

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



جامعة العربي بن مهيدي أم البواقي
UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI
OUM EL BOUAGHI



FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES
Département De Génie Electrique

POLYCOPIE DE COURS

Domaine : Sciences & Technologies

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Niveau : Licence 3

Cours de Réseaux électriques



Réalisé par : **Dr . BELILA Hassen**

MCB au département de génie électrique

Année universitaire : 2021/2022

Avant-propos	1
<i>CHAPITRE 1: Généralité sur les réseaux électrique</i>	
1.1. Introduction	2
1.2. Avantages et inconvénients du courant continu	3
1.3. Avantages et inconvénients du courant alternatif	3
1.4. Définition du Réseau Electrique	3
1.5. Constitution des réseaux électriques	3
1.5.1. Les centrales électriques	4
1.5.1.1. Centrales thermiques	4
1.5.1.2. Centrales nucléaires	4
1.5.1.3. Centrales hydrauliques	5
1.5.1.4. Les centrales éoliennes	6
1.5.1.5. Les centrales solaires ou photovoltaïques	7
1.5.1.6. Les avantages et les inconvénients des sources d'énergie	7
1.6. Les postes électriques	8
1.6.1. Fonction des postes électriques	8
1.6.2. Les différents éléments du poste	9
1.6.2.1. Transformateurs de puissances	9
1.6.2.2. Disjoncteurs	9
1.6.2.3. Sectionneurs	9
1.6.2.3. Parafoudres	10
1.6.2.5. Transformateur de courant	10
1.6.2.6. Transformateur de tension	10
1.6.2.7. Jeux de barres	11
1.6.2.8. Circuit bouchon haute tension	11
1.7. Les lignes électriques	11
1.7.1. Eléments constitutifs d'une ligne aérienne	11
1.7.1.1. Les conducteurs de phase	12
1.7.1.2. Les Eclateurs	12
1.7.1.3. Les Pylônes	12
1.7.1.4. Les isolateurs	12
1.7.1.5. Câbles de garde	13
1.7.1.6. Prises de terre des pylônes	13
1.8. Appel de puissance d'un réseau	13
<i>CHAPITRE 2: Modes de transport, répartition et distribution de l'énergie électrique</i>	
2.1. Description des réseaux électriques	15
2.2 Les niveaux de tension et les types de réseau électrique	16
2.3. Les moyens d'acheminer l'électricité	16
2.4. Structures topologiques des réseaux	17

2.4.1. Réseau radial	17
2.4.2. Réseau bouclé	17
2.4.3. Réseau maillé	18
2.5. Mode d'alimentation des postes de livraison HTB	18
2.5.1. Simple antenne	18
2.5.2. Double antenne	19
2.5.3. Double antenne - double jeu de barres	19
2.6. Mode d'alimentation des postes de livraison HTA	20
2.6.1. Simple dérivation ou en antenne	21
2.6.2. Coupure d'artère ou boucle	21
2.6.3. Double dérivation	22

CHAPITRE 3: Calcul des paramètres linéiques

3.1. Introduction	23
3.2. Détermination des paramètres linéiques d'une ligne (R L C G)	23
3.2.1. Calcul de la résistance (R)	23
3.2.2. Calcul de l'inductance	23
3.2.2.1. Inductance d'un conducteur simple	24
3.2.2.1.1. Inductance interne due au flux magnétique interne	24
3.2.2.1.2. Inductance externe due au flux magnétique externe	25
3.2.2.2. Inductance des lignes monophasées	26
3.2.2.2.1 Inductances propre et mutuelle	27
3.2.2.2.2. Inductances d'une ligne monophasée avec conducteur composée	28
3.2.2.3. Inductance linéique d'une ligne triphasée	29
3.2.2.3.1. Espacement symétrique	29
3.2.2.3.2. Espacement asymétrique	30
3.2.2.3.2.1 Ligne transposée	31
3.3. Calcul des capacités linéiques	32
3.3.1. Champ électrique d'un conducteur rectiligne	32
3.3.2. Potentiel entre deux points	32
3.3.3. Capacité d'une ligne bifilaire	33
3.3.4. Capacité d'une ligne triphasée	33
3.3.4.1. Espacement symétrique	33
3.3.4.2. Espacement asymétrique	34
3.3.5. Effet du sol	36
3.4. La conductance due à l'effet couronne G	37

CHAPITRE 4: Modélisation des lignes aériennes

4.1. Introduction	38
4.2. Modélisation d'une ligne aérienne	38
4.2.1. Modèle d'une ligne courte	38

4.2.2. Modèle d'une ligne moyenne	39
4.2.3. Modèle d'une ligne longue	40
4.2.3.1. Détermination des constantes d'intégration A_1 et A_2	42
4.2.3.2. Circuits équivalent d'une ligne longue	42
4.2.3.3. Ligne sans pertes	43
4.2.4. Taux de régulation	44
4.2.5. Effet de FERRANTI	44
4.3. Transit de puissance à travers une ligne de transport	45
4.4. Compensation de l'énergie réactive	45
4.4.1. Compensation shunt par inductance	46
4.4.2. Compensation série et shunt par condensateur	47
 <i>CHAPITRE 5: Transformateur et système d'unité relative</i> 	
5.1. Introduction	49
5.2. Rappels sur le transformateur monophasé	49
5.2.1. Symbole	49
5.2.3. Rapport de tension (essai à vide)	49
5.2.4. Rapport de courant (essai en charge)	50
5.2.5. Puissance apparente	50
5.2.6. Etude du transformateur réel	50
5.2.7. Etude du transformateur avec l'hypothèse de Kapp	51
5.2.8. Détermination des éléments équivalents	53
5.2.8.1. Essai à vide	54
5.2.8.2. Essai en court-circuit	54
5.2.8.3. Représentation des tensions et courants dans le plan complexe	54
5.2.9. Rendements des transformateurs	54
5.3. Transformateurs triphasés	55
5.3.1. Constitution	56
5.3.2. Connexions des transformateurs triphasés	56
5.3.3. Choix du couplage	57
5.3.4. Indice horaire	57
5.3.5. Rapport de transformation	58
5.3.6. Couplages normalisés	58
5.3.6.1. Couplage étoile-étoile Yy_0	58
5.3.6.2. Couplage étoile-étoile Dy_{11}	59
5.3.6.3. Couplage étoile-zig zag Yz_{11}	59
5.3.7. Marche en parallèle des transformateurs triphasés	59
5.3.8. Schéma monophasé équivalent	60
5.4. Système des grandeurs réduites (Le per unit)	62
5.4.1. Changement de base	63

<i>CHAPITRE 6: Calcul des défauts symétriques</i>	
6.1. Introduction	65
6.2. Les principaux défauts de court-circuit	65
6.2.1. Caractéristiques des courts-circuits	65
6.2.2. Conséquences des défauts de court-circuit	66
6.3. Etablissement de l'intensité de court-circuit	67
6.3.1. Défaut éloigné des alternateurs	68
6.3.2. Défaut à proximité des alternateurs	70
6.4. Calcul du court-circuit par la théorie de Thévenin	72
6.4.1. Exemple	73
6.4.2 Puissance du court-circuit (Sélection du disjoncteur)	77
6.5. Analyse du défaut utilisant la matrice impédance bus	77
<i>CHAPITRE 7: Les composantes symétriques</i>	
7.1. Introduction	81
7.2. Présentation de la méthode des composantes symétriques	81
7.3. Impédances de séquence	84
7.3.1 Impédances de séquence des charges connectées en Y	84
7.3.2 Impédance de séquence des lignes de transmission	85
7.3.3. Impédance de séquence du transformateur	86
7.4. Réseaux de séquence d'une machine synchrone (générateur) chargée	88
<i>CHAPITRE 8: Calcul des défauts asymétriques</i>	
8.1. Introduction	90
8.2. Calcul des défauts asymétriques	90
8.2.1. Défaut phase-terre	90
8.2.2. Défaut phase-phase	92
8.2.3. Défaut biphasé terre	94
8.3. Calcul des défauts asymétriques par la matrice Z_{bus}	95
8.3.1. Défaut phase-terre utilisant Z_{bus}	95
8.3.2. Défaut biphasé utilisant Z_{bus}	96
8.3.3. Défaut double Ligne-Terre utilisant Z_{bus}	97
8.4. Tensions aux bus et courants de ligne durant le défaut	97
Références Bibliographiques	99

Avant-propos

Ce cours de réseaux électriques est destiné aux étudiants en troisième année Licence électrotechnique, il est axé sur le calcul des paramètres des lignes électriques, la modélisation des différentes parties du réseau, l'écoulement de puissances dans les réseaux électriques, et le calcul des courants de court-circuit.

Il commence par des généralités sur les réseaux électriques (les modes de production d'énergie électriques, les postes électriques et leurs éléments, types des réseaux électriques et leurs différents éléments)

Le deuxième chapitre donnera les modes de transport, répartition et distribution de l'énergie électrique une analyse des différentes architectures des réseaux avec un accent particulier sur le design des postes qui sont un élément essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques (fiabilité, protection, maintenance . . . etc).

Le troisième chapitre se focalisera essentiellement sur les lignes électriques, leurs types, leurs composants ainsi le calcul des caractéristiques longitudinales (Résistance, inductance), et aussi le calcul des caractéristiques transversales (Capacité, conductance) des lignes électriques.

Le quatrième chapitre sera consacré aux différents modèles des lignes de transport d'énergie électrique (modèle de ligne courte, modèle de ligne moyenne, modèle de ligne longue), ligne sans pertes, chute de tension, et transite de puissance.

Le cinquième chapitre présentera le transformateur et le système des grandeurs réduites, qui permet à l'ingénieur électricien d'avoir constamment à l'esprit des ordres de grandeurs relatifs de certains paramètres indépendamment des niveaux de tension et de puissance.

Le sixième chapitre consistera au calcul des défauts symétriques qui peuvent affecter une ligne électrique,

Au septième chapitre, nous présentons la méthode des composantes symétriques qui est utilisée pour analyser les systèmes déséquilibrés.

Le dernier chapitre de ce cours traitera le calcul des courants de défaut asymétriques.

Connaissances préalables recommandées :

Cours de base d'électrotechnique fondamentale (électricité et circuit, champ électrique et magnétique, puissance, régime triphasé, alternateur, moteur, transformateur).

CHAPITRE

1

GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUE

1.1. Introduction

Benjamin Franklin est connu pour sa découverte de l'électricité. Né en 1706, il a commencé à étudier l'électricité dans le début des années 1750.

Entre 1750 et 1850, il y avait beaucoup de grandes découvertes dans les principes de l'électricité et du magnétisme par Volta, Coulomb, Gauss, Henry, Faraday, et d'autres. Il a été constaté que le courant électrique produit un champ magnétique et un champ magnétique mobile produit de l'électricité dans un fil.

En 1879, Thomas Edison a inventé une ampoule plus efficace. En 1882, il a placé en service le premier système de distribution de courant continu (CC) à New York (centrale à vapeur-électrique).

Le problème de ce mode de générations d'énergie électrique ne permet pas de transmettre cette énergie très loin, car on ne peut le générer et l'utiliser qu'à des tensions basses pour des raisons de sécurité et d'isolation.

Et pour satisfaire la demande, ils ont construit des stations de générations près des centres de consommations, et chacun y allait de ses propres projets de mini réseaux.

Pour résoudre le problème du transport de l'énergie électrique sur de longues distances, William Stanley a inventé le transformateur en 1885. Le transformateur a permis l'énergie électrique pour être transporté sur de longues distances efficacement. Cela a permis de fournir de l'électricité aux foyers et aux entreprises situées loin des centrales de production d'électricité. L'application de transformateurs requis le système de distribution de type courant alternatif (CA).

1.2. Avantages et inconvénients du courant continu

Les avantages de la liaison en (CC) sont :

- Grace au développement de l'électronique de puissance, il est plus économique de convertir la THT et UHT de l'alternateur au continu cela permet d'utiliser deux lignes au lieu de trois et de le reconverter à l'autre extrémité (recommander pour des lignes > 500 km).
- Les lignes à (CC) n'ayant pas de réactance (X), sont donc capables de faire transiter plus de puissance que des lignes à (CA) avec des conducteurs de même section.
- L'utilisation du (CC) est mieux lorsqu'il s'agit de traverser des cours d'eau ou mer.

Les inconvénients de la liaison en (CC) sont :

- La production d'harmonique qui nécessite un filtrage robuste, et un système de compensation d'énergie réactive important aux deux extrémités de la ligne.
- Difficulté de couper les courants continus, d'où dispositifs de coupure plus performants et plus chers,

1.3. Avantages et inconvénients du courant alternatif

Les avantages de la liaison en (AC) sont :

- La suppression des collecteurs dans les alternateurs, permet de construire des alternateurs à moyenne tension.
- La transformation de l'énergie électrique (élévation, abaissement).
- Transporter l'énergie électrique à des grandes distances.

Les inconvénients de la liaison en (AC) sont :

- Implique des effets inductifs et capacitifs (facteur de puissance <1),
- L'interconnexion de plusieurs réseaux nécessite, l'identité de la tension, de la fréquence et de la phase,
- Implique un effet de peau d'où la nécessité de câbles et lignes adaptés et donc plus chers.
- Une liaison a courant alternatif est constituée au minimum de trois conducteurs dont chacun.

1.4. Définition du Réseau Electrique

Un réseau électrique est l'ensemble des composantes requises pour conduire l'énergie électrique de la source (générateur) à la charge (consommateur). Cet ensemble comprend des transformateurs, des lignes de transmission, des pylônes, des générateurs, des moteurs, des réactances, des condensateurs, des appareils de mesure et de contrôle, des protections contre la foudre et les courts-circuits, etc.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques..., avec les centres de consommation (villes, usines...). L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) et minimiser la chute de tension puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final.

Les systèmes électriques sont des systèmes de livraison d'énergie en temps réel. Temps réel signifie que l'électricité est produite, transportée, et fournie au même temps.

Les systèmes d'alimentation électriques ne sont pas des systèmes de stockage tels que les systèmes d'eau et les systèmes de gaz. Au lieu de cela, les générateurs produisent de l'énergie que la demande l'exige.

1.5. Constitution des réseaux électriques

1.5.1. Les centrales électriques

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles, dites centrales thermiques classiques ;
- Les centrales nucléaires ;
- Les centrales hydroélectriques ;
- Les centrales solaires ou photovoltaïques ;
- Les centrales éoliennes.

1.5.1.1. Centrales thermiques

Pour fonctionner, une centrale thermique à flamme a besoin d'une source de chaleur (pétrole, charbon, gaz) qui va chauffer un fluide dans une chaudière (dans la majorité des cas, il s'agit d'eau), ce fluide va ainsi passer de l'état liquide à l'état gazeux (tel que la vapeur par exemple). Le gaz ainsi obtenu va faire tourner une turbine qui elle-même est reliée à un alternateur qui va produire de l'énergie électrique (Figure.1.1).

Pour pouvoir faire tourner la turbine, il faut condenser le gaz en aval de la turbine grâce à une source froide pour diminuer sa pression, à la sortie de la turbine, la vapeur est refroidie pour la retransformer en eau puis, elle est renvoyée dans la chaudière. Le refroidissement de la vapeur est confié à une réserve d'eau (cours d'eau)

Une centrale thermique à flamme fournit une puissance électrique de l'ordre de quelques centaines de mégawatts

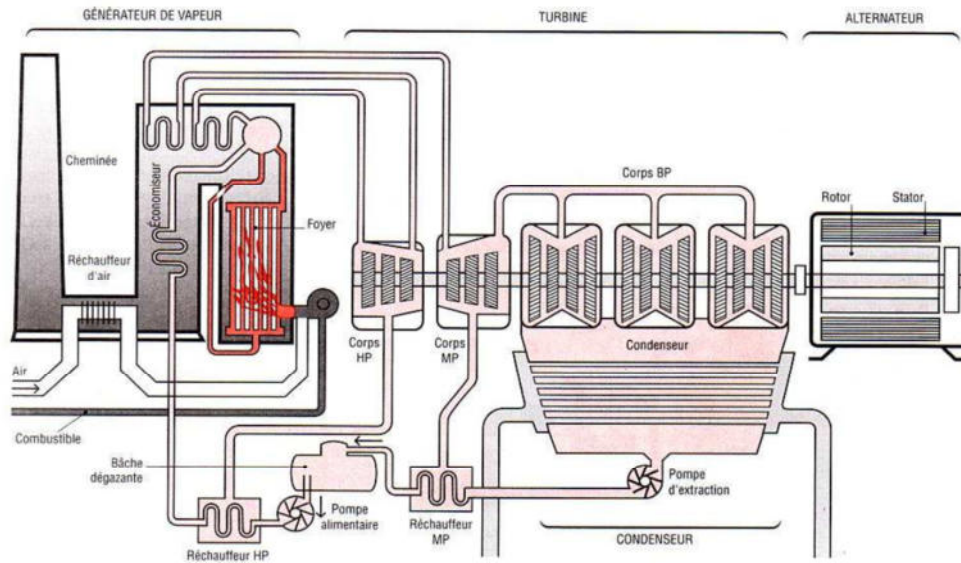


Figure.1.1. Centrales thermiques à vapeur

1.5.1.2. Centrales nucléaires

Les centrales nucléaires *produisent* l'électricité à partir de la chaleur libérée par une réaction nucléaire. Ce phénomène est provoqué par la division du noyau d'un atome, procédé qu'on appelle fission nucléaire (Figure1.2).

Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission. Une telle centrale comprend donc une turbine à vapeur, un alternateur, un condenseur, etc... , comme dans une centrale thermique conventionnelle . Le rendement global est semblable (entre 30 % et 40 %) et l'on doit encore prévoir un système de refroidissement important, ce qui nécessite un emplacement près d'un cours d'eau ou la construction d'une tour de refroidissement.

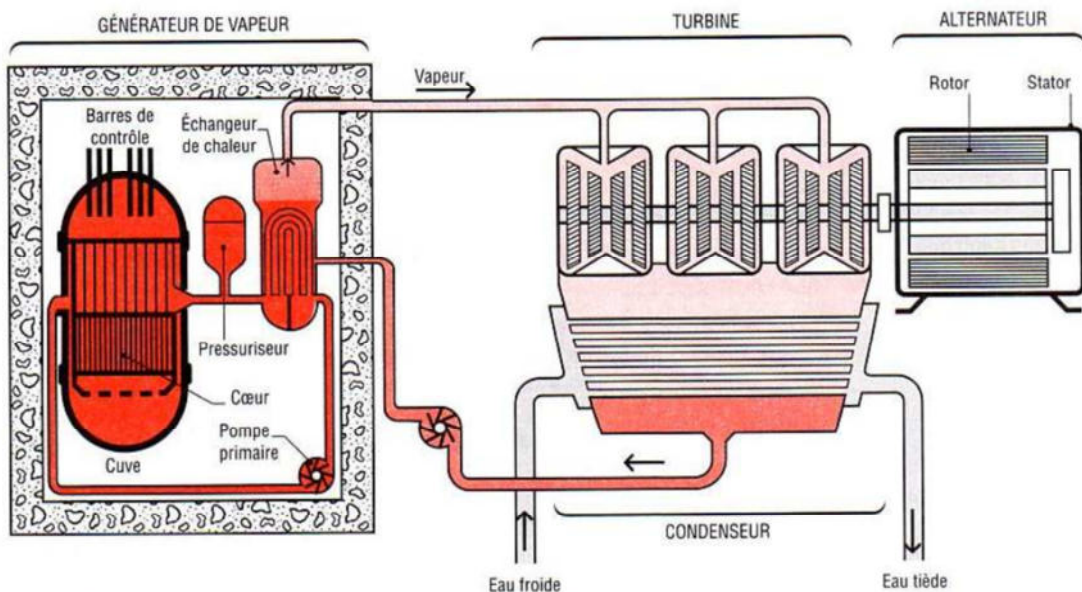


Figure.1.2. Centrales nucléaires

➤ **Energie libérée par la fission atomique**

Lorsque le noyau d'un atome subit la fission, il se sépare en deux. La masse totale des deux atomes ainsi formés est habituellement différente de celle de l'atome original. S'il y a une diminution de la masse, une quantité d'énergie est libérée. Sa valeur est donnée par la formule :

$$E = m \cdot c^2 \quad (1.1)$$

Avec :

E = énergie libérée, en joules [J]

m = diminution de masse, en kilogrammes [kg] ;

c = vitesse de la lumière [3×10^8 m/s].

- La quantité d'énergie libérée est énorme, car une diminution de 1 g seulement donne une énergie de 72.6×10^9 joules, soit l'équivalent énergétique d'environ trois mille tonnes de charbon.

I.5.1.3. Centrales hydrauliques

Les centrales hydro-électriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique (Figure.1.3). Cette turbine entraîne un alternateur dans le lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

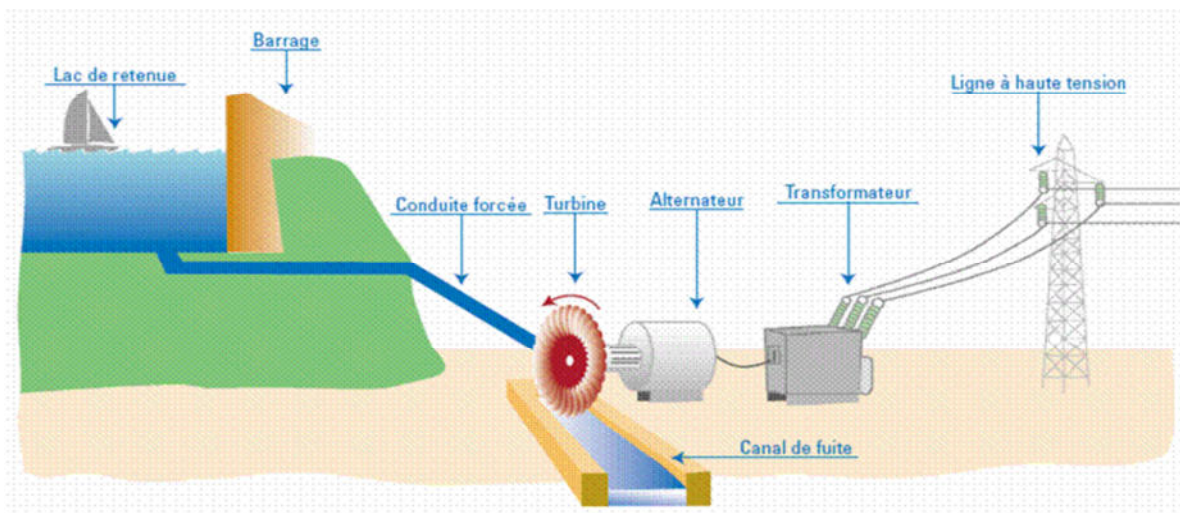


Figure.1.3. Centrales hydrauliques

➤ **Puissance disponible**

D'une façon générale, la puissance que l'on peut tirer d'une chute dépend non seulement de la hauteur de la chute, mais aussi du débit du cours d'eau. Le choix de l'emplacement d'une centrale hydro-électrique dépend donc de ces deux facteurs.

La puissance disponible est donnée par l'équation :

$$P = g \cdot \rho \cdot q \cdot h \quad (1.2)$$

Où :

- P : puissance hydraulique, en kilowatts [kW]
 ρ : la masse volumique de l'eau [kg/m^3]
 q : débit en mètres cubes par seconde [m^3/s]
 h : hauteur de la chute, en mètres [m]
 g : l'accélération de la pesanteur 9.8 [m/s^2]

1.5.1.4. Les centrales éoliennes

Une éolienne est une machine permettant de convertir la force du vent en électricité. Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales (on parle aussi d'une hélice) qui font elles-mêmes tourner un générateur. Le générateur transforme à son tour l'énergie mécanique du vent en énergie électrique (Figure.1.4).

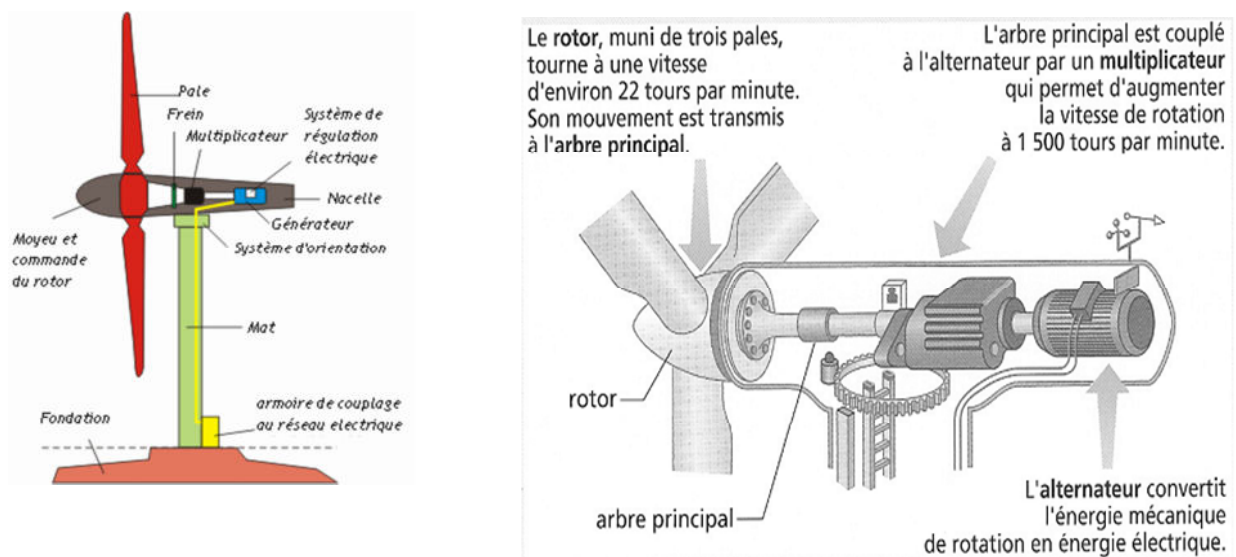


Figure.1.4. Hélice d'une éolienne

➤ Puissance disponible

Puissance fournie par l'éolienne :

$$P = k.S.v^3 \quad (1.3)$$

Avec :

- S : la surface du rotor face au vent en [m^2];
 v : la vitesse du vent en [m/s]; et k un facteur;

1.5.1.5. Les centrales solaires ou photovoltaïques

Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité (Figure.1.5). Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux.



Figure.1.5. Centrales solaires ou photovoltaïques

I.5.1.6. Les avantages et les inconvénients des sources d'énergie

Source d'énergie	Avantages	Inconvénients
Fossiles (7%) : - Pétrole - Gaz - charbon	Faciles à exploiter	Production de CO2
Nucléaire (79%)	Moins cher aujourd'hui. Moins de CO2	Déchets radioactifs Risque d'accident nucléaire.
Renouvelables (14%) : - Eau - Soleil - Vent	non polluantes	Ne peuvent être implantée de partout. Coût plus élevé. Faible puissance. Fabrication recyclage des cellules photovoltaïque

1.6. Les postes électriques

Tous les réseaux sont reliés entre eux par des postes électriques. On distingue trois types de postes électriques, suivant les fonctions qu'ils assurent :

- **Postes d'interconnexion :** Permettent de relier entre eux plusieurs sections du réseau, leur but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques. Ils comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension.
- **Postes de transformation :** Dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs.
- **Les postes mixtes :** Les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

1.6.1. Fonction des postes électriques

Dans les réseaux, les postes ont pour fonction en particulier :

- **Élévation ou diminution de la tension** : La tension de l'électricité fournie par le réseau est modifiée par un ou plusieurs transformateurs placés dans le poste de transformation.
- **D'organiser (configurer)** : la topologie des réseaux c'est à dire l'affectation des lignes à telles ou telles barres (bus) et donc ouvrir, fermer les disjoncteurs /sectionneurs.
- **De surveiller** : c'est la fonction qui consiste à mesurer le courant, la tension, les puissances, enregistrer et traiter les alarmes etc....
- **De protéger** : c'est la fonction de protection des ouvrages (lignes, postes...) dans les réseaux par les disjoncteurs,

1.6.2. Les différents éléments du poste

1.6.2.1. Transformateurs de puissances

Un transformateur de puissance est un appareil électrique essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique ». Il peut être monophasé ou triphasé.



1.6.2.2. Disjoncteurs

Le disjoncteur est un appareil qui peut interrompre des courants importants, qu'il s'agit du courant normal ou des courants 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 automatiquement dès que le courant qui le traverse dépasse une valeur prédéterminée. Quand il sert à interrompre les forts courant de court – circuit, il joue le même rôle qu'un fusible, mais il a un fonctionnement plus sûr pas besoin de le remplacer après chaque interruption.

Disjoncteurs SF₆ monophaséDisjoncteurs SF₆ triphasé

Les disjoncteurs les plus répandus sont :

- Les disjoncteurs à air comprimé
- Les disjoncteurs à vide
- Les disjoncteurs à l'huile
- Les disjoncteurs au SF₆

Dans les disjoncteurs à gaz, le courant est coupé lorsqu'un soufflage suffisant est exercé sur l'arc électrique pour le refroidir et l'interrompre.

1.6.2.3. Sectionneurs

Les sectionneurs sont des appareils destinés à ouvrir ou fermer un circuit électrique à vide, ne possèdent aucun pouvoir de coupure, ils ne permettent d'ouvrir un circuit qu'en l'absence de tout courant,



1.6.2.3. Parafoudres

Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter la surtension imposée aux transformateurs, instruments et machines électriques par la foudre et par les manœuvres de commutation. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des conducteurs de la ligne à protéger et la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre de faible résistance.



1.6.2.5. Transformateur de courant

Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale, un transformateur de courant est « un transformateur de mesure dans lequel le courant secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasé par rapport à celui-ci d'un angle voisin de zéro pour un sens approprié des connexions ». La caractéristique la plus importante d'un transformateur de courant est donc son rapport de transformation, exprimé par exemple sous la forme 400A /1A.



L'équipement de mesure connecté à son secondaire est en général un ampèremètre, mais on peut également brancher un wattmètre ou des relais de protection. Tous sont conçus pour mesurer des courants de quelques ampères.

1.6.2.6. Transformateur de tension

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



1.6.2.7. Jeux de barres

Un jeu de barres est un ouvrage électrique triphasé dominant sur la longueur du poste. Il permet de relier entre eux les départs de même tension qui y aboutit. Un poste électrique peut être doté d'un, deux, voire trois jeux de barres pour une tension donnée.



1.6.2.8. Circuit bouchon haute tension

Les circuits bouchons sont utilisés dans les réseaux de transport et de distribution. Les circuits bouchons sont des composants clés des systèmes de courant porteurs en ligne (CPL), utilisés pour les signaux de télécommande, les communications vocales, la télémétrie et la téléconduite entre les postes d'un réseau électrique.



1.7. Les lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolant et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre...

Une ligne électrique à haute tension peut être soit une ligne aérienne, soit un câble souterrain ou sous-marin. Son rôle est de transporter l'énergie électrique.

D'après le principe de conservation de puissance, la haute tension est pour deux raisons :

- L'augmentation de la tension permet de diminuer le courant.
- La réduction du courant permet d'utiliser de plus petites tailles de conducteurs.

Les lignes de transmissions utilisent plusieurs conducteurs par phase appelée faisceaux. L'objectif de cette dernière est pour augmenter la capacité de transport d'énergie d'une ligne électrique.

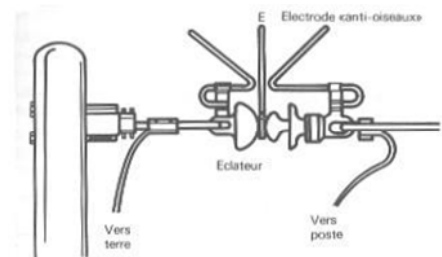
1.7.1. Eléments constitutifs d'une ligne aérienne

1.7.1.1. Les conducteurs de phase

Les conducteurs sont « nus » c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec l'augmentation du niveau de tension. On général on utilise des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium – acier.

1.7.1.2. Les Eclateurs

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes.



1.7.1.3. Les Pylônes

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées aux voisinages des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatique.



Pylônes nappe



Pylônes Triangle



Pylône Double drapeaux

1.7.1.4. Les isolateurs

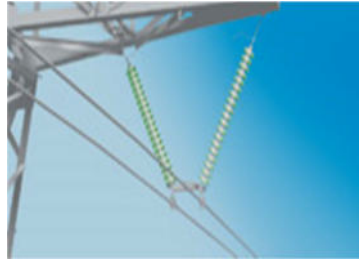
Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, de la neige.

Les isolateurs ont deux fonctions principales :

- Ils empêchent le courant électrique de phase de passer dans les pylônes.
- Ils accrochent les conducteurs de phase au pylône



Chaînes d'ancrage



Chaînes V



Chaînes droite

1.7.1.5. Câbles de garde

Les câbles de gardes ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de phase. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitent le foudroisement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant.



1.7.1.6. Prises de terre des pylônes

Les pylônes des lignes de transport d'énergie sont reliés à des prises de terre conçues avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance effectivement. Il ne faut pas que la chute de tension dans la prise de terre provoquée par un courant de foudre qui frappe le pylône dépasse la tension de contournement des isolateurs. Sinon les trois phases de la ligne se mettent en court-circuit entre elles et à la terre.

1.8. Appel de puissance d'un réseau

La puissance demandée par l'ensemble des clients d'un réseau subit de grandes fluctuations selon l'heure de la journée et selon les saisons. Le graphique de la figure.1.6 montre des variations saisonnières et quotidiennes typiques pour un réseau.

On remarque dans cet exemple que la pointe de 15 GW en hiver se produit vers 17 h, car c'est à ce moment que les lumières sont allumées dans toutes les maisons et que plusieurs usines sont encore en marche. Par contre, le creux de la demande arrive aux petites heures du matin.

Si l'on ramène les appels de puissance journaliers à une base annuelle, on obtient le graphique de la Figure.1.7. Par exemple, cette figure indique qu'un appel de puissance de 9 GW existe pendant 70 % du temps, tandis qu'un appel de 12 GW ne se produit que 15 % du temps. On s'aperçoit qu'une puissance de base de 6 GW est requise en tout temps, qu'une puissance intermédiaire additionnelle de 6 GW est requise pendant au moins 17 % du temps et qu'une puissance de pointe de 3 GW n'est requise que pendant une courte période.

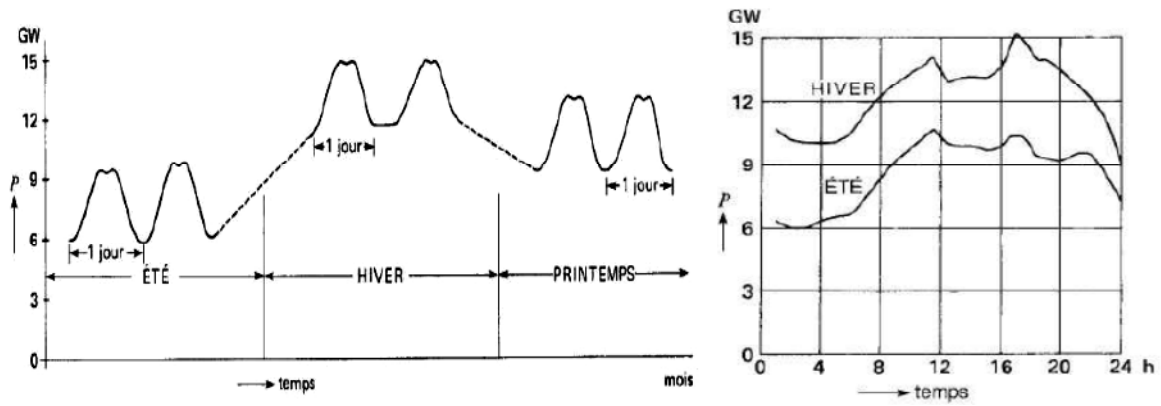


Figure.1.6. Fluctuations typiques de l'appel de puissance durant l'année et le jour

Ces fluctuations de l'appel de puissance obligent les compagnies d'électricité à prévoir trois classes de centrales de génération :

- Les centrales de base de grande puissance qui débitent leur pleine capacité en tout temps. Les centrales nucléaires et les centrales thermiques sont particulièrement aptes à remplir ce rôle.
- Les centrales intermédiaires de puissance moyenne qui peuvent réagir rapidement aux fluctuations de la demande. C'est le cas des centrales hydrauliques dont le débit est facilement contrôlable.
- Les centrales de pointe de puissance moyenne qui ne débitent leur pleine capacité que pendant de courtes périodes. C'est pourquoi les compagnies d'électricité encouragent les usagers à limiter leur charge de pointe.

Les centrales de pointe doivent être mises en marche dans un délai très court ; elles utilisent donc des moteurs diesel, des turbines à gaz, des moteurs à air comprimé ou des turbines hydrauliques à réserve pompée.

A noter que la période de démarrage est de quatre à huit heures pour les centrales thermiques et de quelques jours pour les centrales nucléaires. En effet, il n'est pas économique d'utiliser ces stations pour fournir une puissance de pointe.

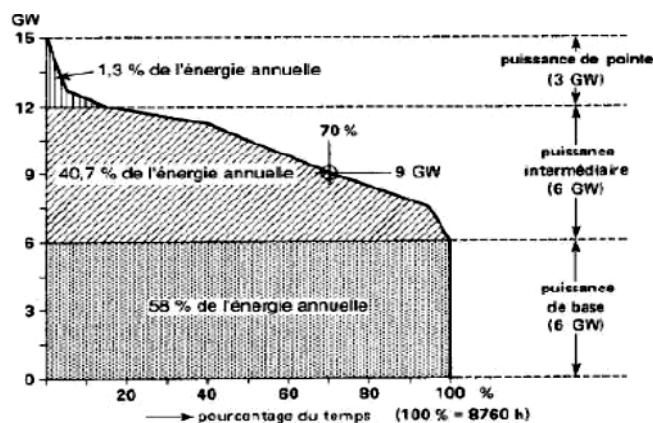


Figure.1.7. Appel de puissance en fonction de son temps d'utilisation annuel.

CHAPITRE

2

MODES DE TRANSPORT, REPARTITION ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

2.1. Description des réseaux électriques

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées (Figure.2.1).

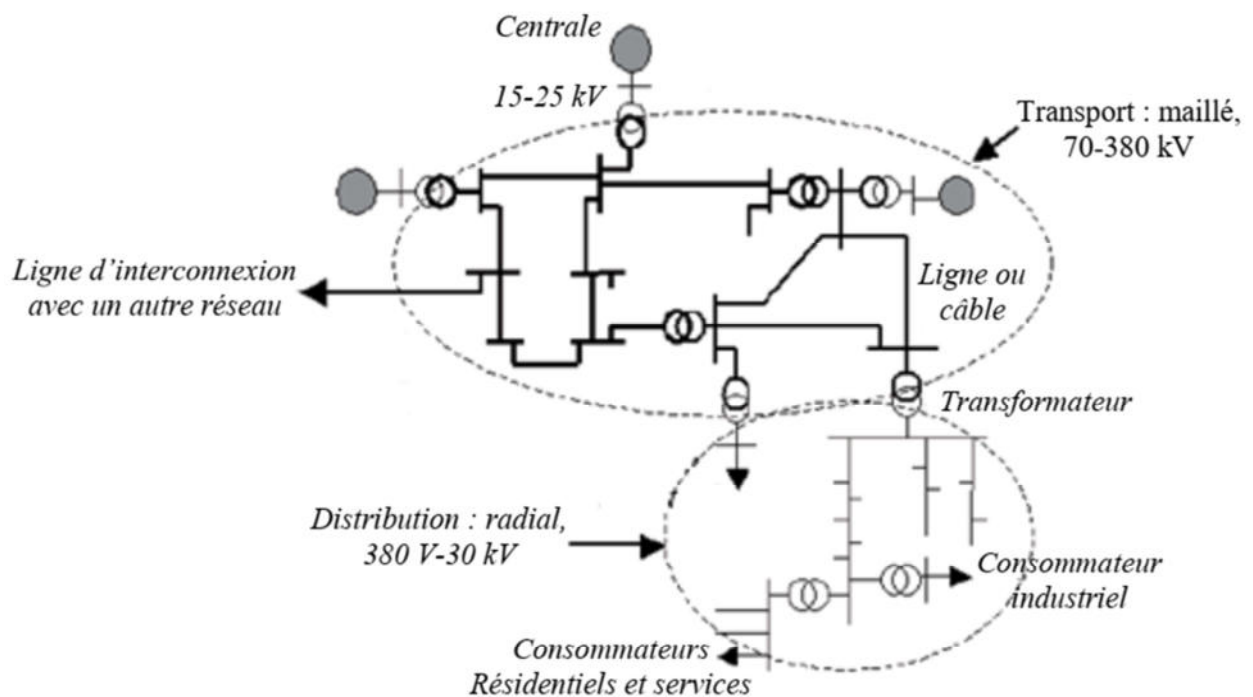


Figure.2.1. Structure des réseaux de transport et de distribution (schéma unifilaire)

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension.

2.2 Les niveaux de tension et les types de réseau électrique

Généralement, le réseau est composé dans le sens du transit de l'énergie des éléments suivants :

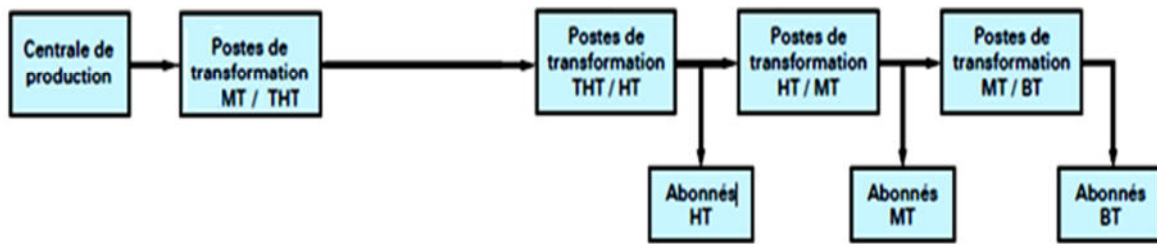


Figure.2.2. Schéma unifilaire d'un réseau en fonction du niveau de tension

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays mettent en œuvre (selon CEI) :

- Un réseau de transport UHT : $500\text{KV} < U_n$
- Un réseau de transport THT : $150\text{KV} < U_n \leq 500 \text{KV}$
- Un réseau de répartition HT : $60 \text{KV} < U_n \leq 150 \text{kV}$
- Un réseau de distribution MT : $1\text{KV} < U_n \leq 60 \text{kV}$
- Un réseau de distribution BT : $400/230 \text{V}$

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative et continue comme suit :

<i>Domaines de tension</i>		<i>Valeur de la tension nominale (U_n en Volts)</i>	
		<i>Courant alternatif</i>	<i>Courant continu</i>
Très Basse Tension	TBT	$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension TB	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension HT	HTA	$1000 < U_n \leq 50\,000$	$1500 < U_n \leq 75\,000$
	HTB	$U_n > 50\,000$	$U_n > 75\,000$

2.3. Les moyens d'acheminer l'électricité

Comme l'électricité ne se stocke pas en grande quantité, la production doit s'adapter sans cesse à la consommation. C'est pourquoi l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs.

Deux types de réseaux électriques permettent d'assurer cet acheminement :

- **Le réseau de transport d'électricité** est situé en amont des réseaux de distribution, il se compose de deux sous-ensembles :
 - **Le réseau de grand transport et d'interconnexion** est destiné à transporter des quantités importantes d'énergie sur de longues distances. Il constitue l'ossature

principale pour l'interconnexion des grands centres de production. Ce réseau peut être assimilé au réseau autoroutier. Son niveau de tension est de 400 000 volts, soit le niveau le plus élevé en Algérie.

- **Les réseaux de répartition régionale ou locale** sont destinés à répartir l'énergie en quantité moindre sur des distances plus courtes. Le transport est assuré en très haute tension (220 000 volts) et en haute tension (150 000 et 90 000 volts). Ce type de réseau est l'équivalent des routes nationales dans le réseau routier.

- **Les réseaux de distribution** sont destinés à acheminer l'électricité à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs de plus faible puissance. La distribution est assurée en moyenne tension (30 000 volts) et en basse tension (400 et 230 volts).

C'est l'équivalent des routes départementales et des voies communales dans le réseau routier

2.4. Structures topologiques des réseaux

2.4.1. Réseau radial

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client y parvient par un seul parcours, on parle de distribution radiale. (Utilisé pour le réseau rural)

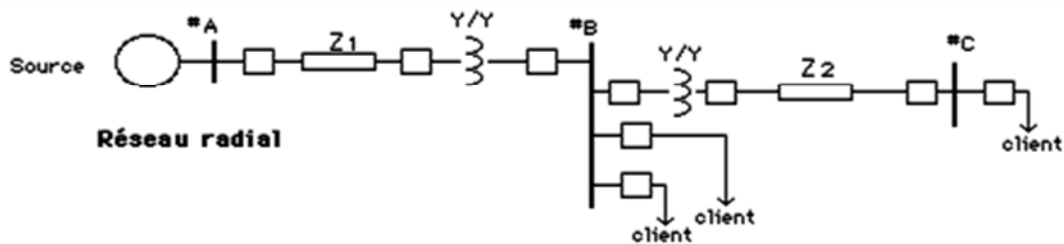


Figure.2.3. Structure d'un réseau radial

2.4.2. Réseau bouclé

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client y parvient par plusieurs parcours, on parle de distribution bouclée. (Utilisé pour les réseaux de répartition)

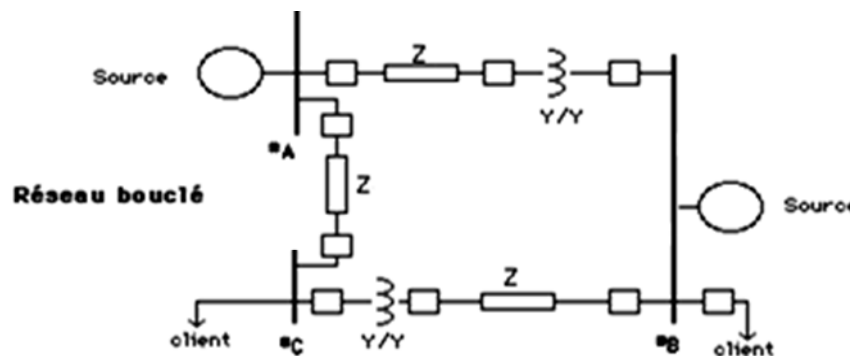


Figure.2.4. Structure d'un réseau bouclé

2.4.3. Réseau maillé

Les réseaux maillés sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant ainsi une structure analogue au maillage d'un filet. Ils sont utilisés pour les réseaux de distribution à basse tension et pour les réseaux de transport.

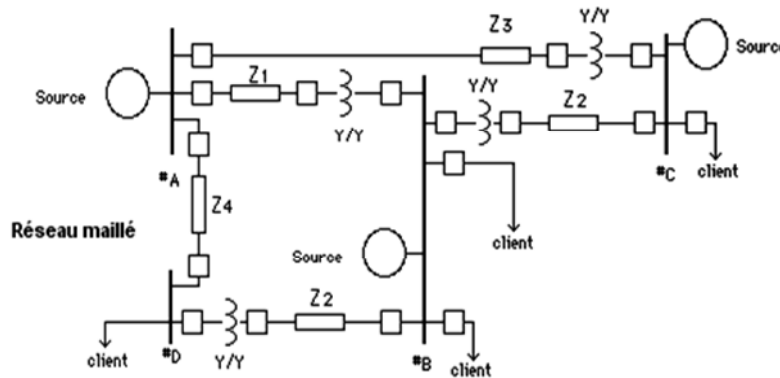
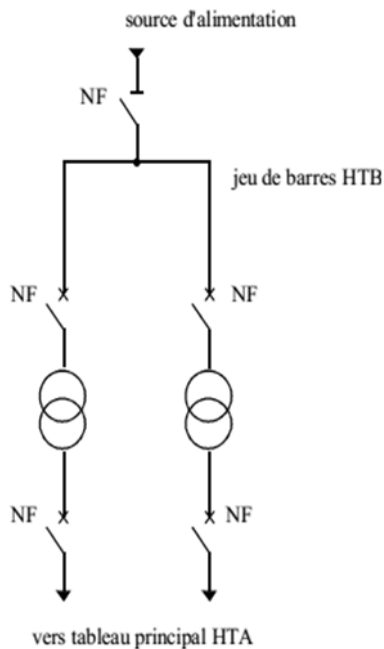


Figure.2.5. Structure d'un réseau bouclé

2.5. Mode d'alimentation des postes de livraison HTB

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les suivants :

2.5.1. Simple antenne



Avantage : Coût minimal

Inconvénient : Disponibilité faible

Figure.2.6. Alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB

2.5.2. Double antenne

Mode d'exploitation :

- Normal :

Les deux disjoncteurs d'arrivée des sources sont fermés, ainsi que le sectionneur de couplage. Les transformateurs sont donc alimentés par les 2 sources simultanément.

- Perturbé :

En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

Avantages :

- bonne disponibilité, dans la mesure où chaque source peut alimenter la totalité du réseau
- maintenance possible du jeu de barres, avec un fonctionnement partiel de celui-ci

Inconvénients :

- solution plus coûteuse que l'alimentation simple antenne
- ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance de celui-ci

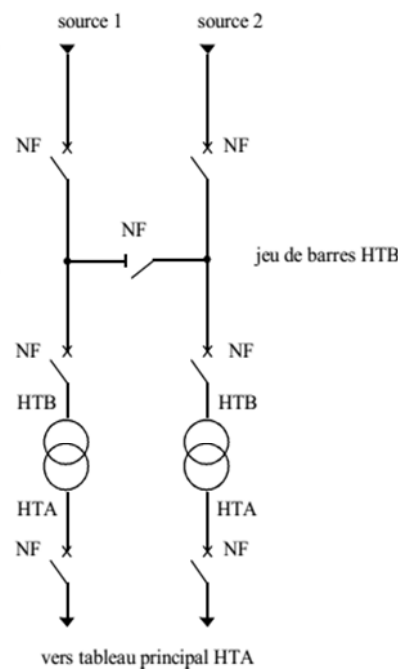


Figure.2.7. Alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB

2.5.3. Double antenne - double jeu de barres

Mode d'exploitation :

Normal: La source 1 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 etDep2.

La source 2 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 etDep4.

Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.

Perturbé : En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

Avantages :

- bonne disponibilité d'alimentation
- très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges, et pour la maintenance des jeux de barres
- possibilité de transfert de jeu de barres sans coupure (lorsque les jeux de barres sont couplés, il est possible de manœuvrer un sectionneur si son sectionneur adjacent est fermé).

Inconvénient :

- surcoût important par rapport à la solution simple jeu de barres

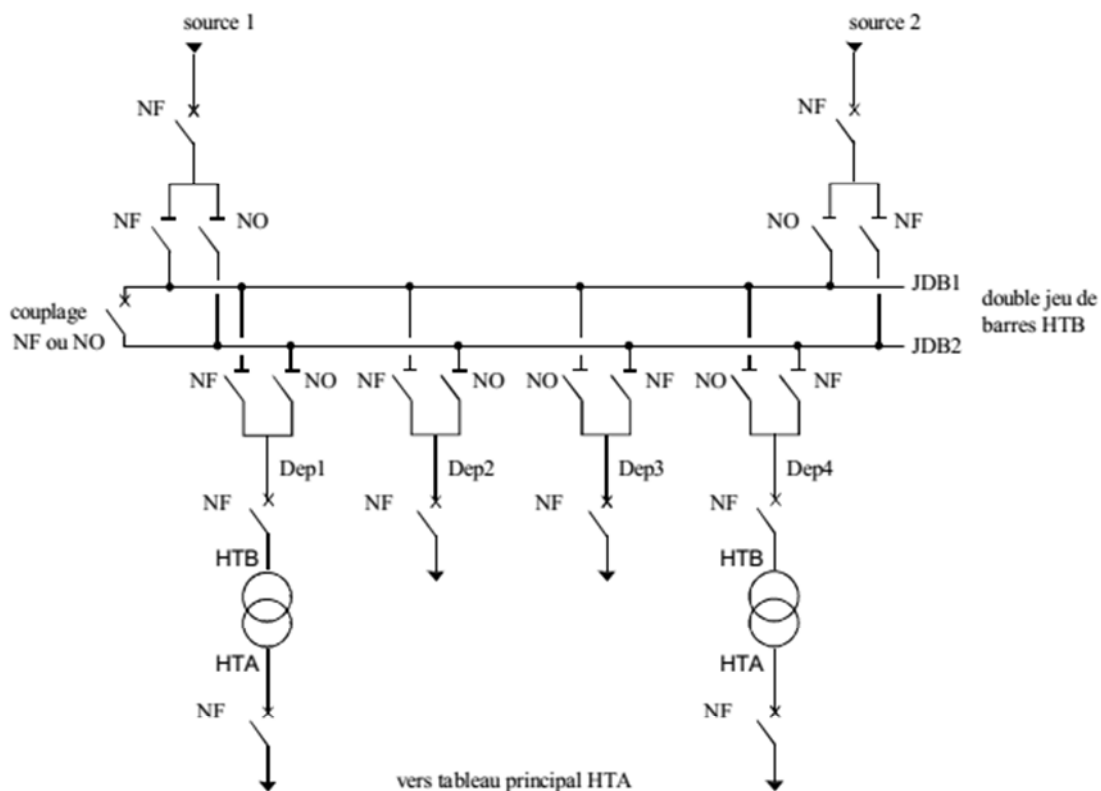


Figure.2.8. Alimentation double antenne - double jeu de barres d'un poste de livraison HTB

2.6. Mode d'alimentation des postes de livraison HTA

Ce type des postes sont caractérisé par:

- -Les tensions d'entrées sont : 10 ou 30 kV
- -Les tensions de sortie (utilisation) sont : 230/ 400 V
- -Puissance : $S < 630$ kVA,

2.6.1. Simple dérivation ou en antenne

Ce type de poste est utilisé en général pour la distribution publique MT (HTA) en lignes aériennes.

Il comporte une seule source d'alimentation possible par le distributeur.

- Avantage : économique car une cellule d'alimentation
- Inconvénient : en cas de défaut sur le câble pas de possibilité de réalimentation

Utilisateur : milieu rural et aux alentours des petites villes

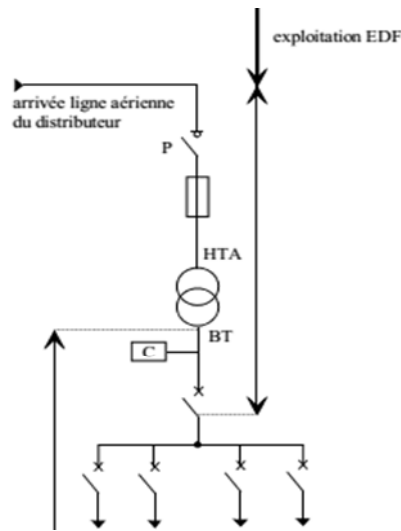


Figure.2.9. Alimentation simple dérivation d'un poste de livraison HTA

2.6.2. Coupure d'artère ou boucle

La distribution en coupure d'artère en figure ci-dessous est très répandue. Ce type de réseau est surtout réalisé en souterrain et, en général, en milieu urbain. En cas de défaut sur une partie de la boucle, on peut toujours alimenter tous les postes en ouvrant la boucle à l'endroit du défaut à l'intérieure des postes, ce dernier équipé par deux cellules arrivées et une cellule de protection.

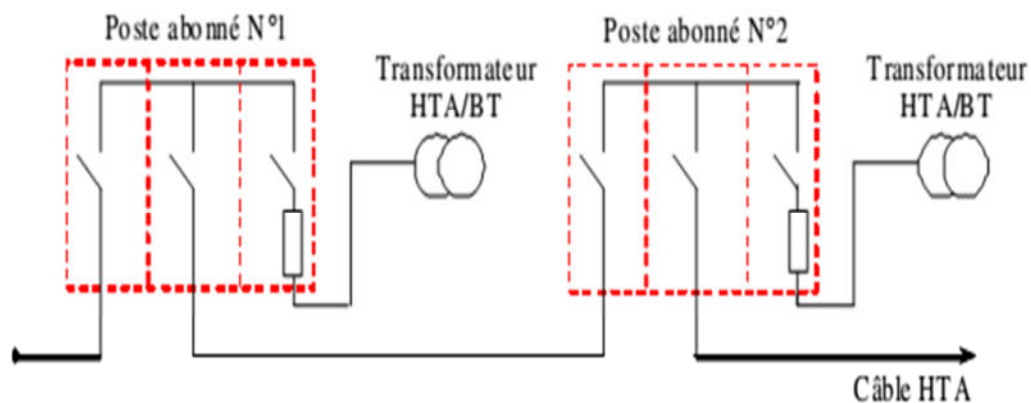


Figure.2.10. Poste abonné alimenté en coupure d'artère.

2.6.3. Double dérivation

La distribution en double dérivation en figure ci-dessous permet dans les zones de forte densité de maintenir un haut niveau de disponibilité de l'énergie électrique. Dans ce cas chaque poste est alimenté par deux câbles HTA avec permutation automatique en cas de manque de tension sur l'une des deux arrivées.

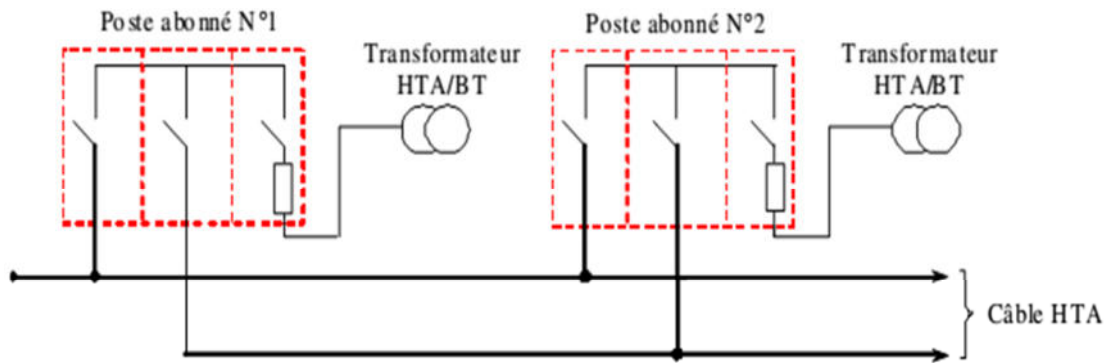


Figure.2.11. Poste abonné alimenté en double dérivation

CHAPITRE

3

CALCUL DES PARAMETRES LINEIQUES

3.1. Introduction

Une ligne électrique est le composant majeur d'un système de puissance, elle doit être représentée quantitativement par une combinaison de quatre paramètres électriques statiques : résistance R, inductance L, capacitance C et conductance G.

3.2. Détermination des paramètres linéiques d'une ligne (R L C G)

3.2.1. Calcul de la résistance (R)

La résistance ohmique R, exprimée en Ω , en courant continu DC et en basse fréquence, d'un conducteur homogène de longueur l en (m), de section uniforme S en (m^2) et de résistivité ρ ($\Omega.m$) en fonction de la température est donnée par la formule :

$$R = \frac{\rho(\theta)l}{S} \quad (3.1)$$

Avec :

$$\rho(\theta) = \rho(\theta_0)(1 + \alpha(\theta - \theta_0)) \quad (3.2)$$

Où : $\rho(\theta_0)$ est la résistivité du conducteur à 20 °C [$\Omega.m$]

α : est le coefficient de température [$^{\circ}C^{-1}$] ($\alpha=0.004$ $^{\circ}C^{-1}$ pour le Cu et Al)

3.2.2. Calcul de l'inductance

Un conducteur porteur de courant produit des lignes de flux magnétiques concentriques autour du conducteur. Si le courant varie avec le temps, le flux magnétique change et une tension est induite. Par conséquent, une inductance est présente, définie comme le rapport de la liaison de flux magnétique ϕ et du courant I .

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (3.3)$$

Le flux magnétique produit par le courant dans les conducteurs de ligne de transmission produit une inductance totale dont l'amplitude dépend de la configuration de la ligne.

3.2.2.1. Inductance d'un conducteur simple

Considérons un conducteur cylindrique plein d'une longueur infinie, de rayon r , transportant le courant I comme indiqué à la Figure.3.1. Si le conducteur est constitué d'un matériau non magnétique et que le courant est supposé uniformément distribué (pas d'effet de peau), les lignes de champ magnétique interne et externe générées sont des cercles concentriques autour du conducteur dont la direction est définie par la règle de la main droite.

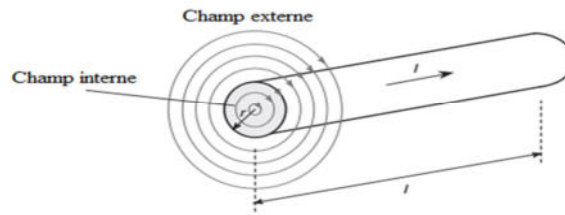


Figure.3.1. Lignes de flux magnétique concentriques externes et internes autour du conducteur.

L'inductance propre L_p du conducteur peut être définie comme la somme des contributions des liaisons de flux internes et externes au conducteur.

$$L_p = L_{int} + L_{ext} \quad (3.4)$$

3.2.2.1.1. Inductance interne due au flux magnétique interne

L'intensité de champ magnétique H_x , autour d'un cercle de rayon $x < r$ (Figure.3.2), est constante et tangente au cercle. La loi d'Ampère nous donne la relation entre H_x et le courant I_x qui circule à l'intérieur de ce cercle :

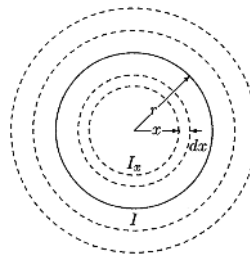


Figure.3.2. Flux magnétique interne

$$\int_0^{2\pi x} H_x \cdot dl = I_x \quad (3.5)$$

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x} \quad (3.6)$$

Si on néglige l'effet de peau et supposant que la densité de courant est uniforme sur la section de conducteur, c.à.d :

$$\frac{I}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi x^2} \quad (3.7)$$

En substituant l'expression de I_x dans celle de champ magnétique (3.6) :

$$H_x = \frac{I}{2\pi r^2} x \quad (3.8)$$

Pour un conducteur non magnétique à perméabilité constante μ_0 , l'induction magnétique est donnée par : $B_x = \mu_0 H_x$, donc :

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x \quad (3.9)$$

Où μ_0 , est la perméabilité de l'espace libre (ou de l'air) et est égal à $4\pi 10^{-7}$ H/m.

Le flux élémentaire $d\phi_x$ sur une petite région d'épaisseur dx et 1 mètre de longueur du conducteur est :

$$d\phi_x = B_x dx \cdot 1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x dx \quad (3.10)$$

Le calcul de différentiel de flux total est simple puisque seule la fraction $(\pi x^2 / \pi r^2)$ du courant I est relié au flux. On multiplie l'équation (3.10) par (x^2/r^2)

$$d\phi_t = \left(\frac{x^2}{r^2}\right) d\phi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} x^3 dx \quad (3.11)$$

Le flux total est trouvé en intégrant de 0 à r :

$$\phi_{int} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} \quad \text{Wb/m} \quad (3.12)$$

La valeur d'inductance due au flux embrassé interne est :

$$l_{int} = \frac{\phi_{int}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad \text{H/m} \quad (3.13)$$

3.2.2.1.2. Inductance externe due au flux magnétique externe

Considérons le champ H_x externe du conducteur au rayon $x > r$ comme montré dans la Figure.3.3. Puisque le cercle au rayon x entoure le courant entier, donc $I_x = I$, $B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$

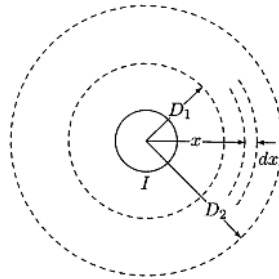


Figure.3.3. Liaison de flux entre D1 et D2

Puisque le courant total I est entouré par le flux en dehors du conducteur, le flux $d\phi_t$ embrassé est numériquement égal au flux élémentaire $d\phi_x$. Comme pour le cas précédent :

$$d\phi_t = d\phi_x = B_x dx \cdot 1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx \quad (3.14)$$

Le flux embrassé entre les deux points D1 et D2 est trouvé par l'intégration de $d\phi_t$.

$$\phi_{ext} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{D_1}^{D_2} \frac{1}{x} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad Wb/m \quad (3.15)$$

L'inductance entre deux points externes à un conducteur sont :

$$L_{ext} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad H/m \quad (3.16)$$

3.2.2.2. Inductance des lignes monophasées

Soit une ligne monophasée de deux conducteurs solides ronds de rayon r_1 et r_2 chaque conducteur est parcouru par un courant $I_1 = -I_2$ (Figure.3.4). Les deux conducteurs sont séparés par une distance D tel que ($r_1 \ll D, r_2 \ll D$).

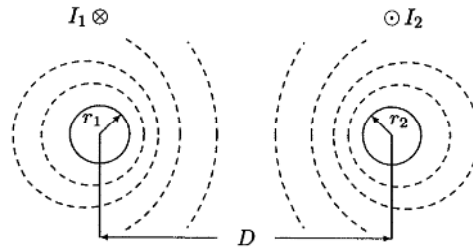


Figure.3.4. Ligne monophasée à deux fils.

L'inductance du conducteur 1 est :

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{1int} + L_{1ext} \\ &= \frac{\mu_0}{8\pi} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_1} \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r_1} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln e^{\frac{1}{4}} + \ln \frac{D}{r_1} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D}{r_1 e^{-1/4}} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_1'} \quad H/m \quad ; \quad (r_1' = r_1 e^{-1/4}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

De même, on trouve l'inductance du conducteur 2 comme suit :

$$L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_2'} \quad H/m \quad ; \quad (r_2' = r_2 e^{-1/4}) \quad (3.18)$$

Le terme $r' = r e^{-1/4}$ est connu mathématiquement comme le rayon moyen géométrique propre (RMG) d'un cercle de rayon r .

L'inductance totale d'une ligne monophasée par phase et par mètre de longueur est donnée par :

$$\begin{aligned} L &= L_1 + L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_1'} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_2'} \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_1'} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_2'} - 2 \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Si les deux conducteurs sont identiques $r_1 = r_2 = r$ et $L_1 = L_2$, l'inductance totale d'une ligne monophasée par phase et par mètre de longueur est donnée par :

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{D}{r'} \quad H/m \quad (3.20)$$

3.2.2.2.1 Inductances propre et mutuelle

L'inductance série par phase pour la ligne bifilaire monophasée ci-dessus peut être exprimée en termes d'auto-inductance de chaque conducteur et de leur inductance mutuelle. Considérons une longueur d'un mètre du circuit monophasé représenté par deux bobines caractérisées par les auto-inductances L_{11} et L_{22} et l'inductance mutuelle L_{12} . La polarité magnétique est indiquée par des symboles de points, comme illustré à la Figure.3.5.

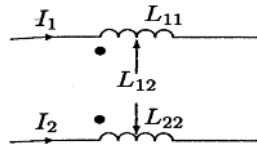


Figure.3.5. Ligne monophasé représenté par deux bobines en en parallèles

Le flux total de chaque conducteur sont données par :

$$\Phi_1 = L_{11}I_1 + L_{12}I_2 \quad (3.21)$$

$$\Phi_2 = L_{12}I_1 + L_{22}I_2$$

Puisque $I_1 = -I_2$, nous avons :

$$\Phi_1 = \underbrace{(L_{11} - L_{12})}_{L_1} I_1 \quad (3.22)$$

$$\Phi_2 = \underbrace{(-L_{12} + L_{22})}_{L_2} I_2$$

Donc l'inductance totale d'une ligne monophasée est :

$$L = L_1 + L_2 = L_{11} + L_{22} - 2L_{12} \quad (3.23)$$

En comparant (3.23) avec (3.19), nous concluons les expressions équivalentes suivantes pour les inductances propres et mutuelles :

$$L_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r'_1}$$

$$L_{22} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r'_2} \quad (3.24)$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D}$$

La notion de l'inductance propre et mutuelle peut être étendue à un groupe de n conducteurs.

Considérons n conducteurs transportant des courants de phase $I_1, I_2 \dots I_n$, tels que :

$$I_1 + I_2 + \dots + I_i + \dots + I_n = 0 \quad (3.25)$$

En généralisant l'équation (3.21), le flux total du conducteur i est :

L'inductance moyenne d'un filament du groupe X est :

$$L_{moy} = \frac{L_a + L_b + \dots + L_n}{n} \quad (3.31)$$

Le groupe X est la forme de n filament en parallèle :

$$L_x = \frac{L_{moy}}{n} \quad (3.32)$$

Finalement l'inductance de la conducteur X est :

$$L_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{DMG_{xy}}{RMG_x} \quad H/m \quad (3.33)$$

Avec : RMG_x et DMG_{xy} est le rayon moyen géométrique et la distance moyenne géométrique

Tel que :

$$RMG_x = \left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n d_{ij} \right)^{1/n^2} = \sqrt[n^2]{(d_{aa}d_{ab} \dots d_{an}) \dots (d_{na}d_{nb} \dots d_{nn})} \quad , d_{ii} = r_i' \quad (3.34)$$

$$DMG_{xy} = \left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m D_{ij} \right)^{1/nm} = \sqrt[nm]{(D_{aa'}D_{ab'} \dots D_{am'}) \dots (D_{na'}D_{nb'} \dots D_{nm'})} \quad (3.35)$$

De même manière pour L_y :

$$L_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{DMG_{xy}}{RMG_y} \quad H/m \quad (3.36)$$

$$RMG_y = \sqrt[m^2]{(d_{aa}d_{ab} \dots d_{an}) \dots (d_{na}d_{nb} \dots d_{nn})} \quad (3.37)$$

Donc l'inductance totale d'une ligne monophasée composée est donnée par :

$$L = L_x + L_y = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{DMG_{xy}}{RMG_x \times RMG_y} \quad H/m \quad (3.38)$$

3.2.2.3. Inductance linéique d'une ligne triphasée

3.2.2.3.1. Espacement symétrique

Considérons une ligne triphasée d'un mètre de longueur avec un conducteur par phase, chacun de rayon r, symétriquement espacés en configuration triangulaire (Figure.3.7)

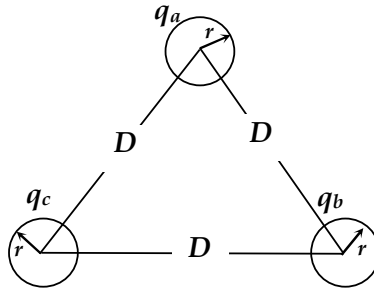


Figure.3.7. Ligne triphasée symétriquement espacée

Assumant des courants triphasés équilibrés, nous avons : $I_a + I_b + I_c = 0$

Le flux embrassé totale du conducteur de phase a est :

$$\begin{aligned}\Phi_a &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + \frac{(I_b + I_c)}{-I_a} \ln \frac{1}{D} \right) = \frac{\mu_0}{2\pi} I_a \ln \frac{D}{r'}\end{aligned}\quad (3.39)$$

De même manière pour Φ_b et Φ_c . Et l'inductance par phase par mètre est donnée par :

$$L_a = L_b = L_c = \frac{\mu_0}{2\pi} I_a \ln \frac{D}{r'} \quad (3.40)$$

3.2.2.3.2. Espacement asymétrique

Dans ce cas, les distances entre les phases diffèrent les unes des autres ($D_{12} \neq D_{13} = D_{23}$) comme le montre la Figure.3.8

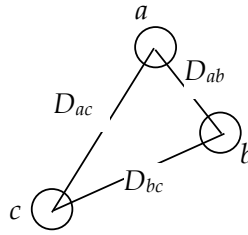


Figure.3.8. Ligne triphasée à espacement asymétrique

Les flux embrassés sont donnés pour chaque conducteur par :

$$\begin{aligned}\Phi_a &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| I_a \ln \frac{1}{r'_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{D_{ac}} \right| \\ \Phi_b &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| I_b \ln \frac{1}{r'_b} + I_a \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{D_{bc}} \right| \\ \Phi_c &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| I_c \ln \frac{1}{r'_c} + I_b \ln \frac{1}{D_{bc}} + I_a \ln \frac{1}{D_{ac}} \right|\end{aligned}\quad (3.41)$$

Pour des courants triphasés équilibrés avec I_a comme référence, nous avons :

$$\begin{aligned}I_b &= a^2 I_a \\ I_c &= a I_a\end{aligned}\quad (3.42)$$

Donc :

$$\begin{aligned}\Phi_a &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| \ln \frac{1}{r'_a} + a^2 \ln \frac{1}{D_{ab}} + a \ln \frac{1}{D_{ac}} \right| I_a \\ \Phi_b &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| \ln \frac{1}{r'_b} + a \ln \frac{1}{D_{ab}} + a^2 \ln \frac{1}{D_{bc}} \right| I_b \\ \Phi_c &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| \ln \frac{1}{r'_c} + a \ln \frac{1}{D_{bc}} + a^2 \ln \frac{1}{D_{ac}} \right| I_c\end{aligned}\quad (3.43)$$

On déduit les inductances par phase et par mètre :

$$\begin{aligned}L_a &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| \ln \frac{1}{r'_a} + a^2 \ln \frac{1}{D_{ab}} + a \ln \frac{1}{D_{ac}} \right| \\ L_b &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| \ln \frac{1}{r'_b} + a \ln \frac{1}{D_{ab}} + a^2 \ln \frac{1}{D_{bc}} \right| \\ L_c &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| \ln \frac{1}{r'_c} + a \ln \frac{1}{D_{bc}} + a^2 \ln \frac{1}{D_{ac}} \right|\end{aligned}\quad (3.44)$$

On constate que les inductances de chaque phase sont différentes, ce qui provoque un déséquilibre dans le réseau électrique. En utilisant dans ce cas la transposition de phase pour trouver la symétrie en bonne mesure et d'obtenir un modèle par phase.

3.2.2.3.2.1 Ligne transposée

Pour avoir un équilibre sur les trois phases de ligne, les conducteurs sont disposés de façon que chaque phase occupe une position pour la même distance (Figure.3.9).

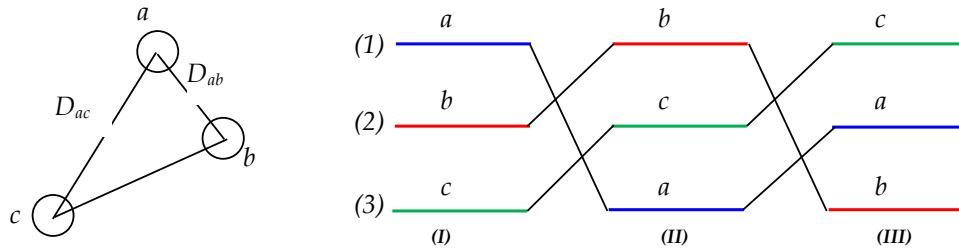


Figure.3.9. Ligne triphasée transposée

L'inductance sera la moyenne des trois tronçons

Le flux embrassé de conducteur *a* est :

$$\phi_a = \frac{(\phi_a^I + \phi_a^{II} + \phi_a^{III})}{3} \tag{3.45}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \phi_a^I &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| I_a \ln \frac{1}{r_1'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right| \\ \phi_a^{II} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| I_a \ln \frac{1}{r_3'} + I_b \ln \frac{1}{D_{13}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right| \\ \phi_a^{III} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| I_a \ln \frac{1}{r_2'} + I_b \ln \frac{1}{D_{32}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right| \end{aligned} \tag{3.46}$$

En substituant l'équation (3.46) dans (3.45), on trouve :

$$\begin{aligned} \phi_a &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{3} \left| I_a \ln \frac{1}{r_1' r_2' r_3'} + \frac{(I_b + I_c)}{-I_a} \ln \frac{1}{D_{12} D_{32} D_{13}} \right| \\ \phi_a &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left| I_a \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{32} D_{13}}}{\sqrt[3]{r_1' r_2' r_3'}} \right| \end{aligned} \tag{3.47}$$

De même manière on trouve le flux ϕ_b et ϕ_c .

Donc l'inductance par phase par mètre est :

$$L_a = L_b = L_c = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{eq}}{R_{eqL}} \tag{3.48}$$

Avec :

$$\begin{aligned} R_{eqL} &= \sqrt[3]{r_1' r_2' r_3'} \\ D_{eq} &= \sqrt[3]{D_{12} D_{32} D_{13}} \end{aligned}$$

NB : Si la ligne est formée par des conducteurs de phase en faisceaux, l'inductance linéique est la même que la précédente avec :

$$R_{eqL} = \sqrt[3]{RMG_{1L}RMG_{2L}RMG_{3L}} \quad \text{où :} \quad RMG_L = \left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n d_{ij} \right)^{1/n^2}, \quad d_{ii} = r'_i$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{DMG_{12}DMG_{32}DMG_{13}} \quad \text{où :} \quad DMG_{ij} = \left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m D_{ij} \right)^{1/nm}$$

3.3. Calcul des capacités linéiques

3.3.1. Champ électrique d'un conducteur rectiligne

Considérons un long conducteur rond de rayon r portant une charge de q coulombs/m comme montré sur la Figure.3.10 :

- Le conducteur est supposé comme un conducteur de longueur infinie pour négligé les effets des extrémités
- Le conducteur est supposé chargé uniquement par une charge q
- Le conducteur supposé dans un espace libre

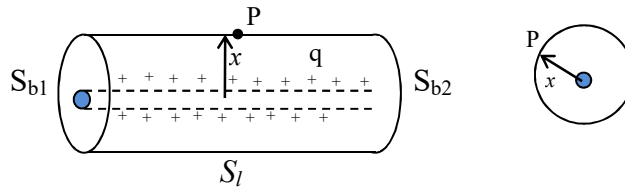


Figure.3.10. Surfaces de Gauss au tour d'un conducteur

D'après le théorème de Gauss :

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = \oint_v \frac{\rho}{\epsilon_0} dv = \frac{ql}{\epsilon_0} \tag{3.49}$$

On peut calculer le champ électrique au point P :

$$\begin{aligned} \oint_S \vec{E} d\vec{s} &= \oint_S \left(\vec{E} ds_l + \underbrace{\vec{E} ds_{b1}}_0 + \underbrace{\vec{E} ds_{b2}}_0 \right) = \frac{ql}{\epsilon_0} \\ &= \oint_S \vec{E} ds_l = \frac{ql}{\epsilon_0} \\ &= E 2\pi x l = \frac{ql}{\epsilon_0} \end{aligned} \tag{3.50}$$

Finalement on trouve :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{x} \quad V/m \tag{3.51}$$

Avec E est l'intensité du champ électrique, et ϵ_0 est la permittivité du vide (8.85×10^{-12})

3.3.2. Potentiel entre deux points

La relation entre le champ électrique et la différence de potentiel est donnée par :

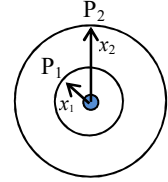
$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V = -\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} \quad (3.52)$$

Par l'intégration de l'équation suivante, on trouve la différence de potentiel entre deux positions x_1 et x_2 :

$$\int_{P_1}^{P_2} dV = -\int_{x_1}^{x_2} E dx = -\int_{x_1}^{x_2} \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{x} dx \quad (3.53)$$

Donc :

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{x_2}{x_1} \quad V \quad (3.54)$$



3.3.3. Capacité d'une ligne bifilaire

Considérant une ligne monophasée d'un mètre constituée de deux long conducteurs ronds solides de rayon r_1 et r_2 comme le montre la Figure.3.11 :

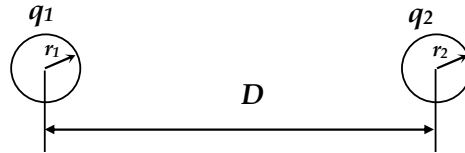


Figure.3.11. Ligne monophasée à deux fils

La différence de potentiel V_{12} due aux deux charges q_1 et q_2 est donné par :

$$\begin{aligned} V_{12} &= V_{12}^{(q_1)} + V_{12}^{(q_2)} \\ &= \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r_1} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{D} \end{aligned} \quad (3.55)$$

Pour une ligne monophasée $q_2 = -q_1 = -q$, donc :

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D^2}{r_1 r_2} \quad (3.56)$$

Pour un mètre de longueur, la capacitance entre les conducteurs est :

$$C_{12} = \frac{q}{V_{12}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D^2}{r_1 r_2}} \quad F/m \quad (3.57)$$

On remarque que la capacité d'une ligne dépend des propriétés physiques et géométriques.

3.3.4. Capacité d'une ligne triphasée

3.3.4.1. Espacement symétrique

Considérons une ligne triphasée d'un mètre de longueur avec un conducteur par phase, chacun de rayon r , symétriquement espacés en configuration triangulaire, comme le montre en Figure.3.12.

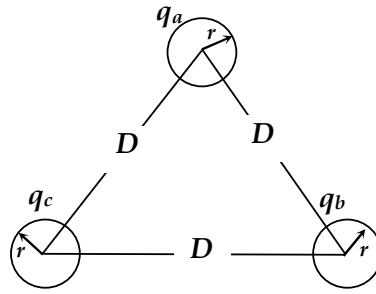


Figure.3.12. Ligne triphasée symétriquement espacée

Pour un système équilibré $q_a = q_b = q_c = 0$.

La différence de potentiel V_{ab} due aux trois charges q_1 , q_2 et q_3 est donné par :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{ab}^{(q_1)} + V_{ab}^{(q_2)} + V_{ab}^{(q_3)} \\ &= \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} + \frac{q_3}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{D} \end{aligned} \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} V_{ac} &= V_{ac}^{(q_1)} + V_{ac}^{(q_2)} + V_{ac}^{(q_3)} \\ &= \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{D} + \frac{q_3}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} \end{aligned} \quad (3.59)$$

Donc :

$$\begin{aligned} V_{ab} + V_{ac} &= \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D^2}{r^2} + \frac{\overbrace{q_2 + q_3}^{-q_1}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} \\ &= \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D^3}{r^3} \\ &= 3 \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} = 3V_{an} \end{aligned} \quad (3.60)$$

Alors :

$$V_{an} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \quad (3.61)$$

La capacité par phase par mètre est donnée par :

$$C_{an} = C_{bn} = C_{cn} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad F/m \quad (3.62)$$

Finalement le tronçon transversal de la ligne peut être représenté comme suite :

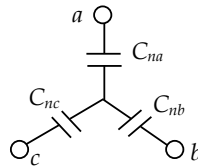


Figure.3.13. Représentation transversale de la ligne

3.3.4.2. Espacement asymétrique

Pour avoir un équilibre sur les trois phases de ligne, les conducteurs sont disposés de façon que chaque phase occupe une position pour la même distance (Figure.3.14).

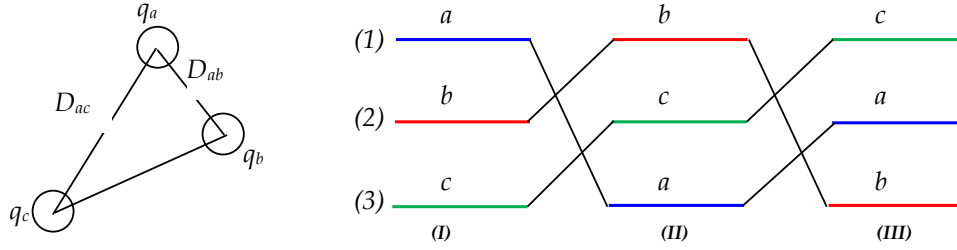


Figure.3.14. Ligne triphasée transposée

La capacité par phase sera la moyenne des trois tronçons

Le flux embrassé de conducteur a est :

La différence de potentiel V_{ab} due aux trois charges q_a , q_b et q_c , dans les trois tronçons est donné par :

$$V_{ab} = \frac{V_{ab}^{(I)} + V_{ab}^{(II)} + V_{ab}^{(III)}}{3} \quad (3.63)$$

Avec :

$$\begin{aligned} V_{ab}^{(I)} &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{12}}{r_1} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{D_{12}} + \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{23}}{D_{13}} \\ V_{ab}^{(II)} &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{13}}{r_3} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{D_{13}} + \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{21}}{D_{23}} \\ V_{ab}^{(III)} &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{23}}{r_2} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_3}{D_{32}} + \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{13}}{D_{12}} \end{aligned} \quad (3.64)$$

En substituant l'équation (3.64) à (3.63), On trouve

$$\begin{aligned} V_{ab} &= \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}}{\sqrt[3]{r_1r_2r_3}} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt[3]{r_1r_2r_3}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}} \\ &= \frac{q_a - q_b}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{eq}}{R_{eqC}} \end{aligned} \quad (3.65)$$

De même manière on aura :

$$V_{ac} = \frac{q_a - q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{eq}}{R_{eqC}} \quad (3.66)$$

Avec :

$$R_{eqC} = \sqrt[3]{r_1r_2r_3}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{32}D_{13}}$$

Pour un système équilibré : $q_a + q_b + q_c = 0$

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{eq}}{R_{eqC}} = 3V_{an} \quad (3.67)$$

Alors :

$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{eq}}{R_{eqC}} \quad (3.68)$$

La capacité par phase par mètre est donnée par :

$$C_{an} = C_{bn} = C_{cn} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_{eq}}{R_{eqC}}} \quad F/m \quad (3.69)$$

NB : Si la ligne est formée par des conducteurs de phase en faisceaux, la capacité linéique est la même que la précédente avec :

$$R_{eqL} = \sqrt[3]{RMG_{1C}RMG_{2C}RMG_{3C}} \quad \text{où :} \quad RMG_C = \left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n d_{ij} \right)^{1/n^2}, \quad d_{ii} = r_i$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{DMG_{12}DMG_{32}DMG_{13}} \quad \text{où :} \quad DMG_{ij} = \left(\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m D_{ij} \right)^{1/nm}$$

3.3.5. Effet du sol

L'effet du sol est d'augmenter la capacité. Le sol est une surface équipotentielle donc les lignes de flux sont forcées de couper la surface d'une façon orthogonale. L'effet de la présence du sol peut être pris en compte par la méthode des charges images introduits par Kelvin, Pour illustrer cette méthode, considérons un conducteur avec une charge $+q$ C/m à une hauteur h au-dessus du sol. Imaginez également une charge $-q$ placée à une profondeur h sous la surface du sol. Cette configuration sans la présence de la surface du sol produira la même distribution de champ qu'une charge unique à la présence de la surface du sol (Figure.3.15).

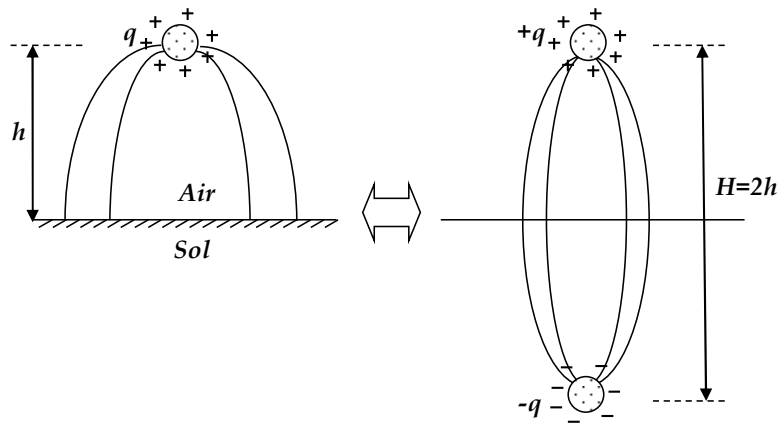


Figure.3.15. Ligne de champ électrique à la présence du sol

La méthode de l'image est appliquée pour calculer la capacité d'une ligne triphasée, cette méthode consiste à remplacer le sol par un conducteur similaire à celui tendu parallèlement à la surface du sol, et de charge opposée disposée symétriquement au conducteur réel par rapport à la surface du sol. Considérons dans la Figure.3.16 une ligne triphasée transposée et des conducteurs a, b, c portant des charges q_a, q_b et q_c respectivement, dans la première partie du cycle de transposition. Au-dessous se trouvent les conducteurs avec les charges images $-q_a, -q_b$ et $-q_c$

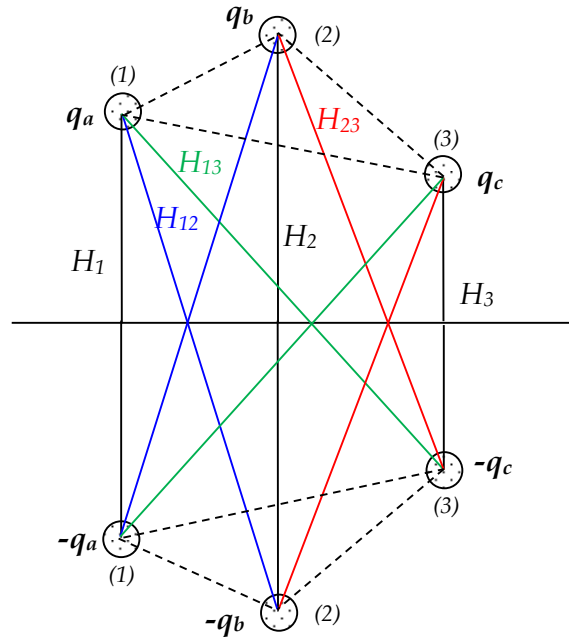


Figure.3.16. Méthode des images pour une ligne triphasée

En suivant les étapes précédentes, la capacité par phase est déterminée à partir de calcul de la différence de potentiel V_{na} due aux trois charges réels q_a, q_b et q_c , et les trois charges image $-q_a, -q_b$ et $-q_c$, dans les trois tronçons de la ligne composée, tel que :

$$V_{an} = \left(\frac{V_{ab} + V_{ac}}{3}\right)^{réel} + \left(\frac{V_{ab} + V_{ac}}{3}\right)^{image} \quad (3.70)$$

Finalement on trouve :

$$C_{an} = C_{bn} = C_{cn} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_{eq}}{R_{eqC}} - \ln \frac{H_{eq}}{h_{eq}}} \quad F/m \quad (3.71)$$

Avec :

$$H_{eq} = \sqrt[3]{H_{12}H_{13}H_{23}}$$

$$h_{eq} = \sqrt[3]{H_1H_2H_3}$$

3.4. La conductance due à l'effet couronne G

Lorsqu'un conducteur est porté à un à un potentiel très élevé, un champ électrique à proximité du conducteur peut dépasser la limite d'ionisation de l'air ambiant et produire alors autour de ce conducteur un phénomène électrique lumineux en forme de couronne appelé effet couronne.

La valeur de cette conductance étant toujours faible surtout pour $U < 400kV$, donner par :

$$g_0 = \frac{\Delta P}{U_n^2} \quad \text{W/km} \quad (3.72)$$

ΔP .: Les pertes de puissance linéique sous l'effet couronne.

U_n : La tension nominale de la ligne électrique.

CHAPITRE

4

MODELISATION DES LIGNES AERIENNES

4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent les paramètres par phase des lignes de transport sont obtenus. Dans ce qui va suivre, nous allons établir la représentation de la performance des lignes de transport sous les conditions d'opération normales. Les lignes de transport sont représentées par un modèle équivalent avec les paramètres « par phase » appropriés du circuit. Le modèle utilisé pour calculer les tensions, les courants, et les écoulements de puissance dépend de la longueur de la ligne.

4.2. Modélisation d'une ligne aérienne

4.2.1. Modèle d'une ligne courte

Pour les lignes électriquement courte ($l < 80\text{km}$), la capacité et la conductance de la ligne peuvent souvent être ignorées, donc ($C \cong 0$), ($G \cong 0$), son schéma équivalent est illustré à la Figure.4.1.

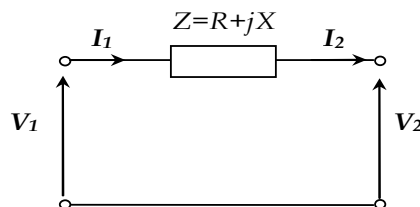


Figure.4.1. Ligne courte

A partir de la Figure.4.1, Les grandeurs d'entrée sont données en fonction des grandeurs de sortie par :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 + ZI_2 \\ I_1 &= I_2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Avec :

$$Z = Z_0 l = (R_0 + j\omega L_0)l \quad (4.2)$$

Où R_0 et L_0 sont : la résistance et l'inductance par phase par unité de longueur.

Cette ligne de transmission peut être représentée par un quadripôle comme indiqué dans la Figure.4.2.

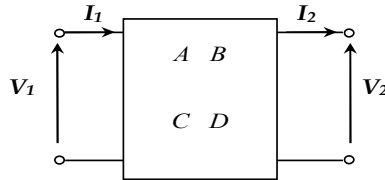


Figure.4.2. La ligne de transmission représentée par un quadripôle

Et les équations peuvent être représentées par les paramètres chaînes de quadripôle (ABCD) comme suit :

$$\begin{aligned} V_1 &= AV_2 + BI_2 \\ I_1 &= CV_2 + DI_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

En comparant les équations de système (4.1) avec les équations (4.3), les constantes ABCD sont données par :

$$A = 1; \quad B = Z; \quad C = 0; \quad D = 1$$

4.2.2. Modèle d'une ligne moyenne

Les lignes moyennes sont caractérisées par une longueur comprise entre 80km et 250 Km, il existe trois types de modèles de la ligne en Γ , T et en π , comme le montre la Figure.4.3 :

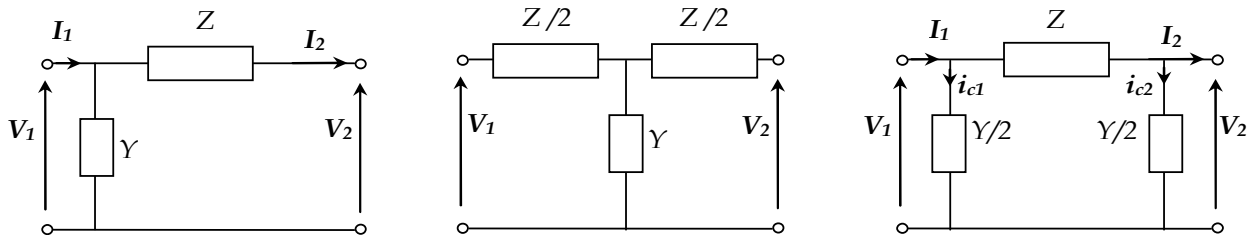


Figure.4.3. Modèle Γ , T et en π de la ligne de longueur moyenne

A partir de la Figure.4.3, et par l'application des lois de Kirchhoff en tension KVL sur le modèle en π :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 + \Delta V \\ V_1 &= V_2 + ZI_l = V_2 + Z(I_2 + i_{c2}) \\ &= V_2 + Z\left(I_2 + \frac{Y}{2}V_2\right) \\ V_1 &= \left(1 + \frac{YZ}{2}\right)V_2 + ZI_2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Par application des lois de Kirchhoff en courant KCL :

$$I_1 = I_l + i_{c1}$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_2 + i_{c1} + i_{c2} = I_2 + \frac{Y}{2}V_1 + \frac{Y}{2}V_2 \\
 I_1 &= I_2 + \frac{Y}{2}\left(\left(1 + \frac{YZ}{2}\right)V_2 + ZI_2\right) + \frac{Y}{2}V_2 \\
 I_1 &= \frac{Y}{2}\left(2 + \frac{YZ}{2}\right)V_2 + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right)I_2
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

En comparant les équations (4.4) et (4.5) avec le système d'équation (4.3), les constantes ABCD pour le modèle π normal sont données par

$$\begin{cases}
 A = D = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \\
 B = Z \\
 C = \frac{Y}{2}\left(2 + \frac{YZ}{2}\right)
 \end{cases}
 \tag{4.6}$$

4.2.3. Modèle d'une ligne longue

On appelle une ligne longue une ligne de longueur supérieure à $> 250 \text{ Km}$, son schéma équivalent est représenté dans la Figure.4.4

Pour les lignes courtes et moyennes, des modèles raisonnablement exacts sont obtenus en assumant que les paramètres de la ligne sont à constantes localisés. En réalité les phénomènes énergétiques précédents ne sont pas localisés ou concentrés à un endroit de la ligne, mais distribués ou réparties le long de la ligne, donc (R, L, C, G) seront uniformément réparties le long de la ligne et on définit alors les constantes linéiques (R_0, L_0, C_0, G_0) par unité de longueur.

Pour dériver les équations qui régissent le comportement de la ligne (le modèle mathématique et le circuit équivalent) nous commençons par un élément infinitésimal de longueur dx dont la Figure.4.4 représente son modèle longitudinal et transversal.

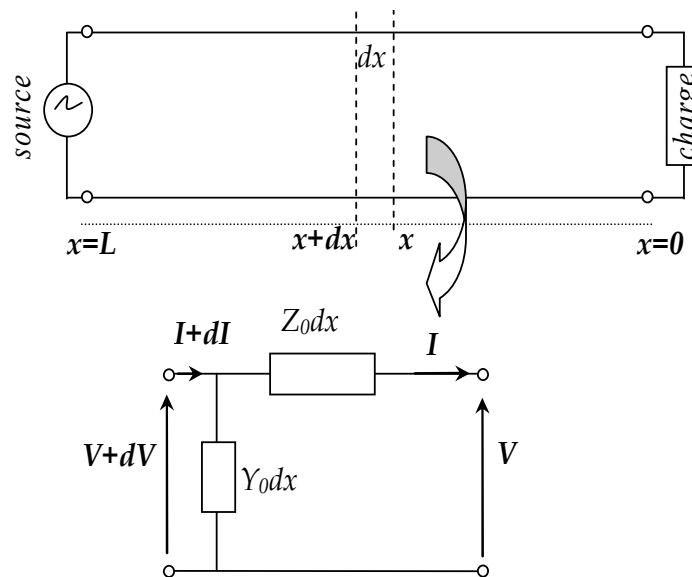


Figure.4.4. Modèle d'une ligne longue

Par application des lois de Kirchhoff en tension KVL sur l'élément longitudinal :

$$dV = Z_0 dx I \quad (4.7)$$

De même, Par application des lois de Kirchhoff en courant KCL sur l'élément transversal :

$$dI = Y_0 dx V \quad (4.8)$$

Où Z_0 et Y_0 sont les impédances et admittances linéiques, avec :

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 = R_0 + jX_0, \text{ et } Y_0 = G_0 + j\omega C_0 = G_0 + jB_0.$$

On peut écrire les deux équations précédentes comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dV}{dx} = Z_0 I \\ \frac{dI}{dx} = Y_0 V \end{cases} \quad (4.9)$$

Pour intégrer le modèle élémentaire (4.9) on fait une 2^{ème} dérivation par rapport à x en suite on intègre le résultat.

$$\begin{cases} \frac{d^2V}{dx^2} = Z_0 Y_0 V \\ \frac{d^2I}{dx^2} = Z_0 Y_0 I \end{cases} \quad (4.10)$$

La solution de cette équation est de la forme :

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} I(x) &= \frac{\gamma}{Z_0} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \\ &= \frac{1}{Z_c} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Avec :

$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0}$: Coefficient (constante) de propagation, quantité complexe.

$\gamma = \alpha + j\beta$:

- α : le facteur d'atténuation (amortissement)
- β : le facteur de retard de phase [rad/km]

$Z_c = \frac{Z_0}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$: Impédance caractéristique de la ligne

NB :

La solution est composée de deux ondes mobiles (incidente + réfléchie) qui se déplacent dont les modules subissent des atténuations selon $e^{\mp \alpha x}$ et des retards de phases selon $\mp \beta x$, tel que :

$$\begin{aligned} V(x) &= A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} = V^+ + V^- \\ I(x) &= \frac{1}{Z_c} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) = I^+ + I^- \end{aligned}$$

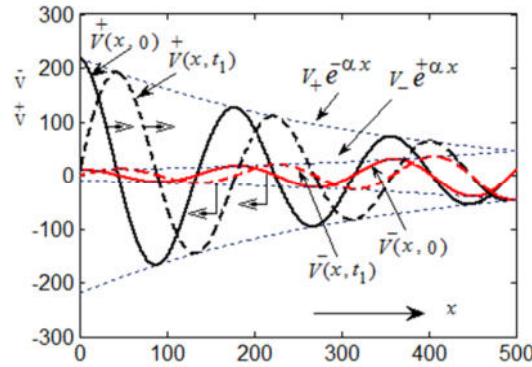


Figure.4.5. Ondes mobiles incidente et réfléchie

Longueur d’onde : On définit la longueur d’onde spatiale λ comme : $\lambda = \frac{\beta}{2\pi}$

Vitesse de propagation : $v = f\lambda = \frac{1}{\sqrt{C_0L_0}}$

Impédance caractéristique.

Si on définit les coefficients de réflexion :

$$V^-(x) = \rho(x)V^+(x) \rightarrow \rho(x) = \frac{V^- e^{+2\gamma x}}{V^+}$$

On remplace $\rho(x)$ dans les équations V et I

$$V(x) = V^+(x). (1 + \rho(x))$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} (V^+(x). (1 - \rho(x)))$$

L’impédance vue d’un point x est

$$Z_x = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_c \cdot \frac{1 + \rho(x)}{1 - \rho(x)} \leftrightarrow \rho_x = \frac{Z_x - Z_c}{Z_x + Z_c} \quad \forall x \leq l$$

Si $Z_x = Z_c \Rightarrow \rho_x = 0 \quad \forall x \leq l$

C'est-à-dire, si $Z_{ch} = Z_c$, ($Z_{ch} = Z_x = l$) le coefficient de réflexion est nul, il n’y a pas d’ondes réfléchies, ni de tension ni de courant. C’est comme si la longueur est infinie. *L’impédance caractéristique d’une ligne est l’impédance de charge qui annule la réflexion* On dit dans ce cas que la ligne est *adaptée*

4.2.3.1. Détermination des constantes d’intégration A_1 et A_2

Les constantes A_1 et A_2 sont déterminées à partir des conditions aux limites :

à l’extrémité charge lorsque $x=0$, on a : $V(0) = V_2$ et $I(0) = I_2$

Alors :

$$V_2 = A_1 + A_2 \tag{4.13}$$

$$I_2 = \frac{1}{Z_c} (A_1 - A_2) \tag{4.14}$$

Nous pouvons extraire les deux constantes A_1 et A_2 comme suit :

$$(4.13) + Z_c(4.14) \Rightarrow A_1 = \frac{V_2 + Z_c I_2}{2} \quad (4.15)$$

$$(4.13) - Z_c(4.14) \Rightarrow A_2 = \frac{V_2 - Z_c I_2}{2} \quad (4.16)$$

On remplace (4.15) et (4.16) dans (4.11) et (4.12) et après arrangements on obtient :

$$V(x) = \frac{V_2 + Z_c I_2}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_2 - Z_c I_2}{2} e^{-\gamma x} \quad (4.17)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \left(\frac{V_2 + Z_c I_2}{2} e^{\gamma x} - \frac{V_2 - Z_c I_2}{2} e^{-\gamma x} \right) \quad (4.18)$$

Les équations de la tension et du courant peuvent être réarrangées sous forme :

$$V(x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} V_2 + Z_c \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} I_2 \quad (4.19)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} V_2 + \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} I_2 \quad (4.20)$$

Qui s'écrit aussi sous la forme suivante, lors en mettant $x = l$:

$$V_1 = \cosh \gamma l V_2 + Z_c \sinh \gamma l I_2 \quad (4.21)$$

$$I_1 = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l V_2 + \cosh \gamma l I_2 \quad (4.22)$$

4.2.3.2 Circuits équivalent d'une ligne longue

Il est maintenant possible de trouver un modèle en π équivalent exact, montré en Figure.4.6, pour remplacer les constantes ABCD du quadripôle. D'une façon similaire aux expressions d'une ligne moyenne obtenues pour le modèle en π normal précédent, nous avons :

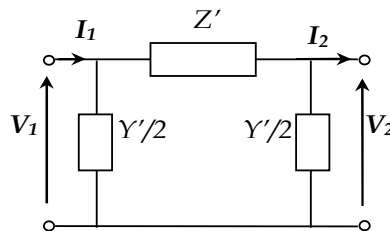


Figure.4.6. Modèle en π équivalent pour une ligne longue.

$$V_1 = \left(1 + \frac{Y' Z'}{2} \right) V_2 + Z' I_2 \quad (4.23)$$

$$I_1 = \frac{Y'}{2} \left(2 + \frac{Y' Z'}{2} \right) V_2 + \left(1 + \frac{Y' Z'}{2} \right) I_2 \quad (4.24)$$

Par la comparaison avec la forme exacte, on trouve :

$$Z' = Z_c \sinh \gamma l$$

$$Z' = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} \sinh \gamma l = Z_0 l \frac{\sinh \gamma l}{\sqrt{Z_0 Y_0} l} \quad (4.25)$$

$$Z' = Z_c \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$$

$$\begin{aligned}
1 + \frac{Y'Z'}{2} &= \cosh \gamma l \\
1 + \frac{Y'}{2} Z_c \sinh \gamma l &= \cosh \gamma l \\
\frac{Y'}{2} &= \frac{1}{Z_c} \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l} \\
\frac{Y'}{2} &= \frac{1}{Z_c} \tanh \frac{\gamma l}{2} \\
\frac{Y'}{2} &= \frac{Y}{2} \cdot \frac{\tanh \frac{\gamma l}{2}}{\frac{\gamma l}{2}}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

4.2.3.3. Ligne sans pertes

Si pour une fréquence de fonctionnement on peut affirmer que dans les paramètres linéiques :

$R_0 \ll \omega L_0$ et $G_0 \ll \omega C_0$ on peut négliger R_0 devant ωL_0 et G_0 devant ωC_0 donc :

$$\begin{aligned}
Z_0 &= j\omega L_0; \quad Y_0 = j\omega C_0; \quad Z_c = \sqrt{L_0/C_0} \text{ (réel)}; \\
\gamma &= j\omega\sqrt{L_0 C_0} = j\beta; \quad \alpha = 0; \quad \beta = \omega\sqrt{L_0 C_0};
\end{aligned}$$

Puisque :

$$\begin{aligned}
\cosh(\gamma l) &= 1 + \frac{(\gamma l)^2}{2!} + \frac{(\gamma l)^4}{4!} + \frac{(\gamma l)^6}{6!} \dots; \\
\sinh(\gamma l) &= (\gamma l) + \frac{(\gamma l)^3}{3!} + \frac{(\gamma l)^5}{5!} + \frac{(\gamma l)^7}{7!} \dots;
\end{aligned}$$

Et

$$\begin{aligned}
\cosh(\alpha l + j\beta l) &= \cosh \alpha l \cdot \cosh \beta l + j \sinh \alpha l \cdot \sinh \beta l \\
\sinh(\alpha l + j\beta l) &= \sinh \alpha l \cdot \cosh \beta l + j \cosh \alpha l \cdot \sinh \beta l
\end{aligned}$$

Ces approximations nous permettent de mieux comprendre avec des calculs simples le comportement d'une ligne.

$$V_1 = \cos \beta l V_2 + j Z_c \sin \beta l I_2 \tag{4.27}$$

$$I_1 = \frac{j}{Z_c} \sin \beta l V_2 + \cos \beta l I_2 \tag{4.28}$$

Et les équations qui relient les grandeurs de sortie en fonction des grandeurs d'entrée sont :

$$V_2 = \cos \beta l V_1 - \frac{j}{Z_c} \sin \beta l I_1 \tag{4.29}$$

$$I_2 = -j Z_c \sin \beta l V_1 + \cos \beta l I_1 \tag{4.30}$$

4.2.4. Taux de régulation

La régulation de la tension de la ligne peut être définie comme le changement en % en tension l'extrémité de réception passant de charge nulle à la charge totale :

$$\mathcal{R} = \frac{|V_{2\infty}| - |V_2|}{|V_2|} \times 100\% \tag{4.31}$$

Avec :

$|V_{2\infty}|$: tension à vide à l'extrémité récepteur ;

$|V_2|$: tension en charge à l'extrémité récepteur.

Dans ce cas on peut écrire le taux de régulation comme :

$$\mathcal{R} = \frac{\left| \frac{V_1}{A} \right| - |V_2|}{|V_2|} \times 100\% \quad (4.32)$$

4.2.5. Effet de FERRANTI

Dans le cas d'une ligne à vide la tension à son extrémité augmente jusqu'à des valeurs inadmissibles à cause de l'effet capacitive des lignes connu sous le nom **effet Ferranti** qui présente un état très dangereux surtout dans le cas des lignes longues auquel doit répondre rapidement les dispositifs de protection.

Dans le fonctionnement à vide ou la charge déconnectée le courant $I_2 \approx 0$. Pour une valeur donnée V_2 de la tension en bout de ligne, la tension de départ est déterminée en ajoutant géométriquement à V_2 la chute de tension aux bornes de l'impédance de la ligne.

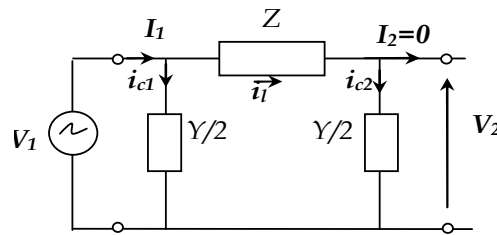


Figure.4.7. Circuit équivalent d'une ligne à vide

$$V_1 = V_2 + Z \cdot i_{c2} \quad (i_{c2} = i_1) \quad (4.33)$$

Le diagramme vectoriel dans ce cas peut être représenté par la figure 3, on peut voir que la tension d'arrivée est plus grande que la tension de départ et dans certaines circonstances elle dépasse la valeur permise.

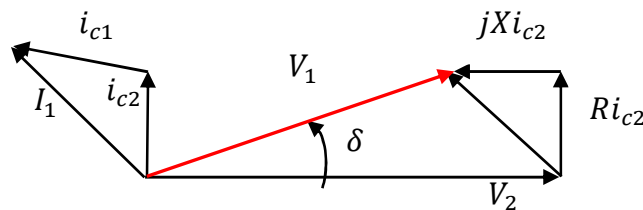


Figure.4.8. Diagramme vectoriel d'une ligne à vide

4.3. Transit de puissance à travers une ligne de transport

Soit une source de tension qui alimente une charge à travers une ligne électrique représenté en quadripôle (Figure.4.3), en donnant les constantes ABCD en forme exponentielle tel que :

$$\underline{A} = A \angle \varphi_A; \underline{B} = B \angle \varphi_B; \text{ et les tensions d'entrée et de sortie par : } \underline{V}_1 = V_1 \angle \delta; \underline{V}_2 = V_2 \angle 0 .$$

à partir de l'expression de V_1 , le courant I_2 peut-être écrit comme :

$$\underline{I_2} = \frac{V_1 - AV_2}{B} = \frac{V_1 \angle \delta - A \angle \varphi_A \cdot V_2 \angle 0}{B \angle \varphi_B} \quad (4.34)$$

$$\underline{I_2} = \frac{V_1}{B} \angle (\delta - \varphi_B) - \frac{AV_2}{B} \angle (\varphi_A - \varphi_B)$$

La puissance complexe à l'extrémité de réceptrice est :

$$\underline{S_{2(3\phi)}} = 3 \cdot V_2 \cdot I_2^* = P_{2(3\phi)} + jQ_{2(3\phi)} \quad (4.35)$$

Substituant pour I_2 :

$$\underline{S_{2(3\phi)}} = 3 \frac{V_1 V_2}{B} \angle (\varphi_B - \delta) - 3 \frac{AV_2^2}{B} \angle (\varphi_B - \varphi_A) \quad (4.36)$$

$$\underline{S_{2(3\phi)}} = \frac{U_1 U_2}{B} \angle (\varphi_B - \delta) - \frac{AU_2^2}{B} \angle (\varphi_B - \varphi_A)$$

Les puissances active et réactive à l'extrémité réceptrice de la ligne sont :

$$P_{2(3\phi)} = \frac{U_1 U_2}{B} \cos(\varphi_B - \delta) - \frac{AU_2^2}{B} \cos(\varphi_B - \varphi_A) \quad (4.37)$$

$$Q_{2(3\phi)} = \frac{U_1 U_2}{B} \sin(\varphi_B - \delta) - \frac{AU_2^2}{B} \sin(\varphi_B - \varphi_A) \quad (4.38)$$

Lorsqu'une ligne sans pertes ($R = 0, G = 0$), donc : $B = jX'$; $\varphi_B = 90^\circ$; $\varphi_A = 0^\circ$ et $A = \cos \beta l$

$$P_{2(3\phi)} = \frac{U_1 U_2}{X'} \sin \delta \quad (4.39)$$

$$Q_{2(3\phi)} = \frac{U_1 U_2}{X'} \cos \delta - \frac{U_2^2}{X'} \cos \beta l \quad (4.40)$$

4.4. Compensation de l'énergie réactive

4.4.1. Compensation shunt par inductance

Les réactances shunt sont utilisées pour compenser l'effet de tension indésirable associé à la capacité de ligne (Figure.4.9). La quantité nécessaire de cette réactance pour maintenir la tension à l'extrémité charge à une valeur spécifiée, est obtenue comme suit :



Figure.4.9. Compensation shunt par inductance

$$I_2 = \frac{V_2}{jX_{sh}} \quad (4.41)$$

Substituant I_2 dans l'expression de tension V_1 à l'équation 4.27 :

$$V_1 = V_2 \left(\cos \beta l + \frac{Z_c \sin \beta l}{X_{sh}} \right) \quad (4.42)$$

Donc X_{sh} est donnée par :

$$X_{sh} = \left(\frac{\sin \beta l}{\frac{V_1}{V_2} - \cos \beta l} \right) Z_c \tag{4.43}$$

4.4.2. Compensation série et shunt par condensateur

Le transport de la puissance réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité récepteur. Afin d'éviter cela, la compensation de puissance réactive, série ou shunt selon les cas, est utilisée pour limiter ce transport de puissance réactive.

Les compagnies d'électricité cherchent toujours à augmenter le facteur de puissance $\cos \varphi$ au niveau du consommateur.

- Le principe la compensation parallèle est expliqué par le schéma suivant :

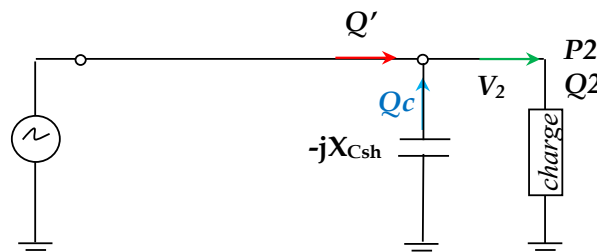


Figure.4.10. Compensation shunt par inductance

Le courant réactif (capacitif) I_c du condensateur compense totalement ou partiellement la composante I_{2r} de la charge selon la valeur de la capacité C pour atteindre un $\cos \varphi_2$ choisi.

Sur le plan des puissances le diagramme suivant montre la valeur de puissance réactive qui va améliorer le facteur de puissance de $\cos \varphi_{20}$ jusqu'à $\cos \varphi_2$.

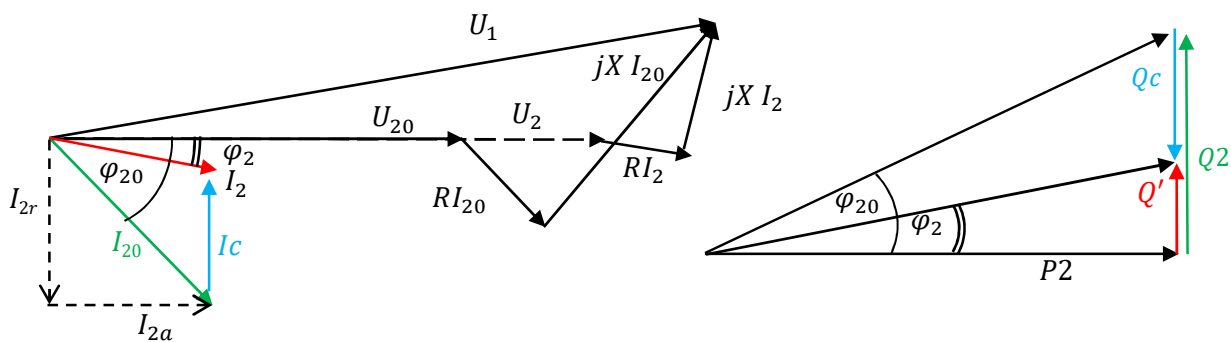


Figure.4.11. Diagramme de Fresnel

La puissance réactive nécessaire pour améliorer le facteur de puissance de $\cos \varphi_{20}$ a la valeur de $\cos \varphi_2$ est déduite à partir du diagramme selon :

$$Q_c = P. (\tan \varphi_{20} - \tan \varphi_2) \tag{4.44}$$

D'où on peut déterminer la valeur de la capacité du condensateur à installer pour cette compensation pour chaque phase :

$$C = \frac{Q_c}{w \cdot U^2} \quad (4.45)$$

- Le principe la compensation série est expliqué par le schéma suivant :

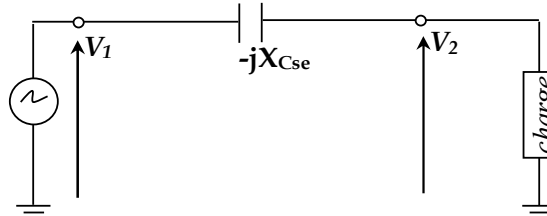


Figure.4.12. Compensation shunt par inductance

Les condensateurs sont connectés en série avec la ligne pour réduire la réactance série de la ligne, à partir de l'équation 4.39 le transit de puissance sans pertes est augment qui devient :

$$P_{2(3\phi)} = \frac{U_1 U_2}{X' - X_{Cse}} \sin \delta \quad (4.46)$$

Où X_{Cse} est la réactance du condensateur série,

NB :

Le rapport X_{Cse}/X' exprimé en pourcentage est généralement appelé pourcentage de compensation. Le pourcentage de compensation est de l'ordre de 25 à 70 %.

CHAPITRE

5

TRANSFORMATEUR ET SYSTEME D'UNITE RELATIVE

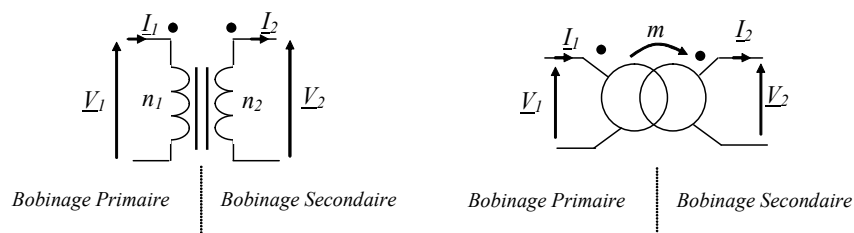
5.1. Introduction

Les transformateurs sont des éléments essentiels dans le système de transport d'énergie. Ils permettent d'élever les tensions relativement basses issues des générateurs, à des niveaux très élevés pour un transport efficace de l'énergie. Aux points d'utilisateurs les transformateurs réduits les tensions à des valeurs plus appropriées pour l'utilisation.

Dans ce chapitre, nous présentons une modélisation des transformateurs et on voit l'avantage de cette dernière.

5.2. Rappels sur le transformateur monophasé

5.2.1. Symbole



5.2.2. Transformateur monophasé parfait

Un transformateur monophasé comporte :

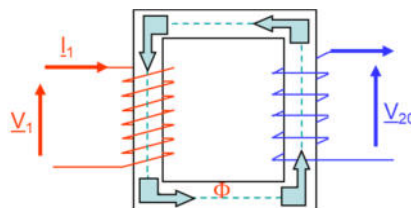


Figure.5.1. Schéma équivalent du transformateur monophasé

- Un circuit magnétique constitué de tôles de matériaux ferromagnétiques feuilletés.

- Deux (ou plus) bobinages, l'un est appelé primaire, les autres secondaires.

Le circuit magnétique d'un transformateur parfait présente :

- Une perméabilité magnétique infinie : sa réluctance \mathfrak{R} est nulle, il n'y a pas de fuites de flux, et pas de pertes ferromagnétiques (hystérésis et courants de Foucault).
- La résistance des enroulements est nul (pas de pertes par effet Joule).

5.2.3. Rapport de tension (essai à vide)

On suppose que : L'enroulement est alimenté par la tension \underline{V}_1 et elle est parcourue par le courant \underline{I}_1 . Cet enroulement possède n_1 spires, et le secondaire possède n_2 spires.

On suppose que les courants, les tensions et les flux soient sinusoïdaux, la f.e.m induite dans les enroulements primaire et secondaire selon la loi de Faraday et de Lenz s'écrit comme suit :

$$\underline{e}_1 = -n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = -jn_1 \omega \phi \quad (5.1)$$

$$\underline{e}_2 = -n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} = -jn_2 \omega \phi \quad (5.2)$$

Et par l'application de la loi des mailles sur le circuit primaire et secondaire on trouve :

$$\underline{V}_1 = \underline{e}_1 = -jn_1 \omega \phi \quad (5.3)$$

$$\underline{V}_{20} = \underline{e}_2 = -jn_2 \omega \phi \quad (5.4)$$

Le rapport de transformation il est défini par :

$$m = \frac{\underline{V}_{20}}{\underline{V}_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.5)$$

5.2.4. Rapport de courant (essai en charge)

Selon la relation d'Hopkinton dans les circuits magnétiques où (théorème d'Ampère) :

$$\varepsilon = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \mathfrak{R}\phi = \sum \vec{I} = n_1 \underline{I}_1 - n_2 \underline{I}_2 \quad (5.6)$$

Puisque le transformateur est parfait $\mathfrak{R} = 0$, alors :

$$m = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.7)$$

Les courants sont transformés dans un rapport inverse des tensions

5.2.5. Puissance apparente

La puissance apparente complexe à l'entrée du transformateur vaut :

$$\underline{S}_1 = \underline{V}_1 \cdot \underline{I}_1^* \quad (5.8)$$

A la sortie du transformateur, elle vaut :

$$\underline{S}_2 = \underline{V}_2 \cdot \underline{I}_2^* = m \cdot \underline{V}_1 \left(\frac{1}{m} \right) \cdot \underline{I}_1^* = \underline{V}_1 \cdot \underline{I}_1^* = \underline{S}_1 \quad (5.9)$$

Conclusion : Le **transformateur idéal** est absolument passif et **sans pertes**.

Quand il élève la tension, il abaisse le courant (ou inversement) et ne modifie pas la puissance qui transite.

5.2.6. Etude du transformateur réel

Le transformateur parfait n'existe pas dans la pratique en effet les enroulements possèdent des résistances et la réluctance magnétique est différente de zéro, et il existe toujours un flux de fuite et des pertes ferromagnétique.

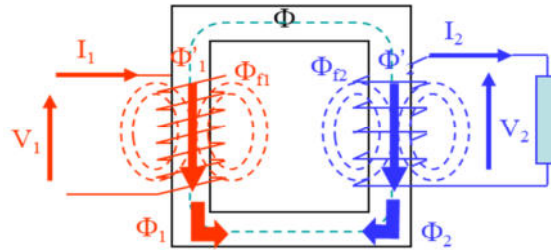


Figure.5.2. Représentation du flux de fuite au transformateur monophasé réel

On suppose que :

L'enroulement primaire est alimenté par la tension \underline{V}_1 elle est parcourue par le courant \underline{I}_1 . Qui possède n_1 spires et a une résistance R_1 . Le secondaire possède n_2 spires et a une résistance R_2 .

On définit :

- le flux total Φ'_1 créé par le courant I_1
- le flux total Φ'_2 créé par le courant I_2
- le flux de fuite Φ_{f1}
- le flux de fuite Φ_{f2}
- le flux Φ_1 créé par l'enroulement 1 et qui traverse l'enroulement 2
- le flux Φ_2 créé par l'enroulement 2 et qui traverse l'enroulement 1
- le flux utile Φ dans le circuit magnétique
- le flux réel Φ_{1r} dans l'enroulement 1
- le flux réel Φ_{2r} dans l'enroulement 2

On peut écrire : $\Phi'_1 = \Phi_1 + \Phi_{f1}$

$$\Phi'_2 = \Phi_2 + \Phi_{f2}$$

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$$

$$\Phi_{1r} = \Phi'_1 - \Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_{f1} - \Phi_2 = \Phi + \Phi_{f1}$$

$$\Phi_{2r} = -\Phi'_2 + \Phi_1 = -\Phi_2 - \Phi_{f2} + \Phi_1 = \Phi - \Phi_{f2}$$

$n_1 \Phi_{f1} = \ell_1 i_1$ avec ℓ_1 est l'inductance de fuite du primaire.

$n_2 \Phi_{f2} = \ell_2 i_2$ avec ℓ_2 est l'inductance de fuite du secondaire.

Mise en équation du circuit primaire :

$$\underline{V}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + n_1 \cdot \frac{d\Phi_{1r}}{dt} = R_1 \cdot \underline{I}_1 + n_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} + n_1 \cdot \frac{d\Phi_{f1}}{dt} \quad (5.10)$$

On définit l'inductance de fuite ℓ_1 par : $\ell_1 = n_1 \cdot \frac{\phi_{f1}}{I_1}$

L'équation (5.10) devient :

$$\underline{V}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + \ell_1 \cdot \frac{d\underline{I}_1}{dt} + \underline{E}_1 \tag{5.11}$$

Où : $\underline{E}_1 = n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$

En peut écrire par :

$$\underline{V}_1 = (R_1 + jX_1)\underline{I}_1 + \underline{E}_1 \tag{5.12}$$

Avec : $X_1 = j\omega\ell_1$

Mise en équation du circuit secondaire

$$n_2 \cdot \frac{d\phi_{2r}}{dt} = n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} - n_2 \cdot \frac{d\phi_{f2}}{dt} = R_2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{V}_2 \tag{5.13}$$

Sachant que : $\underline{E}_2 = n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ et $\ell_2 = n_2 \cdot \frac{\phi_{f2}}{I_2}$

Alors :

$$\underline{E}_2 = R_2 \cdot \underline{I}_2 + \ell_2 \cdot \frac{d\underline{I}_2}{dt} + \underline{V}_2 \tag{5.14}$$

En peut écrire par :

$$\underline{E}_2 = (R_2 + jX_2) \cdot \underline{I}_2 + \underline{V}_2 \tag{5.15}$$

Avec : $X_2 = j\omega\ell_2$

Le modèle équivalent du transformateur monophasé réel est montré en Figure 5.3. Le circuit équivalent est constitué d'un transformateur idéal de rapport de transformation $m = \frac{n_2}{n_1}$, ainsi que des éléments qui *représentent les imperfections du transformateur réel* :

- Résistances séries des bobinages : R_1 et R_2
- Inductances dites "de fuites" séries des bobinages : ℓ_1 et ℓ_2
- Echauffement du circuit magnétique appelé "*pertes fer*" sensiblement proportionnelles au carré de la tension d'entrée : on fait une équivalence avec une résistance appelée R_f en parallèle avec l'entrée.
- Réactance équivalente du transformateur à vide dite "*inductance magnétisante*" qu'on notera X_m .

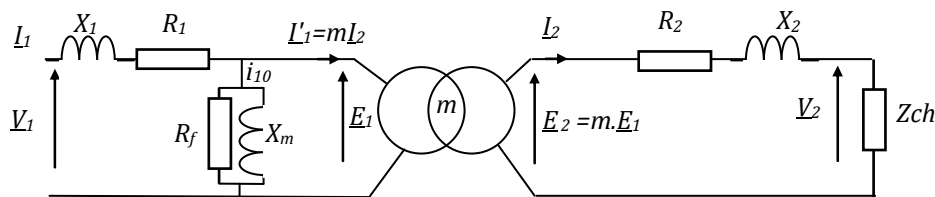


Figure.5.3. Circuit équivalent d'un transformateur

5.2.7. Etude du transformateur avec l'hypothèse de Kapp

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant primaire à vide i_{10} devant le courant I_1 et I'_1 et en charge donc on peut déplacer la branche magnétisante à l'entrée du schéma équivalent.

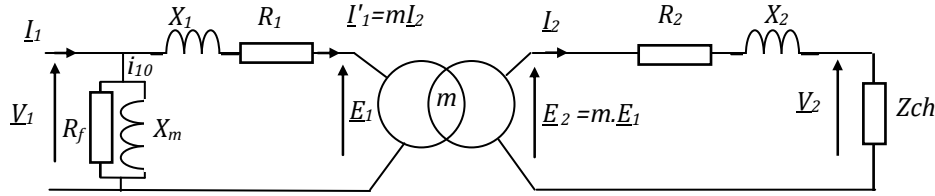


Figure.5.4. Circuit équivalent d'un transformateur par l'hypothèse de Kapp

$$\underline{V}_1 = (R_1 + jX_1)I'_1 + \underline{E}_1 \tag{5.16}$$

$$\underline{E}_2 = (R_2 + jX_2).I_2 + \underline{V}_2 \tag{5.17}$$

On multiplie l'équation (5.16) par m et on remplace $I'_1 = mL_2$ et $\underline{E}_2 = m\underline{E}_1$

$$m\underline{V}_1 = (R_1 + jX_1)m^2.L_2 + \underline{E}_2 \tag{5.18}$$

On remplace \underline{E}_2 par sa valeur de (5.17) on trouve :

$$m\underline{V}_1 = (R_1 + jX_1)m^2.L_2 + (R_2 + jX_2).I_2 + \underline{V}_2 \tag{5.19}$$

$$m\underline{V}_1 = \underline{V}_{20} = (R_s + jX_s).I_2 + \underline{V}_2 \tag{5.20}$$

Avec :

$R_s = R_2 + m^2R_1$: La résistance du transformateur ramenée au secondaire

$X_s = X_2 + m^2X_1$: La réactance de fuite du transformateur ramenée au secondaire

En simplifiant le schéma équivalent du transformateur réel, on obtient le schéma dit "schéma équivalent ramenée au secondaire" représenté ci-dessous :

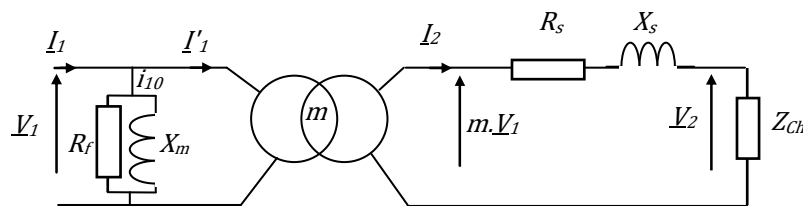


Figure.5.5. Circuit équivalent d'un transformateur aux éléments ramenés au secondaire

La même chose on trouve le circuit équivalent du transformateur avec les éléments sont ramenés au primaire.

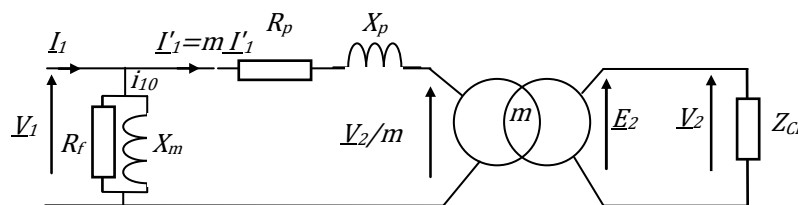


Figure.5.6. Circuit équivalent d'un transformateur aux éléments ramenés au primaire

Avec :

$R_p = R_1 + R_2/m^2$: La résistance du transformateur ramenée au primaire

$X_p = X_1 + X_2/m^2$: La réactance de fuite du transformateur ramenée au primaire

5.2.8. Détermination des éléments équivalents

On détermine habituellement ces éléments au cours de deux "essais" appelée "essai à vide" et "essai en court-circuit".

5.2.8.1. Essai à vide

Le transformateur n'est connecté à aucune charge et alimenté par le primaire.

On mesure $P_{10}, V_{10}, I_{10}, V_{20}$

A partir de cet essai, on peut calculer les grandeurs suivantes :

1. Les pertes fer P_{fer} soit $P_{fer} = P_{10} - R_1 I_{10}^2$. Comme généralement les pertes joules sont négligeables, on peut admettre que $P_{fer} = P_{10}$
2. Le rapport de transformation à vide soit $m = V_{20}/V_{10}$
3. La résistance équivalente aux pertes fer $R_f = V_{10}^2/P_{10}$
4. Le courant active primaire $I_{1a} = P_{10}/V_{10}$
5. Le courant réactive primaire $I_{1r} = \sqrt{I_{10}^2 - I_{1a}^2}$
6. La réactance de magnétisation vue du primaire $X_m = V_{10}/I_{1r}$
7. Le facteur de puissance primaire à vide $\cos(\varphi_{10}) = \frac{P_{10}}{V_{10}I_{10}}$

5.2.8.2. Essai en court-circuit

On court-circuite le secondaire et on applique une tension réduite V_{1cc} (V_{1cc} représente quelques pour cent de V_{1n}) au primaire afin d'avoir au secondaire un courant $I_{2cc} = I_{2n}$.

On mesure : $V_{1cc}, P_{1cc}, I_{1cc}, I_{2cc}$;

1. Le rapport de transformation en court-circuit $m = I_{1cc}/I_{2cc}$.
2. La résistance totale ramenée au secondaire $R_s = P_{1cc}/I_{1cc}^2$
3. La réactance totale ramenée au secondaire $X_s = \sqrt{\left(\frac{mV_{1cc}}{I_{2cc}}\right)^2 - R_s^2}$

5.2.8.3. Représentation des tensions et courants dans le plan complexe

Pour faire des calculs sur le schéma équivalent du transformateur réel, il est habituel de représenter ses tensions et courants dans le plan complexe. On aboutit classiquement à la représentation ci-dessous :

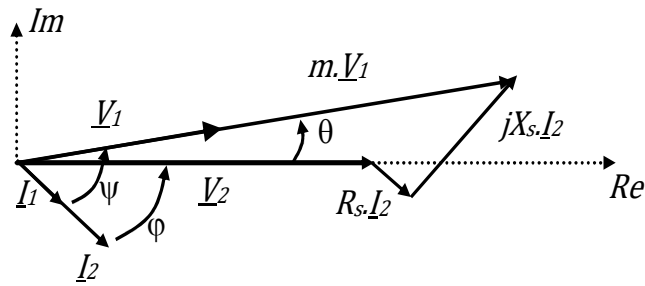


Figure.5.7. Représentation de Fresnel

L'angle φ est le déphasage entre I_2 et V_2 , L'angle ψ est le déphasage entre I_1 et V_1

NB : Il est à noter d'après ce schéma qu'il existe en général, et à cause des imperfections, un déphasage entre V_2 et V_1 .

Plus important : il existe une chute de tension entre V_2 et $m.V_1$ (la tension à vide).

On exprime cette tension, en valeur efficace, comme étant : $\Delta V_2 = mV_1 - V_2$

Après calcul théorique et une légère approximation comme quoi θ est faible, on retiendra :

$$\Delta V_2 = mV_1 - V_2 \cong R_s I_2 \cos \varphi + X_s I_2 \sin \varphi \quad (5.21)$$

5.2.9. Rendements des transformateurs

Le rendement du transformateur s'exprime facilement en fonction des données à courant de charge I_2 constant :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_{joul}} \quad (5.22)$$

5.3. Transformateurs triphasés

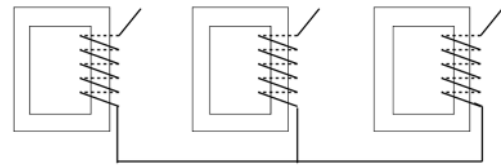
La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé. Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie en haute tension est plus économique d'où la nécessité d'employer des transformateurs éleveurs à la sortie de centrale de production et abaisseur tout proche des centres de consommation. En effet pour modifier la tension d'un système triphasé on peut choisir d'utiliser :



- Soit 3 transformateurs monophasés identiques (flux indépendants)
- Soit un seul transformateur triphasé (la solution la plus économique) ;

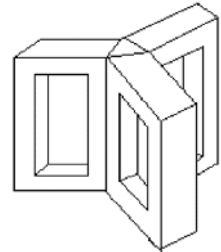
5.3.1. Constitution

Un transformateur triphasé peut être constitué de trois transformateurs monophasés. La figure ci-contre représente les enroulements primaires couplés en étoile.



Cette solution entraîne un encombrement important et une sous-utilisation du fer mais elle est parfois utilisée.

Il est possible de réaliser le circuit magnétique ci-contre (les enroulements primaire et secondaire sont placés sur les colonnes verticales périphériques) :



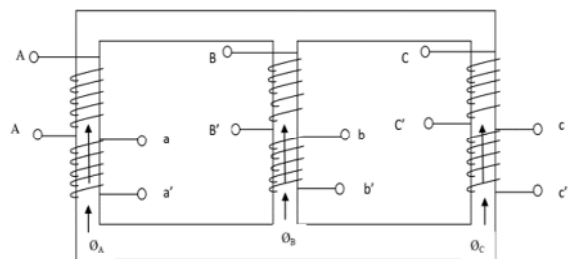
Chaque enroulement primaire comporte n_1 spires, le secondaire n_2 spires. Le circuit magnétique de chaque enroulement se referme dans la colonne centrale, les flux sont indépendants. $\underline{V}_A = jn_1\omega\phi_A$; $\underline{V}_B = jn_1\omega\phi_B$; $\underline{V}_C = jn_1\omega\phi_C$;

D'où le flux dans la colonne centrale :

$$\underline{\phi} = \underline{\phi}_A + \underline{\phi}_B + \underline{\phi}_C = \frac{1}{jn_1\omega}(\underline{V}_A + \underline{V}_B + \underline{V}_C) \tag{5.23}$$

Si $(\underline{V}_A + \underline{V}_B + \underline{V}_C) = 0$ il est possible de supprimer la colonne centrale. Ce type de transformateur se rencontre très rarement à cause de la complexité de la construction par rapport au bénéfice obtenu.

Pour simplifier la construction, on réalise des circuits magnétiques coplanaires (un seul enroulement par colonne est représenté sur le schéma ci-contre) : la somme des flux dans



chacune des colonnes verticales est nulle $(\phi_A + \phi_B + \phi_C) = 0$ si les fuites de flux sont négligées.

5.3.2. Connexions des transformateurs triphasés

Le circuit magnétique est formé de trois noyaux fermés par 2 culasses. Il est fabriqué en tôles magnétiques feuilletées. Chaque noyau porte :

- Un enroulement primaire
- Un ou plusieurs enroulements secondaires

Les enroulements primaires peuvent être connectés en étoile (Y) ou en triangle (Δ , D), et le secondaire en (y), triangle (Δ , d), ou en zig-zag (z).

On notera de façon conventionnelle les bobinages primaires en majuscule (A, B et C) et secondaires en minuscules (a, b et c).

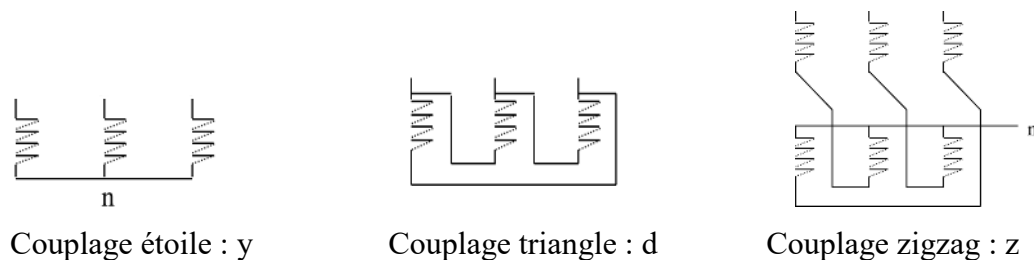


Figure.5.8. Couplage de secondaire

Le couplage zig-zag est obtenu de la manière suivante :

En divisant les trois bobines d'un enroulement en six demi-bobines, et pour réaliser chaque phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des noyaux différents et connectées en sens inverse, Les trois extrémités libres sont réunies et forment le neutre, les trois autres constituent les bornes.

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

Y-y : étoile –étoile	Y-d : étoile-triangle	Y-z : étoile-zigzag
D-y : triangle- étoile	D-d : triangle –triangle	D-z : triangle-zigzag

5.3.3. Choix du couplage

Le choix de couplage s'effectuera à partir de nombreux critères ; citons quelques règles générales :

- Aux très hautes tensions, on aura intérêt à choisir un couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que : $V = U/\sqrt{3}$.
- Pour les très forts courants, on préférera le montage triangle où chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité : $J = I/\sqrt{3}$.
- Lorsque la charge nécessite la présence du neutre. Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag.
- Aux faibles déséquilibres ($I_{\text{neutre}} \leq 10\% I_{\text{ligne}}$), primaire et secondaire seront couplés en étoile avec conducteurs neutres ;

- Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire sera connecté en zig-zag.
- Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilisera un montage triangle-étoile pour économiser du cuivre au secondaire.
- Il faut éviter d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire afin d'éviter de transmettre le déséquilibre des courants d'un coté à l'autre.

5.3.4. Indice horaire

L'indice horaire (J) est un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduit le déphasage entre deux tensions simple primaire et secondaire homologues. Ce déphasage obtenu est toujours un multiple entier de 30 degrés.

$$J = \frac{\theta}{\pi/6} ; \theta = (\underline{V}_A, \underline{V}_a) \text{ ou } \theta = (\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{ab}) \quad (5.24)$$

5.3.5. Rapport de transformation

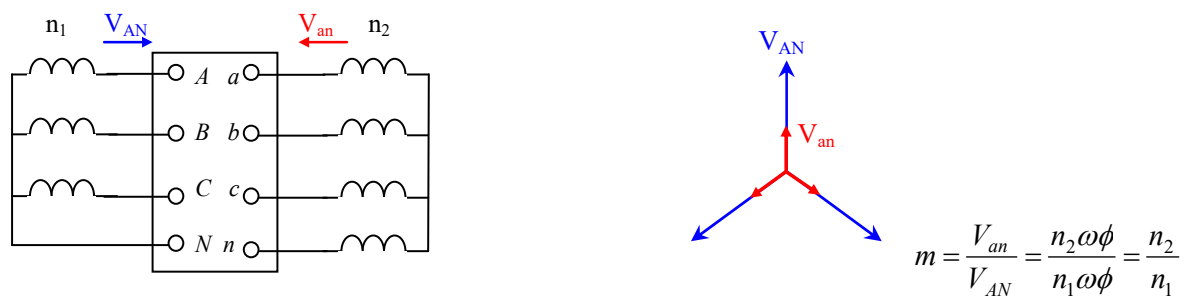
Comme en monophasé, le rapport de transformation est le rapport des tensions à circuit secondaire ouvert (fonctionnement à vide).

$$m = \frac{V_{an}}{V_{AN}} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} \quad (5.25)$$

5.3.6. Couplages normalisés

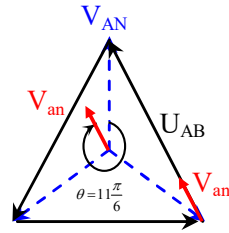
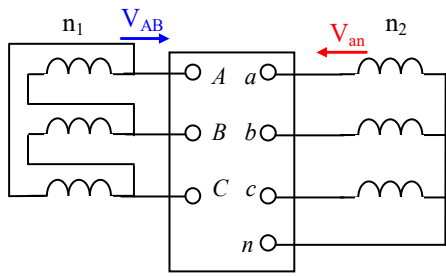
Voici ci-dessous la représentation de quelques couplages internes utilisés d'un transformateur et le calcul de l'indice horaire et le rapport de transformation

5.3.6.1 Couplage étoile-étoile Yy_0



D'après le schéma on peut voir que V_{AN} et V_{an} sont en phase, car, portés par le même noyau. Ils sont orientés dans le même sens ce qui implique que $\theta = 0^\circ$ et $J = 0$

5.3.6.2 Couplage triagle-étoile Dy₁₁

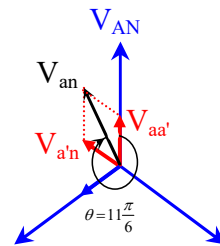
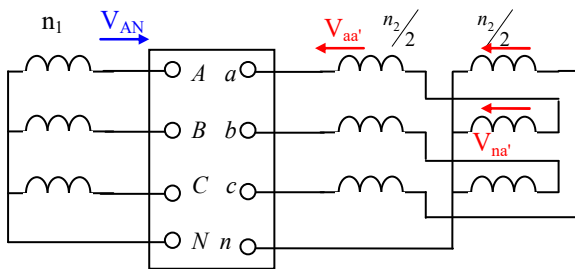


$$m = \frac{V_{an}}{V_{AN}} = \frac{U_{ba}}{U_{BA}} = \frac{\sqrt{3}V_{an}}{U_{BA}} = \sqrt{3} \frac{n_2 \omega \phi}{n_1 \omega \phi} = \sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$$

D'après le schéma on peut voir que V_{AB} et V_{an} sont en phase, car, portés par le même noyau. Ils sont orientés dans le même sens.

$\theta = 11 \frac{\pi}{6}$, ce qui implique J= 11 C'est bien 11 heures ! Ce couplage sera désigné Dy₁₁.

5.3.6.3 Couplage étoile-zig zag Yz₁₁



$$\underline{V_{an}} = \underline{V_{aa'}} + \underline{V_{na'}}$$

$$\underline{V_{an}} = \underline{V_{aa'}} + (-\underline{V_{a'n}})$$

$$m = \frac{V_{an}}{V_{AN}} = \frac{2V_{a'n} \cos(\pi/6)}{V_{AN}} = \frac{2 \left(\frac{n_2}{2}\right) \omega \phi \frac{\sqrt{3}}{2}}{n_1 \omega \phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{n_2}{n_1}$$

Pour obtenir la tension V_{an} on prend $(n_2/2)$ spires sur le noyau B en sens inverse d'où $V_{a'n}$ en opposition de phase avec V_{BN} puis on ajoute $(n_2/2)$ spires sur le noyau A en sens directe d'où $V_{aa'}$ en phase avec V_{AN} .

5.3.7. Marche en parallèle des transformateurs triphasés

L'utilisation de deux ou plusieurs transformateurs en parallèle est suivant l'augmentation des charges dont la puissance dépasse la puissance que peut délivrer un transformateur existant.

Et suivant :

- D'un manque de place (hauteur) pour pouvoir utiliser un gros transformateur,
- D'un besoin de sécurité (la probabilité d'indisponibilité simultanée des 2 transformateurs est faible),
- De la standardisation d'une taille de transformateur pour l'ensemble de l'installation.

Les conditions nécessaires pour brancher deux transformateurs triphasés en parallèle, sont :

- Même tension primaire
- Même rapport de transformation
- Même indice horaire ou même groupe d'indice horaires
- Les tensions de court-circuit inférieur à 10 %.

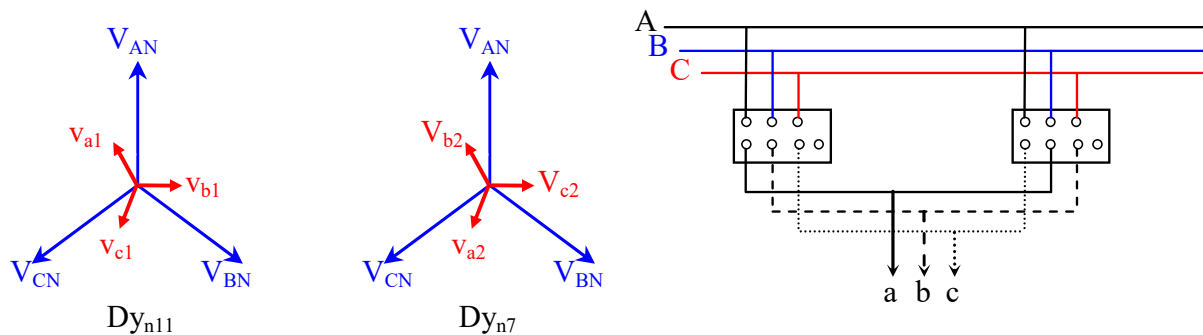
Groupes	Indices	Couplages
I	0, 4, 8	Yy, Dd, Dz
II	2, 6, 10	Yy, Dd, Dz
III	1, 5, 9	Dy, Yz, Yd
IV	3, 7, 11	Dy, Yz, Yd

Si nous inversons les sens d'enroulement d'un des bobinages HT ou BT, les tensions correspondantes sont déphasées de 180° donc de 6h ; l'indice augmente donc de 6. Nous passons du groupe I au groupe II ou du groupe III au groupe IV en inversant les bobines primaires ou secondaires, sans modifier le couplage.

Notons que seuls les couplages étoile - triangle et étoile - zigzag peuvent donner des indices impairs donc des couplages dans les groupes III et IV.

Exemple :

Soit deux transformateurs de couplage différents Dy_{n11} et Dy_{n7} comme suit :



D'après la représentation de Fresnel des deux transformateurs, le réseau secondaire est construite par les phases (a_1+b_2) (b_1+c_2) et (c_1+a_2) .

5.3.8. Schéma monophasé équivalent

Puisque les pertes dans le noyau (fer) et le courant de magnétisation sont de l'ordre de 1% des valeurs nominales maximales, l'impédance shunt est négligée et seulement la résistance de l'enroulement et la réactance de fuite sont considérées pour modéliser le transformateur. En traitant les couplages Y-d ou Dy, il est convenant de remplacer la connexion Δ par une connexion Y et travailler seulement avec une phase.

Puisque pour des régimes équilibrés le neutre de la connexion Y et le neutre de la connexion Y équivalent du Δ sont sur le même potentiel, ils peuvent être connectés ensemble et représenté par

un conducteur neutre. Lorsque l'impédance série équivalente d'un seul transformateur est ramenée au côté Δ , les impédances connectées en Δ du transformateur sont remplacées par des impédances en Y équivalentes, données par $Z_y = Z\Delta / 3$. Le modèle par phase équivalent avec la branche shunt négligée est montré en Fig.7.

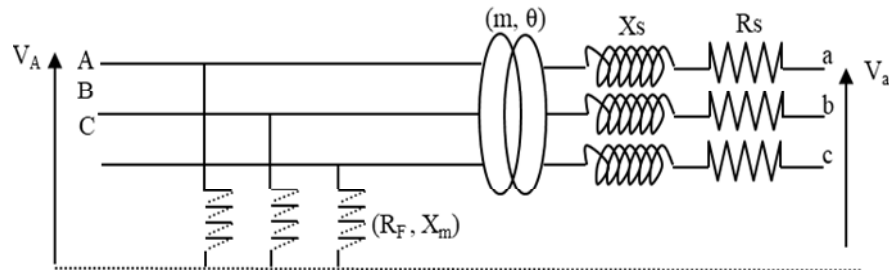


Figure.5.6. Schéma de transformateur triphasé

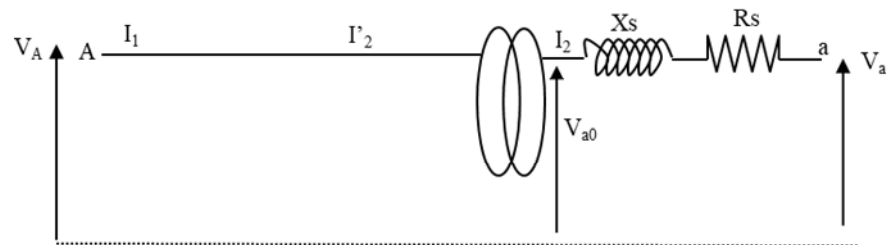


Figure.5.7. Schéma de transformateur équivalent par phase

Le transformateur a un rapport de transformation m tel que : $m = \frac{V_{na0}}{V_{NA}}$

Il introduit un déphasage θ tel que : $V_{na0} = mV_{NA} e^{-j\theta}$

5.4. Système des grandeurs réduites (Le per unit)

La solution d'un système d'énergie interconnecté ayant plusieurs niveaux de tensions différents nécessite la transformation lourde de toutes les impédances à un niveau de tension unique. Cependant, les ingénieurs du réseau électrique ont divisé le système par unit tel que les quantités physiques comme la puissance, la tension, le courant, et l'impédance sont exprimés comme une fraction décimale ou une multiplication des quantités de base. Dans ce système, les différents niveaux de tension disparaissent, et le réseau d'énergie incluant les générateurs, les transformateurs, et les lignes (de différents niveaux de tension) se réduit à un système d'impédances simples. La valeur par unit de n'importe quelle quantité est définie comme :

$$\text{Quantité en per unit} = \frac{\text{Quantité réelle}}{\text{Valeur de base de la quantité}} \quad (5.26)$$

$$\text{Par exemple : } S_{pu} = \frac{S}{S_B} ; V_{pu} = \frac{V}{V_B} ; I_{pu} = \frac{I}{I_B} ; Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B}$$

Au minimum 4 quantités de base sont nécessaires pour définir complètement un système per unit : la puissance apparente, la tension, le courant, et l'impédance. Généralement, la puissance apparente de base triphasé S_B et la tension composée (ligne-ligne) V_B sont sélectionnées. Le courant de base et l'impédance de base sont ensuite dépendants de S_B et V_B et doivent obéir aux lois des circuits. Ceci est donné par :

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} \quad Z_B = \frac{V_B/\sqrt{3}}{I_B}$$

En remplaçant I_B dans Z_B , l'impédance de base devient :

$$Z_B = \frac{(V_B)^2}{S_B} \left[\frac{(kV)^2}{MVA} \right] \quad (5.27)$$

Les quantités de phase et de ligne exprimés en per unit sont les mêmes, les lois d'électricité sont valides, c.à.d. :

$$S_{pu} = V_{pu} I_{pu}^* \quad (5.28)$$

$$V_{pu} = Z_{pu} I_{pu} \quad (5.29)$$

La puissance de charge à son tension nominale peut aussi être exprimé par l'impédance per-unit, si $S_{ch(3\phi)}$ est la puissance apparente de charge, le courant de charge par phase à la tension de phase est donné par : $S_{ch(3\phi)} = 3V_p I_p^*$

Le courant de phase en termes de l'impédance de charge ohmique est : $I_p = \frac{V_p}{Z_{ch}}$

Remplaçant I_p dans l'expression $S_{ch(3\phi)}$, la valeur ohmique de l'impédance de charge est donnée par :

$$Z_{ch}(\Omega) = \frac{3|V_p|^2}{S_{ch(3\phi)}^*} = \frac{|V_{L-L}|^2}{S_{ch(3\phi)}^*} \quad (5.30)$$

À partir de (5.26), l'impédance de charge en per-unit est :

$$Z_{ch}(pu) = \frac{Z_p}{Z_B} = \frac{\left(\frac{|V_{L-L}|^2}{S_{ch(3\phi)}^*} \right)}{\left(\frac{(V_B)^2}{S_B} \right)} = \frac{|V_{pu}|^2}{S_{ch(pu)}^*} \quad (5.31)$$

5.4.1. Changement de base

L'impédance des générateurs individuels et transformateurs, lorsqu'elles sont fournies par le fabricant, sont généralement en termes de pourcentage ou quantités per-unit basés sur leurs propres évaluations. Les impédances des lignes de transport sont généralement exprimées par leurs valeurs réelles (ohmiques).

Pour l'analyse des systèmes d'énergie, toutes les impédances doivent être exprimées en per-unit sur un système de base commun (unique). Pour accomplir ça, une base arbitraire pour la puissance apparente est sélectionnée ; par exemple 100 MVA, puis, les bases de tensions doivent être sélectionnées. Une fois une base de tension est sélectionnée pour un point dans le système, les bases de tension restantes, sont déterminées par les différents rapports de transformateurs.

Exemple : Si sur le côté BT d'un transformateur 34.5/115 kV, la base de tension de 36 kV est sélectionnée, la base de tension en côté HT est $36 \cdot (115/34.5) = 120$ kV. Normalement, nous essayons de sélectionner les tensions de base qui sont les mêmes que les valeurs nominales.

$$Z_{pu}^{(1)} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_B^{(1)}} = Z_{\Omega} \frac{S_B^{(1)}}{V_B^{(1)2}} \quad (5.32)$$

Exprimant Z_{Ω} à une nouvelle base de puissance et à une nouvelle base de tension, donne la nouvelle impédance per-unit :

$$Z_{pu}^{(2)} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_B^{(2)}} = Z_{\Omega} \frac{S_B^{(2)}}{V_B^{(2)2}} \quad (5.33)$$

À partir de (5.32) et (5.33), la relation entre les nouvelles et anciennes valeurs per-unit sont :

$$Z_{pu}^{(2)} = Z_{pu}^{(1)} \left(\frac{V_B^{(1)}}{V_B^{(2)}} \right)^2 \left(\frac{S_B^{(2)}}{S_B^{(1)}} \right) \quad (5.34)$$

Les avantages du système per-unit pour l'analyse sont décrites comme suit :

- Les valeurs per-unit des impédances, tensions et courant d'un transformateur sont les mêmes indépendamment si elles sont ramenées au primaire ou au secondaire. Ceci est un grand avantage puisque les différents niveaux de tension disparaissent et le système entier se réduit à un système à une seule impédance simple.
- Le système par unité est idéal pour calculer (analyser) et simuler des problèmes complexes de réseaux électriques.
- Les lois d'électricité sont valides en systèmes per-unit, et les équations de la puissance et de la tension comme données en (5.28) et (5.29) sont simplifiées puisque les facteurs de $\sqrt{3}$ et 3 sont éliminés dans le système per-unit.

CHAPITRE

6

CALCUL DES DEFAUTS SYMETRIQUES

6.1. Introduction

Jusqu'à présent, nous avons traité le comportement du système de puissance en régime permanent dans des conditions de fonctionnement normales. Ce chapitre est consacré au comportement anormal du système dans des conditions de court-circuit symétrique (défaut symétrique triphasé). De telles conditions sont provoquées dans le système accidentellement par une défaillance de l'isolation de l'équipement ou par le claquage des lignes déclenchées par une foudre ou par un fonctionnement accidentel défectueux. Le système doit être protégé contre les courants de court-circuit importants (qui peuvent causer des dommages permanents aux principaux équipements) en déconnectant la partie défectueuse du système au moyen de disjoncteurs actionnés par un relais de protection. Pour choisir correctement les disjoncteurs et les relais de protection, il faut estimer l'amplitude des courants qui circuleraient dans des conditions de court-circuit.

6.2. Les principaux défauts de court-circuit

Dans les installations électriques différents courts-circuits peuvent se produire.

6.2.1. Caractéristiques des courts-circuits

Ils sont principalement caractérisés par :

- leurs durées : fugitif ou permanent ;

Les défauts fugitifs disparaissent d'eux même après l'ouverture des disjoncteurs de protection et ne réapparaissent pas lors de la remise en service.

Les défauts permanents nécessitent la mise hors tension d'un câble, d'une machine... et l'intervention du personnel d'exploitation.

- leurs origines :

- mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux),
 - surtensions électriques d'origine interne ou atmosphérique,
 - ou à la suite d'une dégradation de l'isolement ;
 - une erreur d'exploitation, par exemple la mise à la terre d'une phase, un couplage entre deux sources de tension différentes ou des phases ou fausse manœuvre.
- leurs localisations : interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique.

Outre ces caractéristiques, les courts-circuits peuvent être :

- monophasés: 80 % des cas ;
- biphasés: 15 % des cas ;
- triphasés: 5 % seulement dès l'origine.

Ces différents courants de court-circuit sont présentés sur la figure (Figure.6.1).

6.2.2. Conséquences des défauts de court-circuit

Elles sont variables selon la nature et la durée des défauts, le point concerné de l'installation et l'intensité du courant :

- au point de défaut, la présence d'arcs de défaut, avec :
 - détérioration des isolants,
 - fusion des conducteurs,
 - incendie et danger pour les personnes ;
- pour le circuit défectueux : Les efforts électrodynamiques, avec :
 - déformation des JdB (jeux de barres),
 - arrachement des câbles ;
- sur-échauffement par augmentation des pertes joules, avec risque de détérioration des isolants ;
- les creux de tension pendant la durée d'élimination du défaut, de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes,
- la mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma et la sélectivité de ses protections,
- l'instabilité dynamique et/ou la perte de synchronisme des machines,
- les perturbations dans les circuits de contrôle et de commande.

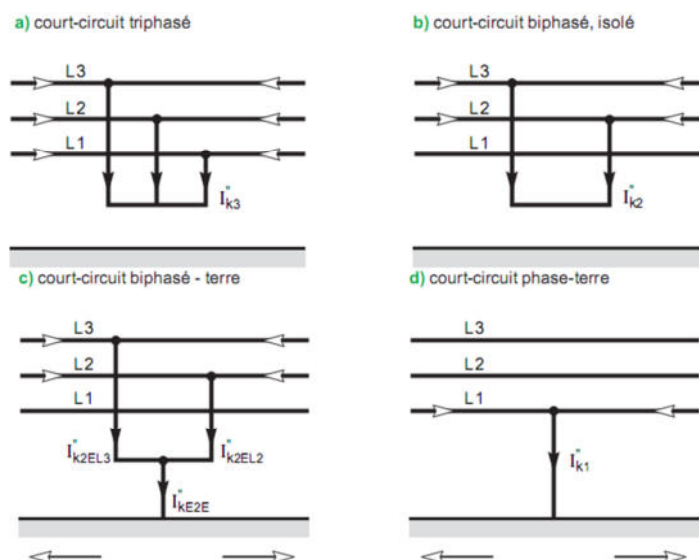


Figure.6.1. Les différents courts-circuits et leurs courants

La majorité des défauts du système ne sont pas des défauts triphasés, mais des défauts impliquant une ligne à la terre ou parfois deux lignes à la terre. Ce sont des défauts asymétriques nécessitant des outils spéciaux comme des composants symétriques et qui font l'objet d'études des deux chapitres suivants. Bien que les défauts symétriques soient rares, l'analyse symétrique des défauts doit être effectuée, car ce type de défaut conduit généralement au flux de courant de défaut le plus sévère contre lequel le système doit être protégé. L'analyse symétrique des défauts est, bien entendu, plus simple à réaliser.

6.3. Etablissement de l'intensité de court-circuit

Un réseau simplifié se réduit à une source de tension alternative constante, un interrupteur et une impédance Z_{cc} représentant toutes les impédances situées en amont de l'interrupteur, et une impédance de charge Z_s (Figure.6.2).

Dans la réalité, l'impédance de la source est composée de tout ce qui est en amont du court-circuit avec des réseaux de tensions différentes (HT, BT) et des canalisations en série qui ont des sections et des longueurs différentes.

Sur le schéma de la figure (Figure.6.2), l'interrupteur étant fermé, hors défaut l'intensité I_s du courant de service circule dans le réseau.

Un défaut d'impédance négligeable apparaissant entre les points A et B donne naissance à une intensité de court-circuit très élevée I_{cc} , limitée uniquement par l'impédance Z_{cc} .

L'intensité I_{cc} s'établit suivant un régime transitoire en fonction des réactances X et des résistances R composant l'impédance Z_{cc} :

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

En distribution de puissance, la réactance $X = L \omega$ est généralement bien plus élevée que la résistance R , et le rapport R / X se situe entre 0,1 et 0,3. Il est pratiquement égal pour ces faibles valeurs au $\cos(\varphi)$ (en court-circuit) soit :

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

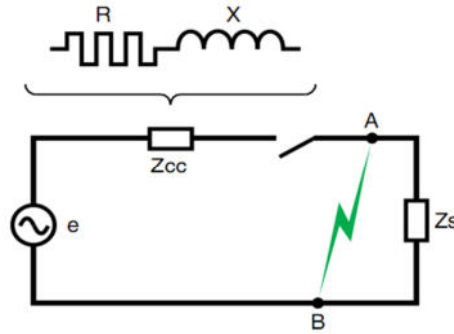


Figure.6.2. Schéma simplifié d'un réseau.

Cependant, le régime transitoire d'établissement du courant de court-circuit diffère suivant l'éloignement du point de défaut par rapport aux alternateurs. Cet éloignement n'implique pas nécessairement une distance géographique, mais cela indique que les impédances des alternateurs sont inférieures aux impédances de liaison entre ces derniers et le point de défaut.

6.3.1. Défaut éloigné des alternateurs

C'est le cas le plus fréquent. Le régime transitoire est alors celui résultant de l'application à un circuit self-résistance d'une tension : $e = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha)$

L'intensité i est alors la somme des deux composantes : $i = i_{CA} + i_{CC}$

- L'une (i_{CA}) est alternative et sinusoïdale : $i_{CA} = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$

Où $I = \frac{E}{Z_{CC}}$ (la valeur efficace du courant en régime établi)

α = angle électrique qui caractérise le décalage entre l'instant initial du défaut et l'origine de l'onde de tension.

- L'autre (i_{CC}) est une composante continue : $i_{CC} = -I\sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$

Sa valeur initiale dépend de α , et son amortissement est d'autant plus rapide que R / L est élevé.

A l'instant initial du court-circuit, i est nulle par définition (l'intensité de service I_s étant négligée), d'où : $i = i_{CA} + i_{CC} = 0$

La figure Figure.6.3 montre la construction graphique de courant i par l'addition algébrique des deux composantes i_{CA} et i_{CC}

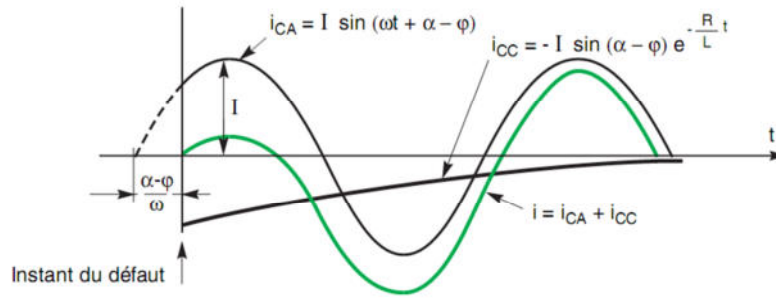


Figure.6.3. Présentation graphique et décomposition du courant d'un court-circuit s'établissant en un point éloigné d'un alternateur.

L'instant de l'apparition du défaut ou de fermeture par rapport à la valeur de la tension réseau étant caractérisé par son angle d'enclenchement α (apparition du défaut), la tension peut s'écrire :

$$U = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha) \tag{6.1}$$

L'évolution du courant de court-circuit est alors de la forme :

$$i = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{CC}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right] \tag{6.2}$$

avec ses deux composantes, l'une alternative et déphasée de φ par rapport à la tension, et l'autre continue tend vers 0 pour t tend vers l'infini.

D'où les deux cas extrêmes définis par :

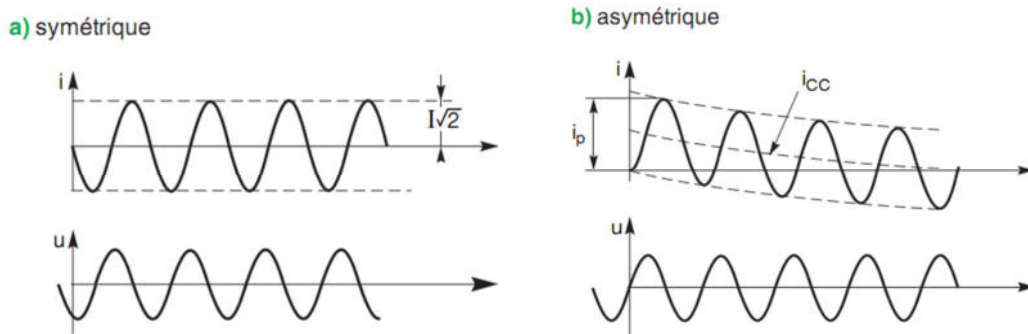


Figure.6.4. Présentation graphique des deux cas extrêmes d'un courant de court-circuit, symétrique et asymétrique

- $\alpha = \varphi$, dit « régime symétrique » (Figure.6.4.a)

Le courant de défaut est de la forme : $i = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{CC}} \sin(\omega t)$ qui, dès son début, a la même allure qu'en régime établi avec une valeur crête E / Z_{CC} .

- $\alpha = 0$, dit « régime asymétrique » (Figure.6.4.b)

Le courant de défaut est de la forme :

$$i = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{CC}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right] \tag{6.3}$$

Ainsi sa première valeur crête i_p est fonction de φ et donc du rapport $R / X \approx \cos \varphi$ du circuit.

Si $\alpha - \varphi = \frac{\pi}{2}$, la composante aperiodique est maximale, le régime est dit **asymétrique maximal** ;

c'est la condition qui entraîne la plus grande valeur du courant crête, on a alors :

$$i = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{CC}} \left[\sin\left(wt + \frac{\pi}{2} \right) - e^{-\frac{R}{X}wt} \right] \quad (6.4)$$

Le courant atteint la valeur crête maximale (1^{ère} crête) lorsque : $\sin\left(wt + \frac{\pi}{2} \right) = -1$ d'où $wt = \pi$

La valeur crête maximale du courant est donc :

$$\hat{i}_p = \frac{E\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \left[1 + e^{-\frac{R}{X}\pi} \right] \quad (6.5)$$

Définissons le coefficient K caractéristique du rapport entre la valeur crête maximale du courant transitoire et la valeur efficace du courant en régime établi : $\hat{i}_p = K$.

$$K = \sqrt{2} \left[1 + e^{-\frac{R}{X}\pi} \right] \quad (6.6)$$

6.3.2. Défaut à proximité des alternateurs

Lorsque le défaut se produit à proximité immédiate de l'alternateur alimentant le circuit concerné, la variation de l'impédance alors prépondérante de l'alternateur provoque un amortissement du courant de court-circuit. En effet, dans ce cas, le régime transitoire d'établissement du courant se trouve modifié par la variation de la f.e.m. (force électromotrice) résultant du court-circuit. Pour simplifier, on considère la f.e.m. constante, mais la réactance interne de la machine comme variable ; cette réactance évolue suivant les 3 stades :

- **subtransitoire** intervenant pendant les 10 à 20 premières millisecondes du défaut ;
- **transitoire** pouvant se prolonger jusqu'à 500 millisecondes ;
- puis... **permanent** ou réactance synchrone.

Notons que dans l'ordre indiqué, cette réactance prend à chaque stade une valeur plus élevée : la réactance subtransitoire est inférieure à la réactance transitoire elle-même inférieure à la réactance synchrone. Cette intervention successive des trois réactances entraîne une diminution progressive de l'intensité de court-circuit, qui est donc la somme de quatre composantes :

- les trois composantes alternatives (subtransitoire, transitoire et permanente) ;
- la composante continue qui résulte de l'établissement du courant dans le circuit (selfique) comme le montre en Figure.6.5.

- a) la réactance subtransitoire = X_d''
- b) la réactance transitoire = X_d'
- c) la réactance synchrone = X_d
- d) la composante continue.

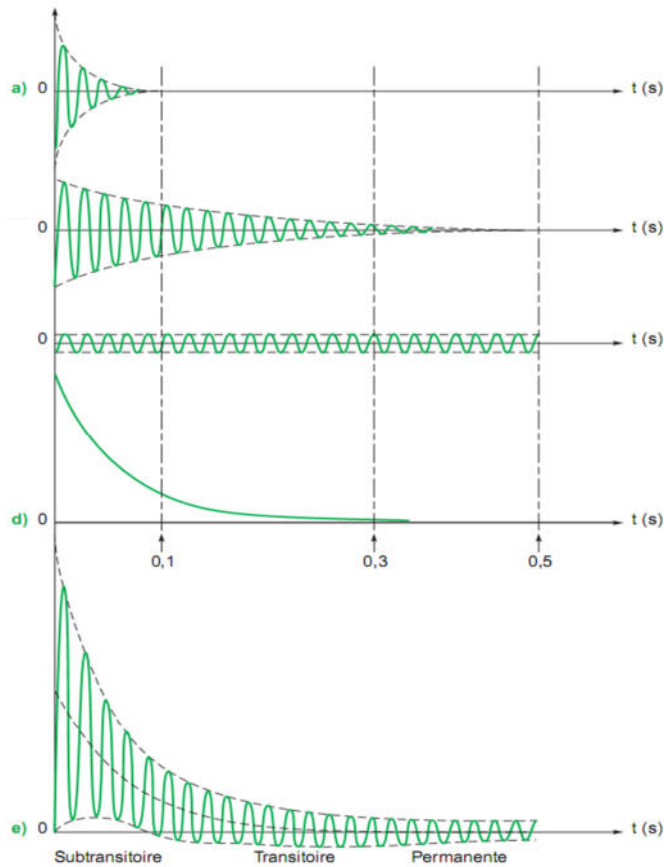


Figure.6.5. forme du courant total de court-circuit i_{cc}

Il y a lieu de noter la décroissance de la réactance de l'alternateur plus rapide que celle de la composante continue. Ce cas rare peut poser des problèmes de coupure et de saturation des circuits magnétiques car le courant ne passe pas au zéro avant plusieurs périodes.

Les calculs sur les régimes transitoires des machines synchrones montrent que l'expression du courant est :

$$i(t) = E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega t + \alpha) - \frac{E\sqrt{2}}{X_d''} e^{-t/T_a} \cos(\alpha) \tag{6.7}$$

α est l'angle d'enclenchement, il définit la phase de la tension à l'instant d'apparition du court-circuit.

Le courant $i(t)$ est maximal pour $\alpha = 0$, on a alors :

$$i(t) = E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega t) - \frac{E\sqrt{2}}{X_d''} e^{-t/T_a} \tag{6.8}$$

Avec :

E : tension simple efficace aux bornes de l'alternateur

X_d'' : réactance subtransitoire

$$X_d'' < X_d' < X_d$$

X_d' : réactance transitoire

X_d : réactance synchrone (permanente)

T''_d : constante de temps subtransitoire

T'_d : constante de temps transitoire

T_a : constante de temps apériodique

Le courant de court-circuit est donc la somme d'un courant sinusoïdal amorti et un courant apériodique :

Notez qu'à $t = 0$, lorsque le défaut se produit, la valeur efficace de $i(t)$ est :

$$I(0) = \frac{E}{X''_d} = I'' \quad (6.9)$$

Qui est appelé le courant de défaut efficace subtransitoire, I'' . La durée de I'' est déterminée par la constante de temps T''_d appelée constante de temps subtransitoire du court-circuit.

Plus tard, lorsque t est grand comparé à T''_d mais petit comparé à la constante de temps transitoire du court-circuit T'_d , le premier terme exponentiel de $i(t)$ a décru presque à zéro, mais la seconde exponentielle n'a pas décru considérablement. Le courant de défaut i efficace est alors égal au courant de défaut transitoire efficace, donné par :

$$I(t) = \frac{E}{X'_d} = I' \quad (6.10)$$

Lorsque t est beaucoup plus grand que T'_d , le courant de défaut efficace se rapproche de sa valeur en régime permanent, donnée par :

$$I(\infty) = \frac{E}{X_d} = I \quad (6.11)$$

Les réactances de la machine X''_d , X'_d et X_d ainsi que les constantes de temps T''_d ; T'_d sont généralement fournis par des fabricants de machines synchrones. Ils peuvent également être obtenus à partir d'un test de court-circuit triphasé, en analysant un oscillogramme tel que celui de la Figure.6.5.

6.4. Calcul du court-circuit par la théorie de Thévenin

Une autre méthode de calcul des courants de court-circuit est l'application du théorème de Thévenin. Cette méthode est plus rapide et facile à adopter pour le calcul systématique des grands réseaux.

Le théorème de Thevenin s'annonce comme suit : « un réseau constitué de sources (tensions et courants) et des impédances peut être remplacé aux bornes de n'importe qu'elle deux point $a - b$ par un simple réseau formé par une source de tension V_t en série avec une impédance Z_t .

- La tension de Thevenin V_t est la tension aux bornes $a - b$ quand le circuit est ouvert dans la branche $a - b$.

- L'impédance de Thevenin Z_t est l'impédance du réseau vue des points $a - b$ quand toutes les sources sont remplacées par leurs impédances internes.

Bien que la méthode soit parfaitement générale, elle est illustrée ici par un exemple simple.

6.4.1. Exemple :

La Figure.6.6 montre un diagramme unifilaire d'un système d'énergie à 3 bus (nœuds). Chaque générateur est représenté par la f.e.m avant la réactance transitoire. Toutes les impédances sont exprimées en pu sur une base commune de 100 MVA, et pour simplifications, les résistances sont négligées. Les simplifications suivantes sont faites :

- Les capacités shunt sont négligées et le système est considéré sans charge.
- Tous les générateurs sont en cours d'exécution à leurs tensions nominales et les fréquences nominales avec leurs f.e.m en phase.

Déterminer le courant de défaut, les tensions aux bus, et les courants de ligne durant le défaut, lorsque un défaut triphasé symétrique avec une impédance de défaut $Z_f = 0.16$ pu se produit au bus 3 puis au bus 2.

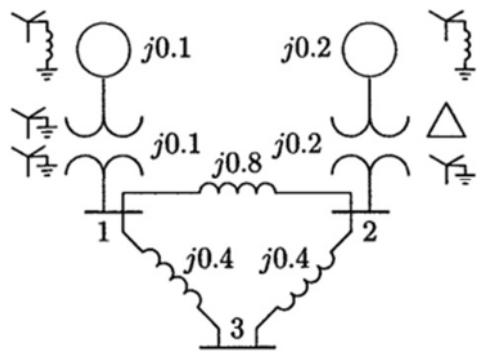


Figure.6.6. Diagramme du réseau à étudier.

Le théorème de Thévenin déclare que l'ajout de l'impédance de défaut Z_f (Figure.6.6.a) est équivalent à l'ajout d'un générateur de tension et les autres sont court-circuités (Figure.6.6.b).

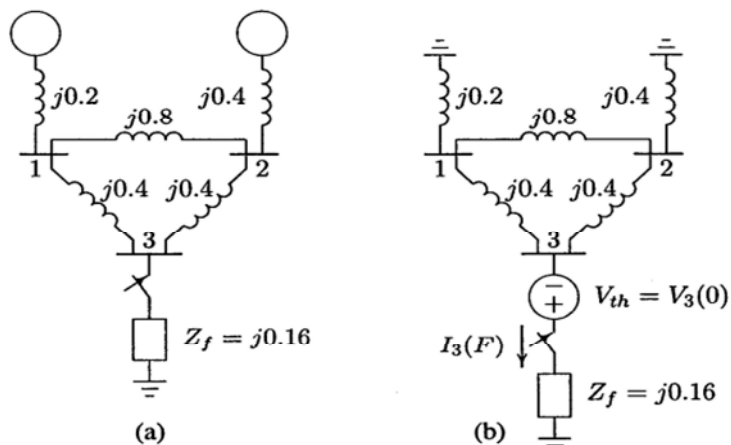


Figure.6.6. a. Réseau d'impédance pour un défaut au bus 3 ; b. Réseau équivalent de Thévenin.

➤ Défaut au nœud 3

Au bus 3, le courant de défaut est :

$$I_3(F) = \frac{V_3(0)}{Z_{33} + Z_f}$$

$V_3(0)$ est la tension de Thévenin ou la tension du bus 3 avant le défaut. Puisque les fem des générateurs sont considérées égales aux valeurs nominales 1.0pu donc :

$$V_1(0) = V_2(0) = V_3(0) = 1.0pu$$

Z_{33} est l'impédance de Thévenin vue à partir du bus en défaut.

Pour trouver l'impédance de Thévenin, nous convertissons les impédances Δ à des impédances Y équivalentes comme montrés en Figure.6.6.a :

$$Z_{1s} = Z_{2s} = \frac{(j0.4)(j0.8)}{j1.6} = j0.2 \qquad Z_{3s} = \frac{(j0.4)(j0.4)}{j1.6} = j0.1$$

En combinant les branches parallèles, l'impédance de thévenin est :

$$Z_{33} = \frac{(j0.4)(j0.6)}{j0.4 + j0.6} + j0.1 = j0.24 + j0.1 = j0.34$$

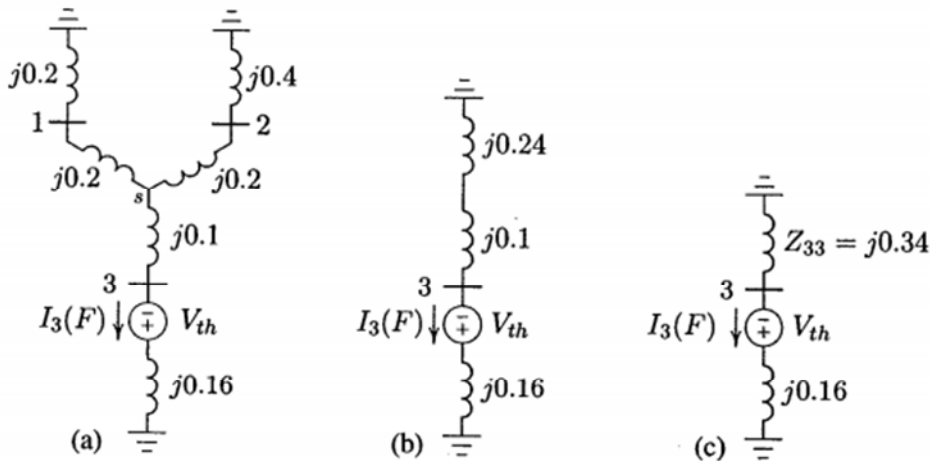


Figure.6.7. Réduction du réseau équivalent de Thévenin.

A partir de la Figure.6.7.c, le courant de défaut est : $I_3(F) = \frac{V_3(0)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.34 + j0.16} = -j2.0pu$

A partir de la Figure.6.7.a, les divisions du courant électrique entre les générateurs est :

$$I_{G1} = \frac{j0.6}{j0.4 + j0.6} I_3(F) = -j1.2pu \qquad I_{G2} = \frac{j0.4}{j0.4 + j0.6} I_3(F) = -j0.8pu$$

Pour les changements des tensions aux bus à partir de Figure.6.7.a, nous obtenons :

$$\Delta V_1 = 0 - (j0.2)(-j1.2) = -0.24pu$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j0.4)(-j0.8) = -0.32pu$$

$$\Delta V_3 = (j0.16)(-j2) - 1.0 = -0.68pu$$

Les tensions aux bus durant le défaut sont obtenues par superposition des tensions aux bus avant défaut et les changements des tensions aux bus causées par la f.e.m équivalente connectée au bus en défaut :

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.24 = 0.76 pu$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.32 = 0.68 pu$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.68 = 0.32 pu$$

Les courants de court-circuit dans les lignes sont :

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{z_{12}} = \frac{0.76 - 0.68}{j0.8} = -j0.1 pu$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.76 - 0.32}{j0.4} = -j1.1 pu$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{z_{23}} = \frac{0.68 - 0.32}{j0.4} = -j0.9 pu$$

➤ **Défaut au nœud 2**

Le défaut au bus 2 avec l'impédance Z_f est montré en Figure.6.8.a, et le réseau équivalent de Thévenin est montré en Figure.6.8.b.

L'impédance de Thévenin est donnée par :

$$Z_{22} = \frac{(j0.4)(j0.6)}{j0.4 + j0.6} = j0.24 pu$$

A partir de la Figure.8.9.b, le courant de défaut :

$$I_2 = \frac{V_2(F)}{Z_{22} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.24 + j0.16} = -j2.5 pu$$

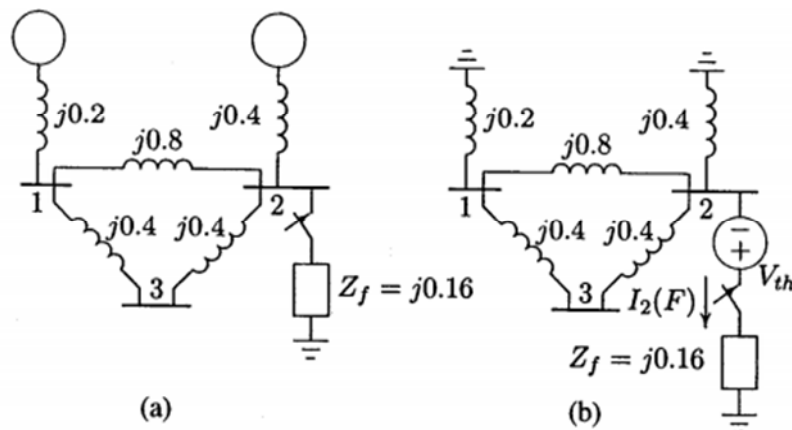


Figure.8. a. Réseau d'impédance pour un défaut au bus 2 ; b. Réseau équivalent de Thévenin.

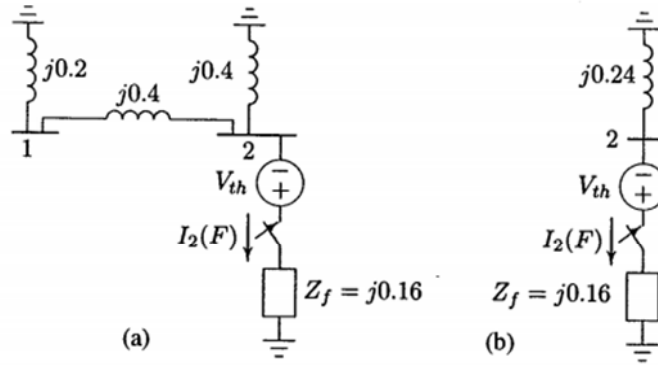


Figure.6.9. Réduction du réseau équivalent de Thévenin.

A partir de la Figure.6.9.a, les diviseurs entre les générateurs est :

$$I_{G1} = \frac{j0.4}{j0.4 + j0.6} I_2(F) = -j1.0 pu$$

$$I_{G2} = \frac{j0.6}{j0.4 + j0.6} I_2(F) = -j1.5 pu$$

Pour les changements des tensions aux bus à partir de la Figure.6.8.a, nous obtenons :

$$\Delta V_1 = 0 - (j0.2)(-j1.0) = -0.2 pu$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j0.4)(-j1.5) = -0.6 pu$$

$$\Delta V_3 = (-0.2) - (j0.4) \left(\frac{-j1.0}{2} \right) = -0.4 pu$$

Les tensions aux bus durant le défaut sont obtenues par superposition des tensions aux bus avant défaut et les changements dans les tensions aux bus causées par la f.e.m équivalente connectée au bus en défaut :

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.2 = 0.8 pu$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.6 = 0.4 pu$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.4 = 0.6 pu$$

Les courants de court-circuit dans les lignes sont :

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{z_{12}} = \frac{0.8 - 0.4}{j0.8} = -j0.5 pu$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.8 - 0.6}{j0.4} = -j0.5 pu$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{z_{23}} = \frac{0.6 - 0.4}{j0.4} = -j0.5 pu$$

Dans cet exemple, les courants de charge sont négligés et tous les tensions avant-défaut sont assumées égales à 1 pu. Pour un calcul exact, les tensions avant-défaut peuvent être obtenues par la solution du flux de puissance.

6.3.2 Puissance du court-circuit (Sélection du disjoncteur)

La puissance du court-circuit dans un bus est une mesure commune de la force d'un bus. La MVA du court-circuit est utilisée pour déterminer la dimension d'un jeu de barre, et la puissance (pouvoir) de coupure d'un disjoncteur. La puissance MVA de court-circuit dans un bus k est donnée par :

$$SCC = \sqrt{3}U_k I_k(F) \times 10^{-3} \text{ MVA} \quad (6.12)$$

Où U_k : Tension composée en [kV], $I_k(F)$ est le courant de défaut au bus (nœud) k en [A].

Le courant de défaut triphasé symétrique en per unit est donné par :

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{X_{kk}} \quad (6.13)$$

Où $V_k(0)$ est la tension du bus avant-défaut en pu, et X_{kk} est la réactance en pu au point de défaut. La résistance du système est négligée et seulement la réactance inductive du système est considérée. Cela donne une impédance du système minimale et un courant de défaut maximal.

Le courant de base est :

$$I_B = \frac{S_B \times 10^3}{\sqrt{3} V_B} \quad (6.14)$$

Où S_B est la MVA de base et V_B est la tension composée de base en kV. Le courant de défaut en [A] :

$$I_k(F) = I_k(F)_{pu} I_B = \frac{V_k(0)}{X_{kk}} \times \frac{S_B \times 10^3}{\sqrt{3} V_B} \quad (6.15)$$

Substituant $I_k(F)$ dans SCC nous avons :

$$SCC = \frac{V_k(0) S_B}{X_{kk}} \frac{V_k}{V_B} \quad (6.16)$$

Si la tension de base est égale à la tension nominale, $V_k = V_B$:

$$SCC = \frac{V_k(0) S_B}{X_{kk}} \quad (6.17)$$

La tension au bus avant-défaut est généralement assumée pour être égale à 1 pu, et donc nous obtenons :

$$SCC = \frac{S_B}{X_{kk}} \quad (6.17)$$

6.4. Analyse du défaut utilisant la matrice impédance bus

Jusqu'à présent, nous avons effectué des calculs de court-circuit pour des systèmes simples dont les réseaux passifs peuvent être facilement réduits. Dans cette section, nous étendons notre étude aux grands systèmes. Considérons un système à n bus représenté schématiquement sur la

Figure.6.10 fonctionnant à charge constante. La première étape vers le calcul de court-circuit consiste à obtenir des tensions de pré-défaut à tous les bus et tous les courants dans toutes les lignes grâce à une étude de flux de charge (écoulement de puissance). Indiquons le vecteur de tension des bus comme suit :

$$V_{bus}^0 = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ V_2(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} \tag{6.18}$$

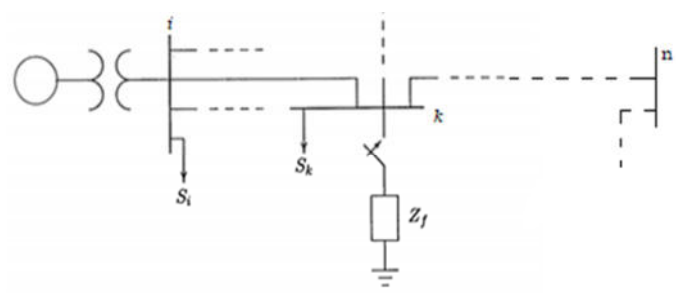


Figure.6.10. Système d'énergie à n bus.

Supposons que le bus k est en défaut à travers une impédance de défaut Z_f . C'est l'équivalent à la mise en série de deux sources de tension $V_k(0)$ et $-V_k(0)$ comme le montre la Figure.6.11.

D'après le théorème de superposition le courant et la tension aux tous points du réseau peuvent être calculé en deux étapes :

- Lorsque $-V_k(0)$ est en court-circuit ;
- Lorsque toutes les sources sont en court-circuitées sauf $-V_k(0)$;

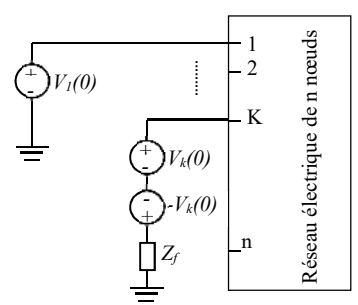


Figure.6.11. Réseau du système pour le calcul des changements de tensions de bus provoqués par le défaut.

Étape 1 :

Si en court-circuité la source $-V_k(0)$ et Z_f on aura la situation avant le défaut :

$$V_{bus}^0 = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ V_2(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \quad (6.20)$$

Étape 2 :

Lorsque toutes les sources sont en court-circuitées sauf la source $-V_k(0)$ qui est en série avec Z_f illustré à la figure 11 ;

Le vecteur ΔV_{bus} comprend les variations des tensions aux bus de ce réseau est donnée comme suit :

$$\Delta V_{bus} = Z_{bus} \times I_{bus}(F) \quad (6.21)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ Z_f I_k(F) - V_k(0) \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1k} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1} & \cdots & Z_{kk} & & Z_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nk} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

A partir de l'équation de tension ΔV_k en peut extraire le courant de défaut $I_k(F)$:

$$Z_f I_k(F) - V_k(0) = Z_{k1} I_1 + \dots + Z_{kk} (-I_k(F)) + \dots + Z_{kn} I_n = -(Z_{kk}) I_k(F) \quad (6.23)$$

Alors :

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (6.24)$$

Substituant $I_k(F)$ dans le vecteur ΔV_{bus} nous avons :

$$\Delta V_i = -Z_{ik} I_k(F) = -\frac{Z_{ik}}{Z_{kk} + Z_f} V_k(0) \quad (6.25)$$

Où ΔV_i : l'écart de tension au nœud i provoqué par le défaut.

Le vecteur de tension aux bus après défaut sera donné par :

$$V_{bus}^F = V_{bus}^0 + \Delta V_{bus} \quad (6.26)$$

Tel que :

$$V_i(F) = V_i(0) - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk} + Z_f} V_k(0) \quad (6.27)$$

Dans la relation ci-dessus, les tensions de bus avant-défaut $V_i(0)$ sont supposées être connues à partir d'une étude d'écoulement de puissance. La matrice Z_{bus} du réseau d'étude du court-circuit de la Figure.6.11 peut être obtenue par l'inversion de sa matrice Y_{bus} ou l'algorithme de construction Z_{bus} . Dans le réseau d'étude du défaut, les impédances de charge sont ignorées, celles-ci étant beaucoup plus grandes que les impédances des lignes et des générateurs. Bien entendu, les moteurs synchrones doivent être inclus dans la formulation de Z_{bus} pour l'étude du court-circuit. Les courants après-défauts dans les lignes entre les bus i et j sont donnés par :

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{Z_{ij}} \quad (6.28)$$

CHAPITRE

7

LES COMPOSANTES SYMETRIQUES

7.1. Introduction

Les différents types des défauts déséquilibrés sont le défaut d'une ligne à la terre, le défaut ligne à ligne et le double défaut ligne à la terre.

L'étude des défauts présentée au chapitre précédent n'a considéré que les défauts triphasés équilibrés, ce qui se prête à une approche simple par phase.

Dans ce chapitre, la méthode des composants symétriques est discutée. Elle est ensuite appliquée aux défauts déséquilibrés, qui permet encore une fois de traiter le problème sur une base simple par phase.

Il existe trois types des circuits triphasés déséquilibrés

1. Charge déséquilibrée : Il peut exister un court-circuit dans la charge, ou une mauvaise répartition des charges monophasées sur le réseau triphasé.
2. Source déséquilibrée : Court-circuit à la source ou dans un transformateur.
3. Combinaison de source et charge déséquilibrées : De façon pratique, on retrouve des charges déséquilibrées plus souvent que des sources déséquilibrées. On conçoit les sources pour qu'elles soient les plus équilibrées possibles.

7.2. Présentation de la méthode des composantes symétriques

La définition des composantes symétrique repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré et la somme de trois systèmes équilibrés, direct, inverse et homopolaire (Figure.7.1).

Il y a trois systèmes triphasés équilibrés séparés (pour une fréquence angulaire ω de donnée, de l'amplitude "A" et la phase φ). Ces systèmes appelés : « directe », « inverse » et « homopolaire ».

En adoptant la représentation de Fresnel (vecteur), ces systèmes sont représentés par les formules ci-dessous :

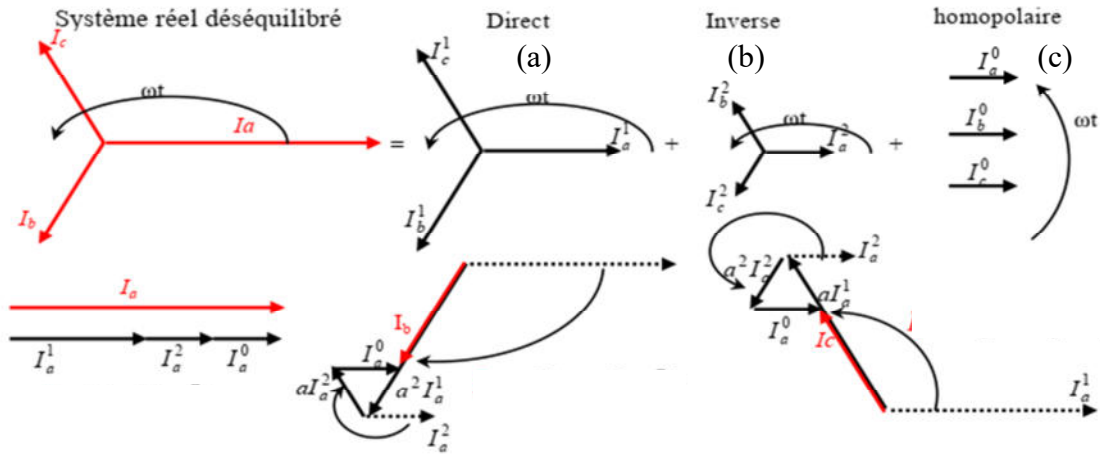


Figure.7.1. Représentation des composantes symétriques.

Par convention, la direction de rotation des phases est prise pour être en sens anti-horaire. Les trois phases sont écrites comme :

$$\begin{aligned} I_a^1 &= I_a^1 \angle 0^\circ = I_a^1 \\ I_b^1 &= I_a^1 \angle 240^\circ = a^2 I_a^1 \\ I_c^1 &= I_a^1 \angle 120^\circ = a I_a^1 \end{aligned} \quad (7.1)$$

Où nous avons défini un opérateur qui cause une rotation anti-horaire de 120°, tel que :

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.87 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.87 \\ a^3 &= 1 \angle 360^\circ = 1 + j0 \end{aligned} \quad (7.2)$$

Donc :

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (7.3)$$

L'ordre des phases est *abc*. Ceci est désigné par la séquence de phase positive (direct). Lorsque l'ordre est *acb* comme en Figure.7.1 (b), il est désigné par la séquence de phase négative (inverse), où :

$$\begin{aligned} I_a^2 &= I_a^2 \angle 0^\circ = I_a^2 \\ I_b^2 &= I_a^2 \angle 120^\circ = a I_a^2 \\ I_c^2 &= I_a^2 \angle 240^\circ = a^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (7.4)$$

En analysant certains types des défauts déséquilibrés, on constatera qu'un troisième groupe de phase doit être introduit, appelé séquence de phase zéro (homopolaire) et qui sont en phase et égales en amplitudes comme montré en Figure.7.1. (c) :

$$I_a^0 = I_b^0 = I_c^0 \quad (7.5)$$

Considérant les courants triphasés déséquilibrés I_a, I_b et I_c montré en Figure.7.1. Nous cherchons à trouver les trois composantes symétriques du courant tel que :

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ I_b &= I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 \\ I_c &= I_c^0 + I_c^1 + I_c^2 \end{aligned} \quad (7.6)$$

D'après la définition des composantes symétriques, on peut réécrire l'équation (7.6) comme suit :

$$\begin{aligned}
I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\
I_b &= I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 \\
I_c &= I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2
\end{aligned} \tag{7.7}$$

Nous réécrivons l'équation ci-dessus en notation matricielle comme :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \tag{7.8}$$

Ou en notation compacte :

$$I^{abc} = A I_a^{012} \tag{7.9}$$

Où :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{7.10}$$

A : est appelée la matrice de transformation des composantes symétriques.

En résolvant ce système matriciel pour les composantes symétriques des courants, nous avons :

$$I_a^{012} = A^{-1} I_a^{abc} \tag{7.11}$$

Avec :

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \tag{7.12}$$

De l'équation 7.10 et 7.12, nous concluons que :

$$A^{-1} = \frac{1}{3} A^* \tag{7.13}$$

En remplaçant A^{-1} dans l'équation 11, nous avons

Alors :

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \tag{7.14}$$

Ou en forme de composante, les composantes symétriques sont :

$$\begin{aligned}
I_a^0 &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\
I_a^1 &= \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \\
I_a^2 &= \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)
\end{aligned} \tag{7.15}$$

A partir de l'équation (7.15), on remarque que la composante homopolaire du courant est égale à un tiers de la somme des courants de phase. Par conséquent, lorsque la somme des courants de phase est nulle, par exemple dans un système triphasé avec neutre non mis à la terre, le courant homopolaire ne peut pas exister. Si le neutre du système électrique est mis à la terre, un courant homopolaire circule entre le neutre et la terre.

Les expressions sont similaires pour les tensions de phase déséquilibrées :

$$\begin{aligned}
V_a &= V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 \\
V_b &= V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 \\
V_c &= V_a^0 + a V_a^1 + a^2 V_a^2
\end{aligned} \tag{7.16}$$

Ou en notation compacte :

$$V^{abc} = A V_a^{012} \tag{7.17}$$

Les composantes symétriques en termes de tensions déséquilibrées sont :

$$\begin{aligned}
V_a^0 &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\
V_a^1 &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\
V_a^2 &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)
\end{aligned} \tag{7.18}$$

Sous une forme compacte :

$$V_a^{012} = A^{-1} V^{abc} \tag{7.19}$$

La puissance apparente peut aussi être exprimée en termes des composantes symétriques :

$$S_{3\Phi} = V^{abcT} I^{abc*} \tag{7.20}$$

En substituant les équations (7.9) et (7.17) dans (7.20), on obtient

$$\begin{aligned}
S_{3\Phi} &= (A V_a^{012})^T (A I_a^{012})^* \\
&= V_a^{012T} A^T A^* I_a^{012*}
\end{aligned} \tag{7.21}$$

Depuis $A^T = A$, puis à partir de l'équation (7.13), $A^T A^* = 3$, et la puissance complexe devient :

$$\begin{aligned}
S_{3\Phi} &= 3(V_a^{012})^T (I_a^{012})^* \\
&= 3V_a^0 I_a^{0*} + 3V_a^1 I_a^{1*} + 3V_a^2 I_a^{2*}
\end{aligned} \tag{7.22}$$

La puissance totale déséquilibrée peut être obtenue à partir de la somme des puissances en composantes symétriques.

7.3. Impédances de séquence

Dans cette section, nous allons noter Z^1 l'impédance de séquence directe (positive), Z^2 l'impédance de séquence inverse (négative), et Z^0 l'impédance de séquence homopolaire (zéro)

7.3.1 Impédances de séquence des charges connectées en Y

La Figure.7.2 montre une Charge triphasée équilibrée connectée en Y. Le neutre est enterré à travers une impédance Z_n

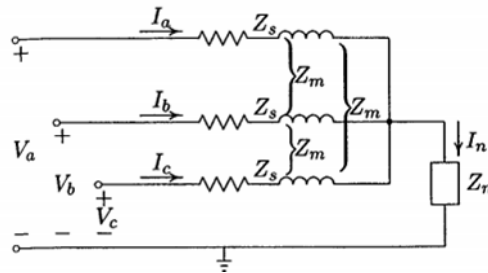


Figure.7.2. Charge équilibrée connectée en Y

Les tensions simples (ligne-sol) sont :

$$\begin{aligned}
V_a &= Z_s I_a + Z_m I_b + Z_m I_c + Z_n I_n \\
V_b &= Z_m I_a + Z_s I_b + Z_m I_c + Z_n I_n \\
V_c &= Z_m I_a + Z_m I_b + Z_s I_c + Z_n I_n
\end{aligned} \tag{7.23}$$

D'après la loi de Kirchhoff KCL, nous avons

$$I_a + I_b + I_c = I_n \tag{7.24}$$

En substituant l'équation (7.24) dans (7.23), et en réécrivant les équations des tensions sous forme matricielle, donc :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

Ou sous forme compacte :

$$V^{abc} = Z^{abc} I^{abc} \quad (7.26)$$

Où :

$$Z^{abc} = \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \quad (7.27)$$

En écrivant V^{abc} et I^{abc} en termes de leurs composantes symétriques, nous obtenons :

$$A V_a^{012} = Z^{abc} A I_a^{012} \quad (7.28)$$

En multipliant l'équation (7.28) par A^{-1} , nous avons :

$$\begin{aligned} V_a^{012} &= A^{-1} Z^{abc} A I_a^{012} \\ &= Z^{012} I_a^{012} \end{aligned} \quad (7.29)$$

Où :

$$Z^{012} = A^{-1} Z^{abc} A \quad (7.30)$$

On trouve :

$$Z^{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (7.31)$$

Après le calcul : $Z^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix}$ (7.32)

Lorsqu'il n'y a pas de couplage mutuel, nous mettons $Z_m = 0$ et Z^{012} devient :

$$Z^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \quad (7.33)$$

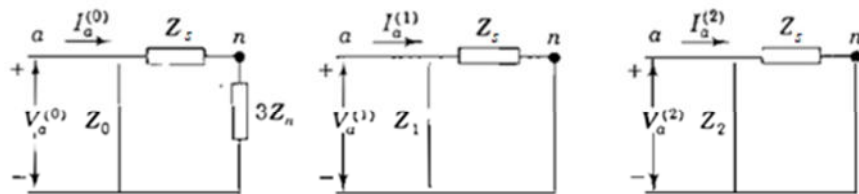


Figure.7.3. Circuits équivalent pour les séquences zéro, direct et inverse

7.3.2 Impédance de séquence des lignes de transmission

La figure.7.4 représente les impédances séries d'une ligne électrique triphasée, prises entre deux points, les impédances propres de chaque phase sont désignées Z_s , avec une impédance mutuelle Z_m :

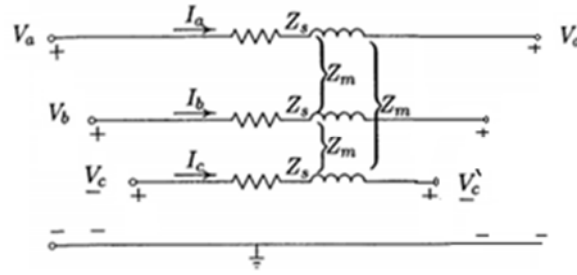


Figure.7.4. Schéma des impédances d'une ligne triphasé

Les chutes de tension aux bornes de ces impédances sont données par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_a - V'_a \\ V_b - V'_b \\ V_c - V'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

L'équation ci-dessus est transformée en équation de séquences de la même manière que précédemment. Nous obtenons alors :

$$\begin{bmatrix} V_a^0 - V_a^{0'} \\ V_a^1 - V_a^{1'} \\ V_a^2 - V_a^{2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (7.36)$$

Ces trois expressions sont représentées par les schémas équivalents monophasés suivants :

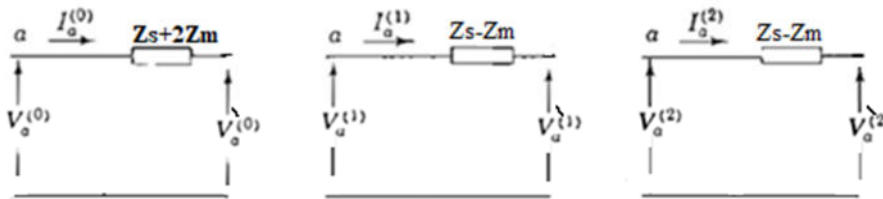


Figure.7.5 schéma monophasés équivalents des séquences des impédances de ligne

7.3.3. Impédance de séquence du transformateur

Dans les transformateurs de puissance, les pertes du noyau et le courant magnétisant sont de l'ordre de 1% des valeurs nominales et par conséquent la branche magnétisante est négligée. Le transformateur est modélisé avec l'impédance équivalente série de fuite. Le transformateur est un dispositif statique et si la séquence de phase est changée, l'impédance de fuite ne va pas changer. Cependant, les impédances direct, inverse, et homopolaire sont les mêmes et égales à l'impédance de fuite du transformateur : $Z^1 = Z^2 = Z^0 = X_f$.

Le circuit équivalent pour l'impédance homopolaire dépend de la connexion d'enroulement et aussi sur si ou non les neutres sont mis à la terre.

La Figure.7.5 montre quelques configurations communes du transformateur et leurs circuits équivalents homopolaires :

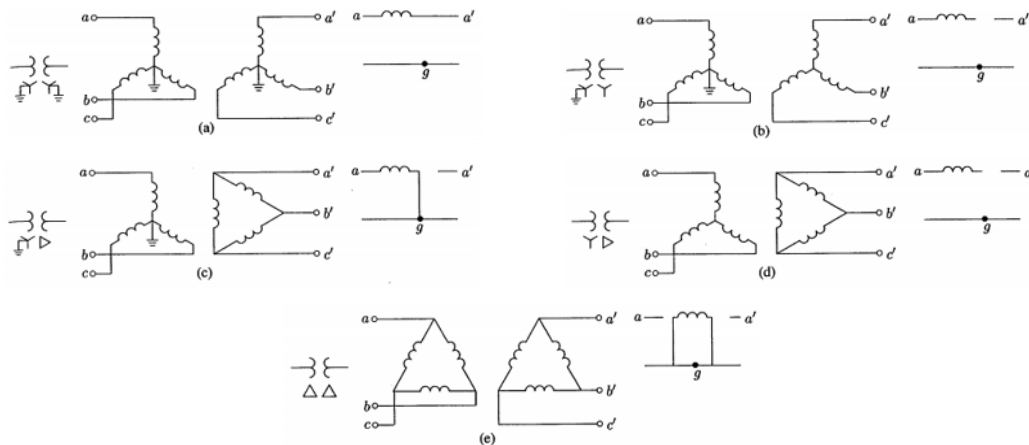


Figure.7.5. Circuit équivalent homopolaire du transformateur.

- Connexion Y-Y : Les deux neutres sont mis à la terre et il y a un chemin pour le courant homopolaire à circuler dans le primaire et le secondaire et le transformateur montre l'impédance équivalente de fuite par phase comme illustré en Figure.7.5(a).
- Connexion Y-Y : Le neutre primaire est mis à la terre et le neutre secondaire est isolé. Le courant homopolaire dans le secondaire est nul. Par conséquent, le courant homopolaire dans le primaire est nul reflétant une impédance infinie ou un circuit ouvert comme montré en Figure.7.5(b).
- Connexion Y- Δ : Le neutre est mis à la terre. Le courant primaire peut circuler parce qu'il y a circulation du courant homopolaire dans le secondaire connecté en Δ et un chemin de retour par le sol pour le primaire connecté en Y. Aussi, noter qu'aucun courant homopolaire ne peut quitter les bornes Δ , donc, il y a une isolation entre le primaire et le secondaire comme montré en Figure.7.5(c).
- Connexion Y- Δ : Le neutre est isolé. Comme le neutre est isolé, le courant homopolaire ne peut pas circuler. Figure.7.5(d) donne le circuit équivalent homopolaire de la connexion.
- Connexion Δ - Δ : Le courant homopolaire circule dans les enroulements connectés en Δ , mais aucun courant ne peut quitter les bornes Δ , et le circuit équivalent est donné en Figure.7.5(e).

7.4. Réseaux de séquence d'une machine synchrone (générateur) chargée

La Figure.7.6 montre une machine synchrone avec un neutre mis à la terre à travers une impédance Z_n . La machine alimente une charge triphasée équilibrée.

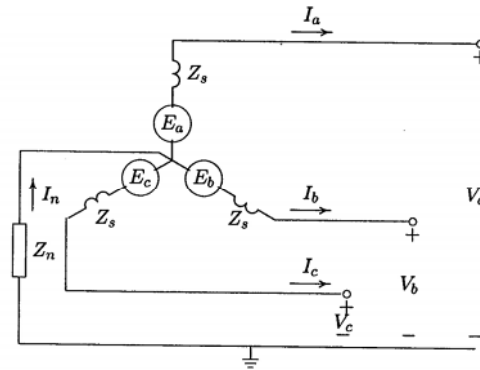


Figure.7.6. Machine synchrone triphasée alimentant une charge triphasée équilibrée.

La machine synchrone génère des tensions triphasées internes et est représentée comme un ensemble à séquence positive (direct) de phaseurs :

$$E^{abc} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} E_a \quad (7.37)$$

En appliquant les lois de Kirchoff en tension à chaque phase, nous obtenons :

$$\begin{aligned} V_a &= E_a - Z_s I_a - Z_n I_n \\ V_b &= E_b - Z_s I_b - Z_n I_n \\ V_c &= E_c - Z_s I_c - Z_n I_n \end{aligned} \quad (7.38)$$

Substituant pour $I_n = I_a + I_b + I_c$, nous obtenons sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7.39)$$

Ou sous forme compacte :

$$V^{abc} = E^{abc} - Z^{abc} I^{abc} \quad (7.40)$$

Transformant les tensions terminales et les courants de phase à leurs composantes symétriques :

$$A V_a^{012} = A E_a^{012} - Z^{abc} A I_a^{012} \quad (7.40)$$

En multipliant par A^{-1} les deux membres de l'équation (7.40), nous avons :

$$\begin{aligned} V_a^{012} &= E_a^{012} - A^{-1} Z^{abc} A I_a^{012} \\ &= E_a^{012} - Z^{012} I_a^{012} \end{aligned} \quad (7.41)$$

Où :

$$Z^{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (7.42)$$

Ce qui donne :

$$Z^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \quad (7.43)$$

Puisque la fem générée est équilibrée, il y a seulement une tension à séquence positive (directe) :

$$E^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.44)$$

Substituant pour Z^{012} et E^{012} dans l'équation (7.41), nous avons :

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (7.45)$$

En écrivant en forme de composantes :

$$\begin{aligned} V_a^0 &= 0 - Z^0 I_a^0 \\ V_a^1 &= E_a - Z^1 I_a^1 \\ V_a^2 &= 0 - Z^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (7.46)$$

Ces trois équations peuvent être représentées par les réseaux de séquence équivalents en Figure.7.7.

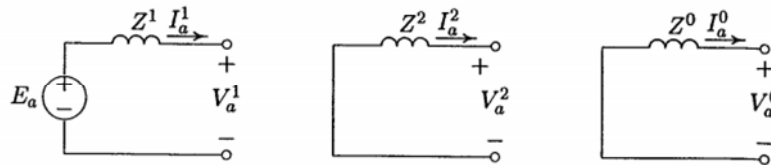


Figure.7.7. Réseaux de séquence : (a) directe ; (b) inverse ; (c) homopolaire

Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- 1- Les trois réseaux de séquence sont indépendants.
- 2- Le neutre du système est la référence pour les réseaux de séquences directe et inverse mais le sol est la référence pour le réseau homopolaire. Cependant, le courant homopolaire ne peut circuler que si le circuit est complété du neutre à la terre dans le système.
- 3- Il n'y a pas de source de tension dans les réseaux de séquences inverse et homopolaire. Seulement le réseau de séquence directe a une source de tension.
- 4- L'impédance de mise à la terre est reflétée dans le réseau homopolaire comme $3Z_n$
- 5- Les trois systèmes de séquence peuvent être résolus séparément sur une base par phase. Les courants et tensions de phase peuvent être ensuite déterminés par superposition de leurs composantes symétriques des courants et tensions respectivement.

CHAPITRE

8

CALCUL DES DEFAUTS ASYMETRIQUES

8.1. Introduction

Le chapitre 6 était consacré au traitement des défauts symétriques (triphases) dans un réseau électrique. Puisque le système reste équilibré pendant de tels défauts, l'analyse est effectuée facilement dans une base monophasée. Dans ce chapitre, nous traiterons des défauts asymétriques. Les différents types de défauts asymétriques qui se produisent dans les réseaux d'alimentation sont des défauts phase terre, phase-phase, biphasé-terre.

La méthode des composantes symétriques détaillée dans le chapitre précédant est un outil robuste pour le calcul des défauts asymétriques et elle sera appliquée dans ce chapitre.

8.2. Calcul des défauts asymétriques

8.2.1. Défaut phase-terre

La Figure.8.1 montre un générateur triphasé avec le neutre mis à la terre à travers l'impédance Z_n

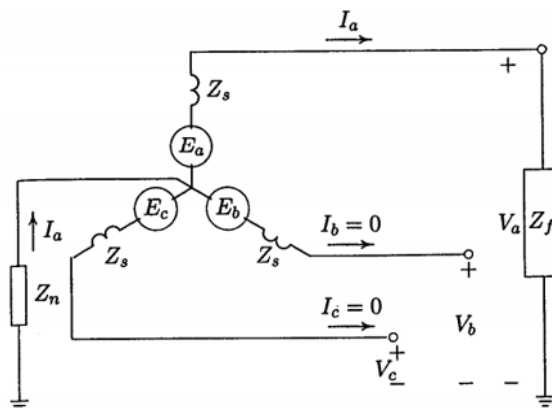


Figure.8.1. Défaut phase terre

Supposant un défaut ligne-terre se produit sur la phase (a) à travers l'impédance Z_f

Assumant que le générateur est à vide, les conditions aux limites au point du défaut sont :

$$V_a = Z_f I_a \quad (8.1)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (8.2)$$

Substituant pour $I_b = I_c = 0$, les composantes symétriques des courants deviennent :

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

De l'équation ci-dessus, nous trouvons que :

$$I_a^0 = I_a^1 = I_a^2 = \frac{1}{3} I_a \quad (8.4)$$

La tension de la phase (a) en termes des composantes symétriques est :

$$V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 \quad (8.5)$$

Dans le chapitre 7 nous avons trouvé :

$$\begin{aligned} V_a^0 &= 0 - Z^0 I_a^0 \\ V_a^1 &= E_a - Z^1 I_a^1 \\ V_a^2 &= 0 - Z^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (8.6)$$

Substituant pour V_a^0, V_a^1 et V_a^2 et notant que $I_a^0 = I_a^1 = I_a^2$, nous avons :

$$V_a = E_a - (Z^0 + Z^1 + Z^2) I_a^0 \quad (8.7)$$

Substituant pour V_a à partir de l'équation (8.1), et notant que $I_a = 3I_a^0$, nous obtenons :

$$3Z_f I_a^0 = E_a - (Z^0 + Z^1 + Z^2) I_a^0 \quad (8.8)$$

Ou :

$$I_a^0 = \frac{E_a}{Z^0 + Z^1 + Z^2 + 3Z_f} \quad (8.9)$$

Donc le courant de défaut est :

$$I_a = 3I_a^0 = \frac{3E_a}{Z^0 + Z^1 + Z^2 + 3Z_f} \quad (8.10)$$

Substituant pour les composantes symétriques des courants dans l'équation (8.6), les composantes symétriques de la tension et les tensions de phase au point du défaut sont obtenues.

Les équations (8.4) et (8.9) peuvent être représentées en connectant les réseaux de séquences en série comme montré dans le circuit équivalent de la Figure.8.2. Donc, pour le défaut phase-terre, l'impédance de Thévenin au point du défaut est obtenue pour chaque réseau de séquence, et les trois réseaux de séquences sont placés en séries. Dans plusieurs applications pratiques, les impédances directes et inverses sont égales. Si le neutre du générateur est directement mis à la terre, $Z_n = 0$ et pour les défauts direct (franc) $Z_f = 0$.

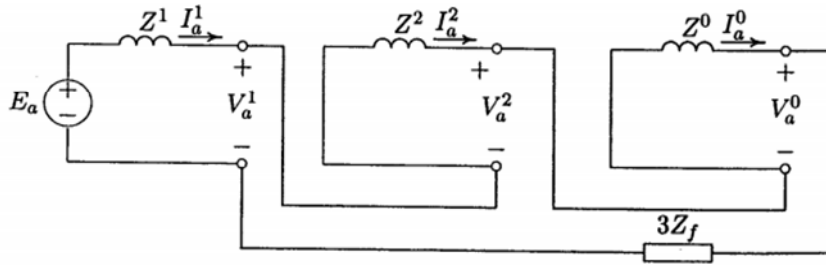


Figure.8.2. Connexion du réseau de séquence pour le défaut phase-terre

8.2.2. Défaut phase-phase

La Figure.8.3 montre un générateur triphasé avec un défaut entre phases (b) et (c) à travers l'impédance Z_f

D'après la Figure.8.3, le générateur est à vide, et les conditions aux limites au point du défaut sont :

$$V_b - V_c = Z_f I_b \tag{8.11}$$

$$I_b + I_c = 0 \tag{8.12}$$

$$I_a = 0 \tag{8.13}$$

Substituant pour $I_a = 0$ et $I_b = -I_c$, les composantes symétriques du courant sont :

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \tag{8.14}$$

De l'équation ci-dessus, nous trouvons que

$$I_a^0 = 0 \tag{8.15}$$

$$I_a^1 = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \tag{8.16}$$

$$I_a^2 = \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \tag{8.17}$$

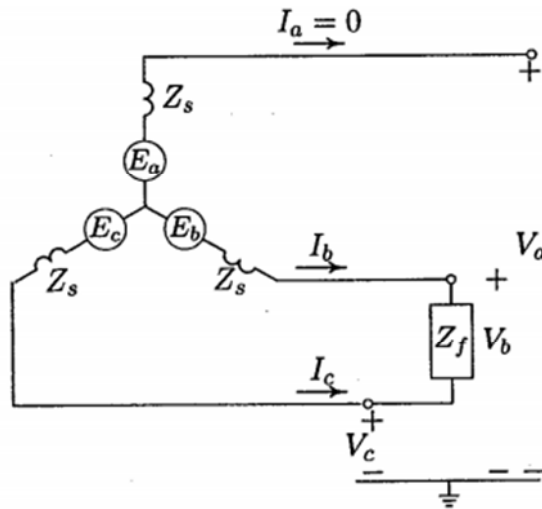


Figure.8.3. Défaut entre phase (b) et (c)

à partir des expressions des équations (8.16) et (8.17), nous remarquons que :

$$I_a^1 = -I_a^2 \quad (8.18)$$

Nous avons aussi :

$$\begin{aligned} V_b - V_c &= (a^2 - a)(V_a^1 - V_a^2) \\ &= Z_f I_b \end{aligned} \quad (8.19)$$

Substituant pour V_a^1 et V_a^2 à partir de l'équation (8.6) et notant que $I_a^2 = -I_a^1$, nous avons :

$$(a^2 - a)[E_a - (Z^1 + Z^2)I_a^1] = Z_f I_b \quad (8.20)$$

Substituant pour I_b à partir de l'équation (8.16), nous obtenons :

$$E_a - (Z^1 + Z^2)I_a^1 = Z_f \frac{3I_a^1}{(a - a^2)(a^2 - a)} \quad (8.21)$$

Puisque $(a - a^2)(a^2 - a) = 3$, donc :

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + Z^2 + Z_f} \quad (8.22)$$

Les courants de phase sont :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_a^1 \\ -I_a^1 \end{bmatrix} \quad (8.23)$$

Le courant de défaut est :

$$I_b = -I_c = (a^2 - a)I_a^1 \quad (8.24)$$

Ou :

$$I_b = -j\sqrt{3}I_a^1 \quad (8.25)$$

En substituant pour les composantes symétriques des courants dans l'équation (8.6), les composantes symétriques de la tension et les tensions de phase au point du défaut sont obtenues.

Les équations (8.18) et (8.22) peuvent être représentées en connectant les réseaux de séquence directe et inverse en opposition comme montré en Figure.8.4. Dans plusieurs applications pratiques, les impédances directe et inverse, sont obtenues égales. Pour un défaut franc, $Z_f = 0$.

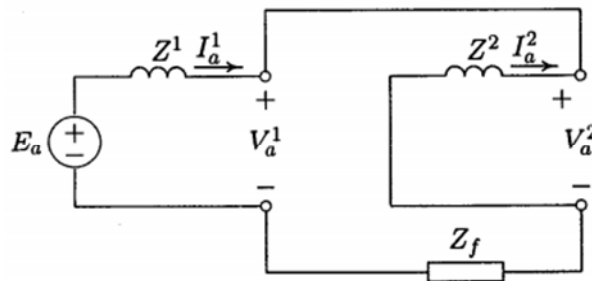


Figure.8.4. Connexion du réseau de séquence pour le défaut biphase.

8.2.3. Défaut biphasé terre

La Figure.8.5 montre un générateur triphasé avec un défaut sur les phases (b) et (c) à travers l'impédance Z_f à la terre.

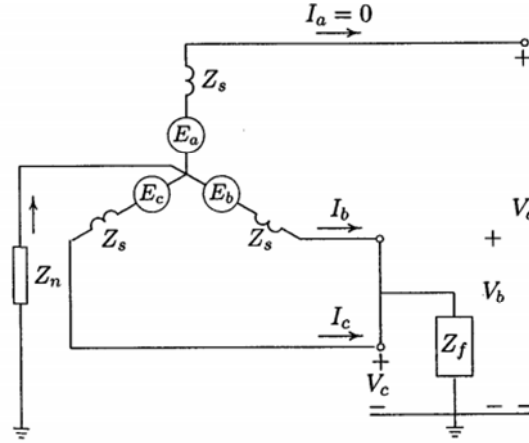


Figure.8.5. Défaut biphasé-terre

D'après la Figure.8.5, le générateur est à vide, et les conditions aux limites au point du défaut sont :

$$V_b = V_c = Z_f I_f = Z_f (I_b + I_c) \quad (8.26)$$

$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 = 0 \quad (8.27)$$

Les tensions V_b et V_c en fonction des composantes symétriques sont :

$$V_b = V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 \quad (8.28)$$

$$V_c = V_a^0 + a V_a^1 + a^2 V_a^2 \quad (8.29)$$

Puisque $V_b = V_c$, nous notons que :

$$V_a^1 = -V_a^2 \quad (8.30)$$

Substituant pour les composantes symétriques des courants dans l'équation (8.26), nous obtenons :

$$\begin{aligned} V_b &= Z_f (I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 + I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2) \\ &= Z_f (2I_a^0 - I_a^1 - I_a^2) \\ &= Z_f I_a^0 \end{aligned} \quad (8.31)$$

Substituant expression (8.31) et (8.30) dans (8.28), nous obtenons :

$$\begin{aligned} 3Z_f I_a^0 &= V_a^0 + (a^2 + a)V_a^1 \\ &= V_a^0 - V_a^1 \end{aligned} \quad (8.32)$$

En substituant pour les composantes symétriques de la tension de l'équation (8.6) : dans (8.32), on trouve :

$$I_a^0 = -\frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^0 + 3Z_f} \quad (8.33)$$

Aussi, substituant pour les composantes symétriques de la tension de l'équation (8.6) dans (8.30), nous obtenons :

$$I_a^2 = -\frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^2} \quad (8.34)$$

Substituant pour I_a^0 et I_a^2 dans (8.27), et résolvant pour I_a^1 , nous avons :

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + \frac{Z^2(Z^0 + 3Z_f)}{Z^2 + Z^0 + 3Z_f}} \quad (8.35)$$

Les équations de I_a^0 , I_a^1 , et I_a^2 peuvent être représentées en connectant l'impédance de séquencedirecte en série avec la combinaison parallèle des réseaux de séquences inverse et homopolaire comme montré en Figure.8.6. Pour trouver les valeurs de I_a^0 et I_a^2 , on substitue la valeur de I_a^1 dans leur expression. Les courants de phase sont ensuite trouvés. Finalement, le courant de défaut est obtenu à partir :

$$I_f = I_b + I_c = 3I_a^0 \quad (8.36)$$

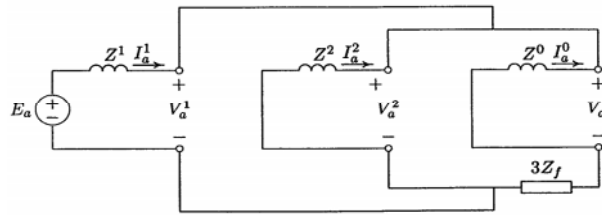


Figure.8.6. Connexion du réseau de séquence pour le défaut biphasé-terre

8.3. Calcul des défauts asymétriques par la matrice Z_{bus}

La méthode de l'analyse des défauts par l'impédance bus, donnée dans le chapitre 6 pour les défauts symétriques, peut être facilement étendue pour le cas des défauts asymétriques. Nous avons vu que lorsque le réseau est équilibré, les impédances des composantes symétriques sont diagonales, donc, il est possible de calculer Z_{bus} séparément pour les réseaux de séquences directe, inverse, et homopolaire. Aussi. Nous avons remarqué que pour un défaut au bus k, l'élément diagonal dans l'axe k de la matrice Z_{bus} est l'impédance de Thévenin au point de défaut. Dans le but d'obtenir une solution pour les défauts déséquilibrés, la matrice Z_{bus} pour chaque réseau de séquence est obtenue séparément, puis les impédances de séquence Z_{kk}^0 , Z_{kk}^1 et Z_{kk}^2 sont connectées ensemble comme montré en Figures 8.2, 8.4, 8.6.

8.3.1. Défaut phase-terre utilisant Z_{bus}

Considérons un défaut entre la phase (a) et la terre à travers l'impédance Z_f au bus k comme montré en Figure.8.7. Le défaut Ligne-Terre nécessite que les réseaux de séquence direct, inverse, et homopolaire pour la phase (a) soit placés en série dont le but de calculer le courant de

défaut homopolaire comme donné en équation (8.9). Donc, en général, pour un défaut au bus k, les composantes symétriques du courant de défaut sont :

$$I_k^0 = I_k^1 = I_k^2 = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + 3Z_f} \quad (8.37)$$

Où Z_{kk}^0 , Z_{kk}^1 et Z_{kk}^2 sont les éléments diagonaux dans le bus k de la matrice correspondante Z_{bus} et $V(0)$ est la tension avant-défaut au bus k. Le courant de défaut de phase est :

$$I_k^{abc} = AI_k^{012} \quad (8.38)$$

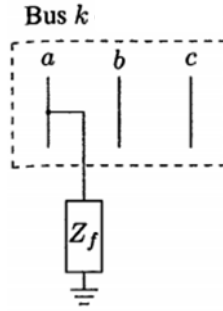


Figure.8.7. Défaut phase-terre au bus k.

8.3.2. Défaut biphasé utilisant Z_{bus}

Considérons un défaut entre les phases (b) et (c) à travers une impédance Z_f au bus k comme montré en Figure.8.8.

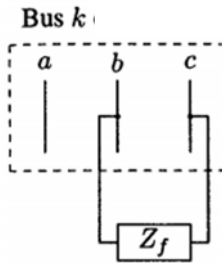


Figure.8.8. Défaut biphasé au bus k

Le réseau de séquence de la phase (a) de la Figure.8.4 est applicable ici, où les réseaux de séquences directe et inverse sont placés en opposition. Les composantes symétriques du courant de défaut comme données en (15), (18) et (22) sont :

$$I_k^0 = 0 \quad (8.39)$$

$$I_k^1 = -I_k^2 = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_f} \quad (8.40)$$

Où Z_{kk}^1 et Z_{kk}^2 sont les éléments diagonaux dans l'axe k de la matrice correspondante Z_{bus} et $V(0)$ est la tension avant-défaut au bus k. Le courant de défaut de phase est : $I_k^{abc} = AI_k^{012}$

8.3.3. Défaut double Ligne-Terre utilisant Z_{bus}

Considérons un défaut entre les phases (b) et (c) à travers une impédance Z_f à la terre au bus k comme montré en Figure.8.9.

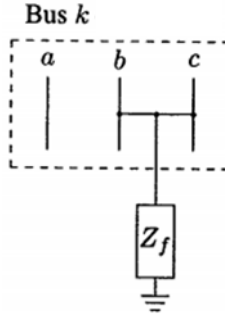


Figure.8.9. Défaut biphasé-terre au bus k

Le réseau de séquence de la phase (a) de la Figure.8.6 est applicable ici, où l'impédance de séquence directe est placée en série avec la combinaison parallèle des réseaux de séquences inverse et homopolaire. Les composantes symétriques du courant de défaut comme données dans la section.8.4 sont :

$$I_k^1 = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}^1 + \frac{Z_{kk}^2(Z_{kk}^0 + 3Z_f)}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_f}} \quad (8.41)$$

$$I_k^2 = -\frac{V_k(0) - Z_{kk}^1 I_k^1}{Z_{kk}^2} \quad (8.42)$$

$$I_k^0 = -\frac{V_k(0) - Z_{kk}^1 I_k^1}{Z_{kk}^0 + 3Z_f} \quad (8.43)$$

Où Z_{kk}^0 , Z_{kk}^1 et Z_{kk}^2 sont les éléments diagonaux dans le bus k de la matrice correspondante Z_{bus} et $V(0)$ est la tension avant-défaut au bus k. Le courant de défaut de phase est : $I_k^{abc} = AI_k^{012}$ qui égale dans ce cas :

$$I_k(F) = I_k^b + I_k^c \quad (8.44)$$

8.4. Tensions aux bus et courants de ligne durant le défaut

En utilisant les composantes de séquence du courant de défaut données par les expressions (8.6), les composantes symétriques des tensions du $i^{ème}$ bus durant le défaut sont obtenues :

$$\begin{aligned} V_i^0(F) &= 0 - Z_{kk}^0 I_k^0 \\ V_i^1(F) &= V_i^1(0) - Z_{kk}^1 I_k^1 \\ V_i^2(F) &= 0 - Z_{kk}^2 I_k^2 \end{aligned} \quad (8.45)$$

Où $V_i^1(0) = V_i(0)$ est la tension de phase avant-défaut au bus i . Les tensions de phase durant le défaut sont :

$$V_i^{abc} = AV_i^{012} \quad (8.46)$$

Les composantes symétriques du courant de défaut dans la ligne entre i et j sont données par :

$$\begin{aligned} I_{ij}^0 &= \frac{V_i^0(F) - V_j^0(F)}{Z_{ij}^0} \\ I_{ij}^1 &= \frac{V_i^1(F) - V_j^1(F)}{Z_{ij}^1} \\ I_{ij}^2 &= \frac{V_i^2(F) - V_j^2(F)}{Z_{ij}^2} \end{aligned} \quad (8.47)$$

Où Z_{ij}^0 , Z_{ij}^1 et Z_{ij}^2 sont les composantes homopolaires, directe, et inverse de l'impédance de la ligne actuelle entre les bus i et j .

Après obtention des composantes symétriques du courant de ligne, le courant de défaut de phase dans la ligne entre i et j est :

$$I_{ij}^{abc} = AI_{ij}^{012} \quad (8.48)$$

-
- [1] D. William D. Stevenson, *elements of power system analysis*. McGraw-Hil, New York, 1994.
- [2] H. Saadat, *Power system analysis*, 3rd Edition. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering, 1999.
- [3] R. Feinberg, *Modern Power Transformer Practice*. The Macmillan Press Ltd, 1979.
- [4] C. L. Wadhwa, *Basic electrical engineering*, 4th Edition. NEW AGE, 2007.
- [5] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd Edition. New York: Wiley Interscience, 1991.
- [6] A. A. Sallam and O. P. Malik, *Electric distribution systems*. IEEE Press, 2018.
- [7] H. William, E. Kemmerly, and S. M. Durbin, *Engineering circuit analysis*. New York: McGraw-Hil, 2012.
- [8] J. S. Grainger, W. D. Stevenson, and W. Grainger, *Power system analysis (Power & Energy)*, Intl. Edit. 1994.
- [9] J. D. Glover, M. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis And Design*, 5th Edition. 2012.
- [10] A. N. Syed, *Theory and problems of Electrical Power Systems*, 1st Editio. Schaum's Outline SERIES McGRAW-HILL, 1989.
- [11] T. Gonen, *Modern Power system analisys*, 2nd Edition. 2013.
- [12] D. William Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, 4th edition. McGraw-Hill Companies, New York, 1982.
- [13] P. M. Anderson, *Analysis of faulted power systems*. IEEE Press, 1995.
- [14] M. A. El-Sharkawi, *Electric energy: An introduction*, CRC Press. 2011.
- [15] J. C. Das, *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*. Marcel Dekker, Inc. New York, 2002.