

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
Mourad BELBEY

Thème

ETUDE ET CALCUL DES COURANTS DE COURTS-CIRCUITS TRIPHASES SYMÉTRIQUES ET PERMANENTS

Mémoire soutenu publiquement le mois 2014 devant le jury composé de :

M Ahmed CHALLAL

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Président

M Karim HADJ SAID

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Rapporteur

M Slimane RABAHALLAH

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

M Hamza BESSAI

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier, en premier lieu le **Bon Dieu** de m'avoir donnée le courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à présenter mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à :

- Mon promoteur : **Mr Hadj Saïd**, de m'avoir proposé ce sujet, et pour ses précieux conseils et tout son aide pour mener ce travail.
- J'adresse mes vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- A mes parents qui ont donné beaucoup de sacrifices durant toute ma formation.
- A mes frères et sœurs.
- A toute la famille.
- A tous mes amis

Mourad

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : généralités sur les défauts	
I.1.Introduction.....	2
I.2.Classification des défauts	2
I.2.1.Leur origine	2
I.2.1.1.Défaut d'origine mécanique.....	2
I.2.1.2.Défaut d'origine électrique.....	2
I.2.2.Leurs localisations.....	2
I.2.3.Leur durée.....	3
I.2.3.1.Auto- extincteur.....	3
I.2.3.2.Fugitif.....	3
I.2.3.3.Semi-permanent.....	3
I.2.3.4.Permanent.....	3
I.2.4.Par leurs natures.....	3
I.2.4.1.Court-circuit triphasé.....	3
I.2.4.2.Court-circuit monophasé terre.....	4
I.2.4.3.Court-circuit biphasé, isole.....	4
I.2.4.4.Court-circuit biphasé terre.....	5
I.3.Conséquence des défauts.....	5
I.3.1.Le fonctionnement des réseaux.....	6
I.3.2.La tenue du matériel.....	6
I.3.3.Les chutes de tension.....	6
I.3.4.Les exploitations de disjoncteur.....	6
I.3.5.Les circuits de télécommunications.....	6
I.3.6.La sécurité des personnes.....	7

Sommaire

I.4.Facteur influençant sur la valeur de l'intensité d'un courant de court-circuit.....	7
I.5.Définition de l'intensité de courant de court-circuit.....	7
I.6.Conclusion.....	8
Chapitre 2 : méthode du calcul des courants de court-circuit	
II.1.Calcul des courants de court-circuit par la méthode des valeurs réduites.....	9
II.1.1.Définition.....	9
II.1.2.Changement de base.....	10
II.1.3.Impédances des différents éléments du réseau.....	11
II.1.3.1.Transformateur à deux enroulements.....	11
II.1.3.2.pour les machines tournantes.....	12
II.1.3.3.Pour les générateurs.....	12
II.1.3.4.Pour les lignes.....	12
II.1.4.Impédance du transformateur à trois enroulements.....	12
II.1.5.Couplage du transformateur.....	13
II.1.6.Composante homopolaire.....	14
II.1.6.1.Ligne.....	14
II.1.6.2.Transformateur.....	14
II.1.7.Méthode de calcul.....	14
II.2.Calcul des courants de court-circuit par la méthode des impédances.....	14
II.2.1.Définition.....	14
II.2.2.Les différents types de courant de court-circuit.....	15
II.2.3.Le court-circuit triphasé symétrique.....	15
II.2.4.Impédance équivalente d'un élément à travers un transformateur.....	17
II.2.5.Impédances des liaisons en parallèle.....	17
II.2.6.Expression des impédances en % et tension de court-circuit en %.....	18
II.2.6.1.Les transformateurs.....	18
II.2.6.2.Les machines tournantes.....	19

Sommaire

II.2.7. Valeur des impédances des différents éléments du réseau.....	20
II.2.7.1. Impédance du réseau amont.....	20
II.2.7.2. Impédance des transformateurs.....	21
II.2.7.3. Impédance des liaisons.....	23
II.2.7.4. Résistance linéique.....	23
II.2.7.5. Réactance linéique.....	25
II.2.7.6. Impédance des disjoncteurs et des fusibles.....	27
II.2.8. Impédance d'une alimentation par alternateur.....	27
II.2.8.1. Valeurs typique des impédances subtransitoires, transitoires et synchrones des alternateurs.....	28
II.2.9. Contribution des moteurs à la valeur de courant de court-circuit.....	29
II.2.9.1. Les moteurs synchrones.....	29
II.2.9.2. Les moteurs asynchrones.....	29
Chapitre 3 : Calcul des courants de court-circuit à l'aide des composantes symétriques	
III.1. Introduction	31
III.2. Transformation de Fortescue.....	31
III.2.1. Détermination des expressions de [A], [B], [C].....	33
III.2.2. Relation entre [B] et [C].....	33
III.2.3. Détermination des valeurs propres de [B].....	33
III.2.4. Détermination la matrice de passage.....	34
III.2.5. Expression $[Z_{Ci}]$ en fonction de [A], [F], [D] et $[F^{-1}]$	35
III.2.6. Expression de $V_o V_d V_i$ en fonction de V_1, V_2 et V_3	35
III.3. Identification de la matrice.....	36
III.4. Application.....	36
III.5. Expression de système (I) en fonction de R, L et M.....	37
III.6. Déduisons les expression de Z, Z', Z'' correspondantes et relatives à l'ensemble (source + ligne) en amont de M.....	37

Sommaire

III.7.Application numérique	38
III.8.Calcul des taux de déséquilibre en tension (f.é.m. source) et en courant.....	39
III.8.1.Court-circuit triphasé en régime permanent.....	40
III.8.2.Court-circuit triphasé symétrique.....	40
III.8.2.1.Etude de fondamental.....	41
III.8.2.2.Harmonique trois.....	42
III.8.3.Court-circuit monophasé	45
III.8.3.1.Pour le fondamental.....	45
III.8.3.2.Pour l'harmonique 3.....	46
III.2.1.Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux radiaux à l'aide des composantes symétriques.....	46
III.2.2.Intérêt de cette méthode	46
III.2.3.Rappel sur les composantes symétriques.....	47
III.2.4.Calcul selon la norme CEI 909.....	49
III.2.5.La procédure.....	49
III.2.6.Incidence de la distance séparant le défaut de l'alternateur.....	51
III.2.7.Condition à respecter pour le calcul des courant de court-circuit maximaux et minimaux.....	51
III.2.8.Equations des différents courants.....	52
III.2.8.1.Courant du court-circuit initial $I_{k''}$	52
III.2.8.2.Valeur de crête I_p du courant de court-circuit.....	52
III.2.8.3.Courant de court-circuit coupé I_b	53
III.2.9.Courant de court-circuit permanent I_k	54
III.2.10.Exemple de calcul 1.....	56
III.2.11.Exemple de calcul 2.....	61
III.2.12. pouvoir de coupure de disjoncteur aux extrémités d'une ligne.....	61

Chapitre IV : protection et appareillage

Sommaire

IV.1.Introduction.....	72
IV.2.Plan de protection.....	72
IV.2.1.Définition d'un système de protection.....	72
IV.2.2.Rôle d'un système de protection.....	73
IV.2.3.Qualité d'un système de protection.....	73
IV.2.4.Constitutions d'un dispositif de protection.....	73
IV.3.Protection ampéremétrique et voltométrique.....	73
IV.3.1.Protection ampéremétriques.....	73
IV.3.1.1.Protection à maximum de courant a temps constant.....	74
IV.3.2.Protection voltométrique.....	75
IV.4.Notion de sélectivité.....	75
IV.4.1.Sélectivitéampéremétrique.....	75
IV.4.2.Sélectivitéchronométrique.....	76
IV.4.3.Sélectivité logique.....	77
IV.5.Degrés de sélectivité.....	77
IV.5.1.Sélectivité totale.....	77
IV.5.2.Sélectivité partielle.....	77
IV.6.Les éléments des systèmes de protection.....	77
IV.6.1.Module structural de principe	77
a- Organe de mesure	77
b- Organe de comparaison et de décision.....	78
c- organe d'intervention	78
IV.6.2.Les transformateurs de mesure	78
IV.6.2.1.Les transformateurs de tension.....	79
IV.6.3.Transformateur de mesure pour protection.....	80
IV.6.3.1.Les transformateurs de courant.....	81
IV.6.4.Transformateur de courant alimentant les protections.....	82

Sommaire

IV.7.Les relais de protection.....	83
IV.7.1.Définition.....	83
IV.7.2.Différent type de relais.....	83
IV.7.3.Constitution des relais.....	84
IV.7.3.1.Relais électromécaniques.....	84
IV.7.3.2.Relais électrostatiques.....	85
IV.7.3.3.Relais électroniques, numérique.....	86
IV.8.Les disjoncteurs.....	86
IV.8.1.Les disjoncteurs à l'huile.....	87
IV.8.2.Les disjoncteurs à air comprimé.....	87
IV.8.3.Les disjoncteurs au SF ₆ (hexafluorure de soufre).....	88
IV.8.4.Les disjoncteurs à vide.....	89
IV.9.Fusible.....	90
IV.9.1.Définition.....	90
IV.9.2.Symbole.....	90
IV.9.3.Constitution.....	91
IV.9.4.Fonctionnement.....	91
IV.9.5.Différents classe de fusible.....	91
IV.9.6.Caractéristiques des fusibles.....	92
IV.9.7.Choix de fusible.....	93
IV.10.Protection des transformateurs.....	93
IV.10.1.Protection par relais BUCHHOLZ.....	94
IV.10.2.Protection différentielle.....	95
IV.10.3.Protection masse cuve.....	96
Conclusion générale.....	97

Introduction générale

Les lignes de transport d'énergie électrique constituent une partie essentielle d'un réseau électrique car elles doivent assurer la continuité de l'alimentation des consommateurs en électricité.

Cependant, elles sont souvent exposées à des incidents ou défauts qui peuvent interrompre ce service, et engendrer des pertes financières importantes pour les industriels et des désagréments pour les simples consommateurs.

La majorité des défauts sont dus à des courts-circuits causés souvent par les foudres, les pluies ou les surtensions créées par l'ouverture et la fermeture des disjoncteurs, Ces courts-circuits pouvant être permanents, il est aussi nécessaire de les détecter et les localiser avec précision pour réparer et restaurer l'alimentation dès que possible.

Pour cela, on utilise des dispositifs de protection qui assurent le bon fonctionnement des lignes de transport.

Notre travail consiste à étudier les courants de court-circuit dans les endroits différents du réseau.

Après une étude des généralités sur les défauts nous avons présenté les méthodes de calcul des courants de court-circuit en illustrant notre analyse par des exemples de calcul des courts-circuits survenus dans un réseau électrique.

Nous avons aussi donné un aperçu sur les appareillages de protection contre les défauts en général et contre les courants de court-circuit en particulier.

Enfin nous avons conclu sur le travail effectué en mettant en évidence l'intérêt d'avoir un réseau bien protégé pour prétendre disposer d'une énergie électrique de bonne qualité et d'une grande stabilité.

I.1. Introduction :

Les défauts des courts-circuits sont des incidents majeurs qui peuvent affecter les réseaux électriques. Leurs apparitions donnent naissance à un courant très important et qui peut provoquer la détérioration de l'équipement électrique. Le court circuit est un régime transitoire de caractère électromagnétique pendant lequel l'impédance du système diminue, ce qui justifie d'une part l'augmentation considérable des courants dans les branches et d'autre part la diminution des tensions dans les différentes parties du réseau surtout à l'endroit où le court circuit est survenu.

I.2. Classification des défauts : [1]

Dans les installations électriques, différents courts-circuits peuvent se produire et ils sont principalement caractérisés par :

I.2.1. Leur origine :**I.2.1.1. Défaut d'origine mécanique :**

C'est le cas des lignes aériennes qui sont soumises aux perturbations atmosphériques (foudre, tempêtes ets ...) et les câbles souterrains qui sont exposés aux agressions extérieures (engins mécaniques de terrassement par exemple) qui entraînent systématiquement des courts circuits permanents.

I.2.1.2. Défaut d'origine électrique :

Les matériels de réseaux et des postes électriques, comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblage plus ou moins complexes placés entre parties sous tension et masse. Les isolants subissent des dégradations conduisant à des défauts d'isolation.

I.2.2. Leur localisation :

Le court-circuit peut être interne à un matériel (câbles, moteur, transformateur, tableau...) il entraîne généralement des détériorations.

Comme il peut être externe à un matériel (câbles, moteur, transformateur, tableau...) les conséquences sont limités à des perturbations pouvant entraîner, à plus ou moins longue échéance, des détérioration dans le matériel considéré, et conduit ainsi à un défaut interne.

I.2.3. Leur durée :

Les durées de régimes de court-circuit sont très courtes, ces régimes sont arrêtés par les protections, donc leurs durées sont : [1]

$$t = t_{\text{prot}} + t_{\text{disj}}$$

t_{prot} : le temps de fonctionnement de la protection

t_{disj} : le temps de fonctionnement du disjoncteur

I.2.3.1. Auto-extincteur :

Le défaut peut disparaître de lui-même en un temps très court (environ 50ms), sans provoquer de déclenchement des organes de protection (fusible ou disjoncteur).

I.2.3.2. Fugitif :

Ce sont des défauts qui nécessitent une brève coupure du réseau d'alimentation d'environ 0.3 secondes, sans nécessiter d'intervention, ils sont de l'ordre de 70-90% des défauts

I.2.3.3. Semi-permanent :

Le défaut disparaît après une ou plusieurs coupures longues du réseau d'alimentation (quelques dizaines de secondes) sans nécessiter d'intervention ; ils sont de l'ordre de 5-15% des défauts.

I.2.3.4. Permanent :

Le défaut provoque un déclenchement définitif et nécessite l'intervention du personnel pour la reprise du service ; ils sont de l'ordre de 5-15% des défauts.

I.2.4. Par leurs natures :

D'après l'ordre de fréquence, on distingue quatre types de court-circuit : [2]

I.2.4.1. Court-circuit triphasé : il correspond à la réunion des trois phases ; il est celui provoquant généralement les courants les plus élevés (5% des cas)

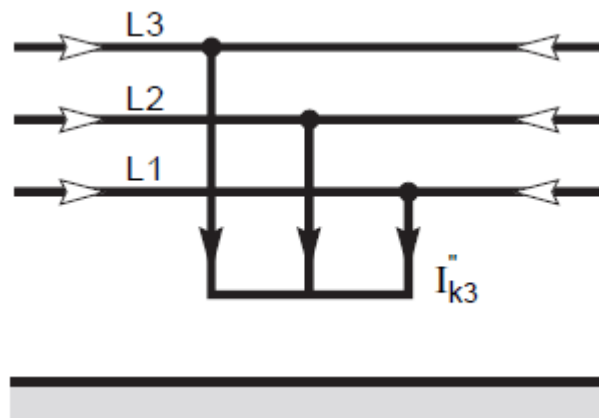


Fig1. Court-circuit triphasé (5% des cas)

I.2.4.2. Court-circuit monophasé terre : il correspond à un défaut entre une phase et la terre il est le plus fréquent (75% des cas)

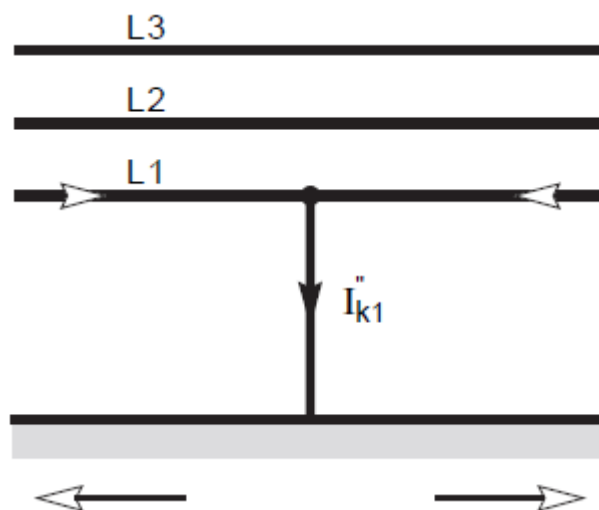


Fig2. Court-circuit monophasé terre (75% des cas)

I.2.4.3. Court-circuit biphasé, isolé : il correspond à un défaut entre deux phases sous tension composée. Le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé, sauf lorsqu'il se situe à proximité immédiate d'un générateur (15% des cas).

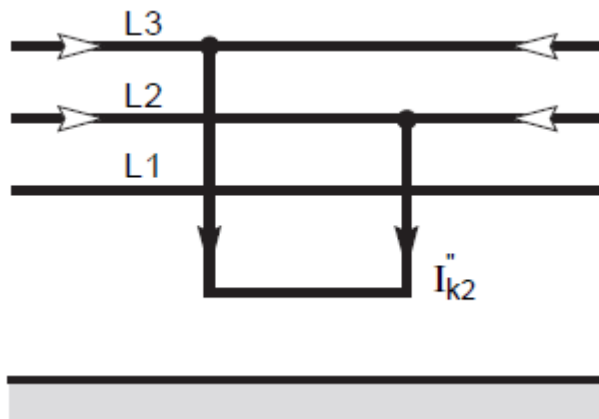


Fig3. Court-circuit biphasé, isolé (15%des cas)

I.2.4.4.Court-circuit biphasé, terre : il correspond à un défaut entre deux phases et la terre.

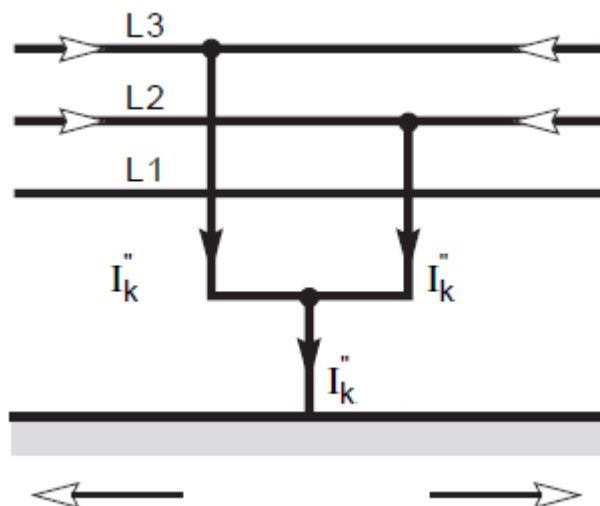


Fig4. Court-circuit biphasé, terre

—→ Courant de court-circuit

—→ Courant de court-circuit partiel dans les conducteurs et la terre

I.3. Conséquences des défauts :

Pendant le court-circuit, l'admittance de la branche en court-circuit augmente. L'importance de la diminution de l'impédance est fonction de la position du point de court-circuit dans le réseau. Le problème majeur du court-circuit, c'est qu'il engendre une augmentation

importante de courant dans quelques branches du réseau. Les défauts peuvent avoir plusieurs conséquences :

I.3.1. Le fonctionnement des réseaux :

Les courts-circuits, surtout lorsqu'ils sont polyphasés et proches des centrales, entraînent une diminution du couple résistant des machines et donc une rupture de l'équilibre entre celui-ci et le couple moteur, s'ils ne sont pas éliminés rapidement, ils peuvent conduire à la perte de stabilité de groupe générateur et des fonctionnements hors synchronisme préjudiciables aux matériels.

I.3.2. La tenue du matériel :

Les courts-circuits provoquent des surintensités violentes qui, amènent deux types de contraintes (thermique dues au dégagement de chaleur par effet Joule dans les conducteurs, et mécaniques dues aux efforts électrodynamiques).

De plus, l'arc électrique consécutif à un court-circuit met en jeu un important dégagement local d'énergie pouvant provoquer des dégâts importants au matériel et même être dangereux pour le personnel travaillant à proximité.

I.3.3. Les chutes de tension :

Les courants de court-circuit provoquent de brusques variations de tension, non seulement sur la ligne mauvaise, mais aussi sur les lignes adjacentes.

I.3.4. Les exploitations de disjoncteurs :

La valeur importante atteinte par les courants de court-circuit peut provoquer l'explosion du disjoncteur, particulièrement s'ils sont d'un type ancien et sont placés sur des réseaux MT alimentés par des transformateurs HT/MT de grande puissance.

I.3.5. Les circuits de télécommunications :

La présence d'un court-circuit dissymétrique entre une ou deux phases d'une ligne d'énergie et la terre entraîne la circulation d'un courant homopolaire qui s'écoule à la terre par les points neutres du réseau. Une tension induite longitudinale, proportionnelle à ce courant, apparaît sur les lignes de télécommunications qui ont un trajet parallèle à la ligne d'énergie.

Cette tension peut atteindre des valeurs dangereuses pour le personnel et les installations de télécommunication.

I.3.6. la sécurité des personnes :

La mise sous tension accidentelle des masses, les élévations de potentiel liées à l'écoulement des courants de défaut à la terre, les conducteurs tombés au sol, sont autant de situations pouvant présenter des risques pour la sécurité des personnes ; le mode de la mise à la terre des points neutres joue un rôle important.

I.4. facteurs influençant sur la valeur de l'intensité d'un courant de court-circuit :

L'intensité du courant de court-circuit est une caractéristique importante ; elle détermine la sévérité de la contrainte appliquée au réseau et au matériel en défaut.

La valeur de cette intensité en un point d'un réseau quelconque dépend de plusieurs facteurs comme :

- la nature des éléments qui constituent le réseau, (alternateur, transformateur, ligne, câbles...);
- La structure topologique de réseau, (radial, boucle, maille...);
- Le mode d'exploitation du réseau : nature isolé ou neutre relié à la terre ;
- La résistance du défaut ;
- Le type de défaut : triphasé, biphasé ou monophasé.

I.5. définition de l'intensité de courant de court-circuit :

L'intensité "I" d'un courant de court-circuit d'un réseau monophasé se définit principalement par l'application de la loi d'ohm.

$$I = \frac{V}{Z} \quad (I.1)$$

Avec :

V : tension simple de la source [kV]

Z : Impédance transitoire pendant le défaut [Ω]

L'intensité de courant de court-circuit dans un réseau triphasé se définit comme suit :

$$I = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (\text{I.2})$$

I.6. conclusion:

Dans ce chapitre on a abordé les généralités sur les différents types de court-circuit, ainsi on a décrit leurs effets sur les réseaux et leur interaction sur les matériels afin d'en déterminer les causes et leur origine.

II.1. Méthode des valeurs réduites : [3]

II.1.1. Définition :

La valeur réduite d'une grandeur physique donnée est le rapport de cette dernière sur une autre grandeur physique de même nature, qui a été choisie arbitrairement comme référence appelée « grandeur de base ».

La tension, l'intensité, la puissance et l'impédance sont tellement reliées que la sélection des valeurs de base pour deux paramètres suffit pour déterminer les valeurs de base des deux autres.

Généralement la puissance en MVA et la tension en kV sont les quantités que l'on choisit afin de spécifier une base.

Pour un système monophasé ou bien triphasé où la grandeur courant est le courant de ligne, le terme tension est la tension simple, et le terme puissance en kW est la puissance par phase, les formules suivantes peuvent être appliquées :

$$I_b = \frac{S_{b(1\Phi)} [kVA]}{V_b [kVA]} \quad (A) \quad (II.1)$$

1Φ: monophasé

3Φ: triphasé

Avec :

U : c'est la tension composée

V : tension simple

$$Z_b = \frac{V_b^2 [kV]}{S_{b(1\Phi)} [MVA]} \quad (\Omega) \quad \text{et} \quad V_b = \frac{U_b}{\sqrt{3}} \quad (II.2)$$

Ainsi
$$S_{b(1\Phi)} = \frac{S_{b(3\Phi)}}{3} \quad (II.3)$$

$$S_b [MVA] = P_b [MW] = Q_b [MVAR]$$

Grandeur réduite = $\frac{\text{grandeur réelle}}{\text{grandeur de base}}$ [Pu] per unit

$$Z_b = X_b = R_b$$

Nous avons aussi en valeurs réduites :

$$U_* = V_* \quad \text{et} \quad P_{*3\Phi} = P_{*1\Phi}$$

Les grandeurs réduites des différents éléments du réseau sont alors :

$$S_* = \frac{S}{S_b}, \quad U_* = \frac{U}{U_b}, \quad I_* = \frac{I}{I_b}, \quad X_* = \frac{X}{X_b} \quad (\text{II.4})$$

Remarque:

- 1- Pour les tensions de base, nous les choisissons toujours égaux aux tensions nominales des transformateurs.
- 2- On choisit autant de tensions de base que de niveaux de tension existant sur le réseau.

Les valeurs données sont toujours en triphasé pour les puissances ; composées pour les tensions sauf spécification.

L'impédance de base et le courant de base peuvent être calculés directement à partir des valeurs triphasées et composées.

$$Z_b = \frac{U_b^2 \text{ [kV]}}{S_{b(3\Phi)} \text{ [MVA]}} \quad (\Omega) \quad (\text{II.5})$$

$$I_b = \frac{S_{b(3\Phi)} \text{ [kVA]}}{\sqrt{3} \cdot U_b \text{ [kV]}} \quad (\text{A}) \quad (\text{II.6})$$

II.1.2. Changement de base:

Quelques fois l'impédance réduite d'un élément du système s'exprime dans une autre base que celle choisie. Comme toutes les impédances doivent s'exprimer par rapport à une même impédance de base, il est nécessaire de trouver un moyen de passer d'un système de base à un autre.

$$Z_{*2} = Z_{*1} * \left(\frac{U_{b1}}{U_{b2}} \right)^2 * \left(\frac{S_{b2}}{S_{b1}} \right) \quad \text{per unit [Pu]} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

U_{b1} : tension dans l'ancienne base

U_{b2} : tension dans la nouvelle base

S_{b1} : puissance de base dans l'ancienne base

S_{b2} : puissance de base dans la nouvelle base

II.1.3. Impédances des différents éléments du réseau :

II.1.3.1. Transformateur à deux enroulements :

$$Z_{*T} = \frac{Z_T(\Omega)}{Z_b(\Omega)} \quad , \quad Z_T = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot U_{cc} \% \quad (\text{II.8})$$

U_n : tension nominale composée (kV)

S_n : puissance nominale en (MVA)

U_{cc} : tension de court-circuit en %

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = X_b = R_b \quad (\text{II.9})$$

$$Z_{*T} = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot U_{cc} \% \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \frac{U_n^2}{U_b^2} \quad (\text{II.10})$$

Comme : $X_{*T} \approx Z_{*T}$ (réseau HT)

$$X_{*T} = U_{cc} \% \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \frac{U_n^2}{U_b^2} \quad (\text{Per unit}) \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Si } \begin{cases} U_b = U_n \\ S_b = S_n \end{cases} \Rightarrow X_{*T} = X_{*Tn} = U_{cc} \% = \frac{U_{cc}}{100} \quad (\text{per unit}) \quad (\text{II.12})$$

Si un calcul rigoureux est demandé :

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$R_T = \frac{\Delta P_{cu}}{3I_n^2} \quad (\text{II.14})$$

ΔP_{cu} : pertes cuivre dans le transformateur

$X_{*d} = X_{*i} = X_{*o}$: valable pour les machines statiques

II.1.3.2. Pour les machines tournantes :

$$X_{*d} \neq X_{*i} \neq X_{*o}$$

X_{*d} : impédance en unité réduite, directe

X_{*i} : impédance en unité réduite, inverse

X_{*o} : impédance en unité réduite, homopolaire

II.1.3.3. Pour les générateurs :

$$X_{*G} = \frac{X_g}{Z_b}, \quad Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\text{II.15})$$

X_{*G} est généralement donnée dans les caractéristiques de la machine

X_G = impédance du générateur

Z_b = impédance de base

II.1.3.4. Pour les lignes :

Les lignes sont toujours caractérisées par les valeurs R_L et X_L données en Ohm ou à la limite calculées à partir des paramètres linéiques X_o , r_o .

$$X_{*L} = \frac{X_L}{Z_b} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (\text{II.17})$$

$$R_{*L} = \frac{R_L}{Z_b} \quad (\text{II.18})$$

II.1.4. Impédances du transformateur à trois enroulements :

$$Z_{*p} = \frac{1}{2}[Z_{*ps} + Z_{*pt} - Z_{*st}]$$

$$Z_{*s} = \frac{1}{2}[Z_{*ps} + Z_{*st} - Z_{*pt}]$$

$$Z_{*t} = \frac{1}{2}[Z_{*pt} + Z_{*st} - Z_{*ps}]$$

Ou :

$$Z^*_{PS} = Z^*_P + Z^*_S$$

$$Z^*_{Pt} = Z^*_P + Z^*_S$$

$$Z^*_{St} = Z^*_S + Z^*_t$$

Avec :

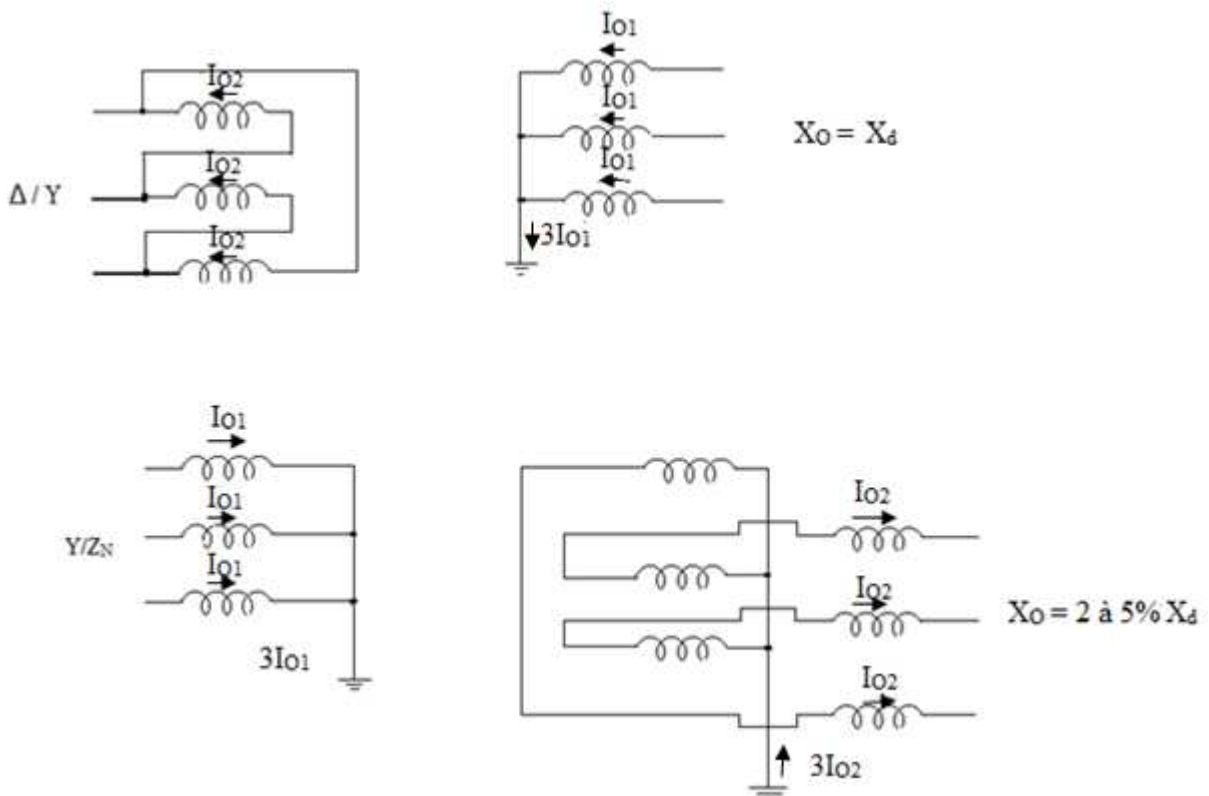
Z^*_{PS} : impédance mesurée au primaire avec le secondaire en court-circuit et le tertiaire ouvert.

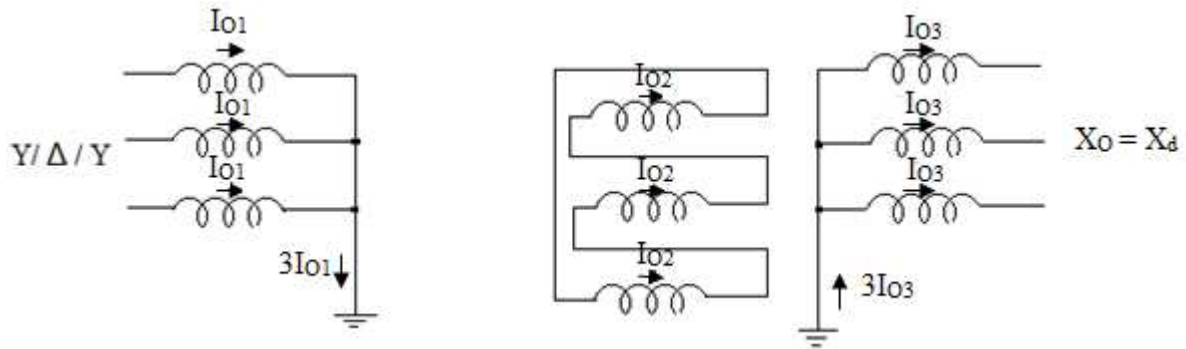
Z^*_{Pt} : impédance mesurée au primaire avec le tertiaire en court-circuit et le secondaire ouvert.

Z^*_{St} : impédance mesurée au secondaire avec le tertiaire en court-circuit et le primaire ouvert.

II.1.5. Couplage du transformateur

réactance homopolaire :





II.1.6. Composante homopolaire :

On utilise les valeurs pratiques, à savoir :

II.1.6.1. Lignes :

$$X_{0*} \approx 3X_{d*}$$

II.1.6.2. Transformateur :

$$X_{0*} = X_{d*} \quad (\Delta/\text{Y}) \text{ flux libre}$$

$$X_{0*} = 10X_{d*} \quad (\Delta/\text{Y}) \text{ flux force}$$

II.1.7. Méthode de calcul:

- On établit le schéma équivalent au réseau en utilisant les réactances des différents éléments
- On ramène toutes les réactances à la tension au point de défaut
- On simplifie le schéma :
- En appliquant les transformateurs Δ -Y et Y- Δ
- En associant les réactances série parallèle.

Le courant de court-circuit correspondant est évidemment égale à :

$$I_{CC} = \frac{U}{\sqrt{3} X_{eq}} \quad (\text{II.19})$$

II.2. Calcul des courants de court-circuit par la méthode des impédances:

II.2.1 Définition:

Le principe de cette méthode consiste à déterminer les courants de court-circuit à partir de l'impédance que représente le (circuit) parcouru par le courant de court-circuit. Cette impédance se calcule après avoir totalisé séparément les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut, depuis et y compris la source d'alimentation du circuit, jusqu'au point considéré.

Le but de cette méthode est de donner tous les éléments permettant de calculer les différents courts-circuits :

II.2.2. Les différents types de courant de court-circuit : [4]

- Triphasé symétrique,
- Monophasé terre,
- Biphase isolé,
- Biphase terre,

En tout point d'un réseau, un calcul détaillé de court-circuit triphasé symétrique en différents point d'un réseau est exécuté à titre d'exemple.

II.2.3. Le court-circuit triphasé symétrique :

Ce défaut correspondant à la figure suivante :

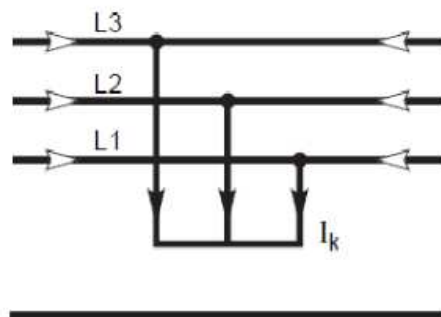


Figure. II.1. court-circuit triphasé symétrique

En général, il provoque les courants de court-circuit les plus importants. Son calcul est indispensable pour choisir les matériels (intensités et contraintes électrodynamiques maximales à supporter).

La méthode de calcul est simple en raison du caractère symétrique du court-circuit. Le courant de court-circuit a la même valeur dans chaque phase, on peut donc faire un calcul en utilisant un schéma monophasé équivalent du réseau amont au court-circuit (figure.II.2), comme on peut le faire en régime normal.

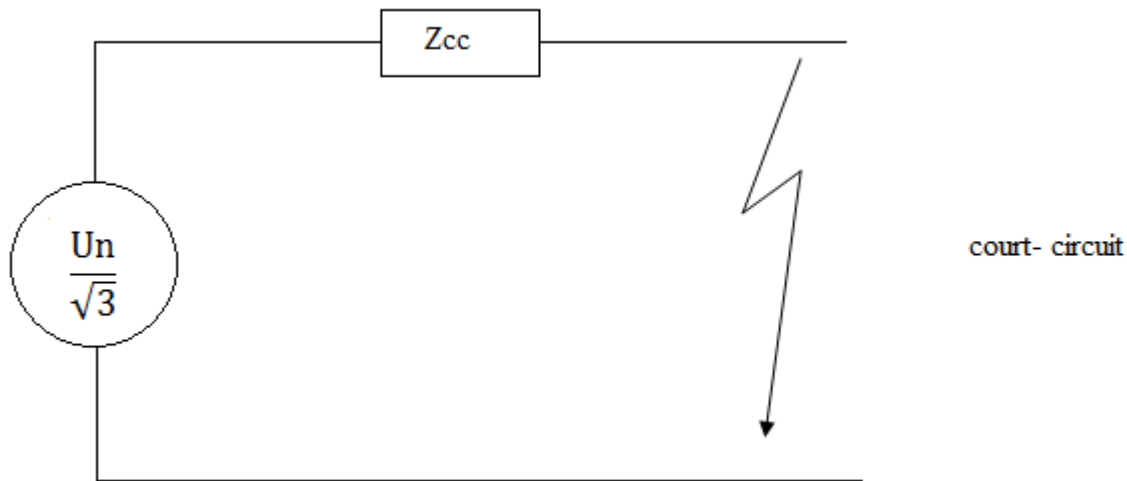


Figure. II.2. schéma monophasé équivalent du réseau amont au court-circuit

La valeur du courant de court-circuit triphasé I_{CC3} est alors :

$$I_{CC3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_{CC}} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

U_n : tension composée entre phases.

Z_{CC} : impédance équivalente à l'ensemble des impédances parcourues par le courant de court-circuit, de la source jusqu'au défaut présumé.

$$Z_{CC} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (\text{II.21})$$

$\sum R$: sommes des résistances en série parcourues par le courant de défaut.

$\sum X$: sommes des réactances en série parcourues par le courant de défaut.

Dans la pratique, on commence par déterminer l'impédance équivalente de la source d'alimentation (alimentation par le distributeur ou par un alternateur de source), puis les impédances de chaque transformateur, câble ou ligne, parcourues par le défaut.

Chaque impédance devra être ramenée au niveau de tension du défaut présumé.

II.2.4. Impédance équivalente d'un élément à travers un transformateur :

Pour un défaut en basse tension, la contribution d'un câble HT en amont du transformateur HT/BT sera :

$$R_{BT} = R_{HT} \left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}} \right)^2 \quad \text{et} \quad X_{BT} = X_{HT} \left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}} \right)^2 \quad (\text{II.22})$$

Ainsi $R_{BT} = Z_{HT} \left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}} \right)^2$

Cette formule est valable quel que soit le niveau de tension du câble c'est-à-dire même à travers plusieurs transformateurs en série.

Exemple :

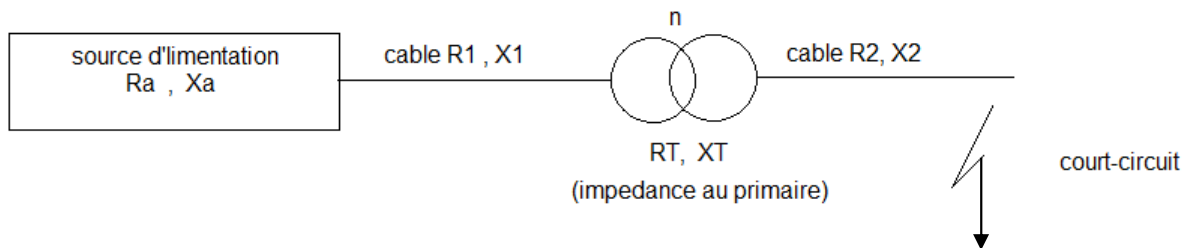


Figure. II.3. Impédance équivalente des éléments à travers un transformateur

n : rapport de transformation

Impédance vue du point de court-circuit :

$$\sum R = R_2 + \frac{R_T}{n^2} + \frac{R_1}{n^2} + \frac{R_a}{n^2}$$

$$\sum X = X_2 + \frac{X_T}{n^2} + \frac{X_1}{n^2} + \frac{X_a}{n^2}$$

II.2.5. Impédance des liaisons en parallèle :

Si le courant de défaut parcourt deux liaisons parallèles d'impédance Z_1 et Z_2 , l'impédance équivalente est :

$$Z_{eq} = \frac{Z_{T1} * Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} \quad (\text{II.23})$$

Si les impédances Z_1 et Z_2 sont différentes, un calcul en nombre complexe est alors à effectuer :

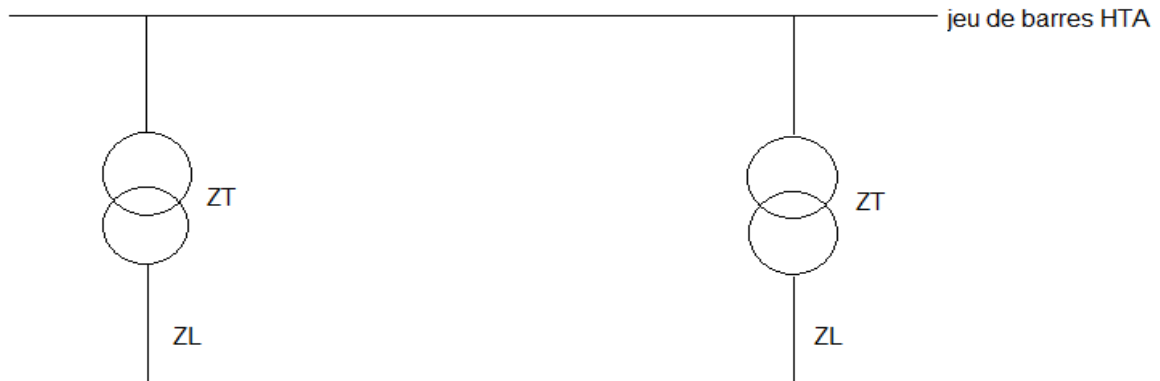


Figure. II.4. Impédance équivalente de deux lignes en parallèle identiques

Z_T : impédance des transformateurs vue du secondaire

Z_L : impédance des liaisons

L'impédance totale Z_{eq} est : $Z_{eq} = \frac{Z_T + Z_L}{2}$ (II.24)

Pour n liaisons en parallèle de même impédance Z , on a $Z_{eq} = \frac{Z}{n}$

II.2.6. Expression des impédances en % et tension de court-circuit en % :

II.2.6.1. Les transformateurs :

Pour les transformateurs, au lieu de donner la valeur de l'impédance totale de court-circuit en Ohms, le constructeur donne la tension de court-circuit U_{CC} exprimée en %

Cette tension de court-circuit représente la tension qui, appliquée au transformateur en court-circuit au secondaire, donne un courant égal au courant nominal.

Si on pose :

$$U_{CC} \text{ en \%} = \alpha$$

On à

$$\frac{\alpha}{100} V_n = Z \cdot I_n$$

D'où

$$Z = \frac{\alpha}{100} \frac{V_n}{I_n}$$

Avec

V_n : la tension nominale simple

Les constructeurs de transformateurs donnent la puissance nominale apparente S_n en [kVA].

$$S_n = 3 V_n I_n \quad (\text{II.25})$$

$$Z = \frac{\alpha}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\text{II.26})$$

Avec

U_n : tension nominale compose ($\sqrt{3} \cdot V_n$)

II.2.6.2. Les machines tournantes :

Pour les moteurs et les alternateurs, au lieu de donner les valeurs des impédances caractéristiques (X_d, X'_d, X''_d) en ohm, les constructeurs donnent celle-ci en % ($X_d (\%), X'_d (\%), X''_d (\%)$).

On a, par définition, la relation suivante :

$$X(\Omega) = \frac{X(\%) V_n}{100 I_n} \quad (\text{II.27})$$

Les constructeurs des machines tournantes donnent la puissance nominale apparente S_n en [kVA].

$$S_n = 3 V_n I_n \quad (\text{II.28})$$

$$X(\Omega) = \frac{3 V_n^2}{S_n} \frac{X(\%)}{100} \quad (\text{II.29})$$

$$X(\Omega) = \frac{U_n^2}{S_n} \frac{X(\%)}{100} \quad (\text{II.30})$$

Avec

U_n : tension composée nominale

On a donc

$$X_d (\Omega) = \frac{U_n^2}{S_n} \frac{X_d(\%)}{100}$$

$$X'_d(\Omega) = \frac{U_n^2}{S_n} \frac{X'_d(\%)}{100}$$

$$X''_d(\Omega) = \frac{U_n^2}{S_n} \frac{X''_d(\%)}{100}$$

II.2.7. Valeurs des impédances des différents éléments du réseau :

Les réseaux électriques sont constitués d’une façon générale : d’un réseau amont (réseau d’alimentation), de transformateurs, d’alternateurs, de moteurs, de disjoncteurs, de câbles, de lignes et jeux de barres. La connaissance de l’impédance de court-circuit dépend de la connaissance des impédances de ces différents éléments le constituant....

II.2.7.1. Impédance du réseau amont :

L’impédance du réseau amont dans la plupart des calculs, ne remonte pas au-delà du point de livraison de l’énergie. La connaissance du réseau amont se limite alors généralement aux indications fournies par le distributeur, à savoir uniquement la puissance de court-circuit S_{CC} (en MVA).

$$Z_a = \frac{U_n^2}{S_{CC}} \tag{II.31}$$

Avec :

U_n : tension composée nominale du réseau ramené de coté moyenne tension.

S_{CC} : puissance de court-circuit fournie par le distributeur.

La résistance amont se déduit à partir du rapport R_a / Z_a (normes CEI60909) donné dans le tableau ci-dessous :

U [kV]	6	20	150
R_a / Z_a	0,3	0,2	0,1

Tableau II.1 [2]

Ainsi, la valeur de la réactance est donnée comme suit :

$$X_a = \sqrt{(Z_a^2 - R_a^2)} \Rightarrow \frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{Z_a}\right)^2} \quad (\text{II.32})$$

II.2.7.2. Impédance des transformateurs :

Elle est déterminée d'après la tension de court-circuit en % ($U_{cc} \%$), de la tension à vide du transformateur (U_0) et de la puissance apparente de ce dernier (S_n). Elle est donnée par la relation suivante :

$$Z_T = \frac{(U_{CC\%} * U_0^2)}{(100 * S_n)} \quad (\text{II.33})$$

La résistance est déterminée d'après la puissance de court-circuit (P_{cc}), la tension à vide et la puissance apparente du transformateur.

$$R_T = \frac{(P_{cc} * U^2)}{S_n^2} \quad (\text{II.34})$$

Alors, la réactance du transformateur est déterminée comme suit :

$$X_T = \sqrt{(Z_T^2 - R_T^2)} \quad (\text{II.35})$$

Remarque :

Pour les transformateurs HTA/HTB, $\frac{R_T}{X_T}$ est proche de 0,05 ; on a alors $Z_T \approx X_T$

L'impédance interne d'un transformateur est donc souvent considérée comme une réactance pure.

Pour les transformateurs de puissance nominale au plus égale à 3150 kVA, les tensions de courts-circuits sont indiquées dans NF C52-113 (voir tableau II.2).

Les valeurs indiquées par cette norme sont valables pour les transformateurs à isolement liquide.

Pour les transformateurs secs, une tension de court-circuit de 6% pourra être prise (elle correspond à la tension de court-circuit de TRIHAL de France transfo de 160 à 2000(kVA).
(Voir tableau II.3)

Tension en kVA	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1800	2000	2500
$U_{cc}(\%)$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Pertes dues à la charge à 75°C(w)	2100	2350	3250	3900	4600	5500	6500	10200	12100	15000	18100	22000	28000
$R_T(m\Omega)$	35,30	15,43	8,74	6,61	4,83	3,7	2,75	2,68	2,03	1,61	1,19	0,92	0,75
$X_T(m\Omega)$	57,23	39,10	25,44	20,30	16,10	12,93	10,31	9,07	8,16	7,22	6,19	5,38	4,65
$Z_T(m\Omega)$	67,24	42,03	26,90	21,35	16,81	13,45	10,67	9,46	8,41	7,40	6,30	5,46	4,71

Tableau II.2 : caractéristiques électriques des transformateurs HTA/BT à isolement liquide pour une tension nominale $U_n = 410V$ [4]

Puissance en KVA	160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000
$U_{cc}(\%)$	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Pertes dues à la charge à 75°C(w)	2300	3400	4800	6800	8200	9600	11500	13900	16000
$R_T(m\Omega)$	15,10	9,14	5,04	2,88	2,15	1,61	1,24	0,91	0,67
$X_T(m\Omega)$	63,04	40,34	25,22	16,01	12,61	10,09	8,07	6,30	5,04
$Z_T(m\Omega)$	61,21	39,29	24,71	15,75	12,43	9,86	7,87	6,23	5,00

Tableau II.3 : caractéristiques électriques des transformateur HTA/BT secs de type TRIHAL pour une tension nominale $U_n= 410V$ [4]

Note 1 : lorsque n transformateurs égaux sont en parallèle et de puissances identiques, leurs valeurs d'impédance équivalente est celle d'un transformateur divisée par n.

$$Z_{eq} = \frac{Z_T}{n} \quad (\text{II.36})$$

Si les transformateurs ne sont pas égaux, il faut considérer l'impédance de chaque transformateur en parallèle. Par exemple pour deux transformateurs :

$$Z_{eq} = \frac{Z_{T1} \cdot Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} \quad (\text{II.37})$$

II.2.7.3. Impédance des liaisons : [2]

L'impédance des liaisons Z_L dépend de leurs résistances, de leurs réactances linéiques ainsi que de leurs longueurs.

II.2.7.4. Résistance linéique :

La résistance linéique R_L des lignes aériennes, des câbles et des jeux de barres est déterminée par la formule suivante :

$$R_L = \left(\frac{\rho}{S} \right) * L \quad (\text{II.38})$$

L : longueur de la liaison en m.

S : section du conducteur en mm^2 .

ρ : résistivité du matériau de l'âme.

Remarque :

a) La résistivité n'est pas la même, elle diffère selon le courant de court-circuit à calculer :

maximum ou minimum [comme le montre le tableau ci-dessous (normes CEI)] :

Règle	Résistivité	Valeur de la résistivité ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	
		Cuivre	Aluminium
Courant de court-circuit maximal	ρ_0	0.01851	0.02941
Courant de court-circuit Minimal :			
- Avec fusible	$\rho_1 = 1.5 \rho_0$	0.028	0.044
- Avec disjoncteur	$\rho_1 = 1.25 \rho_0$	0.023	0.037

Tableau II.4. Valeurs de la résistivité r des conducteurs à prendre en considération selon le courant de court-circuit calculé, maximum ou minimum.

b) Dans le calcul des courants de court-circuit maximum, on tient compte du facteur de tension $C=1.1$ correspondant à la tension maximum, autorisée par le réseau. Pour les courants de court-circuit minimum, on applique le facteur de tension $C=1$ correspondant à la tension minimum autorisée par le réseau.

c) Dans le calcul des courants de court-circuit maximum, on prend dans les câbles la résistance à 20°C . Par contre, dans les courants de court-circuit minimum, on prend la résistance à la température la plus élevée :

$$R_L : [1 + \alpha * (\theta_d - 20^\circ\text{C})] * R_{L20} \tag{II.39}$$

Avec :

R_{L20} : résistance spécifique à 20°C .

θ_d : température admissible par le conducteur à la fin du court-circuit en $^\circ\text{C}$.

α : coefficient de température pris égal à $\frac{0.004}{^{\circ}\text{C}}$.

II.2.7.5. Réactance linéique :

La réactance linéique des lignes aériennes, des câbles et des jeux de barres se calcule par la formule suivante :

$$X_L = L \cdot \omega = [15.7 + 144.44 \log\left(\frac{d}{r}\right)] = X_0 \cdot l \quad (\text{II.40})$$

Avec :

L : Inductance de la ligne ;

l : longueur ;

r : rayon des âmes conductrices ;

d : distance moyenne entre les conducteurs.

NB : Ici, \log = logarithme décimal.

Pour les lignes aériennes, la réactance est proche de celle de vide $\mu_0 \omega$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$)


Les valeurs moyennes à retenir sont :

$X = 0.3 \Omega/\text{km}$ pour les lignes BT ou HTA

$X = 0.4 \Omega/\text{km}$ pour les lignes HTB


Pour les câbles, selon leur mode de pose, le tableau récapitule différentes valeurs de réactance en BT.

Les valeurs moyennes à retenir sont :

- $0.08 \Omega/\text{km}$ pour un câble tripolaire 

Cette moyenne, un peu plus élevée en HT, est comprise entre 0.1 et $0.15 \Omega/\text{km}$;

- $0.09 \Omega/\text{km}$ pour les câbles unipolaires serrés en nappe 

Ou en tringle 

0.15 Ω/km pour les câbles unipolaires espacés $d= 8 r$ 

Pour les jeux de barres, la valeur à retenir est : $0.15 \cdot 10^{-3} \Omega/m$.

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes valeurs de réactance d'après leurs modes de pose.






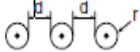
Mode de pose	Jeux de barre	Câble tripolaires	Câble unipolaires espacés	Câble unipolaires serrés en triangle	Trois câbles en nappe serrée	Trois câbles en nappe espacée de «d» $d=2r$, $d= 4r$	
Schéma							
Réactance linéique valeurs recommandées dans UTE C 15-105 (en mΩ/m)		0,08	0,13	0,08	0,09	0,13	0,13
Réactance linéique valeurs moyenne (en mΩ/m)	0,15	0,08	0,15	0,085	0,095	0,145	0,19
Réactance linéique Valeurs extrêmes (en mΩ/m)	0,12-0,18	0,06-0,1	0,1-0,2	0,08-0,09	0,09-0,1	0,14-0,15	0,18-0,20

Tableau II.5. Valeur de la réactance des câbles selon le mode de pose [2]

II.2.7.6. Impédance des disjoncteurs et des fusibles :

Les résistances des disjoncteurs et des fusibles sont, généralement, négligeables. Par contre, leurs réactances sont prises égales à $0.15\text{m}\Omega$ et $0.125\text{m}\Omega$ respectivement.

II.2.8. Impédance d'une alimentation par alternateur : [4]

Le courant de court-circuit évolue suivant les trois stades suivant :

Subtransitoire (X_d'') : intervenant pendant 10 à 20 ms après le début de défaut

Transitoire (X_d') : se prolongeant jusqu'à 100 à 400ms.

Synchrone (X_d) : réactance permanente ou synchrone à considérer après la période transitoire.

Pour la vérification des contraintes électrodynamiques, le courant de court-circuit maximal est calculé d'après la réactance transitoire.

$$I_{CC3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_d'} \quad (\text{II.41})$$

Avec

U_n : tension composée nominal.

Pour vérifier les contraintes thermique des machines, le courant de court-circuit maximal est calculé d'après la réactance transitoire

$$I_{CC3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_d'} \quad (\text{II.42})$$

Pour le réglage du seuil des protections à maximum de courant phase, notamment lorsque l'alternateur peut fonctionner îlot du réseau de distribution, le courant de court-circuit minimal est calculé d'après la réactance transitoire.

$$I_{CCb, \min} = \frac{U_n}{2X_d'} \quad (\text{II.43})$$

Il n'est généralement pas tenu compte du régime permanent en supposant que les dispositifs de protection coupent pendant le régime transitoire ou que le courant de court-circuit est maintenu à $3 I_n$, on règle alors le seuil de la protection en dessous de cette valeur.

Dans le cas contraire, on utilise une protection à maximum de courant de phase à retenue de tension.

Pour déterminer le pouvoir de coupure des disjoncteurs basse tension, le courant de court-circuit maximal est calculé d'après la réactance subtransitoire

$$I_{CC3} = \frac{U_n}{\sqrt{3X_d''}} \quad (\text{II.44})$$

Généralement il est bien inférieur au courant de court-circuit alimenté par le distributeur.

Pour déterminer le pouvoir de coupure, des disjoncteurs haute tension, il faut déterminer la composante périodique et la valeur de la composante aperiodique à l'instant d'ouverture minimal des contacts, auquel on ajoute une demi-période de la fréquence assigné. Ces valeurs devront être transmises au constructeur pour accord ou essai.

II.2.8.1. Valeurs typiques des impédances subtransitoires, transitoires et synchrones des alternateurs :

S(KVA)	75	200	400	800	1600	2500
X_d'' (%)	10,5	10,4	12,9	10,5	18,8	19,1
X_d' (%)	21	15,6	19,4	18	33,8	30,2
X_d (%)	280	291	358	280	404	292

Tableau II.6 : Impédance subtransitoires, transitoires et synchrones des alternateurs

Leroy-Somer 4 pôles, tension composée 400V ; f = 50Hz [4]

S(KVA)	2200	2800	3500
X''_d (%)	15,5	14	13
X'_d (%)	25,5	24,4	23
X_d (%)	235	230	225

Tableau II.7 : Impédance subtransitoires, transitoires et synchrones des alternateurs Leroy-Somer 4 pôles, tension composée 6KV ; f = 50Hz [4]

S(KVA)	1500	2500	3250
X''_d (%)	15,5	14,5	14
X'_d (%)	27,5	26,5	25,5
X_d (%)	255	255	250

Tableau II.8 : Impédance subtransitoires, transitoires et synchrones des alternateurs Leroy-Somer 4 pôles, tension composée 11KV ; f = 50Hz [4]

II.2.9. contribution des moteurs à la valeur du courant de court-circuit :

II.2.9.1. Les moteurs synchrones :

Ils ont une contribution équivalente à celle des alternateurs car, lors d'un court-circuit, ils marchent en alternateur. Ils sont donc équivalents à une source de tension d'impédance interne X'_d ou X''_d .

II.2.9.2. Les moteurs asynchrones :

Lors d'un court-circuit, ils ont un courant qui s'atténue assez rapidement, avec une constante de temps d'environ :

10 ms pour les moteurs à simple cage jusqu'à 100 KW

20 ms pour les moteur à double cage et les moteurs de plus 100 KW

30 à 50 ms pour les très gros moteurs (1000 KW) à rotor bobiné.

Les moteurs asynchrones sont équivalents à une source de tension à laquelle on attribue une impédance transitoire X'_M telle que :

$$X'_M(\%) = \frac{1}{\eta \cos \varphi} * \frac{I_n}{I_d} * 100 \quad (\text{II.45})$$

Avec :

η : Rendement du moteur

$\cos \varphi$: Facteur de puissance du moteur

$\frac{I_n}{I_d}$: Rapport du courant nominal au courant de démarrage du moteur

En l'absence d'information précise, on pourra prendre $\eta \cos \varphi = 0.8$ et $\frac{I_n}{I_d} = 6$, ce qui nous donne $X'_M = 21 \%$.

III.1.Introduction :

L'étude des courts-circuits dans les systèmes triphasés passe par deux aspects : l'étude des régimes transitoires et celle des régimes permanents. Pour pouvoir systématiser l'étude de ces derniers on est amené à tenir compte de certaines particularités, de constitution des distributions triphasées et des réseaux correspondants. L'utilisation dans ces cas particuliers de la transformation de Fortescue rend les calculs plus aisés.

Le présent chapitre propose l'étude et les justifications de la transformation de Fortescue pour les réseaux à structure impédante «circulante», ce qui est le cas des réseaux triphasés et des générateurs triphasés d'alimentation et de distribution initialement équilibrés.

Dans une seconde partie on étudie quelques applications avec, en outre, l'analyse de cas où il y a présence d'un harmonique 3 en plus du fondamental.

III.2.Transformation de Fortescue :

On étudie un système de distribution d'énergie triphasé en se plaçant en régime sinusoïdal permanent de pulsation ω . Le système est modélisable suivant le schéma de la figure suivante :

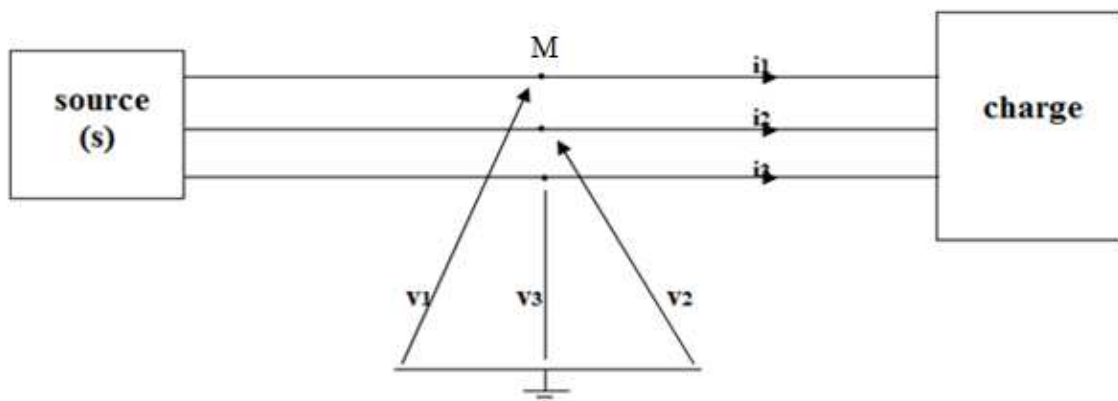


Figure.III.1.Modélisation du système triphasé

Entre source et récepteur en un point M de la ligne les tensions par phase évaluées par rapport à un potentiel de référence (terre) soit v_1 , v_2 , v_3 et les courants sont respectivement i_1 , i_2 , i_3 . Cote source les f.e.m sont e_1 , e_2 , e_3 pour un montage en étoile.

Pour la suite quand on travaille à une fréquence déterminée, on désigne par x_k l'amplitude complexe associée à la fonction sinusoïdale x_k .

Dans le cas où la fonction x_k présente plusieurs fréquences f_i, f_j, \dots on aura le soin de travailler séparément dans chaque plan de Fresnel à $\omega_i; \omega_j \dots$ et d'appliquer ensuite le théorème de superposition des états de régimes permanents, les systèmes sur lesquels on travaille étant des systèmes régis par des équations linéaires.

Par hypothèse, le régime étudié est caractérisable par le système d'équation (I)

$$\begin{cases} \underline{E}_1 = \underline{V}_1 + \underline{Z} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}' \cdot \underline{I}_2 + \underline{Z}'' \cdot \underline{I}_3 \\ \underline{E}_2 = \underline{V}_2 + \underline{Z}'' \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z} \cdot \underline{I}_2 + \underline{Z}' \cdot \underline{I}_3 \\ \underline{E}_3 = \underline{V}_3 + \underline{Z}' \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}'' \cdot \underline{I}_2 + \underline{Z} \cdot \underline{I}_3 \end{cases} \quad (\text{I})$$

Les quantités $\underline{Z}, \underline{Z}', \underline{Z}''$ homogènes à des impédances sont caractéristiques de la structure «amont» de M cotés génératrices.

En écriture matricielle le système précédent se met sous la forme.

$$\begin{cases} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \\ \underline{E}_3 \end{cases} = \begin{cases} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{cases} + \begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} \end{bmatrix} \begin{cases} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{cases} \quad (\text{I bis})$$

Ce que nous noterons de façon condensée :

$$[\underline{E}_K] = [\underline{V}_K] + [\underline{Z}_{ci}] [\underline{I}_K] \quad (\text{I bis})$$

La matrice $[\underline{Z}_{ci}]$ a la propriété d'être «circulante» c'est-à-dire que la 2^{ème} ligne est obtenue à partir de la 1^{ère} par permutation circulaire (ou décalage à droite), de même pour la 3^{ème} ligne à partir de la 2^{ème}. (On vérifiera ultérieurement qu'il en est ainsi sur un cas simple.)

Dans le but de déterminer des systèmes triphasés équivalents à la configuration précédente on écrit la matrice $[\underline{Z}_{ci}]$ sous forme :

$$[\underline{Z}_{ci}] = \underline{Z} [A] + \underline{Z}' [B] + \underline{Z}'' [C] \quad (\text{II})$$

Dans cette expression, les quantités $[A], [B], [C]$ sont des matrices 3×3 dont les éléments sont 0 ou 1.

III.2.1. Détermination des expressions de [A], [B] et [C] :

La matrice $[Z_{ci}]$ s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}' & \underline{Z}'' \\ \underline{Z}'' & \underline{Z} & \underline{Z}' \\ \underline{Z}' & \underline{Z}'' & \underline{Z} \end{bmatrix} = \underline{Z} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \underline{Z}' \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \underline{Z}'' \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice $[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ correspond à la matrice unité 3×3 que l'on note usuellement $[I]$.

$$\text{La matrice } [B] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice } [C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

III.2.2. Relation entre [B] et [C] :

La matrice $[B]$ élevée au carré donnera :

$$[B]^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B]^2 = [C]$$

III.2.3. Détermination des valeurs propres de [B] :

Soit λ_1, λ_2 et λ_3 des valeurs propres

On calcule suivant les méthodes habituelles :

$$\text{Det} ([B] - \lambda [I]) = \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & 0 \\ 0 & -\lambda & 1 \\ 1 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = -\lambda^3 + 1$$

Donc l'équation caractéristique est $-\lambda^3 + 1 = 0$

Les racines λ_k sont donc les racines cubiques de l'unité, on donne l'ordre suivant pour λ_k .

$$\lambda_1 = 1$$

$$\lambda_2 = a^2 = \exp\left(j\frac{4\pi}{3}\right).$$

$$\lambda_3 = a = \exp\left(j\frac{2\pi}{3}\right)$$

III.2.4. Détermination de la matrice de passage :

Diagonalisons [B] ; ce qui permet d'écrire

$$[B] = [F] \cdot [D] \cdot [F^{-1}] \quad \text{où} \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

La matrice de passage est la matrice des vecteurs propres en colonne. Les vecteurs propres sont respectivement :

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ Pour la valeur propre } 1 ;$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} \text{ Pour la valeur } a^2 ; \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} \text{ pour les valeurs } a ;$$

La matrice de passage est donc :

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ qui est la matrice de Fortescue}$$

Notons au passage que

$$F^{-1} = \frac{1}{3} F^* ; \quad \text{où} \quad (F^*) \text{ désigne la matrice des éléments conjugués de } F$$

La matrice diagonale D est :

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a^2 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix}$$

III.2.5. Expressions $[Z_{Ci}]$ en fonction de $[A]$, $[F]$, $[D]$ et $[F^{-1}]$

La matrice \underline{Z}_{Ci} s'écrit :

$$\underline{Z}_{Ci} = Z \cdot (I) + Z' \cdot (F) (D) (F^{-1}) + Z'' \cdot (F) (D^2) (F^{-1})$$

d'où

$$(E_k) = (V_k) + [Z (I) + Z' (F) (D) (F^{-1}) + Z'' (F) (D^2) (F^{-1})] I_k$$

On multiplie alors à gauche par F^{-1} et on développe la parenthèse (i_e : on distribue (I_k) sur la quantité entre crochet) :

$$(F^{-1}) (E_k) = (F^{-1}) (V_k) + Z \cdot (F^{-1}) (I_k) + Z' \cdot (D) (F^{-1}) (I_k) + Z'' (D^2) (F^{-1}) (I_k)$$

$$(F^{-1}) (E_k) = (F^{-1}) (V_k) + [Z \cdot (I) + Z' (D) + Z'' (D^2) (F^{-1})] (I_k)$$

On peut alors remarquer que :

$(F^{-1}) (E_k)$; $(F^{-1}) (V_k)$ et $(F^{-1}) (I_k)$ définissent les valeurs colonnes des composants symétriques des f.e.m, tensions, courants respectivement :

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \\ \underline{E}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{E}_o \\ \underline{E}_d \\ \underline{E}_i \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}_o \\ \underline{V}_d \\ \underline{V}_i \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_o \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix}$$

III.2.6. Expression de \underline{V}_o , \underline{V}_d , \underline{V}_i en fonction de \underline{V}_1 , \underline{V}_2 et \underline{V}_3 :

Le développement de la 2^{ème} expression matricielle précédente conduit à :

$$\begin{cases} \underline{V}_o = \frac{1}{3} (\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3) \\ \underline{V}_d = \frac{1}{3} (\underline{V}_1 + a\underline{V}_2 + a^2\underline{V}_3) \\ \underline{V}_i = \frac{1}{3} (\underline{V}_1 + a^2\underline{V}_2 + a\underline{V}_3) \end{cases}$$

Sur un réseau triphasé symétrique et en régime déséquilibré la transformation de Fortescue rend indépendants les 3 systèmes direct, inverse, homopolaire.

III.3. Identification de la matrice :

$$[Z \cdot (I) + Z' (D) + Z'' (D)^2]$$

La matrice $[Z \cdot (I) + Z' (D) + Z'' (D)^2]$ est une matrice diagonale que l'on peut identifier à

$$\begin{bmatrix} Z_o & 0 & 0 \\ 0 & Z_d & 0 \\ 0 & 0 & Z_i \end{bmatrix}$$

Soit :

$$\begin{bmatrix} Z_o & 0 & 0 \\ 0 & Z_d & 0 \\ 0 & 0 & Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}'' & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}'' \end{bmatrix}$$

D'où le résultat :

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_o = \underline{Z} + \underline{Z}' + \underline{Z}'' \\ \underline{Z}_d = \underline{Z} + a^2 \underline{Z}' + a \underline{Z}'' \\ \underline{Z}_i = \underline{Z} + a \underline{Z}' + a^2 \underline{Z}'' \end{bmatrix}$$

Ces relations vont nous permettre les calculs des impédances homopolaires, directes et inverses.

III.4. Application :

Le circuit suivant comporte une source triphasée de f.e.m $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, sinusoïdales quelconques, dépourvue d'impédance interne (Source de Thevenin).

$$\begin{cases} e_1(t) = E_1 \sqrt{2} \sin (\omega t - \alpha) \\ e_2(t) = E_2 \sqrt{2} \sin (\omega t - \beta) \\ e_3(t) = E_3 \sqrt{2} \sin (\omega t - \gamma) \end{cases}$$

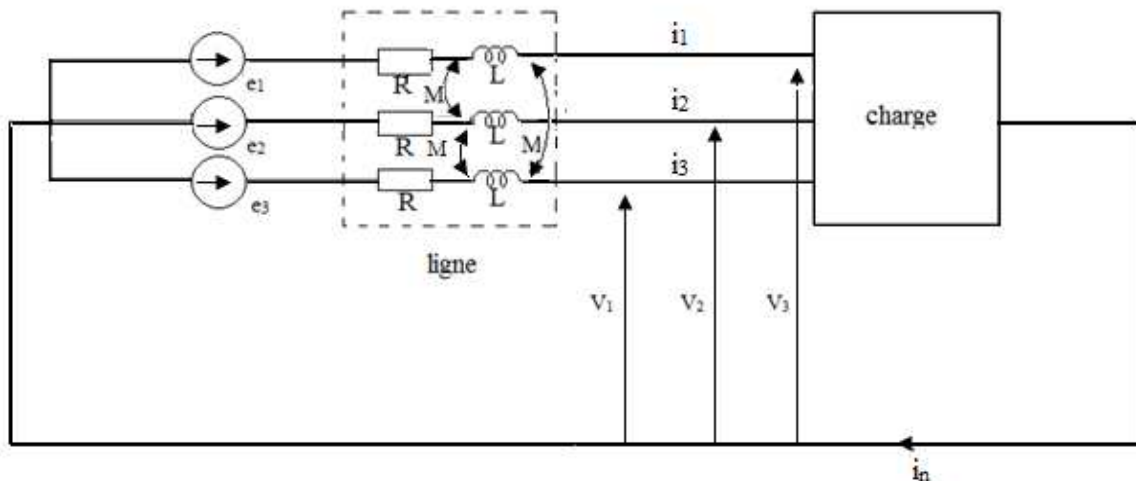


Figure.III.2. source de thevenin + ligne symétrique + charge déséquilibrée, neutres reliés

La ligne entre la source et le point M a une résistance R et une inductance L par fil de ligne.

En outre, chaque fil comporte une mutuelle M avec chacune des phases

$$M_{ij} = M_{jk} = M \text{ pour tout } i, j, k \in [1, 2, 3].$$

La charge est caractérisée par des impédances homopolaire, direct et inverse : I_n

$$Z_{or} = \infty ; Z_{dr} = 15 + 20j ; Z_{ir} = 5j$$

III.5.Expression de système (I) en fonction de R, L et M.

La loi d'ohm exprimée pour partie (source + ligne) conduit à :

$$\begin{cases} \underline{E}_1 = \underline{V}_1 + R\underline{I}_1 + jL\omega\underline{I}_1 + jM\omega\underline{I}_2 + jM\omega\underline{I}_3 \\ \underline{E}_2 = \underline{V}_2 + R\underline{I}_2 + jL\omega\underline{I}_2 + jM\omega\underline{I}_1 + jM\omega\underline{I}_3 \\ \underline{E}_3 = \underline{V}_3 + R\underline{I}_3 + jL\omega\underline{I}_3 + jM\omega\underline{I}_2 + jM\omega\underline{I}_1 \end{cases}$$

III.6.Déduction les expressions de $\underline{Z}, \underline{Z}', \underline{Z}''$ correspondantes et relatives à l'ensemble (source +ligne) en amont de M :

$$\underline{Z} = R + j L \omega ; \quad \underline{Z}' = j M \omega ; \quad \underline{Z}'' = j M \omega.$$

et donc

$$\underline{Z}_0 = R + j (L + 2 M) \omega ; \quad \underline{Z}_d = \underline{Z}_i = R + j (L - M) \omega.$$

III.7. Application numérique :

$$R = 0,5\Omega ; \quad L \omega = 2\Omega ; \quad M \omega = 0,75\Omega ; \quad \alpha = 0 ; \quad \beta = \frac{2\pi}{3} ; \quad \gamma = \frac{4\pi}{3}$$

$$E_3 = E_2 = 220V ; \quad E_1 = 110V.$$

Calculons les courants en ligne.

Au départ on peut écrire

$$\begin{cases} \underline{E}_2 = a^2 E_1 = 220 a^2 = a^2 E \\ \underline{E}_3 = a E \\ \underline{E}_1 = \frac{1}{2} E \end{cases}$$

Les composants symétriques des f.e.m sont :

$$\begin{cases} 3E_0 = a^2 E + aE + \frac{1}{2} E = \frac{-E}{2} \\ 3E_d = \frac{E}{2} + a(a^2 E) + a^2(aE) = \frac{5E}{2} \\ 3E_i = \frac{E}{2} + a^2(a^2 E) + a(aE) = \frac{-E}{2} \end{cases}$$

Les impédances en ligne sont :

$$\begin{cases} \underline{Z}_0 = 0,5 + 2j + 1,5j \\ \underline{Z}_d = 0,5 + 1,25j \\ \underline{Z}_i = 0,5 + 1,25j \end{cases}$$

On déduit alors :

$$\begin{cases} \frac{-E}{6} = (\infty + 0,5 + j3,5)I_0 \\ \frac{5E}{6} = (0,5 + 1,25j + 15 + 20j)I_d \\ \frac{-E}{6} = (0,5 + 1,25j + 5j)I_i \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_0 = 0 \\ I_d = \frac{1100}{6(15,5+21,25j)} \\ I_i = \frac{-220}{6(0,5+6,25j)} \end{cases}$$

Ces complexes peuvent s'écrire (module+argument)

$$\begin{cases} I_0 = 0 \\ I_d = 6.97 \exp(j C_d) \\ I_i = 5.85 \exp(j C_i) \end{cases} \quad \text{Ou} \quad \begin{cases} \varphi_d = -0.941 \text{ rad} = 53.915^\circ \\ \varphi_i = 1.651 \text{ rad} = 94.6^\circ \end{cases}$$

On peut alors "expliciter" les complexes associés aux courants de ligne :

$$\begin{cases} I_1 = I_d + I_i = 3.641 + 0.198j = 3.647e^{j\varphi_1} \\ I_2 = a^2 I_d + a I_i = -11.75 - 4.06j = 12.43e^{j\varphi_2} \\ I_3 = a I_d + a^2 I_i = 8.105 + 3.86j = 8.98e^{j\varphi_3} \end{cases}$$

$$\text{Où} \quad \begin{cases} \varphi_1 = 0.054 \text{ rad} = 3.11^\circ \\ \varphi_2 = -2.81 \text{ rad} = -160.9^\circ \\ \varphi_3 = 0.445 \text{ rad} = 25.48^\circ \end{cases}$$

Les fonctions temporelles correspondantes sont :

$$i_1(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + 0.054)$$

$$i_2(t) = I_2 \sqrt{2} \sin(\omega t - 2.809)$$

$$i_3(t) = I_3 \sqrt{2} \sin(\omega t + 0.445)$$

On peut noter que les courants i_2 et i_3 sont pratiquement en opposition de phase. Ce qui confirme le calcul :

$$\varphi_2 - \varphi_3 = 186.4^\circ \text{ qui est très proche de } 180^\circ.$$

III.8. Calculs des taux de déséquilibre en tension (f.e.m source) et en courant :

Les taux de déséquilibre se déduisant des résultats précédents :

$\frac{E_i}{E_d} = \frac{1}{5}$ soit 20% en valeur relative (ce qui est beaucoup en égard aux normes de distribution).

$\frac{E_i}{E_d} = \frac{5.848}{6.97}$: on voit que l'installation aura besoin de corriger ce déséquilibre.

2^{ème} partie**III.8.1. Court-circuit triphasés en régime permanent :**

Dans cette partie on envisage d'étudier le cas d'un alternateur de petite puissance fonctionnant en source autonome (groupe électrogène de secours) cet alternateur délivre trois tensions $e_1(t)$; $e_2(t)$; $e_3(t)$ telles que :

$$\begin{cases} e_1(t) = E \sqrt{2} \sin \omega t + E' \sqrt{2} \sin 3\omega t \\ e_2(t) = e_1 \left(t - \frac{2T}{3} \right) \\ e_3(t) = e_1 \left(t - \frac{4T}{3} \right) \end{cases}$$

Avec : $E = 220V$; $E' = 39V$

L'analyse du fonctionnement interne de ce type de machine (machine synchrone imparfaite mais de constitution symétrique) conduit à mettre en évidence trois impédances Z, Z', Z'' du type envisagé à la première partie et donc à lui conférer des impédances internes pour chacun des régimes de fonctionnement :

- Régime à pulsation ω (fréquence f) ; impédances homopolaire, directe, et inverse :

$$Z_0 = j X_0 = 0.4j ; \quad Z_d = R + j X_d = 0.4 + 2.2j ; \quad Z_i = j X_i = 0.6j$$

- Régime à pulsation 3ω (fréquence $3f$), impédance homopolaire, directe et inverse

$$Z'_0 = j x'_0 = 1.2j ; \quad Z'_d = R + j x'_d = 0.4 + 6.6j ; \quad Z'_i = j x'_i = 1.8j$$

III.8.2. Courts-circuits triphasés symétriques :

- Composantes symétriques, $\underline{E}_0, \underline{E}_d, \underline{E}_i$ des f.e.m e_1, e_2, e_3 relatives à la pulsation ω .

Pour la pulsation ω (fondamentale) la f.e.m est triphasée et équilibrée donc :

$$E_0 = 0 ; \quad E_i = 0 ; \quad E_d = E = 220 V$$

- Composante symétrique $\underline{E}_0, \underline{E}_d, \underline{E}_i$ des f.e.m e_1, e_2, e_3 relatives à la pulsation 3ω .

Pour la pulsation 3ω il n'y a qu'un système homopolaire comme le montre le développement de e_2 et de e_3 .

Nous avons :

$$e_1(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega t) + E'\sqrt{2} \sin(3\omega t)$$

$$e_2(t) = e_1\left(t - \frac{2T}{3}\right) = E\sqrt{2} \sin(\omega t) + E\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$e_3(t) = e_1\left(t - \frac{4T}{3}\right) = E\sqrt{2} \sin(\omega t) + E\sqrt{2} \sin(3\omega t)$$

- Un court-circuit triphasé s'établit sur la ligne en sortie de l'alternateur (figure.III.3)

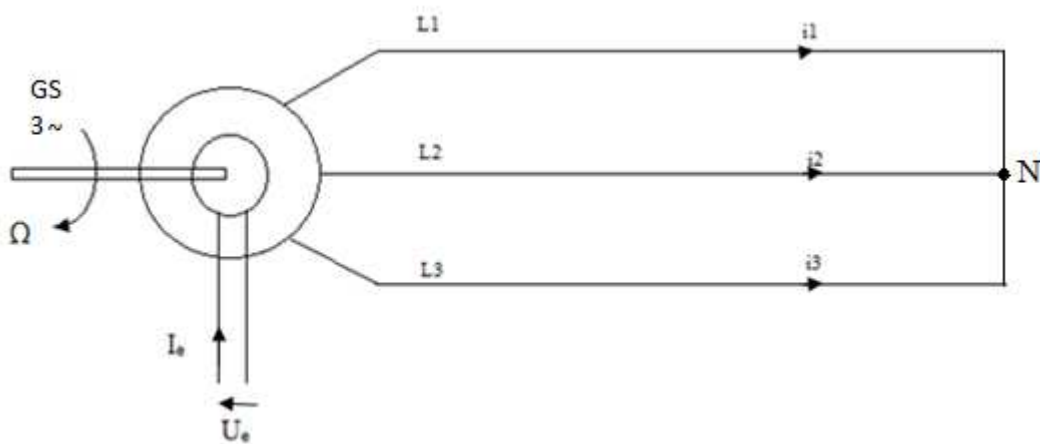


Figure.III.3.Court-circuit triphasé symétrique.

Déterminons les valeurs des composantes symétriques des courants i_1, i_2, i_3 en tenant compte de conditions particulières du défaut et déduisons les valeurs efficaces de ces courants.

Il n'y a pas de liaison entre les points neutres N et N' (source et charge respectivement), donc le courant homopolaire est nul quelle que soit la fréquence considérée. Pour trouver les courants en effectue une double décomposition :

-Décomposition harmonique ;

-Pour chaque fréquence, on détermine le régime de courants en décomposant en 3 composantes homopolaire, direct et inverse.

Le réseau étant linéaire on effectue ensuite une superposition des différents régimes permanents.

III.8.2.1.Etude du fondamental :

Cette étude est menée de façon classique ; l'analyse par décomposition de Fortescue conduit à :

$$\begin{cases} E - Z_d \cdot I_d = V_d \\ -Z_i \cdot I_i = V_i \\ -Z_o \cdot I_o = V_o \end{cases}$$

Les tensions $\underline{V}_d, \underline{V}_i, \underline{V}_o$ étant à l'endroit du défaut: Ajoutons les relations qui impliquent les particularités du défaut étudié.

-égalité des potentiels au défaut (court-circuit) : $\underline{V}_1 = \underline{V}_2 = \underline{V}_3$

Loi des nœuds en N' : $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

Exprimons les relations ci-dessus au niveau des composantes symétriques :

$$\begin{cases} \underline{V}_1 = \underline{V}_2 \Leftrightarrow V_o + V_d + V_i = V_o + a^2 V_d + a V_i \\ \underline{V}_1 = \underline{V}_3 \Leftrightarrow V_o + V_d + V_i = V_o + a V_d + a^2 V_i \end{cases}$$

Ce dernier système s'écrit :

$$\begin{cases} (1 - a^2)V_d - (1 - a)V_i = 0 \\ (1 - a)V_d - (1 - a^2)V_i = 0 \end{cases}$$

Ce système est linéaire homogène de déterminant : $\begin{vmatrix} 1 - a^2 & a - 1 \\ a - 1 & 1 - a^2 \end{vmatrix} \neq 0$

Il n'admet comme solution que la solution : $V_d = V_i = 0$

On peut alors tenir compte de cette particularité dans le système, il vient :

$$E = Z_d \cdot I_d ; \quad I_i = 0.$$

\underline{V}_o paraît indéterminée, comme l'impédance homopolaire est infinie, le courant homopolaire est nécessairement nul. Le seul courant qui existe à la pulsation ω est le courant direct :

$$I_d = \frac{E}{Z_d} = \frac{220}{0.4 + j2.2}$$

III.8.2.2. Harmonique trois:

$$\begin{cases} 0 - Z'_d \cdot I'_d = V'_d \\ 0 - Z'_i \cdot I'_i = V'_i \\ E' - Z'_o \cdot I'_o = V'_o \end{cases}$$

Des conditions semblables aux précédentes conduisent aussi à $V'_i = V'_d = 0$

et donc ici $I'_d = I'_i = I'_o = 0$

Les courants de court-circuit se résument donc au seul fondamental constituant un système de courants triphasés équilibrés directes.

$$\begin{cases} I_1 = I_d \\ I_2 = a^2 I_d \\ I_3 = a I_d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \\ i_2 = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_3 = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

Où $I = \frac{220}{\sqrt{0.5^2 + 2.2^2}} = 97.51^\circ$; $\text{tg}\varphi_d = 4.4$

On établit une connexion supplémentaire entre N' et le neutre N de l'alternateur comme le montre la figure suivante : (fig.III.4)

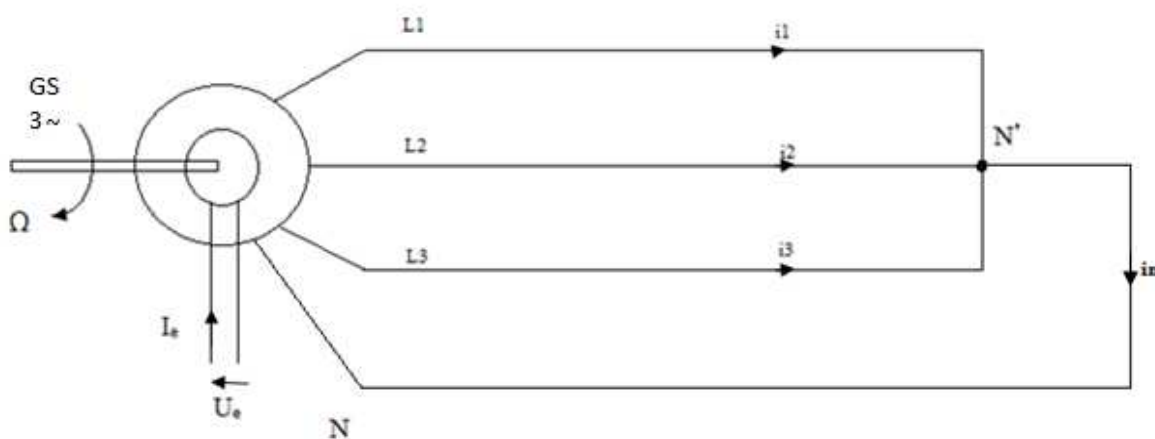


Figure.III.4.Court-circuit triphasé symétrique avec liaison au neutre

On veut voir comment sont modifiés les courants de ligne, et quelle est la valeur efficace et la fréquence du courant dans le fil neutre.

Ce cas, diffère pour l'harmonique trois par rapport au cas précédant. Le fondamentale donne lieu à un raisonnement tout a fait semblable ;

a) Fondamental :

$$\begin{cases} \underline{E} - \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d = \underline{V}_d \\ -\underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i = \underline{V}_i \\ -\underline{Z}_o \cdot \underline{I}_i = \underline{V}_o \end{cases}$$

La liaison au neutre N' étant faite, cette fois il est possible de préciser tous les potentiels :

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_2 = \underline{V}_3 = 0 \Rightarrow \underline{V}_d = \underline{V}_i = \underline{V}_o = 0$$

$$\text{On a toujours } \underline{I}_d = \frac{E}{Z_d} = \frac{220}{0.4 + 2.2j}$$

b) Harmonique trois :

$$\begin{cases} \underline{Z}'_o = \underline{V}'_o + \underline{Z}'_o \cdot \underline{I}'_o \\ \underline{Z}'_i \cdot \underline{I}'_i + \underline{V}'_i = 0 \\ \underline{Z}'_d \cdot \underline{I}'_d + \underline{Z}'_d = 0 \end{cases}$$

A ce système s'ajoute les relations de défaut.

$$\underline{I}'_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 = \underline{I}'_n \text{ et } \underline{V}'_1 = \underline{V}'_2 = \underline{V}'_3 = 0$$

Dont on en déduit avec les relations précédente

$$\Rightarrow \underline{I}'_d = 0 \quad \text{et} \quad \underline{I}'_i = 0 ; \quad \underline{I}'_o = \frac{E'_o}{Z'_o} ; \quad \text{tg} \varphi_o = 13.2$$

D'où l'expression des courants i_1, i_2, i_3

$$I_1(t) = \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{0.4^2 + 2.2^2}} \sin(\omega t - \varphi_d) + \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{0.4^2 + 6.6^2}} \sin(3\omega t - \varphi_o)$$

$$I_2(t) = \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{0.4^2 + 2.2^2}} \sin\left(\omega t - \varphi_d - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{0.4^2 + 6.6^2}} \sin(3\omega t - \varphi_o)$$

$$I_3(t) = \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{0.4^2 + 2.2^2}} \sin\left(\omega t - \varphi_d - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{0.4^2 + 6.6^2}} \sin(3\omega t - \varphi_o)$$

Le courant i'_n qui circule dans le fil neutre a une valeur efficace de $\frac{3 \times 39}{\sqrt{0.4^2 + 6.6^2}} = 17.7 \text{ A}$

On notera que les trois phases sont parcourues par le même courant de valeur efficace I : Le courant dans le neutre est le courant d'harmonique 3

III.8.3.Court-circuit monophasé :

On se place à présent dans les conditions de la figure suivante :

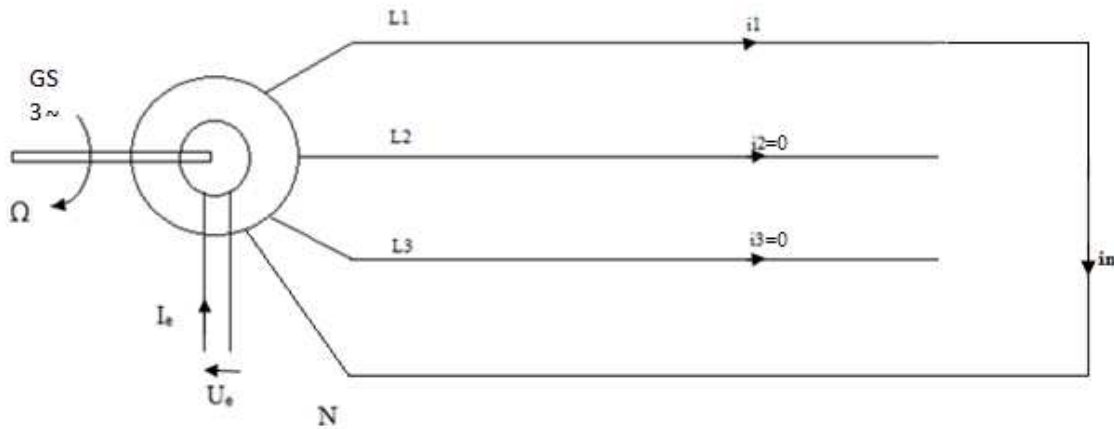


Figure.III.5.court-circuit monophasé sans liaison au neutre

Pour déterminer la valeur du courant de court-circuit on détermine d'abord les composantes symétriques des courants à la pulsation ω puis les composantes symétriques des courants à la pulsation 3ω .

Par application du théorème de superposition des états de régime permanent, déterminons les caractéristiques (amplitude maximale, valeur efficace, expression en fonction du temps), et le graphe du courant de court-circuit.

III.8.3.1.Pour le fondamental :

Relations pour les composantes symétriques :

$$\begin{cases} E - \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d = \underline{V}_d \\ -\underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i = \underline{V}_i \\ -\underline{Z}_o \cdot \underline{I}_o = \underline{V}_o \end{cases}$$

Relation de défaut : $I_2= I_3= 0 ; \quad V_1=0 ; \quad I_1= i_{cc}$

$$\underline{I}_o + a^2 \underline{I}_d + a \underline{I}_i = \underline{I}_o + a \underline{I}_d + a^2 \underline{I}_i = 0$$

D'où $I_d= I_i$ et si on tient compte de ce résultat dans la première relation : $\underline{I}_o - \underline{I}_d = 0$

Cela implique : $\underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_o$

On fait les somme membre à membre les relations précédentes :

$$E - (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o) \underline{I}_d = \underline{V}_d + \underline{V}_i + \underline{V}_o = \underline{V}_1 = 0$$

$$\text{Donc: } \underline{I}_d = \frac{E}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o} = \frac{220}{\sqrt{0.4^2 + 3.2^2}} e^{j\phi} = 68.2A$$

$$(\arg : \arctg 8 = \phi = 82.88^\circ) = 1.446 \text{ rad.}$$

III.8.3.2. Pour l'harmonique 3 :

Relations par les composantes symétriques :

$$\begin{cases} -\underline{Z}_{3d} \cdot \underline{I}_{3d} = \underline{V}_d \\ -\underline{Z}_{3i} \cdot \underline{I}_{3i} = \underline{V}_i \\ \underline{Z}_3 - \underline{Z}_{3o} \cdot \underline{I}_{3o} = \underline{V}_o \end{cases}$$

Relation par les composantes de défauts :

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_{3d} + \underline{V}_{3i} + \underline{V}_{3o} = 0$$

$$I_{32} = I_{33} = 0$$

On sans difficultés que $I_{3d} = I_{3i} = I_{3o}$.

$$\text{Et que : } \underline{I}_{3o} = \frac{E_3}{\underline{Z}_{3d} + \underline{Z}_{3i} + \underline{Z}_{3o}}$$

La valeur efficace du fondamental est 68.221A, celle du courant total est 68.33A.

L'harmonique trois, pourtant présent, à peu d'influence sur la valeur efficace ; tout au plus implique-t-il une légère distorsion du courant. Son amplitude est faible.

III.2.1 Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux radiaux à l'aide des composantes symétriques : [2]

III.2.2. Intérêt de cette méthode :

Le calcul à l'aide des composantes symétriques est particulièrement utile lorsqu'un réseau triphasé est déséquilibré car les impédances classiques R et X dites «cycliques» ne sont alors plus normalement utilisables du fait, par exemple, de phénomènes magnétiques. Aussi, ce calcul est nécessaire quand :

- Un système de tensions et courants est non symétrique (vecteurs de Fresnel de modules différents et de déphasages différents de 120°) ; c'est le cas lors d'un court-circuit monophasé (phase-terre), biphasé, ou biphasé-terre ;
- Le réseau comporte des machines tournantes et/ou des transformateurs spéciaux (couplage Y yn par exemple).

Cette méthode est applicable à tous types de réseaux à distribution radiale et ce quelque soit leur tension.

III.2.3.Rappel sur les composantes symétriques :

De même que le théorème de Leblanc dit qu'un champ alternatif rectiligne à amplitude sinusoïdal est équivalent à deux champs tournant en sens inverse, la définition des composants symétriques repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés : direct, indirect et homopolaire (voir la figure.6)

Le principe de superposition est alors exploitable pour le calcul des courants de défaut.

Pour l'explication suivante, le système est défini en prenant le courant I_1 comme référence de rotation, avec :

- I_{1d} comme sa composante directe,
- I_{1i} sa composante inverse,
- I_{1o} sa composante homopolaire, et en utilisant l'opérateur,

$$A = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ entre } I_1, I_2 \text{ et } I_3$$

Ce principe appliqué à un système de courant se vérifie par construction graphique (figure.III.6)

A titre d'exemple l'addition graphique des vecteurs donne bien, pour I_2 , le résultat suivant :

$$I_2 = a^2 \cdot I_{1d} + a \cdot I_{1i} + I_{1o}$$

Les courants I_1 et I_3 s'expriment de la même manière d'où le système;

$$I_1 = I_{1d} + I_{1i} + I_{1o}$$

$$I_2 = a^2 \cdot I_{1d} + a \cdot I_{1i} + I_{1o}$$

$$I_3 = a \cdot I_{1d} + a^2 I_{1i} + I_{1o}$$

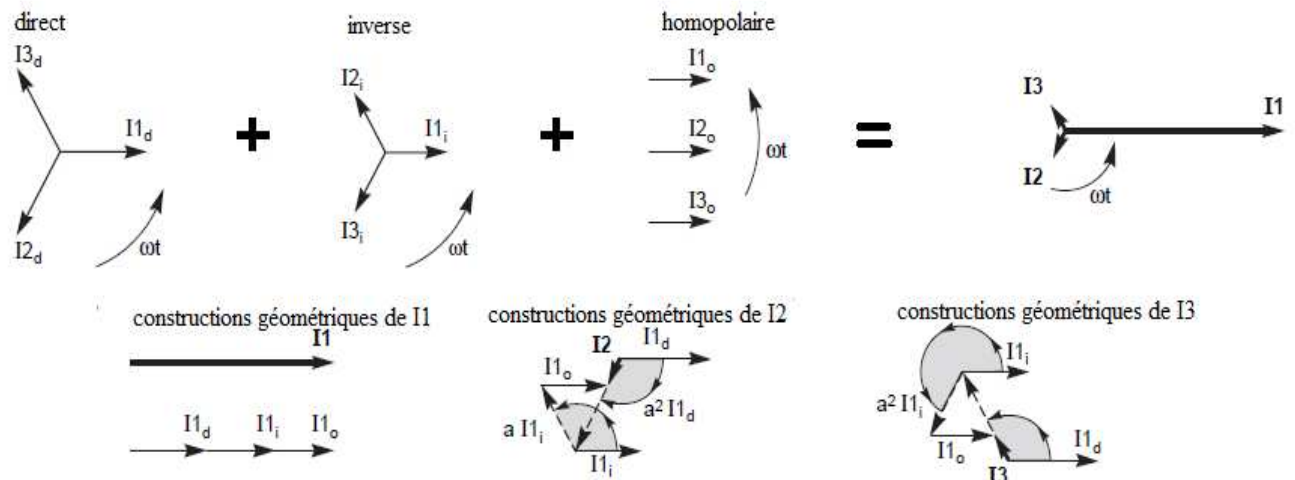


Figure.III.6. Construction graphique de la somme de trois systèmes triphasés équilibrés: direct, inverse et homopolaire.

Ces composantes symétriques de courant sont liées aux composantes symétriques de tension par les impédances correspondantes :

$$Z_d = \frac{V_d}{I_d} \quad , \quad Z_i = \frac{V_i}{I_i} \quad \text{et} \quad Z_o = \frac{V_o}{I_o}$$

Ces impédances se définissent à partir des caractéristiques éléments (indiquées par leurs constructeurs) du réseau électrique étudié. Parmi ces caractéristiques il faut noter que $Z_i \approx Z_d$ sauf pour les machines tournantes, alors que Z_o varie selon les éléments (figure.III.7)

Eléments	Z_o
Transformateur (vu du secondaire)	
Sans neutre	∞
Y_{yn} ou Z_{yn}	Flux libre ∞ Flux force 10 à 15 X_d
D_{yn} ou $Y_{N_{yn}}$	X_d
Primaire D ou Y + zn	0.1 à 0.2 X_d
Machine	
Synchrone	$\approx 0.5 Z_d$
Asynchrone	≈ 0
Ligne	$\approx 3 Z_d$

Tableau.III.7 .caractéristiques homopolaires des différents éléments d'un réseau électrique.

III.2.4. Calcul selon la norme CEI 909 :

La norme CEI 909 définit et présente une procédure, utilisable par des ingénieurs non spécialisés, exploitant les composantes symétriques.

Elle s'applique aux réseaux électriques d'une tension inférieure à 230KV.

Elle explique le calcul des courants de court-circuit maximaux et minimaux. Les premiers permettent de déterminer les caractéristiques assignées des matériels électriques. Les seconds sont nécessaires au calibrage des protections de surintensité.

III.2.5. La procédure :

- 1) Calcul de la tension équivalente au point de défaut égale à : $C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$

Avec :

C : facteur de tension dont l'introduction dans les calculs est nécessaire pour tenir compte :

- Des variations de tension dans l'espace et dans le temps,
- Des changements éventuels de prise des transformateurs,
- Du comportement subtransitoire des alternateurs et des moteurs.

Selon les calculs à effectuer et les niveaux de tension considérés, les valeurs normatives de ce facteur de tension sont indiquées dans la (figure.III.8).

- 2) Détermination et sommation des impédances équivalentes directe, inverse et homopolaire amont au point de défaut.
- 3) Calcul du courant de court-circuit initial, à l'aide des composantes symétriques. En pratique, selon le type de défaut, les formules à retenir pour le calcul des courants de court-circuit sont indiquées dans le tableau de la (figure.III.9)
- 4) A partir du calcul de la valeur efficace du courant de court-circuit ($I_{k''}$), sont déterminées les autres grandeurs caractéristiques;
I_p : la valeur de crête,
I_b : la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique coupé,
I_{CC} : la composante aperiodique,

I_K : la valeur efficace du courant de court-circuit permanent.

Tension nominale U_n	Facteur de tension C pour le calcul de	
	$I'_{CC \text{ MAX}}$	$I'_{CC \text{ MIN}}$
BT		
230-400 V	1	0.95
Autre	1.05	1
HT		
1 à 230 KV	1.1	1

Tableau.III.8. Valeurs du facteur de tension C.

Type de court- circuit	I'_k cas général	défaut éloigné des générateurs
Triphasé (Z_T quelconque)	$= \frac{C.U_n}{\sqrt{3} Z_d }$	$= \frac{C.U_n}{\sqrt{3} Z_d }$
	<p>Dans les deux cas, le courant de court-circuit ne dépend que de Z_d. Ainsi Z_d est remplacée. généralement par Z_K : impédance de court-circuit au point de défaut avec : $Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$ ou</p> <p>R_K : est la somme des résistances d'une phase placées en série ;</p> <p>X_K : est la somme des réactances d'une phase placées en série ;</p>	
Biphasé isolé ($Z_t = \infty$)	$= \frac{C.U_n}{\sqrt{3} Z_d+Z_i }$	$= \frac{C.U_n}{2 Z_d }$
Monophasé	$= \frac{C.U_n\sqrt{3}}{ Z_d+Z_i+Z_o }$	$= \frac{C.U_n}{ 2.Z_d+Z_o }$
Biphasé terre (Z_{CC} entre phases = 0)	$= \frac{C.U_n\sqrt{3} Z_i }{ Z_d.Z_i+Z_i.Z_o+Z_d.Z_o }$	$= \frac{C.U_n\sqrt{3}}{ Z_d+2.Z_o }$

Tableau.III.9. valeurs des courants de court-circuit en fonction des impédances direct, inverse et homopolaire du réseau concerné.

Notation retenues dans ce tableau :

- Tension efficace composée du réseau triphasé = U
- Courant de court-circuit en module = K''
- Impédance symétrique = Z_d, Z_i, Z_o
- Impédance de court-circuit = Z_{CC}
- Impédance de terre = Z_t

III.2.6. Incidence de la distance séparant le défaut de l'alternateur :

Avec cette méthode de calcul il y a toujours lieu de distinguer deux cas :

- Celui des courts-circuits éloignés des alternateurs, qui correspond aux réseaux dans lesquels les courants de court-circuit n'ont pas de composante alternative amortie. C'est généralement le cas en BT, sauf lorsque des récepteurs à forte consommation sont alimentés par des postes particuliers HTA/HTB.
- Et celui des courts-circuits proches des alternateurs, qui correspond aux réseaux dans lesquels les courants de court-circuit ont des composantes alternatives amorties. Ce cas se présente généralement en HT. Mais il peut se présenter aussi en BT lorsque, par exemple, un groupe de secours alimente des départs prioritaires. Ces deux cas ont comme principales différences :
 - Pour les courts-circuits éloignés des alternateurs, il y a égalité :
 - Entre les courants de court-circuit initial (I_K''), permanent (I_K) et coupé (I_b) d'une part ($I_K'' = I_K = I_b$) ;
 - Entre les impédances directe (Z_d) et inverse (Z_i) d'autre part ($Z_d = Z_i$) ;
 - Alors que pour les courts-circuits proches des alternateurs, l'inégalité suivante est vérifiée : $I_K < I_b < I_K''$; avec en plus Z_d qui n'est pas nécessairement égale à Z_i

A noter cependant que des moteurs asynchrones peuvent aussi alimenter un court-circuit, leur apport pouvant atteindre 30% de I_{CC} du réseau pendant les trente premières millisecondes :

l'équation $I_K'' = I_K = I_b$ n'est alors plus variable.

III.2.7. Conditions à respecter pour le calcul des courants de court-circuit maximaux et minimaux :

Le calcul des courants de court-circuit maximaux tient compte des points suivants :

- Le facteur de tension C à appliquer correspondant au calcul du courant de court-circuit maximal ;
- De toutes les hypothèses et approximation citées dans ce chapitre, seules doivent être considérées celles qui amènent à un calcul par excès ;
- Les résistances R_L des lignes (lignes aériennes, câbles, conducteurs de phase et neutre) sont à prendre à la température de 20°C.

Pour le calcul des courants de court-circuit minimaux, il faut :

- Appliquer la valeur du facteur de tension c correspondant à la tension minimale autorisée sur le réseau.
- Choisir la configuration du réseau, et dans certains cas, l'alimentation minimale séparer les sources et lignes d'alimentation du réseau, qui conduisent à la valeur minimale du courant de court-circuit au point de défaut.
- Tenir compte de l'impédance des jeux de barres, des transformateurs de courant, etc...
- Ignorer les moteurs.
- Prendre les résistances R_L à la température envisageable la plus élevée :

$$R_L = \left[1 + \frac{0.004}{^\circ\text{C}} (\theta_e - 20^\circ\text{C}) \right] \times R_{L20}$$

Où R_{L20} est la résistance à la température 20°C et θ_e la température (en °C) admissible par le conducteur à la fin du court-circuit.

Le facteur 0.004/ °C s'applique au cuivre, à l'aluminium et aux alliages d'aluminium.

III.2.8. Equations des différents courants :

III.2.8.1 Courant du court-circuit initial I_K'' :

Le calcul des différents courants de court-circuit initiaux I_K'' est effectué en appliquant les formules du tableau de la (figure.III.12)

III.2.8.2. Valeur de crête i_p du courant de court-circuit :

La valeur de crête i_p du courant de court-circuit, Dans les réseaux non maillés, peut être calculée, quelque soit la nature du défaut, à partir de la formule suivante :

$$I_p = K. \sqrt{2} I_K''$$

Où :

I_K'' = courant de court-circuit initial,

K = facteur fonction des rapports $\frac{R}{X}$, défini sur les abaques ou calculé par la formule approchée suivante :

$$K = 1,02 + 0,98 e^{-3\frac{R}{X}}$$

III.2.8.3. Courant de court-circuit coupé I_b :

Le calcul du courant de court-circuit coupé I_b n'est nécessaire que dans le cas de défaut proche des alternateurs et lorsque la protection est assurée par des disjoncteurs retardés. Rappelons que ce courant sert à déterminer le pouvoir de coupure de ces disjoncteurs.

Ce courant peut être calculé avec une bonne approximation, à l'aide de la formule suivante :

$$I_b = \mu \cdot I_K''$$

Dans laquelle :

μ = facteur fonction du temps mort minimal t_{\min} et du rapport $\frac{I_K''}{I_r}$ (figure.III.10) qui traduit l'influence des réactances subtransitoire et transitoire

Avec : I_r = courant assigné de l'alternateur.

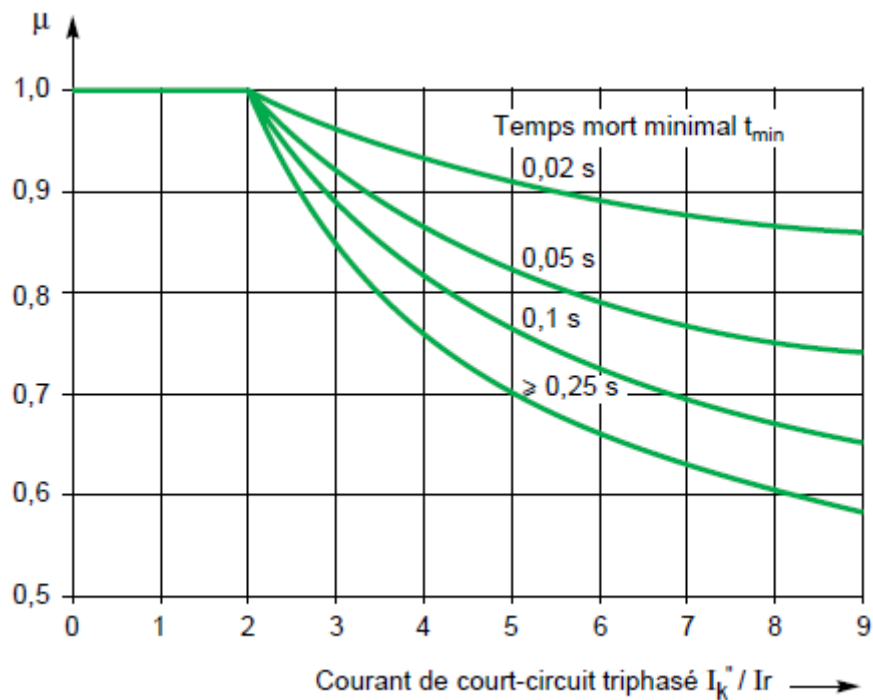


Figure.III.10.facteur μ pour le calcul du courant de court-circuit coupé I_b

III.2.9.Courant de court-circuit permanent I_K :

L'amplitude du courant de court-circuit permanent I_K , étant dépendant de l'état de saturation du fer des alternateurs, son calcul est moins précis que celui du courant symétrique initial I_K''

Les méthodes de calcul proposées peuvent être considérées comme procurant une estimation suffisamment précise des valeurs supérieures et inférieures pour le cas où le court-circuit est alimenté par un alternateur ou une machine synchrone. Ainsi :

- Le courant de court-circuit permanent maximal, sous la plus forte excitation du générateur synchrone, est donné par :

$$I_{K \max} = \lambda_{\max} \cdot I_r$$

- Le courant de court-circuit permanent minimal est obtenu pour une excitation constante (minimale) à vide de la machine synchrone. il est donné par :

$$I_{K \min} = \lambda_{\min} \cdot I_r$$

Avec:

I_r = valeur assignée du courant aux bornes de l'alternateur.

λ = facteur dépendant de l'inductance de saturation $X_d \text{ sat}$.

Les valeurs de λ_{\max} et λ_{\min} sont données par la (figure.III.11) pour les turbo-alternateurs et la (figure.III.12) pour les machines à pôles saillants.

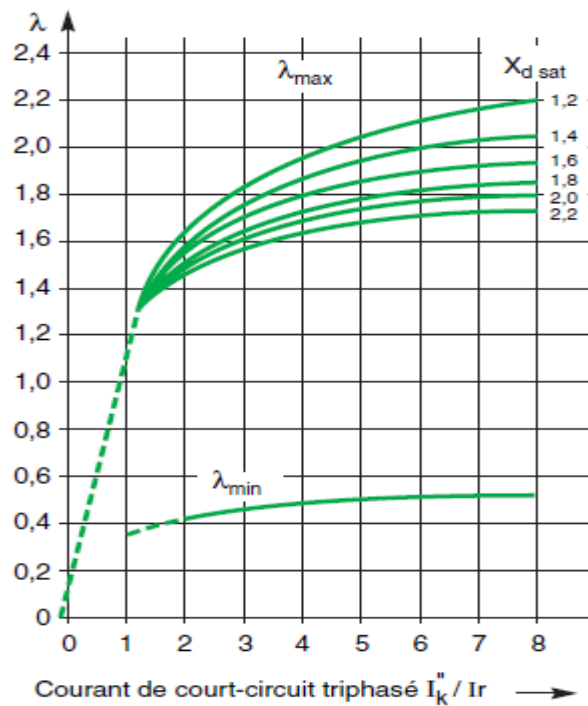


Figure.III.11.facteurs λ_{\max} et λ_{\min} pour turbo-alternateurs.

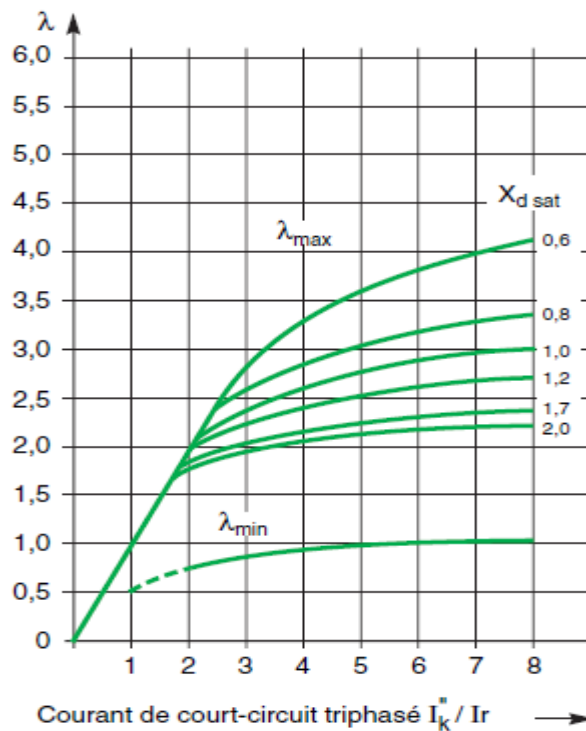


Figure.III.12.facteurs λ_{\max} et λ_{\min} pour alternateur à pôles saillants.

III.2.10. Application : 1

Quatre réseaux, trois de 5 KV et un de 15 KV, sont alimentés par un réseau de 30 KV à partir des transformateurs du poste E (figure.III.13) lors de la construction de la ligne GH il est demandé de déterminer le pouvoir de coupure du disjoncteur M.

Il est précisé que :

- Les seules mises à la terre sont celles des secondaires des transformateurs du poste E ;
- Pour une ligne de 30 KV, la réactance est de $0.35 \Omega/\text{km}$ en régimes direct et inverse et de $3 \times 0.35 \Omega/\text{km}$ en régime homopolaire ;
- La réactance de court-circuit des transformateurs est de 6% pour le poste E et de 8% pour les autres ;
- Le coefficient C multiplicande de U est pris égal à 1 ;
- Toutes les charges raccordées aux point F et G sont essentiellement passives ;
- Toutes les résistances sont négligeables vis-à-vis des réactances.

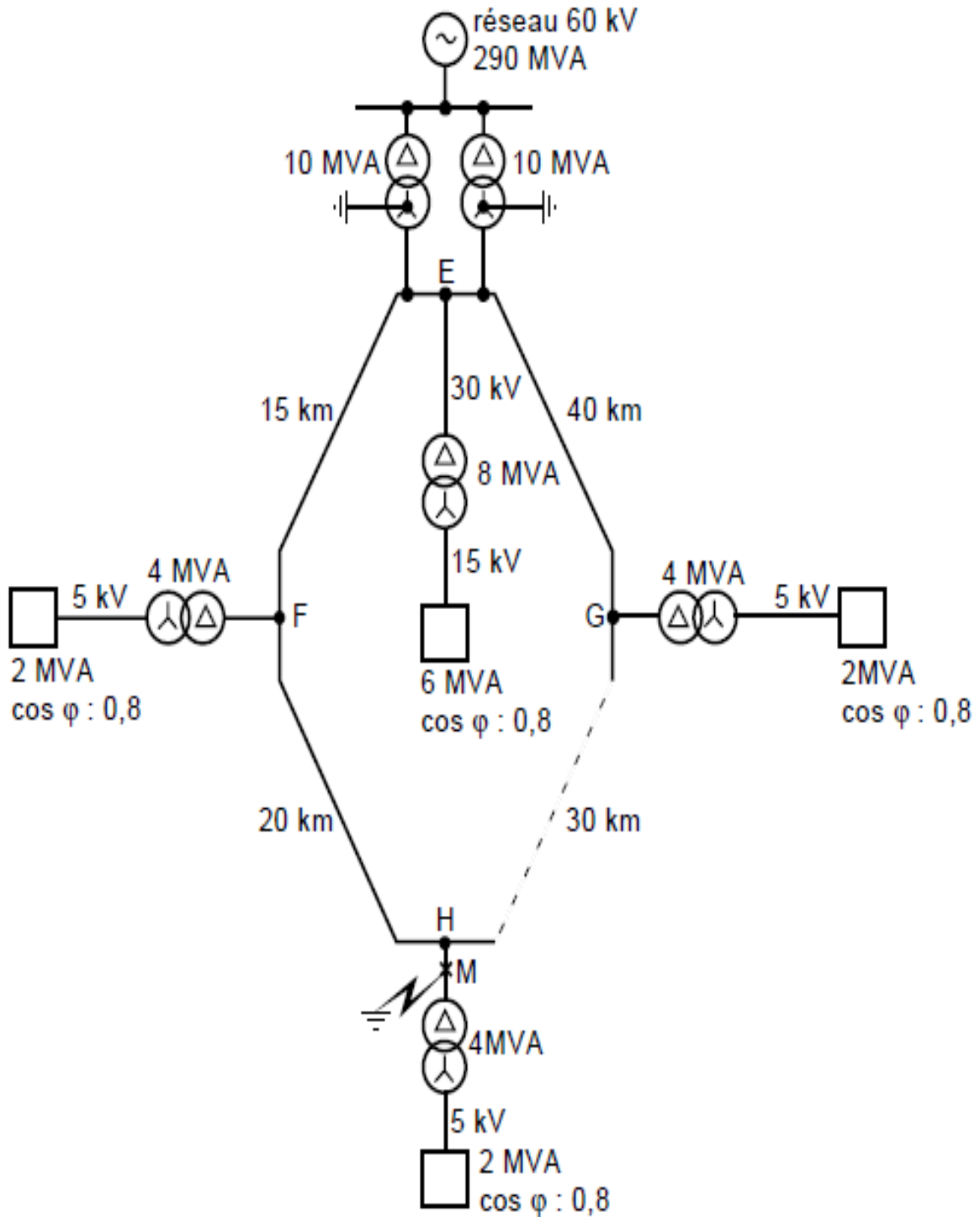


Figure.III.13. Réseau de 60 Kv

➤ Résolution :

A partir du schéma direct et inverse (figure.III.14) il est possible d'écrire :

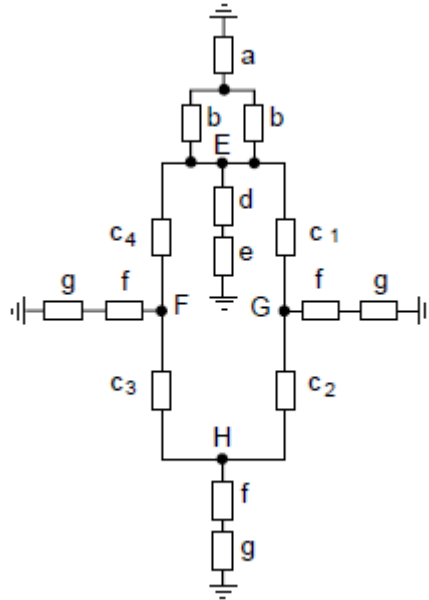


Figure.III.14. Schéma direct et inverse

$$a = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{230^2}{290} \Rightarrow j 3.1 \Omega$$

$$b = U_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{6}{100} \times \frac{30^2}{10} = j 5.4 \Omega$$

$$c_1 = 0.35 \times 40 \Rightarrow j 14 \Omega$$

$$c_2 = 0.35 \times 30 \Rightarrow j 10.5 \Omega$$

$$c_3 = 0.35 \times 20 \Rightarrow j 7 \Omega$$

$$c_4 = 0.35 \times 15 \Rightarrow j 5.25 \Omega$$

$$d = U_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{8} \Rightarrow j 9 \Omega$$

$$e = \frac{U^2}{S} \times 0.6 = \frac{30^2}{6} \times \Rightarrow j 90 \Omega$$

$$f = U_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{4} \Rightarrow j 18 \Omega$$

$$g = \frac{U^2}{S} \times 0.6 = \frac{30^2}{2} \times 0.6 \Rightarrow j270 \Omega$$

Sur le schéma homopolaire (fig.III.15) il faut remarquer : les enroulements en triangle des transformateurs du poste E arrêtent les courants homopolaires.

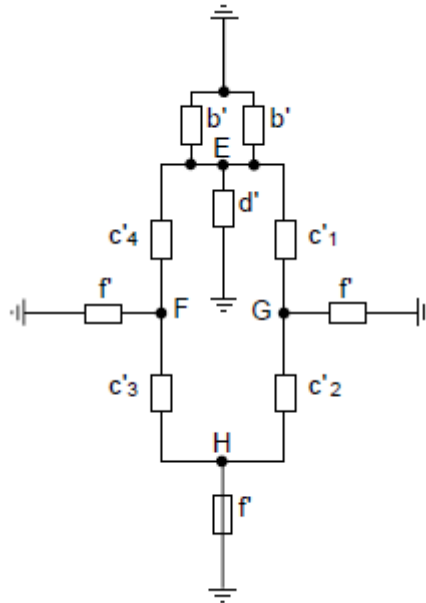


Figure.III.15. Schéma homopolaire

De même, les transformateurs des postes F, H et G ne voient pas les courants homopolaires à cause de leurs enroulements en triangle, ils ont donc une impédance infinie pour le défaut.

$$b' = b_1 = j 5.4 \Omega$$

$$C'_1 = 3 \times C_1 = j42 \Omega$$

$$C'_2 = 3 \times C_2 = j31.5 \Omega$$

$$C'_3 = 3 \times C_3 = j21 \Omega$$

$$C'_4 = 3 \times C_4 = j15.75 \Omega$$

$$d' = \infty$$

$$F' = \infty$$

Deux schémas réduits sont alors à étudier :

- Ligne GH ouverte (figure.III.16)

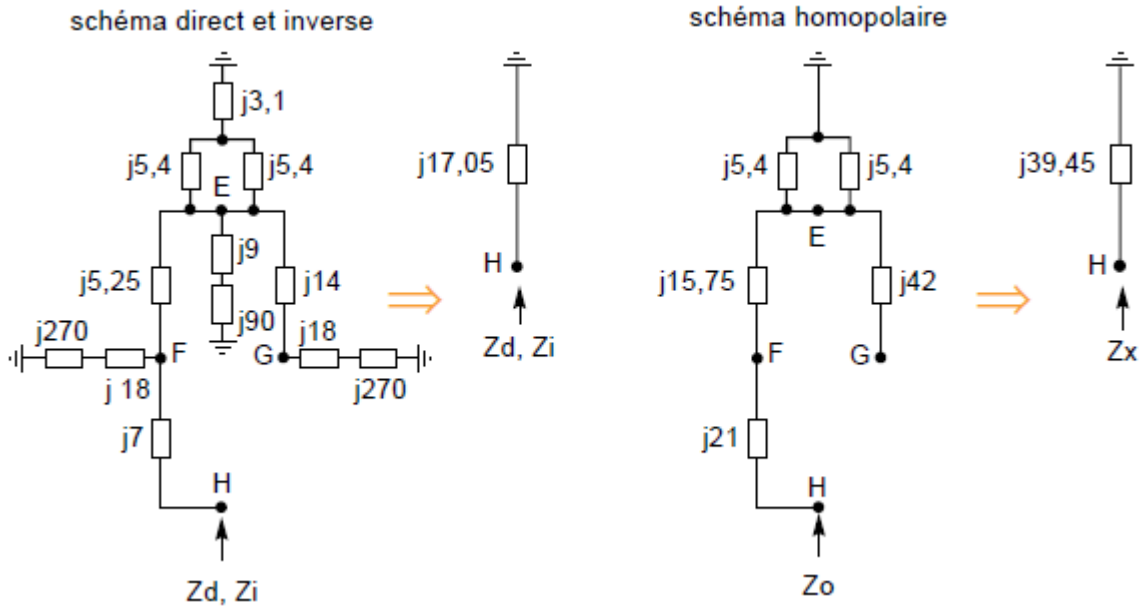


Figure.III.16. Schéma direct, inverse et homopolaire

$$Z_d = Z_i = j17.05 \Omega$$

$$Z_o = j39.45 \Omega$$

$$I_{CC3} = \frac{C \cdot U_n}{|Z_d| \sqrt{3}} \approx 1.104 \text{ kA}$$

$$I_{CC1} = \frac{C U_n \sqrt{3}}{|Z_d + Z_i + Z_o|} \approx 0.773 \text{ kA}$$

Note : réseau HT d'où le coefficient $C = 1,1$ (voir tableau de la figure.III.8)

- Ligne GH fermée (figure.III.17)

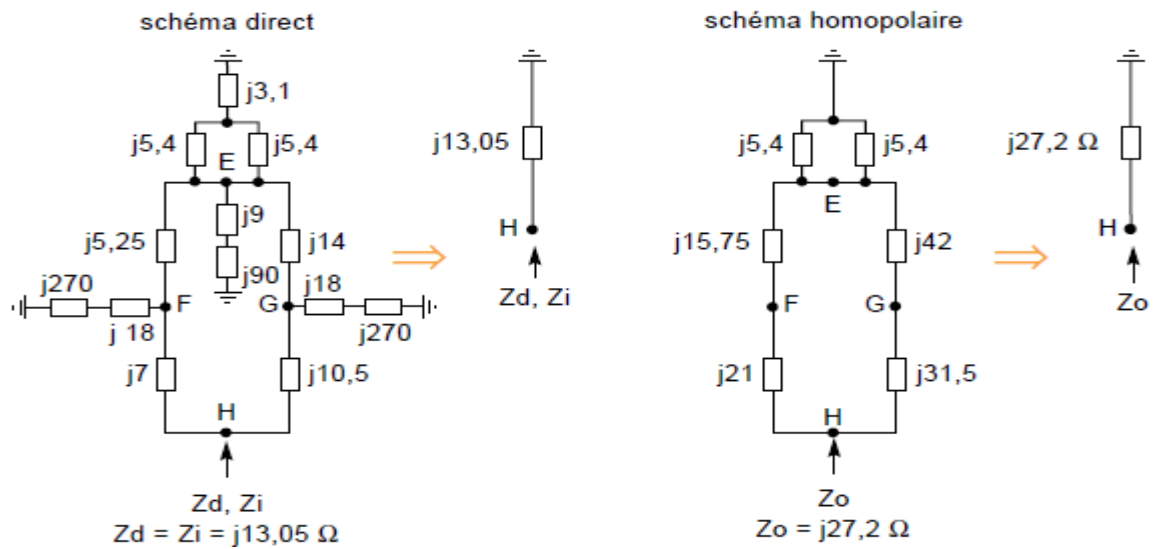


Figure.III.17. Schéma direct homopolaire

$$Z_d = Z_i = j13,05 \Omega$$

$$Z_o = j27,2 \Omega$$

$$I_{cc3} = 1.460 \text{ kA}$$

$$I_{cc1} = 1.072 \text{ kA}$$

En fonction du courant de court-circuit le plus important ($I_{CC3} = 1.460 \text{ kA}$), le disjoncteur de ligne au point M doit donc être dimensionné à :

$$S = U \cdot I \cdot \sqrt{3} = 30 \times 1.406 \times \sqrt{3}$$

$$S \approx 76 \text{ MVA.}$$

III.2.11. Application 2 :

III.2.12. Pouvoir de coupure des disjoncteurs aux extrémités d'une ligne [5]

Dans un réseau de 60 kV, déterminer le pouvoir de coupure des disjoncteurs des postes C et E qui alimentent la ligne de 15 km.

La réactance de court-circuit des transformateurs de groupe et de réseau est de 10% et celle des autres transformateurs de 80 %.

Pour une ligne de 60 kV, la réactance est de :

- 0,40 Ω/km en régime direct ou inverse,
- $3 \times 0,40 \Omega/\text{km}$ en régime homopolaire,

Les groupes ont une réactance directe ou inverse de 25 %

La puissance active P_{cc} a une réactance équivalente estimée de $j \times 0,6 U^2/P_{cc}$.

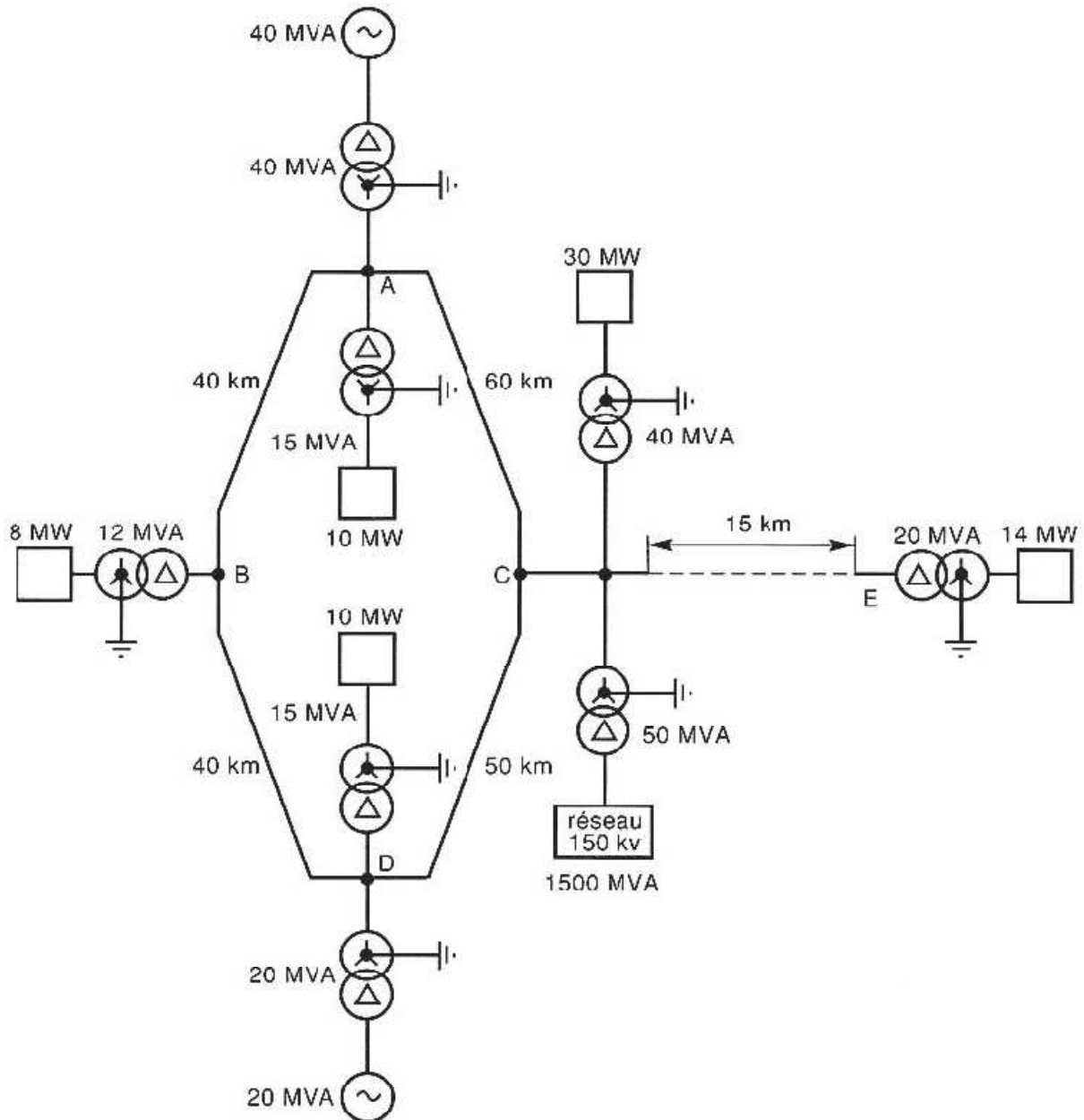
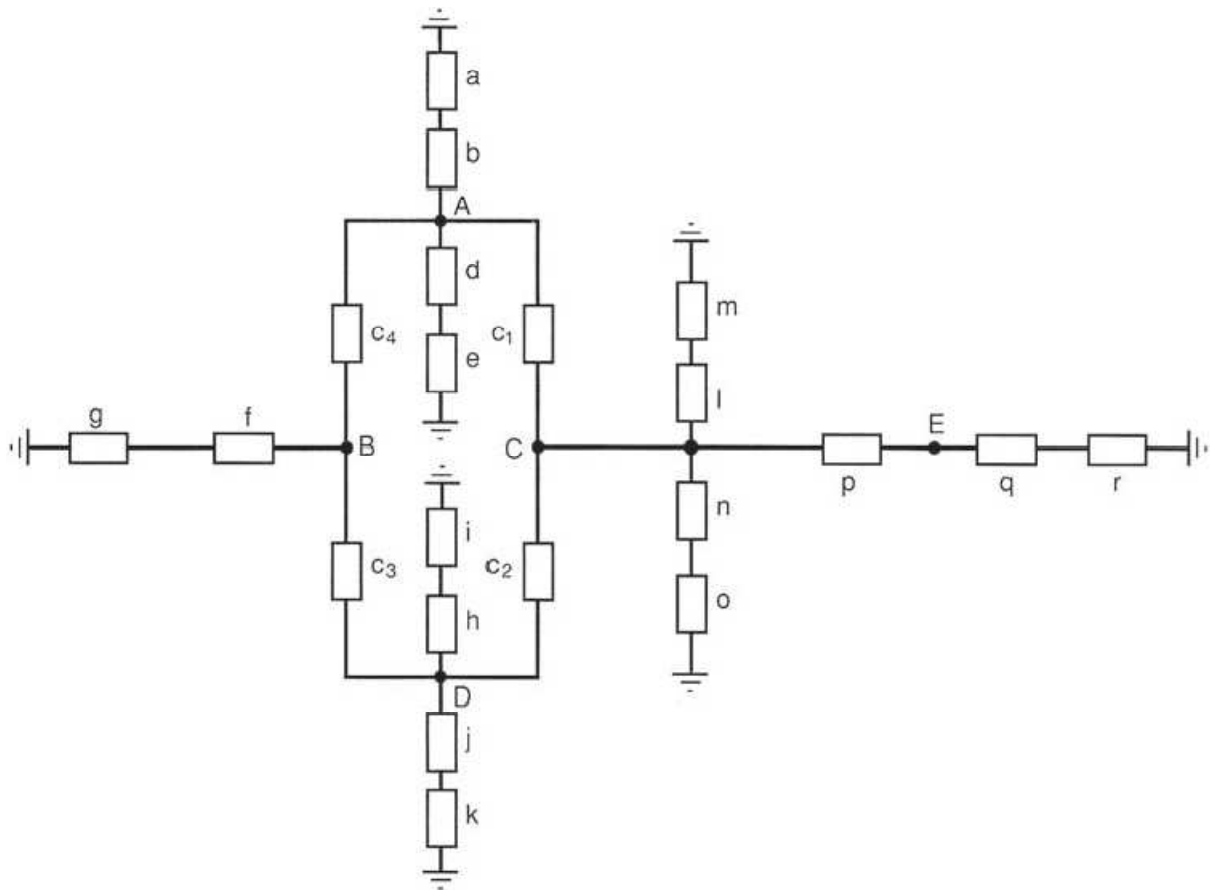


Figure.III.18. Réseau de 60 Kv

Résolution :

Schéma global direct ou inverse (réduction à 60 kV) (fig.III.19)

**Figure.III.19. Schéma global direct ou inverse (réduction à 60 kV)**

$$a = j \frac{U^2}{S_{cc}} \times \frac{25}{100} = \frac{60^2}{40} \times \frac{25}{100} = j22,5 \Omega$$

$$b = jU_{cc} \frac{U^2}{S_{cc}} \times \frac{10}{100} = \frac{60^2}{400} = j9 \Omega$$

$$C_1 = j0,40 \times 60 = j24 \Omega$$

$$C_2 = j0,40 \times 50 = j20 \Omega$$

$$C_3 = j0,40 \times 40 = j16 \Omega$$

$$C_4 = j0,40 \times 40 = j16 \Omega$$

$$d = jU_{CC} \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{8}{100} = \frac{60^2}{15} = j19,2 \Omega$$

$$e = j \frac{U^2}{P} \times 0,6 = \frac{60^2}{10} \times 0,6 = j216 \Omega$$

$$f = jU_{CC} \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{8}{100} \times \frac{60^2}{12} = j24 \Omega$$

$$g = j \frac{U^2}{P} \times 0,6 = \frac{60^2}{8} \times 0,6 = j270 \Omega$$

$$h = jU_{CC} \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{8}{100} \times \frac{60^2}{15} = j19,2 \Omega$$

$$i = j \frac{U^2}{P} \times 0,6 = \frac{60^2}{10} \times 0,6 = j216 \Omega$$

$$j = jU_{CC} \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{10}{100} \times \frac{60^2}{20} = j18 \Omega$$

$$k = j \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{25}{100} = \frac{60^2}{20} \times \frac{25}{100} = j45 \Omega$$

$$l = jU_{CC} \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{8}{100} \times \frac{60^2}{40} = j7,2 \Omega$$

$$m = j \frac{U^2}{P} \times 0,6 = \frac{60^2}{30} \times 0,6 = j72 \Omega$$

$$n = jU_{CC} \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{10}{100} \times \frac{60^2}{50} = j7,2 \Omega$$

$$o = j \frac{U^2}{P_{CC}} = \frac{60^2}{1500} = j2,4 \Omega$$

$$p = j0,4 \times 15 = j2,4 \Omega$$

$$q = jU_{CC} \frac{U^2}{P_{CC}} \times \frac{8}{100} \times \frac{60^2}{20} = j14,4 \Omega$$

$$r = j \frac{U^2}{P} \times 0,6 = \frac{60^2}{14} \times 0,6 = j154 \Omega$$

- Schéma global homopolaire (réduction à 60kV) (fig.III.20)

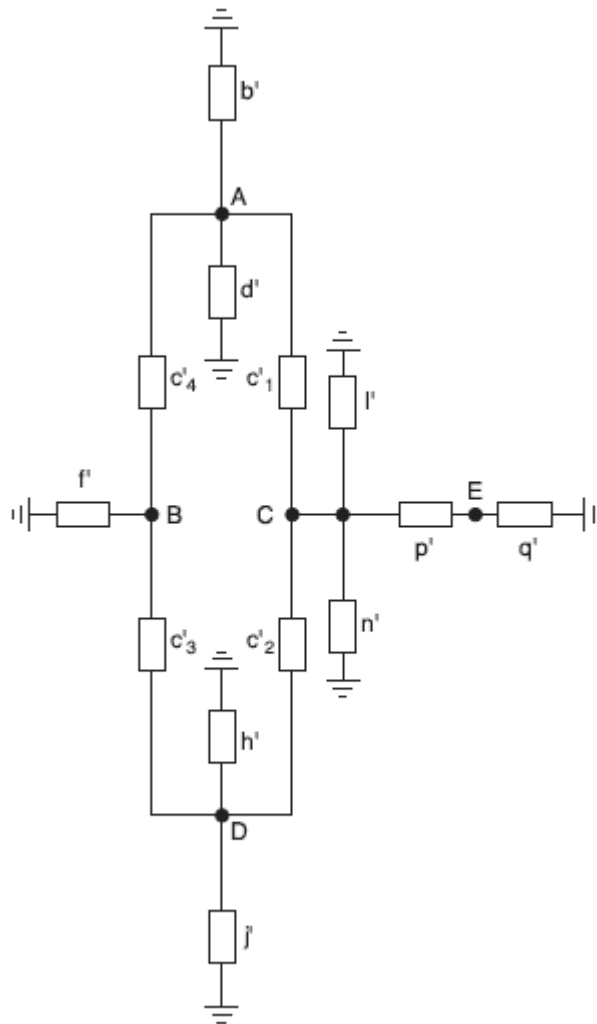


Figure.III.20. Schéma global homopolaire (réduction à 60kV)

Les transformateurs du poste arrêtent les courants homopolaires dans les enroulements en triangle.

$$b' = b = j9 \Omega$$

$$c'_1 = 3c_1 = j72 \Omega$$

$$c'_2 = 3c_2 = j60 \Omega$$

$$c'_3 = 3c_3 = j48 \Omega$$

$$c'_4 = 3c_4 = j48 \Omega$$

$d' = \infty$

$f' = \infty$

$h' = \infty$

$j' = j = j18 \Omega$

$l' = \infty$

$n' = n = j7,2 \Omega$

$p' = 3p = j18 \Omega$

$q' = \infty$

- Schémas réduits

Pour l'étude qui nous intéresse on peut réduire les schémas à ce qui se passe en C et E (fig.III.21)

Schéma direct/inverse

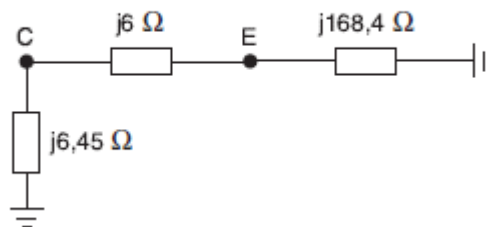


Schéma homopolaire

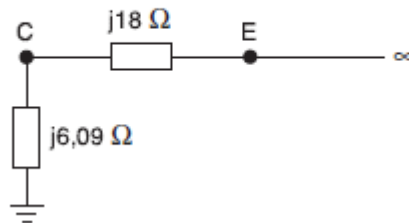


Figure.III.21. Schéma direct, inverse et homopolaire

- Dimensionnement du disjoncteur de ligne côté C :

Cas 1 : défaut côté jeu barres (fig.III.22)

Schéma direct



Schéma homopolaire

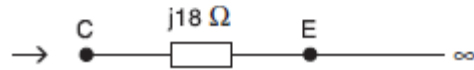


Figure.III.22. Schéma direct et homopolaire

$$Z_d = j6 + j168,4 = j174,4 \Omega$$

$$Z_o = \infty$$

- I_{CC} triphasé est égal à :

$$\frac{U}{|Z_d|\sqrt{3}} = \frac{60}{174,4 \sqrt{3}} = 0,195 \text{ kA}$$

$$\text{d'où : } S_{CC} = U I \sqrt{3} = 20,7 \text{ MVA}$$

- I_{CC} monophasé est égal à :

$$\frac{U\sqrt{3}}{|Z_d+Z_i+Z_o|} = 0$$

$$\text{d'où : } S_{CC} = 0$$

Cas 2 : défaut côté ligne (figure.III.23)

Schéma direct

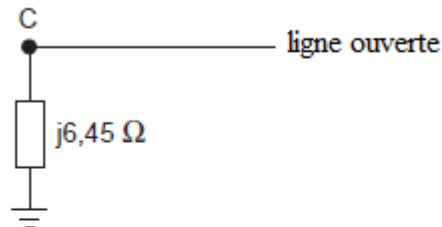


Schéma homopolaire

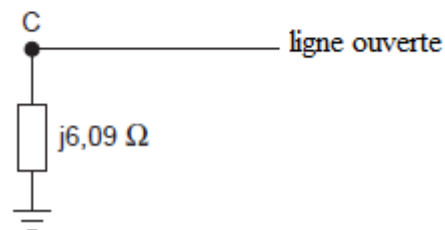


Figure.III.23. Schéma direct et homopolaire

$$Z_d = j6,45 \Omega$$

$$Z_o = j6,09 \Omega$$

- I_{CC} triphasé est égal à :

$$\frac{U}{|Z_d| \sqrt{3}} = \frac{60}{6,45 \sqrt{3}} = 5,37 \text{ kA}$$

$$\text{D'où : } P_{CC} = U I \sqrt{3} = 558,1 \text{ MVA}$$

- I_{CC} monophasé est égal à :

$$\frac{U \sqrt{3}}{|Z_d + Z_i + Z_o|} = \frac{60 \sqrt{3}}{18,99} = 5,47 \text{ kA}$$

$$\text{D'où : } P_{CC} = U I \sqrt{3} = 568,7 \text{ MVA}$$

Les disjoncteurs de ligne au point C doit donc être dimensionné à 570 MVA

- Dimensionnement du disjoncteur de ligne côté E

Cas 1 : défaut côté barres (figure.III.24)

Schéma direct

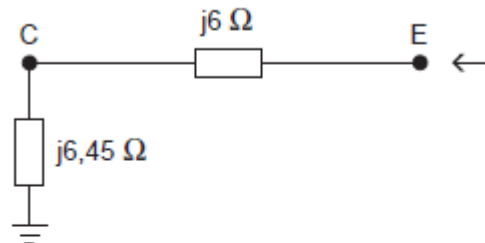


Schéma homopolaire

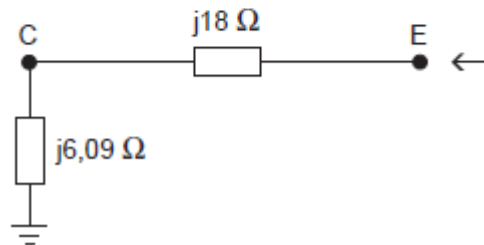


Figure.III.24. Schéma direct et homopolaire

$$Z_d = j6 + j6,45 = j12,45 \Omega$$

$$Z_o = j18 + 6,09 = j24,09 \Omega$$

- I_{CC} triphasé est égale à :

$$\frac{U}{|Z_d|\sqrt{3}} = \frac{60}{12,45\sqrt{3}} = 2,782 \text{ kA}$$

$$\text{D'où : } P_{CC} = U I \sqrt{3} = 289,2 \text{ MVA}$$

- I_{CC} monophasé est égal à :

$$\frac{U\sqrt{3}}{|Z_d+Z_1+Z_o|} = \frac{60\sqrt{3}}{48,99} = 2,121 \text{ kA}$$

$$\text{D'où : } P_{CC} = U I \sqrt{3} = 220,5 \text{ MVA}$$

Cas 2 : défaut côté ligne (figure.III.25)

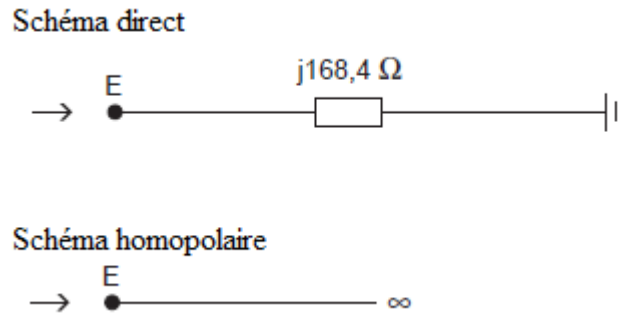


Figure.III.25. Schéma direct et homopolaire

$$Z_d = j168,4 \Omega$$

$$Z_o = \infty$$

- I_{CC} triphasé est égale à :

$$\frac{U}{|Z_d|\sqrt{3}} = \frac{60}{168,4\sqrt{3}} = 0,206 \text{ kA}$$

$$\text{D'où : } P_{CC} = U I \sqrt{3} = 21,4 \text{ MVA}$$

- I_{CC} monophasé est égal à :

$$\frac{U\sqrt{3}}{|Z_d+Z_i+Z_o|} = 0$$

$$\text{D'où : } P_{CC} = 0$$

Le disjoncteur de ligne au point E doit donc être dimensionné à 290 MVA.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode utilisée pour le calcul des défauts qui apparaissent sur les réseaux électriques, l'application de cette dernière diffère d'un type de court-circuit à une autre.

IV.1.Introduction :

L'apparition et la propagation d'un défaut dans un réseau électrique engendre des effets néfastes sur ce dernier. C'est pour cette raison qu'il faut l'éliminer le plus rapidement possible et cela en utilisant des dispositifs de protection.

IV.2. Plan de protection : [6]

IV.2.1. Définition d'un système de protection :

C'est un ensemble de dispositif plus ou moins complexe, qui se compose d'une chaîne constituée des éléments suivants :

- Capteur de mesure courant et tension fournissant les informations de mesure nécessaire à la détection des défauts.
- Relais de protection, charge de la surveillance permanente de l'état électrique du réseau jusqu'à l'élaboration des ordres d'élimination des parties défectueuses et leur commande par le circuit de déclenchement.
- Organe de coupure dans leur fonction d'élimination de défaut : disjoncteur, interrupteur, fusible.

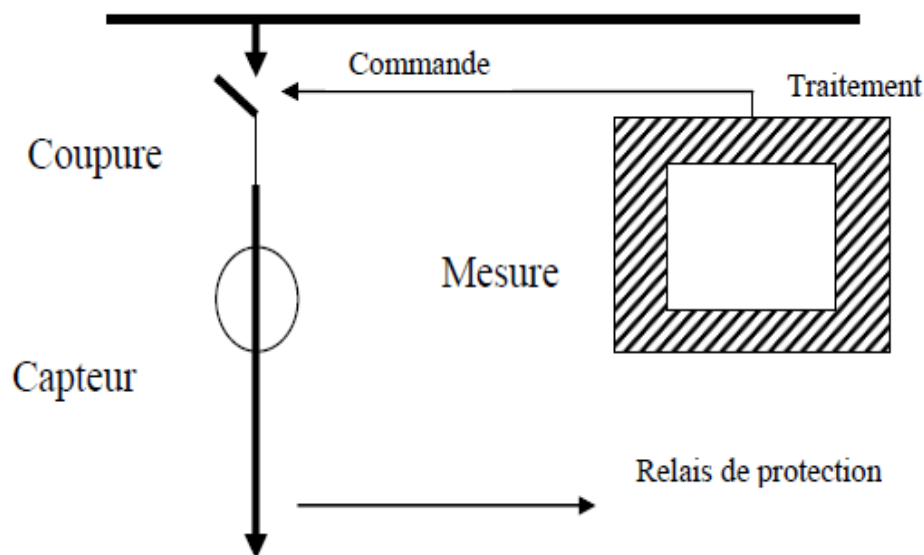


Figure. IV. I .Chaîne de protection

IV.2.2. Rôle d'un système de protection :

Le système de protection électrique a pour but de déceler l'existence des défauts et de mettre automatiquement hors tension le réseau défectueux.

IV.2.3. Qualité d'un système de protection : [7]

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

- a) **fiabilité** : Déclenchement suite à un défaut réel (décision sûre).
- b) **Sélectivité** : Seuls les appareils de coupure encadrant le défaut doivent s'ouvrir
- c) **Rapidité d'action** : Pour limiter les effets néfastes du défaut.
- d) **Sensibilité** : Doit détecter la moindre variation des paramètres de l'élément surveillé.
- e) **Consommation** : Doit avoir une consommation réduite.
- f) **Disponibilité** : C'est la capacité de fonctionner lors de l'apparition d'un défaut, ce qui impose diverses procédures ou dispositifs pour s'assurer que la protection est en état de marche.

IV.2.4. Constitution d'un dispositif de protection :

Un système de protection est constitué de :

- Organe de détection et de décision
 - 1- Organe de mesure ou chaîne de mesure.
 - 2- Organe de comparaisons.
 - 3- Organe de décision.
- Organe d'intervention
 - 1- Organe de signalisation et de disjonction.

IV.3. Protection ampérométriques et volumétriques :

IV.3.1. Protection ampéremétriques :

Cette protection permet d'éviter les surintensités dangereuses en :

- Valeur.
- Temps.

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.

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



Figure. IV.2. Coupe circuit fusible

IV.3.1.1. Protection à maximum de courant à temps constant :

Elle fonctionne instantanément ou avec temporisation quand le courant dans le circuit à protéger atteint ou dépasse une valeur déterminée (réglage).

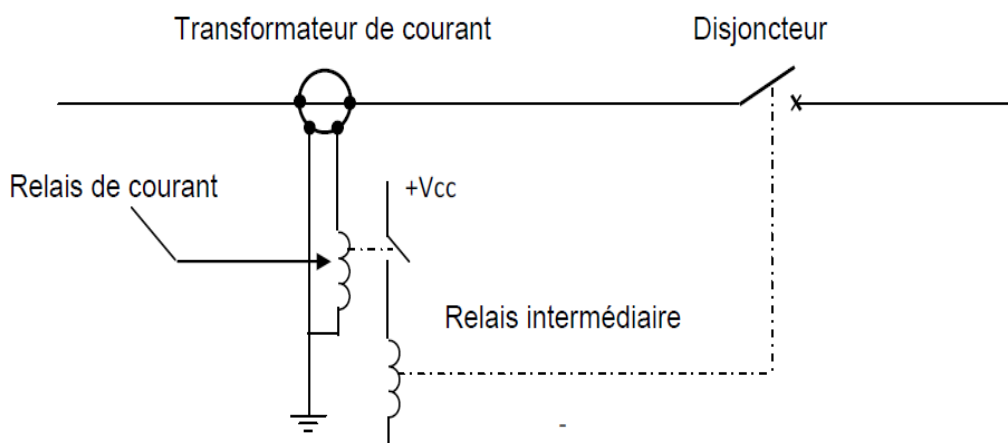


Figure. IV.3. Protection à maximum de courant à temps constant (avec le relais de courant et relais intermédiaire), pour une phase.

IV.3.2. Protection voltmétrique :

Elle fonctionne instantanément ou avec temporisation quand la tension dans le circuit à protéger atteint ou dépasse une valeur déterminée (réglage). Les transformateurs de tension assurent l'isolement galvanique et l'adaptation de la tension aux circuits de mesures.

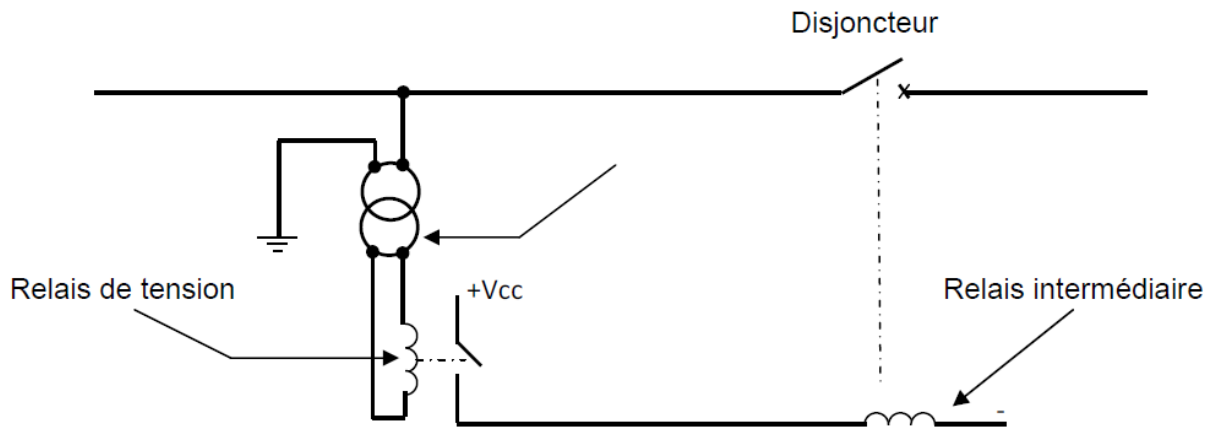


Figure. IV.4. Protection à maximum de tension à temps constant (pour une phase)

IV.4. Notion de sélectivité :

Une protection est dite sélective si un défaut apparaissant en un point quelconque du circuit est éliminé par l'appareil de protection situé immédiatement en amont du défaut et par lui seul.

On distingue trois types de sélectivité :

IV.4.1. Sélectivité ampéremétrique :

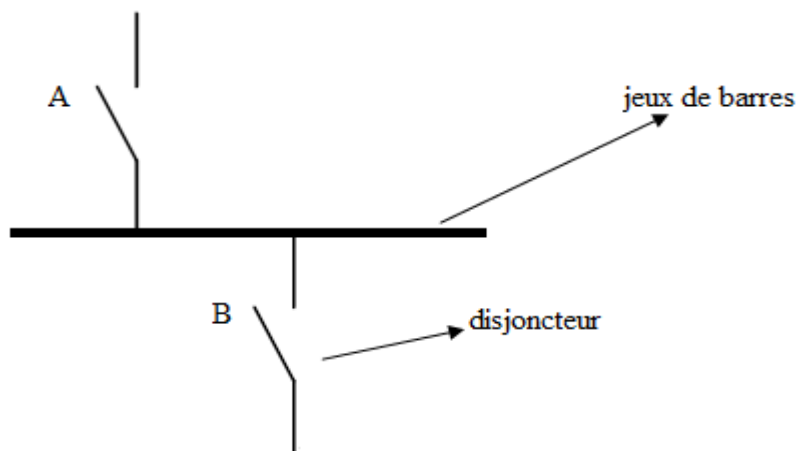


Figure. IV.5. sélectivité ampéremétrique

le courant de court-circuit en aval du disjoncteur B est I_{ccB} , la valeur de déclanchement du disjoncteur A est I_{RA} dans ce cas :

- Si le courant $I_{RA} > I_{ccB}$ la sélectivité est dite totale
- Si le courant $I_{RA} < I_{ccB}$ la sélectivité est dite partielle

IV.4.2. Sélectivité chronométrique :

Elle est assurée par les réglages en valeur de temps des seuils de déclanchement.

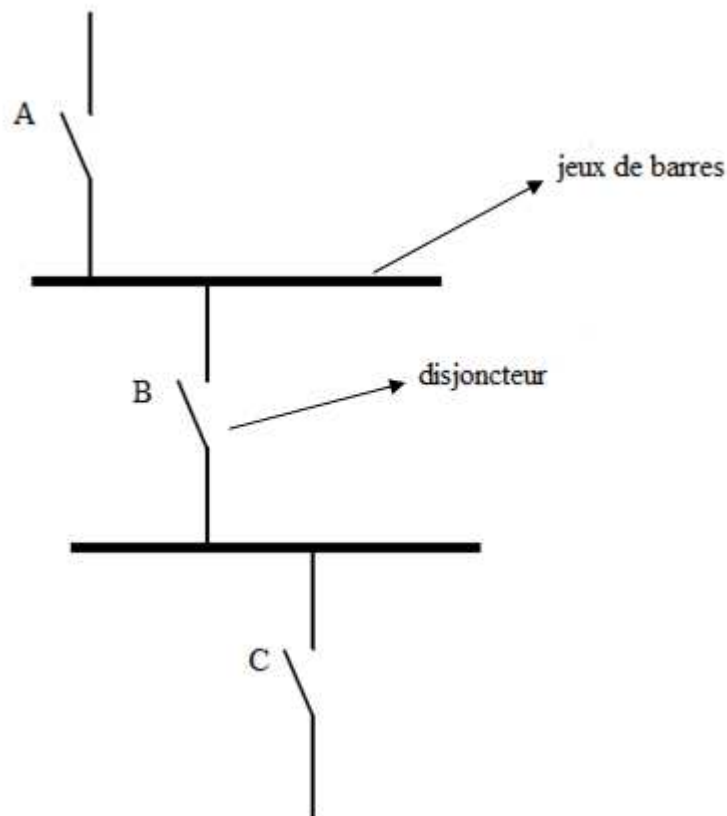


Figure. IV.6. Sélectivité chronométrique

Le disjoncteur C est un disjoncteur à action rapide, tandis que les autres disjoncteurs sont à action retardée (le disjoncteur B à 0.3s, le disjoncteur A à 0.6s). La différence des temps de fonctionnement entre deux protections consécutives constitue l'intervalle de sélectivité. Il doit prendre en compte :

- Le temps de coupure du circuit T_c
- Les tolérances sur la temporisation dt
- Le temps de retour au repos de la protection t_r

Le temps «t» vérifie de ce fait la relation $t = T_c + t_r + 2dt$. Étant donné les performances actuelles des dispositifs de coupure et des relais, la valeur qui est utilisée pour «t» se situe entre 200 et 300 ms pour deux disjoncteurs consécutifs.

IV.4.3. Sélectivité logique : [8]

Ce principe est utilisé lorsqu'un temps court d'élimination de défaut est exigé. L'échange de données logiques entre des protections consécutives élimine les intervalles de sélectivité.

Dans des réseaux en antenne, les protections situées en amont du point de défaut sont activées alors que celles situées en aval ne le sont pas ; ceci permet de localiser clairement le point de défaut et les disjoncteurs à déclencher. Chaque protection qui est activée par le défaut envoie :

- Un ordre de blocage au niveau amont (ordre qui augmente la temporisation du relais amont).
- Un ordre de déclenchement au disjoncteur concerné à moins qu'il n'ait lui-même reçu un ordre de blocage de l'aval.

La temporisation est utilisée comme secours.

IV.5. Degrés de sélectivité :

Dans le domaine de la protection à maximum d'intensité, on peut distinguer deux degrés de sélectivité :

IV.5.1. Sélectivité totale : il y a sélectivité totale entre deux appareils de protection si, un défaut est éliminé par l'appareil de protection en amont du défaut pour toute valeur du courant de défaut présumé.

IV.5.2. Sélectivité partielle : l'appareil en amont fonctionne seul lors d'un défaut jusqu'à une certaine valeur de courant de défaut.

IV.6. Les éléments des systèmes de protection : [7]

IV.6.1. Modèle structural de principe :

Le principe de base de la protection contient essentiellement trois organes principaux qui sont :

- a) **Organe de mesure :** transformateurs de mesure, capteurs....

- b) **Organe de comparaison et de décision** : relais.....
- c) **Organe d'intervention** : ce sont généralement des disjoncteurs

Le schéma suivant représente le principe de base d'un système de protection :

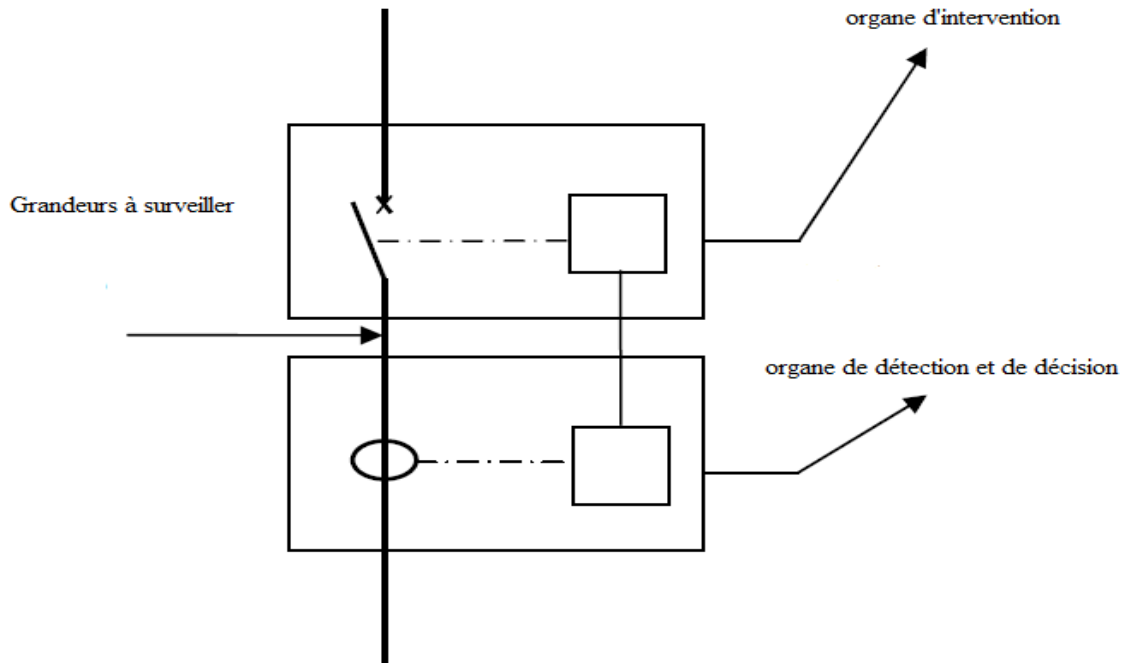


Figure. IV.7. Schéma de principe de la protection

IV.6.2. Les transformateurs de mesure :

Les systèmes de protections sont alimentés par des transformateurs de mesure (transformateur de tension, transformateur de courant). Les transformateurs de mesure sont destinés à ramener les tensions et les courants sur les circuits électriques à des valeurs plus faibles à :

- Mesurer
- Utiliser pour alimenter les dispositifs de comptage
- Utiliser pour alimenter les dispositifs de protections électriques

Ils ont pour but :

- D'isoler les circuits électriques
- De normaliser les grandeurs électriques
- D'assurer des fonctions annexes

IV.6.2.1. Les transformateurs de tension :

Les transformateurs de tension sont des transformateurs de haute précision dont le rapport de transformation varie très peu avec la charge. De plus, la tension secondaire est en phase avec la tension primaire à une fraction de degré près. Les transformateurs de tension sont utilisés pour alimenter les appareils de mesure (voltmètre, wattmètre, etc...) ou de protection (relais). Ils servent à isoler ces appareils et à les alimenter à des tensions appropriées. Le rapport de transformation est choisi de façon que la tension secondaire soit d'une centaine de volts. Ce qui permet l'utilisation d'instruments de fabrication courant (0-15 V) pour la mesure de tension élevées.

Le primaire des transformateurs de tension est branché en parallèle avec le circuit dont on veut connaître la tension.

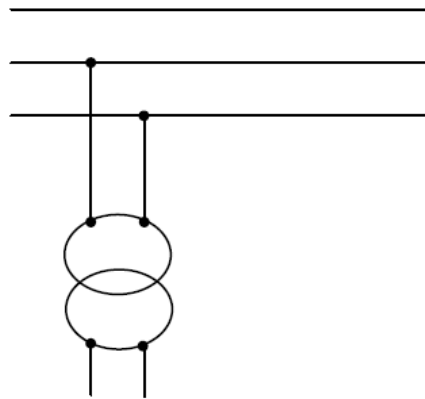


Figure. IV.8. Schéma de branchement

La construction des transformateurs de mesure ne diffère que de très peu de celle des transformateurs conventionnels. Cependant leur puissance nominale est généralement faible (inférieure à 500 VA), de sorte à ce que le volume d'isolation dépasse souvent celui du cuivre

Les transformateurs de mesure sont caractérisés par :

- Le rapport de transformation
- La classe de précision
- La puissance d'échauffement

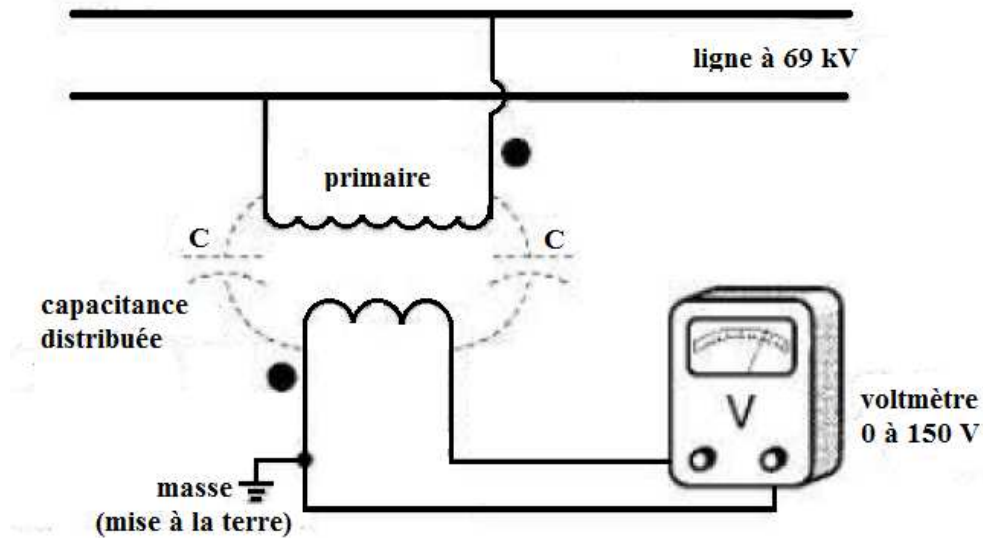


Figure. IV.9. Montage d'un transformateur de tension

Pour mesurer la tension d'une ligne de 69 KV (les capacités servent à empêcher la variation brusque de la tension)

IV.6.3. Transformateur de mesure pour protection :

La classe de précision prévue pour les protections est la classe 3%, erreur de tension de $\pm 3\%$, erreur de déphasage de ± 120 minutes

Les erreurs sont garanties entre 2% de la tension nominale et la valeur correspondant au facteur de tension nominale et ceci pour une charge comprise entre 25 et 100% de la puissance nominale.

Remarque :

Il faut éviter de sur-dimensionner le transformateur de puissance car il sera sur-corrigé et pourra présenter une erreur plus importante, donc respecter la règle :

La résistance de la filerie entre transformateur de puissance et protection intervient comme un facteur d'erreur et non comme un facteur de consommation.

Eviter d'utiliser la classe 6%, pour les mesures de puissance ou impédance, pour laquelle l'erreur sur la tension et sur le déphasage est plus importante ($\pm 6\%$ et le déphasage de ± 240 minutes).

Les classes 0.2, 0.5 et 1 prévues normalement pour la mesure sont acceptables (erreurs respectives de $\pm 0.2\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$, et de déphasage de ± 10 minutes, ± 20 minutes, ± 40 minutes), mais dans la plage de 80 à 120% de la tension nominale (au lieu de la plage de 2% à la tension correspondante au facteur de tension).

Eviter d'utiliser la classe mesure 3% pour laquelle l'erreur sur le déphasage n'est pas garantie.

La classe E de la norme Anglaise BS 3938 est rigoureusement identique à la classe 3%. [7]

IV.6.3.1. Les transformateurs de courant :

Les transformateurs de courant sont des transformateurs à haute précision dont le rapport de transformation demeure essentiellement constant même lorsque la charge au secondaire varie. On atteint un haut niveau de précision en réduisant au minimum le courant d'excitation. Les transformateurs de courant sont utilisés pour ramener à une valeur facilement mesurable les courants intenses des lignes haute ou basse tension. Ils servent aussi à isoler les appareils de mesure ou de protection des lignes à haute tension. Le primaire de ces transformateurs est monté en série avec la ligne dont on veut mesurer le courant.

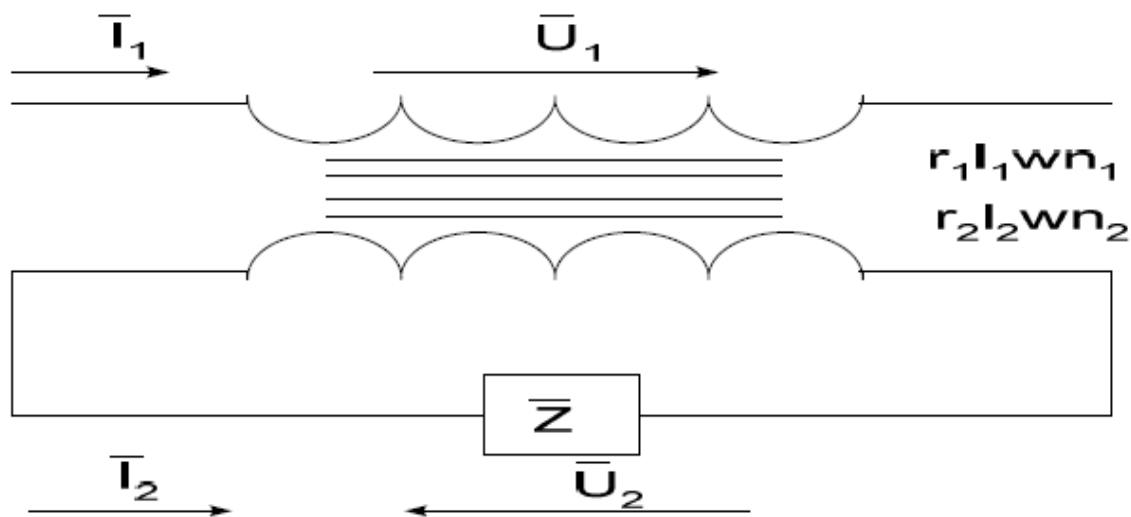


Figure. IV .10. Schéma de branchement

Les transformateurs de courant sont employés seulement pour des fins de mesure et de protection ; donc leur capacité est faible est normalement de l'ordre de 15 à 200 VA.

Comme pour les transformateurs conventionnels, le rapport de transformation du courant est

inversement proportionnel au rapport des nombres de spires du primaire et du secondaire. Un transformateur de courant ayant un rapport de 150/5 A à donc 30 fois plus de spires au secondaire qu'au primaire. Le courant nominal au secondaire est généralement de 5A ou 1A.

Afin d'assurer une bonne précision, les transformateurs de courant utilisés pour la mesure de l'énergie et de la puissance électrique sont construits avec beaucoup de soin. En particulier, le courant d'excitation doit être extrêmement petit, ce qui impose au constructeur une faible densité de flux dans le noyau, de l'ordre de 4V à 20V.

La figure suivante est un montage d'un transformateur de courant, dont le primaire est raccordé en série avec une ligne de 69KV.

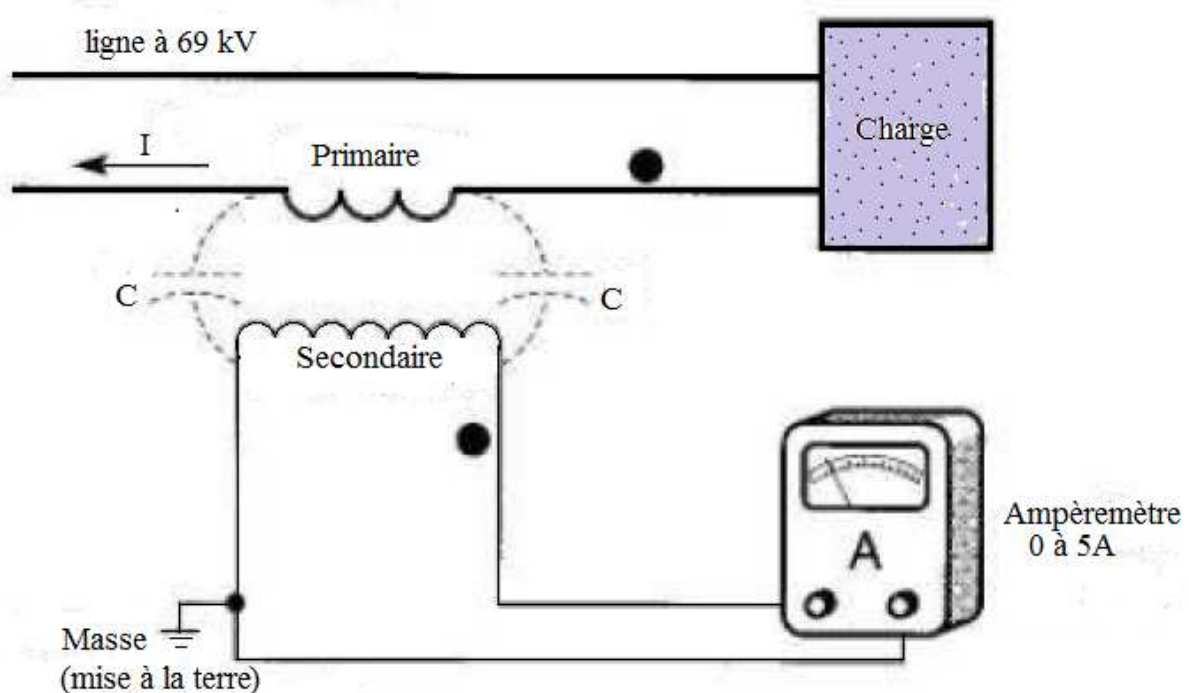


Figure. IV.11. Montage d'un transformateur de courant

IV.6.4. Transformateurs de courant alimentant les protections :

Pour alimenter un dispositif de protection contre les courts-circuits, il faut que le relais de détection soit alimenté par les transformateur de courant qui ne se sature pas au courant de défaut maximal de façon que le courant secondaire, image du courant primaire ne soit pas déformé.

La norme CEI 185 définit une classe de précision d'un transformateur de courant pour protection en le caractérisant par un nombre (indice de classe) et par la lettre «P» (initiale de protection).

L'indice de classe indique la limite supérieure de l'erreur composée pour le courant limite de précision assigné la charge de précision.

Les valeurs normales des classes de précision sont 5% et 10%

Les valeurs nominales des facteurs limites de précision sont 5, 10, 15, 20, 30 et 40.

La norme définit une tension limite de précision équivalente " U_{al} ", qui est la valeur efficace de la tension sinusoïdale, à la fréquence assignée, qui si elle était appliquée à l'enroulement secondaire d'un transformateur de courant produirait un courant d'excitation correspondant au courant d'erreur maximal admissible relatif à la classe de précision du transformateur courant. En pratique les constructeurs de transformateurs de courant pour une définition en classe "5%", calculent cette tension " U_{al} " pour une induction maximale du circuit magnétique de l'ordre de 1.8 Tesla.

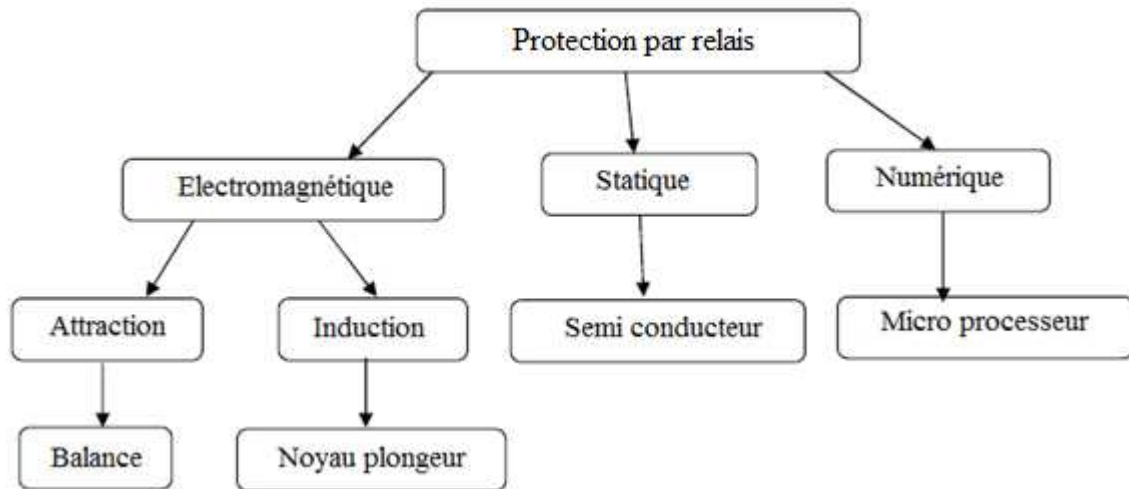
IV.7. Les relais de protection :

IV.7.1. Définition :

Le relais est un dispositif à action mécanique ou électrique provoquant le fonctionnement des systèmes qui isolent une certaine zone du réseau en défaut en actionnant un signal en cas de défaut ou de conditions anormales de marche (alarme, signalisation...)

IV.7.2. Différents types de relais :

Il existe essentiellement trois classes de relais selon l'organigramme suivant :



IV.7.3.Constitution des relais :

IV.7.3.1.Relais électromécanique :

Pendant longtemps, les relais ont été exclusivement de deux genres différents :

- L'attraction magnétique provoquée par un courant qui traverse solénoïde à noyau de fer
- Le couple fourni par la réaction de courants induits dans un rotor massif.

La force ou le couple sont utilisés par un système mécanique qui provoque la manœuvre d'un (ou plusieurs) contacts, éventuellement par l'intermédiaire d'un système d'horlogerie destiné à introduire un retard ajustable.

Les relais électromécaniques sont simples et robustes. Leur entretien est peu coûteux et ils ont une bonne durée de vie (≥ 25 ans). Ils exigent malheureusement une puissance importante pour fonctionner (plusieurs Kilos volts-ampères sur courts-circuits violents) ce qui oblige à dimensionner très largement les transformateurs de courant. Ils peuvent aussi présenter une grande susceptibilité aux chocs et vibrations, particulièrement lorsque l'on cherche une grande sensibilité.

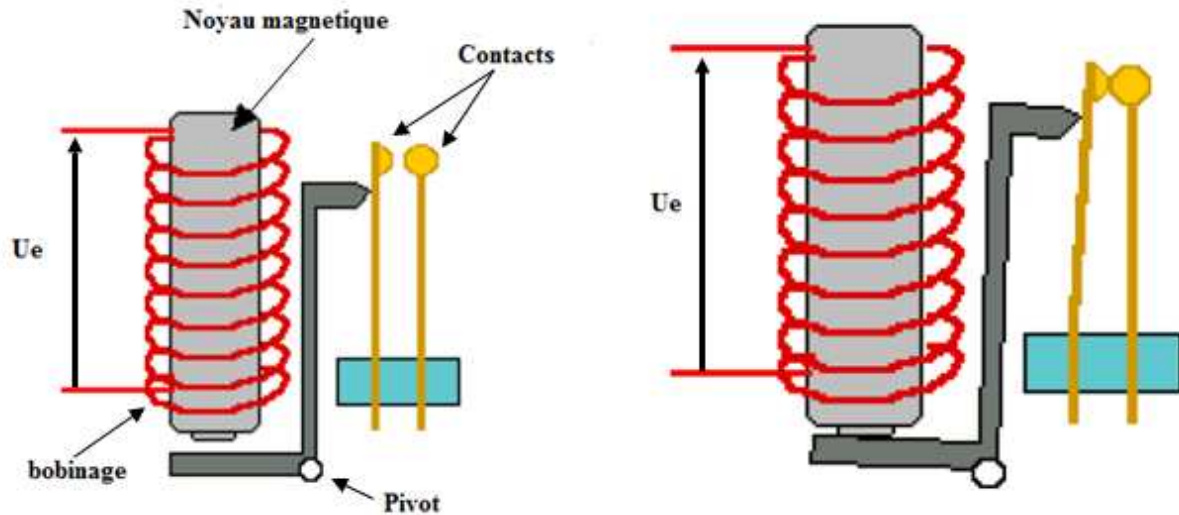


Figure. IV.12. Relais Electromécaniques

IV.7.3.2. Relais Electrostatiques :

La génération suivante (à partir des années soixante) a fait apparaître les relais électroniques analogiques. Ceux-ci sont composés grossièrement de trois blocs

- Un bloc **d'adaptation** et de **filtrage**, constitué de petits transformateurs, d'impédances et de filtres passe-bas destinés à éliminer les composantes rapides transitoires et les harmoniques gênants.
- Un bloc de **traitement** et de **détection**, composés d'un circuit analogique adapté, transformant la grandeur surveillée en une tension ou un courant continu proportionnel, et d'une bascule servant à détecter le passage d'un seuil.
- Un bloc de sortie, comprenant une temporisation par exemple un circuit RC (résistance, condensateur), un relais de sortie électromécanique avec ou sans auto maintien.

Les principaux avantages des relais électrostatiques sur les relais électromécaniques sont leur sensibilité, leur précision et leur rapidité de fonctionnement (quelques périodes) et, surtout leur faible puissance d'entrée (quelque voltampère), permettant de réduire les dimensions et le coût des transformateurs de courant, et d'être moins sensibles au phénomène de saturation de ceux-ci.

Par contre, ils nécessitent une alimentation auxiliaire lorsqu'ils ne sont pas conçus spécialement pour fonctionner à leur propre courant (c'est-à-dire avec la puissance nécessaire au fonctionnement du relais prélève sur le courant de défauts).

IV.7.3.3. Relais Electroniques, Numériques :

La dernière génération est constituée de relais électronique numérique bénéficiant des progrès considérables des microprocesseurs. Ils sont composés :

- d'un bloc **d'adaptation** et de **filtrage**, comparable à celui des relais électronique analogiques, incluant un filtre anti repliement nécessité par la.
- D'un **convertisseur analogique-numérique** le signale par échantillonnage.
- d'un système de **traitement** comportant un microprocesseur et ses annexes et des mémoires conservant le logiciel d'exploitation et de traitement, les données ajustables et les résultats du traitement, la puissance du microprocesseur utilise permet de réaliser plusieurs mesures et de tenir compte de conditions logiques.
- D'un système de sortie et de communication avec un automate ou un calculateur par un bus spécialisé. Les ré actionneurs, places dans les disjoncteurs sont commandés directement par le système de sortie. Le bus de communication permet de renvoyer vers un niveau supérieur (résultats des mesures et de traitement déjà effectué).

Les relais électroniques numériques présentent les mêmes avantages que les relais électroniques analogiques : sensibilité, précision, fidélité et rapidité de fonctionnement (dépendant toute fois de la complexité des fonctions assurées) et faible puissance du signale d'entrée. Ils peuvent assurer des fonctions multiples parfois très complexes et ces fonctions peuvent être modifiées par simple échange de la mémoire contenant les instructions. Ils sont également capable de s'auto contrôler.

Comme tout équipement électronique numérique, ces relais sont sensibles à l'environnement, et particulièrement aux perturbations électromagnétiques. Leur conception doit impérativement en tenir compte pour éviter les déconvenues.

IV.8. Les disjoncteurs : [6]

Le disjoncteur est un organe électromécanique, de protection capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants importants, qu'il s'agisse du courant nominal ou des courant de défauts. Il peut donc être utilisé comme un gros interrupteur, commandé sur place par un

bouton-poussoir ou télécommandé. De plus, le disjoncteur ouvre un circuit automatique dès que le courant qui le traverse dépasse une valeur prédéterminée, quand il sert à interrompre les forts courants de court-circuit. Il a un fonctionnement plus sûr et on n'a pas besoin de le remplacer après chaque interruption.

Les disjoncteurs les plus répandus sont:

IV.8.1. Les disjoncteurs à l'huile : [6]

Les premiers disjoncteurs à haute tension furent des disjoncteurs à gros volume d'huile. Dans un disjoncteur à l'huile, l'arc décompose cette dernière en formant des gaz inflammables constitués principalement de 70% d'hydrogène et de 20% d'acétylène, en libérant des particules de carbone.

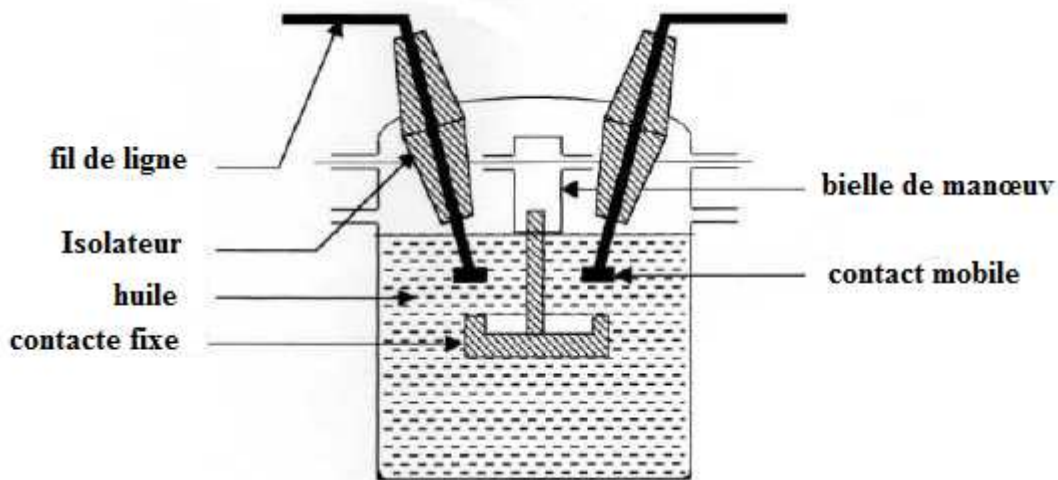


Figure. IV.13. Constitution d'un disjoncteur à l'huile

IV.8.2. Les disjoncteurs à air comprimé : [9]

Ce type de disjoncteur se présente sous forme d'une colonne, et constitué des parties suivantes :

- Un contact fixe lié généralement à l'une des bornes du sectionneur accouplé au disjoncteur.
- Un contact mobile.
- Une chambre inférieure, par laquelle arrive de l'air comprimé quand il faut que l'appareil déclenché.

- Une chambre supérieure, dite chambre d'extinction par laquelle l'air comprimé pourra s'échapper dans l'atmosphère.
- Une surface de contact qui sépare la colonne en deux chambres.



Figure. IV.14. disjoncteur à air comprimé

IV.8.3. Les disjoncteurs au SF₆ (hexafluorure de soufre) : [6]

Le SF₆ est un gaz lourd, inodore, incolore, non toxique, inflammable et ayant de très bonnes caractéristiques diélectriques.

Les disjoncteurs au SF₆ sont disponibles pour toutes les tensions dans la gamme de 14,4kV à 800kV, et ils possèdent un pouvoir de coupure six fois supérieur à celui du disjoncteur à air comprimé. Ils sont à la base des postes blindés à HT, dont le développement se poursuit d'une façon rapide. Ce type de disjoncteurs a l'avantage de s'installer aussi bien en position horizontale qu'en position verticale, selon la structure des postes. Les distances seront réduites et les postes seront plus compacts.

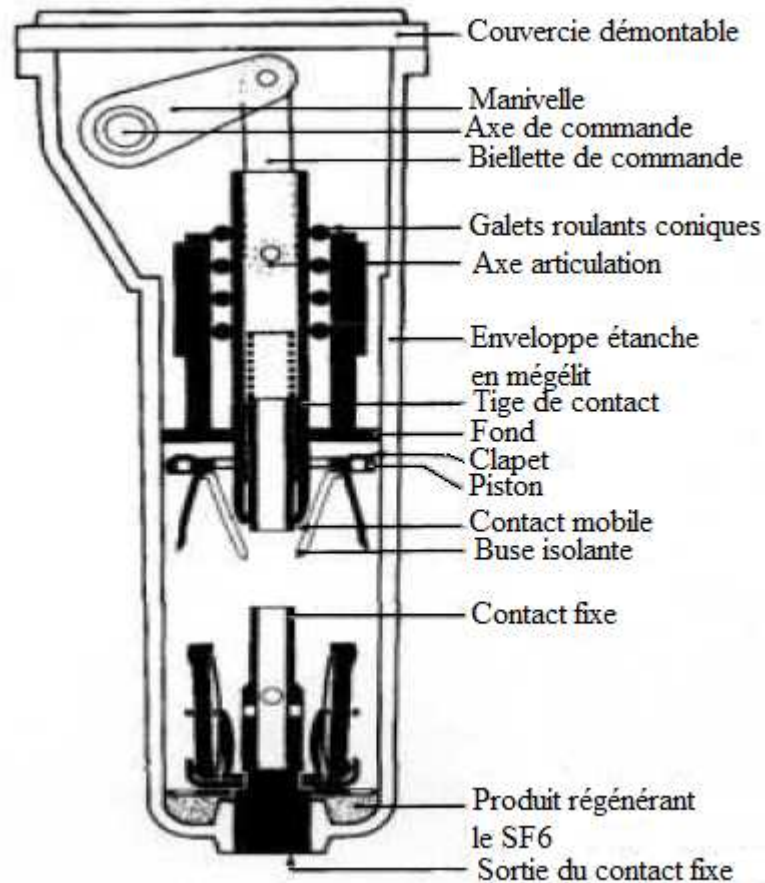


Figure. IV.15. constitution d'un disjoncteur à l'hexafluorure de soufre

IV.8.4. disjoncteur à vide :

Le principe de fonctionnement de ce disjoncteur est différent de celui des autres, car l'absence d'un gaz évite le problème d'ionisation lors de l'ouverture des courants. Ce disjoncteur est scelle hermétiquement de sorte qu'il n'occasionne aucun problème de contamination, ni de bruit.

Sa tension de rupture est limitée à environ 30kV, et pour une tension grande, on met plusieurs modules en série.

La plaque signalétique d'un disjoncteur indique le courant nominal de régime permanent, le courant de rupture (courant maximal que le disjoncteur peut interrompre), la tension nominale et le temps d'ouverture en cycle. Grâce à un soufflage énergétique et une désionisation rapide de l'arc, on réussit à ouvrir un circuit dans un temps compris entre trois et huit cycles sur un réseau de 60Hz. Une coupure rapide permet de réduire les dommages aux lignes et à l'équipement, et ce qui est tout aussi important, elle empêche que le réseau devienne instable.

L'ouverture du disjoncteur peut être commandée directement par le passage du courant à interrompre dans une bobine de déclenchement un dispositif qui peut déceler des conditions anormales sur un réseau.

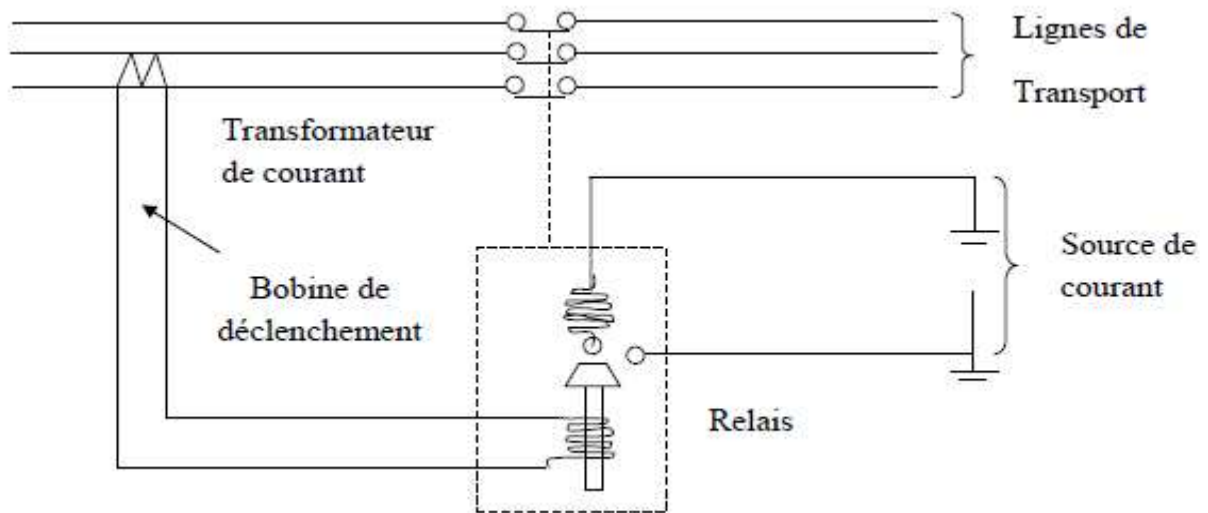


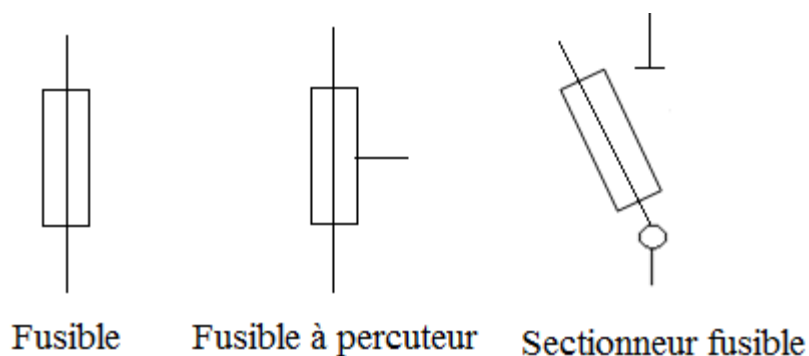
Figure. IV.16. commande d'ouverture d'un disjoncteur par un relais.

IV.9.Fusible : [8]

IV.9.1.Définition :

Le fusible est un organe de sécurité dont le rôle est d'ouvrir, par fusion, le circuit dans lequel il est inséré et d'interrompre le courant lorsque celui-ci dépasse pendant un temps déterminé une valeur donnée. Son nom découle du fait qu'il fonctionne par fusion d'un filament.

IV.9.2.Symbole :



IV.9.3.Constitution :

Le fusible est constitué de :

- Socle : qui permet le raccordement à l'installation.
- Une porte fusible : support de l'élément de remplacement.
- Une cartouche fusible cylindrique (utilisée dans le domaine domestique ou industriel) ou à couteaux (utilisée dans le domaine industriel seulement).



Figure. IV.16. Cartouche cylindrique



Figure. IV.17. cartouche à couteau

IV.9.4.Fonctionnement

Le courant circulant dans le circuit traverse entièrement le fusible. Lorsque le courant dépasse le calibre (valeur spécifiée pendant un temps précis), la partie conductrice du fusible fond et ouvre le circuit.

IV.9.5.Différentes classe de fusible

Il existe trois types de fusibles :

- Fusible à usage générale (gG et gF) : offrant une protection contre les surcharges et les courts-circuits.
- Fusible accompagnement moteur (aM) : il est utilisé pour la protection contre les courts-circuits uniquement, il réagit à 4 fois I_N (courant nominal de moteur).
- Fusible à fusion ultra rapide : utilisé pour la protection des semi conducteurs.

IV.9.6. Caractéristiques des fusibles :

Les caractéristiques des fusibles sont :

- Tension nominale (U_n) : 250, 400, 500, 660V.
- Courant nominale (I_n) : c'est le calibre du fusible ou de la cartouche de remplacement.
- Courant de non fusion (I_{nf}) : c'est la valeur du courant qui peut être supportée par l'élément fusible pendant un temps conventionnel sans fondre.
- Courant de fusion (I_f) : c'est la valeur du courant qui provoque la fusion de fusible avant la fin du temps conventionnel.
- Durée de coupure : c'est le temps qui s'écoule entre le moment où commence à circuler un courant suffisant pour provoquer la fusion et la fin de fusion.
- Pouvoir de coupure : c'est le courant maximum qu'un fusible peut coupe, en évitant la formation d'un arc électrique qui pourrait retarder dangereusement la coupure du courant ; les fusibles possèdent toujours des pouvoirs de coupure élevés (PdC en kA).
- Courbe de fonctionnement d'un fusible : on exprime le temps de fusion en fonction de l'intensité, ce qui se traduit par les deux courbes suivantes :

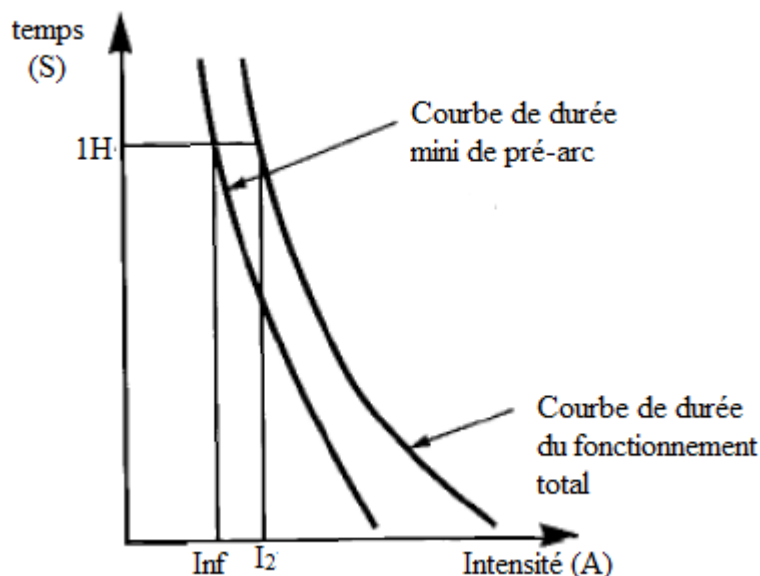


Figure. IV.18. courbe de fonctionnement d'un fusible

IV.9.7.Choix des fusibles :

Le choix d'un fusible doit être fixe selon plusieurs paramètres :

- la classe du fusible gG ou aM.
- Le calibre du fusible I_n et la tension assignée
- La forme et la taille et le pouvoir de coupure.

V.9.Protection des transformateurs : [7]

Un transformateur triphasé est constitué d'un circuit magnétique formé de trois colonnes feuilletées.

Les trois colonnes reçoivent un enroulement primaire et un enroulement secondaire, les enroulements sont concentriques.

Le circuit magnétique est de préférence de section circulaire pour utiliser au mieux la surface interne des bobinages. Les enroulements et le circuit magnétique baignent dans l'huile à l'intérieur d'une cuve assurant ainsi le refroidissement et la protection de la partie active.

Les défauts qui pourront affecter le transformateur sont :

- Court-circuit entre phase à l'intérieur et l'extérieur de la cuve
- Court –circuit entre spires

Le transformateur est équipé de protections de bases suivantes :

- Protection 'BUCHHOLZ' qui protège le transformateur contre tout défaut apparaissant à l'intérieur de la cuve.
- Protection différentielle
- Protection masse cuve

Ces protections se complètent mutuellement.

V.9.1. Protection par relais BUCHHOLZ :

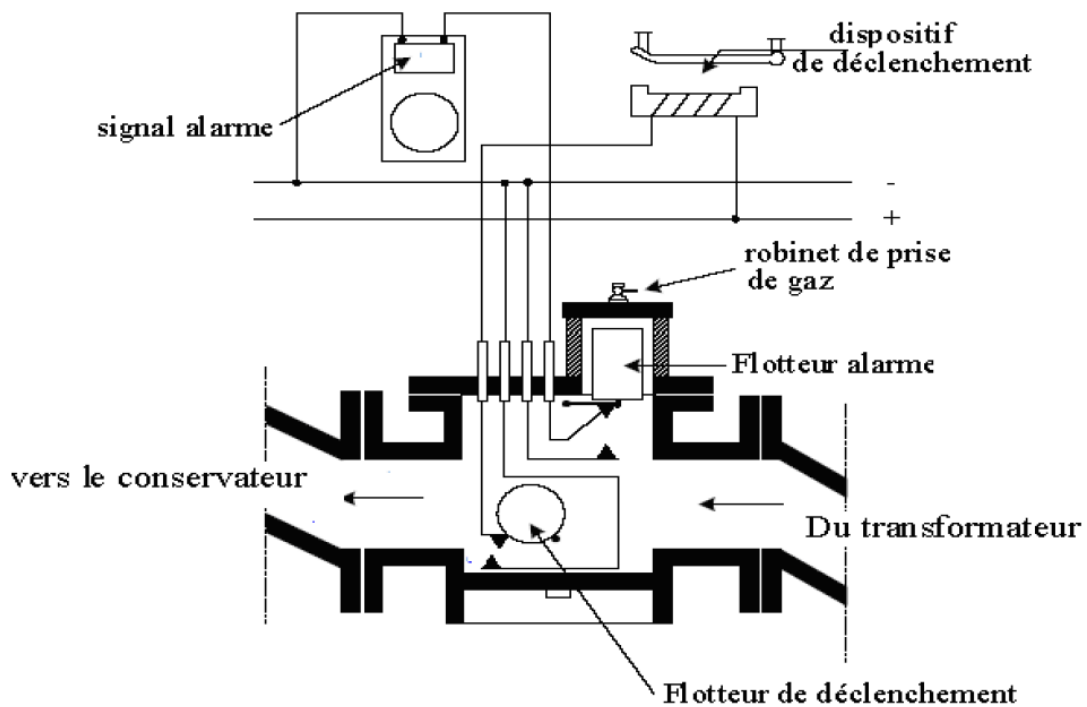


Figure. IV.19. schéma de principe du relais BUCHHOLZ [6]

Lorsque le transformateur est affecté d'un défaut interne, les gaz provenant de la décomposition de l'huile ou de la dégradation des isolants par l'arc électrique remonteront vers le relais BUCHHOLZ et entraînent suivant l'impédance du défaut, le basculement des flotteurs, soit en position déclenchement soit en position alarmes.

Après le fonctionnement du relais BUCHHOLZ, l'accumulateur de gaz situé à la partie supérieure du relais peut renseigner sur l'origine du défaut.

Après examen visuel la couleur des gaz donne une indication sur l'endroit du défaut :

- Gaz blanc proviennent de la destruction de papier
- Gaz jaune proviennent de la destruction des pièces en bois
- Gaz noir ou gris proviennent de la détérioration de l'huile.

Un examen complémentaire renseigne aussi sur la nature de défaut

Si les gaz ne sont pas inflammables on conclut que c'est de l'air qui provient soit de l'évacuation d'une poche d'air, soit de fuite d'huile.

Si les gaz s'enflamment, il ya en destruction des matières isolantes, donc le transformateur doit être mis hors service.

V.9.2 Protection différentielle :

La protection différentielle du transformateur compare phase à phase les courants primaires et secondaires du transformateur à protéger. L'une d'entrée et l'autre de sortie devaient être égales en l'absence de tout défaut, de ce fait des transformateurs de courant sont placés à l'amont et à l'aval de chaque phase tels que leur courants I_1 et I_2 circulent en sens contraire dans le primaire.

Dans le secondaire on recueille un courant image : $I_d = \Delta I = I'_1 - I'_2$

D'autre part, on utilise un sommateur, dont le primaire est composé de deux demi-primaires, où circulent les courants délivrés par les deux TC de la phase.

Ils donnent un courant :

$$I_S = \frac{I'_1 - I'_2}{2}$$

La figure suivante est un schéma de principe d'une protection différentielle

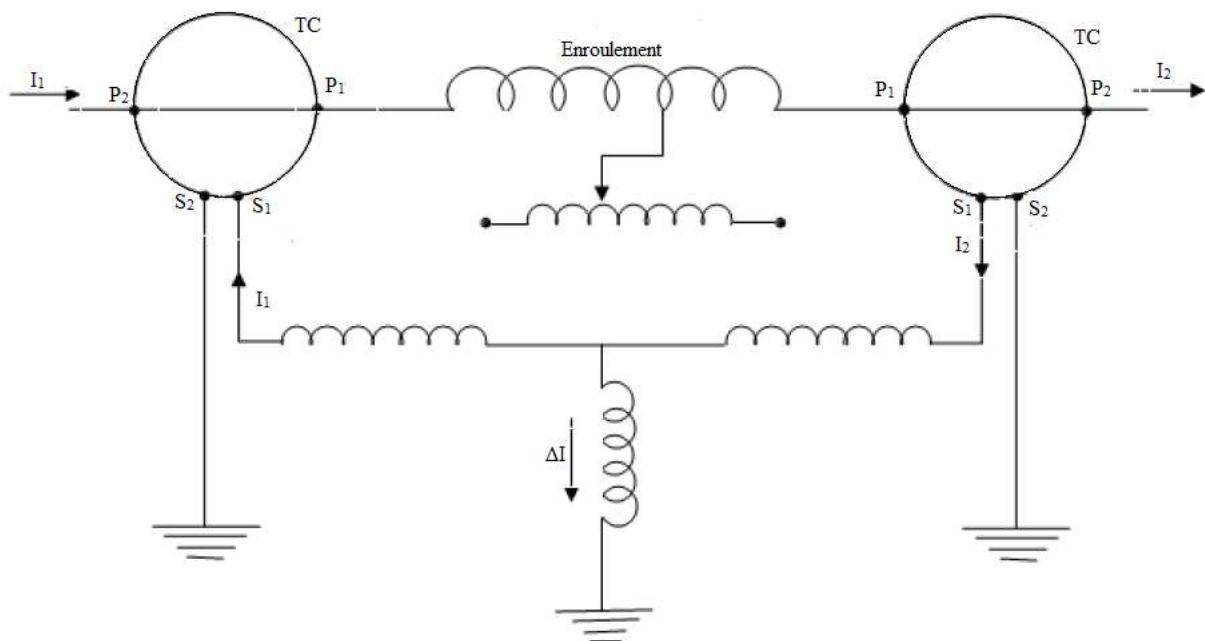


Figure. IV.20. Schéma de protection différentielle pour transformateur

V.9.3. Protection masse cuve :

La protection ampérométrique masse cuve est utilisable pour les transformateurs HT/MT reliés à un réseau électrique dont le neutre est relié à la terre.

Pour les réseaux électriques dont le neutre est isolé, la protection masse cuve est assurée par un relais de tension homopolaire. Quand le courant de défaut dépasse la valeur de consigne, le relais bascule, et ordonne l'ouverture du disjoncteur.

La figure suivante est un schéma de principe d'une protection masse-cuve.

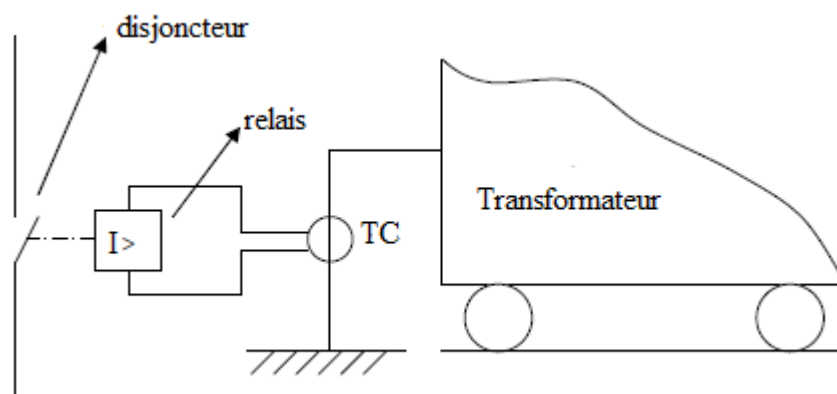


Figure. IV.21. Schéma de protection masse cuve pour transformateur

Conclusion :

Après avoir étudié les différents défauts affectant dans un réseau électrique nous avons intérêt d'étudier leurs moyens de protection.

Pour cela, nous avons bien défini les qualités d'un système de protection doit être satisfaisant pour assurer une meilleure protection des différentes parties d'un réseau électrique.

Conclusion générale

L'installation électrique doit être protégée contre les courts-circuits. L'intensité du courant de court-circuit est à calculer aux différents étages de l'installation pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou qui doit couper le courant de défaut.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour le calcul des courants de court-circuit. La méthode des impédances est utilisée quand le défaut est triphasé et symétrique, il est très souvent considéré car il provoque les courants de défauts les plus importants son calcul est donc indispensable pour le choix du matériel.

La méthode des composantes symétriques est la plus générale car elle tient compte de la réalité du défaut mais son application est laborieuse et nécessite donc un outil mathématique plus complexe.

La méthode des valeurs réduites est utilisée pour des réseaux à constitution simple pour lequel il est aisé de calculer les différentes résistances et réactances et ainsi concevoir le schéma équivalent en régime de court-circuit, donc la connaissance de ces paramètres est indispensable pour chaque élément constituant le réseau.

Afin de parer aux conséquences des courants de court-circuit il est indispensable de munir le réseau d'appareillage adéquat de protection et d'équipements adaptés pour rétablir le bon fonctionnement du réseau et isoler la partie en défaut.

Nous espérons avoir apporté une petite contribution à l'étude des courts-circuits et nous souhaitons qu'il soit d'un apport appréciable pour d'autres travaux sur les réseaux électriques en général.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. IMAROUNENE, S. SI HADJ MOHAND « étude des courants de courts-circuits dans les réseaux électriques avec le neutre partiellement isolé de la terre» projet de fin d'études. UMMTO promotion 2010
- [2] benoît de METZ-NOBALT, Frédéric DUMAS, Christophe POULAIN
« Calcul des courants de court-circuit» Cahier Technique Schneider Electric n° 158.
- [3] A. CHAOUCHI, K. BOUBEKEUR « Etude des réseaux par la méthode des puissances complexes de court-circuit » projet de fin d'études. UMMTO promotion 1998.
- [4] B. AIT SAI, H. SAMAH « Etude des courants de courts-circuits et leurs conséquences dans les réseaux électriques » projet de fin d'étude. UMMTO promotion 2012.
- [5] benoît de METZ-NOBALT, « Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à laide des composantes symétriques » cahier Technique Scheider Electric n° 18.
- [6] Z. OUGUENOUNE, N. MAMOU « Etude des protections du départ MT BOUKHALFA issu du poste 60/30 KV Draa ben khedaa » projet de fin d'études. UMMTO promotion 2009.
- [7] M. CHATBI, A. LADJ « Etude des protections électriques du jeu de barres 6,3 KV de la centrale thermique De Ras-djinet » projet de fin d'études. UMMTO promotion 2009.
- [8] F. AMRAN, R. BELKESSA « Etude des protections des départs moyenne tension application poste 60/30 KV de TiziMèden » projet de fin d'études. UMMTO promotion 2009.
- [9] N. TOUATI, T. AIT RAHMANE, S. BERKANI «Etude des défauts dans un réseau moyenne tension» projet de fin d'études. UMMTO promotion 2009.