

PRÉFACE

Les réseaux électriques constituent un élément essentiel pour assurer une alimentation fiable et de qualité en énergie. Leur étude occupe une place centrale dans la formation des étudiants en électrotechnique.

Ce document est conçu comme un **support de cours** destiné principalement aux étudiants de troisième année licence en **Électrotechnique**. Ce support a pour objectif de se familiariser avec les différents procédés et techniques de protection des réseaux électriques et de leurs éléments face aux diverses contraintes, afin d'assurer une protection optimale. Il vise également à présenter de manière progressive et structurée les notions fondamentales relatives aux systèmes électriques. Ce document fournit une base solide pour l'apprentissage et l'approfondissement des systèmes électriques et de leurs dispositifs de protection.

Le document est organisé en quatre chapitres :

- **Chapitre 1 : Introduction à la protection des réseaux électriques (4 semaines)**

Ce chapitre présente les notions fondamentales de la protection des réseaux électriques. Il aborde les principaux types de défauts pouvant apparaître dans un réseau, ainsi que les moyens de mesure et de réduction des grandeurs électriques associés (transformateurs de courant et de potentiel, mesure des impédances, de la puissance et composantes symétriques).

Il traite également des principes généraux de la protection, notamment la sélectivité, la sensibilité, la rapidité et la fiabilité. Enfin, il introduit les protections ampérométrique (surintensité) et volumétrique (différentielle), ainsi que les différents modes de sélectivité.

- **Chapitre 2 : Rappels sur les composantes symétriques et les courants de défauts (3 semaines)**

Ce chapitre est consacré à l'étude des composantes symétriques appliquées à l'analyse des courants de défauts dans les réseaux électriques. Il présente la définition des composantes

symétriques et la transformation des impédances en leurs composantes directe, inverse et homopolaire.

- **Chapitre 3 : Éléments du système de protection (3 semaines)**

Ce chapitre présente la structure générale d'un système de protection des réseaux électriques ainsi que les principes de fonctionnement et les domaines d'application des différents types de relais de protection. Il aborde le modèle structural de principe, les technologies des relais (relais de courant, de tension, différentiels, directionnels de puissance et de distance) ainsi que les dispositifs de transformation de tension et de courant nécessaires à leur fonctionnement.

L'objectif est de comprendre l'architecture globale d'un système de protection et le rôle de chaque composant dans la détection et l'élimination des défauts.

- **Chapitre 4 : Protection des éléments du réseau électrique (5 semaines)**

Ce chapitre traite des principes et des techniques de protection appliquées aux principaux éléments du réseau électrique. Il présente les dispositifs de protection des alternateurs et des moteurs, des jeux de barres, des transformateurs ainsi que des lignes de transport et de distribution, notamment les protections à distance et différentielles.

L'objectif est de permettre la compréhension du fonctionnement et du choix des protections adaptées afin d'assurer la sécurité des équipements, la continuité du service et la fiabilité du réseau électrique

Chapitre I

Introduction à la protection des réseaux électriques

I.1. Introduction

La protection des réseaux électriques regroupe l'ensemble des dispositifs destinés à détecter les défauts et les conditions anormales de fonctionnement afin d'assurer la sécurité des équipements et la continuité de l'alimentation électrique. Elle permet d'isoler rapidement la partie défectueuse du réseau tout en maintenant la stabilité globale du système. Ces dispositifs reposent sur des capteurs, des relais et des disjoncteurs, et doivent être réglés en fonction de l'architecture du réseau, du régime de neutre et des niveaux de court-circuit. La sélectivité constitue un principe fondamental de la protection, en divisant le réseau en zones correctement protégées. Chaque élément du réseau, depuis la production jusqu'à la distribution, nécessite des protections spécifiques adaptées à ses caractéristiques et à ses conditions d'exploitation.

Selon la Commission Électrotechnique Internationale (CEI), la protection correspond à l'ensemble des moyens mis en œuvre pour détecter les défauts et les conditions anormales de fonctionnement des réseaux électriques et pour provoquer, le cas échéant, l'ouverture d'un ou de plusieurs disjoncteurs, ainsi que l'émission d'ordres de signalisation appropriés.

I.2. Principaux défauts pouvant survenir dans un réseau d'énergie électrique

I.2.1. Défauts électriques

Un défaut électrique est une anomalie ou perturbation dans un réseau électrique qui modifie les tensions et les courants normaux et peut endommager les équipements si elle n'est pas corrigée rapidement. Les principaux défauts rencontrés dans les réseaux électriques sont :

- Courts-circuits phase-phase et phase-terre
- Surtensions dues à la foudre ou aux manœuvres
- Défauts à la masse
- Surcharges thermiques
- Perte de synchronisme
- Baisses importantes de fréquence
- Défaillances de disjoncteurs.

Les défauts les plus rencontrés dans les installations électriques :

○ **Surcharges :**

Une **surcharge électrique** se produit lorsqu'une charge réclame une puissance trop importante pour la ligne d'alimentation. Cela entraîne un courant supérieur aux limites normales, provoquant un échauffement excessif des conducteurs et une usure progressive des isolants, ce qui peut à terme provoquer d'autres défauts, comme des courts-circuits. Plus le courant dépasse les limites autorisées, plus l'échauffement et l'usure sont importants. Un exemple typique de surcharge est l'utilisation simultanée de plusieurs appareils électriques sur la même phase, comme un radiateur, une machine à laver et un autre appareil branché occasionnellement.

☞ **Conséquences du au courant de surcharge :**

- Surintensité
- Echauffement lent et progressif des parties actives
- Déséquilibre.
- Des masses métalliques des isolants.
- Chute de fréquence

☞ **Moyens de protection :**

- Relais thermique.
- Fusible déclencheur thermique du disjoncteur.

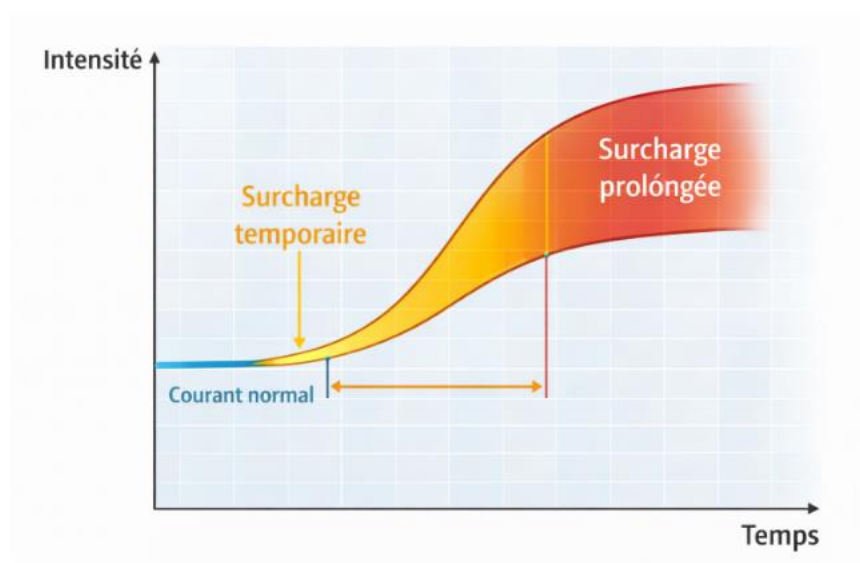


Figure I.1.Exemple de surcharge temporaire et prolongé

○ **Surtension :**

Une **surtension** est une augmentation anormale et temporaire de la tension dans un réseau électrique, souvent d'origine inductive. Elle peut être provoquée par des phénomènes de résonance, la foudre ou d'autres perturbations.

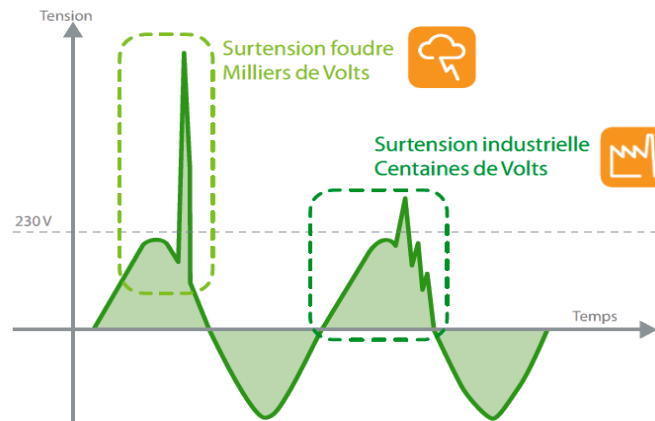


Figure I.2.Exemple de surtension

☞ **Conséquences dû à la surtension :**

- Claquage des isolants.
- Courant de court-circuit
- Mauvais fonctionnement du disjoncteur.

☞ **Moyens de protection**

- Limiteur de surtension.
- Relais de surtension.
- Parafoudre

La norme EN 50160 définit des limites de surtension selon le type de mise à la terre du réseau :

- Pour les réseaux dont le neutre est relié à la terre (directement ou via une impédance), les surtensions ne doivent pas dépasser 1,7 fois la tension nominale.
- Pour les réseaux avec neutre isolé ou impédant, les surtensions ne doivent pas excéder 2 fois la tension nominale.

Les surtensions peuvent avoir différentes origines, notamment :

1. **Foudre** : les coups de foudre frappant les lignes ou les bâtiments peuvent générer des surtensions importantes.
2. **Événements de commutation** : l'allumage ou l'arrêt d'équipements électriques tels que moteurs, compresseurs, systèmes de chauffage ou de climatisation peut provoquer des surtensions transitoires.
3. **Perturbations électromagnétiques** : des sources externes comme les stations radio, antennes TV ou émetteurs radiofréquences peuvent induire des surtensions dans le réseau.
4. **Problèmes liés au réseau électrique** : des fluctuations de tension, des pannes ou des variations de fréquence peuvent également entraîner des surtensions.

○ *Courts-circuits*

Un **court-circuit** correspond à la mise en contact de deux conducteurs portant des potentiels différents. Cela entraîne une brusque augmentation du courant et un échauffement important, pouvant dégrader les isolants et provoquer à terme d'autres courts-circuits. On peut également observer des arcs électriques lorsque les conducteurs ne sont pas en contact direct. Un exemple typique de court-circuit est le contact accidentel entre deux fils dénudés, entre deux conducteurs dont l'isolant est usé ou encore entre deux phases, par exemple lorsqu'un oiseau touche simultanément deux conducteurs d'une ligne électrique

Un court-circuit dans les réseaux électriques peut être :

- **Monophasé** : entre une phase et la terre ou une masse.
- **Biphasé** : entre deux phases raccordées ensemble, peut être un court-circuit biphasé mis à la terre ou biphasé isolé.
- **Triphasés** : entre trois phases de la ligne ou les trois phases et la terre.

☞ **Les dispositifs de détection réservés à cette perturbation sont :**

- Relais électromagnétiques
- Transformateur d'isolement
- Fusibles (gI, gG ou aM)

○ **Baisse de tension**

Une **baisse de tension** (ou chute de tension) correspond à une diminution anormale de la tension dans un réseau électrique, souvent causée par des déséquilibres dans les réseaux triphasés. Elle peut provoquer un mauvais fonctionnement des équipements électriques, comme

un éclairage insuffisant ou des appareils qui ne démarrent pas correctement. Pour protéger les installations contre ce type de défaut, on utilise des relais à minima de tension, capables de détecter la chute et de déclencher les dispositifs de protection si nécessaire.

I.2.2. Classement des défauts

Les défauts électriques peuvent être classés selon leur nature :

a. Fugitifs : ce sont des défauts temporaires qui nécessitent seulement une coupure très brève du réseau. Par exemple, le balancement des conducteurs sous l'effet du vent, le passage d'objets transportés par le vent, le brouillard givrant, la pluie en zone polluée, ou encore une branche d'arbre proche de la ligne pouvant brûler sous l'effet de l'arc électrique.

b. Permanents : ce sont des défauts qui nécessitent une intervention humaine pour rétablir le réseau. Cela inclut la rupture d'un câble ou de sa pince d'ancrage, la chute d'un arbre ou d'une grue sur la ligne, des actes de malveillance endommageant un pylône, ou le contact d'un brin de conducteur avec une autre masse métallique.

c. Auto-extincteurs : ce sont des défauts qui disparaissent spontanément et rapidement, sans intervention.

d. Semi-permanents : ce sont des défauts qui nécessitent une coupure relativement longue, de l'ordre de quelques dizaines de secondes, avant de disparaître.

I.2.3. Types de défauts et leurs effets

Quel que soit le type de défaut, ses effets peuvent être classés de deux manières :

- **Effets instantanés** : Ils se traduisent par des manœuvres intempestives de contacteurs ou d'organes de protection, ainsi que par le mauvais fonctionnement ou l'arrêt d'une machine. L'impact de ces perturbations est immédiatement observable, tant sur le plan technique que financier.
- **Effets différés** : Ils se manifestent par des pertes énergétiques et un vieillissement accéléré du matériel, provoqué par les échauffements et les efforts électrodynamiques supplémentaires générés par les perturbations. L'impact financier de ces effets est plus difficile à évaluer.

I.3. Appareils de mesures et réduction des grandeurs électriques

Dans un réseau électrique, les grandeurs telles que la tension et le courant ne sont pas directement exploitables par les systèmes de protection et de contrôle. Elles sont donc d'abord transformées à l'aide de réducteurs de mesure, comme les transformateurs de courant et de tension, qui permettent de ramener ces grandeurs à des niveaux compatibles avec les capteurs et les instruments de mesure. Au secondaire de ces réducteurs, les capteurs élaborent les grandeurs essentielles à la conduite du réseau, notamment la puissance active et réactive des

équipements ainsi que la tension efficace sur les barres. Ces informations sont ensuite transmises aux équipements de télésurveillance ou de téléconduite sous forme de courants continus proportionnels, permettant un suivi précis et une commande efficace du réseau.

I.3.1. Transformateurs de mesures

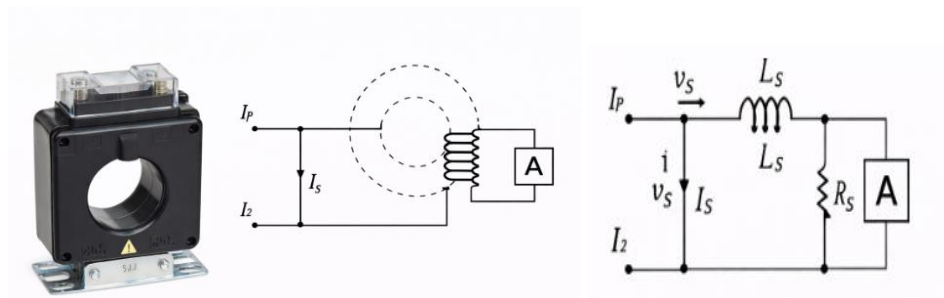
Les transformateurs de mesure sont des dispositifs essentiels pour adapter les grandeurs électriques d'un réseau aux niveaux compatibles avec les équipements de protection et de contrôle. Il en existe deux principaux types : les transformateurs de courant (TC), qui réduisent les courants élevés du réseau à des valeurs mesurables et sûres, et les transformateurs de tension (TT ou TP), qui abaissent la tension à des niveaux exploitables par les instruments et relais. Ces transformateurs permettent ainsi aux capteurs et aux équipements de télésurveillance de mesurer avec précision les courants, les tensions et d'en déduire les puissances active et réactive, garantissant une surveillance fiable et la sécurité du réseau électrique.

A. Transformateur de courant

Un transformateur de courant (TC) est un dispositif utilisé pour réduire les courants élevés d'un réseau électrique à des valeurs proportionnelles, sûres et mesurables. Il permet d'alimenter les relais de protection et les instruments de mesure sans exposer ces équipements aux forts courants du réseau. Le TC conserve la proportionnalité entre le courant primaire et le courant secondaire, ce qui permet une mesure précise et fiable tout en assurant la sécurité du personnel et du matériel.

Les transformateurs de courant ont deux fonctions essentielles :

- Adapter la valeur du courant MT du primaire aux caractéristiques des appareils de mesure ou de protection en fournissant un courant secondaire d'intensité proportionnelle réduite.
- Isoler les circuits de puissance du circuit de mesure et/ou de protection.



Sous-station

Figure I.3. Schéma de principe d'un transformateur de courant et schéma équivalent du circuit secondaire d'un TC

B. Transformateur de potentiel ou de tension

Un transformateur de tension (TT ou TP) est un dispositif qui permet de réduire la tension d'un réseau électrique à des valeurs sûres et exploitables par les instruments de mesure et les relais de protection. Il est utilisé pour mesurer la tension efficace dans les barres ou lignes et pour alimenter les dispositifs de surveillance et de contrôle sans exposer ces équipements aux hautes tensions du réseau. Le TT conserve une proportionnalité entre la tension primaire et la tension secondaire selon le rapport de transformation, garantissant ainsi des mesures précises et fiables pour la conduite et la protection du réseau électrique.

La caractéristique la plus importante d'un transformateur de tension est donc son rapport de transformation, par exemple 400 000 V/100 V.

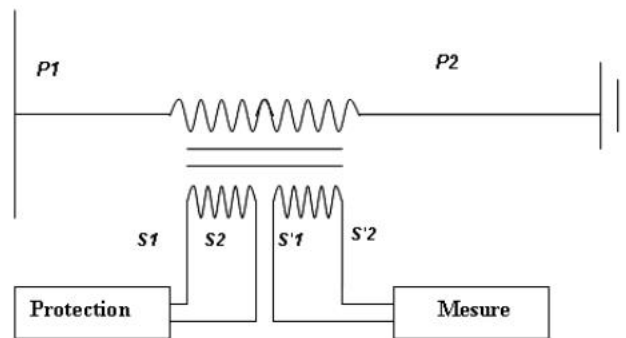


Figure I.4. Transformateur de tension avec double secondaire.

Il existe trois technologies existantes pour le transformateur de tension :

- o Transformateur de tension inductif
- o Transformateur de tension capacitif
- o Transformateur de tension optique

- **Transformateur de tension inductif :**

Un transformateur de tension inductif est un dispositif utilisé pour réduire la tension élevée d'un réseau électrique à des niveaux sûrs et exploitables par les instruments de mesure et les relais de protection. Il fonctionne selon le principe de l'induction électromagnétique : une tension appliquée au primaire crée un flux magnétique dans le noyau, qui induit une tension proportionnelle dans le secondaire. Ce type de transformateur assure une isolation galvanique entre le réseau et les appareils de mesure, tout en conservant une proportionnalité entre la

tension primaire et secondaire selon le rapport de transformation. Les transformateurs de tension inductifs sont largement utilisés pour la télésurveillance, la protection et la mesure de la puissance dans les réseaux électriques.

- **Transformateur de tension capacitif:**

Un transformateur de tension capacitif (TTC) ou transformateur de tension avec capacité conjuguée (CCVT en anglais) est un dispositif utilisé pour réduire les hautes tensions d'un réseau électrique à des niveaux sécurisés pour les instruments de mesure et les relais de protection, en utilisant le principe capacitif plutôt que l'inductif. Il est constitué d'un diviseur capacitif qui abaisse la tension primaire, puis d'un transformateur secondaire pour fournir une tension proportionnelle aux appareils de mesure. Ce type de transformateur offre une bonne précision pour les mesures à haute tension et permet également une isolation galvanique entre le réseau et les instruments. Les TTC sont particulièrement utilisés dans les lignes à très haute tension et dans les stations de transformation pour la télésurveillance et la protection du réseau.

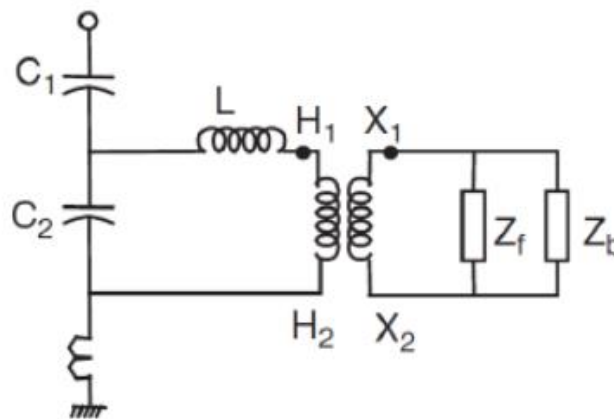


Figure I.5. Schémas équivalent d'un TTC (CCVT)

C. Filtres de composantes symétriques de courant et tension

Les filtres de composantes symétriques sont des dispositifs ou méthodes utilisés pour analyser et séparer les différentes composantes d'un courant ou d'une tension triphasée dans un réseau électrique. Dans un système déséquilibré, les grandeurs triphasées peuvent être décomposées en composantes directe (positive), inverse (négative) et homopolaire (zero). L'utilisation de ces filtres permet d'isoler chaque composante afin de faciliter l'étude des défauts, la protection des équipements et le contrôle du réseau. Les relais et instruments de protection peuvent alors réagir spécifiquement aux défauts détectés dans une composante particulière, améliorant la sélectivité et la fiabilité des protections.

I.4. Généralités sur la protection

Les réseaux de transport d'énergie sont composés d'éléments triphasés tels que les lignes aériennes, les câbles souterrains, les transformateurs de puissance et les jeux de barres. La protection électrique regroupe l'ensemble des dispositifs destinés à isoler rapidement un équipement ou une portion du réseau en cas de défaut. Elle a pour objectif de préserver les équipements et d'assurer la sécurité du personnel, tout en empêchant la propagation du défaut vers les autres parties du réseau qui fonctionnent normalement.

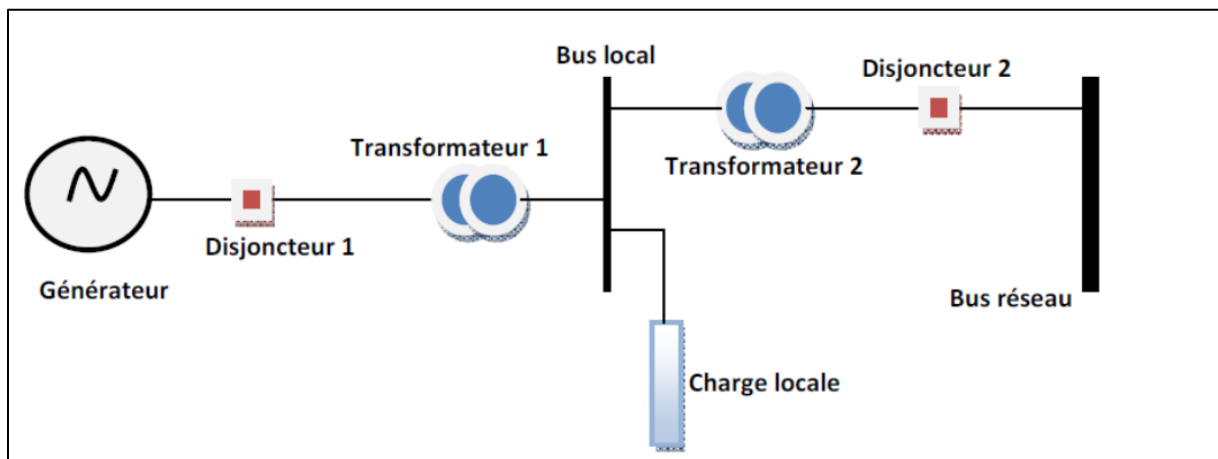


Figure I.6. Schéma unifilaire un réseau triphasé

I.4.1. Objectifs de la protection

La protection électrique a pour objectif principal de préserver les équipements et le personnel contre les dommages causés par des défauts ou des anomalies dans le réseau. Elle permet également d'isoler rapidement la partie du réseau en défaut afin d'éviter la propagation de ce défaut vers d'autres zones en fonctionnement normal. Parmi les objectifs spécifiques, on peut citer :

- ✓ Protéger les équipements contre les dommages
- ✓ Assurer la sécurité du personnel.
- ✓ Maintenir la continuité du service en limitant les interruptions.
- ✓ Garantir la sélectivité : n'isoler que la zone en défaut.
- ✓ Assurer rapidité et fiabilité des interventions pour réduire les impacts.

I.4.2. Qualités principales d'un système de protection :

Un système de protection électrique doit présenter plusieurs qualités essentielles pour être efficace :

1. **Sélectivité** : n'isoler que la partie du réseau affectée par le défaut, sans perturber les zones en bon état. Cela évite des coupures inutiles dans des zones qui ne sont pas en défaut et permet de limiter l'impact sur les consommateurs et le réseau global.
2. **Sensibilité** : détecter même les défauts de faible intensité ou les anomalies subtiles. Une protection sensible assure une réaction appropriée aux premiers signes de problème.
3. **Rapidité** : agir rapidement pour limiter les dommages matériels et les risques pour le personnel ce qui réduit les échauffements, les arcs électriques et les risques de détérioration des équipements et des installations.
4. **Fiabilité** : fonctionner correctement lorsque le défaut survient et éviter les déclenchements intempestifs. Une protection fiable assure la continuité du service et la sécurité du personnel.
5. **Simplicité et robustesse** : être facile à comprendre, à régler et résistant aux conditions d'exploitation.

I.5. Zones de protection

Dans un réseau électrique, la protection est organisée par zones afin de garantir la sécurité et la fiabilité du système. Chaque zone correspond à une portion du réseau ou à un équipement spécifique (ligne, transformateur, alternateur, jeu de barres, etc.) qui est isolée en cas de défaut. Les zones se chevauchent légèrement pour s'assurer qu'aucun point du réseau ne reste sans protection. Cette approche permet aux dispositifs de protection de détecter et d'isoler rapidement les défauts localisés, tout en évitant de couper inutilement d'autres parties du réseau qui fonctionnent normalement. La délimitation des zones est essentielle pour assurer la sélectivité et la coordination des protections dans le réseau.

I.5.1. Différents types de Sélectivité (Mode de Sélectivité)

La sélectivité dans un système de protection désigne la capacité à isoler uniquement la partie du réseau en défaut sans affecter le reste du réseau. Les différents moyens qui peuvent être mis

en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique, les plus importants sont les trois types suivants :

1. Sélectivité ampèremétrique (par les courants) :

Cette méthode consiste à déterminer quel dispositif doit intervenir en fonction de l'intensité du courant. Le relais le plus proche du défaut détecte un courant supérieur à son seuil et déclenche la coupure, tandis que les autres relais restent inactifs.

La sélectivité ampèremétrique présente l'avantage de sa simplicité. Cependant, son principal inconvénient est que les protections situées en amont, proches de la source, ne peuvent pas toujours secourir efficacement celles situées en aval. De plus, il est souvent difficile de régler correctement deux protections en cascade pour obtenir une sélectivité parfaite, car le courant de défaut peut ne pas être suffisamment différent entre deux zones adjacentes. En haute tension, cette méthode est généralement peu adaptée, notamment pour les lignes à faible impédance. En revanche, elle peut être utilisée de part et d'autre d'un transformateur, où les courants sont très différents entre le côté primaire et secondaire, et elle reste adaptée aux installations basse tension.

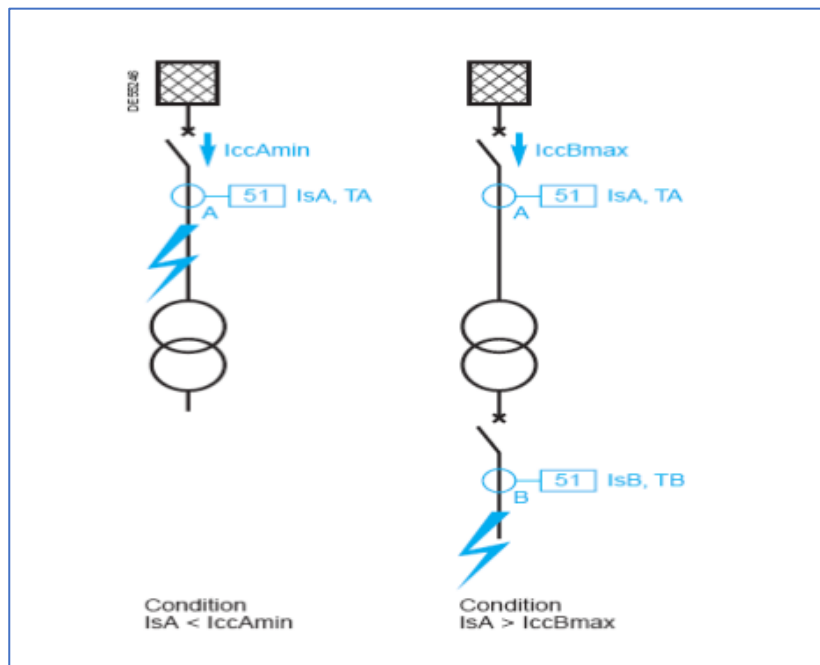


Figure I.7. Sélectivité ampèremétriques

2. Sélectivité chronométrique

La sélectivité chronométrique repose sur l'utilisation de temporisations différentes pour les dispositifs de protection placés en cascade sur un réseau. Le relais le plus proche du défaut déclenche en premier, tandis que les relais situés en amont n'interviennent que si le défaut persiste après un délai prédéfini. Cette méthode permet d'isoler rapidement la zone affectée tout en protégeant le reste du réseau. Elle est fiable même lorsque les courants de défaut sont proches entre deux zones, ce qui la rend particulièrement adaptée aux réseaux haute tension.

Avantages :

- Simple à mettre en œuvre.
- Permet une bonne coordination entre relais en cascade.

Inconvénients :

- Nécessite un réglage précis des temporisations.
- Peut entraîner des délais avant l'isolation complète du défaut.
- Lorsque le nombre de relais en cascade est élevé, la temporisation totale devient très longue, ce qui peut retarder l'isolement complet du défaut.

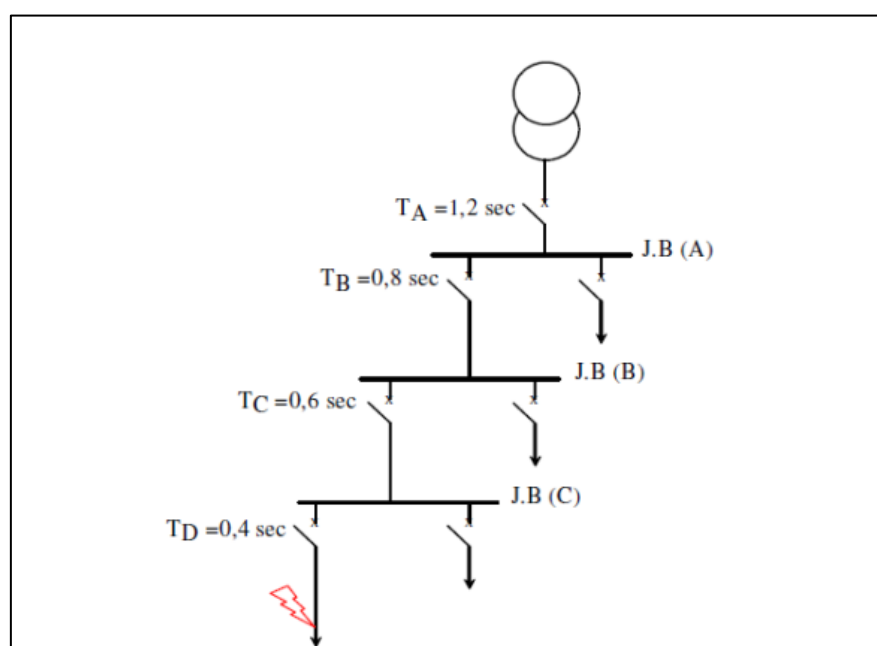


Figure I.8.Sélectivité chronométrique

3. Sélectivité logique

La sélectivité logique repose sur l'échange d'informations entre relais ou dispositifs de protection pour déterminer avec précision quelle zone du réseau est en défaut. Les relais communiquent entre eux afin de déclencher uniquement la coupure dans la zone affectée, sans perturber les autres parties du réseau.

Avantages :

- Permet une coupure rapide et ciblée.
- Offre une sélectivité optimale, même sur des réseaux complexes ou à haute tension.
- Ne dépend pas des différences de courant ou de temporisation.

Inconvénients :

- Nécessite des systèmes de communication fiables entre les relais.
- Plus complexe à mettre en œuvre et à configurer.

I.6. Protections ampèrométriques et voltmétriques

I.6.1. Protections ampermétriques

Les protections ampèremétriques sont basées sur la mesure du courant circulant dans un circuit. Elles détectent les défauts qui provoquent des surintensités, comme les courts-circuits ou les surcharges, et déclenchent les dispositifs de protection pour isoler la zone concernée. Ces protections sont largement utilisées pour assurer la sécurité des lignes, transformateurs et moteurs.

- Le relais thermique protège le système contre les courants de surcharge.
- Le relais électromagnétique intervient pour protéger le système contre les courants de court-circuit.

La coupe circuit à fusible est un appareil de connexion capable de protéger le système contre les surintensités

- Cartouches gI, gII sont à usage général (Protègent le système contre tous les types de surintensités)

- Cartouches aM assurent la protection du système contre les surintensités fortes.

☞ Protection à maximum de courant à temps constant

La protection à maximum de courant à temps constant est un type de protection ampèremétrique qui déclenche la coupure lorsqu'un courant dépasse un seuil prédéfini, après un délai fixe. Ce délai ne varie pas avec l'intensité du courant ; il reste constant quelle que soit la valeur de la surintensité.

Caractéristiques principales :

- Le relais surveille le courant et déclenche uniquement si le courant dépasse le seuil fixé.
- Le temps de déclenchement est fixe, ce qui simplifie la coordination avec d'autres protections.

Avantages :

- Facile à régler et à comprendre.
- Convient aux installations où les courants de défaut sont très différents des courants normaux.

Inconvénients :

- Peu adapté lorsque la surintensité est très variable, car le délai fixe peut être trop long pour des défauts importants.
- Peut ne pas assurer une sélectivité optimale dans les réseaux complexes avec plusieurs relais en cascade.

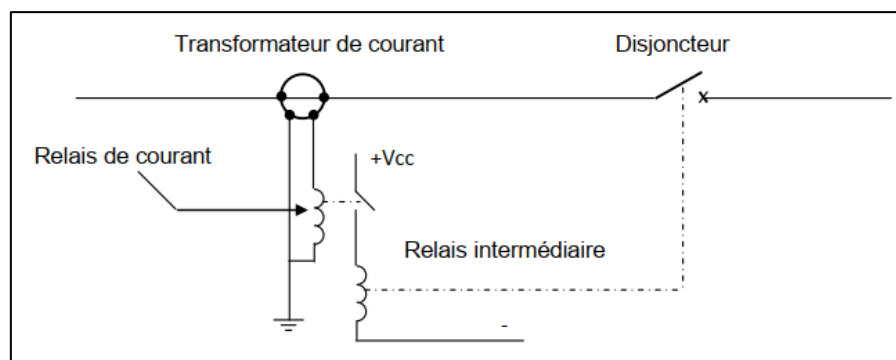


Figure I.9. Protection à maximum de courant à temps constant (Schéma d'une phase)

I.6.2. Protection voltmétrique

Cette protection intervient immédiatement ou après un certain délai lorsque la tension dans le circuit à protéger atteint ou dépasse une valeur prédéfinie (réglage du relais). Les transformateurs de tension sont utilisés pour assurer l'isolement galvanique et pour adapter la grandeur de tension aux niveaux compatibles avec les instruments de mesure et les relais.

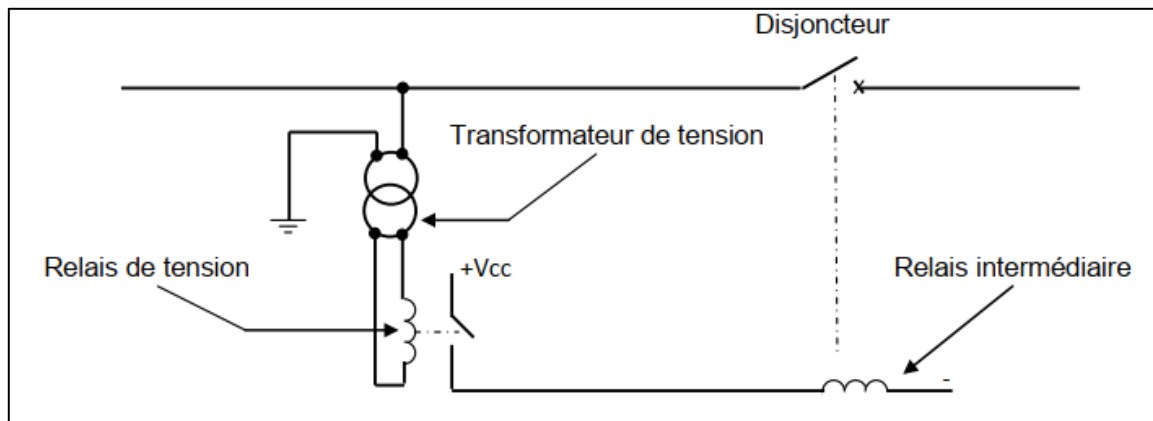


Figure I.10. Protection voltmétriques (schéma d'une phase)