



HAL
open science

Localisation de défaut dans les lignes de transmission d'énergie

Javad Sadeh

► **To cite this version:**

Javad Sadeh. Localisation de défaut dans les lignes de transmission d'énergie. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français. NNT: . tel-00551763

HAL Id: tel-00551763

<https://theses.hal.science/tel-00551763>

Submitted on 4 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Sharif Université de Technologie

THESE

présentée par

Javad SADEH

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

et le grade Ph.D

DE SHARIF UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE

Spécialité: GENIE ELECTRIQUE

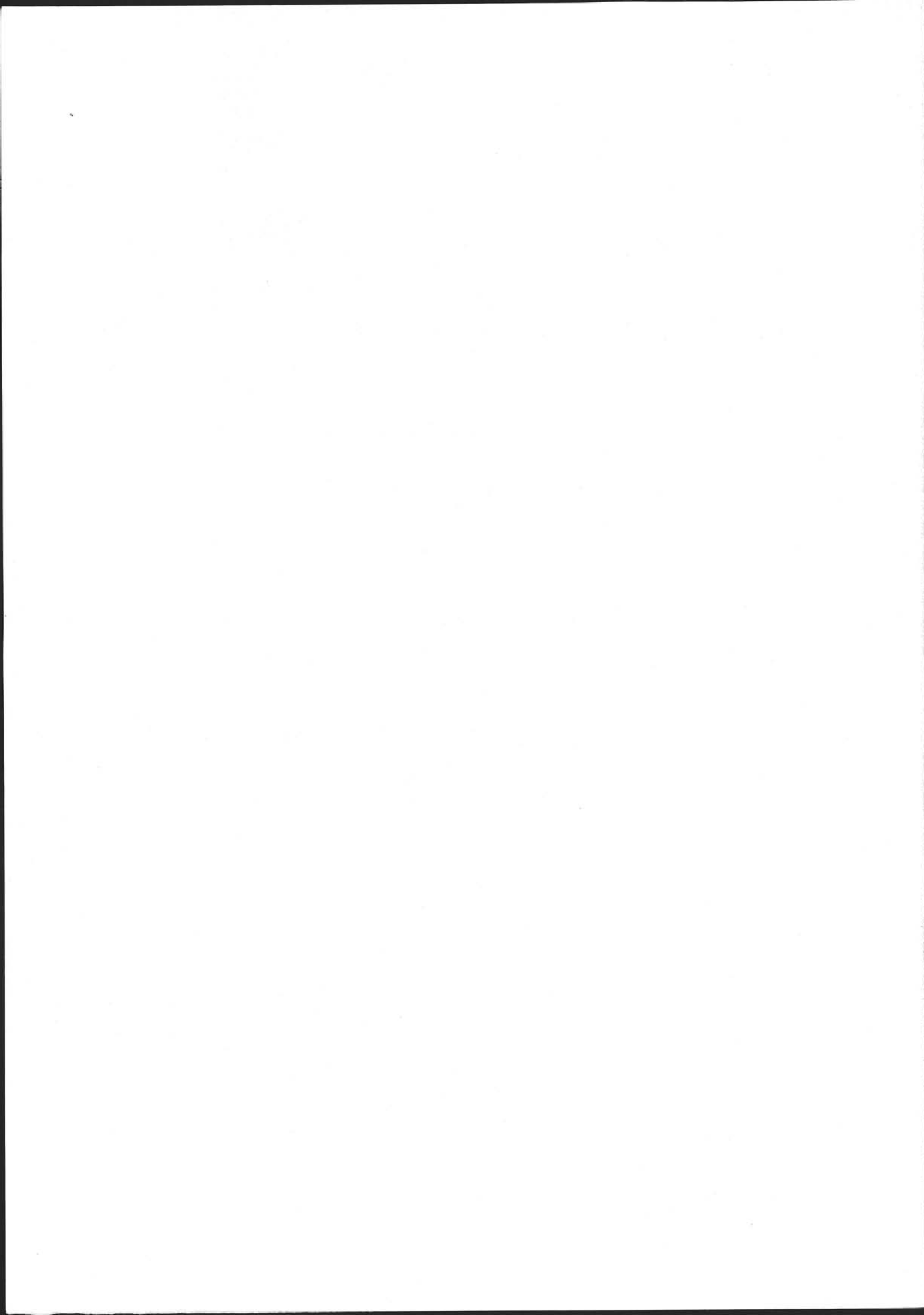
=====
*Localisation de Défaut dans les Lignes de
Transmission d'Énergie*
=====

Date de soutenance : le 02 Juin 2001

Composition du jury :

Messieurs

Lamine MILI
Mehrdad ABEDI
Nouredine HADJSAID
Mehdi VAKILIAN
Forouhar FARZANEH
René FEUILLET
Ali-Mohammad RANJBAR



Remerciements

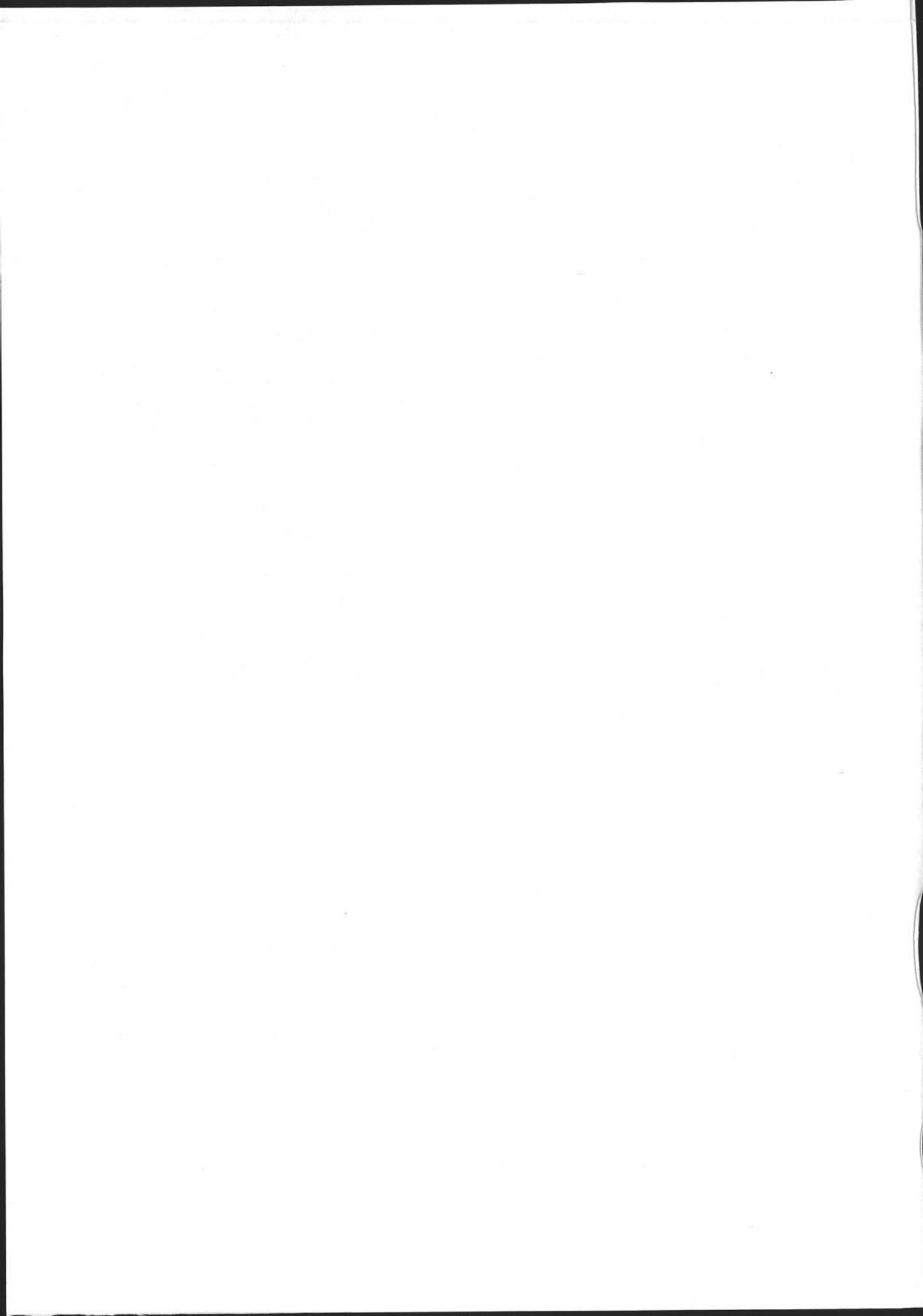
Je tiens a remercier:

- Monsieur **J.C. Rognon**, Directeur du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG) pour m'avoir accueilli au LEG,
- Monsieur **R. Feuillet**, Professeur du LEG pour m'avoir accepte dans l'equipe reseaux electriques du LEG et pour avoir ete mon directeur de these (cote francais),
- Monsieur **A.M. Ranjbar**, Professeur du Sharif Universite de Technologie, d'Iran pour avoir propose le sujet de these, pour avoir ete mon directeur de these (cote iranien) et pour m'avoir accueilli au Centre de recherche de NIROO (NRI),
- Monsieur **N. Hadj-said**, Professeur pour les echanges d'idees et les discussions scientifiques, pour avoir ete mon directeur de these et pour avoir su me consacrer le temps qu'il fallait pour la lecture de ce rapport,
- Madame **L. Mili**, Professeure du Virginia Tech d'Etats Unit pour avoir accepte d'etre rapporteur de mon travail,
- Madame **M. Abedi**, Professeure de l'Amir-Kabir Universite de Technologie, d'Iran pour avoir accepte d'etre rapporteur de ce travail,
- Madame **M. Vakilian**, Maitre de Conference du Sharif Universite de Technologie, d'Iran pour avoir accepte d'etre examinateur de ma these,
- Madame **F. Farzaneh**, Maitre de Conference du Sharif Universite de Technologie, d'Iran pour avoir accepte d'etre examinateur de ma these et aussi pour avoir traduit mon expose a la langue francaise.

Je remercie les gens de l'equipe reseaux avec qui j'ai eu l'occasion de travailler dans la bonne humeur.

Je remercie le Ministere d'Education Superieur d'Iran qui a finance mes recherches en Iran et le President de Centre de Relation International de Sharif Universite de Technologie.

Je tiens a remercier egalement le Ministere des Affaires Etrangeres francais et les gens du Centre Culturel Francais en Iran qui ont finance mes recherches en France.



SOMMAIRES

CHAPITRE 1: INTRODUCTION	1
1.1 Introduction générale	1
1.2 Etat de l'art	3
1.3 Objectif de la thèse	8
CHAPITRE 2: LOCALISATION DE DEFAUT DANS LES LIGNES DE TRANSMISSION D'ENERGIE	10
2.1 Introduction	10
2.2 Model de ligne de transmission avec les paramètres distribués	11
2.3 Les algorithmes de localisation de défaut	12
2.4 Défauts triphasés asymétriques paramètre distribués	15
2.5 Résultats d'essais	15
2.6 Considération de la résistance de défaut	16
2.7 L'algorithme proposé	20
2.8 Evaluation de performance	22
2.9 Conclusion	25
CHAPITRE 3: LOCALISATION DE DEFAUT DANS LES LIGNES DE TRANSMISSION D'ENERGIE, INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE SUR LES PARAMÈTRES DE LA LIGNE	26
3.1 Introduction	26
3.2 Model de ligne avec les paramètres dépendants de la fréquence	26
3.3 L'algorithme de localisation de défaut	29
3.3.1 Considération de résistance de défaut	30
3.4 Evaluation de l'algorithme	33
3.5 Conclusion	35
CHAPITRE 4: LOCALISATION DE DEFAUT DANS LES LIGNES DE TRANSMISSION COMPORTANT UNE COMPENSATION SERIE	36
4.1 Introduction	36
4.2 Model de condensateur en série / MOV	37
4.3 Les algorithmes proposés	38
4.3.1 Premier algorithme	38
4.3.1.1 Model mathématique et méthode de résolution	38
4.3.1.2 Transformation de la référence phase à la référence modal	39
4.3.1.3 Critères pour localisation de défaut	40
4.3.1.4 Résultats d'essais	40
4.3.2 Deuxième algorithme	43
4.3.2.1 Modélisation de ligne de transmission et méthode de localisation de défaut de deux extrémités	43
4.3.2.2 Calcul de résistance de défaut	44
4.3.2.2 L'algorithme de localisation de défaut pour une ligne comportant une compensation série	45

4.3.2.2.1 Routine 1: Défaut en aval du condensateur série	46
4.3.2.2.2 Routine 2: Défaut en amont du condensateur série	46
4.3.2.2.3 L'algorithme de choix	46
4.3.2.3 Evaluation de performance	47
4.4 Conclusion	49
CHAPITRE 5: LOCALISATION DE DEFAUT BASEE SUR LA LOGIQUE FLOUE POUR LES LIGNES DE TRANSMISSION D'ENERGIE	51
5.1 Introduction	51
5.2 Le réseau adaptatif à base du système flou d'inférence (ANFIS)	52
5.2.1 Architecture d'ANFIS	52
5.2.2 Algorithme d'apprentissage d'ANFIS	54
5.3 Algorithme de localisation de défaut	55
5.3.1 Sélection d'entrée-sortie de l'ANFIS	55
5.3.2 Simulation du réseau électrique	56
5.3.3 Extraction de caractéristiques	56
5.3.4 Les données d'apprentissage et de test	57
5.4 Evaluation de performance	57
5.5 Application aux lignes comportant de la compensation série	59
5.6 Conclusion	61
CHAPITRE 6: CONCLUSION GENERALE	62
REFERENCES	65
LES ARTICLES PUBLIES	69

CHAPITRE 1:

INTRODUCTION

1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les réseaux électriques fournissent la continuité du service essentielle depuis la production jusqu'à la consommation. Les lignes composant ce réseau sont exposées aux divers défauts, comme les court-circuits, et doivent être mises hors tension par les relais de protection et les disjoncteurs de puissance situés aux extrémités de la ligne. Parmi les dispositifs de protection utilisable à cet effet, les relais de distance jouent un rôle très important dans la protection des réseaux complexes. Les relais de distance calculent l'impédance entre le lieu du relais et le lieu du défaut. Car l'impédance par kilomètre (mille) d'une ligne de transport d'énergie étant assez constante, ces relais déterminent en fait le lieu du défaut.

Les relais de distance, à base de microprocesseur, sont utilisés pour la protection des lignes, l'échantillonnage et l'analyse des signaux de tension et de courant aux extrémités de la ligne. Ils commandent le déclenchement des disjoncteurs en quelques dizaines de millisecondes après l'occurrence d'un défaut sur la ligne. Chaque déclenchement de ligne à la suite d'un défaut exige l'inspection autour du lieu de défaut avant que la ligne puisse être manuellement réactivée. Les compagnies d'électricités essayent de restaurer la puissance aussi rapidement que possible. Pour satisfaire cet objectif et afin d'améliorer la qualité de la fourniture d'énergie, divers dispositifs de détection de défaut sont développés et proposés dans la littérature. Il faut cependant noter que les relais de distance calculent la distance de défaut en temps réel, alors que les programmes de localisation de défaut s'exécutent après le défaut, en utilisant des données de défaut enregistrées. Ainsi, un programme de localisation de défaut fonctionne en régime hors ligne (off-line), et permet de calculer correctement le lieu du défaut. Les progrès rapides en technologie de microprocesseur donnent un espoir aux algorithmes numériques de localisation de défaut pour être utilisés pour les protections de distance, en particulier ceux dits "algorithmes de localisation de défaut à une extrémité". De tels algorithmes fournissent des résultats précis, mais ils sont basés sur certaines hypothèse, au sujet des impédances de source (c.-à-d. la connaissance

exacte de la topologie de réseau), de résistance de défaut, de charge et d'autres facteurs. Afin de réduire l'erreur de calcul de lieu du défaut, les algorithmes de localisation de défaut utilisant de données de deux extrémités de la ligne, dits "algorithmes de localisation de défaut de deux extrémités" sont développés.

Les relais numériques et les possibilités de transmissions de données entre les deux extrémités de la ligne, permettent une localisation de défaut en utilisant les données de ces deux extrémités. Cette approche suppose que l'acquisition de données des deux extrémités de ligne est synchronisée. Cette contrainte constitue l'obstacle principal pour des applications temps réel. Des nouvelles méthodes n'exigeant pas la synchronisation des données, ont été développées. Pour ces approches l'angle de synchronisation entre les phaseurs locaux et ceux à distance a été estimé en utilisant la technique itérative du Newton-Raphson.

La localisation de défaut dans les réseaux électriques est essentielle pour une qualité de service électrique fiable et continue. Le problème de localisation de défaut dans les systèmes de puissance est aussi vieux que l'industrie électrique elle-même. Pendant que les lignes de transport sont devenues plus longues et pendantes que plus de lignes ont été construites à travers les montagnes et les déserts, qui sont difficiles d'accès, l'importance du problème a considérablement crû.

Les lignes aériennes d'un réseau électrique sont sujettes à de nombreux défauts autant diverses causes. Seuls 5 à 10% des défauts se produisant sur les lignes aériennes sont à caractère permanent. Les 90 à 95% des autres défauts sont transitoires, et le ré-enclenchement de la ligne est réussie après une ou plusieurs tentatives.

Ces défauts et l'interruption de service correspondant peuvent être réduits par un meilleur matériel de protection, d'automatisation, d'information et de commande. L'application d'algorithme de localisation de défaut précis réduira également le temps global d'interruption du service. Ceci mènera non seulement à un système plus fiable mais également à une continuité de service améliorée.

Comme on l'a déjà mentionné, les défauts sur des lignes de transport sont permanents ou transitoires. Un défaut permanent est normalement accompagné des dommages mécaniques qui doivent être réparés pour remettre la ligne en service. Il est très important,

pour les compagnies d'électricité, de connaître la localisation exacte du défaut pour envoyer des réparateurs et pour restaurer le service. La réparation rapide améliore la disponibilité du système et les frais d'exploitation sont alors réduits. La localisation de défaut est très importante même quand la ligne est ré-enclenchée automatiquement ou manuellement à la suite d'un défaut transitoire. Bien qu'un défaut transitoire ne cause pas l'interruption du service (un ré-enclenchement réussi est probable), il peut endommager le matériel, par exemple un isolateur. En conséquence, un défaut transitoire peut conduire à un défaut permanent très rapidement. Par ailleurs la connaissance que les défauts se produisent à plusieurs reprises dans la même zone peut être utile en détectant la cause. Des taches faibles qui ne sont pas évidentes peuvent être trouvées parce qu'une inspection plus complète peut être focalisée dans la zone limitée définie par le localisateur de défaut.

1.2 ÉTAT DE L'ART

Des recherches importantes ont continué sur le sujet de la localisation de défaut et de la protection des lignes de transmission d'énergie depuis les années 1960's. Cela est motivé par le fait que plus de la moitié des défauts se produisent sur les lignes aériennes. Rockefeller [1] a proposé une protection pour le réseau électrique basée sur des relais numériques. En quelques années, de nouveaux systèmes de relais numériques ont été développés [2,3] et essayés sur le terrain par les entreprises électriques [4-7]. On peut résumer quelques raisons favorisant le développement rapide du relais numérique comme suit:

- un prix réduit du matériel numérique;
- une fiabilité plus élevée, rendue possible par la surveillance continue du réseau électrique et de l'auto-diagnostic du système des relais;
- une meilleure performance, due à l'aspect pratique, pour mettre en application les diverses fonctions de relais désirées et pour former les caractéristiques opérationnelles complexes;
- une meilleure coordination de l'exploitation du système, de la commande et de la protection par une organisation efficace des voies de transmission de données.

Un microprocesseur est utilisé pour réaliser d'un algorithme de localisation de défaut pour le relais de distance afin de calculer la distance de défaut sur une ligne de transport

d'énergie. Avec les possibilités offertes par le microprocesseur, les calculs complexes correspondant peuvent s'effectuer rapidement et avec une bonne précision. Plusieurs algorithmes de localisation de défaut ont été proposés et appliqués pour déterminer le point de défaut sur des lignes de transmission. Ces algorithmes développés dans la littérature peuvent être classés dans trois catégories:

- 1) les approches de phaseur en régime permanent
- 2) les approches à base équations différentielles transitoires
- 3) les approches de propagation d'onde

Dans le reste de ce chapitre quelques algorithmes de localisation de défaut dans les lignes de transmission d'énergie sont passés en revue et l'objectif de cette thèse est expliqué.

Dans un papier de Kohlas [8], la ligne de transmission a été représentée par les équations des télégraphistes et les profils de tension et de courant ont été calculés à l'aide des enregistrements de la tension et du courant pris à l'extrémité de la ligne dans les premières millisecondes suivant le défaut. La localisation de défaut a été donnée par le point sur la ligne pour lequel le profil de tension est un minimum. La méthode est basée sur la théorie de propagation d'onde. Elle donne une bonne précision. Mais l'effet de la résistance de défaut n'a pas été expliqué dans le papier. En outre, l'utilisation de la méthode pour le système triphasé n'a pas été développée.

Westlin et Bubenko [9] ont formulé le problème de localisation de défaut comme un problème d'analyse en régime permanent. Ils ont présenté un algorithme appliquant la technique itérative de Newton-Raphson aux équations algébriques non linéaires pour résoudre le problème de localisation de défaut. Le filtrage numérique de la forme d'onde initiale de défaut est essentiel dans cette méthode puisque seuls les composantes de 50 Hz sont utilisées.

Takagi et autres [10] ont présenté une méthode qui a utilisé la transformation de Fourier pour extraire les phaseurs de tension et de courant à partir de la forme d'onde de défaut. La technique itérative de Newton-Raphson est employée pour résoudre les équations algébriques non linéaires afin de localiser la distance au défaut. L'inconvénient dans cette méthode est qu'elle assume une ligne de transmission sans perte. Elle est sujette donc à des erreurs quand elle est appliquée aux réseaux réels qui ont des pertes. Dans les recherches suivantes, Takagi et autres [11] ont généralisé leur méthode en appliquant la théorie de

transformation de Laplace. Pour une précision meilleure, ils ont déterminé l'intervalle optimum pour l'opérateur de transformation de Laplace.

Richard et Tan [12] ont présenté un algorithme dynamique d'estimation de paramètres pour la localisation de défaut, basé sur les tensions et les courants localement disponibles. Le système des équations est basé sur le modèle de la ligne avec les paramètres localisés, les équivalents transitoires de Thevenin pour des deux extrémités de la ligne et une résistance inconnue de défaut. Le problème de localisation de défaut est traité comme un problème d'estimation de paramètres d'un système dynamique, dans lequel la réponse du système réel est comparée à celle du modèle de la ligne avec les paramètres localisés. Les paramètres du modèle sont variés jusqu'à ce qu'un accord adéquat soit obtenu avec la réponse du système réel.

Dans le travail de Wiszniewski [13] la source d'erreur dans la méthode d'impédance de la localisation de défaut a été identifiée comme étant le déphasage entre le courant mesuré à une extrémité de la ligne et de celui qui traverse la résistance de défaut. L'algorithme corrige cette erreur dans un calcul non-iterative simple.

Girgis [14] a conçu un arrangement numérique de protection de distance, qui a utilisé le filtrage de Kalman pour estimer les composantes de la fréquence fondamentale des signaux de tension et de courant lors d'un défaut. Ces composantes sont employées pour déterminer l'impédance apparente au défaut, et par conséquent au lieu de défaut.

Eriksson et autres [15] ont utilisé les composantes symétriques de défaut afin de réduire l'effet de la charge à distance. Avec l'hypothèse que les facteurs de distribution des composantes directe et inverse du courant sont égaux, on a éliminé la composante homopolaire de l'impédance. Ainsi une équation complexe associant la distance de défaut et la résistance de défaut est obtenue. Les parties réelle et imaginaire de cette équation sont alors utilisées pour éliminer la résistance de défaut. Cet algorithme exige la connaissance de l'impédance équivalente de source aux deux extrémités de la ligne.

Afin de rendre compte entièrement de la présence de la résistance de défaut et de la charge, on propose un algorithme utilisant les mesures des deux extrémités de la ligne [16,17]. Avec une telle méthode, le facteur de distribution du courant, la résistance de défaut et l'impédance équivalente de source aux deux extrémités de ligne ne sont plus les facteurs concernés dans la fonction de relais. Afin d'essayer d'utiliser les données de deux extrémités et de compenser l'effet du compensateur shunt de la ligne aussi bien, Sachdev et Agarwal ont proposé un procédé [18], dans lequel une estimation est d'abord obtenue à partir de la réactance de séquence directe utilisant le modèle série de ligne avec les

paramétriser localisés par la mesure des deux extrémités de la ligne. En se basant sur cette distance initiale de défaut, le compensateur shunt sur chaque côté de la ligne, peut être estimée. Les courants de remplissage qui traversent ces deux compensateurs peut être calculé en utilisant les tensions mesurées aux deux extrémités de la ligne. Les courants de ligne au point de défaut peuvent alors être obtenus en soustrayant le courant de remplissage du courant précédent de ligne. La distance de défaut est alors estimée en utilisant les nouveaux courants et tensions. Ce procédé se répète jusqu'à ce que la convergence soit obtenue. Cependant, il n'est pas montré dans cet article comment la résistance de défaut est estimée et comment les données asynchrones affecteront la précision de l'algorithme. Il n'explique pas non plus quel est le critère de convergence utilisé.

Cook dans son papier [19] a présenté trois méthodes de localisation de défaut basées sur les composantes symétriques. Lui aussi a négligé l'effet du compensateur shunt de la ligne dans ses méthodes. Deux des méthodes ont utilisé les impédances mesurées par les relais de protection aux deux extrémités d'une ligne, alors que la troisième utilisait des données d'impédance d'une seule extrémité de la ligne. Une attention considérable est focalisée sur l'influence du courant avant l'occurrence du défaut car l'auteur assume ceci comme la principale source d'erreur.

Kezunovic et al. ont présenté un nouvel algorithme de localisation de défaut basé sur l'échantillonnage synchronisé [20]. Un modèle d'une ligne de transmission dans le domaine temporel avec des paramètres répartis a été utilisé comme une base de développement de l'algorithme. Des échantillons de tensions et de courants aux deux extrémités de la ligne ont pris de façon synchrone et sont utilisés pour déterminer la localisation de défaut. Cet article a présenté deux algorithmes différents utilisant deux modèles de ligne, c'est-à-dire le modèle de ligne courte et le modèle de ligne longue.

Le modèle distribué de ligne suppose que les paramètres sont distribués uniformément le long de la ligne. Les courants de remplissage shunt sont inclus. En utilisant la transformation modale, les variables de phase peuvent être découplées.

Une méthode caractéristique est proposée par Ibe et Cory [21] pour calculer et tracer les profils de tension et de courant. Elle est basée sur le fait que le minimum de tension sera trouvé au point du défaut. Afin de calculer la tension et le courant le long de la ligne, l'équation différentielle partielle de la ligne est découplée d'abord en utilisant la transformation modale, ensuite elle est résolue par la méthode de caractéristiques en utilisant les échantillons de tension et de courant comme condition de la limite pris à une extrémité de la ligne. L'estimation des profils de la tension et du courant obtenu pour le

reste de la ligne de transmission est employée pour calculer les différentes fonctions de critères pour déterminer la position de défaut. La valeur carrée de la tension, de la valeur carrée du courant et produit de la valeur carrée de tension et de courant sont utilisés comme des fonctions de critères pour trouver le lieu du défaut. Ranjbar et autres [22] ont utilisé une fonction différente de critère dans laquelle l'intégration de la valeur absolue de la tension est utilisée, ce qui a permis d'enregistrer une meilleure sélectivité du point de défaut.

Récemment quelques efforts de recherches ont été concentrés sur la localisation de défaut sur les lignes disposant de compensation série [23-27]. Dans [23], la chute de tension à travers le condensateur série est estimé et est soustrait de la tension mesurée dans la sous-station. Une méthode déterministe et une méthode à base de réseaux de neurones avaient été appliquées pour le calcul de cette chute de tension. Les signaux corrigés ont été proposés pour la localisation de défaut et pour les relais de distance. La référence [24] propose deux routines pour le calcul du point de défaut, l'un pour des défauts en amont du condensateur série et l'autre pour des défauts en aval du condensateur série. De plus, un procédé de choix spécial pour sélectionner la solution correcte a été également proposé. La référence [25] présente un algorithme précis et robuste de localisation de défaut pour les lignes parallèles qui sont compensées par une capacité série. C'est la version généralisée de la référence [24] pour considérer les lignes parallèles. Dans ces références, pour déterminer la localisation du défaut, le modèle de la ligne avec les paramètres localisés est utilisé. Dans [26], une nouvelle approche basée sur le calcul du profil de tension est proposée. Dans cet algorithme, le modèle distribué dans le domaine temporel de la ligne de transmission est utilisé. Les dernières quatre références sont considérées comme un algorithme de localisation de défaut d'une extrémité, qui ont seulement besoin des échantillons de tensions et de courants sur une extrémité de la ligne. La référence [27] propose un algorithme de localisation de défaut des deux extrémités pour les lignes de transmission avec compensation série. Afin d'estimer le point du défaut, des échantillons synchronisés de tensions et de courants sont utilisés. L'idée de l'algorithme présenté est que le problème de localisation de défaut est considéré comme un problème d'optimisation qui peut être résolu par une méthode mathématique appropriée.

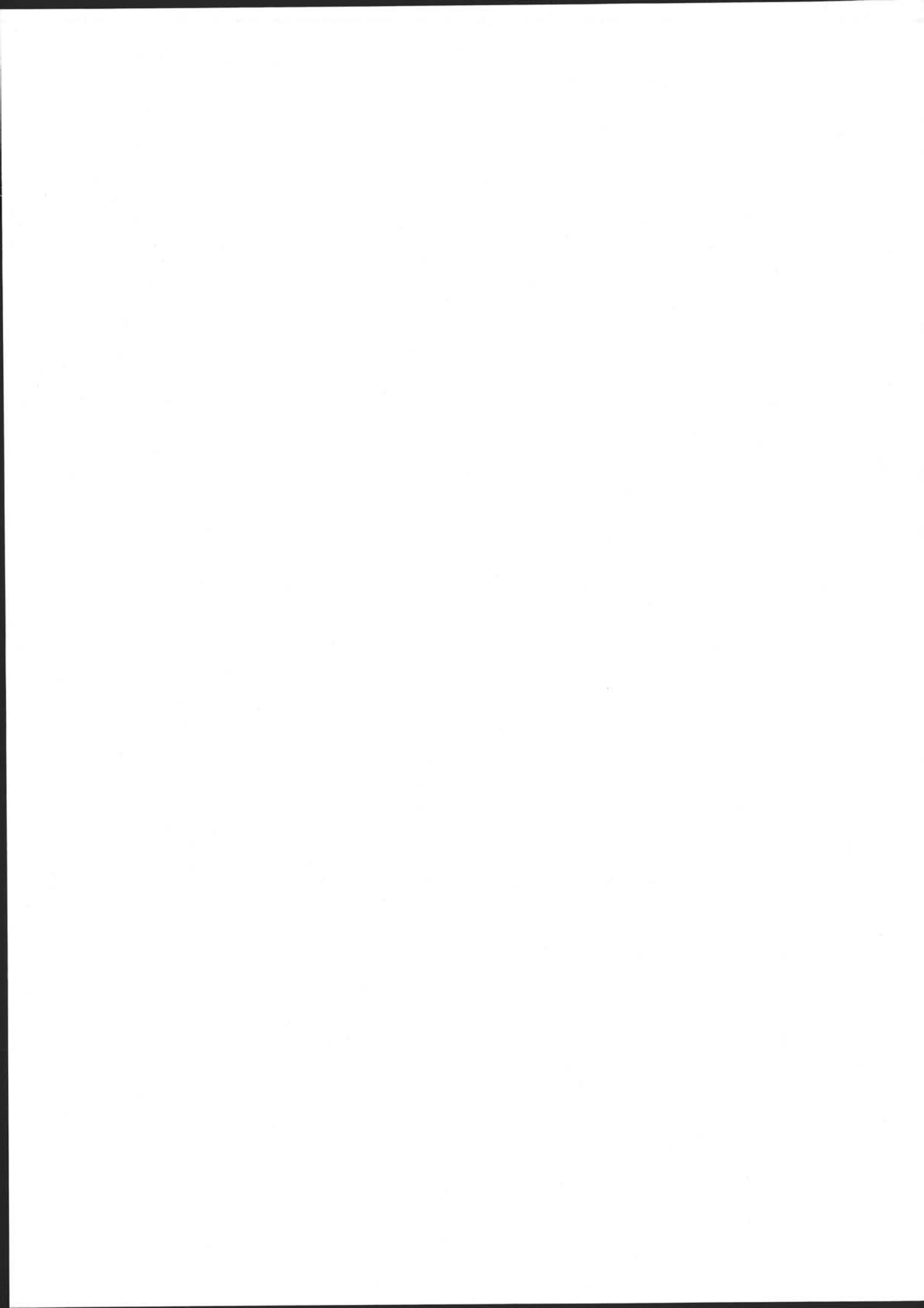
1.3 OBJECTIF DE LA THÈSE

L'objectif du travail présenté dans cette thèse est de trouver une(des) nouvelle(s) solution(s) pour le problème de la localisation de défaut dans les lignes de transport d'énergie. Beaucoup de techniques ont été proposées pour trouver le lieu exact de défaut sur des lignes de transmission. Dans la plupart de ces approches, la localisation de défaut a été effectuée par l'utilisation de modèle série de la ligne avec les paramètres localisés. Puisque ces modèles ne représentent pas la capacité shunt de la ligne de transmission, des erreurs significatives sont généralement produites dans la localisation exacte du défaut pour une ligne de transmission longue. Dans cette thèse nous suggérons une nouvelle technique basée sur le modèle distribué de la ligne de transmission pour surmonter le problème produit dans les approches conventionnelles.

Il y a bien longtemps qu'on a identifié qu'un des aspects les plus importants dans la modélisation de ligne en régimes transitoires électromagnétiques concerne prise en compte de la dépendance des paramètres de ligne de la fréquence et de la nature distribuée des pertes. Les modèles qui supposent que les paramètres de ligne sont constants (par exemple à 50 Hz) ne peuvent pas simuler correctement la réponse de la ligne sur une longue éventail de fréquences présentes dans les signaux pendant le régime transitoire. Cependant, il faut de noter que les variations des paramètres de ligne existent quand l'intervalle de fréquence est étendu. Les variations peuvent produire une erreur dans la solution finale des méthodes qui ont ignoré cet effet. En conséquence, pour la localisation de défaut précis il est nécessaire de considérer cet effet. Une partie de cette thèse est consacrée à ce sujet.

La protection et la localisation de défaut de ligne de transmission avec une compensation série avaient reçu une attention particulière ces dernières années. La performance de la localisation de défaut dépend du statut du condensateur et de la réponse transitoire du circuit de protection de ce condensateur. Une modélisation précise de l'installation du condensateur est exigée pour l'algorithme de localisation de défaut. Dans l'autre partie de cette thèse, une nouvelle approche pour la localisation de défaut sur ce type de lignes est présentée.

Des systèmes à base d'intelligence artificielle tels que les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue ont été appliqués avec succès au problème du diagnostic de défaut. Dans la dernière partie de cette thèse, la faisabilité d'application de la théorie de la logique floue pour résoudre le problème de la localisation de défaut est évaluée. Les règles de type de Takagi-Sugeno sont utilisées pour estimer la localisation de défaut. Pour calculer les paramètres optimaux de la fonction d'appartenance et les paramètres optimaux de conséquent de règles, nous utilisons les données obtenues par la simulation de différentes conditions de défaut. Les résultats donnés par cet algorithme sur un système typique confirment que l'approche de la logique floue peut être utilisée comme une alternative efficace pour la localisation précise du défaut dans les lignes de transmission.



CHAPITRE 2:

LOCALISATION DE DÉFAUT DANS LES LINGES DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE

2.1 INTRODUCTION

La détection, la localisation et l'élimination rapides des défauts sont des facteurs essentiels pour une exploitation satisfaisante des réseaux électriques. Quand un défaut se produit sur la ligne de transmission d'énergie, il est très important de trouver le lieu exact du défaut. Ceci permettra de réduire le temps requis pour réparer les dommages provoqués par le défaut et améliorer la fiabilité et la continuité de service. La localisation de défaut sur les lignes de transmission a toujours été un sujet bien connu, puisqu'il est étudié depuis longtemps. Cependant, ce problème a pris beaucoup d'importance de nos jours, en raison de la déréglementation et de la qualité exigée d'alimentation. Beaucoup de techniques ont été proposées et appliquées pour localiser le point exact de défaut sur les lignes de transmission. Les différences principales entre ces divers algorithmes viennent principalement des différents modèles de ligne de transmission (paramètres localisés ou distribués) utilisés et des données nécessaires (d'une extrémité ou de deux extrémités de la ligne). En calculant la distance de défaut, et en utilisant les signaux de la tension et du courant, il est plus avantageux d'exploiter les données des deux côtés de la ligne de transmission. Cependant, du point de vue pratique, il est plus approprié que l'algorithme utilise seulement les données de la tension et du courant d'un côté de la ligne, ce qui mène à la simplicité du matériel utilisé.

Ce chapitre présente un nouvel algorithme de localisation de défaut qui utilise uniquement les données d'une extrémité de ligne et qui emploie le modèle distribué du domaine temporel de la ligne de transmission en vue d'une bourse précision. L'idée de l'algorithme présenté est qu'elle considère la localisation de défaut, comme un problème d'optimisation qui peut être résolu par une méthode mathématique appropriée.

2.2 MODÈLE DE LIGNE DE TRANSMISSION AVEC LES PARAMÈTRES DISTRIBUÉS

Le modèle monophasé d'une ligne triphasée de transmission avec des paramètres distribués est représenté dans la Fig.2.1.

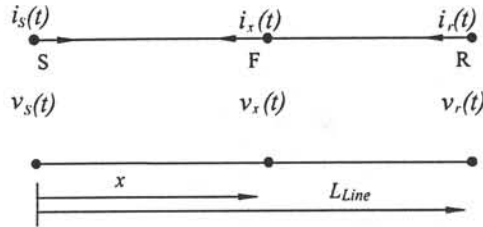


Fig.2.1: Ligne de transmission avec les paramètres distribués

Dans cette figure S représente l'extrémité émettrice et F est pris comme un point arbitraire à une distance x ($x \leq L_{Line}$) de S sur la ligne. Le modèle distribué [28] du segment SF est montré dans la Fig.2.2.

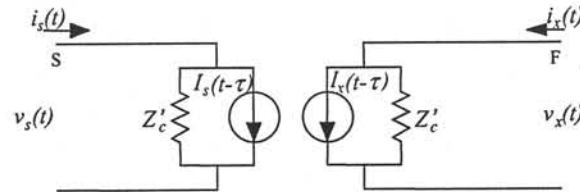


Fig.2.2: Modèle distribué du segment SF

Les équations suivantes peuvent être dérivées selon cette figure.

$$i_s(t) = \frac{1}{Z'_c} v_s(t) + I_s(t - \tau) \quad (2.1)$$

$$i_x(t) = \frac{1}{Z'_c} v_x(t) + I_x(t - \tau) \quad (2.2)$$

Dans ces équations, les sources de courants c.-à-d. I_s et I_x sont définies comme:

$$I_s(t - \tau) = \frac{-R'/4}{Z_c'^2} [v_s(t - \tau) + Z_c'' i_s(t - \tau)] - \frac{Z_c}{Z_c'^2} [v_x(t - \tau) + Z_c'' i_x(t - \tau)] \quad (2.3)$$

$$I_x(t - \tau) = \frac{-R'/4}{Z_c'^2} [v_x(t - \tau) + Z_c'' i_x(t - \tau)] - \frac{Z_c}{Z_c'^2} [v_s(t - \tau) + Z_c'' i_s(t - \tau)] \quad (2.4)$$

où:

$$\tau = \text{Le temps de la propagation d'onde de S à F}$$

Z_c = Impédance Caractéristique .

R' = Résistance de ligne de S à F

$$Z'_c = Z_c + R'/4 \quad Z''_c = Z_c - R'/4$$

Comme on peut le voir dans les équations (2.3) et (2.4), dans le cas où une résistance de ligne significative est observée, les sources de courants I_s et I_x sont fonctions des tensions et des courants des deux côtés de la ligne. Quand la résistance de ligne est assez petite pour être ignorée, les équations (2.3) et (2.4) peuvent être simplifiées (voir équations (2.5) et (2.6)), alors que les équations (2.1) et (2.2) restent sans changement.

$$I_s(t - \tau) = \frac{-1}{Z_c} v_x(t - \tau) - i_x(t - \tau) \quad (2.5)$$

$$I_x(t - \tau) = \frac{-1}{Z_c} v_s(t - \tau) - i_s(t - \tau) \quad (2.6)$$

A la différence de précédent cas, ces équations impliquent que les sources de courants I_s et I_x sont seulement fonction des courants et tensions du côté opposé de la ligne. Le nouvel algorithme sera développé en appliquant ces équations et les données sont assemblés à partir d'un côté de la ligne.

2.3 LES ALGORITHMES DE LOCALISATION DE DEFAUT

I. Définition Mathématique

Considérons que $v_x(t)$ et $i_x(t)$ représentent respectivement la tension et le courant au point x sur la ligne de transmission. $v_x(t)$ et $i_x(t)$ satisfont le système des équations partielles hyperboliques comme:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial x} + L_l \frac{\partial i}{\partial t} = - R_l i \end{array} \right. \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_l \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

où R_l , L_l et C_l représentent respectivement la résistance, l'inductance et la capacité par kilomètre,. Supposons que la tension au point de défaut F est donnée par:

$$v_x(t) = v_F \quad t \geq t_0 \quad (2.9)$$

où t_0 représente l'instant de commencement du défaut.

Les enregistrements de la tension et du courant à l'extrémité locale de la ligne pendant le défaut peuvent être représentés par:

$$\begin{cases} v_s(t) \\ i_s(t) \end{cases} \quad t_0 \leq t \leq T+t_0 \quad (2.10)$$

où T est la longueur de la fenêtre de l'enregistrement. Le problème de localisation de défaut peut alors être défini pour la détermination la coordonnée x en utilisant le modèle de ligne (équations (2.7) et (2.8)) et les données de l'équation (2.10).

Afin de résoudre ce problème, deux cas distincts sont considérés. Un avec un modèle de ligne sans perte et l'autre en prenant en considération la résistance de la ligne.

B. Ligne de Transmission Sans Perte

Supposons qu'un court-circuit franc ($v_F = 0$) s'est produit au point F, à la distance x de l'extrémité émettrice de la ligne. Selon le modèle distribué du domaine temporel de la ligne de transmission et en considérant les équations (2.5) et (2.6), nous obtenons:

$$v_s(t) = Z_c i_s(t) + Z_c i_x(t-\tau) + v_x(t-\tau) \quad (2.11)$$

$$v_x(t) = Z_c i_x(t) + Z_c i_s(t-\tau) + v_s(t-\tau) \quad (2.12)$$

Sans perte de généralité, nous supposons que le court circuit s'est produit à $t_0 = 0$. Afin d'annuler le courant inconnu i_x dans équations (2.11) et (2.12), nous décalons l'équation (2.11) de τ secondes. Selon ces équations d'un côté et équation (2.9) de l'autre côté, on peut écrire:

$$v_s(t+\tau) + v_s(t-\tau) = Z_c (i_s(t+\tau) - i_s(t-\tau)) \quad (2.13)$$

La distance au point de défaut x , n'apparaît pas explicitement dans l'équation (2.13). Elle est cachée dans le temps de propagation d'onde τ . En plus, τ n'apparaît pas comme une variable dans l'équation (2.13), mais comme une valeur de laquelle, la tension et le courant dépendent. L'équation (2.13) peut être écrite sous forme discrète comme:

$$v_s(k+m) + v_s(k-m) = Z_c (i_s(k+m) - i_s(k-m)) \quad (2.14)$$

où:

$$m \Delta t = \tau$$

$$k \Delta t = t$$

$$\Delta t = \text{pas d'échantillonnage}$$

$$m, k = \text{nombre entiers arbitraires}$$

Dans l'équation (2.14), il y a juste un paramètre inconnu, la distance au point de défaut, et un système d'équations (une équation pour chaque échantillon). Par conséquent, pour trouver la meilleure estimation, on considère tous les échantillons. Dans ce cas, la

technique d'estimation de moindre carrée est utilisée. Dans ce cas particulier, la fonction de coût (le critère) qu'il faut minimiser est:

$$J_1(m) = \sum_{k=m}^{N-m} \left[\frac{v_s(k+m) + v_s(k-m)}{i_s(k+m) - i_s(k-m)} - Z_c \right]^2 \quad (2.15)$$

où:

$$N = \text{le nombre total des échantillons } (N \Delta t = T)$$

Puisque le critère ne dépend pas linéairement de m , la recherche du minimum doit être effectuée d'une manière approximative. Pour ce faire, la valeur du critère défini par l'équation (2.15), est évaluée pour différentes valeurs de m . Le minimum de ces valeurs de critère détermine la valeur finale de m pour laquelle la localisation de défaut est déterminée.

C. Ligne de Transmission Résistive

Cette section décrit un algorithme pour résoudre le problème de localisation de défaut dans le cas d'une ligne de transmission résistive. De la même façon que précédemment, nous avons supposé que le court-circuit soit produit au point F sur la ligne à une distance x d'extrémité émettrice. Selon les équations (2.1) à (2.4), nous obtenons:

$$v_s(t) = Z'_c i_s(t) + \frac{R'/4}{Z'_c} [v_s(t-\tau) + Z''_c i_s(t-\tau)] + \frac{Z_c}{Z'_c} [v_x(t-\tau) + Z''_c i_x(t-\tau)] \quad (2.16)$$

$$v_x(t) = Z'_c i_x(t) + \frac{R'/4}{Z'_c} [v_x(t-\tau) + Z''_c i_x(t-\tau)] + \frac{Z_c}{Z'_c} [v_s(t-\tau) + Z''_c i_s(t-\tau)] \quad (2.17)$$

La suppression du paramètre inconnu des équations ci-dessus mène à l'expression suivante:

$$\begin{aligned} & v_s(t+\tau) - Z'_c i_s(t+\tau) + \frac{R'/4}{Z'_c} \left[\frac{Z''_c}{Z'_c} (v_s(t) - Z'_c i_s(t)) - (v_s(t) + Z''_c i_s(t)) \right] \\ & + \frac{Z''_c}{Z'_c{}^3} (Z_c^2 - (R'/4)^2) [v_s(t-\tau) + Z''_c i_s(t-\tau)] = 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dans ce cas, le paramètre inconnu x , apparaît non seulement implicitement dans l'argument de tension et de courant, mais il apparaît également explicitement dans les variables, R' , Z'_c et Z''_c . En discrétisant l'équation ci-dessus on considère:

$$F(m, k) = 0 \quad (2.19)$$

L'équation (2.19) est plus spécifiée puisqu'elle a juste une variable inconnue, la distance au point de défaut, x . Ainsi, la meilleure estimation peut être trouvée en se basant sur la technique d'estimation des moindres carrés. Afin de déterminer la localisation du défaut, le problème d'optimisation suivant doit être résolu:

$$\underset{m}{\text{Min}} J_2(m) = \underset{m}{\text{Min}} \sum_{k=m}^{N-m} F^2(m, k) \quad (2.20)$$

2.4 DÉFAUTS TRIPHASÉS ASYMÉTRIQUES

La localisation des défauts asymétriques peut également être déterminée en utilisant la méthode proposée dans la section précédente. Le procédé est semblable au cas de défauts symétriques. Dans le cas des défauts asymétriques, les équations couplées dans le domaine de phase doivent être transformées aux équations découplées dans le domaine modal. Pour une ligne équilibrée, il y a un certain nombre de matrices simples de transformation qui découplent les équations de ligne. Par exemple, une telle matrice et son inverse pour les lignes triphasées sont [28]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

En utilisant l'inverse de matrice de transformation \mathbf{M}^{-1} , les tensions de l'extrémité émettrice dans le domaine modal peuvent être écrites comme:

$$\begin{cases} v_s^0(t) = [v_s^a(t) + v_s^b(t) + v_s^c(t)] / 3 \\ v_s^1(t) = [v_s^a(t) - v_s^b(t)] / 3 \\ v_s^2(t) = [v_s^a(t) - v_s^c(t)] / 3 \end{cases} \quad (2.22)$$

Après le découplage du système d'équation (2.22), nous pouvons appliquer le même procédé pour chacun des trois modes, et donc effectuer la localisation de défaut.

2.5 RÉSULTATS D'ESSAIS

Dans cette section la performance des algorithmes proposés a été évaluée. La Fig.2.3 représente une ligne triphasée longue 400 kV et 308 km avec des paramètres distribués. Un défaut triphasé se produit à un point arbitraire F en une distance x de l'extrémité émettrice. Pour x égale à 100 km, la tension et le courant de la phase (a) à l'extrémité émettrice sont montrés dans les Figs.2.4 et 2.5 respectivement. Pour ce cas on a assumé que l'angle de commencement de défaut est de 90 degrés. Ces courbes sont obtenues en utilisant le logiciel MATLAB, et ressemblent en grande partie aux résultats obtenus par le logiciel EMTP.

Pour cette condition, les fonctions de critère J_1 et J_2 sont montrées dans la Fig.2.6 en fonction la distance. Les minimums de ces fonctions de critère déterminent la localisation de défaut dans deux cas, c.-à-d. ligne sans perte et ligne résistive. Selon cette figure, on peut conclure que la précision élevée du modèle de ligne mène à une précision élevée des résultats. Pour le calcul des fonctions de critère, seuls les échantillons de tension et de courant du défaut pris à l'extrémité émettrice de la ligne sont utilisés. Ces données n'exigent pas le filtrage de la composante de courant continu (DC) et de la composante haute fréquence. La fenêtre de données utilisée dans le calcul de la localisation de défaut a contenu 2.5 à 3.5 millisecondes de données de défaut, à partir de l'occurrence de défaut.

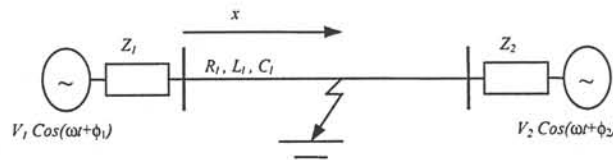


Fig.2.3: Système d'étude

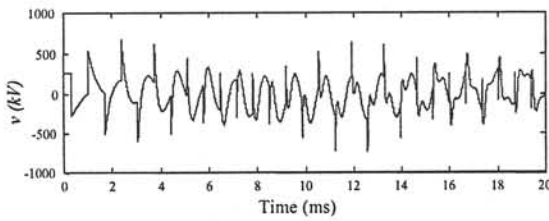


Fig.2.4: La tension de l'extrémité émettrice pour l'angle de commencement du défaut égale à 90°

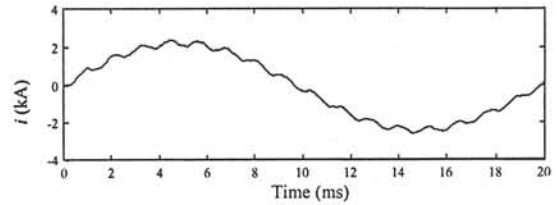


Fig.2.5: Le courant de l'extrémité émettrice pour l'angle de commencement du défaut égale à 90°

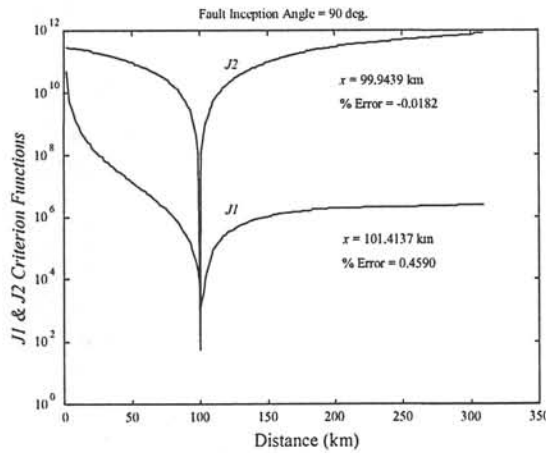


Fig.2.6: Les fonctions de critère J_1 et J_2 pour le défaut à 100km et pour l'angle de commencement du défaut égale à 90°

Afin d'analyser la précision de l'algorithme pour différentes situations de défaut, nous avons réalisé les essais étendus pour différents angles de commencement de défaut. Comme un exemple, pour l'angle du commencement de défaut égale à zéro, la tension et le courant à l'extrémité émettrice pour un défaut triphasé à 100 km sont montrés dans les Figs.2.7 et 2.8 respectivement. Les fonctions de critère pour ce cas sont représentées dans la Fig.2.9. Le résultat est encore satisfaisant en dépit de la composante DC significative dans le signal du courant, comme on le voit sur la Fig.2.8.

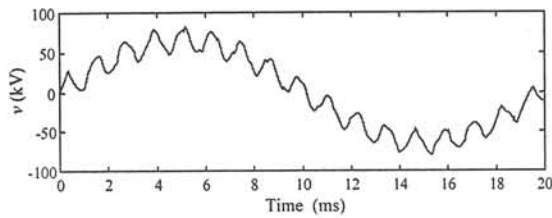


Fig.2.7: La tension de l'extrémité émettrice pour l'angle de commencement du défaut égale à zéro

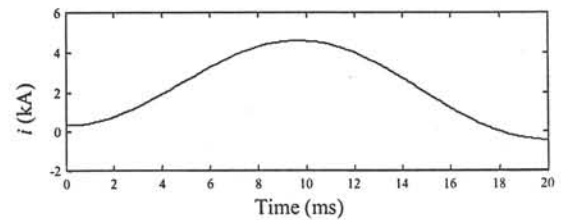


Fig.2.8: Le courant de l'extrémité émettrice pour l'angle de commencement du défaut égale à zéro

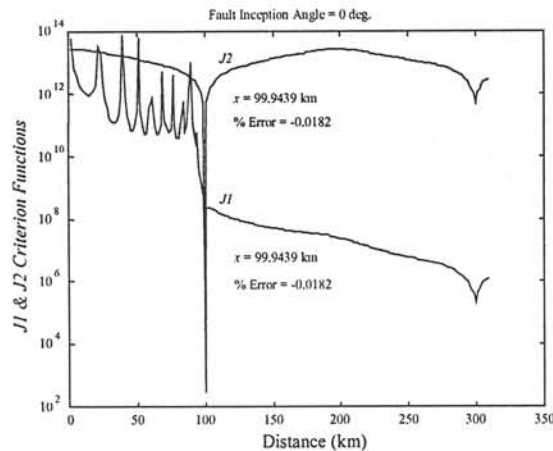


Fig.2.9: Les fonctions de critère J_1 et J_2 pour le défaut à 100km et pour l'angle de commencement du défaut égale à zéro

Pour étudier la précision la précision des méthodes proposées pour différentes positions de défaut, le pourcentage de l'erreur est tracé en fonction de la distance de défaut dans les Figs.2.10 et 2.11. Ces figures sont préparées pour le cas d'un angle du commencement de défaut égale à 45 degrés. Les Figs.2.10 et 2.11 concernant les cas des modèles de ligne sans perte et la ligne résistive respectivement. Comme on l'a vu dans la Fig.2.10, les défauts se produisant près de l'extrémité de la ligne causent des erreurs trop importantes. Cela est dû au modèle imprécis de ligne. D'un autre côté, les localisations du défaut sont calculées exactement quand le modèle précis de ligne est utilisé.

Notons que le pourcentage de l'erreur est calculé comme:

$$Erreur (\%) = \frac{x_{est} - x_{réel}}{L_{Line}} \times 100 \quad (2.23)$$

où:

x_{est} = Localisation calculée du défaut

$x_{réel}$ = Localisation réelle du défaut

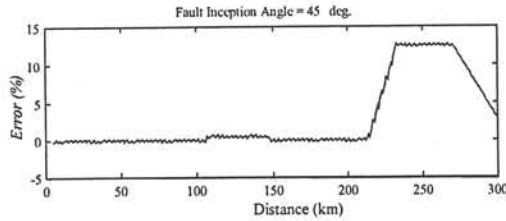


Fig.2.10: Pourcentage de l'erreur pour le modèle de ligne sans perte

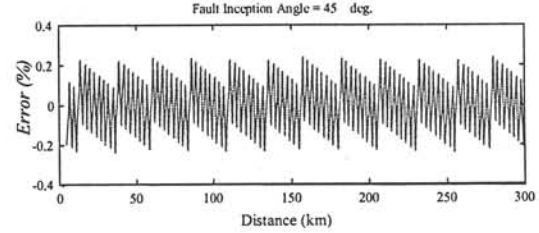


Fig.2.11: Pourcentage de l'erreur pour le modèle de ligne résistive

L'algorithme proposé peut être aussi appliqué dans le cas des défauts asymétriques (monophasé, biphasé et biphasé à la terre). Cet algorithme a été testé pour différentes localisations de défaut. Les résultats indiquent des erreurs très petites dans tous les cas, incluant les localisations et les types de défaut. Le pourcentage de l'erreur en fonction de la distance de défaut, pour le type de défaut le plus commun, c.-à-d. le défaut monophasé, est montré dans la Fig.2.12. Les résultats de cette étude prouvent que les erreurs pour les défauts asymétriques sont légèrement plus grandes que pour les défauts symétriques.

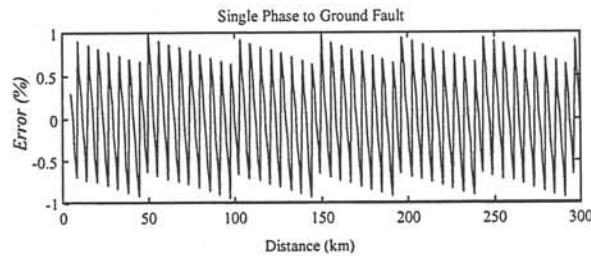


Fig.2.12: Pourcentage d'erreur pour défaut asymétrique

2.6 CONSIDÉRATION DE LA RÉSISTANCE DE DÉFAUT

Le modèle monophasé d'une ligne de transmission triphasée avec des paramètres distribués est montré dans la Fig.2.13.

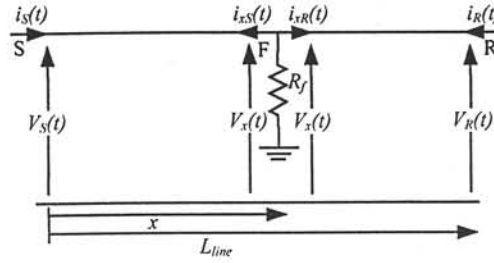


Fig.2.13: Ligne de transmission avec les paramètres répartis

Le modèle distribué [28] des segments de SF et de FR sont montrés dans la Fig.2.14

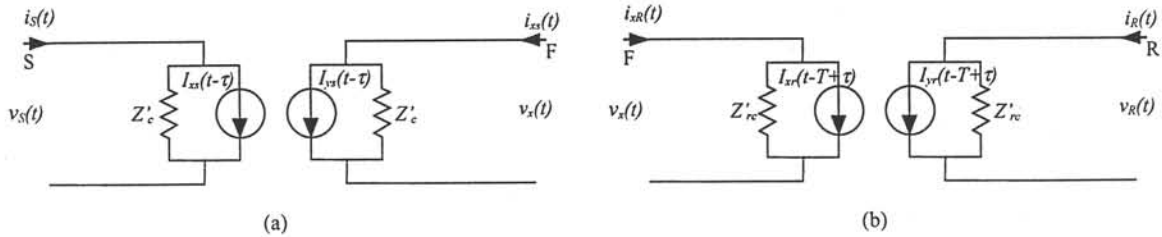


Fig.2.14: Le modèle distribué de (a) segment SF et (b) segment FR

Les équations suivantes peuvent être dérivées selon la Fig.2.14 (a).

$$i_s(t) = \frac{1}{Z'_c} v_s(t) + I_{xs}(t - \tau) \quad (2.24)$$

$$i_{xs}(t) = \frac{1}{Z'_c} v_x(t) + I_{ys}(t - \tau) \quad (2.25)$$

Dans ces équations, les sources de courants c.-à-d. I_{xs} et I_{ys} sont définies comme:

$$I_{xs}(t - \tau) = \frac{-R'/4}{Z'_c{}^2} [v_s(t - \tau) + Z'_c i_s(t - \tau)] - \frac{Z_c}{Z'_c{}^2} [v_x(t - \tau) + Z'_c i_{xs}(t - \tau)] \quad (2.26)$$

$$I_{ys}(t - \tau) = \frac{-R'/4}{Z'_c{}^2} [v_x(t - \tau) + Z'_c i_{xs}(t - \tau)] - \frac{Z_c}{Z'_c{}^2} [v_s(t - \tau) + Z'_c i_s(t - \tau)] \quad (2.27)$$

Des équations semblables peuvent être écrites pour la Fig.2.14 (b) comme suit:

$$i_R(t) = \frac{1}{Z'_rc} v_R(t) + I_{xr}(t - T + \tau) \quad (2.28)$$

$$i_{xR}(t) = \frac{1}{Z'_rc} v_x(t) + I_{yr}(t - T + \tau) \quad (2.29)$$

Dans ces équations, les sources de courants c.-à-d. I_{xr} et I_{yr} sont définies comme:

$$I_{xr}(t-T+\tau) = \frac{-R'_c/4}{Z'_{rc}} [v_R(t-T+\tau) + Z'_c i_R(t-T+\tau)] - \frac{Z_c}{Z'^2_{rc}} [v_x(t-T+\tau) + Z'_c i_{xR}(t-T+\tau)] \quad (2.30)$$

$$I_{yr}(t-T+\tau) = \frac{-Z_c}{Z'^2_{rc}} [v_R(t-T+\tau) + Z'_c i_R(t-T+\tau)] - \frac{R'_c/4}{Z'_c} [v_x(t-T+\tau) + Z'_c i_{xR}(t-T+\tau)] \quad (2.31)$$

Le nouvel algorithme est développé sur la base de ces équations et sur la base des données relevées d'un seul côté de la ligne.

2.7 L'ALGORITHME PROPOSÉ

Nous supposons que le court circuit est produit au point F sur la ligne de transmission à une distance x de l'extrémité émettrice. Selon (2.24)-(2.27), nous obtenons:

$$v_s(t) = Z'_c i_s(t) + \frac{R'_c/4}{Z'_c} [v_s(t-\tau) + Z'_c i_s(t-\tau)] + \frac{Z_c}{Z'_c} [v_x(t-\tau) + Z'_c i_{xs}(t-\tau)] \quad (2.32)$$

$$v_x(t) = Z'_c i_x(t) + \frac{R'_c/4}{Z'_c} [v_x(t-\tau) + Z'_c i_{xs}(t-\tau)] + \frac{Z_c}{Z'_c} [v_s(t-\tau) + Z'_c i_s(t-\tau)] \quad (2.33)$$

Après un arrangement les équations ci-dessus, nous pouvons écrire:

$$v_x(t) = f_1(v_s, i_s, t, t-\tau, t+\tau) \quad (2.34)$$

$$i_{xs}(t) = f_2(v_s, i_s, t, t-\tau, t+\tau) \quad (2.35)$$

Et également, nous avons:

$$v_x(t) = f_3(v_R, i_R, t, t+T-\tau, t-T+\tau) \quad (2.36)$$

$$i_{xR}(t) = f_4(v_R, i_R, t, t+T-\tau, t-T+\tau) \quad (2.37)$$

Si le court circuit se produit avec la résistance R_f , nous pouvons écrire:

$$v_x(t) = -R_f (i_{xs}(t) + i_{xR}(t)) \quad (2.38)$$

Les équations ci-dessus sont valables pour chaque échantillon. Nous supposons que seulement les données de l'extrémité émettrice sont accessibles. Ainsi s'il y a N échantillons, nous aurons les $5N$ équations et les inconnus sont $5N+2$. Les inconnus sont $i_R(t)$, $v_R(t)$, $v_x(t)$, $i_{xs}(t)$, $i_{xR}(t)$, R_f et τ (proportionnels à x : la distance au défaut). Pour résoudre ces équations pour τ (ou x), nous devons avoir une autre hypothèse. Pendant les premiers cycles après qu'un défaut se produit, l'extrémité réceptrice de la ligne peut être représentée par l'équivalent de Thevinin c.-à-d. une tension constante derrière l'impédance subtransitoire. Ce modèle sera employé pour décrire l'extrémité réceptrice pendant le défaut. La tension du circuit ouvert ne change pas pendant les premiers cycles suivant le défaut.

Cette tension est déterminée par l'état d'exploitation avant l'occurrence du défaut [9]. Selon cette hypothèse, nous pouvons écrire:

$$v_R(t) = f_5(E_R(t), i_R(t)) \quad (2.39)$$

où $E_R(t)$ est la tension de circuit ouvert à l'extrémité réceptrice. Selon les équations (2.34)-(2.38) nous aurons:

$$v_R(t) - Z'_{rc} i_R(t) = f_6(t, \tau, R_f) \quad (2.40)$$

$$v_R(t) + Z''_{rc} i_R(t) = f_7(t, \tau, R_f) \quad (2.41)$$

En utilisant les équations (2.39)-(2.41) nous pouvons écrire:

$$f_8(t, \tau, R_f) = 0 \quad (2.42)$$

Le paramètre inconnu x , apparaît non seulement implicitement dans l'argument de tension et de courant, mais apparaît également explicitement dans les variables R' , R'_c , Z'_c , Z'_{rc} , Z''_c et Z''_{rc} . En discrétisant l'équation ci-dessus nous avons écrit:

$$F(k, m, R_f) = 0 \quad (2.43)$$

où: $m\Delta t = \tau$, $k\Delta t = t$, Δt est le pas de l'échantillon et m et k sont deux nombres entiers arbitraires.

Le système d'équation de localisation de défaut donné par (2.43) est plus spécifié puisqu'il a juste deux variables inconnues, distance au point de défaut x et résistance du défaut R_f . Par conséquent, la meilleure estimation peut être trouvée en utilisant la technique d'estimation des moindres carrés. Afin de déterminer la localisation du défaut, le problème d'optimisation suivant doit être résolu:

$$\underset{m}{\text{Min}} J(m, R_f) = \underset{m}{\text{Min}} \sum_k F^2(k, m, R_f) \quad (2.44)$$

Pour résoudre ce problème mathématique on propose l'approche suivante.

D'abord, nous supposons que R_f est constant, par exemple zéro Ohms. Avec cette supposition et avec l'application de l'équation (2.44), nous trouvons une localisation du défaut (m). Ensuite, avec cette valeur nous résolvons le problème d'estimation des moindres carrés linéaires suivant pour trouver la résistance du défaut:

$$A R_f = B \quad (2.45)$$

A et B sont des vecteurs colonne qui sont dépendant des échantillons de la tension et du courant de l'extrémité émettrice de la ligne et également du lieu du défaut. Pour trouver la valeur R_f de cette équation, nous pouvons utiliser la méthode d'estimation des moindres carrés comme suit:

$$R_f = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.46)$$

où T représente la transposée du vecteur. Ce processus est répété jusqu'à ce que la variation des paramètres (R_f et m) sur deux étapes successives soit dans une limite prédéfinie.

La localisation des défauts asymétriques peut également être déterminée en utilisant cette approche. Le procédé est semblable au cas de défauts symétriques. Dans le cas des défauts asymétriques, les équations couplées dans le domaine de phase doivent être transformées en équations découplées dans le domaine modal. Après le découplage des équations du système, nous pouvons appliquer le même procédé aux composantes modales.

2.8 ÉVALUATION DE PERFORMANCE

Afin d'étudier la précision de l'algorithme proposé, les résultats de diverses simulations sont présentés dans cette section. Fig.2.15 montre une ligne triphasée longue à 400 kV et 300 km avec des paramètres répartis. Un défaut triphasé se produit en un point arbitraire F à une distance x de l'extrémité émettrice. Pour x égale à 150 kilomètres, la tension et le courant de la phase (a) de l'extrémité émettrice sont montrés dans les Figs.2.16 et 2.17 respectivement. Pour ce cas on a assumé que l'angle de commencement de défaut et la résistance de défaut sont 90 degrés et 10 Ω respectivement.

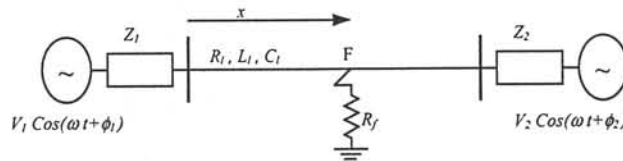


Fig.2.15: Système d'étude

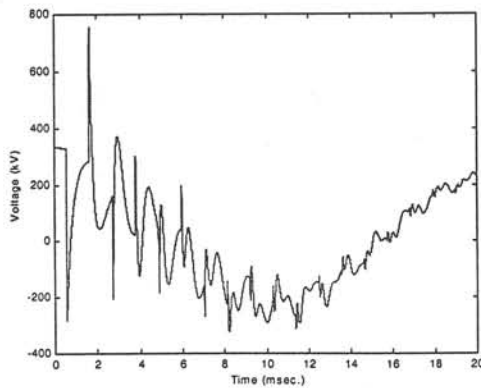


Fig.2.16: La tension de l'extrémité émettrice de phase (a)
- défaut à 150km

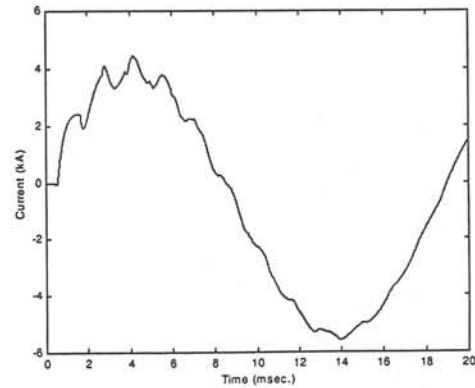


Fig.2.17: Le courant de l'extrémité émettrice de phase (a)
- défaut à 150km

Selon la section précédente, pour trouver le point du défaut, le problème d'optimisation défini dans l'équation (2.44) est résolu. Cette fonction de critère est tracée dans la Fig.2.18. Pour le calcul de la distance de défaut, seul la moitié du cycle des échantillons de tension et de courant après le commencement de défaut, prises à une extrémité de la ligne, est utilisé. Pour ce cas, l'estimation de la distance de défaut est de 150.9537 (kilomètre) c.-à-d. une erreur de 0.3179%.

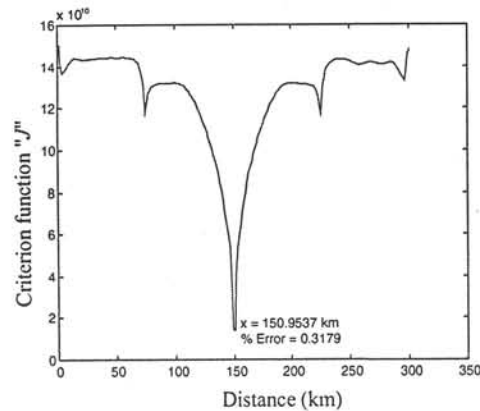


Fig.2.18: La fonction de critère J pour le défaut à 150 km et pour l'angle de commencement du défaut égale à 90°

Afin d'analyser la précision de l'algorithme pour différentes situations de défaut, nous avons réalisé des essais pour différents angles de commencement. Par exemple, pour l'angle de commencement de défaut égale à zéro, la tension et le courant à l'extrémité émettrice pour la localisation de défaut à 175 kilomètres sont montrés dans les Figs.2.19 et 2.20 respectivement. La fonction de critère pour ce cas est illustrée dans la Fig.2.21. Pour ce cas, l'estimation de la distance de défaut est de 175.8818 (kilomètre), c.-à-d. une erreur de 0.2939%. Le résultat est encore satisfaisant en dépit de la composante DC significative dans le signal du courant, comme on peut le voir sur la Fig.2.20.

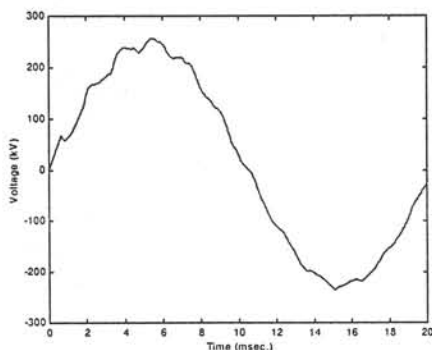


Fig.2.19: La tension de l'extrémité émettrice de phase (a)
- défaut à 175 km

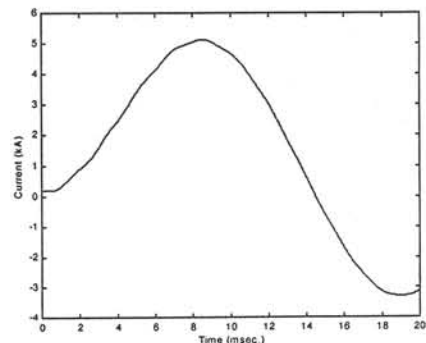


Fig.2.20: Le courant de l'extrémité émettrice de phase (a)
- défaut à 175km

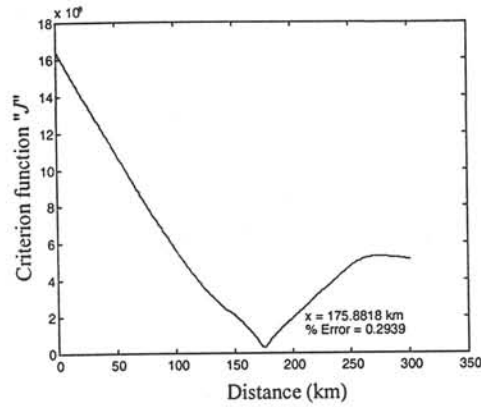


Fig.2.21: La fonctionne de critère J pour le défaut à 175km et pour l'angle de commencement du défaut égale à zéro

Afin d'étudier la précision de la méthode proposée pour différentes localisations de défaut, l'algorithme a été testé pour quelques points de long de la ligne. Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 2.1. Dans toutes les simulations on assume que la résistance de défaut est de 10Ω . Selon les entrées de ce tableau, on peut constater que l'erreur est très petite dans presque tous les cas, c.-à-d. l'erreur reste inférieure à 0.45%. La variation de l'angle de commencement de défaut n'a pas beaucoup d'influence sur la précision de l'algorithme. Notons que le pourcentage de l'erreur est calculé en utilisant l'équation (2.23).

Tableau 2.1: Les valeurs estimées de la localisation de défaut pour $R_f = 10 \Omega$

Localisation de défaut (km)	L'angle de commencement du défaut égale à zéro		l'angle de commencement du défaut égale à 90°	
	La valeur estimée (km)	Erreur (%)	La valeur estimée (km)	Erreur (%)
25	26.3130	0.4377	24.9281	-0.0240
50	51.2412	0.4137	49.8563	-0.0479
75	76.1693	0.3889	74.7844	-0.0719
100	99.7125	-0.0958	99.7125	-0.0958
125	126.0255	0.3418	124.6406	-0.1198
150	150.9537	0.3179	150.9537	-0.3179
175	175.8818	0.2939	174.4969	-0.1677
200	200.8099	0.2700	199.4250	-0.1917
225	225.7380	0.2460	224.3531	-0.2156
250	250.6662	0.2221	250.6662	0.2221
275	275.5943	0.1981	275.5943	0.1981

2.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons proposé un nouvel algorithme de localisation de défaut en utilisant les échantillons de la tension et du courant après l'occurrence de défaut, pris à une extrémité de la ligne de transmission. Les avantages de ce nouvel algorithme sont:

- aucune exigence pour l'élimination de la composante du courant continu (DC) et des composantes hautes fréquence des données
- Basse sensibilité à l'angle de commencement de défaut et également à la localisation du défaut
- Précision élevée
- fenêtre très étroite des données (2.5 à 3.5 millisecondes de données après le commencement de défaut).
- considération de la résistance de défaut et basse sensibilité à cette résistance.

Les algorithmes ont été testés sous une variété de conditions de défaut. Dans le cas des défauts symétriques, les erreurs estimées sur le lieu du défaut sont entre 0.25% à 0.45% par rapport à longueur de la ligne pour le cas du modèle précis de la ligne. Cependant, quand nous utilisons le modèle de ligne sans perte (modèle imprécis), cela mène à des erreurs trop importantes, particulièrement quand le défaut se produit près de l'extrémité de la ligne. Les résultats de localisation de défaut pour les cas de défauts asymétriques indiquent que les erreurs estimées pour localiser de défaut étaient assez petites pour tous les cas, puisqu'elles n'excèdent jamais 1% de la longueur de la ligne.

CHAPITRE 3:

LOCALISATION DE DÉFAUT DANS LES LINGES DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE:

INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE SUR LES PARAMÈTRES DE LA LIGNE

3.1 INTRODUCTION

On connaît depuis longtemps que l'un des aspects les plus importants dans la modélisation des lignes électriques pour des études des régimes transitoires électromagnétiques est celui de la prise en considération de la dépendance des paramètres de ligne de la fréquence et ainsi que la nature distribuée des pertes. Les modèles qui supposent que les paramètres de ligne sont constants (par exemple à 50 Hz) ne peuvent pas simuler convenablement la réponse de la ligne sur un vaste éventail de fréquences présentes dans les signaux pendant le régime transitoire. Cependant, il faut noter que les variations des paramètres de la ligne existent quand l'intervalle de fréquence est étendu. De ce fait des erreurs peuvent se produire dans la solution finale des méthodes qui ignorent cet effet. Ainsi, pour une localisation de défaut précise, il est nécessaire de considérer cet effet.

Ce chapitre présente un nouvel algorithme de localisation de défaut utilisant seulement les données d'une extrémité de la ligne après l'occurrence du défaut et emploie un modèle de ligne dépendant de fréquence en vue d'une meilleure précision. L'idée de l'algorithme présenté est qu'il considère la localisation de défaut comme un problème d'optimisation qui peut être résolu par la méthode de Newton-Raphson associée à une technique d'estimation des moindres carrés.

3.2 MODÈLE DE LIGNE AVEC LES PARAMÈTRES DÉPENDANTS DE LA FRÉQUENCE

Quand la dépendance de la fréquence des paramètres de ligne est prise en considération, il devient très difficile, d'écrire la solution des équations de la ligne directement dans le domaine temporel. Cette solution, cependant, peut facilement être obtenue dans le domaine de fréquentiel, et est donnée par les équations bien connues ci-dessous [29,30]:

$$V_s(\omega) = \text{Cosh}(\gamma(\omega)x)V_x(\omega) - Z_0(\omega)\text{Sinh}(\gamma(\omega)x)I_x(\omega) \quad (3.1)$$

et

$$I_s(\omega) = \frac{1}{Z_0(\omega)} \text{Sinh}(\gamma(\omega) x) V_x(\omega) - \text{Cosh}(\gamma(\omega) x) I_x(\omega) \quad (3.2)$$

où:

$$Z_c(\omega) = \sqrt{Z'(\omega) / Y'(\omega)} = \text{Impédance Caractéristique} \quad (3.3)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{Z'(\omega) \cdot Y'(\omega)} = \text{Constante de Propagation} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} Z'(\omega) = R'(\omega) + j \omega L'(\omega) \\ Y'(\omega) = G'(\omega) + j \omega C'(\omega) \end{cases}$$

R' = Résistance série L' = Inductance série

G' = Conductance shunt C' = Capacité shunt

(Les valeurs de ces paramètres sont données par unité de longueur de la ligne)

Un des premiers modèles de la ligne avec les paramètres dépendants de la fréquence utilisé pour les régimes solutions transitoires dans le domaine temporel est proposé par Budner [31]. Il a utilisé le concept des fonctions pesantes dans un modèle d'admittance de la ligne. Les fonctions pesantes dans ce modèle sont, cependant, fortement oscillantes et difficiles à évaluer avec certitude. Dans un effort pour améliorer la méthode des fonctions pesantes de Budner, Snelson [32] a présenté un changement de variables. Les nouvelles variables sont définies comme suit:

la propagation vers l'avant (incident):

$$\begin{cases} f_s(t) = v_s(t) + R_I i_s(t) \\ f_x(t) = v_x(t) + R_I i_x(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

et la propagation en arrière (réflective) :

$$\begin{cases} b_s(t) = v_s(t) - R_I i_s(t) \\ b_x(t) = v_x(t) - R_I i_x(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

où R_I est une vraie constante définie comme $R_I = \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_c(\omega)$

Les équations (3.5) et (3.6) sont alors transformées dans le domaine fréquentiel et comparées à la solution de ligne présentée par les équations (3.1) et (3.2). Cette idée a été encore développée par Meyer et Dommel [29] et a mené aux fonctions pesantes $a_1(t)$ et $a_2(t)$ qui sont montrées dans la Fig.3.1. La représentation équivalente de ligne est montrée dans la Fig.3.2. Dans ce circuit $b_s(t)$, la propagation réflective est obtenue à l'aide des courants et des tensions aux deux extrémités de la ligne et est donnée par l'intégrale de convolution comme:

$$b_s(t) = \int_0^{\infty} \{ f_s(t-u) a_2(u) + f_x(t-u) a_1(u) \} du \quad (3.7)$$

Une équation de convolution semblable est obtenue pour le nœud x.

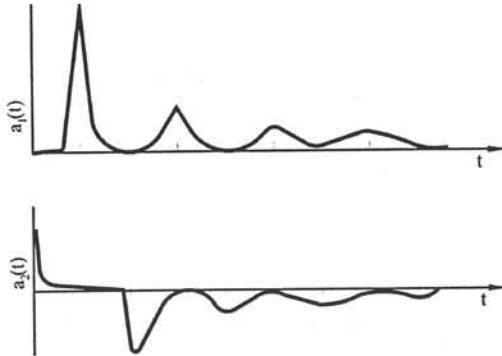


Fig.3.1: Les fonctions pesantes dans formulation de Meyer et Dommel

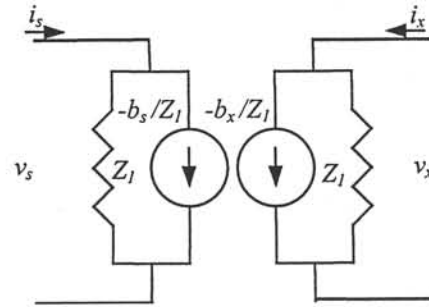


Fig.3.2: Circuit équivalent de la ligne

Cette technique, cependant, présente quelques inconvénients numériques. Un de ces inconvénients est le processus relativement long exigé pour l'évaluation de l'intégrale (3.7) à chaque itération. L'autre inconvénient est la difficulté d'évaluer la fonction $a_2(t)$ avec une précision suffisante. Pour surmonter ces problèmes, J. Marti a proposé une nouvelle méthode dans laquelle la résistance R_l est remplacée par une impédance équivalente ($Z_{eq}(\omega)$) dont la réponse en fréquence est identique à l'impédance caractéristique de la ligne, $Z_c(\omega)$.

Pour la génération des nouvelles fonctions pesantes, les fonctions de propagation incidente et réfléctive peuvent être définies dans le domaine fréquentiel comme suit:

$$\begin{cases} F_s(\omega) = V_s(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_s(\omega) \\ F_x(\omega) = V_x(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_x(\omega) \end{cases} \quad (3.8)$$

et

$$\begin{cases} B_s(\omega) = V_s(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_s(\omega) \\ B_x(\omega) = V_x(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_x(\omega) \end{cases} \quad (3.9)$$

En comparant les équations (3.8) et (3.9) avec la solution générale de la ligne dans le domaine de fréquence (équations (3.1) et (3.2)), on obtient:

$$B_s(\omega) = A_l(\omega) F_x(\omega) \quad (3.10)$$

et

$$B_x(\omega) = A_l(\omega) F_s(\omega) \quad (3.11)$$

où:

$$A_1(\omega) = e^{-\gamma(\omega)x} = \frac{1}{\text{Cosh}(\gamma(\omega)x) + \text{Sinh}(\gamma(\omega)x)} \quad (3.12)$$

La forme, dans domaine temporel des équations (3.10) et (3.11) est donnée par les intégrales de convolution, comme suit:

$$b_s(t) = \int_{\eta}^{\infty} f_x(t-u) a_1(u) du \quad (3.13)$$

et

$$b_x(t) = \int_{\eta}^{\infty} f_s(t-u) a_1(u) du \quad (3.14)$$

La limite inférieure de ces intégrales est η parce que $a_1(t)$ est égal à zéro pour $t < \eta$. Le délai η représente le temps de propagation de la composante de la fréquence la plus rapide. Dans la section suivante, un nouvel algorithme de localisation de défaut sera développé en appliquant ces équations et en n'utilisant que les données d'un côté de la ligne.

3.3 L'ALGORITHME DE LOCALISATION DE DÉFAUT

Dans cette section nous présentons une nouvelle méthode pour la localisation de défaut dans les lignes avec des paramètres dépendants de la fréquence. Pour trouver le lieu du défaut, nous nous basons sur les équations dérivées de la section précédente. Commenant avec le cas le plus simple, le court circuit triphasé. Ce court-circuit se produit au point F sur la ligne à une distance x de l'extrémité émettrice, nous pouvons écrire:

$$V_x(\omega) = \frac{B_x(\omega) + F_x(\omega)}{2} = 0 \rightarrow B_x(\omega) = -F_x(\omega) \quad \forall \omega \in \Omega \quad (3.15)$$

où Ω est la bande de fréquence à l'intérieure de laquelle les paramètres de la ligne ont été calculées. A partir de cette équation et des équations (3.10) et (3.11), nous avons:

$$e^{-\gamma(\omega)x} F_s(\omega) + e^{\gamma(\omega)x} B_s(\omega) = 0 \quad \forall \omega \in \Omega \quad (3.16)$$

Dans cette expression, il y a juste un paramètre inconnu x , la distance au défaut, et il y a un système d'équation, une équation pour chaque échantillon de la fréquence. Par conséquent, pour trouver la meilleure solution, on considère tous les échantillons et la méthode du Newton-Raphson associée à la technique d'estimation des moindres carrées est utilisée. Dans le cas général, cette équation peut être représentée par:

$$F(x) = 0 \quad (3.17)$$

où F est un vecteur avec une dimension est lié au nombre d'échantillons de la fréquence. Selon la méthode du Newton-Raphson nous pouvons écrire:

$$\left[\frac{\partial F}{\partial x} \right] \Delta x \cong - F(x) \quad (3.18)$$

En se basant sur la technique d'estimation des moindres carrées, nous avons:

$$\Delta x = - \left[\left[\frac{\partial F}{\partial x} \right]^T \left[\frac{\partial F}{\partial x} \right] \right]^{-1} \left[\frac{\partial F}{\partial x} \right]^T F(x) \quad (3.19)$$

où exponentiel T représente la transposé du vecteur. A l'aide de ces techniques on peut résoudre l'équation (3.16), menant ainsi à la localisation du défaut.

Maintenant, nous considérons le cas du court-circuit monophasé sans résistance de défaut. Supposons qu'un court-circuit dans la phase (a) se produit à la distance x de l'extrémité émettrice de la ligne. Nous pouvons écrire:

$$V_x^a(\omega) = 0 \quad (3.20)$$

En utilisant les composantes modales, nous avons:

$$V_x^{(0)}(\omega) + V_x^{(1)}(\omega) + V_x^{(2)}(\omega) = 0 \quad (3.21)$$

où les symboles exponentiels (0), (1) et (2) les modes représentent la terre et aérien respectivement. Selon les équations dérivées dans la section précédente, l'équation suivante est obtenue:

$$\frac{F_x^{(0)}(\omega) + B_x^{(0)}(\omega)}{2} + \frac{F_x^{(1)}(\omega) + B_x^{(1)}(\omega)}{2} + \frac{F_x^{(2)}(\omega) + B_x^{(2)}(\omega)}{2} = 0 \quad (3.22)$$

En appliquant les équations (3.10) et (3.11), nous avons:

$$e^{-\gamma^{(0)}(\omega) x} F_s^{(0)}(\omega) + e^{\gamma^{(0)}(\omega) x} B_s^{(0)}(\omega) + e^{-\gamma^{(1)}(\omega) x} F_s^{(1)}(\omega) + e^{\gamma^{(1)}(\omega) x} B_s^{(1)}(\omega) + e^{-\gamma^{(2)}(\omega) x} F_s^{(2)}(\omega) + e^{\gamma^{(2)}(\omega) x} B_s^{(2)}(\omega) = 0 \quad \forall \omega \in \Omega \quad (3.23)$$

Dans la même façon que précédemment, il y a juste une inconnue et N équations (N est le total nombre des échantillons de fréquence). Ainsi, la méthode de Newton-Raphson est appliquée pour trouver le lieu du défaut:

3.3.1 CONSIDÉRATION DE LA RÉSISTANCE DE DÉFAUT

Afin d'analyser ce cas considérons la Fig.3.3:

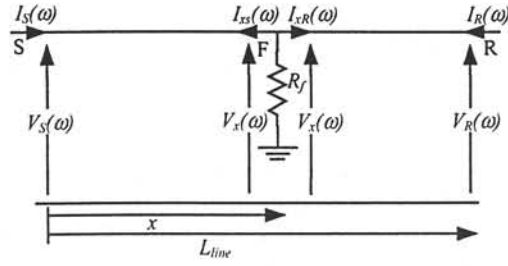


Fig.3.3: Système d'étude

Pour la première partie de la ligne (de l'extrémité émettrice au point de défaut), les équations suivantes sont dérivées:

$$\begin{cases} V_s(\omega) = \text{Cosh}(\gamma(\omega) x) V_x(\omega) - Z_c(\omega) \text{Sinh}(\gamma(\omega) x) I_{xs}(\omega) \\ I_s(\omega) = \frac{I}{Z_c(\omega)} \text{Sinh}(\gamma(\omega) x) V_x(\omega) - \text{Cosh}(\gamma(\omega) x) I_{xs}(\omega) \end{cases} \quad (3.24)$$

Dans la même façon que précédemment, les fonctions de propagation incidentes et réfléchies sont définies comme suit:

$$\begin{cases} F_s(\omega) = V_s(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_s(\omega) \\ F_{xs}(\omega) = V_x(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_{xs}(\omega) \end{cases} \quad \begin{cases} B_s(\omega) = V_s(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_s(\omega) \\ B_{xs}(\omega) = V_x(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_{xs}(\omega) \end{cases} \quad (3.25)$$

En comparant les équations (3.25) à (3.24), on arrive au résultat suivant:

$$\begin{cases} B_s(\omega) = A_I(\omega) F_{xs}(\omega) \\ B_{xs}(\omega) = A_I(\omega) F_s(\omega) \end{cases} \quad (3.26)$$

où:

$$A_I(\omega) = e^{-\gamma(\omega) x} = \frac{I}{\text{Cosh}(\gamma(\omega) x) + \text{Sinh}(\gamma(\omega) x)} \quad (3.27)$$

Des équations semblables peuvent être dérivées pour la deuxième partie de la ligne (du point de défaut à l'extrémité de réceptrice):

$$\begin{cases} V_x(\omega) = \text{Cosh}[\gamma(\omega) (L_{line} - x)] V_R(\omega) - Z_c(\omega) \text{Sinh}[\gamma(\omega) (L_{line} - x)] I_R(\omega) \\ I_{xR}(\omega) = \frac{I}{Z_c(\omega)} \text{Sinh}[\gamma(\omega) (L_{line} - x)] V_R(\omega) - \text{Cosh}[\gamma(\omega) (L_{line} - x)] I_R(\omega) \end{cases} \quad (3.28)$$

et:

$$\begin{cases} F_R(\omega) = V_R(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_R(\omega) \\ F_{xR}(\omega) = V_x(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_{xR}(\omega) \end{cases} \quad \begin{cases} B_R(\omega) = V_R(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_R(\omega) \\ B_{xR}(\omega) = V_x(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_{xR}(\omega) \end{cases} \quad (3.29)$$

En comparant les équations (3.29) avec (3.28), on arrive au résultat suivant:

$$\begin{cases} B_R(\omega) = A_3(\omega) F_{xR}(\omega) \\ B_{xR}(\omega) = A_3(\omega) F_R(\omega) \end{cases} \quad (3.30)$$

où:

$$A_3(\omega) = e^{-\gamma(\omega)(L_{\text{line}}-x)} = \frac{1}{\text{Cosh}[\gamma(\omega)(L_{\text{line}}-x)] + \text{Sinh}[\gamma(\omega)(L_{\text{line}}-x)]} \quad (3.31)$$

Si le court-circuit se produit avec une résistance R_f , nous pouvons écrire:

$$V_x(\omega) = -R_f [I_{xs}(\omega) + I_{xR}(\omega)] \quad (3.32)$$

Cette équation peut être réécrite en utilisant les conditions aux limites (émettrice – réceptrice) comme suit:

$$\frac{(1/A_1)B_s + A_1F_s}{2} = \frac{-R_f}{Z_{eq}(\omega)} \left[\frac{(1/A_1)B_s - A_1F_s}{2} + \frac{(1/A_3)B_R - A_3F_R}{2} \right] \quad (3.33)$$

En raison de la continuité de la tension à la position du défaut, nous avons:

$$V_x(\omega) = \frac{(1/A_1)B_s + A_1F_s}{2} = \frac{(1/A_3)B_R + A_3F_R}{2} = V_x(\omega) \quad (3.34)$$

L'utilisation des équations (3.33) et (3.34), mène à:

$$\begin{aligned} F_R(\omega) &= \frac{1}{2A_3} \left\{ \left(2 + \frac{Z_{eq}(\omega)}{R_f} \right) \frac{1}{A_1} B_s(\omega) + \frac{Z_{eq}(\omega)}{R_f} A_1 F_s(\omega) \right\} \\ B_R(\omega) &= \frac{A_3}{2} \left\{ -\frac{Z_{eq}(\omega)}{R_f} \frac{1}{A_1} B_s(\omega) + \left(2 - \frac{Z_{eq}(\omega)}{R_f} \right) A_1 F_s(\omega) \right\} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Les équations ci-dessus sont valables pour chaque échantillon de la fréquence. Nous supposons que seuls les données de l'extrémité émettrice sont accessibles. Ainsi s'il y a N échantillons de la fréquence, nous aurons $2N$ équations et $2N+2$ inconnus. Les inconnus sont $I_R(\omega)$, $V_R(\omega)$, x et R_f . Pour résoudre ces équations pour x , nous devons prendre l'autre hypothèse. Pendant les premiers cycles après qu'un défaut se produit, l'extrémité réceptrice de la ligne peut être représentée par l'équivalent de Thevinin c.-à-d. une tension constante derrière l'impédance sub-transitoire. Ce modèle sera employé pour décrire l'extrémité réceptrice pendant le défaut. Selon cette hypothèse, nous pouvons écrire:

$$V_R(\omega) = f(E_R(\omega), I_R(\omega)) \quad (3.36)$$

où $E_R(\omega)$ est la tension du circuit ouvert à l'extrémité réceptrice. Maintenant nous avons $3N$ équations et les $2N+2$ inconnus peuvent être ainsi calculés. L'annulation $I_R(\omega)$ et de $V_R(\omega)$ entre ces équations mène à:

$$F(x, R_f, \omega) = 0 \quad (3.37)$$

Dans cette condition, nous avons deux paramètres inconnus, la distance de défaut x et la résistance de défaut R_f . Pour trouver ces deux inconnues, nous pouvons utiliser la combinaison de la méthode du Newton-Raphson et de la technique d'estimation des moindres carrés. Dans la section suivante les performances des algorithmes proposés seront évaluées.

3.4 ÉVALUATION DE L'ALGORITHME

Pour l'évaluation d'exécution de l'algorithme, une ligne de transport de 500 kV, 138 milles est utilisée. Un court circuit monophasé se produit en un point arbitraire F à une distance x de l'extrémité émettrice. Pour $x = 100$ milles et $R_f = 50 \Omega$, la tension et le courant de la phase (a) de l'extrémité émettrice sont montrés dans les Figs.3.3 et 3.4 respectivement. On a assumé que l'angle de commencement de défaut est égal à 90 degrés. Dans ces figures les résultats comparatifs du modèle de ligne avec les paramètres constants et du modèle de ligne avec les paramètres dépendants de la fréquence sont montrés.

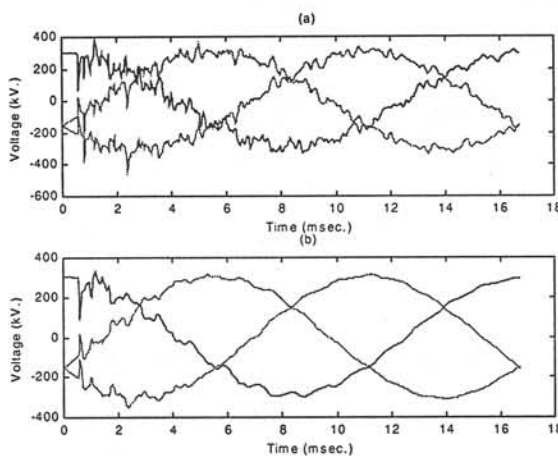


Fig.3.3. Les tensions de l'extrémité émettrice
a) Paramètres constants b) Paramètres dépendants de la fréquence

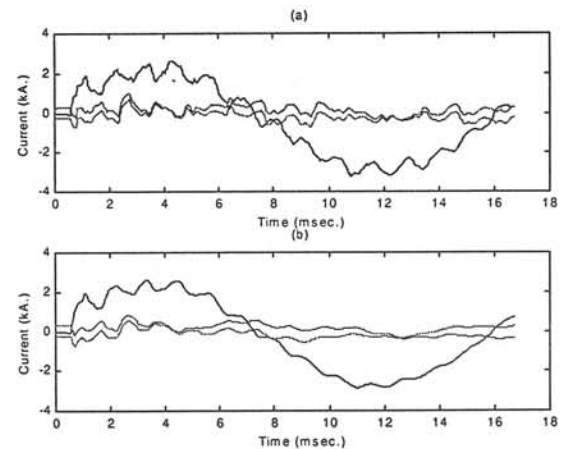


Fig.3.4. Les courants de l'extrémité émettrice
a) Paramètres constants b) Paramètres dépendants de la fréquence

Selon ces figures, on constate que quand le modèle avec les paramètres constants est utilisé une exagération des harmoniques se produit dans les signaux.

D'une façon générale, la convergence de la méthode de Newton-Raphson est obtenue en moins de dix itérations. La trajectoire de convergence pour trois valeurs initiales différentes de x (0, 50 et 138 milles) est montrée dans la Fig.3.5. Comme on le voit dans cette figure, la valeur estimée de la distance au défaut est approximativement de 100.386 milles.

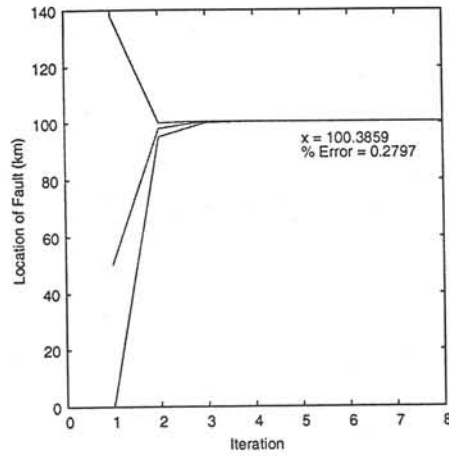


Fig.3.5. Caractéristique de convergence

Afin d'analyser la précision de l'algorithme pour différentes conditions de défaut, nous avons réalisé les essais pour de divers angles de commencement de défaut et pour différents points de défaut. Certains des résultats sont récapitulés dans les tableaux 3.1 et 3.2. Le premier tableau correspond à la résistance de défaut égale à zéro, alors que le second, contient les résultats correspondant à une résistance de défaut de 50 Ω.

Tableau 3.1: Localisation de défaut estimée pour une résistance de défaut égale à zéro

Localisation de défaut (mile)	50		80		100	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°
L'angle de commencement de défaut						
Le modèle avec les paramètres dépendants de la fréquence	50.355 (0.26%)	50.324 (0.24%)	80.538 (0.39%)	80.321 (0.23%)	100.906 (0.66%)	100.373 (0.27%)
Le modèle avec les paramètres constants	51.707 (1.24%)	54.749 (3.44%)	83.644 (2.64%)	83.644 (2.64%)	106.457 (4.68%)	103.415 (2.47%)

Tableau 3.2: Localisation de défaut estimée pour une résistance de défaut égale à 50 Ω

Localisation de défaut (mile)	50		80		100	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°
L'angle de commencement de défaut						
Le modèle avec les paramètres dépendants de la fréquence	50.482 (0.35%)	50.405 (0.29%)	80.792 (0.57%)	80.434 (0.32%)	101.328 (0.96%)	100.386 (-0.8%)
Le modèle avec les paramètres constants	57.791 (5.66%)	54.749 (3.44%)	91.248 (8.15%)	86.686 (4.84%)	114.661 (10.2%)	95.621 (-3.2%)

Selon ces tableaux, il est clair que le modèle exact de la ligne mène à des résultats plus précis.

3.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouvel algorithme basé sur le modèle de ligne avec des paramètres dépendants de la fréquence pour la localisation de défaut dans les lignes de transport d'énergie. Dans la méthode proposée, les techniques de Newton-Raphson et d'estimation des moindres carrées sont utilisées pour résoudre les équations non linéaires. Les simulations prouvent que l'algorithme est capable de déterminer le lieu du défaut avec une précision élevée dans presque toutes les conditions, y compris pour différents angles de commencement de défaut, différentes résistances de défaut et différents points de défaut.

CHAPITRE 4:

LOCALISATION DE DÉFAUT DANS LES LIGNES DE TRANSMISSION COMPORTANT UNE COMPENSATION SÉRIE

4.1 INTRODUCTION

Le condensateur série (SC) est largement utilisé dans les lignes longues pour améliorer la capacité de transfert de puissance. Une des considérations principales dans la conception et l'application des condensateurs série est leur protection contre les surtensions. Dans les installations modernes, le procédé traditionnel consistant à fermer l'interrupteur parallèle et mettre le condensateur série hors tension pour éviter la surtension est remplacé par la Varistance d'Oxyde du Métal (MOV) protection. Cependant, la protection et la localisation du défaut dans les systèmes ayant des lignes compensées série sont considérées comme des tâches très difficiles pour les constructeurs de relais et les opérateurs de réseau des ingénieurs d'entreprises. Le problème provient principalement de la protection MOV mise en parallèle avec le condensateur. Les condensateurs série ainsi que leurs MOVs créent un circuit non-linéaire dépendant du courant. Ce circuit non-linéaire doit être pris en considération dans l'algorithme de localisation de défaut.

Dans ce chapitre, nous présentons deux algorithmes nouveaux et précis de localisation de défaut pour les lignes de transmission compensées série. Le modèle de ligne est basé sur les équations différentielles. Le premier algorithme a besoin des échantillons de la tension et du courant d'une extrémité. Cet algorithme n'exige pas le filtrage des composantes de courant continu (DC) et des composantes hautes fréquence. L'idée de l'algorithme présenté est que le profil de tension a un minimum au point de défaut. Donc la comparaison des valeurs de profil de tension en différents points de la ligne peut aider à trouver la localisation du défaut.

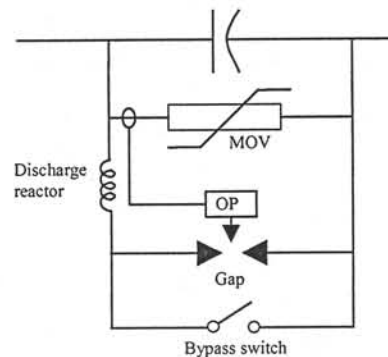
Dans le deuxième algorithme, des échantillons de la tension et du courant aux deux extrémités de la ligne sont pris synchroniquement et sont employés pour estimer le lieu du défaut. La protection du condensateur série (MOV) contre les surtensions est prise en considération. L'algorithme proposé pour la localisation du défaut se compose de deux routines. L'un est pour des défauts en amont du condensateur série et l'autre pour des

défauts en aval du condensateur série. En appliquant ces deux routines, deux solutions sont obtenues pour le point de défaut. Par la suite, un procédé spécial pour choisir la solution correcte est utilisé.

4.2 MODÈLE DE CONDENSATEUR SÉRIE / MOV

La performance de la localisation de défaut et de la protection des lignes compensées série dépend fortement de la protection de surtension du condensateur série. Ces dernières années, les installations de condensateur série ont utilisé des MOVs comme protection principale du condensateur. La Fig.4.1 représente schématiquement la configuration d'une installation typique d'un condensateur série.

Avec un court circuit sur la ligne, la tension aux bornes du condensateur est montée à des valeurs extrêmement élevées. Les MOVs, dans ce cas, limiteront la tension à un certain niveau qu'on peut déterminer, en général égale à 2 pu, où 1 pu est la tension aux bornes du condensateur quand le courant qui le traverse est nominal.



OP = protection de surcharge

Fig.4.1: Schéma de protection du condensateur

La caractéristique V-I d'un MOV peut être représentée approximativement par le modèle en exponentiel ci-dessous [23,33]:

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad (4.1)$$

où p est la référence du courant et q l'exponentiel.

Le MOV est un dispositif résistif qui absorbe l'énergie. Il faut le protéger contre la surchauffe par une protection de surcharge. La protection de surcharge calcule l'énergie absorbée par le MOV et ferme l'interrupteur en parallèle (mettant hors circuit le MOV)

quand l'énergie absorbée dépasse une limite prédéterminée. Dans certains cas, l'arrangement parallèle d'un condensateur série et son MOV est représenté par une résistance et une réactance équivalente connectée en série. La technique d'équivalence suppose que les phaseurs de fréquence fondamentale dans l'arrangement initial et dans le branchement équivalent s'assortissent [33]. Il faut bien noter que les valeurs de la résistance et de la réactance dépendent de l'amplitude du courant traversant le dispositif. La connexion série équivalente $Z_{cMOV} = R_{cMOV} + j X_{cMOV}$ est donnée par [33]:

$$\begin{cases} R_{cMOV} = X_c (0.0745 + 0.49 e^{-0.243 I_{pu}} - 35.0 e^{-5.0 I_{pu}} - 0.6 e^{-1.4 I_{pu}}) \\ X_{cMOV} = X_c (0.1010 - 0.005749 I_{pu} + 2.088 e^{-0.8566 I_{pu}}) \end{cases} \quad (4.2)$$

Les équations s'appliquent seulement quand le courant du condensateur excède 98% du courant de niveau protecteur. Autrement dit, $R_{cMOV} = 0$ et $X_{cMOV} = X_c$. En outre quand la protection de surcharge fonctionne, le condensateur est mis hors circuit et $R_{cMOV} = X_{cMOV} = 0$.

Dans ce chapitre, le modèle linéaire du condensateur série / MOV est pris en compte.

4.3 LES ALGORITHMES PROPOSÉS

4.3.1 PREMIER ALGORITHME

4.3.1.1 Modèle Mathématique et Méthode de Résolution

Le modèle triphasé de la ligne se caractérise par l'ensemble d'équations partielles hyperboliques suivant:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + L_l \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial t} = - R_l \mathbf{i} \\ C_l \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

où R_l , L_l et C_l sont des matrices 3×3 de résistance, d'inductance et de capacité (par unité de longueur de la ligne) respectivement; \mathbf{v} et \mathbf{i} sont des vecteurs colonnes de troisième ordre représentant des tensions et des courants. L'équation (4.3) est résolue en deux étapes: tout d'abord les matrices seront diagonalisées en appliquant le concept de l'analyse modale, ensuite les équations composantes résultantes sont résolues par la méthode de caractéristique [21].

4.3.1.2 Transformation de la Référence de Phase à la Référence Modal

Les matrices de transformation M_1 et M_2 sont déterminées à partir d'une solution du problème de valeur propre sur le produit $L_1 C_1$. M_1 est une matrice dont les éléments sont les vecteurs propres de $L_1 C_1$, et M_2 est l'inverse de la transposée de M_1 ($M_2 = (M_1^T)^{-1}$). M_1 et M_2 sont utilisées pour transformer les variables dans l'équation (4.3) du domaine de phase au domaine modal comme suit:

$$\begin{aligned} v^{(m)} &= M_1^{-1} v & i^{(m)} &= M_2^{-1} i \\ R^{(m)} &= M_1^{-1} R_1 M_2 & L^{(m)} &= M_1^{-1} L_1 M_2 & C^{(m)} &= M_2^{-1} C_1 M_1 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dans les équations ci-dessus le symbole (m) représente la composante modale. En remplaçant R_l , L_l , C_l , v et i de l'équation (4.3) par leurs équivalents modaux définis dans l'équation (4.4), nous obtenons:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1 & 0 \\ 0 & 0 & l_2 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & 0 \\ 0 & 0 & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} c_0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & c_2 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.5)$$

Sur l'expansion, équation (4.5) rapportera trois paires d'équations indépendantes de la forme suivante:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_k}{\partial x} + l_k \frac{\partial i_k}{\partial t} = -r_k i_k \\ c_k \frac{\partial v_k}{\partial t} + \frac{\partial i_k}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad k = 0, 1, 2 \quad (4.6)$$

L'équation (4.6) se rapporte à un mode unitaire et est semblable au modèle de ligne monophasé. Cette équation est résolue par la méthode caractéristique qui est décrite dans la référence [21]. Quand les trois paires d'équations sont résolues, les tensions et les courants de phase peuvent être obtenus à l'aide de la transformation du domaine modal au domaine de phase:

$$\begin{aligned} v &= M_1 v^{(m)} \\ i &= M_2 i^{(m)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Par conséquent, en résolvant l'équation (4.6) avec les données du défaut (c.-à-d. les tensions et les courants de l'extrémité émettrice), comme conditions aux limites, les tensions et les courants après commencement du défaut sur la ligne de l'extrémité émettrice

au premier nœud du condensateur série (c.-à-d. nœud BC₁ de la Fig.4.2) peuvent être obtenus. Ensuite en appliquant le modèle du condensateur série / MOV, les tensions de l'autre nœud du condensateur série sont calculées (nœud BC₂). Pour les autres parties de la ligne (du milieu de la ligne au nœud extrémité), un procédé semblable avec des données modifiées pour trouver les tensions et des courants sur la ligne est utilisé. Avec ce procédé, le profil de la tension après commencement de défaut peut être obtenu le long de la ligne.

4.3.1.3 Critères pour la Localisation de Défaut

Les critères pour la localisation de défaut proviennent d'une des deux fonctions de base impliquant la valeur absolue de la tension ou le rapport des valeurs absolues de la tension et du courant. La sélection de ces fonctions est basée sur le fait qu'au point de défaut, le profil de tension devrait être un minimum et le courant de la ligne serait grand. Alors nous prévoyons que la minimisation de ces fonctions mène au point de défaut. Les critères utilisés pour la localisation de défaut sont comme suit:

$$J_1(x) = \frac{1}{T} \int_0^T |v_x(t)| dt \quad (4.8)$$

$$J_2(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{v_x(t)}{i_x(t)} \right| dt \quad (4.9)$$

où T est la longueur de la fenêtre de l'enregistrement. Pour calculer les intégrales ci-dessus, la méthode d'intégration trapézoïdale est utilisée.

4.3.1.4 RESULTATS D'ESSAIS

Afin d'étudier la précision de l'algorithme proposé, les résultats des simulations sont présentés. La Fig.4.2 représente une ligne triphasée 400 kV, 300 km avec un compensateur série.

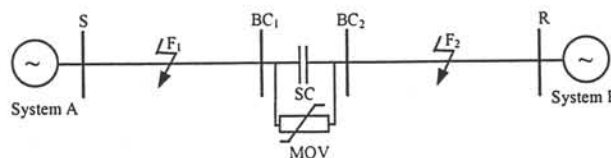


Fig.4.2: La ligne de transmission avec la compensation série

Un court circuit monophasé se produit en un point arbitraire F à une distance x de l'extrémité émettrice. Pour x égal à 100 kilomètres, les tensions et les courants à l'extrémité émettrice et les courants du MOV sont illustrés dans les Figs.4.3-4.5 respectivement. Pour

ce cas, on a assumé que l'angle de commencement de défaut est de zéro degré. Pour cette condition, la fonction de critère en fonction de la distance est montrée sur la Fig.4.6. Le minimum de cette fonction de critère détermine la localisation de défaut. Pour le calcul de la fonction de critère, seule une moitié de cycle des échantillons de la tension et du courant après commencement de défaut prélevées à l'extrémité émettrice de la ligne sont utilisés. Ces données n'exigent pas le filtrage des composantes de courant continu (DC) et celles des hautes fréquences. Comme on l'a vu dans la Fig.4.6, le résultat est très bon en dépit de la valeur importante la composante continue (DC) dans le signal de courant comme on le voit sur la Fig.4.4.

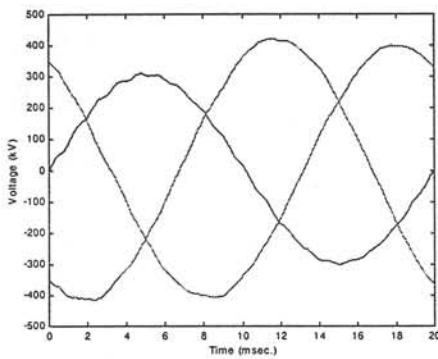


Fig.4.3: Les tensions de l'extrémité émettrice – défaut à 100 km

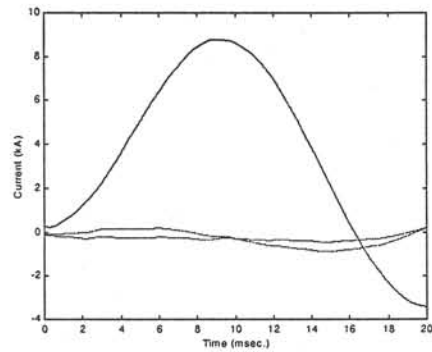


Fig.4.4: Les courants de l'extrémité émettrice – défaut à 100 km

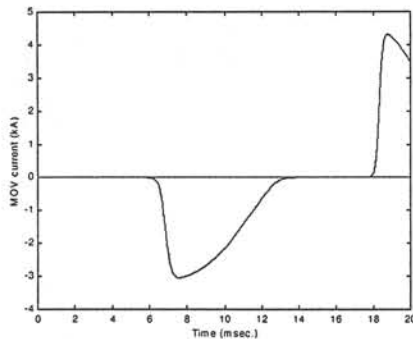


Fig.4.5: Les courant de MOV

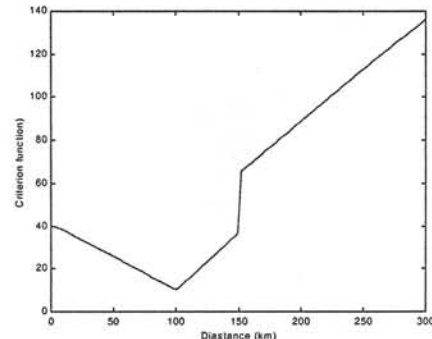


Fig.4.6: La fonction de critère pour le défaut à 100km et l'angle de commencement de défaut est zéro ($x = 99.7125$, Erreur= $-.0958\%$)

Afin d'étudier la précision de l'algorithme proposé pour différentes situations de défaut, des essais avec de divers angles de commencement de défaut et différents lieux de défaut ont été réalisés. Par exemple, des fonctions de critère pour un court circuit monophasé à 200 km sont illustrées dans les Figs.4.7 et 4.8. Dans la Fig.4.7, l'angle de commencement de défaut est de zéro degré tandis que dans la Fig.4.8 il est de 90 degrés.

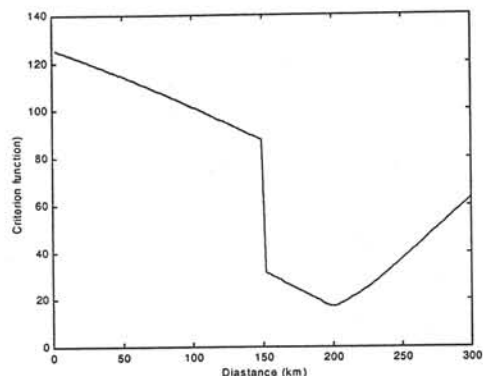


Fig.4.7: La fonction de critère pour le défaut à 200 km et l'angle de commencement de défaut est égal à zéro degré
($x = 199.425$, Erreur = -0.1917%)

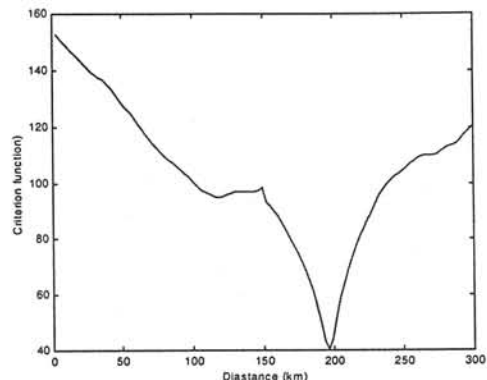


Fig.4.8: La fonction de critère pour le défaut à 200 km et l'angle de commencement de défaut est égal à 90 degrés
($x = 196.6552$, Erreur = -1.1149%)

D'autres résultats sont montrés dans les tableaux 4.1 et 4.2. Le premier tableau correspond au court circuit monophasé sur la phase (*a*) et l'autre correspond à court circuit biphasé. Les résultats indiquent que l'erreur est plutôt petite pour presque tous les cas, particulièrement dans les cas de court circuit biphasé

Tableau 4.1: Résultats pour le court circuit monophasé pour différents lieux de défauts

		100 (km)	200 (km)	250 (km)	300 (km)
L'angle de commencement de défaut est zéro	Estimé (km)	99.7125	199.4250	249.2813	299.1375
	Erreur (%)	-0.0958	-0.1917	-0.2396	-0.2875
L'angle de commencement de défaut est 90	Estimé (km)	96.9427	196.6552	246.5115	296.3677
	Erreur (%)	-1.0191	-1.1149	-1.1628	-1.2108

Tableau 4.2: Résultats pour le court circuit monophasé pour différents lieux de défauts

		100 (km)	200 (km)	250 (km)	300 (km)
L'angle de commencement de défaut est zéro	Estimé (km)	99.7125	199.4250	249.2813	299.1375
	Erreur (%)	-0.0958	-0.1917	-0.2396	-0.2875
L'angle de commencement de défaut est 90	Estimé (km)	99.7125	199.4250	249.2813	299.1375
	Erreur (%)	-0.0958	-0.1917	-0.2396	-0.2875

4.3.2 DEUXIÈME ALGORITHME

4.3.2.1.1 Modélisation de Ligne et Méthode de Localisation de Défaut pour Deux Extrémité

Un modèle équivalent monophasé d'une ligne avec des paramètres distribués est montré sur la Fig.4.9.

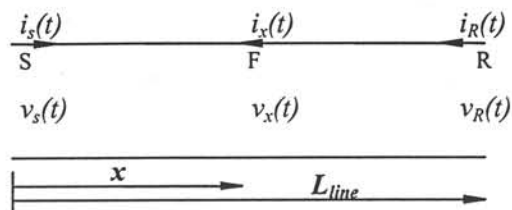


Fig.4.9: Ligne de transmission avec les paramètres répartis

Dans cette figure S et R représentent respectivement les extrémités émettrice et réceptrice de la ligne, F est pris comme un point arbitraire à une distance x ($x \leq L_{line}$) de S sur la ligne. Le modèle distribué [28] du segment SF est montré sur la Fig.4.10.

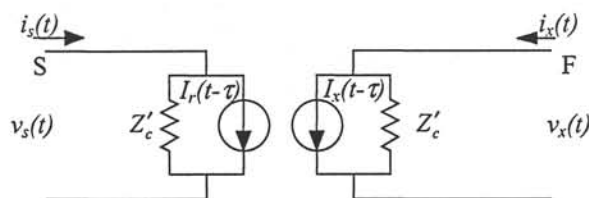


Fig.4.10: Le modèle distribué du segment SF

A partir de cette figure, les équations suivantes peuvent être dérivées:

$$i_s(t) = \frac{1}{Z'_c} v_s(t) + I_r(t - \tau) \quad (4.10)$$

$$i_x(t) = \frac{1}{Z'_c} v_x(t) + I_x(t - \tau) \quad (4.11)$$

Dans ces équations les sources de courants c.-à-d. I_r et I_x sont définies comme:

$$I_r(t - \tau) = \frac{-R'/4}{Z'_c} [v_s(t - \tau) + Z'_c i_s(t - \tau)] - \frac{Z_c}{Z_c'^2} [v_x(t - \tau) + Z_c'' i_x(t - \tau)] \quad (4.12)$$

$$I_x(t - \tau) = \frac{-R'/4}{Z_c'^2} [v_x(t - \tau) + Z_c'' i_x(t - \tau)] - \frac{Z_c}{Z_c'^2} [v_s(t - \tau) + Z_c'' i_s(t - \tau)] \quad (4.13)$$

où:

τ = Le temps de la propagation d'onde de S à F

Z_c = Impédance caractéristique

R' = Résistance de ligne de S à F

$$Z'_c = Z_c + R'/4 \quad Z''_c = Z_c - R'/4$$

En annulant le courant i_x de (4.10)-(4.13), nous obtenons:

$$v_x(t) = (Z_c'^2 [v_s(t+\tau) - Z'_c i_s(t+\tau)] + Z_c^2 [v_s(t-\tau) + Z_c'' i_s(t-\tau)] - \frac{Z'_c R'}{4} \left[\frac{R'/2}{Z'_c} v_s(t) + 2Z_c'' i_s(t) \right]) / 2Z_c^2 \quad (4.14)$$

En procédant de la même manière, la tension du point de défaut en fonction de la tension et du courant de l'extrémité réceptrice peut être obtenue, comme suit:

$$v_x(t) = (Z_{rc}'^2 [v_R(t+T-\tau) - Z'_{rc} i_R(t+T-\tau)] + Z_{rc}''^2 [v_R(t-T+\tau) + Z''_{rc} i_R(t-T+\tau)] - \frac{Z'_{rc} R'_r}{4} \left[\frac{R'_r/2}{Z'_{rc}} v_R(t) + 2Z_{rc}'' i_R(t) \right]) / 2Z_c^2 \quad (4.15)$$

où:

T = Le temps de la propagation d'onde de S à R

R'_r = Résistance de ligne de F à R

$$Z'_{rc} = Z_c + R'_r/4 \quad Z''_{rc} = Z_c - R'_r/4$$

En raison de la continuité de la tension sur la ligne, les équations (4.14) et (4.15) peuvent être combinées pour mener à:

$$F(v_s, i_s, v_R, i_R, t, \tau) = 0 \quad (4.16)$$

La distance au point de défaut x , n'apparaît pas explicitement dans l'équation (4.16) et est cachée dans le temps de propagation d'onde τ . En outre, τ n'apparaît pas comme variable dans l'équation (4.16), mais comme valeur de laquelle, la tension et le courant dépendent. Pour trouver la localisation du défaut, on décritise d'abord cette équation et ensuite on résout le problème d'optimisation suivant:

$$\underset{m}{\text{Min}} J(m) = \underset{m}{\text{Min}} \sum_k F^2(v_s, i_s, v_R, i_R, k, m) \quad (4.17)$$

où:

$$m \Delta t = \tau,$$

$$k \Delta t = t$$

$$\Delta t = \text{pas d'échantillonnage},$$

$$m, k = \text{nombre entiers arbitraires}$$

4.3.2.1.2 Calcul de la Résistance de Défaut

L'algorithme proposé pour la localisation de défaut pour chaque partie de la ligne (en amont et en aval de compensateur série) est indépendant de la résistance de défaut, mais il faut la calculer pour déterminer la section de défaut. Après le calcul de la position de

défaut, un problème d'estimation des moindres carrés est résolu pour trouver la résistance de défaut. Pour un défaut symétrique avec la résistance R_f , nous pouvons écrire:

$$v_x(t) = -R_f (i_{xs}(t) + i_{xr}(t)) \quad (4.18)$$

Le courant de défaut se compose de i_{xs} et i_{xr} , qui sont fournis à partir du nœud S et du nœud R respectivement. Selon (4.10)-(4.13):

$$i_{xs}(t) = (Z'_c [v_s(t+\tau) - Z'_c i_s(t+\tau)] - Z''_c [v_s(t-\tau) + Z''_c i_s(t-\tau)] - \frac{R'}{4} [2v_s(t) - \frac{R'}{2} i_s(t)]) / 2Z_c^2 \quad (4.19)$$

et de la même façon:

$$i_{xr}(t) = (Z'_{rc} [v_R(t+T-\tau) - Z'_{rc} i_R(t+T-\tau)] - Z''_{rc} [v_R(t-T+\tau) + Z''_{rc} i_R(t-T+\tau)] - \frac{R'_r}{4} [2v_R(t) - \frac{R'_r}{2} i_R(t)]) / 2Z_c^2 \quad (4.20)$$

En substituant les équations (4.14), (4.19) et (4.20) dans l'équation (4.18) nous obtenons:

$$A R_f = B \quad (4.21)$$

A et B sont des vecteurs colons qui dépendent des échantillons de la tension et du courant des deux extrémités de la ligne. Pour trouver R_f , la méthode d'estimation des moindres carrés peut être employée en utilisant la formulation suivante:

$$R_f = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (4.22)$$

où T représente la transposé du vecteur.

Le procédé ci-dessus est présenté pour les défauts symétriques, mais il peut être étendu aux cas asymétriques en utilisant le concept de la transformation modale.

4.3.2.2 L'algorithme de Localisation de Défaut pour une Ligne Comportant une Compensation Série

Pour résoudre le problème de la localisation de défaut pour les lignes compensées série, la position de défaut en ce qui concerne la position du condensateur série devrait être déterminée à l'avance. Par conséquent, l'algorithme proposé considère deux points de défaut (Fig.4.2):

♦ défaut en aval du condensateur série (F1) ♦ défaut en amont du condensateur série (F2).

Ceci mène à deux routines dans l'algorithme de localisation de défaut. En appliquant ces routines, deux solutions pour la localisation du défaut sont obtenues. Puis un procédé spécial pour choisir la solution correcte est utilisé.

4.3.2.2.1 Routine 1: Défaut en Aval du Condensateur Série

Pour appliquer le procédé qui a été expliqué dans la section A, l'accès aux données des deux nœuds c.-à-d. S et BC₁ (Fig.4.2), est nécessaire. Ayant les données du nœud S, le calcul des tensions et des courants au nœud BC₁ est présenté comme suit. En considérant les données de défaut (les tensions et les courants de l'extrémité réceptrice R), comme des conditions aux limites dans l'équation (4.6), les tensions et les courants après l'occurrence du défaut sur la ligne entre les nœuds R et BC₂ sont calculés. Ensuite, en utilisant le modèle du condensateur série / MOV, les tensions de l'autre nœud du condensateur série (c.-à-d. BC₁) peuvent être déterminées. Maintenant, ces valeurs (les tensions et les courants au nœud BC₁), avec les données de l'extrémité émettrice (c.-à-d. v_s et i_s) sont employées pour résoudre le problème d'optimisation décrit par l'équation (4.17). Après détermination du point de défaut, l'équation (4.22) est utilisée pour le calcul de la résistance de défaut. En conclusion, la première routine offre la solution (x_1 , R_{f1}) pour un défaut en aval du condensateur série.

4.3.2.2.2 Routine 2: Défaut en Amont du Condensateur Série

Le procédé est presque semblable au cas précédent. Dans ce cas, la solution de l'équation (4.6) en considérant avec les données du défaut (c.-à-d. les tensions et les courants de l'extrémité émettrice S) comme des conditions aux limites, les tensions et les courants après l'occurrence du défaut sur la ligne entre les nœuds S et BC₁ sont calculés. Puis en appliquant le modèle du condensateur série / MOV, les tensions de l'autre nœud de condensateur série (c.-à-d. BC₂) sont déterminées. Maintenant, ces valeurs (les tensions et les courants au nœud BC₂), avec les données de l'extrémité de réception (c.-à-d. v_R et i_R) sont employées pour résoudre le problème d'optimisation décrit par l'équation (4.17). Après détermination du point de défaut, l'équation (4.22) est appliquée pour le calcul de la résistance de défaut. Ainsi, la deuxième routine offre la solution (x_2 , R_{f2}) pour un défaut en amont du condensateur série.

4.3.2.2.3 L'Algorithme de Choix

La localisation d'un défaut par rapport au lieu du condensateurs série dans le système de la Fig.4.2 est un problème séparé qui est étudié dans la référence [34]. Cependant, ce

problème est réduit à la sélection de la paire correcte (x, R_f) de deux solutions (x_1, R_{f1}) et (x_2, R_{f2}) . L'algorithme simple qui fonctionne dans les la plupart des cas est décrit comme [24]:

si x_1 est dans $[0, L_{cap}]$ et x_2 est hors de $[L_{cap}, L_{line}]$ alors

acceptez (x_1, R_{f1}) comme une solution **sinon**

si x_1 est hors de $[0, L_{cap}]$ et x_2 est dans $[L_{cap}, L_{line}]$ alors

acceptez (x_2, R_{f2}) comme une solution **sinon**

sélectionnez l'alternative avec inférieur R_f comme une solution.

où L_{cap} est la distance du condensateur série au nœud émettrice.

4.3.2.3 EVALUATION DE PERFORMANCE

Afin d'évaluer la précision de l'algorithme proposé, les résultats des simulations sont présentés dans cette section. La Fig.4.2 montre une ligne triphasée 400 kV, 300 km avec une compensation séries. Le condensateur série est installé au milieu de la ligne. Un défaut monophasé (SLG) sur la phase (a) se produit en un point arbitraire à une distance x de l'extrémité émettrice. Pour x est égal à 100 km, en aval du compensateur série, les tensions et les courants aux extrémités émettrice et réceptrice sont montrés dans les Figs.4.11 et 4.12 respectivement. Pour ce cas, on a assumé que l'angle de commencement de défaut est de zéro degré et la résistance de défaut est de 50 Ω . Après le calcul des tensions et des courants, le problème d'optimisation est résolu, selon le procède de la section précédente. La fonction de critère J , qui est définie dans l'équation (4.17), est calculée pour les deux cas considérés, un pour le défaut en aval du compensateur série et l'autre pour le défaut en amont du compensateur série. Ces deux fonctions sont tracées dans la Fig.4.13. Pour calculer la distance de défaut, seule une moitié de cycle des échantillons de la tension et du courant après occurrence de défaut prélevée aux deux extrémités de la ligne, sont appliqués.

Pour ce cas, la premier routine estime:

- ◆ Distance de défaut 99.7125 (km)
- ◆ Résistance de défaut 50.0706 (Ω)

la deuxième routine estime:

- ◆ Distance de défaut 150.4312 (km)
- ◆ Résistance de défaut 73.8561 (Ω)

En appliquant la procédure du choix, l'algorithme de localisation de défaut donne l'évaluation de la distance comme étant de 99.7125 km avec une résistance de défaut de 50.0706 Ω . L'erreur de localisation est d'environ 0.0958% tandis que l'estimation de la résistance de défaut reflète la valeur réelle.

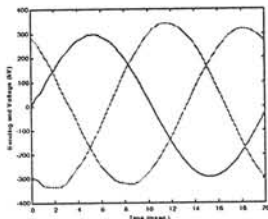


Fig.4.11-a: Les tensions de l'extrémité émettrice

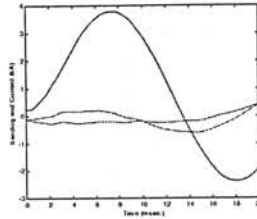


Fig.4.11-b: Les courants de l'extrémité émettrice

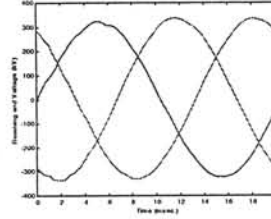


Fig.4.12-a: Les tensions de l'extrémité de réception

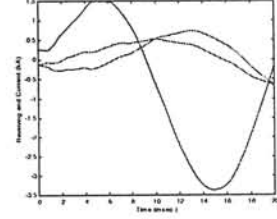


Fig.4.12-b: Les courants de l'extrémité de réception

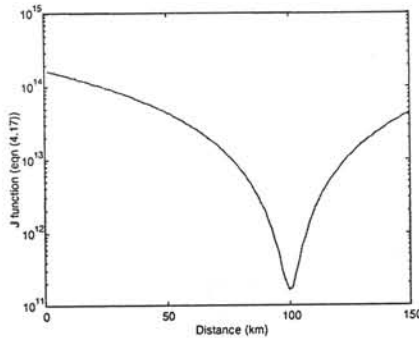


Fig.4.13-a: Fonction de critère J (équation (4.17)), sous-routine 1

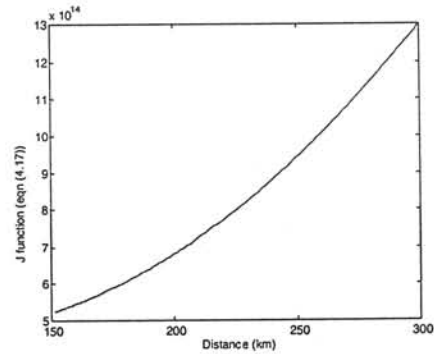


Fig.4.13-b: Fonction de critère J (équation (4.17)), sous-routine 2

Pour évaluer la précision de calcul de distance de défaut, l'algorithme proposé a été testé pour une grande variété de conditions de défaut. Certains des résultats sont récapitulés dans le tableau 4.3. On assume que la résistance de défaut est de 10 Ω . D'après les résultats de ce tableau, on peut constater que l'erreur est très petite dans presque tous les cas, c.-à-d. l'erreur reste inférieure à 0.5%. En outre, la variation de l'angle de commencement de défaut n'a pas beaucoup d'influence sur la précision de l'algorithme.

Tableau 4.3: Distance et résistance estimés de défaut pour $R_f = 10 \Omega$

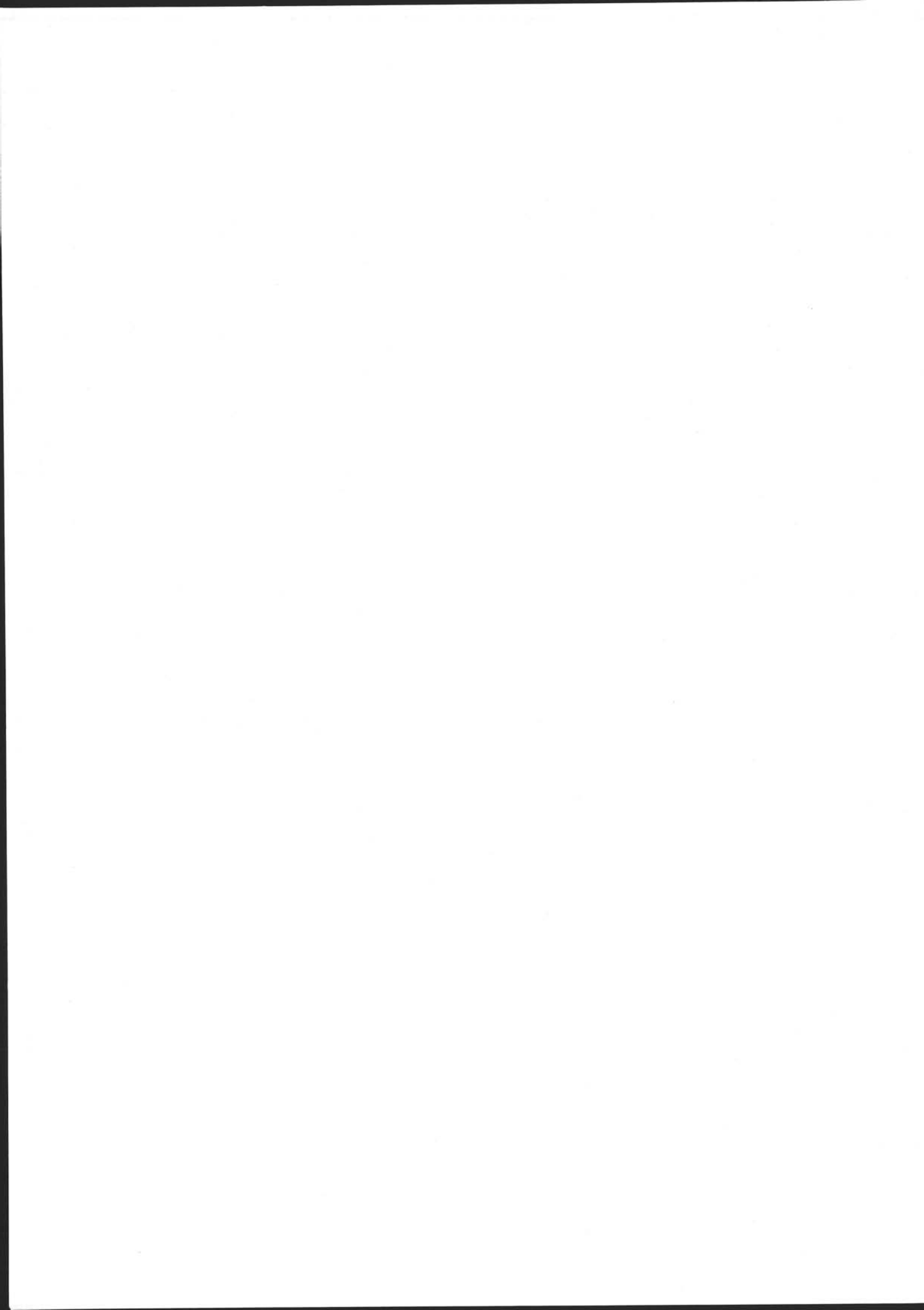
Localisation de défaut (km)	L'angle de commencement de défaut égale à zéro degré		L'angle de commencement de défaut égale à 90 degrés	
	Estimé (km)	Résistance (Ω)	Estimé (km)	Résistance (Ω)
50	49.8563	10.0590	49.8563	10.0622
100	99.7125	10.0858	99.7125	10.0714
140	141.2594	9.7368	139.8745	10.0753
145	145.4141	9.9504	145.4141	9.9621
155	154.5859	9.9504	154.5859	9.9621
160	158.7406	9.7368	160.1255	10.0753
200	200.2875	10.0858	200.2875	10.0714
250	250.1437	10.0590	250.1437	10.0622

4.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, deux nouveaux algorithmes de localisation de défaut pour les lignes comportant de la compensation série sont proposés. Les techniques développées utilisent seulement une moitié de cycle des échantillons de la tension et du courant après occurrence de défaut. Dans le premier algorithme, la tension et le courant d'une extrémité de la ligne sont utilisés tandis que dans le deuxième algorithme, les échantillons de tensions et de courants pris synchroniquement en deux extrémités de la ligne, sont employés pour trouver le point exact du défaut. Dans le premier algorithme le profil de tension a été calculé en utilisant des enregistrements de la tension et du courant pris à l'extrémité émettrice de la ligne. La localisation de défaut est donnée par le point pour lequel le profil de tension est un minimum. Les résultats de simulation ont confirmé la précision de cette méthode. Mais cet algorithme est sensible à la résistance de défaut. Les défauts résistives ne sont pas bien localisés. Pour surmonter ce problème, l'algorithme de localisation de défaut à deux extrémités pour la ligne compensée série est proposé. Puisque le point de défaut par rapport au lieu du condensateur série n'est pas connu avant de résoudre le problème de localisation de défaut, l'algorithme proposé considère deux points de défaut - défaut en aval du condensateur série - défaut en amont du condensateur série. Ceci mène à deux routines pour la localisation de défaut. En appliquant ces routines, deux solutions pour la

localisation de défaut sont obtenues. Puis un procédé spécial pour choisir la solution correcte est utilisé.

Pour évaluer la précision du calcul de la distance de défaut, l'algorithme proposé a été testé pour une grande variété de conditions de défaut consistant en différents angles de commencement de défaut, différents types de défauts (symétriques et asymétrique) et différentes résistances de défaut. Les résultats sont très satisfaisants dans presque tous les cas et l'erreur reste inférieure à 0.5%.



CHAPITRE 5:

LOCALISATION DE DÉFAUT BASÉE SUR LA LOGIQUE FLOUE POUR LES LIGNES DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE

5.1 INTRODUCTION

Après qu'un défaut se produit sur une ligne d'électrique, le temps nécessaire pour déterminer le point de défaut sur cette ligne a une grande influence sur l'exploitation des réseaux électriques. En utilisant des techniques de localisation de défaut, le point de défaut peut être déterminé rapidement et précisément. Ceci au bénéfice des entreprises d'électricité et des consommateurs. La localisation de défaut pour des lignes d'électrique est un sujet qui a suscité beaucoup d'intérêt pendant de longues années. La raison principale de cette activité est qu'une méthode précise de localisation de défaut peut réduire le temps nécessaire pour restaurer la ligne et par conséquent pour améliorer la qualité de service.

Des systèmes intelligents tels que les systèmes experts et les réseaux de neurones ont été proposés et appliqués au problème du diagnostic de défaut [35-36]. Les systèmes experts exigent un grand effort pour mettre à jour la base d'apprentissage (acquisition de connaissance). Les réseaux de neurones artificiels (ANN) de leurs côtés, tandis que prétendent fournir une solution simple et plus robuste au problème de diagnostic de défaut, la capacité de suppression de bruit, la puissance d'apprentissage, l'adaptabilité, la capacité de tracer non linéaire et le traitement parallèle, mais a toujours un certain nombre d'éventualités qui peuvent compromettre la précision. D'autre part, la logique floue, en tant que technique d'intelligence artificielle, est beaucoup plus étroite de l'esprit de la pensée humaine et du langage naturel des systèmes traditionnels de logique. C'est une méthode représentant facilement la connaissance humaine sur un ordinateur. Dans les réseaux électriques, la logique floue a été utilisée souvent pour développer les systèmes de commande sophistiqués, de la modélisation, de l'identification de configuration, de l'estimation de sécurité des systèmes électriques [37-38] et plus récemment de la localisation de défaut dans les réseaux électriques [39-40]. D'autres techniques ont été

proposées et appliquées pour localiser le point exact des défauts sur des lignes de transmission.

Ce chapitre présente un nouvel algorithme de localisation de défaut utilisant la logique floue de type de Takagi-Sugeno pour fournir une bonne estimation du point de défaut. Les composantes de la fréquence de la tension et du courant après l'occurrence du défaut à une extrémité de la ligne sont employées pour détecter le lieu précis du défaut. Pour calculer les paramètres optimaux de la fonction d'appartenance et les paramètres optimaux de conséquent de règles, nous utilisons les données obtenues par simulation des défauts sous diverses conditions. Les résultats de simulation confirment que l'approche logique floue peut être utilisée comme une alternative efficace pour la localisation précise du défaut dans les lignes de transmission.

5.2 LE RÉSEAU ADAPTATIF A BASE DU SYSTÈME FLOUE D'INFÉRENCE (ANFIS) [41]

5.2.1 ARCHITECTURE D'ANFIS

Un réseau adaptatif est un réseau multicouche dans lequel chaque nœud effectue une fonction particulière sur les signaux entrants aussi bien qu'un ensemble de paramètres concernant ce nœud. La formule pour les fonctions de nœud peut changer du nœud au nœud. Le choix de chaque fonction de nœud dépend de la fonction globale d'entrée-sortie que le réseau adaptatif exige pour effectuer. L'ensemble des paramètres d'un réseau adaptatif est l'union des ensembles de paramètres de chaque nœud adaptatif. Afin de réaliser une entrée-sortie désirée traçant, ces paramètres sont mis à jour selon des données d'apprentissage. Le procédé d'apprentissage est basé sur le gradient. Dans le reste de cette section, l'architecture d'ANFIS en tant que réseau adaptatif est décrit.

Pour la simplicité, nous supposons que le système floue d'inférence que nous proposons d'étudier possède deux entrées x et y et une sortie. Supposons que la base des règles contient deux règles de floue de type de Takagi-Sugeno [42] comme suit.

Règle 1: Si x est A_1 et y est B_1 alors $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

Règle 2: Si x est A_2 et y est B_2 alors $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

Le raisonnement floue est illustré dans la Fig.5.1-a et l'architecture d'ANFIS équivalente correspondante est montrée dans la Fig.5.1-b. Les fonctions de nœud dans la même couche sont de la même fonction que décrivent ci-dessous:

Couche 1: Chaque nœud i dans cette couche est un nœud adaptatif avec une fonction de nœud:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (5.1)$$

où x est l'entrée de nœud i , et A_i est l'étiquette linguistique associée à cette fonction de nœud. En d'autres mots, O_i^1 est la fonction d'appartenance de A_i et elle satisfait le quantifier A_i . Habituellement nous choisissons $\mu_{A_i}(x)$ sous forme de cloche ou sous forme de Gaussienne avec le maximum égal à 1 et le minimum égal à zéro, tel qui :

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (5.2)$$

ou

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (5.3)$$

où $\{a_i, b_i, c_i\}$ est l'ensemble de paramètres. Lorsque les valeurs de ces paramètres changent, les fonctions en forme de cloche changent en conséquence, de ce fait montrer de diverses formes de fonction d'appartenance sur l'étiquette linguistique A_i . En fait, toutes les fonctions continues et différentiables par morceaux, telles que les fonctionnes trapézoïdales ou triangulaires (formes généralement utilisée), sont des formes qualifiées pour des fonctions de nœud dans cette couche. Les paramètres de cette couche sont désignés sous le nom de *paramètres de lieux*

Couche 2: Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe étiqueté Π , qui multiplie les signaux entrants. Par exemple,

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (5.4)$$

Chaque sortie de nœud représente la force de mise à feu d'une règle.

Couche 3: Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe étiqueté N . Le i^{eme} nœud calcule le rapport de la force de la mise à feu de la règle d' i^{eme} à la somme de forces de la mise à feu de toutes les règles:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (5.5)$$

Par convenance, les sorties de cette couche seront nommées les forces normalisées de mise à feu.

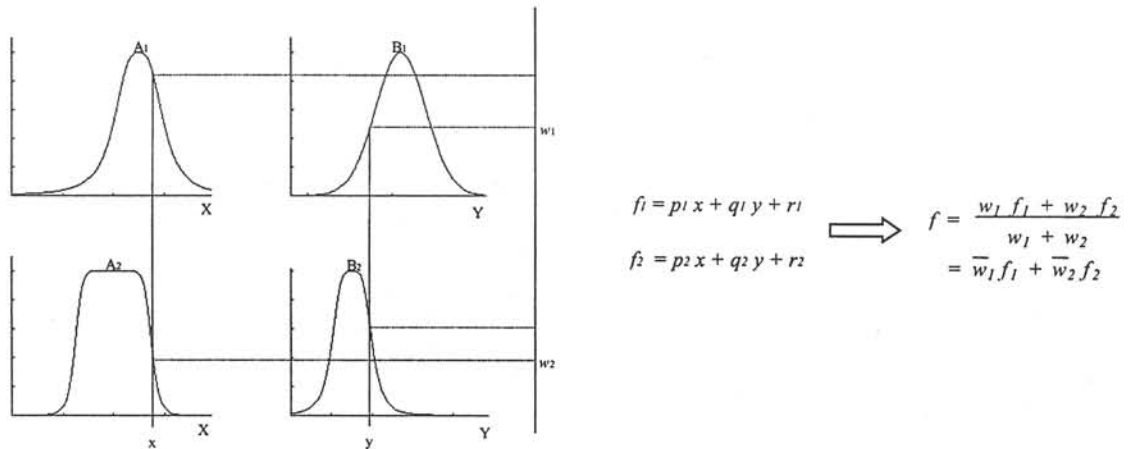
Couche 4: Chaque nœud i dans cette couche est un nœud adaptatif avec une fonction de nœud comme suit:

$$O_i^4 = \bar{w}_i \quad f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \tag{5.6}$$

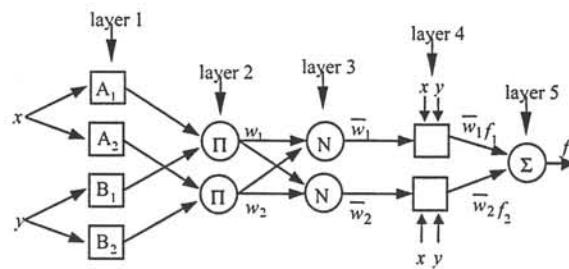
où \bar{w}_i est une sortie de la troisième couche et $\{p_i, q_i, r_i\}$ est l'ensemble des paramètres de cette couche. Les paramètres dans cette couche sont désignés sous le nom de *paramètres conséquents*.

Couche 5: Le seul nœud dans cette couche est un nœud fixe étiqueté Σ qui calcule la sortie globale comme la somme de tous les signaux entrants, c.-à-d.

$$O_i^5 = \text{overall output} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \tag{5.7}$$



(a)



(b)

Fig.5.1: (a) Le raisonnement flou (b) L'architecture d'ANFIS équivalente

5.2.2 ALGORITHME D'APPRENTISSAGE D'ANFIS

ANFIS utilise deux modes de l'apprentissage. D'abord, un passage vers l'avant est fait en utilisant des paramètres actuels de lieux pour optimiser des paramètres conséquents de règle en utilisant la technique d'estimation des moindres carrés basée sur l'erreur de sortie.

Ceci possible puisque les sorties sont une fonction linéaire les paramètres conséquents. Ensuite, un passage en arrière est fait pour modifier les paramètres de lieux en utilisant l'apprentissage basé sur la méthode de gradient. Ce processus d'apprentissage est nommé 'apprentissage hybride'.

La méthode utilisée dans le passage en arrière pour l'apprentissage d'ANFIS est semblable à la méthode de rétropropagation de l'erreur dans les réseaux de neurones. Pour chaque passage, chaque paramètre antécédent de règle α est changé selon:

$$\Delta \alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha} \quad (5.8)$$

et

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_{\alpha} \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right)^2}} \quad (5.9)$$

où E est l'erreur de sortie, η est le paramètre de cadence d'apprentissage et k est un paramètre, qui est automatiquement changé pendant l'apprentissage pour adapter la cadence d'apprentissage. k est augmenté si quatre étapes consécutives d'apprentissage réduisent l'erreur de sortie et est diminués si deux étapes consécutives d'apprentissage ont les changements non-monotoniques de l'erreur. $\partial E / \partial \alpha$ est calculé en utilisant la règle à chaîne.

5.3 ALGORITHME DE LOCALISATION DE DÉFAUT

5.3.1 SÉLECTION D'ENTRÉE-SORTIE DE L'ANFIS

Dans le cas d'un algorithme de localisation du défaut de la sortie de l'ANFIS est la distance de défaut. Les données de la tension et du courant, qui ont recueilli à l'extrémité émettrice de la ligne après l'occurrence du défaut, constituent la base de l'information sur position de défaut. Normalement, ces données sont employées pour trouver la localisation du défaut. Mais dans les différentes références le processus appliqué sur ces données est différent. Jusqu'ici l'application des moyennes des amplitudes maximales de tension de chaque phase [40], de la tension et du courant à la fréquence fondamentale [43,44] et les phaseurs de la tension et du courant avec la composante de courant continu (DC) du courant [45,46] sont enregistrées.

Afin de choisir le meilleur ensemble d'entrée-sortie pour étudier l'ANFIS, quelques cas sont testés. Le meilleur résultat est obtenu en utilisant les phaseurs de la tension et du courant avec la composante continue du courant comme entrées de l'ANFIS et naturellement la distance de défaut comme sortie de l'ANFIS.

5.3.2 SIMULATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

La Fig.5.2 montre une ligne triphasée 400 kV, 300 km avec les paramètres distribués. La simulation du réseau électrique a été effectuée en utilisant EMTP, un programme bien connu pour les études des transitoires électromagnétiques.

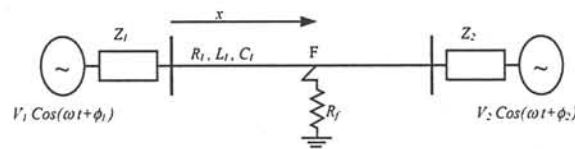


Fig.5.2: Système d'étude

Dans cette figure R_l , L_l et C_l sont respectivement la résistance, l'inductance et le compensateur par unité de longueur de la ligne, F est la position de défaut, R_f est la résistance de défaut et x est la distance de défaut de l'extrémité émettrice. Afin de rassembler les données, ce système est simulé à l'aide du logiciel EMTP.

5.3.3 EXTRACTION DE CARACTÉRISTIQUES

Comme la première étape dans chaque technique de classification de configuration, l'extraction de dispositif est employée pour réduire la dimension des données et pour extraire l'information utile sous une forme concise. Il est important de noter que les différents emplacements de défaut produisent différentes composantes de la fréquence dans les signaux de la tension et du courant. Ceci signifie également que ces signaux changent avec le type, la localisation et l'angle de commencement de défaut. Les entrées d'ANFIS comportent un ensemble de caractéristiques basés sur la tension et le courant. Un critère simple et acceptable utilisé dans ce cas est que toute variable à l'entrée d'ANFIS devrait fournir plus d'informations pour la localisation de défaut que celle non choisie. À cet égard, l'amplitude de la fréquence fondamentale de la tension et du courant, la différence de phase entre la tension et le courant et la composante continue (DC) du courant sont utilisés

comme caractères des signaux mesurés. Ainsi, dans le cas d'un défaut triphasé, l'ANFIS a quatre entrées et une sortie.

5.3.4 LES DONNÉES D'APPRENTISSAGE ET DE TEST

Afin de concevoir un ANFIS, il est extrêmement important de réaliser l'apprentissage efficacement et correctement. Les données d'apprentissage doivent être soigneusement choisies de sorte que toutes les différentes conditions de défaut telles que différents angles de commencement de défaut, différentes résistances de défaut et différents points de défaut soient considérés. ANFIS est alors testé en utilisant des données en dedans et dehors des données d'apprentissage. L'approche adaptée ici pour l'apprentissage de l'ANFIS est basée sur l'apprentissage hybride cela est décrit dans la section 5.2.2. Afin de trouver les valeurs optimales des paramètres d'ANFIS, une donnée d'entrée correspondant à une condition de défaut particulière alimente ANFIS et sa sortie est comparée à la donnée de sortie désirée correspondant à cette condition de défaut. Les paramètres d'ANFIS sont mis à jour après que toutes les données aient été fournies à l'ANFIS. Dans nos études, en considérant 5 kilomètres comme le pas de distance de défaut, 15 degrés comme le pas d'angle de phase et les trois différentes résistances du défaut (0, 3 et 10 Ohms), 2052 données sont produites pour l'apprentissage de l'ANFIS.

5.4 EVALUATION DE PERFORMANCE

Après l'apprentissage de l'ANFIS, l'ensemble de données d'apprentissage et un ensemble séparé de données de test sont fournis comme entrées à l'ANFIS afin d'évaluer la précision. Fig.5.3 montre des erreurs sur les données d'apprentissage.

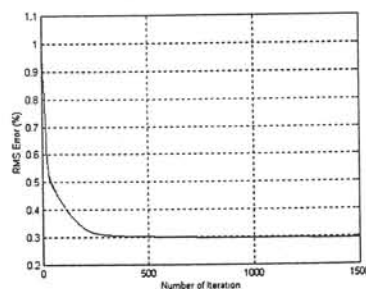


Fig.5.3: Erreur en apprentissage de l'ANFIS

Le pourcentage de l'erreur dans le calcul de la position de défaut est illustré par Fig.5.4. Le maximum, la moyenne absolue et la déviation standard de l'erreur sont 2.1%, 0.1959% et 0.2861% respectivement. La Fig.5.5 montre également le maximum et le minimum de l'erreur le long de la ligne.

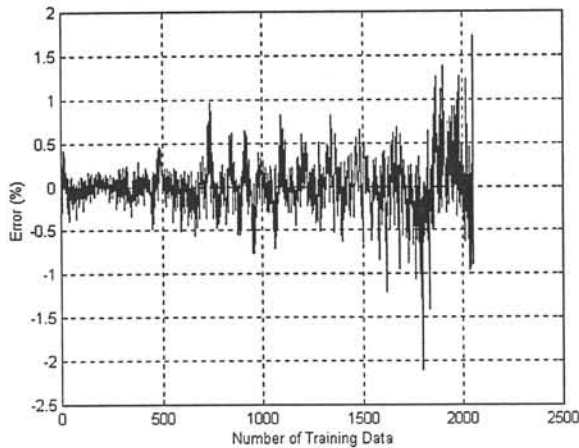


Fig.5.4: Pourcentage d'erreur en testant l'ANFIS

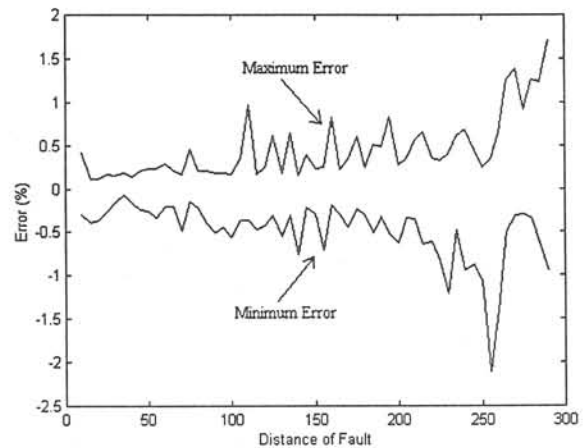


Fig.5.5: Pourcentage maximum et minimum de l'erreur le long de la ligne

Pour estimer l'erreur dans le calcul de la distance de défaut, l'algorithme proposé a été testé pour une grande variété de conditions de défaut qu'ANFIS n'a pas vues auparavant. Certains résultats sont récapitulés dans les tableaux 5.1 et 5.2. L'erreur pour la localisation de défaut est exprimée en pourcentage de la longueur de la ligne. A partir des résultats de ces tableaux, on peut voir que l'erreur est petite dans presque tous les cas, c.-à-d. l'erreur reste inférieure à 1.9%. De plus, la variation de l'angle de commencement de défaut et la résistance de défaut n'ont pas beaucoup d'influence sur la précision de l'algorithme.

Tableau 5.1: Les résultats de localisation de défaut obtenus en testant l'ANFIS

Localisation de défaut (km)	L'angle de commencement de défaut (Deg.)	Résistance de défaut (Ohm)	Sortie d'ANFIS (km)	Erreur (%)
25	0	7	24.9909	-0.0030
	50	0	26.3280	0.4427
	140	3	24.7711	-0.0763
100	0	7	100.3003	0.1001
	50	0	98.4865	-0.5045
	140	3	100.9056	0.3019
200	0	7	200.2517	0.0839
	50	0	200.3505	0.1168
	140	3	200.9195	0.3065
290	0	7	290.8813	0.2938
	50	0	284.3238	-1.8921
	140	3	291.0634	0.3545

Tableau 5.2: Les résultats de localisation de défaut obtenu en testant l'ANFIS

Localisation de défaut (km)	L'angle de commencement de défaut (Deg.)	Résistance de défaut (Ohm)	Sortie d'ANFIS (km)	Erreur (%)
57	0	0	57.4971	0.1657
	0	10	56.4985	-0.1672
	30	3	57.2872	0.0957
102	0	0	103.0366	0.3455
	0	10	101.8907	-0.0364
	30	3	101.6439	-0.1187
71	170	9	70.0362	-0.3213
117	38	2	116.1574	-0.2809
208	111	8	203.5925	-1.4692

5.5 APPLICATION AUX LIGNES COMPORTANT DE LA COMPENSATION SÉRIE

Le processus de localisation décrit dans les sections précédentes est appliqué aux lignes compensées série. Le système compensé série utilisé dans cette simulation est une ligne typique 400 kV. La longueur de la ligne est de 300 kilomètres et le condensateur série est situé au milieu de la ligne. La Fig.4.2 montre le système d'étude. Un niveau typique de compensation de 70% est utilisé partout. Après l'apprentissage de l'ANFIS, les données d'apprentissage et un ensemble séparé de données d'essai sont fournis comme entrées à l'ANFIS afin d'évaluer la performance. La Fig.5.6 montre l'erreur sur les données d'apprentissage.

Dans la Fig.5.7, le pourcentage de l'erreur dans le calcul de la position de défaut est illustré. Le maximum, la moyenne absolue et la déviation standard de l'erreur sont 1.87%, 0.1377% et 0.2387% respectivement. La Fig.5.8 montre également le maximum et le minimum de l'erreur le long de la ligne.

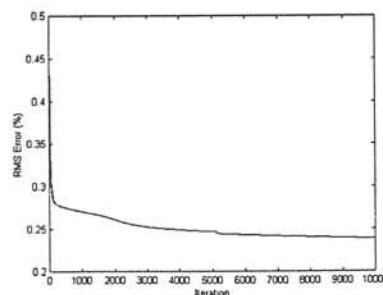


Fig.5.6: Erreur en apprentissage de l'ANFIS

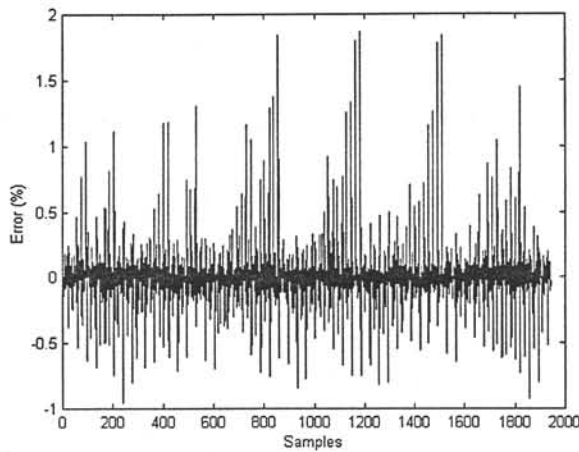


Fig.5.7: Pourcentage d'erreur en testant l'ANFIS

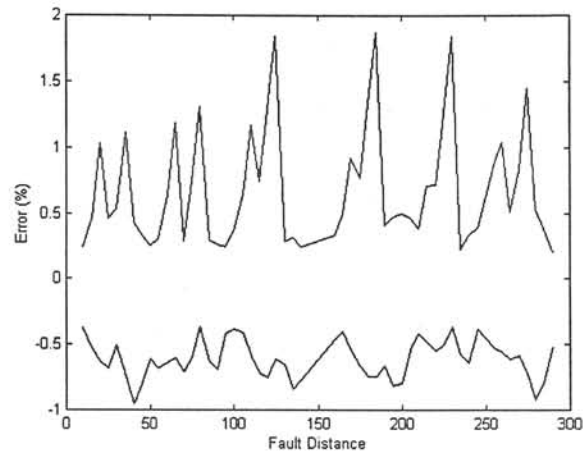


Fig.5.8: Pourcentage maximum et minimum de l'erreur le long de la ligne

Pour estimer l'erreur dans le calcul de la distance de défaut, l'algorithme proposé a été testé pour une grande variété de conditions de défaut simulées que l'ANFIS n'a pas vu auparavant. Certains résultats sont récapitulés dans les tableaux 5.3 et 5.4. A partir des résultats de ces tableaux, on peut voir que l'erreur est très petite dans presque tous les cas, c.-à-d. l'erreur est gardée inférieure à 1.5% par rapport à la longueur de la ligne. De plus la variation de l'angle de commencement de défaut et la résistance de défaut n'ont pas beaucoup d'influence sur la précision de l'algorithme.

Tableau5.3: Les résultats de localisation de défaut obtenus en testant l'ANFIS

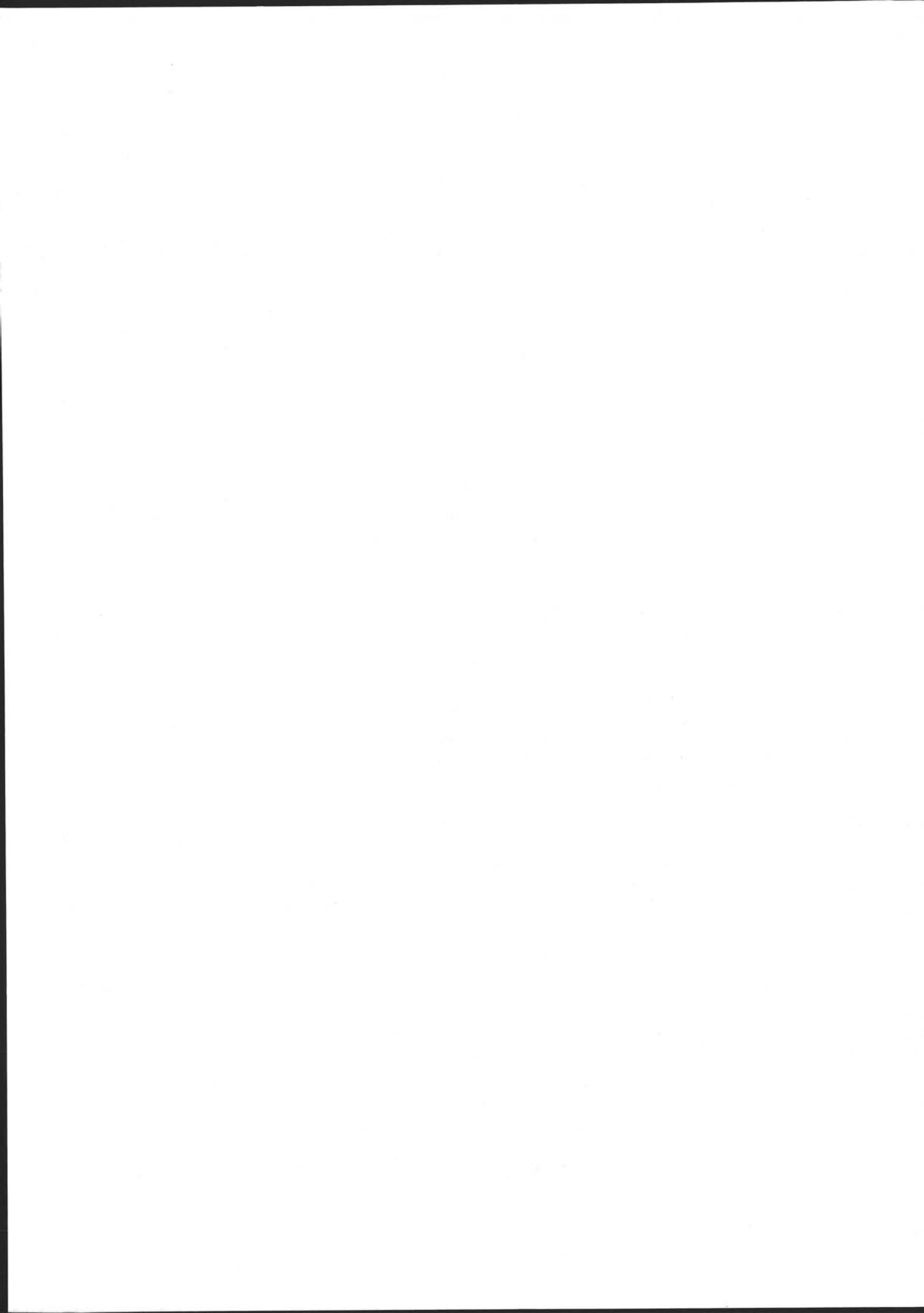
Localisation de défaut (km)	L'angle de commencement de défaut (Deg.)	Résistance de défaut (Ohm)	Sortie d'ANFIS (km)	Erreur (%)
50	0	7	50.2022	0.0674
	50	0	51.6560	0.5520
	140	3	49.2562	-0.2479
100	0	7	99.3003	-0.2332
	50	0	100.6865	0.2288
	140	3	99.2036	-0.2655
200	0	7	199.6425	-0.1192
	50	0	201.2205	0.4068
	140	3	198.9539	-0.3487
250	0	7	250.7265	0.2421
	50	0	245.4289	-1.5237
	140	3	248.5969	-0.4677

Tableau5.4: Les résultats de localisation de défaut obtenus en testant l'ANFIS

Localisation de défaut (km)	L'angle de commencement de défaut (Deg.)	Résistance de défaut (Ohm)	Sortie d'ANFIS (km)	Erreur (%)
93	0	0	94.1971	0.3990
	0	10	93.8536	0.2845
	30	3	91.8721	-0.3860
167	0	0	169.0213	0.6738
	0	10	166.2311	-0.2563
	30	3	164.9861	-0.6713
71	170	9	69.2535	-0.5822
137	38	2	139.2503	0.7501
208	111	8	203.8175	-1.3941

5.6 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté un nouvel algorithme basé sur la logique floue pour la localisation de défaut dans les lignes de transmission d'énergie. Afin de concevoir l'ANFIS, il est très important de réaliser l'apprentissage efficacement et correctement. Les données d'apprentissage doivent être soigneusement choisies de sorte que toutes les différentes conditions de défaut soient considérées. Pour estimer la précision du calcul de la distance de défaut, l'algorithme proposé a été testé pour une grande variété de conditions de défaut tels que différents angles de commencement de défaut, différentes résistances de défaut et différents points de défaut. Les résultats sont très satisfaisants dans presque tous les cas, c'est à dire que l'approche de logique floue peut être utilisée comme technique alternative et efficace pour la localisation précise de défaut dans les lignes de transmission. À la fin de ce chapitre l'application de la méthode proposée pour les lignes comportant de compensation série est présentée. Les résultats de simulation montrent la précision de la méthode proposée. Les erreurs n'excèdent jamais 2% par rapport à la longueur de la ligne.



CHAPITRE 6:

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif du travail présenté dans cette thèse est d'étudier et d'analyser des méthodes et des algorithmes existants pour le problème de la localisation de défaut dans les lignes de transport d'énergie et bien sûr de proposer quelques nouvelles méthodes pour résoudre ce problème précisément. Les résultats de cette thèse qui est préparés en six chapitres, va expliquer ci-dessous:

- Le premier chapitre est consacré à la définition du problème et à la revue de certaines méthodes existantes. Les avantages et les inconvénients des algorithmes ont étudié et les lignes de recherche en ce domaine sont trouvées. Ce chapitre est fini par l'explication des objectifs de cette thèse.
- Il y a eu beaucoup de techniques présentées pour trouver la localisation exacte de défaut sur des lignes de transmission. Dans la plupart de ces approches, le lieu de défaut a été détecté par l'utilisation de modèle série de la ligne avec les paramètres localisés. Puisque ce modèle ne représente pas la capacité shunt de la ligne, des erreurs significatives sont généralement produites dans la localisation exacte de défaut pour la ligne longue. Dans cette thèse nous avons suggéré des nouvelles techniques basées sur le modèle distribué de ligne pour surmonter le problème produit dans des approches conventionnelles. Pour la modélisation de ligne, nous avons utilisé des modèles proposés par Dommel [28]. Nous avons commencé avec les défauts triphasés et francs (sans résistance de défaut) en considérant deux cas différents. Le premier cas a consacré à la ligne sans perte alors que le deuxième cas considère la perte de la ligne. Nous avons obtenu les résultats très précis pour la localisation de ce type de défauts en deuxième cas. Quand on a négligé la résistance de ligne, les résultats seront imprécis pour des défauts près à la fin de la ligne.

Ensuite nous avons continué vers considération des effets des défauts asymétriques et également les défauts avec la résistance. L'idée principale des algorithmes présentés est qu'elle considère la localisation de défaut comme un problème d'optimisation qui peut être résolu par une méthode mathématique appropriée.

Tous les algorithmes proposés dans ce chapitre, utilisent seuls les échantillons de la tension et du courant d'un côté de la ligne et on a trouvé que dans la plupart des cas les algorithmes présentés sont indépendants de l'angle de commencement de défaut.

Les simulations montrent que les résultats sont très précis, c'est-à-dire l'erreur estimée pour la localisation de défaut était assez petite pour presque tous les cas, comme elle n'excède jamais 1% de la longueur de la ligne.

- On connaît depuis longtemps que l'un des aspects les plus importants dans la modélisation des lignes électriques pour des études des régimes transitoires électromagnétiques est celui de la prise en considération de la dépendance des paramètres de ligne de la fréquence. Ainsi pour la localisation de défaut précise, il est nécessaire de considérer cet effet. Le troisième chapitre de cette thèse est consacré à ce sujet. Pour la localisation de défaut en considérant cet effet, nous avons utilisé le modèle de la ligne qui est présenté par J.R. Marti [30]. Dans la méthode proposée, les techniques du Newton-Raphson et d'estimation des moindres carrés sont utilisées pour résoudre les équations non-linéaires, mènent à la localisation de défaut. Dans une partie de ce chapitre, on a fait une comparaison entre les algorithmes proposés avec ou sans considération d'effet de la dépendance des paramètres de la ligne de la fréquence.
- La protection et la localisation de défaut de ligne comportant la compensation série avaient reçu l'attention pendant les dernières années. La performance de localisation de défaut dépend de l'état du condensateur et aussi de la réponse transitoire du circuit de protection de condensateur. La modélisation précise de l'installation de condensateur est exigée pour l'application de localisation de défaut. Dans le quatrième chapitre les nouvelles méthodes pour la localisation de défaut sur ces types de lignes sont présentées. Tout d'abord on a proposé que les données d'un côté de la ligne soient accessibles. En utilisant les équations différentielles partielles comme le modèle de ligne, et les échantillons de la tension et du courant comme les conditions aux limites, nous pouvons calculer et tracer le profil de tension du long de la ligne. La localisation de défaut est donnée par le point pour lequel le profil de tension est un minimum. Les résultats de simulation ont confirmé la précision de cette méthode. Mais cet algorithme est sensible à la résistance de défaut. Les défauts résistifs ne sont pas bien localisés. Pour surmonter ce problème, l'algorithme de localisation de défaut de deux extrémités

pour les lignes compensées séries est proposé. Puisque le point de défaut par rapport au lieu du condensateur série n'est pas connu avant de résoudre le problème de localisation de défaut, l'algorithme proposé considère deux points de défaut - défaut en aval du condensateur série - défaut en amont du condensateur série. Ceci mène à deux routines pour la localisation de défaut. En appliquant ces routines, deux solutions pour la localisation de défaut sont obtenues. Puis un procédé spécial pour choisir la solution correcte est utilisé. Pour évaluer la précision du calcul de la distance de défaut, l'algorithme proposé a été testé pour une grande variété de conditions de défaut consistant en différents angles de commencement de défaut, différents types de défauts (symétriques et asymétrique) et différentes résistances de défaut. Les résultats sont très satisfaisants dans presque tous les cas et l'erreur reste inférieure à 0.5% par rapport à longueur de la ligne.

- Des systèmes intelligents tels que les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue ont été proposés et appliqués au problème du diagnostic de défaut. Dans la dernière partie de cette thèse, nous avons présenté un nouvel algorithme de localisation de défaut utilisant la logique floue de type de Takagi-Sugeno pour fournir une bonne estimation du point de défaut. Les composantes de la fréquence de la tension et du courant après l'occurrence du défaut à une extrémité de la ligne sont employées pour détecter le lieu précis du défaut. Pour calculer les paramètres optimaux de la fonction d'appartenance et les paramètres optimaux de conséquent de règles, nous avons utilisé les données obtenues par simulation des défauts sous diverses conditions. Les résultats de simulation confirment que l'approche logique floue peut être utilisée comme une alternative efficace pour la localisation précise du défaut dans les lignes de transmission.



RÉFÉRENCES

- [1] G.D. Rockefeller, "Fault Protection with a Digital Computer," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-88, 1969, pp.438-461.
- [2] B.J. Mann and I.F. Morrison, "Digital Calculation of Impedance for Transmission Line Protection," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-90, No.1, Jan./Feb. 1971, pp.270-279.
- [3] B.J. Mann and I.F. Morrison, "Relaying a Three Phasre Transmission Line with a Digital Computer," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-90, No.2, March/April 1971, pp.742-750.
- [4] G.B. Gilcrest, *et al*, "High Speed Distance Relaying Using a Digital Computer, I. System Description," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-91, 1972, pp.1135-1243.
- [5] G.D. Rockefeller and E.A. Udren, "High Speed Distance Relaying Using a Digital Computer, II. Test Results," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-91, 1972, pp.1144-1258.
- [6] W.D. Breingan, *et al*, "The Laboratory Investigation of a Digital System for the Protection of Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-98, 1978, pp.350-368.
- [7] A.G. Phadke, *et al*, "A Digital Computer System for EHV Substations: Analysis and Field Tests," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-95, 1976, pp.291-301.
- [8] J. Kohlas, "Estimation of Fault Locations on Power Lines," *Proceeding of the 3rd IFAC Symposium, the Hague/Delft, the Netherlands*, pp.393-402, June 1973.
- [9] S.E. Westlin and J.A. Bubenko, "Newton - Raphson Technique Applied to the Fault Location Problem," *IEEE Summer Meeting, Paper No. A. 76 334-3, Portland, OR.*, 18-23 July 1976.
- [10] T. Takagi, *et al*, "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines : Part I - Fourier Transformation Method," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-100, No. 3, March 1981, pp.1316-1323.
- [11] T. Takagi, *et al*, "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines : Part II - Laplase Transform Method," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-101, No. 3, March 1982, pp.564-573.

- [12] G.G. Richards and O.T. Tan, "An Accurate Fault Location Estimator for Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-101, No. 4, April 1982, pp.945-950.
- [13] A. Wiszniewski, "Accurate Fault Impedance Locating Algorithms," *IEE Proc.*, Vol. 130, Pt. C, No. 6, November 1983, pp.311-314.
- [14] A.A. Girgis, "A New Kalman Filtering Based Digital Distance Relay," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-101, No.9, September 1982, pp.3471-3480.
- [15] L. Eriksson, *et al*, "An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote - End Infeed," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-104, No. 2, Feb. 1985, pp.424-436.
- [16] E.O. Schweitzer III, "Evaluation and Development of Transmission Line Fault - Locating Techniques which Use Sinusoidal Steady - State Information," *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 4, 1983, pp.269-278.
- [17] A.T. Johns and S. Jamali, "Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines," *IEE Proc.*, Vol. 137, Pt. C, No. 6, Nov. 1990, pp.395-402.
- [18] M.S. Sachdev and R. Agarwal, "A Technique for Estimating Transmission Line Fault Locations from Digital Impedance Relay Measurements," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No. 1, Jan. 1988, pp.121-129.
- [19] V. Cook, "Fundamental Aspects of Fault Location Algorithm Used in Distance Protection," *IEE Proc.*, Vol. 133, Pt. C, No. 6, Sept. 1986, pp.359-368.
- [20] M. Kezunovic, *et al*, "An Accurate Fault Location Algorithm Using Synchronized Sampling," *Electric Power System Research*, Vol. 29, 1994, pp.161-169.
- [21] A.O. Ibe and B.J. Cory, "A Travelling Wave Fault Location for Two and Three Terminal Networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 1, No.2, April 1986, pp.283-288.
- [22] A.M. Ranjbar, *et al*, "A New Approach for Fault Location Problem on Power Lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992, pp.146-151.
- [23] D. Novosel, *et al*, "Algorithms for Locating Faults on Series Compensated Lines Using Neural Network and Deterministic Methods," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 4, Oct. 1996, pp.1728-1736.
- [24] M.M. Saha, *et al*, "A New Accurate Fault Locating Algorithm for Series Compensated Lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, July 1999, pp.789-797.

- [25] M.M. Saha, *et al*, "Fault Location in Uncompensated and Series Compensated Parallel Lines," *IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting'2000, 23-27 Jan. 2000, Singapore*.
- [26] J. Sadeh, *et al*, "A New Algorithm for Fault Location in the Series Compensated Power Transmission Lines," *14th International Power System Conference (PSC'99), Oct. 1999, Tehran, Iran*.
- [27] J. Sadeh, *et al*, "Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines," *IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting'2000, 23-27 Jan. 2000, Singapore*.
- [28] H. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transient in Single - and Multi Phase Networks," *IEEE Trans. Power Appar. Syst., Vol. PAS-88, No. 4, April 1969, pp.388-399*.
- [29] W.S. Meyer and H.W. Dommel, "Numerical Modelling of Frequency - Dependent Transmission Line Parameters in an Electromagnetic Transient Program," *IEEE Transactions Power Appar. Syst., Vol. PAS-93, Sept./Oct. 1974, pp.1401-1409*.
- [30] J.R. Marti, "Accurate Modelling of Frequency - Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations," *IEEE Transactions Power Appar. Syst., Vol. PAS-101, No. 1, Jan. 1982, pp.147-157*.
- [31] A. Budner, "Introduction of Frequency-Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transient Program," *IEEE Transactions Power Appar. Syst., Vol. PAS-98, No. 1, Jan. 1979, pp.88-97*.
- [32] J.K. Snelson, "Propagation of Travelling Waves on Transmission Lines - Frequency Dependent Parameters," *IEEE Transactions Power Appar. Syst., Vol. PAS-91, No.1, Jan./Feb. 1972, pp.85-91*.
- [33] D.L. Goldsworthy, "A Linearized Model for MOV-Protected Series Capacitors" *IEEE Transactions on Power Systems, vol. 2, no. 4, Nov. 1987, pp.953-958*.
- [34] D. Novosel, *et al*, "Problems and Solutions for Microprocessor Protection of Series Compensated Lines," *Proc. of 6th International Conference on Developments in Power System Protection, 25-27 March 1997, Nottingham, UK; Conference Publication No. 434, IEE 1997, pp.18-23*.
- [35] C. Fukuri and J. Kawakami, "An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective relays and Circuit Breakers," *IEEE Transactions on Power Delivery, vol.1, no. 4, Oct. 1986, pp.83-90*.

- [36] H. Tanaka, *et al*, "Design and Evaluation of Neural Network for Fault Diagnosis," *Second Symposium on Expert System Application to Power System, Seattle, July 1989*, pp. 378-384.
- [37] Y. Hsu and H. Kuo, "Fuzzy Based Contingency Ranking," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no.3,1992.
- [38] M. Matos, "Fuzzy Analysis of Steady State Security for on-line Assessment," *Proceeding of IEEE JIPC, Greec, 1993*.
- [39] K. Urasawa, *et al*, "Fault Location System for Electric Power Transmission Lines Based on Fuzzy Knowledge Base," *Electrical Engineering in Japan, Vol. 111, No. 4, 1991*.
- [40] T.S. Davis, *et al*, "Learning Fuzzy Rules Based for Fault Location and Diagnosis in Three Phase Power Transmission System," *University Power Engineering Conference (UPEC'97), 1997*, pp. 427-431.
- [41] J.S. Roger Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Logic Inference System," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 23, 1993*, pp.665-684.
- [42] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modelling and Control," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 15, 1985*, pp.116-132.
- [43] Zh. Chen and J.C. Maun, "An Artificial Neural Network Based Real Time Fault Locator for Transmission Lines," *International Conference on Neural Network, Vol. 1, 1997*, pp.163-168.
- [44] Zh. Chen and J.C. Maun, "Artificial Neural Network Approach to Single Ended Fault Locator for Transmission Lines," *20th International Conference gon Power Industry Computer Application (PICA), 1997*, pp. 125-131.
- [45] M. Joorabian, "A New Approach to Accurate Fault Location on EHV Transmission Lines Based on Combined Fuzzy Logic - Neural Network Architecture," *The 5th Iranian Conference on Electical Engineering, May 7-9, Vol.2, 1997*, pp.2/240-2/247.
- [46] M. Joorabian, "A Novel Fault Location Technique for EHV Series-Compensated Lines Based on Artificial Neural Networks," *The 6th Iranian Conference on Electical Engineering, May 12-14, Vol.5, 1998*, pp.V39-V44.

LES ARTICLES PUBLIÉS

- [1] J. Sadeh and A. M. Ranjbar, "Review of Some Fault Location algorithms : Part 1, Lumped Line Model," *BARGH Magazine*, No. 24, Summer 1999, pp. 66-74, in *Persian*.
- [2] J. Sadeh and A. M. Ranjbar, "Review of Some Fault Location algorithms : Part 2, Distributed Line Model," *BARGH Magazine*, No. 24, Summer 1999, pp. 75-81, in *Persian*.
- [3] J. Sadeh and A.M. Ranjbar, "A New Algorithm for Fault Location in Power Transmission Lines," *Proceedings of the American Power Conference (APC'99)*, 61st Annual Meeting, Chicago, Illinois, 1999, pp.458-462.
- [4] **J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid and R. Feuillet, "An Accurate Fault Location Algorithm for Power Transmission Lines,"** *European Transaction on Electrical Power (ETEP)*, No. 5, Sept./Oct. 2000, pp.313-318
- [5] J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid, R. Feuillet and T. Tran-Quoc, "New Method for Fault Location in Power Transmission Lines Using One Terminal Data," *IEEE PowerTech'99 Conference*, 29 Aug.- 2 Sept. 1999, Budapest, Hungary.
- [6] J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid and R. Feuillet, "A New Algorithm for Fault Location in the Series Compensated Power Transmission Lines," *14th International Power System Conference (PSC'99)*, Oct. 1999, pp.205-211, Tehran, Iran.
- [7] J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid and R. Feuillet, "Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines," *IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting'2000*, 23-27 Jan. 2000, Singapore.
- [8] **J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid and R. Feuillet, "Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines,"** *IEEE Transactions on Power Delivery*, No.3, July 2000, pp. 97-103.
- [9] J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid and R. Feuillet, "An Accurate Method for Estimating Transmission Line Fault Locations Using One Terminal Data," *The 8th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE'2000)*, Isphahan, Iran, 12-15 May, 2000, pp.35-42.
- [10] J. Sadeh, A.M. Ranjbar and R. Feuillet, "Fuzzy Logic Based Fault Locating Algorithm for Power Transmission Lines," *International Symposium "Electrical Power*

Engineering at the Beginning of the Third Millennium", 12-18 May 2000, Naples-Capri, Italy.

- [11] J. Sadeh, A.M. Ranjbar and R. Feuillet, "A New Approach Based on Fuzzy Logic to Solve Fault Location Problem in the Series Compensated Lines," *Fourth IASTED International Conference Power and Energy System (PES 2000), Sept. 19-22, 2000, Marbella, Spain.*
- [12] J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid and R. Feuillet, "Fault Location in Power Transmission Lines: Frequency Dependent Line Parameters Model," *32nd Annual North American Power Symposium (NAPS 2000), Waterloo, Ontario, Canada, Oct. 23-24, 2000.*