

Chapitre.3. Composantes symétriques et Calcul des courants de court-circuit de court-circuit

1. Introduction

L'industrialisation et la croissance de la population dans le monde a poussé tout les pays à suivre une politique de mise à niveau pour améliorer leurs positions mondiale, et pour y arriver là les premiers pas ont été fait dans le domaine de l'énergie et surtout celui de l'énergie électrique. Dans ce cadre la plupart des études et des recherches ont été basé sur le perfectionnement des moyens de protection contre les dangers et les problèmes survenant sur les réseaux électriques et surtout celui de court circuit à cause de son impact.

2. Régime sinusoïdal triphasé

A l'heure actuelle, la majeure partie de la production et du transport de l'énergie électrique se fait sous forme triphasé. Pour mieux comprendre l'intérêt du triphasé dans le transport d'énergie, on peut raisonner sur l'exemple Fig.1.

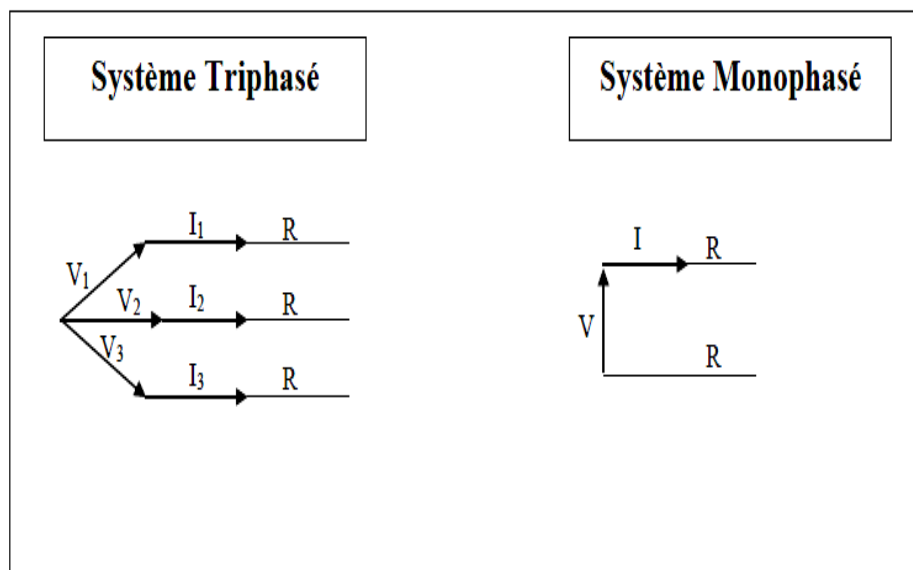


Figure.1 Comparaison entre système monophasé et un système triphasé

2.1. Pourquoi utilise-t-on les réseaux triphasés au lieu de réseaux monophasés?

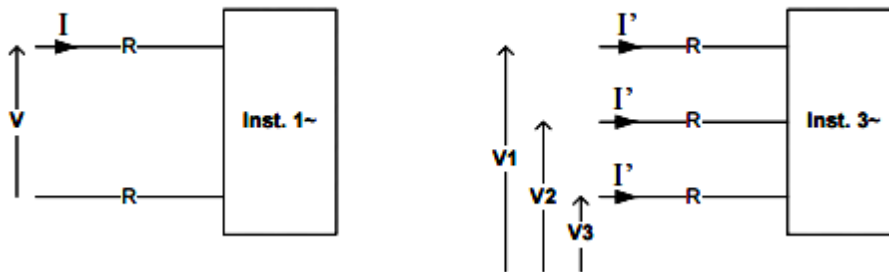
1) En production

A masse égale, une machine triphasée (synchrone ou asynchrone) possède une puissance nominale supérieure de 50 à 100% et un meilleur rendement qu'une machine monophasée.

2) En transport :

Considérons les 2 installations ci-dessous:

- Même puissance $P(W)$ consommée.
- Même $\cos \varphi$;
- $V_1 = V_2 = V_3 = V$; (tensions simples)
- Même R : résistance des conducteurs d'alimentation des 2 installations.
- Même longueur de conducteur.



Puissance active consommée par chaque installation

$$P_{1\sim} = VI \cos \varphi \qquad P_{3\sim} = 3VI' \cos \varphi$$

$$P_{1\sim} = P_{3\sim} \text{ Alors } VI \cos \varphi = 3VI' \cos \varphi \text{ donc } \frac{I}{3} = I'$$

Puissance perdue par effet joule dans les conducteurs d'alimentation

$$P_{J1\sim} = 2RI^2 \qquad P_{J3\sim} = 3RI'^2 = \frac{1}{3} RI^2$$

Rapport des puissances

$$\frac{P_{J1\sim}}{P_{J3\sim}} = \frac{2RI^2}{\frac{1}{3}RI^2} = 6$$

Soit :

$$P_{J1\sim} = 6P_{J3\sim}$$

On constate que pour transmettre la même puissance sur la même longueur, les pertes actifs en monophasé sont plus grandes de 6 fois que celle triphasé. De plus la quantité de matière utilisée pour réaliser une ligne de longueur L on aura besoin d'un volume de cuivre V (tri) en triphasé et V (mono) en monophasé

Avec :

$$V_{tri} = 3L.S$$

$$V_{mono} = 6.L.S$$

Donc il est nécessaire d'employer une quantité double dans le cas d'une ligne monophasé, tout en ayant les pertes en ligne doubles.

Conclusion :

La ligne triphasée consomme 6 fois moins de puissance que la ligne monophasée et nécessite 50 % de volume de conducteur pour fonctionner.

3. Définition D'un Système triphasé symétrique

Considérons trois grandeurs sinusoïdales X_1, X_2, X_3 , formant un système triphasé symétrique et qui se présentent sous forme:

$$X_1 = X\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi)$$

$$X_2 = X\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \varphi - m\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$X_3 = X\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \varphi - m\frac{4\pi}{3}\right)$$

Ces trois grandeurs sont de même valeur efficace et déphasé l'un à l'autre de $2\pi/3$

m: est appelé ordre du système triphasé.

3.1. Système direct:

$m=1$, le système est direct. Les trois grandeurs se présentent sous la forme Fig.: (2)

$$X_1 = X\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi)$$

$$X_2 = X\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$X_3 = X\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Est sont, alors symétriques et équilibrés

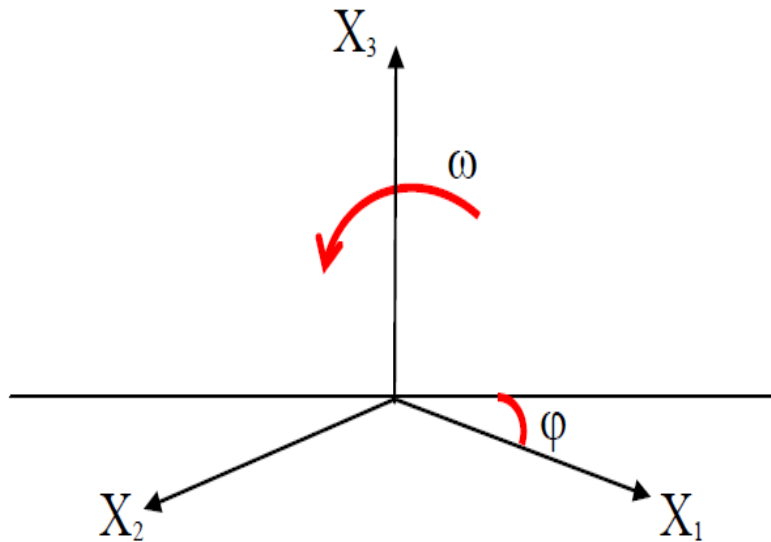


Figure.2. Représentation de Fresnel des trois vecteurs

En notation complexe $a = e^{j2\pi/3}$, on peut représenter:

$$\overline{X_1} = X e^{j(\omega t - \varphi)}$$

$$\overline{X_2} = a^2 \overline{X_1}$$

$$\overline{X_3} = a \overline{X_1}$$

3.2. Système inverse

Si $m = 2$, le système est dit inverse, donc les trois grandeurs sinusoïdales se présentent sous la forme Fig. (3)

$$X_1 = X\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi)$$

$$X_2 = X\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$X_3 = X\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

Est sont, également symétriques et équilibrées

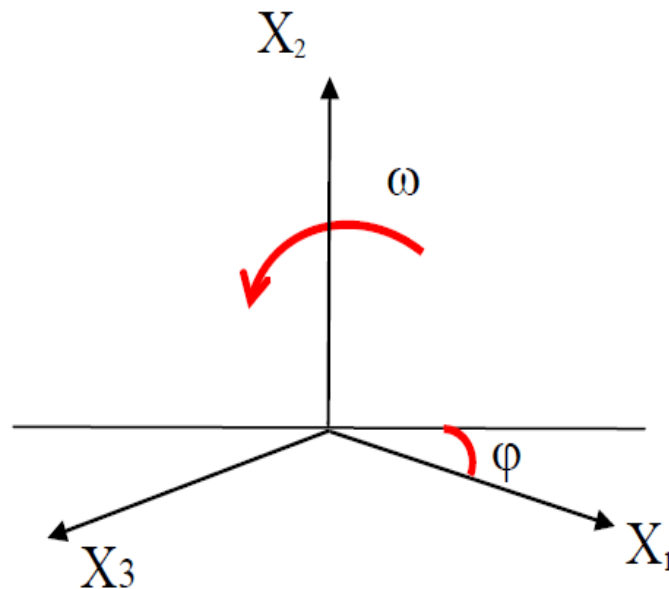


Figure.3. Représentation de Fresnel des trois vecteurs

d'où :

$$\overline{X_1} = X e^{j(\omega t - \varphi)}$$

$$\overline{X_2} = a \overline{X_1}$$

$$\overline{X_3} = a^2 \overline{X_1}$$

3.3. Système homopolaire

Si $m = 3$, le système est dit homopolaire, donc les trois grandeurs se présentent sous la forme Figure 4.

$$X_1(t) = X_2(t) = X_3(t)$$

D'où

$$\overline{X}_1 = \overline{X}_2 = \overline{X}_3$$

Donc les trois vecteurs sont confondus.

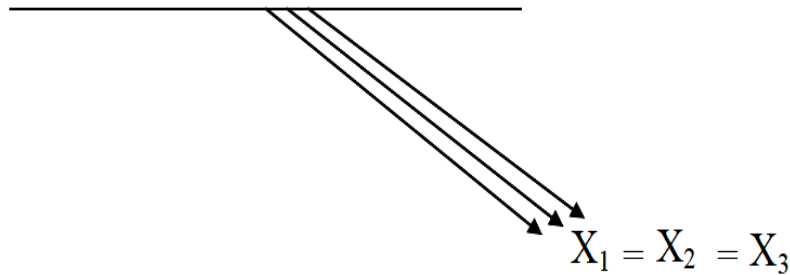


Figure.4. Représentation de Fresnel des trois vecteurs

4. Système triphasé asymétrique

Un état de fonctionnement non symétrique apparaît lorsque les impédances de phase de la charge ne sont pas identiques (four à induction, machine à souder à l'arc.....). Elle peut aussi intervenir en cas d'une ouverture d'une phase, court - circuitetc.

Néanmoins un système sinusoïdal asymétrique, peut être ramené à une combinaison de systèmes symétrique.

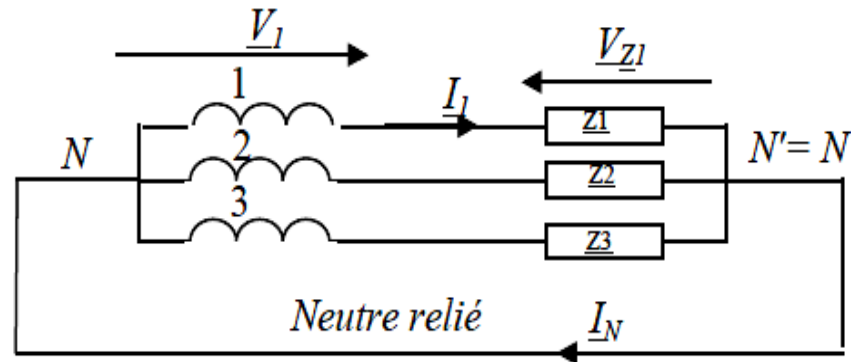
4.1. Système déséquilibré et importance du neutre

Un système triphasé est dit déséquilibré dès lors qu'il débite du courant sur une charge non équilibrée.

En bref, il y a déséquilibre si $Z_1 \neq Z_2$ ou $Z_1 \neq Z_3$ ou $Z_2 \neq Z_3$

En cas de déséquilibre le fait que le **neutre soit ou pas relié** devient **primordial**. En effet, comparons un système triphasé déséquilibré à neutre relié et à neutre non relié, comme c'est le cas sur les figures ci-dessous.

4.1.1. Un système avec le neutre relié

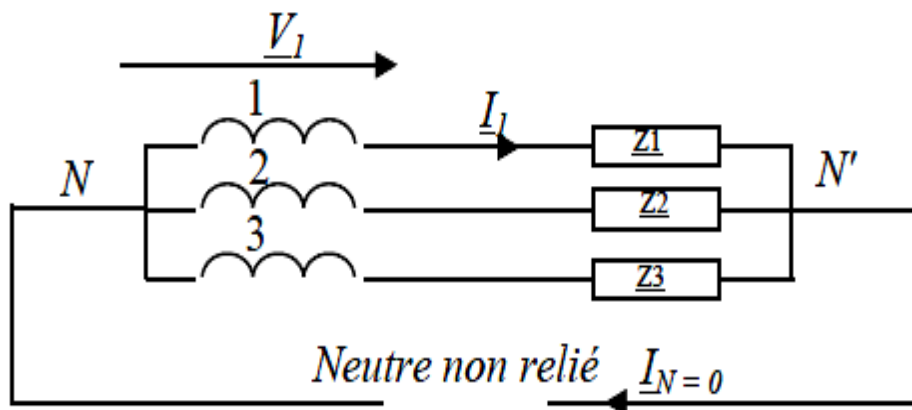


Les relations de maille des phases se refermant par le neutre donnent :

$$I_k = V_{Zk} / Z_k \text{ et } V_{Zk} + V_{NN'} = V_k (k = 1, 2 \text{ ou } 3) \text{ avec } V_{NN'} = 0$$

On aura $I_n = I_1 + I_2 + I_3 \neq 0$, il y a déséquilibre en courant.

4.1.2. Un système sans neutre relié



Les relations de mailles ne se referment plus par le neutre, et il n'y a plus égalité des tensions simples sur les charges :

$$V_{Zk} \neq V_k \text{ avec } V_1 = V_2 = V_3, V_{Zk} + V_{NN'} = V_k, \text{ avec } V_{NN'} \neq 0$$

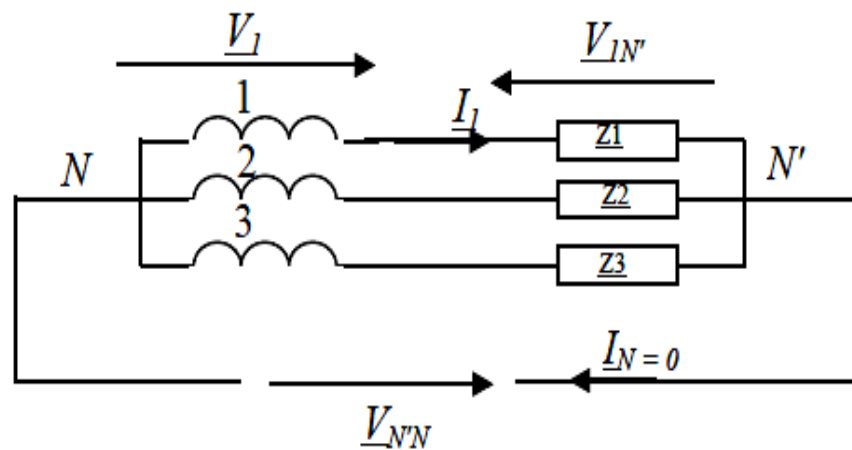
Par ailleurs, $I_n = I_1 + I_2 + I_3 = 0$ mais avec $I_1 \neq I_2 \neq I_3$ Il y a donc déséquilibre en courant et tension.

4.2. Résolution des systèmes triphasés déséquilibrés sans neutre

Il existe deux méthodes pour la résolution des systèmes déséquilibrés sans neutre : une méthode matricielle et une méthode consistant en un changement de base appelé "utilisation des composantes symétriques".

4.3. Méthode matricielle :

Tout système déséquilibré sans neutre peut être ramené à un système équivalent avec générateurs et charges en étoile. Ce système équivalent sera donc conforme au schéma ci dessous. En général, les tensions V_1 à V_3 sont considérées comme invariables et on s'intéresse à la détermination des tensions $V_{1N'}$ à $V_{3N'}$ qui sont les tensions effectives appliquées aux charges. Connaissant les impédances de charges, ce calcul revient à la détermination des courants I_1 à I_3 .



Ce système amène les équations suivantes :

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_1 \cdot I_1 + V_{NN} = V_{1N'} + V_{NN} \\ V_2 &= Z_2 \cdot I_2 + V_{NN} = V_{2N'} + V_{NN} \\ V_3 &= Z_3 \cdot I_3 + V_{NN} = V_{3N'} + V_{NN} \\ I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \end{aligned}$$

En ajoutant les trois premières équations, on aboutit à

$$3 \cdot V_{NN} = -(V_{1N'} + V_{2N'} + V_{3N'})$$

Le système se ramène donc à :

$$\begin{aligned} V_1 &= (2/3)V_{1N'} - (1/3)V_{2N'} - (1/3)V_{3N'} \\ V_2 &= (-1/3)V_{1N'} + (2/3)V_{2N'} - (1/3)V_{3N'} \\ V_3 &= (-1/3)V_{1N'} - (1/3)V_{2N'} + (2/3)V_{3N'} \\ I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \end{aligned}$$

Il est possible de remarquer dès à présent que la troisième équation est une combinaison linéaire des deux premières (en effet, $V_3 = -V_1 - V_2$), ainsi elle n'apporte aucune information supplémentaire dans le système et peut être éliminée.

Par ailleurs, la dernière équation peut s'écrire

$$\underline{I_1} + \underline{I_2} + \underline{I_3} = \frac{\underline{V_{1N'}}}{\underline{Z_1}} + \frac{\underline{V_{2N'}}}{\underline{Z_2}} + \frac{\underline{V_{3N'}}}{\underline{Z_3}} = \underline{0}$$

Ainsi, l'ensemble des équations se ramène au système suivant :

$$\begin{cases} \frac{2}{3}\underline{V_{1N'}} - \frac{1}{3}\underline{V_{2N'}} - \frac{1}{3}\underline{V_{3N'}} = \underline{V_1} \\ -\frac{1}{3}\underline{V_{1N'}} + \frac{2}{3}\underline{V_{2N'}} - \frac{1}{3}\underline{V_{3N'}} = \underline{V_2} \\ \frac{\underline{V_{1N'}}}{\underline{Z_1}} + \frac{\underline{V_{2N'}}}{\underline{Z_2}} + \frac{\underline{V_{3N'}}}{\underline{Z_3}} = \underline{0} \end{cases}$$

Il est préférable, à ce stade, d'écrire la relation matricielle :

$$\begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{\underline{Z_1}} & \frac{1}{\underline{Z_2}} & \frac{1}{\underline{Z_3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{V_{1N'}} \\ \underline{V_{2N'}} \\ \underline{V_{3N'}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{V_1} \\ \underline{V_2} \\ \underline{0} \end{pmatrix} \text{ ou d'écrire : } M \cdot \begin{pmatrix} \underline{V_{1N'}} \\ \underline{V_{2N'}} \\ \underline{V_{3N'}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{V_1} \\ \underline{V_2} \\ \underline{0} \end{pmatrix} \text{ où la matrice } M = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{\underline{Z_1}} & \frac{1}{\underline{Z_2}} & \frac{1}{\underline{Z_3}} \end{pmatrix}$$

La résolution du système va se ramener à l'inversion de la matrice M et à l'écriture, une fois cette opération réalisée, des relations :

$$\begin{pmatrix} \underline{V_{1N'}} \\ \underline{V_{2N'}} \\ \underline{V_{3N'}} \end{pmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V_1} \\ \underline{V_2} \\ \underline{0} \end{pmatrix}$$

Par ailleurs, on obtiendra les courants avec :

$$\begin{pmatrix} \underline{I_1} \\ \underline{I_2} \\ \underline{I_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\underline{Z_1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\underline{Z_2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\underline{Z_3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{V_{1N'}} \\ \underline{V_{2N'}} \\ \underline{V_{3N'}} \end{pmatrix}$$

4.4. Méthode de composante symétrique

Tout système triphasé non symétrique est la superposition d'un système direct, système inverse et système homopolaire figure 5.

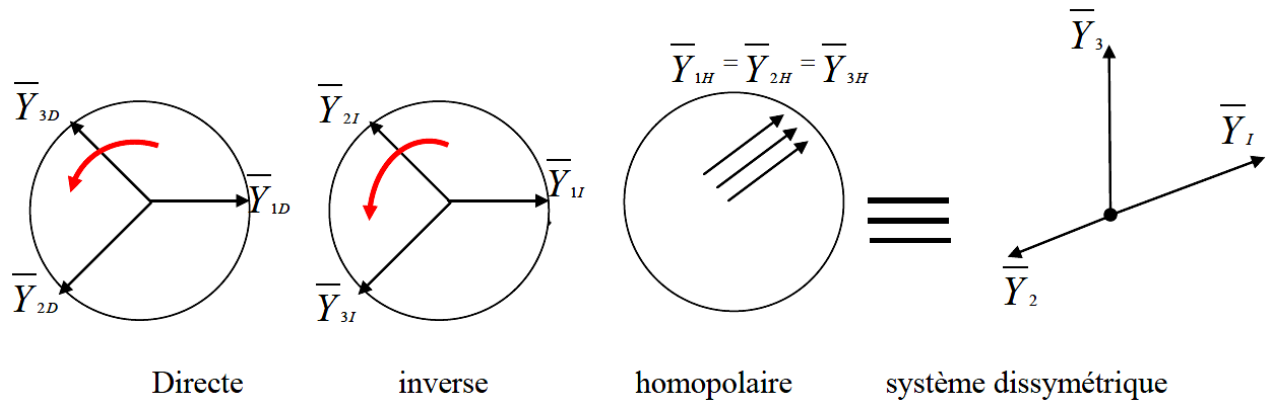


Figure.5. Décomposition d'un système triphasé déséquilibré

Les indices d, i et h indiquant respectivement les composantes directe, inverse et homopolaire.

En posant $a = e^{j2\pi/3}$ (opérateur de rotation d'un angle de 120°)

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}, \quad a^3 = 1$$

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Ou : $a = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ)$

Les trois grandeurs du système non symétrique sont exprimées par le système d'équation:

$$\left. \begin{aligned} \overline{Y}_1 &= \overline{Y}_{1d} + \overline{Y}_{1i} + \overline{Y}_{1h} \\ \overline{Y}_2 &= \overline{Y}_{2d} + \overline{Y}_{2i} + \overline{Y}_{2h} \\ \overline{Y}_3 &= \overline{Y}_{3d} + \overline{Y}_{3i} + \overline{Y}_{3h} \end{aligned} \right\}$$

En introduisant l'opérateur de rotation, le système d'équation devient:

$$\left. \begin{aligned} \overline{Y}_1 &= \overline{Y}_d + \overline{Y}_i + \overline{Y}_h \\ \overline{Y}_2 &= a^2 \overline{Y}_d + a \overline{Y}_i + \overline{Y}_h \\ \overline{Y}_3 &= a \overline{Y}_d + a^2 \overline{Y}_i + \overline{Y}_h \end{aligned} \right\}$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} \overline{Y}_{3d} &= a \overline{Y}_{1d}; \overline{Y}_{2d} = a^2 \overline{Y}_{1d} \\ \overline{Y}_{2i} &= a \overline{Y}_{1i}; \overline{Y}_{3i} = a^2 \overline{Y}_{1i} \\ \overline{Y}_{1h} &= \overline{Y}_{2h} = \overline{Y}_{3h} \end{aligned}$$

Soit matériellement:

$$\begin{bmatrix} \overline{Y}_1 \\ \overline{Y}_2 \\ \overline{Y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{Y}_d \\ \overline{Y}_i \\ \overline{Y}_h \end{bmatrix}$$

Avec :

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

où **F** est la matrice de transformation des composantes symétriques (Fortescue) (dé fois notée par M).

En résolvant par rapport aux composantes symétrique on obtient:

$$\left. \begin{aligned} \overline{Y}_d &= \frac{1}{3}(\overline{Y}_1 + a \overline{Y}_2 + a^2 \overline{Y}_3) \\ \overline{Y}_i &= \frac{1}{3}(\overline{Y}_1 + a^2 \overline{Y}_2 + a \overline{Y}_3) \\ \overline{Y}_h &= \frac{1}{3}(\overline{Y}_1 + \overline{Y}_2 + \overline{Y}_3) \end{aligned} \right\}$$

Sous forme matricielle on aura:

$$\begin{bmatrix} \overline{Y}_d \\ \overline{Y}_i \\ \overline{Y}_h \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{Y}_1 \\ \overline{Y}_2 \\ \overline{Y}_3 \end{bmatrix}$$

Avec :

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

F^{-1} : représente la matrice inverse de Fortescue (dé fois notée par M^{-1})

4.5. Loi d'ohm dans le système des composante symétriques

1. Les tensions et courants de phases dans une matrice :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \vec{V}_{123} = [Z_{123}] \vec{I}_{123}$$

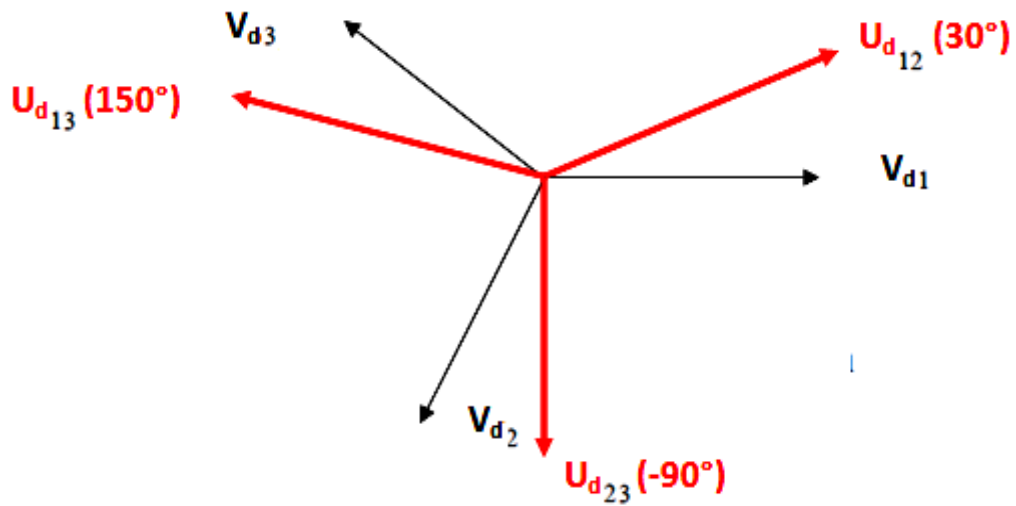
2. Les Tensions et courants des trois séquences (directe, inverse et homopolaire)

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_o & Z_i & Z_d \\ Z_d & Z_o & Z_i \\ Z_i & Z_d & Z_o \end{bmatrix}}_{Z_{dio}} \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{bmatrix}$$

4.6. Système triphasé déséquilibré (composantes symétriques)

 Les tensions simples et composées

1. Système direct



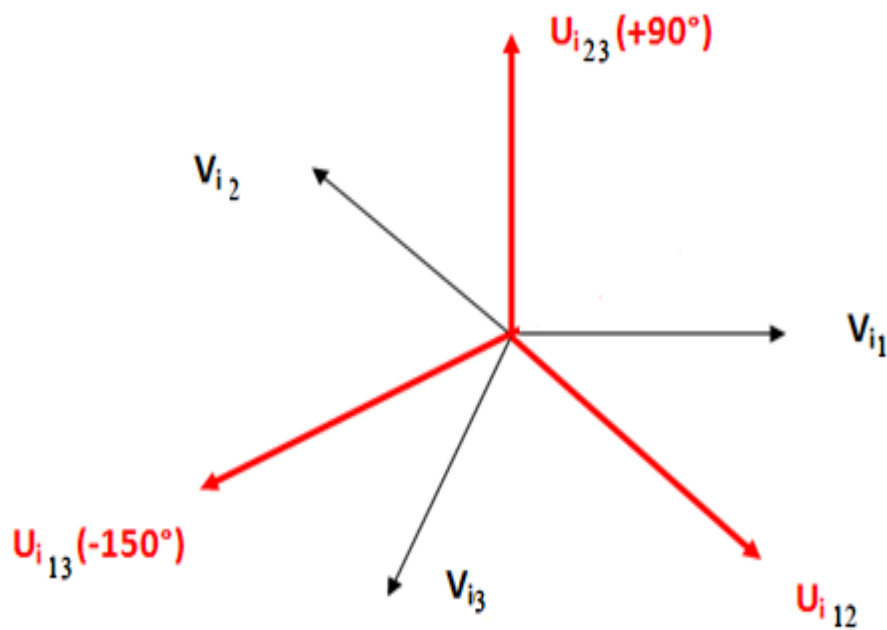
Composante de phase : $V_{d1} = V_d \angle 0$

Composante de ligne : $V_{dl,12} = V_d \sqrt{3} \angle 30^\circ$

$V_{dl,23} = V_d \sqrt{3} \angle -90^\circ$

$V_{dl,13} = V_d \sqrt{3} \angle 150^\circ$

2. Système Inverse



Composante de phase : $V_{i1} = V_d \angle 0$

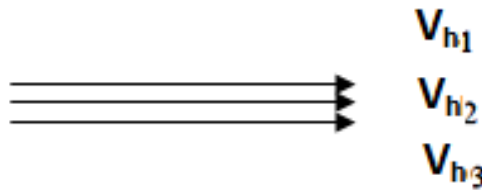
Composante de ligne : $V_{il,12} = V_d \sqrt{3} \angle -30^\circ$

$$V_{il,23} = V_d \sqrt{3} \angle +90^\circ$$

$$V_{il,13} = V_d \sqrt{3} \angle -150^\circ$$

3. Système Homopolaire

$$V_{hl} = \frac{1}{3} (V_{l,12} + V_{l,23} + V_{l,13})$$



Quel que soit le système (avec neutre, sans neutre, équilibré, déséquilibré), la composante homopolaire de ligne $V_{hl} = 0$. Mais on ne peut pas déterminer la composante homopolaire simple V_h en fonction V_{hl} .

Les tensions composées homopolaire de ligne sont identiques et vaut zéro (ils sont confondues) mais il existe des tensions simples de même module et même déphasage

4.7. Taux de déséquilibre d'un système

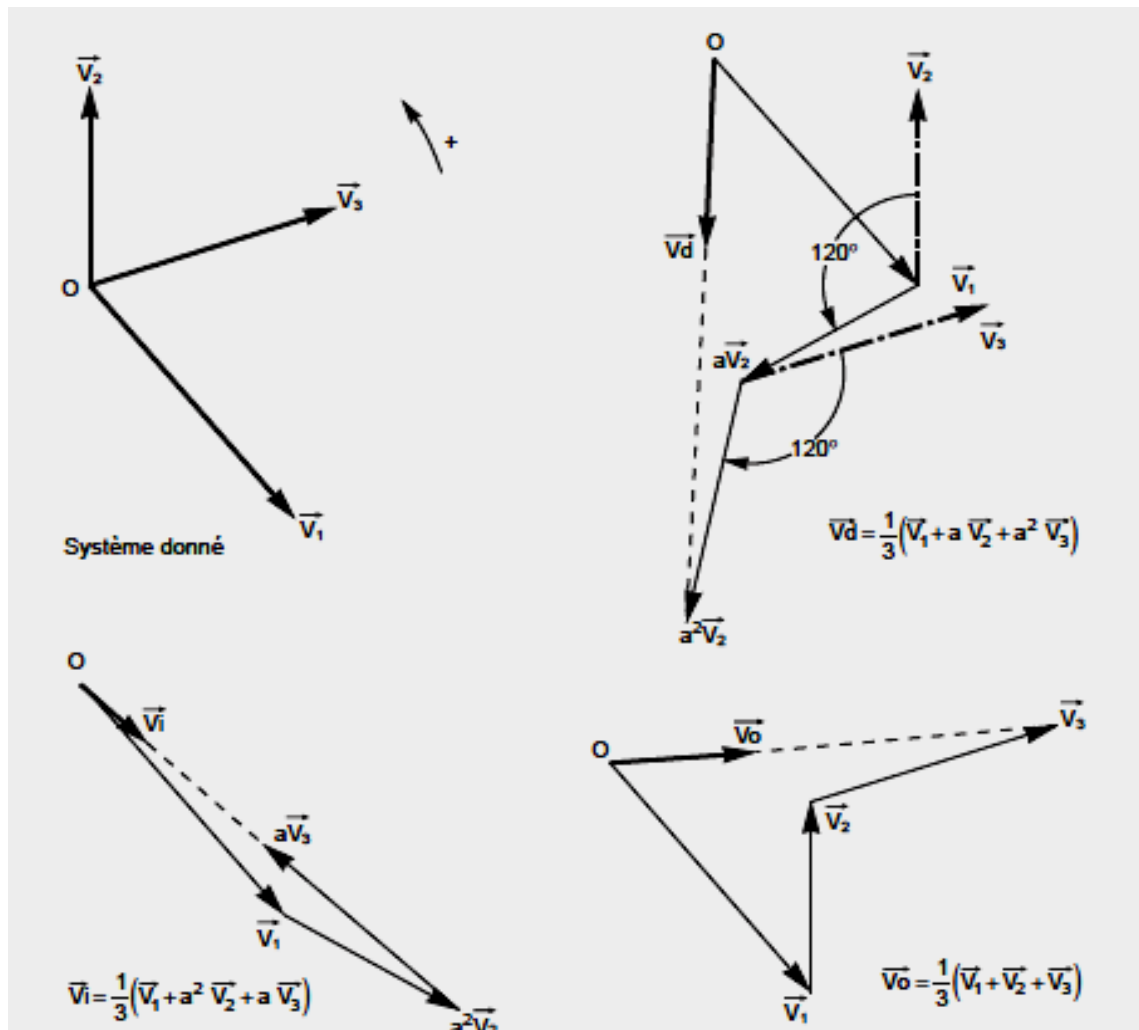
On vérifie aisément que si le système initial est symétrique direct, on a donc : $V_d = V_1$ et $V_i = V_h = 0$. En particulier $|V_i|$ ne prend une valeur non nulle que si le système initial n'est pas symétrique. Cette grandeur, rapportée à la composante directe $|V_d|$ peut donc servir de mesure de la dissymétrie (traditionnellement appelée *déséquilibre des phases*) :

$\Delta = \frac{|V_i|}{|V_d|}$ V_i et V_d sont les valeurs efficaces de tension de système inverse et direct respectivement

$\Delta = 1$: dissymétrie totale (déséquilibre) $V_i = V_d$

$\Delta = 0$: aucune dissymétrie (équilibre) $V_i = 0$

4.8. Représentation vectorielle d'un système triphasé en ses composantes symétriques



5. Régime de court-circuit

Les courts- circuits sont un cas particulier des conditions anormales de fonctionnement des réseaux électriques. Les conditions anormales peuvent être dues soit à un défaut d'isolement (imperfection du matériel isolant), soit due à celle de l'exploitation (les surcharges, Non fermeture accidentel d'une phase.....etc). Un court- circuit présente un circuit où tous les courants se convergent vers le point de défaut, et il s'ensuit d'une augmentation des courants dans tous les éléments du réseau en dépassent plusieurs fois les valeurs admissibles. Cette augmentation est surtout ressentie par les éléments proches au point de défaut. Les effets du courant de court- circuit ne se limitent pas seulement aux réseaux et aux installations électriques mais peut constituer un danger pour l'être humain.

6. Court-circuit : définition

Un court-circuit est une liaison accidentelle entre conducteurs à impédance nulle (court-circuit franc) ou non (court-circuit impédant). Un court-circuit peut être interne s'il est localisé au niveau d'un équipement, ou externe s'il se produit dans les liaisons.

La durée d'un court-circuit est variable : auto-extincteur si le défaut est trop court pour déclencher la protection ; fugitif lorsque éliminé après déclenchement et ré-enclenchement de la protection ; permanent s'il ne disparaît pas après déclenchement de la protection.

7. Danger et effets physiologiques du courant électrique

Le courant électrique a une action sur les principales fonctions vitales de l'organisme à savoir la respiration et la circulation. Il convient également de ne pas négliger les risques de brûlures liés au passage du courant électrique à travers le corps humain lors du contact avec un matériel destiné à l'usage électrique.

La limite de sensation est variable d'un corps à un autre; cela dépend de nombreux facteurs : tension de contact, état et humidité de la peau et nature du contact avec le sol.

⊙ **0,5 mA** Picotement - وخز



⊙ **10 mA** tétanisation musculaire
(Une contraction spontanée)



⊙ **30 mA** paralysie respiratoire



⊙ **75 mA** Fibrillation Ventriculaire
(Est un trouble du rythme cardiaque correspondant à la contraction rapide, désorganisée et inefficace Des ventricules cardiaques).



⊙ **1 A** Arrêt cardiaque.



8. Les origines des courts-circuits

Les courts circuits peuvent avoir diverses origines :

8.1. Electriques

C'est l'altération des isolants des matériels de réseau, par exemple. En effet, les matériels électriques que l'on trouve sur le réseau ou dans les postes comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc des courts-circuits.

8.2. Atmosphériques

Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes, le givre ou pollution atmosphérique des isolateurs.

8.3. Mécaniques

C'est la chute d'un corps sur un conducteur ou la dégradation mécanique de conducteurs consécutive à des agressions extérieures par des engins de terrassement par exemple.

8.4. Humaines

Ce sont les fausses manœuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple

9. Caractéristiques des défauts

Les défauts sont caractérisés par leur **forme**, leur **durée** et **l'intensité du courant**. On utilise souvent, comme l'Electrotechnicien des réseaux, le terme de défaut pour les désigner. Par exemple : Défaut triphasé de 5 secondes et de 30 kA d'intensité de courant.

10. Avantage du courant de court –circuit.

Malgré toutes les préoccupations des chercheurs sur le danger que cause ce phénomène, ils ont pu utiliser le court –circuit comme un moyen où une technique pour la protection des réseaux électriques, sur tout dans les pays où il neige et ceci pour faire fondre la glace

11. Objectif de calcul de courant de court-circuit

L'étude de comportement de régime de court-circuit a pour but :

A) D'identifier les situations à risque, origines possibles de :

- Danger pour les personnes
- Destruction des matériels par contraintes électrodynamiques, sur échauffement et surtensions.
- Dysfonctionnement de l'exploitation pouvant aller jusqu'à la perte totale de réseau à cause des creux des tensions et des coupures d'alimentation.

B) Aider à faire des choix à base des conceptions pour éliminer les effets néfastes des défauts, en ci qui concerne :

- Les systèmes de liaison à la terre des installations.
- Le dimensionnement approprié des matériels.
- Le réglage de protection, déterminé à partir de calcul des courants de défauts.

12. Les différents types du court- circuit

Le fonctionnement des réseaux électriques peut être caractérisé, principalement, par trois régimes : régimes normaux, régimes transitoires et régimes après avaries. Ce dernier peut être symétrique ou non symétrique : Ceux qui est du type symétrique : - court- circuit triphasé entre les trois phases sans liaison à la terre (**PPP**), et ceux qui sont asymétriques sont : - court-circuit biphasé entre deux phases sans liaison à la terre (**PP**). - court- circuit biphasé entre deux phases avec liaison à la terre (**PPT**). - court- circuit monophasé entre une phase et la terre (**PT**) (figure.6).

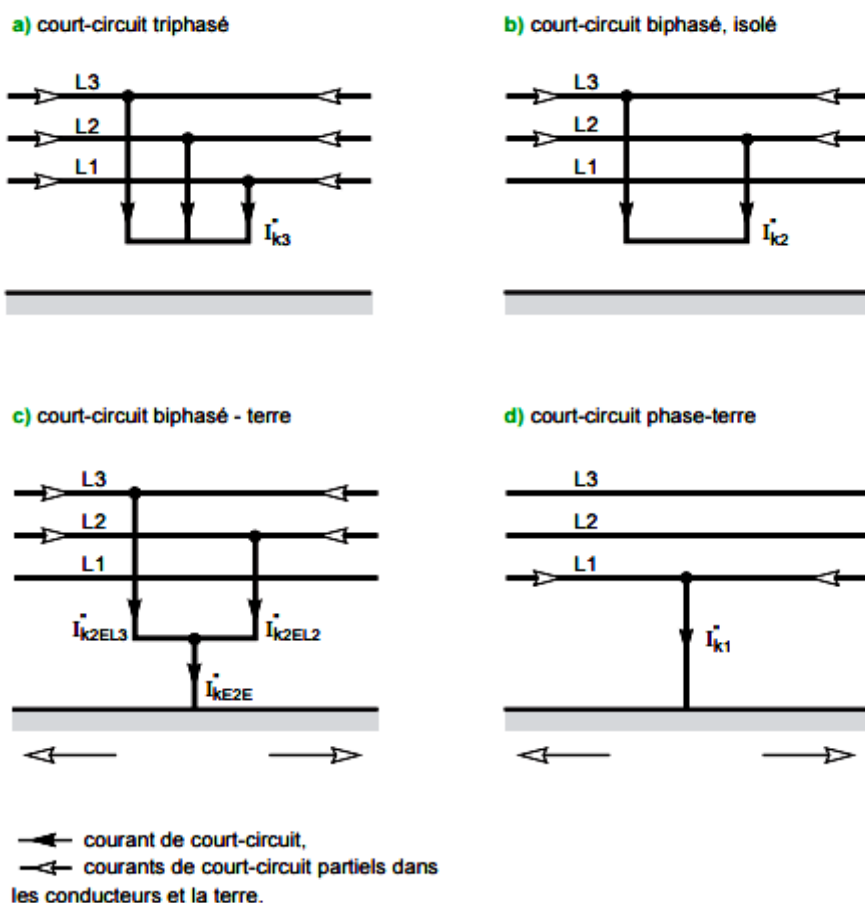


Figure. 6. Les différents courts-circuits et leurs courants. Le sens des flèches figurant les courants est arbitraire (cf. CEI 60909)

L'expérience dans l'exploitation des réseaux électriques montre que les court-circuits les plus fréquents sont de type monophasé qui représente de (60 ÷ 90%), la figure .6 nombre la fréquence d'apparition des différents types de court-circuit (figure.7).

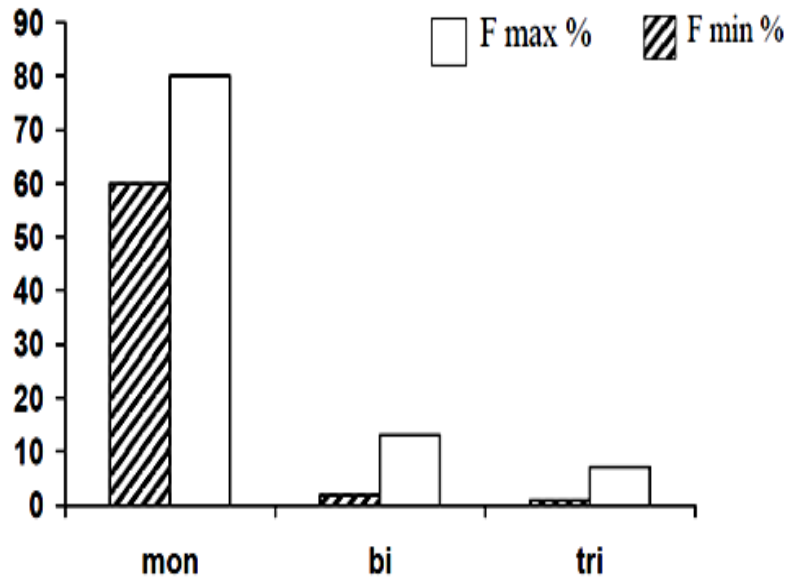


Figure.7. Fréquence d'apparition des différents types de court-circuit.

13. 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 :

1. Au point de défaut, la présence d'arcs de défaut, avec :

- Détérioration des isolants,
- Fusion des conducteurs,
- Incendie et danger pour les personnes ;

2. Pour le circuit défectueux :

- Les efforts électrodynamiques, avec déformation des JdB (jeux de barres), et arrachement des câbles ;
- Sur échauffement par augmentation des pertes joules, avec risque de détérioration des isolants ;

3. Pour les autres circuits électriques du réseau concerné ou de réseaux situés à proximité :

- 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 commande, etc...

14. Avantage du courant de court –circuit.

Malgré tout les préoccupations des chercheurs sur le danger que cause ce phénomène, ils ont pu utiliser le court –circuit comme un moyen où une technique pour la protection des réseaux électriques, sur tout dans les pays où il neige et ceci pour faire fondre la glace.

15. Calcul des I_{cc} par la méthode des impédances

Le courant de court-circuit I_{cc} se détermine selon les différents types de court-circuit

15.1. Court-circuit triphasé

C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases. L'intensité de court-circuit I_{cc3} est :

$$I_{cc3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

Avec U (tension composée entre phases) correspondant à la tension à vide du transformateur, laquelle est supérieure de 3 à 5 % à la tension aux bornes en charge.

Le calcul de l'intensité de court-circuit se résume alors au calcul de l'impédance Z_{cc} , impédance équivalente à toutes les impédances parcourues par l' I_{cc} du générateur jusqu'au point de défaut

- de la source et des lignes -. C'est en fait l'impédance «directe» par phase :

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

Avec :

$\sum R$ = somme des résistances en série.

$\sum X$ = somme des réactances en série.

**Défaut triphasé**

Le défaut triphasé est généralement considéré comme celui provoquant les courants de défaut les plus élevés.

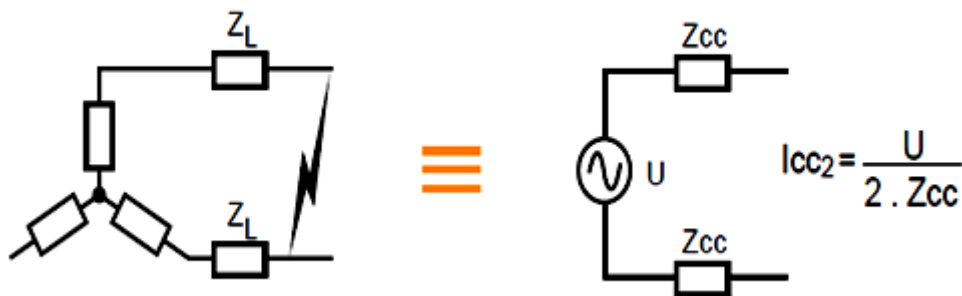
En effet, Le calcul d' I_{cc3} est donc indispensable pour choisir les matériels (intensités et contraintes électrodynamiques maximales à supporter).

15.2. Court-circuit biphase isolé

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée U .

L'intensité I_{cc2} débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé :

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3} \approx 0,86 I_{cc3}$$

**Défaut biphase**

15.3. Court-circuit monophasé isolé

Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre, alimenté sous une tension simple $V = U / \sqrt{3}$. L'intensité I_{cc1} débitée est alors :

$$I_{cc1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$$

Dans certains cas particuliers de défaut monophasé l'intensité monophasée peut être alors plus élevée que celle du défaut triphasé.



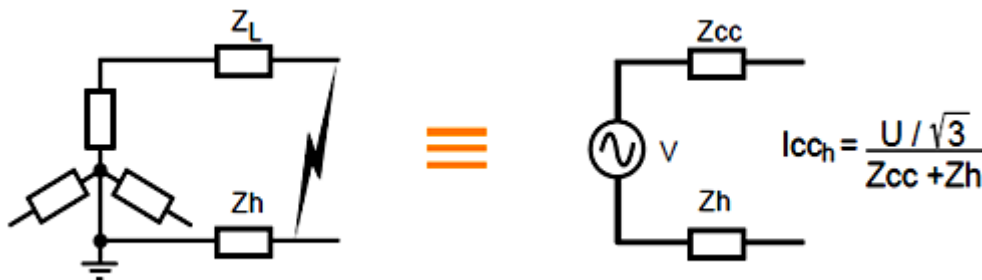
Défaut monophasé

15.4. Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé)

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance homopolaire Z_0 (impédance de la terre). Sauf en présence de machines tournantes où l'impédance homopolaire se trouve réduite, l'intensité I_{ccH} débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé.

Le courant de court-circuit se calcule comme suite :

$$I_{ccH} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_h}$$



Défaut à la terre

15.5. Détermination des diverses impédances de réseau

Pour calculer le courant de court -circuit en différents points d'une installation électrique. Il est nécessaire de calculer l'impédance totale Z_{cc} du réseau en amont du point de défaut. Cette impédance se calcule après avoir totalisé les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut y compris la source de l'alimentation jusqu'à point considéré.

$$Z_{CC} = \sqrt{(R_{cc})^2 + (X_{cc})^2}$$

Z_{cc} : Impédance totale de court-circuit en Ω .

R_{cc} : Résistance totale de court-circuit en Ω .

X_{cc} : Réactance totale de court-circuit en Ω .

15.5.1. Impédance de transformateur Z_T

$$Z_T = \sqrt{(R_T)^2 + (X_T)^2}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{cc} \times U_n^2}{S_n^2}$$

$$Z_T = \frac{\Delta U_{cc(\%)} \times U_n^2}{S_n}$$

R_T : Résistance de transformateur en Ω .

X_T : Réactance de transformateur en Ω .

Avec :

U_n : Tension nominale de transformateur au secondaire.

ΔP_{cc} : Les pertes de cuivre de transformateur.

S_n : Puissance apparente nominale de transformateur.

ΔU_{cc} : La chute de tension de transformateur.

15.5.2. Impédance de l'alternateur (générateur) Z_G

$$R_G = 0$$

$$Z_G = X_G = \frac{\Delta U(\%) \times U_{nG}^2}{S_n}$$

ΔU : La chute de tension de l'alternateur.

U_{nG} : Tension nominale de l'alternateur.

S_n : Puissance apparente nominale de l'alternateur.

15.5.3. Impédance de Réseau (la ligne)

$$Z_R = \sqrt{(R_R)^2 + (X_R)^2}$$

$$R_R = R \times L$$

$$X_R = X \times L$$

R_R : Résistance de réseau en Ω .

X_R : Réactance de réseau en Ω .

R_R : Résistance linéique en Ω/Km .

X_R : Réactance linéique en Ω/Km .

L : Longueur de la ligne en Km.

15.5.4. Jeux de barre

La résistance du jeu de barre et supposée négligeable sauf pour les faibles sections ; la réactance est supposée égale à 0,15 Ω/km .

15.5.5. Disjoncteur

La résistance d'un Disjoncteur négligeable est sa réactance est supposée égale à 0,15 Ω/km .

16. Calcul des courants de court-circuit à l'aide des composantes symétriques.

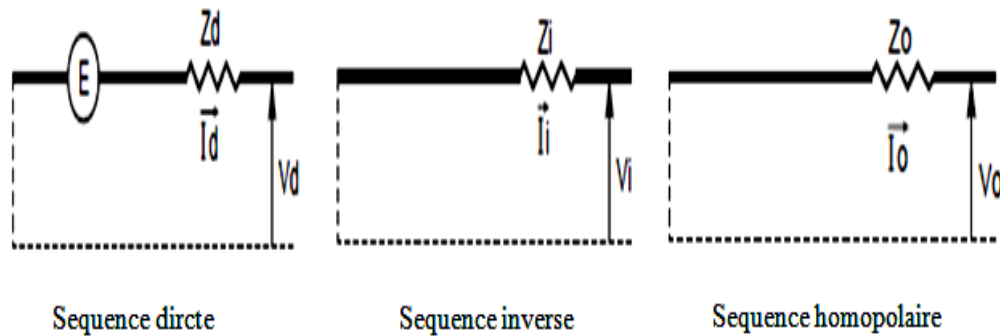
16.1. Principe de superposition

Nous allons examiner le comportement d'un réseau triphasé linéaire et symétrique, c'est-à dire composé d'impédances constantes et identiques pour les 3 phases (c'est le cas en pratique) ne comportant que des forces électromotrices équilibrées mais dont les courants et tensions peuvent se trouver déséquilibrés du fait de la connexion à une zone dissymétrique (défaut).

Les forces électromotrices (f.e.m.) constituent par nature des systèmes directs, les f.e.m. des systèmes inverses et homopolaires étant nulles. Le fonctionnement du réseau est interprété en considérant la **superposition** de trois régimes correspondant chacun à l'un des systèmes direct, inverse et homopolaire.

En effet dans ce réseau linéaire et symétrique, les courants de chaque système sont liés uniquement aux tensions du même système, et réciproquement, par l'intermédiaire des impédances du système considéré. Notons que ces impédances Z_d , Z_i et Z_o sont fonction des impédances réelles, notamment des inductances mutuelles.

Pour un réseau comportant une seule f.e.m., les composantes symétriques de tension et de courant étant respectivement, à l'endroit de la dissymétrie V_d , V_i , V_o , I_d , I_i , I_o , le circuit équivalent définissant les 3 régimes est :



En présence de défaut, les composantes symétriques des tensions du réseau s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} V_d &= E_d - Z_d I_d \\ V_i &= 0 - Z_i I_i \\ V_h &= 0 - Z_h I_h \end{aligned} \quad (1)$$

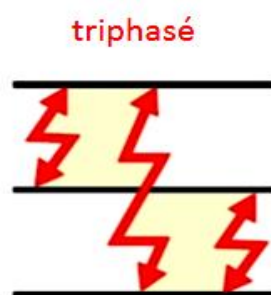
Avec :

E_d : la tension simple (phase –neutre) préexistante au point de défaut ou la tension de transformateur à vide (E_d la tension directe générateur $E_d = V_1$ puisque le générateur est en équilibre et $V_2 = a^2 E_d$ et $V_3 = a E_d$ toujours)

Z_d, Z_i, Z_h : les impédances équivalentes au réseau dans les trois systèmes.

16.2. Méthode de résolution pratique d'Icc

16.2.1. Défaut triphasé symétrique



1. Expression du défaut

$$V_1 = V_2 = V_3 = 0 \text{ (Phases en défaut)}$$

2. Traduction en grandeurs symétriques

On sait que : $V_d = \frac{1}{3}(V_1 + aV_2 + a^2V_3) = 0$ de même pour V_i, V_h . Donc

$$V_d = V_i = V_h$$

A partir de l'équation de défaut (équation (1)) On trouve alors :

$$V_d = E_d - Z_d I_d = 0$$

$$V_i = 0 - Z_i I_i = 0$$

$$V_h = 0 - Z_h I_h = 0$$

Finalement :

$$I_d = \frac{E_d}{Z_d}$$

$$I_i = 0$$

$$I_h = 0$$

3. Valeur du courant de défaut triphasé :

$$I_{CC} = I_{3\phi cc} = \frac{E_d}{Z_d}$$

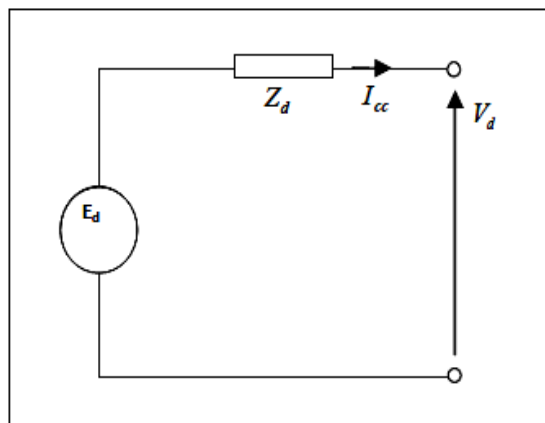
4. Retour aux grandeurs de phase

$$V_1 = V_2 = V_3 = 0$$

$$I_1 = (I_d + I_i + I_h) = \frac{E_d}{Z_d}$$

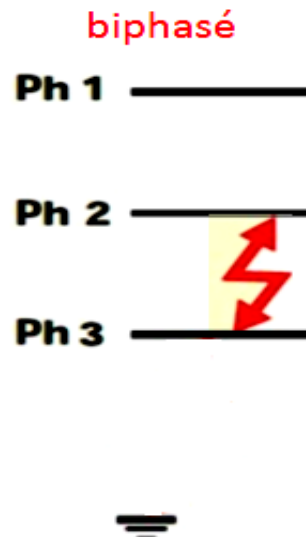
$$I_2 = (a^2 I_d + a I_i + I_h) = a^2 \frac{E_d}{Z_d}$$

$$I_3 = (a I_d + a^2 I_i + I_h) = a \frac{E_d}{Z_d}$$



Circuit équivalent de défaut

16.2.2. Défaut biphasé isolé



1. Expression du défaut

$V_2 = V_3, V_{23} = 0$ et $I_2 = -I_3$ (Phases en défaut)

$I_1 = 0$ (Phases saine)

2. Traduction en grandeurs symétriques

$$V_{23} = V_{2n} + V_{n3} = (a^2 V_d + a V_i + V_h) - (a V_d + a^2 V_i + V_h) = 0$$

$$V_{23} = V_d(a^2 - a) + V_i(a - a^2) + V_h(1 - 1) = 0$$

$$\Rightarrow V_d(a^2 - a) = V_i(a^2 - a) \Rightarrow V_d = V_i$$

Implique que $\Rightarrow E_d - Z_d I_d = -Z_i I_i$ (**)

En tenant compte les courants

$I_1 = 0$ et $I_2 = -I_3$

On trouve donc les grandeurs symétriques

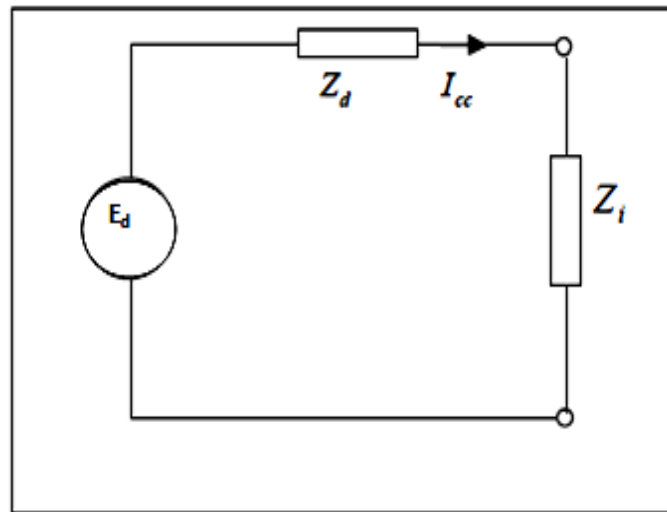
$$I_d = \frac{1}{3}(I_1 + aI_2 + a^2I_3) = \frac{1}{3}(a - a^2)I_2 = j\frac{1}{\sqrt{3}}I_2$$

$$I_i = \frac{1}{3}(I_1 + a^2I_2 + aI_3) = -\frac{1}{3}(a - a^2)I_2 = -j\frac{1}{\sqrt{3}}I_2$$

$$I_h = \frac{1}{3}(I_1 + I_2 + I_3) = 0$$

Donc : $I_d = -I_i$

Soit d'après ()** $E_d - Z_d I_d = -Z_i I_i \Rightarrow I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i}$



Circuit équivalent de défaut

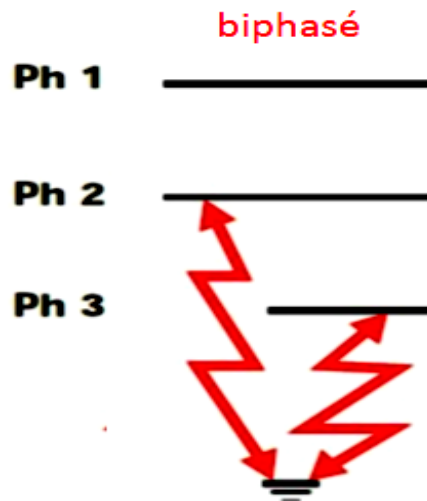
3. Retour aux grandeurs de phase (courants de défaut) :

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = -j\sqrt{3} \frac{E_d}{Z_d + Z_i} = I_{cc2Isolé}$$

$$I_3 = j\sqrt{3} \frac{E_d}{Z_d + Z_i} = I_{cc2Isolé}$$

16.2.3. Défaut biphasé terre



1. Expression du défaut

$V_2 = V_3 = 0, I_2 = -I_3$ (Phases en défaut)

$I_1 = 0$ (Phases saine)

2. Traduction en grandeurs symétriques

$$\begin{cases} V_d = \frac{1}{3}(V_1 + aV_2 + a^2V_3) = \frac{1}{3}V_1 \\ V_i = \frac{1}{3}(V_1 + a^2V_2 + aV_3) = \frac{1}{3}V_1 \\ V_h = \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3) = \frac{1}{3}V_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_d = V_i = V_h$$

Soit d'après l'équation (1)

$$V_i = -Z_i I_i \quad \text{et} \quad V_h = -Z_h I_h$$

Donc

$$I_i = -\frac{(E_d - Z_d I_d)}{Z_i}$$

$$I_h = -\frac{(E_d - Z_d I_d)}{Z_h}$$

Alors : $I_1 = I_d + I_i + I_h = 0$

$$\Rightarrow I_1 = I_d - \frac{(E_d - Z_d I_d)}{Z_i} - \frac{(E_d - Z_d I_d)}{Z_h} = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_d = \frac{E_d(Z_i + Z_h)}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \\ I_i = \frac{E_d Z_h}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \\ I_h = -\frac{E_d Z_i}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \end{cases}$$

3. Retour aux grandeurs de phase :

$$I_3 = (a I_d + a^2 I_i + I_h) = \frac{(a-1)E_d Z_i + (a-a^2)E_d Z_h}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h}$$

$$I_2 = (a^2 I_d + a I_i + I_h) = -\frac{(a-1)E_d Z_i + (a-a^2)E_d Z_h}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h}$$

4. Courant de court-circuit

$$I_{cc2} = I_3 = I_d + a^2 I_i + I_h \Rightarrow I_3 = \frac{\sqrt{3}E_d(Z_h^{\angle+90^\circ} + Z_i^{\angle+150^\circ})}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h}$$

$$I_{cc2} = I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_h \Rightarrow I_2 = \frac{\sqrt{3}E_d(Z_h^{\angle-90^\circ} + Z_i^{\angle-150^\circ})}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h}$$

NB : On peut écrire la forme suivante :

$$a-1 = -\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}\angle + 150^\circ$$

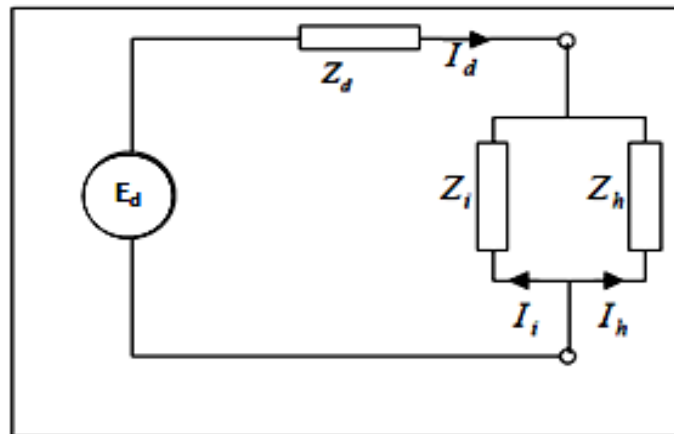
Donc :

$$(a-1)E_d Z_i = \sqrt{3}\angle + 150^\circ E_d Z_i = \sqrt{3}E_d Z_i \angle + 150^\circ$$

On obtient Le phasage de $Z_i + 150^\circ$

Le courant dans le neutre est :

$$I_n = I_2 + I_3 = \left| \frac{3E_d}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \right|$$



Circuit équivalent de défaut

16.2.4. Défaut entre phase et la terre

monophasé

Ph 3 ———

Ph 2 ———

Ph 1 ———


1. Expression du défaut

$V_1 = 0$ (phase en défaut), $I_2 = I_3 = 0$ (phases saines)

2. Traduction en grandeurs symétriques

$$V_d + V_i + V_h = \frac{1}{3}(V_1 + aV_2 + a^2V_3) + \frac{1}{3}(V_1 + a^2V_2 + aV_3) + \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3)$$

$$I_d + I_i + I_h = \frac{1}{3}(I_1 + aI_2 + a^2I_3) + \frac{1}{3}(I_1 + a^2I_2 + aI_3) + \frac{1}{3}(I_1 + I_2 + I_3)$$

$$I_d = \frac{1}{3}(I_1 + aI_2 + a^2I_3) = \frac{1}{3}I_1, I_i = \frac{1}{3}(I_1 + a^2I_2 + aI_3) = \frac{1}{3}I_1, I_h = \frac{1}{3}(I_1 + I_2 + I_3) = \frac{1}{3}I_1$$

On trouve alors :

On fait la sommation des tensions V_d, V_i, V_h on trouve :

$$V_d + V_i + V_h = 0$$

$$I_d = I_i = I_h$$

Soit d'après l'équation (1)

$$V_d + V_i + V_h = E_d - Z_d I_d - Z_i I_d - Z_h I_d = 0$$

Donc on obtient les courants

$$I_d = I_i = I_h = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_h}$$

Ainsi pour les tensions :

$$V_d = \frac{Z_i + Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times E_d$$

$$V_i = \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_h} \times E_d$$

$$V_h = \frac{Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times E_d$$

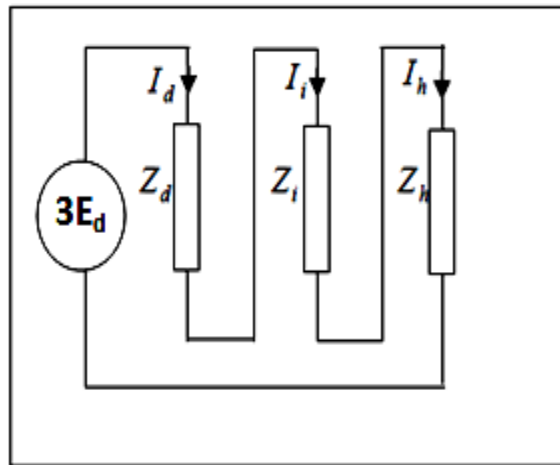
3. Retour aux grandeurs de phase

$$\begin{cases} V_1 = 0 \\ V_2 = \frac{(a^2 - a)Z_i + (a^2 - 1)Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times E_d \\ V_3 = \frac{(a - a^2)Z_i + (a - 1)Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times E_d \end{cases}$$

4. Courant de court-circuit

$$I_{CC1terre} = I_1 = \frac{3 E_d}{Z_d + Z_i + Z_h}$$

$$I_2 = I_3 = 0$$



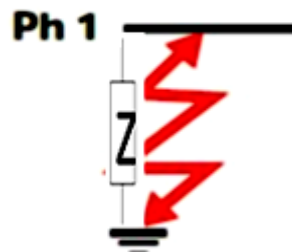
Circuit équivalent de défaut

16.2.5. Défaut entre phase et la terre à travers une impédance ($Z_H \neq 0$)

monophasé

Ph 3 ———

Ph 2 ———



Dans ce cas la tension au point du défaut n'est pas nulle.

1. Expression du défaut (Z_H : Impédance de la terre)

$$V_1 = Z_H \times I_1 \text{ (phase en défaut)}$$

$$I_2 = I_3 = 0 \text{ (phases saines)}$$

2. Traduction en grandeurs symétriques

$$I_d = \frac{1}{3}(I_1 + aI_2 + a^2 I_3) = \frac{1}{3}I_1$$

$$I_i = \frac{1}{3}(I_1 + a^2 I_2 + a I_3) = \frac{1}{3}I_1$$

$$I_h = \frac{1}{3}(I_1 + I_2 + I_3) = \frac{1}{3}I_1$$

On obtient donc :

$$\Rightarrow I_d = I_i = I_h$$

On a:

$$V_1 = Z_H \times I_1$$

$$I_2 = I_3 = 0$$

Alors:

$$\begin{cases} V_1 = Z_H \times I_1 = V_d + V_i + V_h \\ I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_h \\ I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_h \end{cases}$$

Puisque

$$I_d = I_i = I_h = \frac{1}{3}I_1 \text{ L'équation est devenue :}$$

$$V_1 = Z_H \times I_1 = V_d + V_i + V_h = 3 Z_H \times I_d$$

Les valeurs des composantes symétriques des courants et des tensions sont :

La sommation de L'équation de défaut donne :

$$E_d + 0 + 0 = V_d + V_i + V_h + Z_d I_d + Z_i I_i + Z_h I_h$$

$$E_d = 3 Z_H \times I_d + Z_d I_d + Z_i I_d + Z_h I_d$$

Donc :
$$I_d = I_i = I_h = \frac{E_d}{3 Z_H + Z_d + Z_i + Z_h}$$

3. Retour aux grandeurs de phase

$$I_a = I_d + I_i + I_h$$

$$I_1 = \frac{3E_d}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z_H}$$

$$V_d = E_d - Z_d I_d$$

$$V_i = Z_i I_i$$

$$V_h = Z_h I_h$$

Les tensions de phases

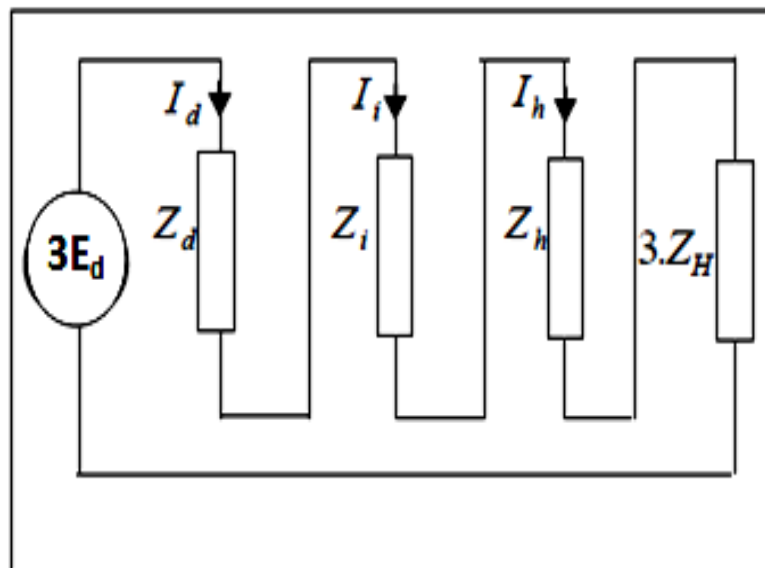
$$V_1 = Z_H I_1$$

$$V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_h$$

$$V_3 = a V_d + a^2 V_i + V_h$$

4. Courant de défaut

$$I_1 = \frac{3E_d}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z_H} = I_{cc1terre}$$



Circuit équivalent de défaut

Remarque : toutes les grandeurs utilisées sont en valeur complexe

17. Décomposition de courant de court-circuit

Le courant diminue en passant par trois périodes caractéristiques (figure.8) :

- ❖ **Subtransitoire** (0,01 à 0,1 s environ) : le courant de court-circuit (valeur efficace de la composante alternative) est élevé ; 5 à 10 fois le courant nominal permanent.
 - ❖ **Transitoire** (entre 0,1 et 1 s) : le courant de court-circuit décroît jusqu'à atteindre entre 2 à 6 fois le courant nominal.
 - ❖ **Permanent** : le courant de court-circuit chute entre 0,5 et 2 fois le courant nominal.
- Les valeurs données dépendent de la puissance.

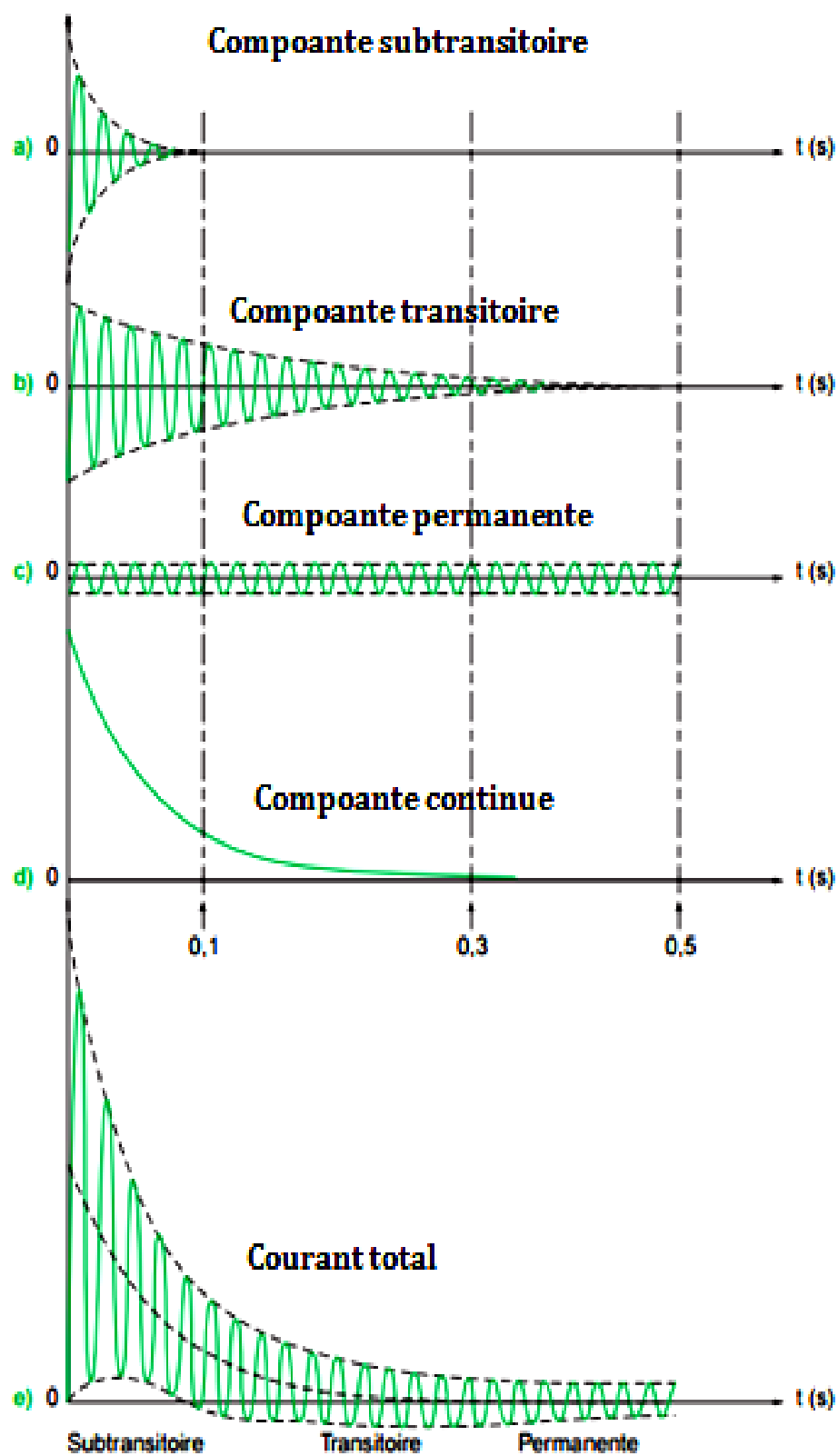


Figure.8. Décomposition du courant de court-circuit

Exercice d'application : Court-circuit ligne à ligne

On considère un réseau triphasé linéaire et symétrique, c'est à dire composé d'impédances constantes et identiques pour les 3 phases (c'est le cas en pratique) ne **comportant que des forces électromotrices équilibrées**. Ce réseau subit un court-circuit dissymétrique entre une phase et la masse par la mise en contact par le sol (rupture soudaine) ou par une pièce conductrice avec la terre (Fig. 1). Les courants et tensions peuvent se trouver déséquilibrés.

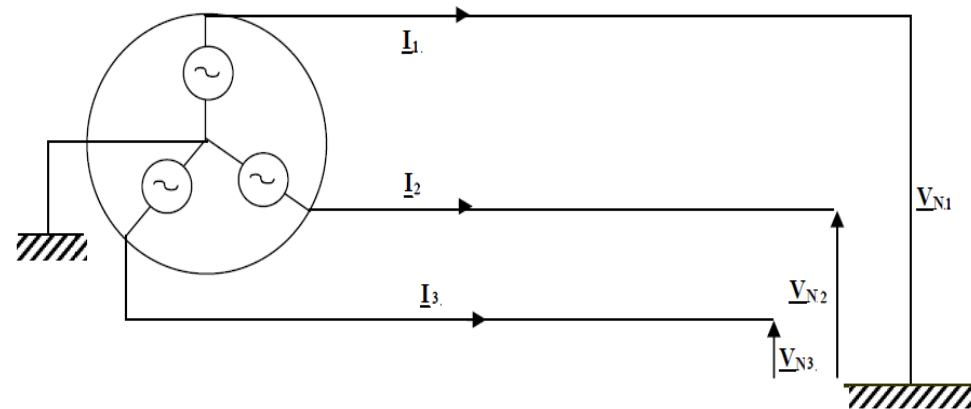


Figure .1

- 1- Déterminer les expressions de V_1 , V_2 et V_3 .
- 2- Application numérique : $E_d = 20 \text{ kV}$, et $Z_d = Z_i = j0,2 \Omega$ $Z_h = j0,15 \Omega$

Références Bibliographiques

- [1] Cahier Technique Schneider Electric n° 18, " Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques", édition juin 2005.
- [2] M. Aguet et J-J Morf, *Énergie Électrique*, Traité d'électricité de l'EPFL, volume XII, Lausanne, 1990 (Collection générale Bibliothèque UQAC : TK7T76812).
- [3] Les Cahiers Techniques de MICROENER, Cahier Technique N°6, " Généralités sur les Réseaux Electriques ".
- [4] LABED Djamel, " *PRODUCTION DECENTRALISEE ET COUPLAGE AU RESEAU* ", thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [5] "Calcul des courants de court circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif", CEI 60909.
- [6] "Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques", Cahier Technique n° 18 - B. DE METZ-NOBLAT. Schneider Electric.
- [7] B. de Metz, F.Noblat, G.Dumas, " Cahier technique n° 158 Calcul des courants de court-circuit " Schneider Electric.
- [8] D. Mukedkar " Calcul du courant de court de circuit dans le réseau d'Hydro-Québec" (Cours pour Post graduée destiné à IREQ), Ecole polytechnique de Montréal, Canada.