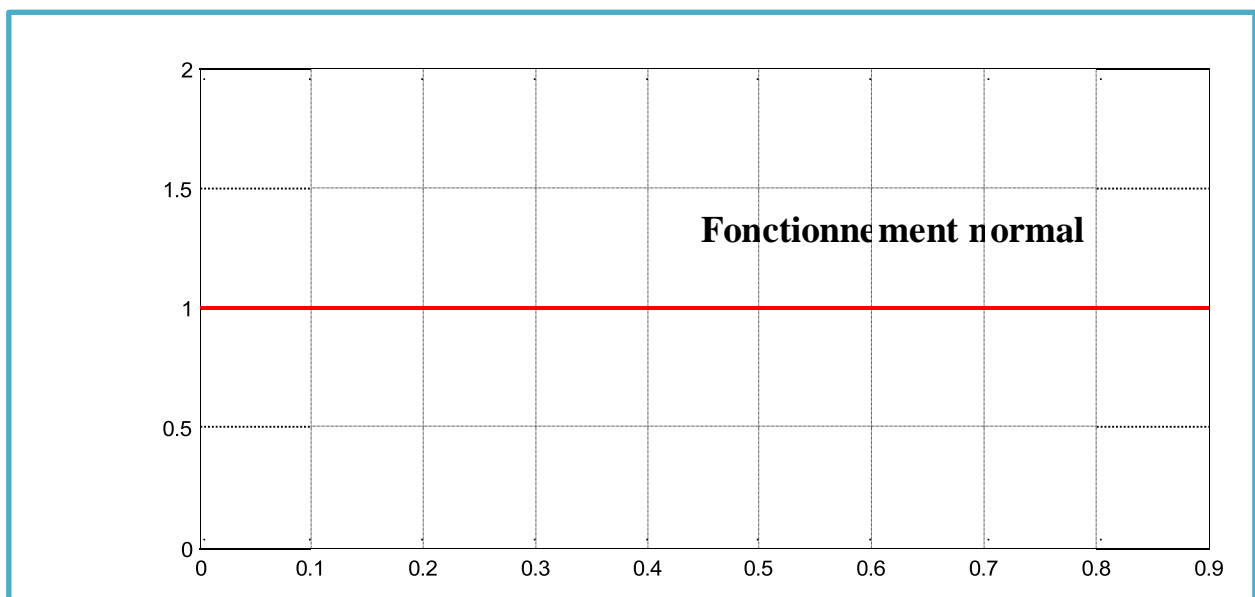


Figure IV.51. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P4).

D'après les résultats obtenus on observe trois phases :

La première phase représente l'état normal du circuit dont le courant dans le circuit est le courant nominal $I=5.729\text{A}$.

La deuxième phase (à partir de l'instant de court-circuit $t_c=0.3\text{s}$) qui représente le courant de court-circuit.

La troisième phase (commence à partir de l'instant $t=0.5$ s) qui représente la coupure des deux disjoncteurs installés dans la ligne 1.

D'après les résultats de la simulation qu'on a obtenus, on observe bien que la ligne 1 en défaut est isolée, et par conséquent la continuité de service pour la charge est assurée par la ligne 2.

IV.5.3.2 Défaut de court-circuit dans la ligne 2

De même, ici la deuxième ligne est le siège d'un défaut de court-circuit. Les résultats de la simulation sont présentés par les figures suivantes :

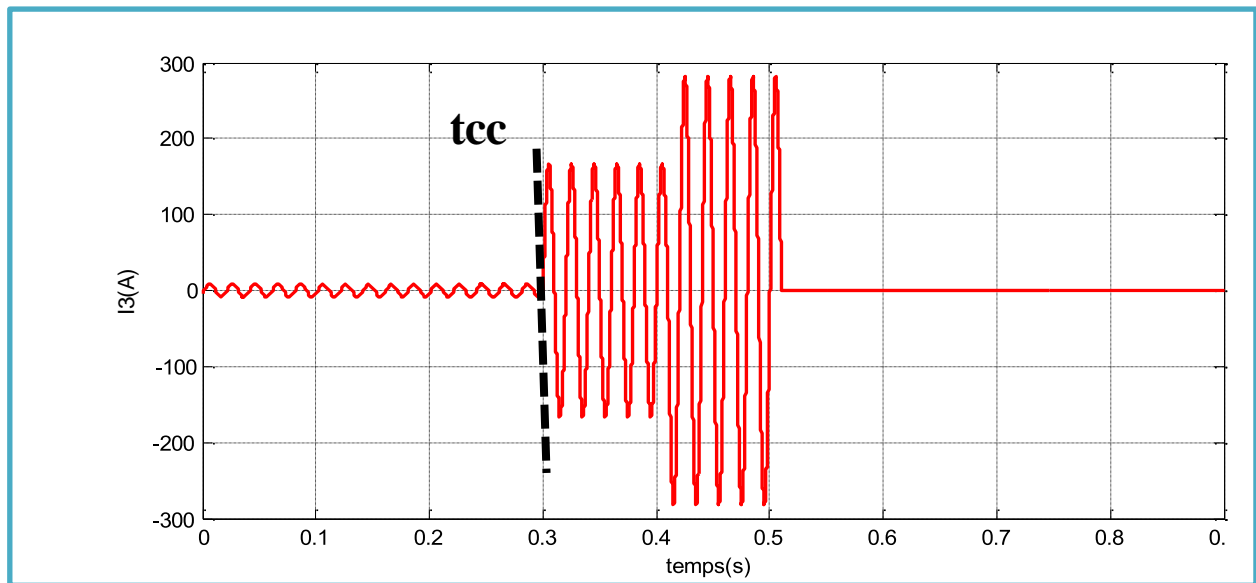


Figure IV.52. Courant de la protection (P3).

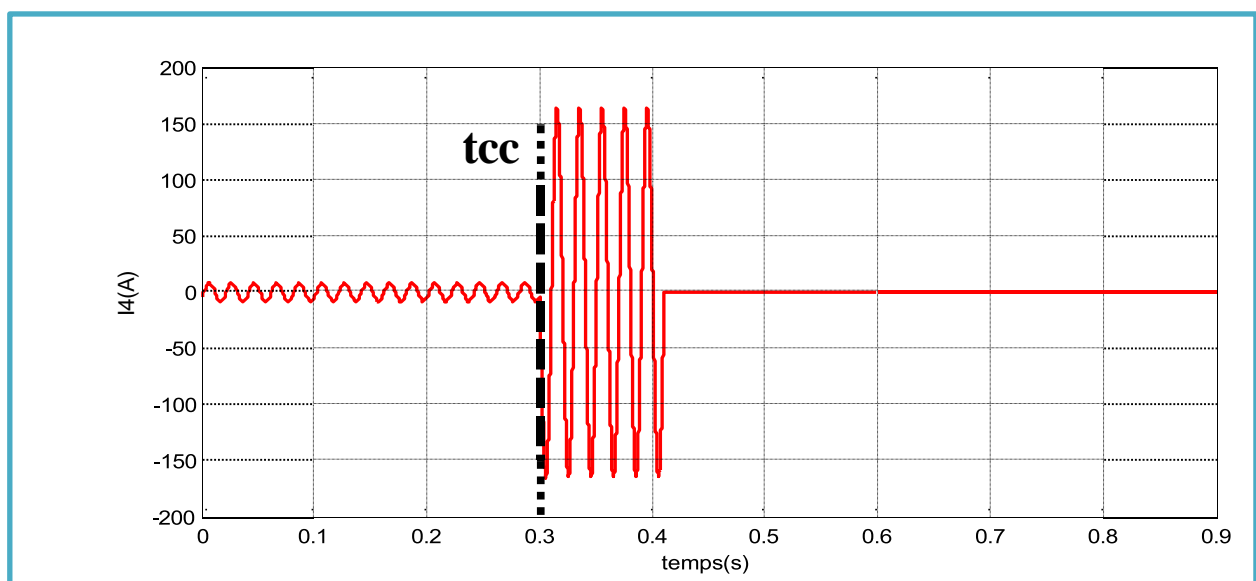


Figure IV.53. Courant de la protection (P4).

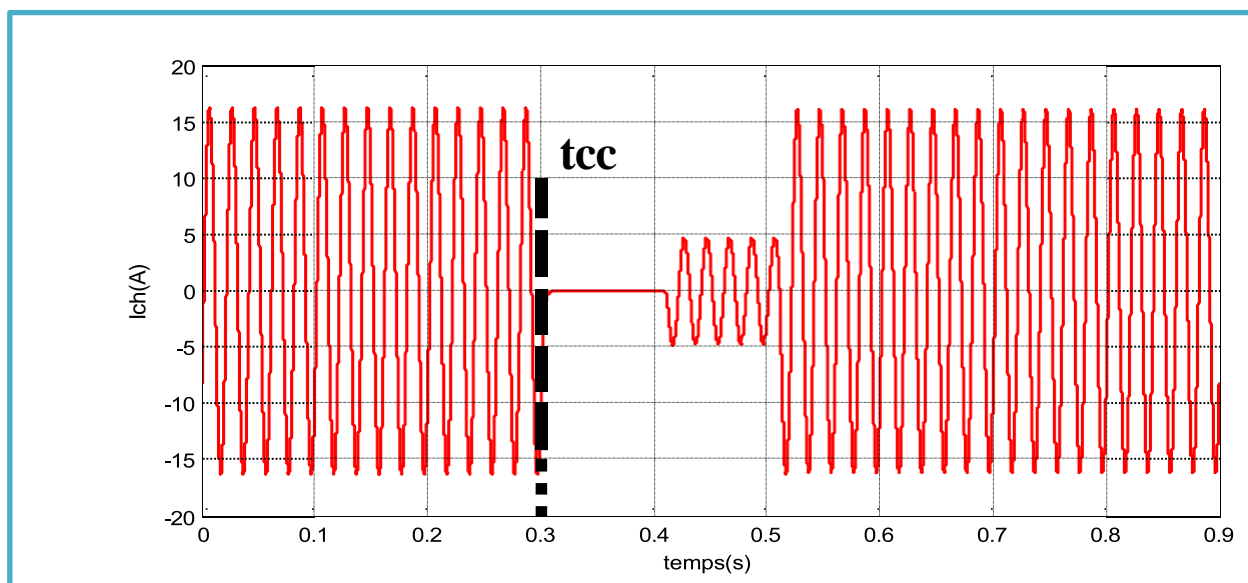


Figure IV.54. Courant de la charge.

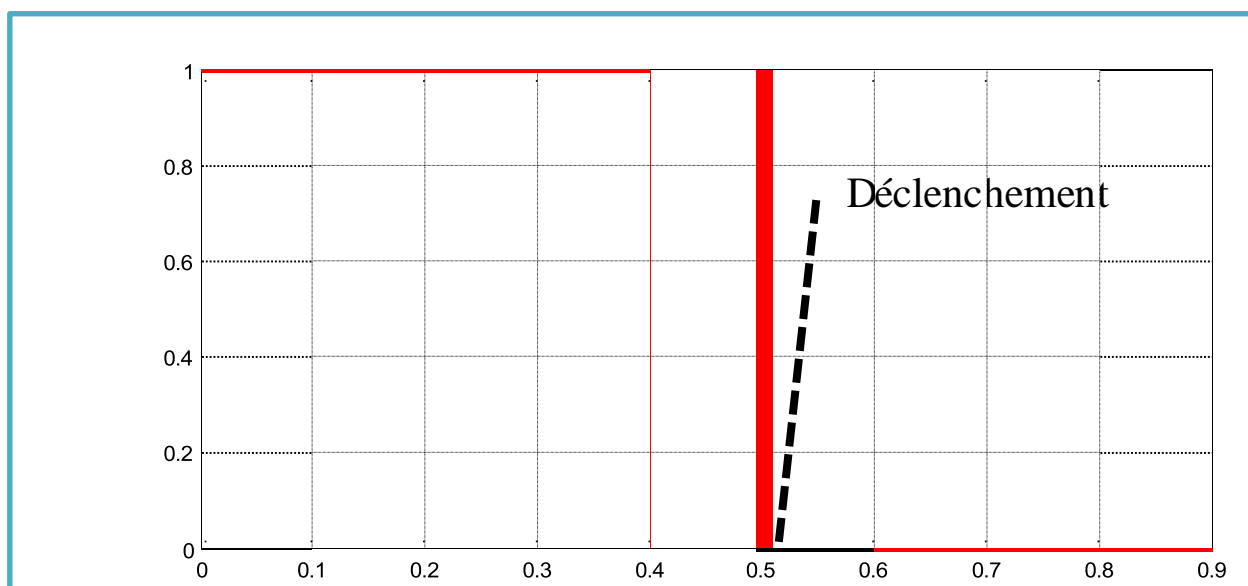


Figure IV.55. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P3).

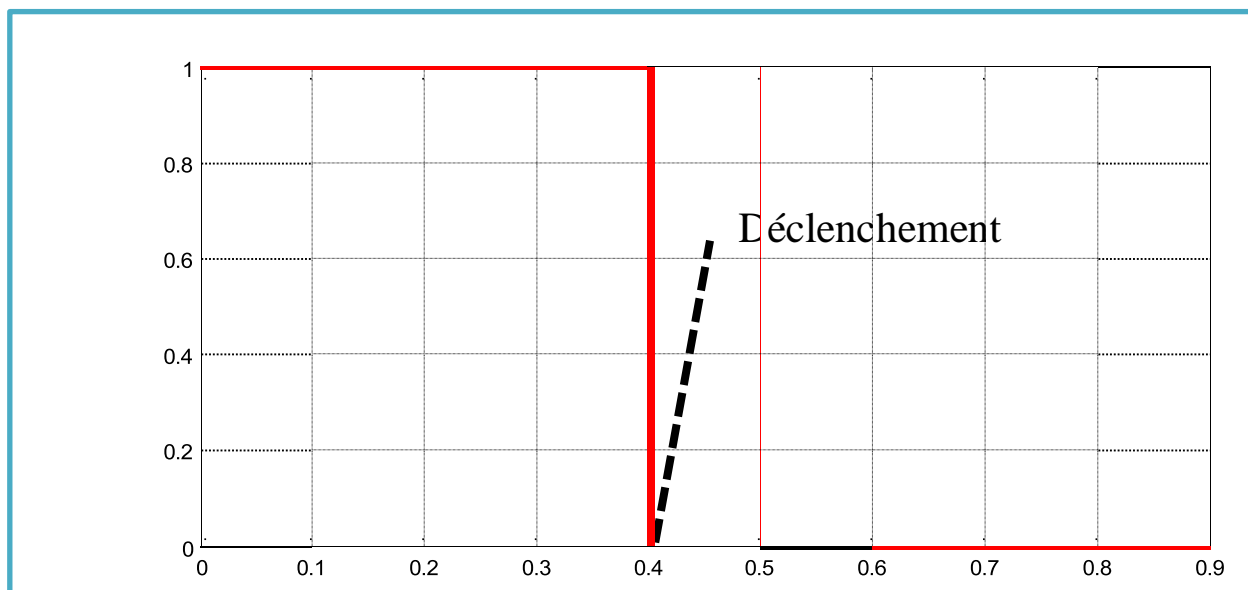


Figure IV.56. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P4).

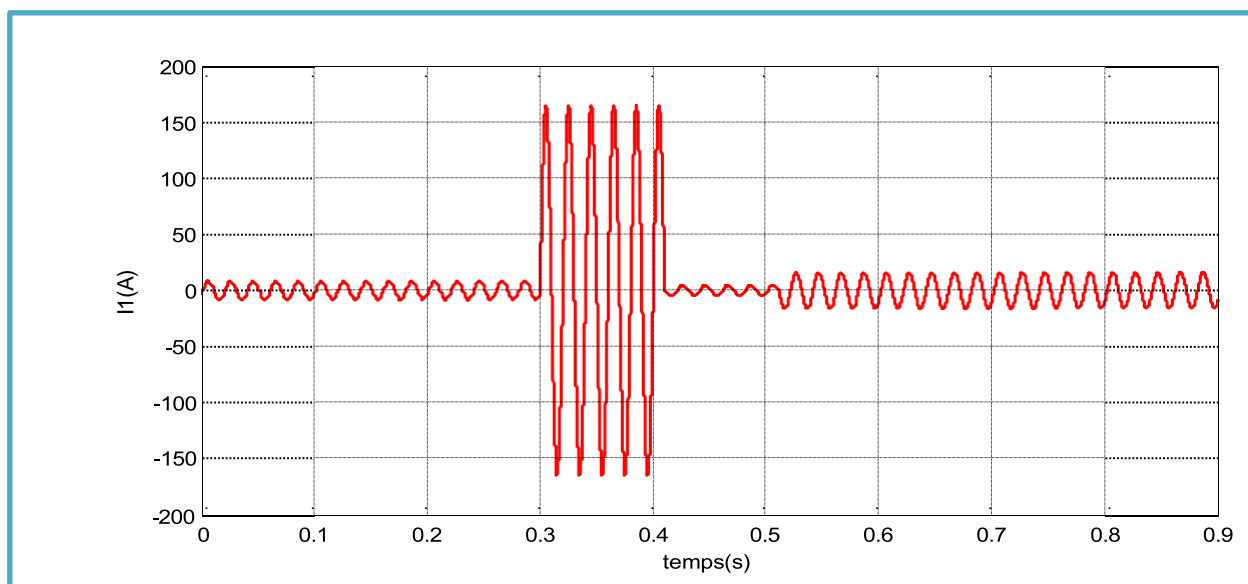


Figure IV.57. Courant de la protection (P1).

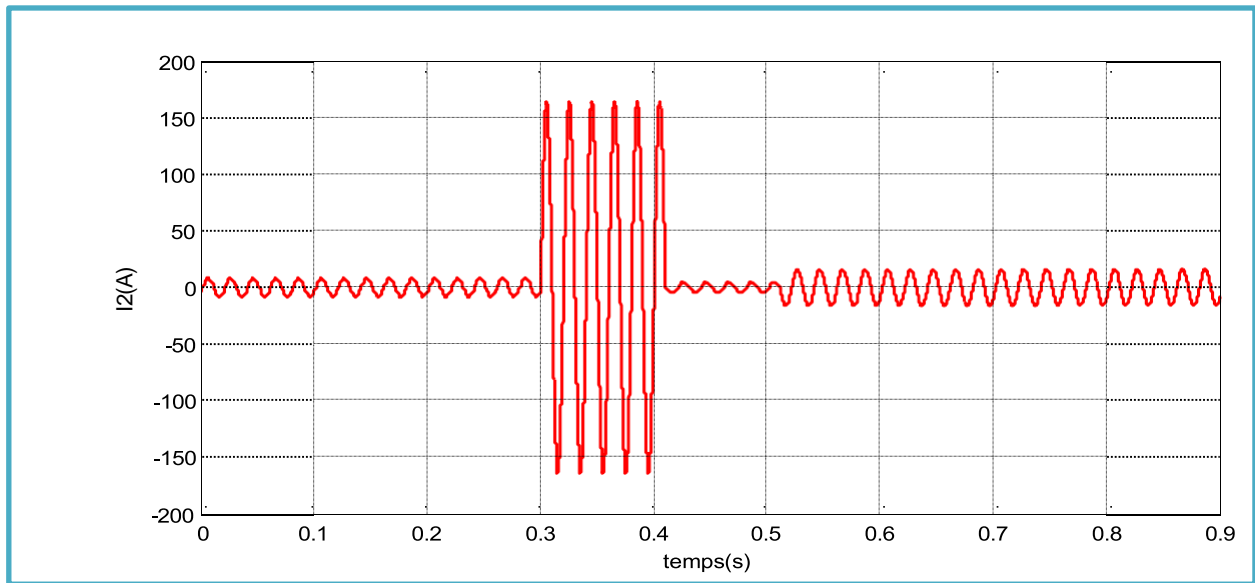


Figure IV.58. Courant de la protection (P2).

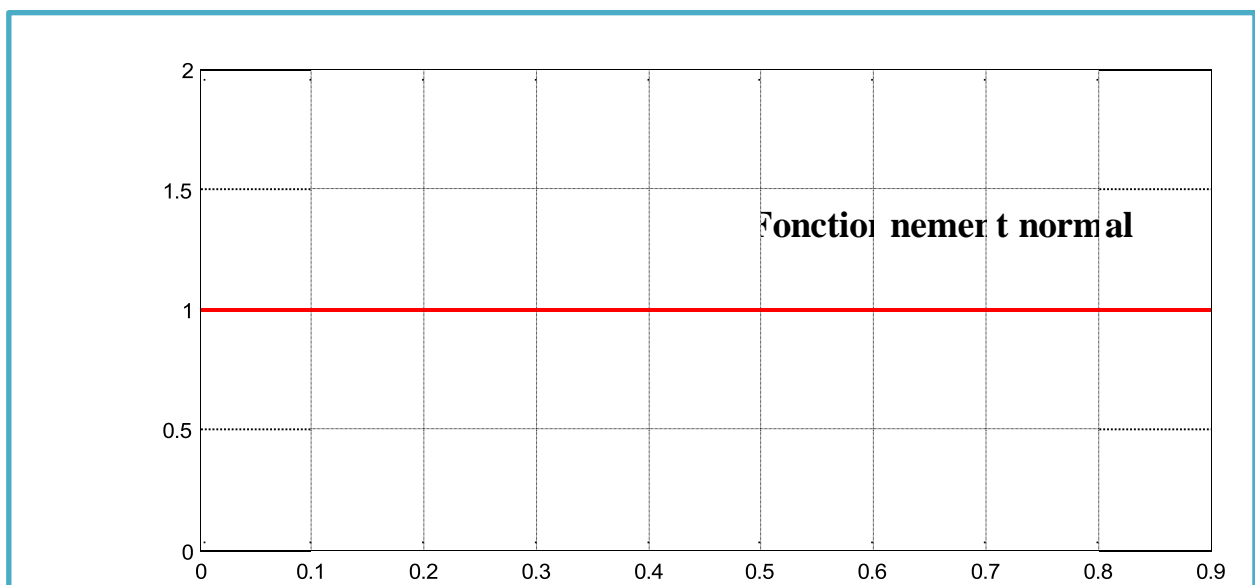


Figure IV.59. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P1).

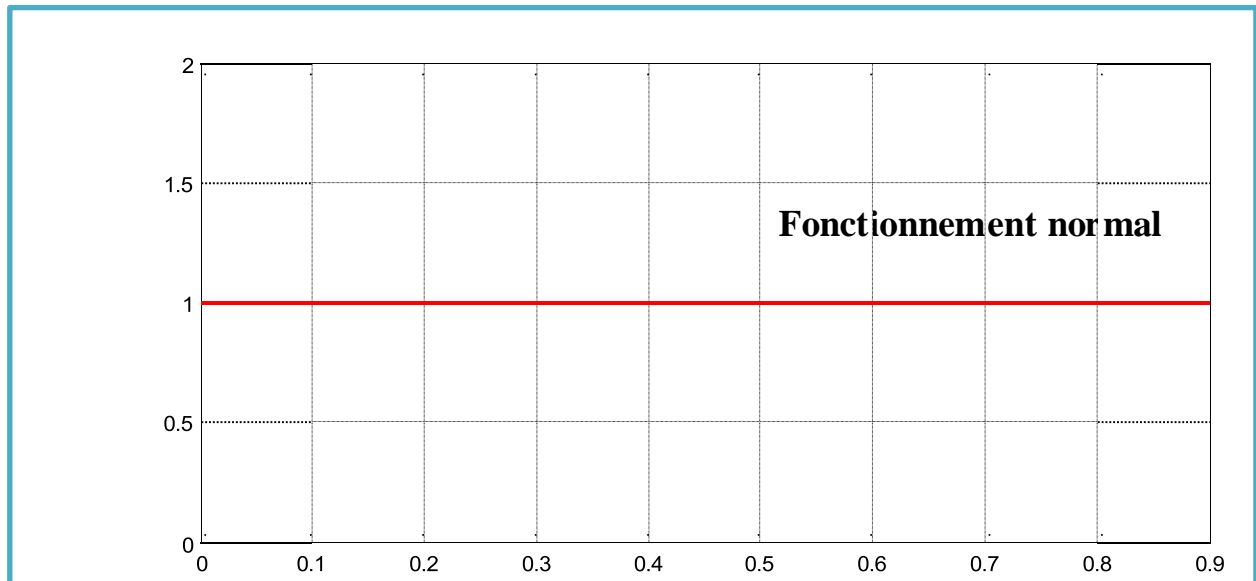


Figure IV.60. Signal de commande du disjoncteur de la protection (P2).

D'après les résultats obtenus on observe trois phases :

La première phase représente l'état normal du circuit, le courant dans le circuit est le courant nominal $I=5.729A$.

La deuxième phase (à partir de l'instant de court-circuit $t_{cc}=0.3s$) qui représente le courant de court-circuit.

La troisième phase (à partir de l'instant $t=0.5s$) représente la coupure des deux disjoncteurs de la ligne 2.

D'après les résultats de la simulation, on observe bien que la ligne 2 en défaut est isolée, et par conséquent la continuité de service pour la charge est assurée par la ligne 1.

Comme conclusion pour cette application, il est possible d'affirmer que l'objectif fixé a été atteint. On observe que la continuité de service est toujours vérifiée ; si la ligne 1 est en état de court-circuit c'est bien la ligne 2 qui assure l'alimentation de la charge. Par contre, si la ligne 2 est en défaut, c'est la ligne 1 qui assure l'alimentation de la charge.

IV.6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié les schémas de deux protections à maximum de courant et la protection à maximum de courant directionnelle. Les résultats des simulations réalisées sous Simulink/Matlab montrent le bon fonctionnement des modèles des protections proposés. La protection à maximum de courant directionnelle permet d'assurer la continuité du service

tout en contrôlant le sens du courant. Dans ce chapitre, nous avons étudié une application très connue constituée d'une charge alimentée par une source à travers deux lignes. Les résultats de la simulation obtenus ont montré le bon fonctionnement des modèles Simulink des différentes protections qu'on a proposé dans ce travail.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous avons présenté un aperçu sur les réseaux électriques, ainsi que les défauts fréquemment rencontrés susceptibles d'entraîner de graves dommages et des pertes financières. Cela rend nécessaire la mise en œuvre d'un système de protection capable de réagir efficacement face à divers types d'anomalies telles que les courts-circuits, les surcharges et les surtensions.

Il nous a semblé important de fournir des informations détaillées sur les différents types de protections utilisées dans les réseaux électriques, ainsi que sur leurs composants. Ces éléments, essentiels au bon fonctionnement de la chaîne de protection, doivent être soigneusement sélectionnés et correctement réglés afin d'assurer une protection à la fois efficace et sélective contre les différents types de défauts.

Ce travail porte principalement sur la simulation d'un système de protection à maximum de courant directionnel. Dans un premier temps, nous avons réalisé plusieurs simulations à l'aide de Simulink/Matlab relatives aux systèmes de protection suivants : la protection à maximum de courant ordinaire et la protection à maximum de courant directionnelle. Pour tester les systèmes de protection proposés, plusieurs simulations ont été menées pour différents cas. Le premier cas a concerné l'état normal du circuit, le deuxième cas a concerné l'insertion d'un défaut de court-circuit et le troisième cas a été consacré à la vérification du système de protection proposé. Les résultats obtenus montrent les bonnes performances des systèmes de protection proposés.

En ce qui concerne la partie application, nous avons appliqué les deux types de protection, à maximum de courant et à maximum de courant directionnelle, à un réseau électrique constitués de deux lignes. Nous avons créé plusieurs défauts de courant de court-circuit afin de tester leur efficacité. Les protections se sont révélées efficaces pour isoler les défauts et assurer la continuité de service pour la charge.

Comme perspective, nous prévoyons d'appliquer les protections proposées à un réseau électrique bouclé comportant plusieurs départs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Haitam Alilouch, «Conception et analyse des performances d'un contrôleur flou pour un système de réglage de tension automatique», Mémoire master académique, université du Québec en Abitibi temiscamingue, mars 2020.
- [2] Noui Issam , «Réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC» Mémoire master académique Université Mohamed Khider Biskra 2012.
- [3] M. Eremia, J. Treca, A. Germond, "Réseaux électriques, aspects actuels", Editura Tehnica, Bucarest, Roumanie, 2000.
- [4] C. PRÉVÉ, « Protection des Réseaux Electriques », pages (29-31), Edition HERMES, Paris 1998.
- [5] VANYA INGNATOVA : « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique». Ingénieur Université Technique de Sofia, le 20 Octobre 2006.
- [6] P. Kundur, "Power System Stability and Control" New York: McGraw-Hill, 1994.
- [7] T. Van Cutsem, C.D. Vournas, "Emergency voltage stability controls" an Overview Proceedings of IEEE/PES General Meeting, June 24-28, 2007.
- [8] C. Madhava Reddy, "Power System Voltage Stability Analysis" Indian Institute of Technology Hyderabad in Partial Fulllment of the Requirements for The Degree of Master of Technology 2011.
- [9] Merlin Gerin "protection des réseaux électriques", fiche technique Schneider electrique, guide 2003.
- [10] Benoit de METZ-NOBLAT, Frédéric DUMAS, Christophe POULAIN, "Calcul des Courants de Courts Circuits", Cahier technique n 158 Schneider Electric, Edition Septembre 2005.
- [11] ZELLAGUI Mohamed, "Étude des protections des réseaux électriques MT (30 &10 kv) ", Mémoire de magistère, Université Mentouri Constantine, 2
- [12] "Défauts des réseaux et des machines", fichier technique de Sonelgaz, 2007.
- [13] M. LAMI, «Protection et Surveillance des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique» Volume 2, Electricité de France (EDF), février 2003.
- [14] C. PRÉVÉ, « Protection des Réseaux Electriques » , livre, Edition HERMES, Paris 1998.
- [15] C. RUSSELL MASON, « The Art and Science of Protective Relaying », 1956 - New York.

- [16] J.C SABONNADIÈRE ,N. HADJSAID «Lignes et réseaux électrique » ,édition LAVOISIERL 2007.
- [17] R.Calvas ; « Les Perturbations Electriques » ; Merlin Guerin N°141., Mai 2001.
- [18] C.CORROYER ,P.DUVEAU «Protection des réseaux de transport et de répartition» techniques d'ingénieur traité électrique D 4 806 .
- [19] W.D Stevenson, "Elements of Power System Analysis", 4th éd., McGraw-Hill Book.
- [20] Christophe Prévé, "Les réseaux électriques industriels 2 ", Livre, Hermès lavoisier Avril 2005.
- [21] P.Cristophe, « protection des réseaux électriques », Paris, 1998.
- [22] Tolba Amrane, "Coordination orientée objet de la protection des réseaux électriques ", Thèse de doctorat, Université de Batna, 2007.
- [23] Boughezala Mohammed Salah ,« Etude et simulation d'un coupleur de signaux HF pour réseaux d'énergie électrique. Application : sélectivité logique des protections » ,Mémoire master Université de Biskra 2013.
- [24] Yves Pelenc " Appareillage électrique d'interruption à haute tension", fiches technique de Merlin Gerin D 4700.
- [25] M. LAMI, « Protection et Surveillance des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique », Volume 2, Electricité de France (EDF), février 2003.
- [26] MANCER Nabil, « contribution `a l'amélioration de l'efficacité de la s'electivité du syst`eme de protection des r`eseaux electriques par les méthodes metaheuristiques », These De Doctorat Universite de Biskra.
- [27] Theodore WILDI, Livre ELECTROTECHNIQUE, avec la collaboration de Gilbert Sybille * Ingénieur, Institut de recherche d'Hydro-Québec, 3eme édition.
- [28] Z. GAJIC, I. IVANKOVIC & B. FILIPOVIC, « Differential Protection Issues for Combined Autotransformer - Phase Shifting Transformer », IEE Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, Netherlands, april 2004.
- [29] ALEAS TECHNIQUES, «Plan de protection»,Version V0 du 01.09.2011.
- [30] citations·B. Wei , Albert Marzàbal, J. Pérez, Ramon Pinyol, J. Guerrero, J. Vasquez «Transactions on Power Electronics »,·IEEE Feb 8, 2019 ·
- [31] F. Coffele, Campbell Booth, A. Dyśko, «Transactions on Power Electronics »,·IEEE Apr 1, 2015.
- [32] Matheus N. O. Aires, R. Medeiros, Flavio Bezerra Costa, Kleber M. Silva, J. Chavez, Marjan Popov, « A wavelet-based restricted earth-fault power transformer differential protection », Electric Power Systems Research ,Jul 1, 2021