

11/621.853

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
**Spécialité : Protection et Contrôle des Réseaux
Electriques**



**Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Régime de défaut (Court-circuit) d'un réseau électrique

Présenté par :
HADDAD Billel
BENSOUDENE Mohcene

Sous la direction de : M.GOUAIDIA Said

Juin 2014

Remerciements



Nous remercions notre Dieu qui nous a donné le pouvoir pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions vivement notre encadreur

« M. GOVAIDIA Said »

Ainsi que tous les enseignants du département d'électrotechnique et d'électronique qui ont participé à notre formation.

Sans oublier de remercier ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A notre chère et dynamique Encadreur « Mr. Gouaidia Said »

Un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts fournis. Vous avez toujours été présente.

Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond respect.

Mes frères Hamza, Hocine, Abderrahman et Abdelkader merci pour votre présence

A tous mes cousins et cousines Adnane, Hamada, Ala, Nacer, Rahim, Issam son oublié le reste de la famille.

Mes amis lafifi, Djahmi, chiheb, josef, hamza, saleh, amirouche, boubaker, et zinou

Tous ceux qui de prêt ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire je dis du fond du cœur merci.

Et en final mon frère et amis Bensoudene Mohcene

Haddad Billel



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A notre chère et dynamique Encadreur «Mr. Gouaidia Said »

Un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts fournis. Vous avez toujours été présente.

Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond respect.

Mon frère Borhen , mes sœurs Soundes et Amani merci pour votre présence .

Mes amis karim, zinou, saad, zaki, djalil, okba , boubaker ,zinou

Tous ceux qui de prêt ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire je dis du fond du cœur merci.

Et en final mon frère et amis Haddad Billel.

Bensoudane Mohcene

Sommaire

Introduction Générale.....	
Chapitre I : Calcul des réseaux électriques	
I .Topologie du réseau	1
I.1 choix de la tension nominale.....	1
I.2 Choix des sections des conducteurs	2
I.3 Vérification de la section choisie d'après l'échauffement admissible	2
I.4 Calcul des puissances de circulation	3
• Méthode des puissances de contours.....	3
I.5 choix du niveau de tensions	4
I.6 choix de section.....	5
I.7 vérifications des sections d'après l'échauffement admissible.....	6
I.8 choix des transformateurs	7
I.9 calcul des puissances de charge (Sch) de chaque nœud.....	9
I.10 Les paramètres des lignes.....	11
I.11 Le calcul des nouvelles charges	12
I.12 Utilisation des unités relatives	13
I.13 détermination des paramètres de la matrice Y_{bus} (p.u).....	13
I.14 calcul des admittances de ligne	13
I.15 Détermination des tensions des nœuds	14
Chapitre II : Calcul des courants de court-circuit	
II. réseau à calculer.....	18
II.1 -Transformation du schéma de calcul.....	18
II.2-Coefficient de distribution des courants.....	20
II.3-Analyse de court circuit en régime transitoire.....	21
II.4-Court-circuit symétrique.....	23
• Réseau de THEVENIN.....	25
II.5-Court-circuit asymétrique.....	27
II.5.1-Théorie des composantes symétriques	27
II.5.2-Circuit équivalent des séquences.....	29
II.5.3-Valeurs des impédances des éléments du réseau.....	30
II.6-Calcul des niveaux de défaut.....	32
II.6.1-Défaut triphasé symétrique.....	32
II.6.2-Défaut biphasé isolé	33

II.6.3- Défaut biphasé terre.....	33
II.6.4-Défaut entre phase et la terre.....	35
II.6.5-Défaut entre phase et la terre à travers une impédance ($Z_n \neq 0$).....	36
II.7-Résultats des calculs du réseau.....	37
Chapitre III : La stabilité dynamique	
III.1-Méthode d'analyse de la stabilité dynamique.....	46
III.1.1-Méthode des aires égales.....	46
III.1.2-Dérivation de la fonction d'énergie.....	49
III.1.3-Méthode d'Euler.....	52
III.1.4- Méthode de RUNGE KUTTA	53
III.2-Application sur une machine connectée à un jeu de barre de puissance infinie.....	54
III.2.1-Données du réseau pendant le régime permanent.....	54
Conclusion générale	61

Introduction Générale

Les investissements humains et matériels affectés aux réseaux électriques sont énormes. Pour cela, le réseau électrique doit répondre à trois exigences essentielles : stabilité, économie et surtout continuité du service.

Les lignes et les câbles de distribution d'énergie électrique haute tension HTA constituent une partie essentielle d'un réseau électrique qui doit assurer la continuité de l'alimentation en électricité aux consommateurs HTA et BT. Ce qui n'est pas toujours le cas, car ces lignes sont souvent exposées à des incidents ou défauts qui peuvent interrompre ce service et engendrer des pertes financières importantes pour les industriels et des désagréments pour les simples consommateurs.

Notre travail consiste à une étude sur le régime de défaut (court-circuit) d'un réseau électrique, dans la première partie de notre travail nous avons comme données puissances maximales des charges ainsi que leurs positions géographiques.

Ces charges sont des consommateurs de la première, et la deuxième catégorie. Et comment à partir de ces données assurer la performance de la fourniture de l'énergie électrique.

Ainsi nous étudierons :

- Les caractéristiques des circuits,
- La méthode pour le calcul de courant de court-circuit
- Le calcul des niveaux des défauts.

Ce qui concerne le 3^{ème} chapitre la stabilité dynamique consistent à analyser et connaître à l'avance les variations dans le temps des grandeurs électriques en différents points d'un réseau.

Ces études ont pour but de rechercher :

- les conditions de fonctionnement du réseau pour assurer une bonne continuité d'alimentation des récepteurs,
- la puissance maximale que l'on peut secourir lors d'une perturbation,
- les valeurs optimales de réglage des éléments du système de protection,

Chapitre I
Calcul des réseaux
électriques

I. Topologie du réseau

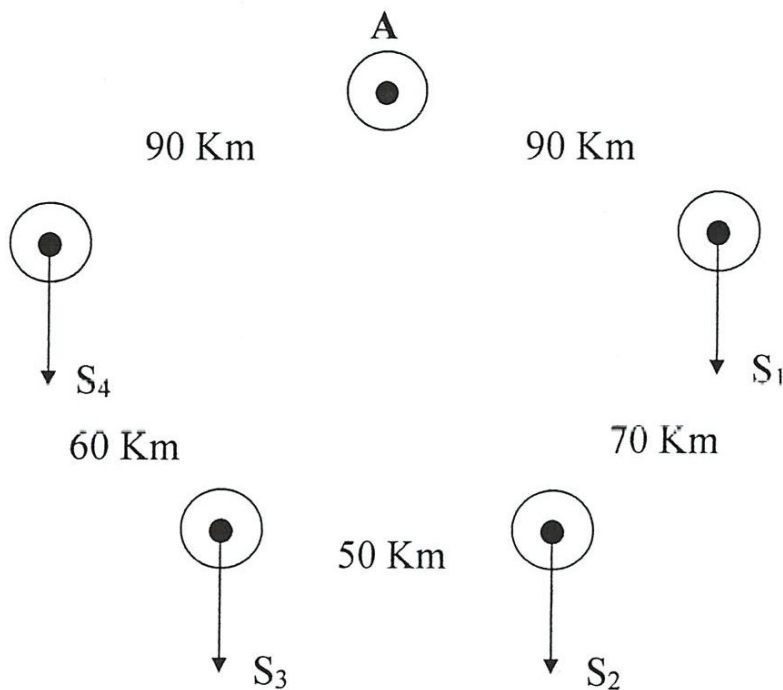


Fig. I-1-schéma de la topologie de réseau

Les puissances de charges sont données dans le tableau suivant :

S_i (MVA)	P_i (MW)	Q_i (MVAR)
S_1	70	60
S_2	100	90
S_3	90	80
S_4	120	100

Les longueurs entre les nœuds sont dans le tableau suivant:

L_{ij}	L_{a1}	L_{a4}	L_{12}	L_{23}	L_{34}	L_{a2}
L (km)	90	90	70	50	60	140

I.1 choix de la tension nominale

Le choix de la tension nominale dépend de la puissance de transit et de la longueur de la ligne, il se détermine par l'expression suivante :

$$S_i \begin{cases} L < 1000(km) \\ \text{Et} \\ p > 60(mw) \end{cases}$$

$$\text{Alors : } U_n = \sqrt{P(kw). (0,1 + 0,015. \sqrt{L(km)})}$$

$$\text{Et pour } \begin{cases} L \leq 250(\text{km}) \\ \text{Et} \\ p \leq 60(\text{mw}) \end{cases}$$

$$\text{Alors : } U_n = 4,34 \sqrt{L(kw) + 0,016. P(kw)}$$

I.2 Choix des sections des conducteurs

La section doit être choisie à partir des analyses technico-économiques

D'après :

$$F = \frac{I_{max}}{j_{eco}}$$

$$I_{max} = \frac{S}{\sqrt{3}. U_n}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad , U_n = 220 \text{ KV}$$

I_{max} : Le courant de la ligne calculé dans le régime nominal.

j_{eco} : La densité économique de courant ($j_{eco}=1A/mm^2$)

La section choisie doit être vérifiée dans les cas suivant :

L'échauffement, l'effet couronne, et la chute de tension.

Après le calcul de la section, on choisit la section **normalisée** la plus proche.

I.3 Vérification de la section choisie d'après l'échauffement admissible

Pour la vérification de l'échauffement on se base sur l'équilibre pendant l'échange entre le conducteur et le milieu extérieur.

La section normalisée choisie doit être vérifiée d'après l'échauffement admissible du conducteur qui correspond à un courant admissible selon la formule suivante :

$$I_{adm} \geq I_{av}/K_t$$

I_{adm} : Le courant admissible du conducteur.

I_{av} : Le courant de la ligne après avarie.

K_t : Coefficient tenant compte de la différence des températures réelles et normalisée du milieu ambiant, ($K_t = 1$).

Chaque section choisie doit être vérifiée pour le risque de l'apparition de l'effet couronne, par exemple $U_n = 220 \text{ KV}$ la section choisie est $F_n \geq 240 \text{ mm}^2$

I.4 Calcul des puissances de circulation

- **Méthode des puissances de contours**

On propose le sens de circulations des puissances comme montré sur la figure suivante :

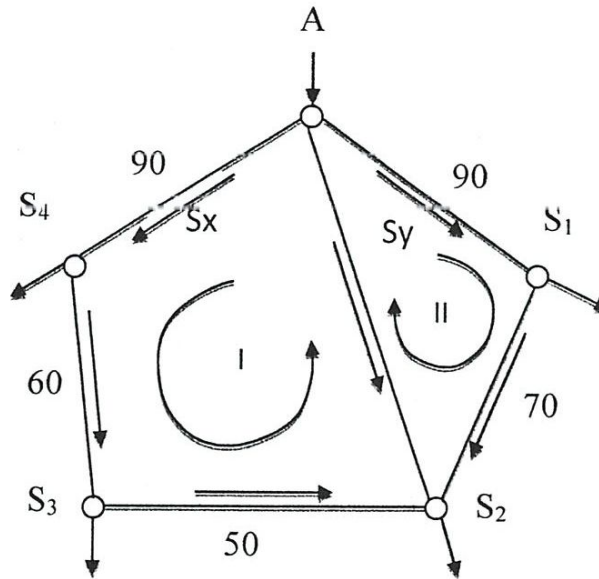


Fig. I-2- puissances de contours

- Le contour (I)

$$S_x \cdot 90 + (S_x - (120 + j100))60 + (S_x - (120 + j100 + 90 + j80))50 - (70 + j60 - S_y - S_x + (120 + j100 + 90 + j80) + 100 + j90)140 = 0$$

- Le contour (II)

$$S_y \cdot 90 + (S_y - (70 + j60))70 - (70 + j60 - S_y - S_x + (120 + j100 + 90 + j80) + 100 + j90)140 = 0$$

$$\begin{cases} S_x(140 + 90 + 60 + 50) + S_y \cdot 140 = 70900 + j61200 \\ S_x \cdot 140 + S_y \cdot 300 = 58100 + j50400 \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 340 & 140 \\ 140 & 300 \end{vmatrix} = 82400$$

$$\Delta_x = \begin{bmatrix} 70900 + j61200 & 140 \\ 58100 + j50400 & 300 \end{bmatrix} = 1313600 + j11304000$$

$$\Delta_y = \begin{bmatrix} 340 & 70900 + j61200 \\ 140 & 58100 + j50400 \end{bmatrix} = 9828000 + j8568000$$

$$S_x = 159,4174 + j137,1844 \text{ MVA}$$

$$S_y = 119,2718 + j103,9805 \text{ MVA}$$

$$S_{A4} = S_x = 159,4174 + j137,1844 \text{ MVA}$$

$$S_{43} = S_x - S_4 = 39,4174 + j37,1844$$

$$S_{32} = S_{43} - S_3 = -50,5826 - j42,8156$$

$$S_{A1} = S_y$$

$$S_{12} = S_y - S_1 = 49,2718 + j43,9805$$

$$S_{A2} = S_2 - S_{32} - S_{12} = 101,3108 + j88,8351$$

I.5 choix du niveau de tensions

- tronçon A-4 :

$$U_n = \sqrt{(159,4174 \cdot 10^3)(0,1 + 0,015\sqrt{90})} = 196,5 \text{ kv}$$

- tronçon A-2 :

$$U_{A2} = \sqrt{(101,3108 \cdot 10^3)(0,1 + 0,015\sqrt{140})} = 167,6662 \text{ kv}$$

- tronçon 4-3 :

$$U_{43} = 4,34\sqrt{60 + 0,016(39,4174 \cdot 10^3)} = 114,0585 \text{ kv}$$

- tronçon 3-2 :

$$U_{32} = 4,34\sqrt{50 + 0,016(50,5826 \cdot 10^3)} = 127,2235 \text{ kv}$$

- tronçon 1-2 :

$$U_{12} = 4,34\sqrt{70 + 0,016(49,2718 \cdot 10^3)} = 127,1505 \text{ kv}$$

- tronçon A-1 :

$$U_{A1} = \sqrt{(119,2718 \cdot 10^3)(0,1 + 0,015\sqrt{900})} = 170,0040 \text{ kv}$$

Donc la tension nominale sera : $U_n = 220 \text{ kv}$

I.6 choix de section

Calculons d'abord les courants de chaque tronçon :

$$\text{Tronçon : A4} \rightarrow I_{A4} = \frac{\sqrt{159,41^2 + 137^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} = 551,94 \quad , A \rightarrow \text{Sec} = \text{Aco } 600$$

$$I_{43} = 142,208 \text{ A}$$

$$I_{32} = 173,9148 \text{ A}$$

$$I_{A2} = 353,6074 \text{ A}$$

$$I_{A1} = 415,2541 \text{ A}$$

$$I_{12} = 173,3242 \text{ A}$$

Donc le choix des sections se fait d'après la densité économique selon la formule suivante :

$$F = I_{\max} / j_{ec}$$

Avec $j_{ec} = 1 \text{ A/mm}^2$

Les résultats sont dans le tableau suivant :

Tançons	A-1	A-2	A-4	4-3	2-3	1-2
I_{\max} (A)	415,2541	353,6074	551,94	142,208	173,9148	173,3242
F (mm ²)	415,2541	353,6074	551,94	142,208	173,9148	173,3242
ACO (mm ²)	500	400	600	240	240	240
I_{adm}	945	825	1050	605	605	605

I.7 vérifications des sections d'après l'échauffement admissible

Dans le régime après avarie, on suppose que la ligne la plus chargée (A-4) est coupée. Alors on obtient la configuration suivante :

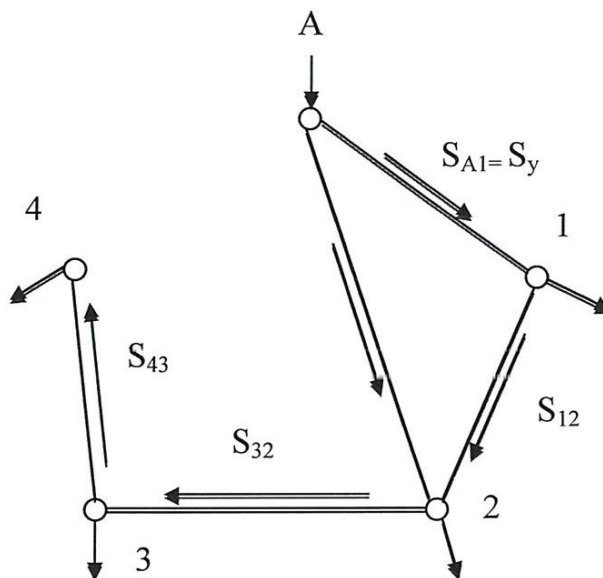


Fig. I-3- le réseau du régime d'avarie

Le schéma devient :

$$\begin{cases} S_x = S_{A1} \\ S_{12} = S_{A1} - S_1 \\ S_{A2} = (S_2 + S_3 + S_4) - S_{12} \end{cases}$$

$$S_{A2} = S_2 + S_3 + S_4 - S_x + S_1$$

$$S_{A2} = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) - S_x$$

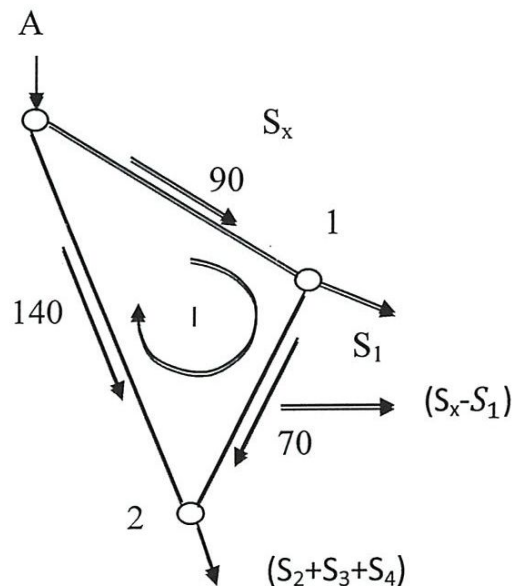
$$S_x \cdot 90 + (S_x - S_1)70 - [\sum S_i - s_x]140 = 0$$

$$(90 + 70 + 140)S_x = 70 - S_1 + 140(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)$$

$$S_x = \frac{58100 + j50400}{300}$$

$$S_x = 193,6666 + j168 \text{ MVA}$$

$$S_{12} = S_x - S_1 = 123,6666 + j108 \text{ MA}$$



$$S_{A2} = 186,3333 + j162 \text{ MVA}$$

Les courants :

$$I_{A1} = \frac{\sqrt{(193,666^2 + 168^2)10^3}}{\sqrt{3} \cdot 290} = 672,82 \text{ A}$$

$$I_{12} = \frac{\sqrt{(123,666^2 + 108^2)10^3}}{\sqrt{3} \cdot 220} = 430 \text{ A}$$

$$I_{A2} = \frac{\sqrt{(186,335^2 + 162^2)10^3}}{\sqrt{3} \cdot 220} = 674,9 \text{ A}$$

Toutes les sections sont vérifiées.

I.8 choix des transformateurs

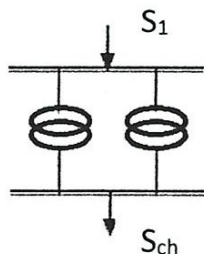
On utilise dans les postes de transformation du réseau haute tension d'habitude deux transformateurs de puissance (S_n) choisie d'après la formule suivante :

$$S_n \geq (0,65 \div 0,7) S'_{\max}$$

Ou :

S'_{\max} : puissance maximale de poste

Pour les variantes qu'on a proposées, on installe dans chaque poste de transformation deux transformateurs parce que tous les consommateurs sont de la première et la deuxième catégorie.



Pour les réseaux haute tension les limites admissibles de la tension est de $\pm 10\%$ de la tension nominale.

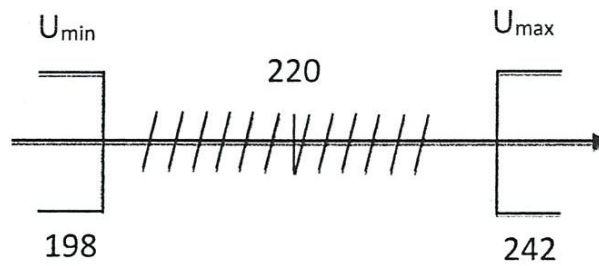


Fig. I-4 l'intervalle de la limite admissible

Le calcul du S_N dans chaque poste est représenté dans le tableau suivant :

Poste	N ^{br} de TR	$S = 0,7 * S_{max} (MVA)$	$S_N (MVA)$
1	2	$S_1 = 0,7\sqrt{70^2 + j60^2} = 64,53$	80
2	2	$S_2 = 0,7\sqrt{100^2 + 90} = 94,17$	100
3	2	$S_3 = 0,7\sqrt{90^2 + 80^2} = 84,29$	100
4	2	$S_4 = 0,7\sqrt{120^2 + 100^2} = 109,34$	125

Les paramètres de ces transformateurs :

S_N MVA	U_N KV	U_{cc} (%)	ΔP_{cc} (KV)	ΔP_0 (KW)	I_0 %	r_t (Ω)	X_t (Ω)	ΔQ_0 (kVAR)
125	242	11	380	135	0,5	1,27	46,5	625
100	230	12	360	115	0,7	1,9	63	700
80	242	11	320	105	0,6	2,64	72,8	480

I.9 calcul des puissances de charge (Sch) de chaque nœud

- Poste (1) :

On à $S_1 = \Delta S_{TRI} + S_{chi}$

Et : $\Delta S_{TRI} = (\Delta P_0 + \Delta P_v) + j(\Delta Q_0 + \Delta Q_v)$

Où $S_{ch} = 70 + j60 \text{ MVA}$

D'après les paramètres du TR :

$$\begin{aligned} \Delta P_0 &= 105 \text{ Kw} \\ \Delta Q_0 &= 480 \text{ Kvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} * \frac{R_t}{2} + 2\Delta P_0 \\ &= \frac{70^2 + 60^2}{220^2} * \frac{2,64}{2} + 2 * \frac{105}{1000} \end{aligned}$$

$$\Delta P_v = 0,44 \text{ MW}$$

$$\text{et } \Delta P_v = \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} * \frac{X_t}{2} + 2\Delta Q_0$$

$$\Delta Q_v = 7,352 \text{ MVAR}$$

Donc $\Delta S_{TRI} = 0,59 + j7,832 \text{ MVA}$

$$S_1 = \Delta S_{TRI} + S_{ch1}$$

$$S_1 = 70,59 + j67,832 \text{ MVA}$$

- Poste (2) :

$$\begin{aligned} \Delta P_0 &= 115 \text{ kw} \\ \Delta Q_0 &= 700 \text{ kvar} \end{aligned}$$

$$\Delta P_v = 0,585 \text{ MW}$$

$$\text{ET } \Delta P_v = 13,18 \text{ MVAR}$$

$$\text{Donc } S_2 = 100,7 + j103,88 \text{ MVA}$$

- Poste (3) :

$$\begin{aligned}\Delta P_0 &= 115 \text{ kw} \\ \Delta Q_0 &= 700 \text{ kvar}\end{aligned}$$

$$\Delta P_v = 3,02 \text{ MW}$$

$$\text{ET } \Delta Q_v = 10,83 \text{ MVAR}$$

$$\text{Donc } S_3 = 93,135 + j91,530 \text{ MVA}$$

- Poste (4) :

$$\begin{aligned}\Delta P_0 &= 135 \text{ kw} \\ \Delta Q_0 &= 625 \text{ kvar}\end{aligned}$$

$$\Delta P_v = 0,59 \text{ MW}$$

$$\text{et } \Delta Q_v = 12,97 \text{ MVAR}$$

$$\text{Donc } S_4 = 120,725 + j113,6 \text{ MVA}$$

Donc les nouvelles puissances de charges de notre réseau deviennent comme suite :

$$S_1 = 70,59 + j67,832 \text{ MVA}$$

$$S_2 = 100,7 + j103,88 \text{ MVA}$$

$$S_3 = 93,135 + j91,530 \text{ MVA}$$

$$S_4 = 120,725 + j113,6 \text{ MVA}$$

I.10 Les paramètres des lignes

D'après les sections choisies, les paramètres des lignes sont donnés dans le tableau suivant :

Lignes	F (mm ²)	L (km)	r ₀ (Ω/km)	x ₀ (Ω/km)	B ₀ .10 ⁻⁶ (Ω ⁻¹ /km)	R (Ω)	X (Ω)	B ₀ .10 ⁻⁶ (Ω ⁻¹)
A-1	500	90	0,065	0,41	2.79	5.85	36,9	251.1
A-2	400	140	0.08	0.41	2.43	11.2	57.4	382.2
1-2	240	70	0,13	0,43	2,66	9.1	30.1	186.2
2-3	240	50	0,13	0,43	2,66	5.6	21.5	133
3-4	240	60	0,13	0,43	2,66	7,8	25.8	159.6
A-4	600	90	0,053	0,41	2,84	4.77	36.9	255.6

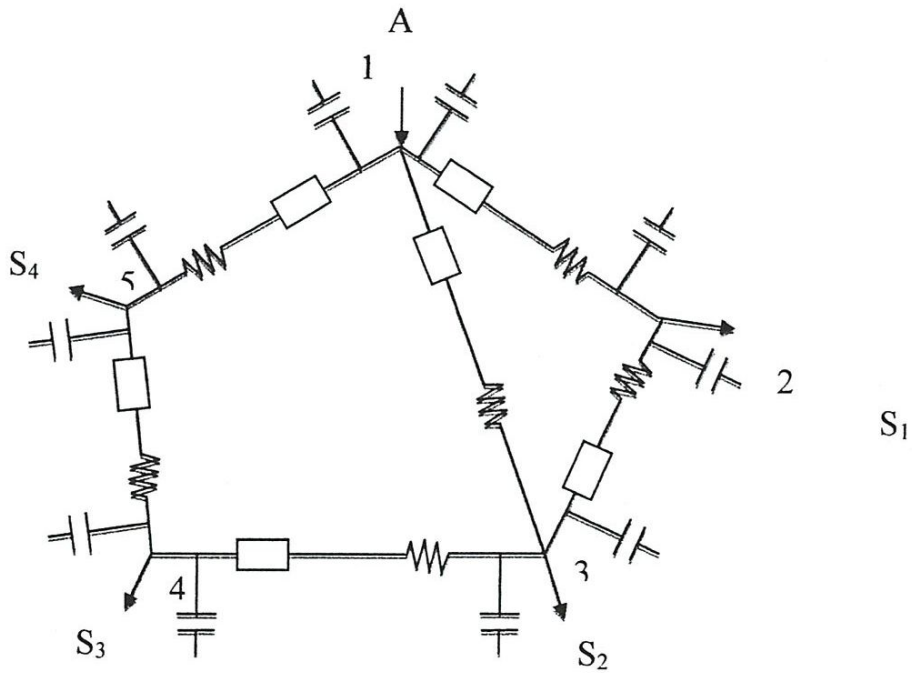
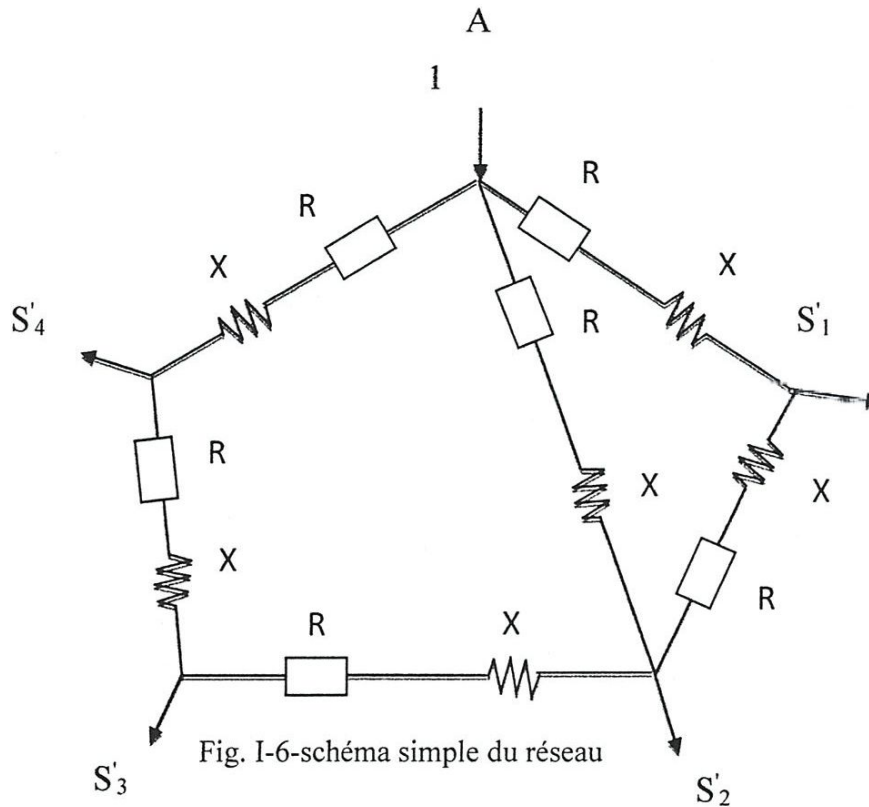


Fig. I-5-schéma équivalent du réseau

Ainsi on peut modifier le schéma comme suit :



I.11 Le calcul des nouvelles charges

$$S'_1 = S_1 - jQ_{v1}$$

$$\text{Avec : } Q_{c1} = \frac{b_{A1}}{2} * U_n^2 = \frac{251,1}{2} * (220)^2 = 6,076 \text{ MVA}$$

$$S'_1 = 70 + j53,924 \text{ MVA}$$

$$S'_2 = S_2 - jQ_{CA2}$$

$$S'_2 = 100 + j80,751 \text{ MVA}$$

$$S'_3 = S_3 - jQ_{C23} - jQ_{C34}$$

$$S'_3 = 90 + j72,93 \text{ MVA}$$

$$S'_4 = S_4 - jQ_{C34} - jQ_{CA4}$$

$$S'_4 = 120 + j89,975 \text{ MVA}$$

D'après le calcul en obtient la matrice Y_{bus} comme suite :

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} 5.2811 & -33.8187i & -2.0285 + 12.7949i & -1.5849 + 8.1228i & 0 & -1.6677 + 12.9010i \\ -2.0285 + 12.7949i & 6.4827 - 27.5281i & -4.4542 + 14.7331i & 0 & 0 & 0 \\ -1.5849 + 8.1228i & -4.4542 + 14.7331i & 12.2750 - 43.4823i & -6.2359 + 20.6264i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6.2359 + 20.6264i & 11.4324 - 37.8150i & -5.1966 + 17.1886i & 0 \\ -1.6677 + 12.9010i & 0 & 0 & -5.1966 + 17.1886i & 0 & 6.8642 - 30.0896i \end{pmatrix}$$

I.15 Détermination des tensions des nœuds

Pour obtenir une solution finale qui dépend de la formule matrice admittance Y la matrice peut être symétrique, creuse ou remplie.

$$Y.U = I \text{ (en unité relative)}$$

Ainsi :

$I = \frac{\hat{S}}{\hat{U}}$ Donc le modèle change sa forme et devient :

$$Y.U = \frac{\hat{S}}{\hat{U}}$$

Pour calculer les tensions des nœuds nous avons choisi la méthode de Gaus-Seidel.

Donc la tension du nœud (k) est donnée par l'expression suivante :

$$U_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left[- \sum_{j=1}^n Y_{kj} U_j^{(i+1)} - \sum_{j=k+i}^n Y_{kj} U_j^{(i)} + \frac{\hat{S}}{\hat{U}} \right]$$

Ayant comme valeurs initiales de tensions :

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = \dot{U}_4 = 220 \angle 0^\circ \text{ KV}$$

Et en valeurs relatives :

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = \dot{U}_4 = 1 \text{ pu}$$

Et : $U_A = 1,1$

- Résultats d'exécution du programme.

Affichage de quinze itérations :

U_A	U_1	U_2	U_3	U_4
1.1000	1.0214 - j0.0231	1.0025 - j0.0257	0.9771 - j0.0305	0.9928 - j0.0541
1.1000	1.0238 - j0.0360	0.9924 - j0.0442	0.9672 - j0.0647	0.9866 - j0.0724
1.1000	1.0187 - j0.0460	0.9858 - j0.0637	0.9600 - j0.0830	0.9824 - j0.0827
1.1000	1.0155 - j0.0567	0.9810 - j0.0757	0.9551 - j0.0938	0.9795 - j0.0889
1.1000	1.0131 - j0.0632	0.9777 - j0.0829	0.9517 - j0.1002	0.9775 - j0.0926
1.1000	1.0114 - j0.0671	0.9754 - j0.0872	0.9494 - j0.1041	0.9762 - j0.0948
1.1000	1.0101 - j0.0694	0.9738 - j0.0898	0.9477 - j0.1064	0.9752 - j0.0961
1.1000	1.0093 - j0.0708	0.9727 - j0.0914	0.9466 - j0.1079	0.9745 - j0.0970
1.1000	1.0087 - j0.0717	0.9719 - j0.0923	0.9458 - j0.1087	0.9741 - j0.0975
1.1000	1.0083 - j0.0722	0.9714 - j0.0929	0.9453 - j0.1093	0.9737 - j0.0978
1.1000	1.0080 - j0.0726	0.9710 - j0.0933	0.9449 - j0.1096	0.9735 - j0.0980
1.1000	1.0078 - j0.0728	0.9708 - j0.0935	0.9447 - j0.1098	0.9734 - j0.0982
1.1000	1.0077 - j0.0729	0.9706 - j0.0936	0.9445 - j0.1099	0.9733 - j0.0982
1.1000	1.0076 - j0.0730	0.9705 - j0.0937	0.9444 - j0.1100	0.9732 - j0.0983
1.1000	1.0075 - j0.0730	0.9704 - j0.0938	0.9443 - j0.1101	0.9731 - j0.0983

Donc on a:

$$U_1 = 1.0075 - j0.0730 \quad \text{p.u}$$

$$U_2 = 0.9704 - j0.0938 \quad \text{p.u}$$

$$U_3 = 0.9443 - j0.1101 \quad \text{p.u}$$

$$U_4 = 0.9731 - j0.0983 \quad \text{p.u}$$

Les tensions de la ligne en unité réelle :

$$U1=220.165 -j9.46 \quad \text{kV}$$

$$U2=213.488 -j20.636 \quad \text{kV}$$

$$U3=207.746 -j24.222 \quad \text{kV}$$

$$U4=214.082 -j21.626 \quad \text{kV}$$

Les modules des tensions :

$$U1=220.3681 \quad \text{kV}$$

$$U2=214.4830 \quad \text{kV}$$

$$U3=209.1530 \quad \text{kV}$$

$$U4=215.1715 \quad \text{kV}$$

Chapitre II

Calcul des courants de court-circuit

II. réseau à calculer

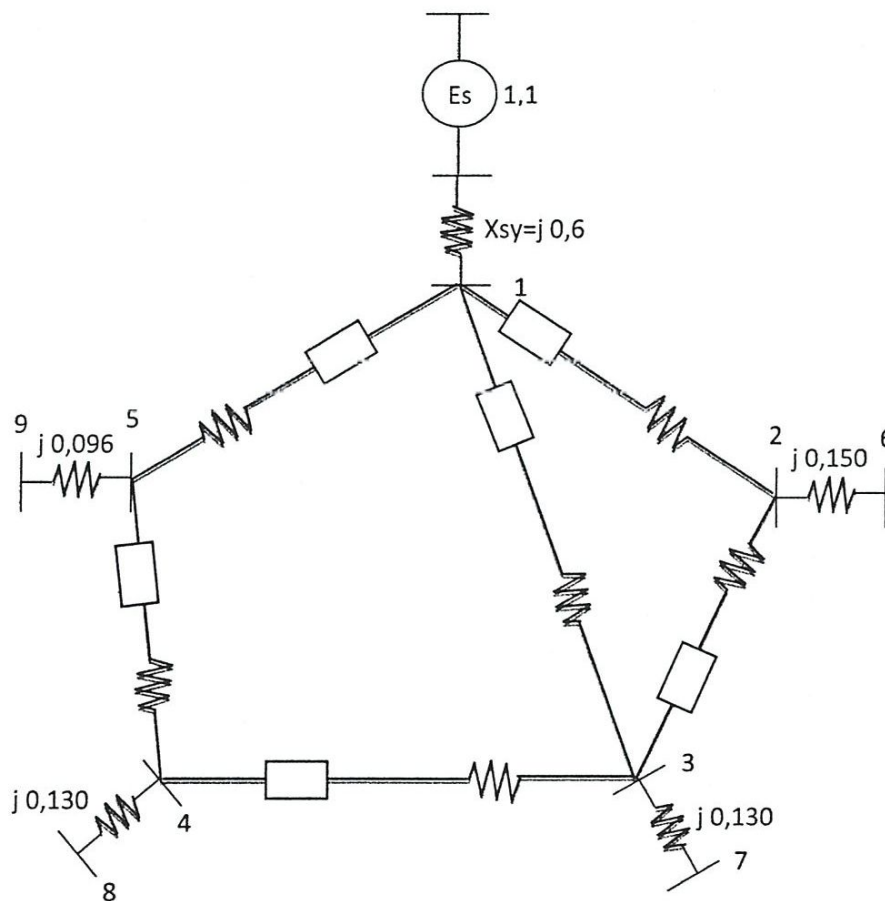


Fig. II-1-schéma simple du réseau

II.1 -Transformation du schéma de calcul

Les calculs de court-circuit se basent sur la transformation du schéma de système (Figure II.1 jusqu'à sa forme la plus simple, composée d'une F.é.m. équivalent, et d'une réaction jusqu'au point de court-circuit << k >> (Figure II.2)

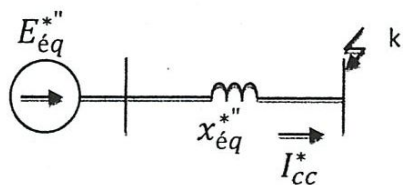
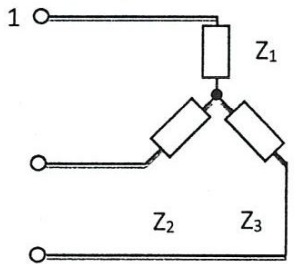
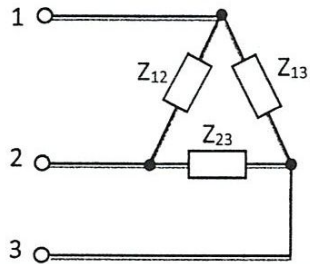
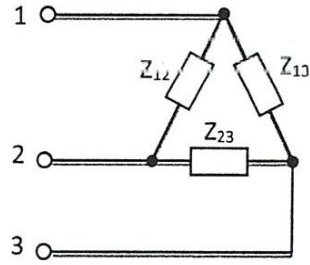
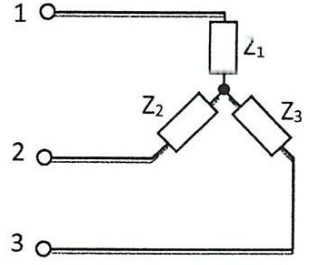
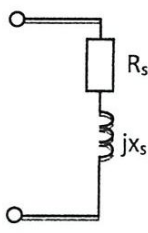
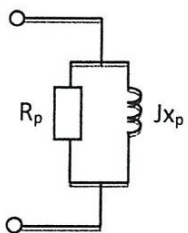
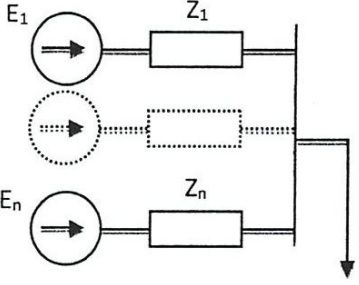
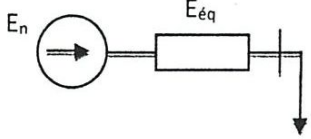


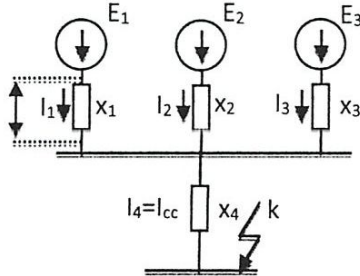
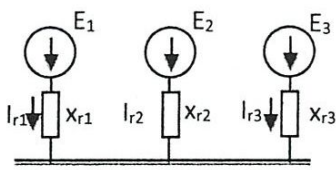
Fig. II.2:formes réduits et simplifiées des schémas équivalents de calcul de courant de c-c

Les transformations à relise pour trouver la réactance équivalent sont résume au tableau suivant :

Schéma initial	Schéma équivalent	Formule
		$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}$
		$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$
		$R_p = \frac{r_s^2 + x_s^2}{r_s}$ $X_p = \frac{r_s^2 + x_s^2}{x_s}$
		$Y_{éq} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$ $Z_{éq} = \frac{1}{Y_{éq}}$ $E_{éq} = \frac{E_1 Y_1 + \dots + E_n Y_n}{Y_{1n} + \dots + Y_n}$

II.2-Coefficient de distribution des courants

Pour certaine formes des transformations obtenues (Figure II.4), il est nécessaire d'utiliser les coefficients de distribution du courant sur les branches parallèles. Pour déterminer les courants impliqués séparément par les sources

$I_1 + I_2 + I_3 = I_{cc}$ $\frac{\Delta U}{x_1} + \frac{\Delta U}{x_2} + \frac{\Delta U}{x_3} = I_{cc}$ <p>Avec :</p> $\Delta U = I_{cc} \cdot x_{\acute{e}q}$	 <p>(Figure II.3)</p>
<p>On déduit donc :</p> $\left[\frac{x_{\acute{e}q}}{x_1} + \frac{x_{\acute{e}q}}{x_2} + \frac{x_{\acute{e}q}}{x_3} \right] = 1$ <p>On pose</p> $I_1 = I_{cc} \frac{x_{\acute{e}q}}{x_1} = I_{cc} \cdot k_1; \left(k_1 = \frac{x_{\acute{e}q}}{x_1} \right)$ $I_2 = I_{cc} \frac{x_{\acute{e}q}}{x_2} = I_{cc} \cdot k_2; \left(k_1 = \frac{x_{\acute{e}q}}{x_2} \right)$ $I_3 = I_{cc} \frac{x_{\acute{e}q}}{x_3} = I_{cc} \cdot k_3; \left(k_1 = \frac{x_{\acute{e}q}}{x_3} \right)$	 <p>(Figure II.4)</p>

On obtient

$$I_1^* + I_2^* + I_3^* \text{ par rapport au courant } I_{cc}$$

$$I_1^* + I_2^* + I_3^* = k_1 + k_2 + k_3 = 1$$

(k_1, k_2, k_3 ; coefficient diviseur de courant)

Ces coefficients permettant de déterminer la réactance résultante de chaque branche entre la F.é.m. correspondante et le point de court-circuit.

Finalement on déduit le schéma le plus simple utilisé pour le calcul du courant de court-circuit I_{cc} (figure II.5)

Avec :

$$x_r = x_{\acute{e}q} + x_4$$

Et

$$x_r = k_1 \cdot x_{r1} = k_2 \cdot x_{r2} = k_3 \cdot x_{r3}$$

$$x_{r1} = \frac{x_r}{k_1}; x_{r2} = \frac{x_r}{k_2}; x_{r3} = \frac{x_r}{k_3}$$

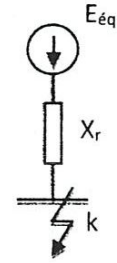


Fig. II.5: formes réduites de schéma équivalent de calcul d'un c-c

II.3-Analyse de court circuit en régime transitoire

On suppose le schéma de la Figure II.6

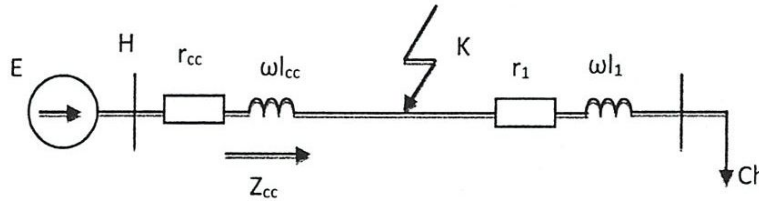


Fig II.6 : schéma équivalent unifilaire d'un c-c triphasé

D'une manière générale les régimes de court-circuit sont caractérisés par deux temps :

Le régime transitoire et le régime permanent.

Le régime transitoire est le temps du changement d'état du système d'un régime permanent initial à un régime permanent de court-circuit.

La tension est donnée par l'équation différentielle :

$$U(t) = r_{cc} \cdot i(t) + L_{cc} \cdot \frac{di(t)}{dt} \rightarrow (2.1)$$

La solution de l'équation (2.1) comporte deux composantes.

$$i(t) = i_f + i_l \rightarrow (2.2)$$

Ou :

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\alpha = \text{artg} \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}$$

$Z_{cc} = r_{cc} + j\omega L_{cc}$, Impédance de court-circuit (Fig. II.7)

x_{Σ}, r_{Σ} : L'inductance et la résistance sommaire d'une

Phase de la source jusqu'à la charge.

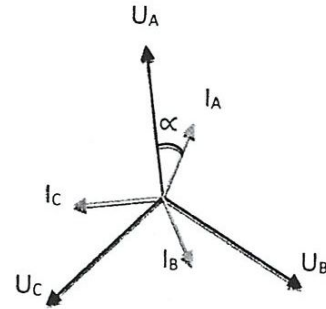


Fig. II.7 : diagramme vectoriel,
Système triphasé des tensions

i_f, i_p : Courant instantané forcé par la tension $U(t)$ dans le circuit de défaut indépendamment du régime transitoire (périodique).

i_l : Courant libre débité par l'inductance $\ll L \gg$ pendant le changement d'état.

On déduit :

$$i_p = i_f = \frac{U(t)}{Z_{cc}} = \frac{U_m}{Z_{cc}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) \rightarrow (2.3)$$

Pendant le court-circuit, $U(t) \rightarrow (2.4)$

La solution de l'équation (2.4) est :

$$i_l(t) = I_0 \cdot e^{\frac{t}{T_a}} \rightarrow (2.5)$$

Avec T_a constante de temps

$$T_a = \frac{L_{cc}}{r_{cc}} = \frac{x_{cc}}{\omega \cdot r_{cc}}$$

D'après la relation (2.3) et (2.5) on déduit :

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) + I_0 \cdot e^{\frac{t}{T_a}} \rightarrow (2.6)$$

Pour $t = 0$:

$$i(0) = \frac{U_m}{Z_{cc}} \sin(\alpha - \varphi_{cc}) + I_0 \Rightarrow i_0 = i(0) - \frac{U_m}{Z_{cc}} \sin(\alpha - \varphi_{cc}) \rightarrow (2.7)$$

$I(0)$: peut être déterminé par la relation (2.3) avant le court-circuit ce qui donne :

$$i(0) = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \rightarrow (2.8)$$

Avec φ : déphasage en régime normal avant la perturbation.

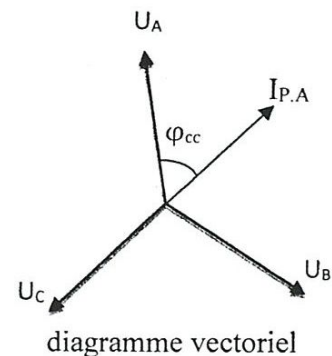


diagramme vectoriel

En remplace l'équation (2. 8) dans (2. 7) et (2. 6) on déduit finalement l'équation :

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) + \left[\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) - \frac{U_m}{Z_{cc}} \sin(\alpha - \varphi_{cc}) \right] \cdot e^{\frac{t}{\tau_a}} \rightarrow (2.9)$$

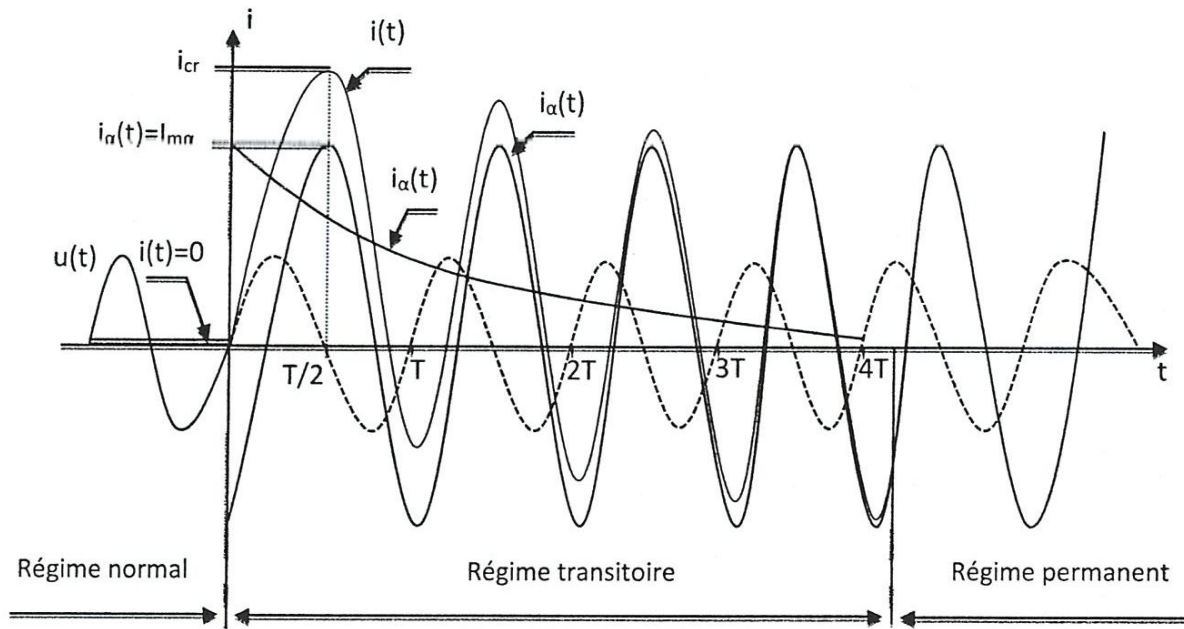


Figure II.8 Cas extrême d'un court-circuit triphasé symétrique.

II.4-Court-circuit symétrique

Si on a un réseau de taille quelconque. Suivant ce réseau est composé de n jeux de barres. Un court-circuit symétrique est appliqué au jeu de barre (q), on veut calculer :

- 1) le courant de défaut au point de court-circuit (I_q^f).
- 2) les tensions de tous les jeux de barres après le défaut (V_i^f).
- 3) les courants de défaut dans les lignes (I_{ij}^f).

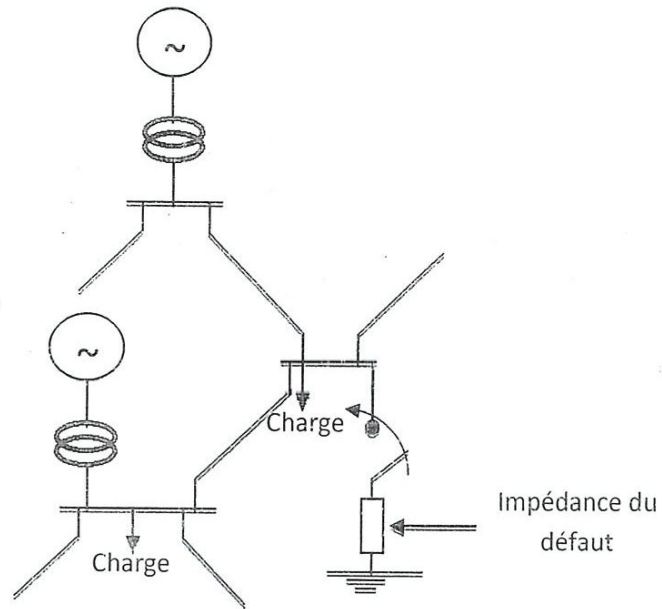


Fig. II.9 Schéma du réseau

On doit connaitre les tensions de chaque jeu de barre avant le défaut.

$$V_{bus}^0 = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ V_2^0 \\ V_3^0 \\ V_4^0 \end{bmatrix}$$

4 Réseau de THEVENIN

Pour déterminer le réseau de THEVENIN on doit éliminer toutes les sources de tensions, et le réseau devient alimenter par la F.é.m. THEVENIN $E_t = V_q^0$

(Tension du jeu de barres q avant le défaut). Les tensions des nœuds dans ce cas sont appelées les tensions de THEVENIN.

$$V_t = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = Z_{bus} \cdot I^f$$

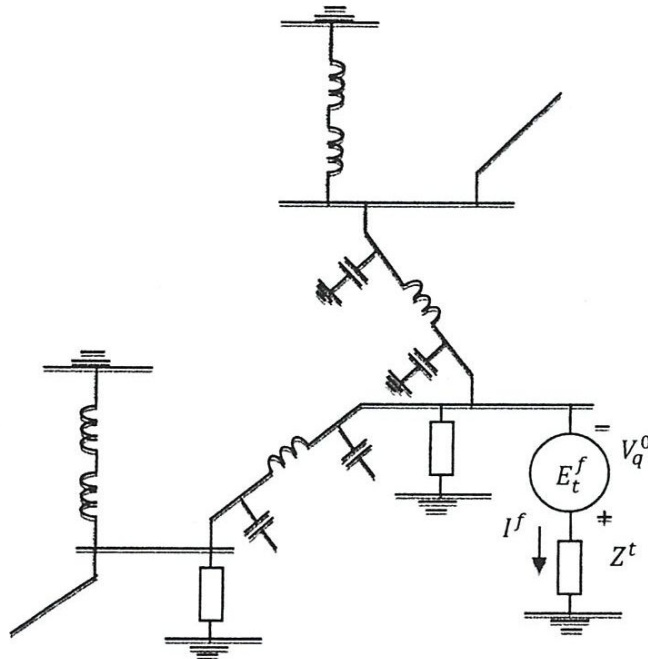


Fig. II.10 Réseau de THEVENIN

Les tensions des jeux de barres après le défaut.

$$V_{bus}^f = V_{bus}^0 + V_t$$

Et

$$V_{bus} = Z_{bus} \cdot I_{bus} \text{ et } Z_{bus} = [Y_{bus}]^{-1}$$

$$I_{bus} = I^f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -I_q^f \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{bus}^f = V_{bus}^0 + Z_{bus} \cdot I^f$$

V_{bus}^f : Tension de défaut après le court-circuit.

V_{bus}^0 : Tension de défaut avant le court-circuit.

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \dots & \dots & Z_{qn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

$$V_q^f = Z^f \cdot I^f$$

Nous obtenons (m+1) équation et nous avons (n+1) inconnus ($V_1^f, V_2^f, V_q^f, V_n^f$ et I_q^f)

$$V_1^f = V_1^0 - Z_{1q} I^f$$

$$V_2^f = V_2^0 - Z_{2q} I^f$$

$$V_i^f = V_i^0 - Z_{iq} I^f$$

$$V_q^f = V_q^0 - Z_{qq} I^f$$

$$V_n^f = V_n^0 - Z_{nq} I^f$$

D'après

$$V_q^f = Z_f I^f$$

$$V_q^f = V_q^0 - Z_{qq} I^f$$

$$Z_f I^f = V_q^0 - Z_{qq} I^f \Rightarrow I^f = \frac{V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

On remplace dans les équations

$$V_i^f = V_i^0 - Z_{iq} I^f = V_i^0 - Z_{iq} \frac{V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

$$V_0^f = V_0^0 - Z_{0q} \frac{Z_{2q}}{Z_f + Z_{qq}} V_q^0$$

$$V_i^f = V_q^0 - \frac{Z_{iq}}{Z_f + Z_{qq}} V_q^0$$

$$V_q^f = V_q^0 - \frac{Z_{qq}}{Z_f + Z_{qq}} V_q^0 = \frac{Z_f}{Z_f + Z_{qq}} \cdot V_q^0$$

$$V_n^f = V_n^0 - \frac{V_q^0}{Z^f + Z_{qq}} V_q^0$$

$$I^f = \frac{V_q^0}{Z^f + Z_{qq}}$$

$$V_i^f = V_i^0 - \frac{Z_{iq}}{Z^f + Z_{qq}} V_q^0 (i = 1 \dots n)$$

- Remarque :

Si l'impédance du défaut $Z^f = 0$.

$$I^f = \frac{V_q^0}{Z_{qq}}$$

$$V_i^f = V_i^0 - \frac{Z_{iq}}{Z_{qq}} V_q^0 (i = 1 \dots n) i \neq q$$

$$V_i^f = 0$$

II.5-Court-circuit asymétrique

II.5.1-Théorie des composantes symétriques

La définition des composantes symétriques repose sur l'équivalence entre un système Triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, Inverse et homopolaire (Figure II.11).

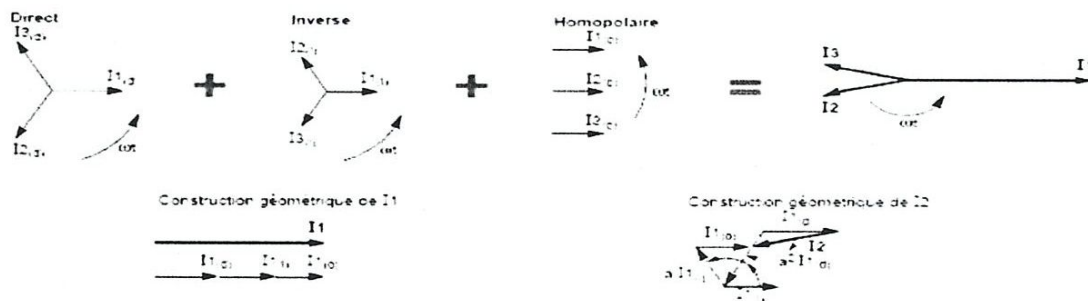


Fig. II.11 –Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant Les trois systèmes équilibrés

- **Le système Direct** (Positif ou de séquenced'ordre1): consiste en trois Vecteurs de même module triphasé de 120° et ayant la même séquence que le système d'origine.

En prenant le vecteur V_a comme référence et sachant que l'opérateur(a):

$$a = -0,5 + j 0,866 = 1 \angle 120^\circ$$

Il vient alors:

$$V_{a1} = V_1$$

$$V_{b1} = V_1 \angle 240^\circ = a^2 \cdot V_1$$

$$V_{c1} = V_1 \angle 120^\circ = a \cdot V_1$$

- **Le système Inverse** (Négatif ou de séquence d'ordre 2): consiste en trois Vecteurs de même module déphasé de 120° mais de séquence opposée au système d'origine.

$$V_{a2} = V_2$$

$$V_{b2} = V_2 \angle 120^\circ = a \cdot V_2$$

$$V_{c2} = V_2 \angle 240^\circ = a^2 \cdot V_2$$

- **Le système homopolaire** (Zéro ou de séquence d'ordre 0): ce système est formé de trois vecteurs ayant la même amplitude et le même angle de phase, ils tournent aussi dans le même sens et à la même vitesse que les vecteurs du système original, on leur attribue l'indice «0»

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0$$

Autrement dit un système triphasé déséquilibré constitué de trois vecteurs V_a, V_b, V_c peut s'écrire en fonction des trois systèmes direct, inverse, homopolaire selon:

$$V_a = V_1 + V_2 + V_0$$

$$V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0$$

$$V_c = a V_1 + a^2 V_2 + V_0$$

Pour déterminer V_1, V_2 et V_0 en fonction de V_a, V_b et V_c on a deux méthodes

- 1^{er} méthode: utiliser la matrice inverse $[T]^{-1}$
- 2^{ème} méthode : utiliser $1 + a + a^2 = 0$

on aura :

$$V_1 = \frac{1}{3} [V_a + aV_b + a^2V_c]$$

$$V_2 = \frac{1}{3} [V_a + a^2V_b + aV_c]$$

$$V_0 = \frac{1}{3} [V_a + V_b + V_c]$$

II.5.2-Circuit équivalent des séquences

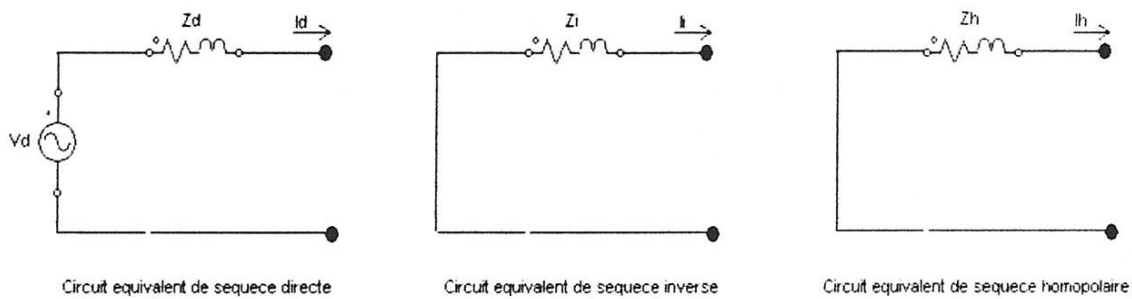


Fig. II.12 Circuit équivalent des séquences

• **Remarque :**

Dans ce qui suit-on utilise la notation suivante pour les composantes symétriques.

Composante directe (indice : d)

Composante inverse (indice : i)

Composante homopolaire (indice : h)

$$V_d = V_d^p - Z_d \times I_d$$

$$V_i = 0 - Z_i \times I_i$$

$$V_h = 0 - Z_h \times I_h$$

Ou

- V_d^p La tension préexistante (avant le défaut) au point de défaut
- Z_d, Z_i, Z_h Les impédances équivalentes au réseau dans les trois systèmes.

II.5.3-Valeurs des impédances des éléments du réseau

Remarques générales concernant les impédances directes :

Z_d est l'impédance directe d'un élément, elle correspond à l'impédance mesurée lorsqu'on lui applique un système de tensions triphasées aux bornes de trois phases. Elle est identique à l'impédance Z_{cc} utilisée pour le calcul des courants de court-circuit triphasé symétrique. En effet, lors d'un court-circuit triphasé symétrique, le système direct de tensions de l'alimentation est appliqué aux éléments du réseau parcourus par le courant de court-circuit. On a donc la relation $Z_d = Z_{cc}$ pour tous les éléments du réseau.

Remarques générales concernant les impédances inverses

Le caractère symétrique des câbles, des lignes et des transformateurs entraîne que l'impédance directe est égale à l'impédance inverse pour ces éléments.

On a donc la relation $Z_i = Z_d = Z_{cc}$ pour tous les éléments du réseau autres que les machines tournantes.

Remarques générales concernant les impédances homopolaires

Elle est directement liée au régime du neutre du distributeur:

-Si le neutre est mis à la terre par une bobine de Petersen, l'impédance homolaire est considérée comme infinie, car le courant de défaut à la terre est nul.

-Si le neutre est mis directement à la terre, l'impédance homolaire est à peu près égale à l'impédance directe ;

-Si le neutre est mis à la terre par résistance, l'impédance homolaire est à peu près égale à 3 fois cette résistance, car les impédances du transformateur et des liaisons sont négligeables devant la résistance de limitation.

$$Z_0 = 3Z_n \quad \text{avec} \quad Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_L}$$

I_L : courant de limitation

- **Impédance des alternateurs**

Pour les alternateurs, au lieu de donner les valeurs des impédances caractéristiques (X_d , X'_d , X''_d , X_i , X_0) en ohms, les constructeurs donnent celles-ci en %.

X_d est la valeur du moment de défaut et continuer brièvement;

X'_d , X''_d est la valeur prise par le générateur après le défaut.

- **Impédance des transformateurs**

Les valeurs pour les trois X_d , X_i , X_0 Sont souvent égale.

⚡ **Impédance homopolaire**

Pour les transformateurs, l'impédance homopolaire dépend des possibilités de rébouclage des courants de défauts à la terre.

La figure. II.13 indique l'impédance homopolaire des transformateurs en fonction des modes de couplage.

Groupement		Schéma unifilaire équivalent	Valeur de la réactance homopolaire du transformateur, vue des bornes	
Primaire	Secondaire		primaires 1	secondaires 2
			Infinie	Infinie
			Infinie	Infinie
			F. L. : infinie F. F. : $X_{11} = 10 \text{ à } 15 \text{ fois } X_{ce}$	F. L. : infinie F. F. : infinie
			$X_{12} = X_{ce}$	$X_{12} = X_{ce}$
			Infinie	Infinie
			$X_{12} = X_{ce}$	Infinie

Fig. II.13 Impédance homopolaire des transformateurs

• **Impédance des lignes**

Réactance directe des lignes aériennes

La réactance linéique des lignes aériennes est proche de celle du vide $\mu_0 \omega$ ($\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$).

Les valeurs à retenir sont :

- $X=0,3 \Omega/\text{Km}$ pour les lignes BT ou HTA

- $X=0,4 \Omega/\text{Km}$ pour les lignes HTB

La réactance homopolaire X_0 des lignes aériennes est à peu près égale à 3 fois la réactance directe : $X_0 = 3X_d$

II.6-Calcul des niveaux de défaut

II.6.1-Défaut triphasé symétrique

- Expression du défaut

$$V_a = V_b = V_c = 0 \text{ (Phases en défaut)}$$

- Traduction en grandeurs symétriques

$$V_d = V_i = V_h = 0$$

$$I_d = \frac{V_d^p}{Z_d}$$

$$I_i = I_h = 0$$

- Valeur du courant de défaut triphasé :

$$I_{mcc} = I_{3\phi cc} = I_d = \frac{v_d^p}{Z_d}$$

- Retour aux grandeurs de phase

$$V_a = V_b = V_c = 0$$

$$I_a = \frac{V_d^p}{Z_d}$$

$$I_b = a^2 \frac{V_d^p}{Z_d}$$

$$I_c = a \frac{V_d^p}{Z_d}$$

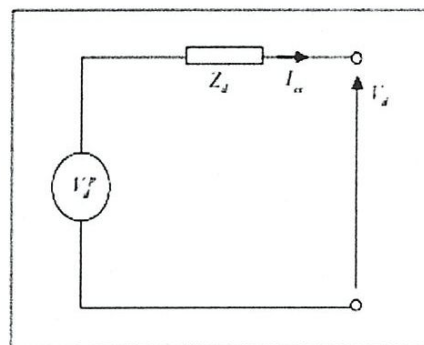
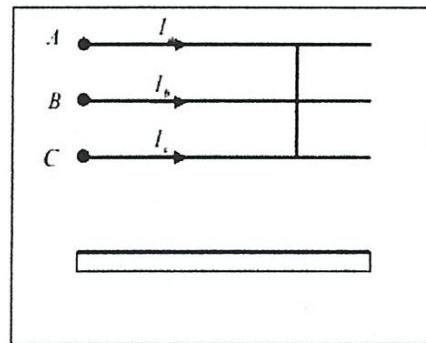


Fig. II.14 Défaut triphasé symétrique

III.6.2-Défaut biphasé isolé

- Expression du défaut

$$V_b = V_c \quad , \quad V_{bc} = 0 \quad , \quad I_b = -I_c \text{ (Phases en défaut)}$$

$$I_a = 0 \text{ (Phase saine)}$$

- Traduction en grandeurs symétriques

$$V_{bc} = V_{bn} + V_{nc} = (a^2 v_d + a v_i + v_h) - (a v_d + a^2 v_i + v_h) = 0$$

$$V_{bc} = v_d(a^2 - a) + v_i(a - a^2) + v_h(1 - 1) = 0$$

$$\rightarrow v_d(a^2 - a) = v_i(a - a^2) \rightarrow v_d = v_i$$

$$\text{Implique que } V_d^p - Z_d \cdot I_d = -Z_i \cdot I_i$$

$$I_d = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) = \frac{1}{3}(a - a^2) I_b = j \frac{1}{\sqrt{3}} I_b$$

$$I_i = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) = \frac{1}{3}(a^2 - a) I_b = -j \frac{1}{\sqrt{3}} I_b$$

$$I_h = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0$$

$$\text{Donc : } I_d = -I_i$$

- Soit d'après

$$V_d^p - Z_d \cdot I_d = -Z_i \cdot I_i \rightarrow I_d = \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$

- Retour aux grandeurs de phase :

$$I_a = 0$$

$$I_b = -j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$

$$I_c = j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$

III.6.3- Défaut biphasé terre

- Expression du défaut

$$V_b = V_c = 0 \quad I_b = -I_c \text{ (Phases en défaut)}$$

$$I_a = 0 \text{ (Phase saine)}$$

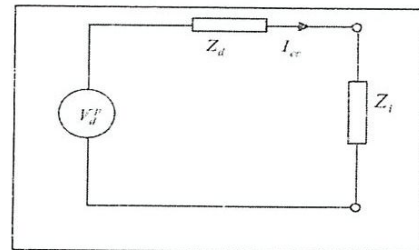
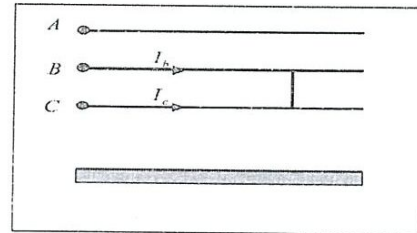


Fig. II.15 Défaut biphasé isolé

- Traduction en grandeurs symétriques

$$\begin{cases} V_d = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) = \frac{1}{3}V_a \\ V_i = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) = \frac{1}{3}V_a \\ V_h = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3}V_a \end{cases}$$

$$\rightarrow v_d = v_i = v_h$$

- Soit d'après(II.15)

$$\rightarrow I_i = \frac{V_i}{Z_i} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_h}{Z_h}$$

$$I_h = -\frac{V_h}{Z_h} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_i}{Z_i}$$

$$\text{Donc } I_i = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_i}$$

$$I_h = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_h}$$

$$I_a = I_d + I_i + I_h = 0$$

$$\rightarrow I_a = I_d - \frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_i} - \frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_h} = 0$$

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_d^p (Z_i + Z_h)}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \\ I_i = \frac{V_d^p \cdot Z_h}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \\ I_h = \frac{V_d^p \cdot Z_i}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \end{cases}$$

- Retour aux grandeurs de phase :

$$I_c = aI_d + a^2I_i + I_0 \rightarrow I_c = \frac{\sqrt{3} \cdot V_d^p (Z_h \angle 90^\circ + Z_i \angle 150^\circ)}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h}$$

$$I_b = a^2I_d + aI_i + I_0 \rightarrow I_c = \frac{\sqrt{3} \cdot V_d^p (Z_h \angle -90^\circ + Z_i \angle -150^\circ)}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h}$$

Le courant dans le neutre est :

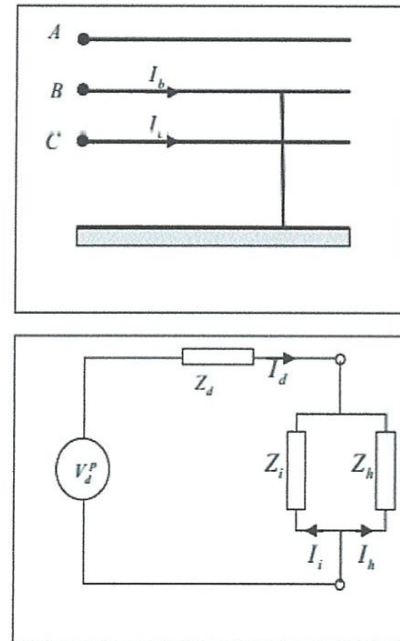


Fig. II.16 Défaut biphasé terre

$$I_n = I_b + I_c = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot V_d^p}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \right|$$

II.6.4-Défaut entre phase et la terre

- Expression du défaut

$$V_a = 0 \text{ (phase en défaut)}$$

$$I_a = I_b = 0 \text{ (phase saines)}$$

- Traduction en grandeurs symétriques

$$V_d = V_i = V_h, I_d = I_i = I_h$$

Soit d'après(II.15)

$$I_d = I_i = I_h = \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h}$$

$$V_d = \frac{Z_i + Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} V_d^p$$

$$V_i = \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_h} V_d^p$$

$$V_h = -\frac{Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} V_d^p$$

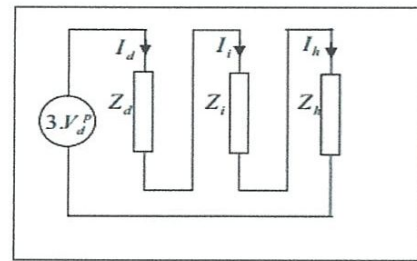
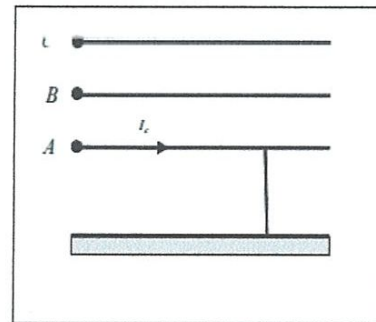


Fig. II.17 Défaut entre phase et la terre

- Retour aux grandeurs de phase

$$V_a = 0$$

$$V_b = \frac{(a^2 - a)Z_i + (a^2 - 1)Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times V_d^p$$

$$V_c = \frac{(a - a^2)Z_i + (a - 1)Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times V_d^p$$

$$I_a = \frac{3 \cdot V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h} I_b = I_c = 0$$

II.6.5-Défaut entre phase et la terre à travers une impédance ($Z_n \neq 0$)

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

- Expression du défaut

$V_a \neq 0$ (Phase en défaut)

$I_b = I_c = 0$ (phases saines)

- Traduction en grandeurs symétriques

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}I_a \\ I_i = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) = \frac{1}{3}I_a \\ I_h = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}I_a \end{cases}$$

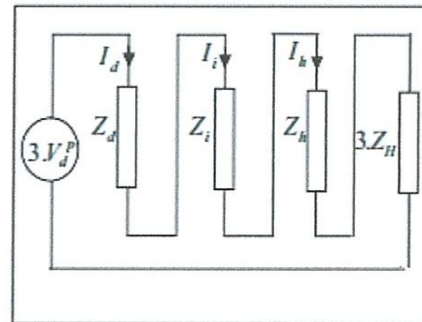
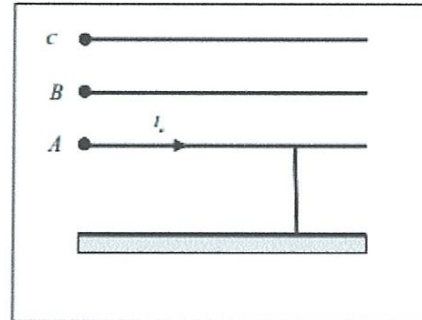


Fig. II.18 défaut entre phase et la terre
À travers une impédance

$\rightarrow I_d = I_i = I_h$

- Soit d'après (II.15)

$$V_d^p - Z_d \cdot I_a = \frac{1}{3}Z_h \cdot I_a + \frac{1}{3}Z_i \cdot I_a + \frac{1}{3}Z_n \cdot I_a$$

- Retour aux grandeurs de phase

$$I_a = \frac{3 \cdot V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z_n}$$

Remarque : toutes les grandeurs utilisées sont en valeur complexe

II.7-Résultats des calculs du réseau

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 1

Courant total de défaut = 1.6667 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 1

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
G	1	1.6667	-90.0000
1	F	1.6667	-90.0000

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 2

Courant total de défaut = 1.5419 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.0761	-10.0048
2	0.0000	0.0000
3	0.0361	-12.7002
4	0.0465	-12.4617
5	0.0591	-12.2895
6	0.0000	0.0000
7	0.0361	-12.7002
8	0.0465	-12.4617
9	0.0591	-12.2895

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 2

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	3	0.3319	-86.5451
1	5	0.2248	-84.8413
G	1	1.5419	-89.1810
2	1	0.9867	88.9446
2	F	1.5419	-89.1810
3	2	0.5566	-85.8572
4	3	0.2248	-84.8413
5	4	0.2248	-84.8413

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 3

Courant total de défaut = 1.5461 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.0738	-11.1211
2	0.0338	-15.4090
3	0.0000	0.0000
4	0.0192	-15.1806
5	0.0423	-15.1881
6	0.0338	-15.4090
7	0.0000	0.0000
8	0.0192	-15.1806
9	0.0423	-15.1881

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 3

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	2	0.5209	-88.5660
1	5	0.4140	-88.3867
G	1	1.5461	-89.1207
2	3	0.5209	-88.5660
3	1	0.6114	89.9096
3	F	1.5461	-89.1207
4	3	0.4140	-88.3867
5	4	0.4140	-88.3867

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 4

Courant total de défaut = 1.5172 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.0917	-11.5261
2	0.0627	-14.1810
3	0.0382	-14.4840
4	0.0000	0.0000
5	0.0387	-17.0238
6	0.0627	-14.1810
7	0.0382	-14.4840
8	0.0000	0.0000
9	0.0387	-17.0238

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 4

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	2	0.3786	-86.8671
1	3	0.4444	-88.3915
G	1	1.5172	-88.8463
2	3	0.3786	-86.8671
3	4	0.8230	-87.6901
4	5	0.6946	89.7839
4	F	1.5172	-88.8463
5	1	0.6946	89.7839

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 5

Courant total de défaut = 1.5337 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.0809	-8.9085
2	0.0638	-10.7073
3	0.0494	-10.8841
4	0.0269	-10.8904
5	0.0000	0.0000
6	0.0638	-10.7073
7	0.0494	-10.8841
8	0.0269	-10.8904
9	0.0000	0.0000

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 5

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	2	0.2227	-83.2596
1	3	0.2613	-84.7840
G	1	1.5337	-89.2203
2	3	0.2227	-83.2596
3	4	0.4840	-84.0827
4	5	0.4840	-84.0827
5	1	1.0525	88.4200
5	F	1.5337	-89.2203

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 6

Courant total de défaut = 1.3821 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.1711	-3.5590
2	0.1037	0.7341
3	0.1353	-2.4713
4	0.1446	-3.0665
5	0.1557	-3.6887
6	0.0000	0.0000
7	0.1353	-2.4713
8	0.1446	-3.0665
9	0.1557	-3.6887

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 6

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	3	0.2975	-86.6300
1	5	0.2015	-84.9262
G	1	1.3821	-89.2659
2	1	0.8844	88.8597
2	6	1.3821	-89.2659
3	2	0.4989	-85.9421
4	3	0.2015	-84.9262
5	4	0.2015	-84.9262
6	F	1.3821	-89.2659

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 7

Courant total de défaut = 1.4050 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.1575	-4.2792
2	0.1211	-3.2797
3	0.0913	0.7990
4	0.1082	-1.7578
5	0.1287	-3.9386
6	0.1211	-3.2797
7	0.0000	0.0000
8	0.1082	-1.7578
9	0.1287	-3.9386

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 7

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	2	0.4734	-88.6463
1	5	0.3762	-88.4670
G	1	1.4050	-89.2010
2	3	0.4734	-88.6463
3	1	0.5555	89.8293
3	7	1.4050	-89.2010
4	3	0.3762	-88.4670
5	4	0.3762	-88.4670
7	F	1.4050	-89.2010

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 8

Courant total de défaut = 1.3810 per unit

Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.1722	-5.0594
2	0.1456	-4.9023
3	0.1236	-3.2959
4	0.0898	1.0502
5	0.1237	-4.0432
6	0.1456	-4.9023
7	0.1236	-3.2959
8	0.0000	0.0000
9	0.1237	-4.0432

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 8

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	2	0.3447	-86.9706
1	3	0.4045	-88.4950
G	1	1.3810	-88.9498
2	3	0.3447	-86.9706
3	4	0.7491	-87.7937
4	5	0.6322	89.6803
4	8	1.3810	-88.9498
5	1	0.6322	89.6803
8	F	1.3810	-88.9498

Court-circuit triphasé symétrique ou barre No. 9

Courant total de défaut = 1.4285 per unit

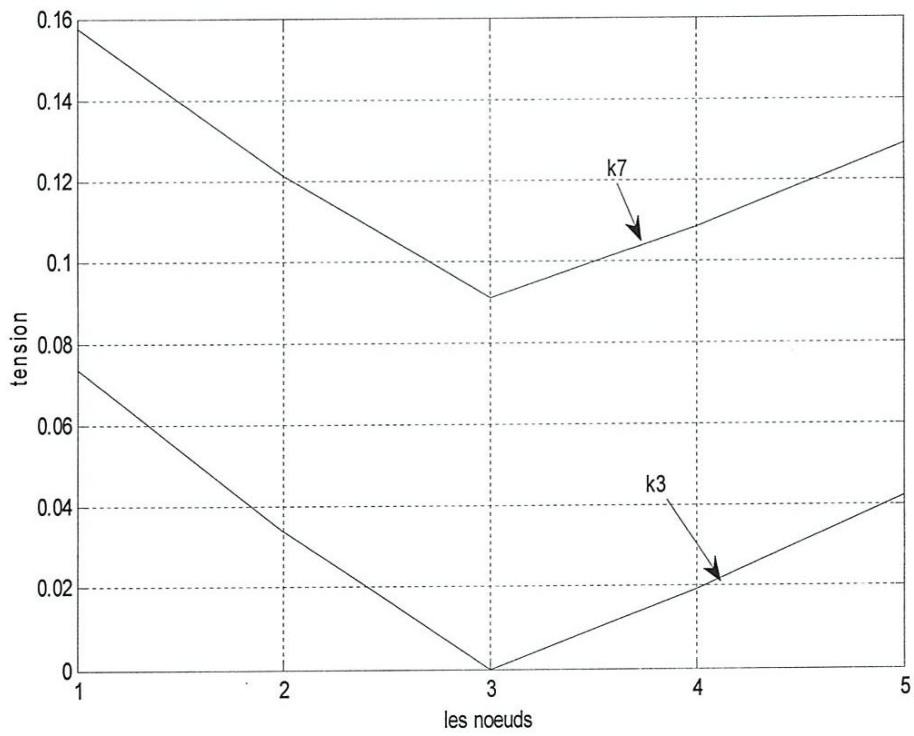
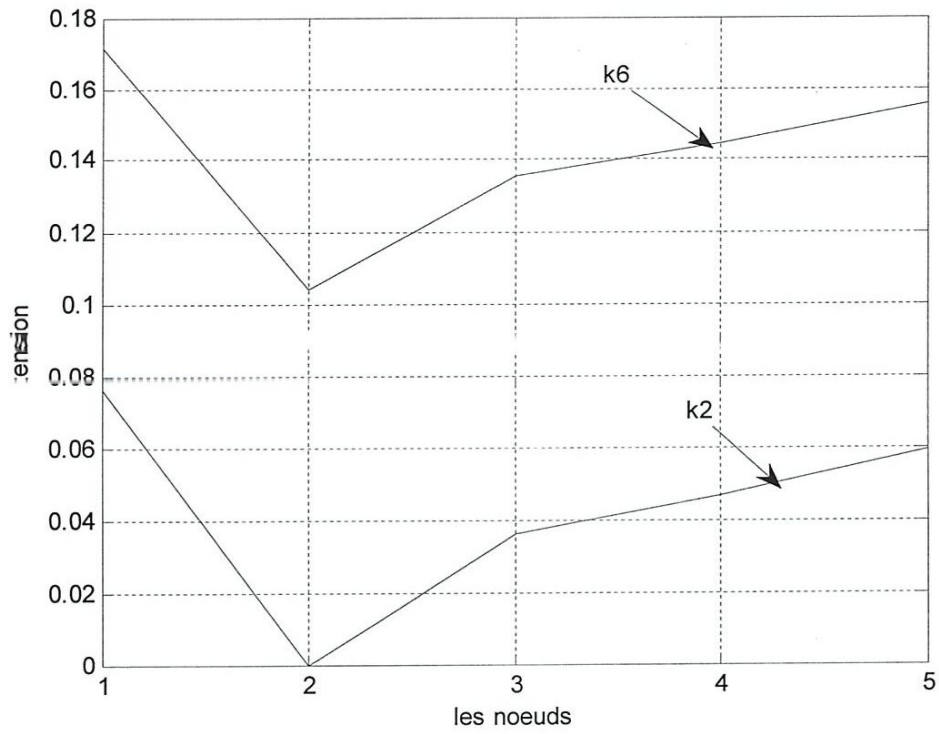
Tensions des jeux de barres durant le défaut en per unit

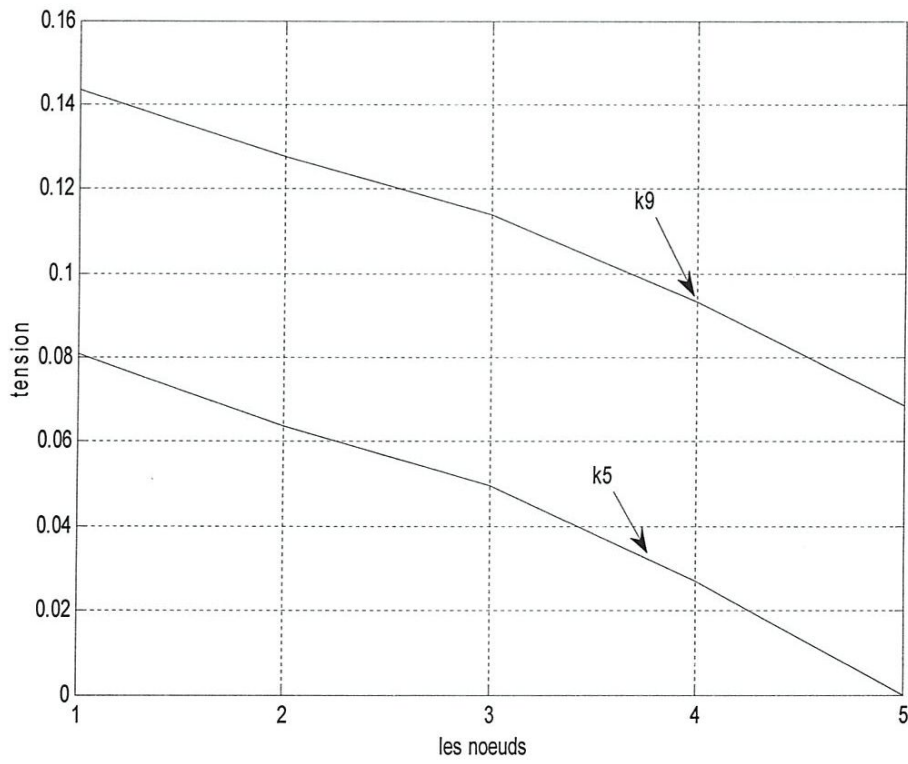
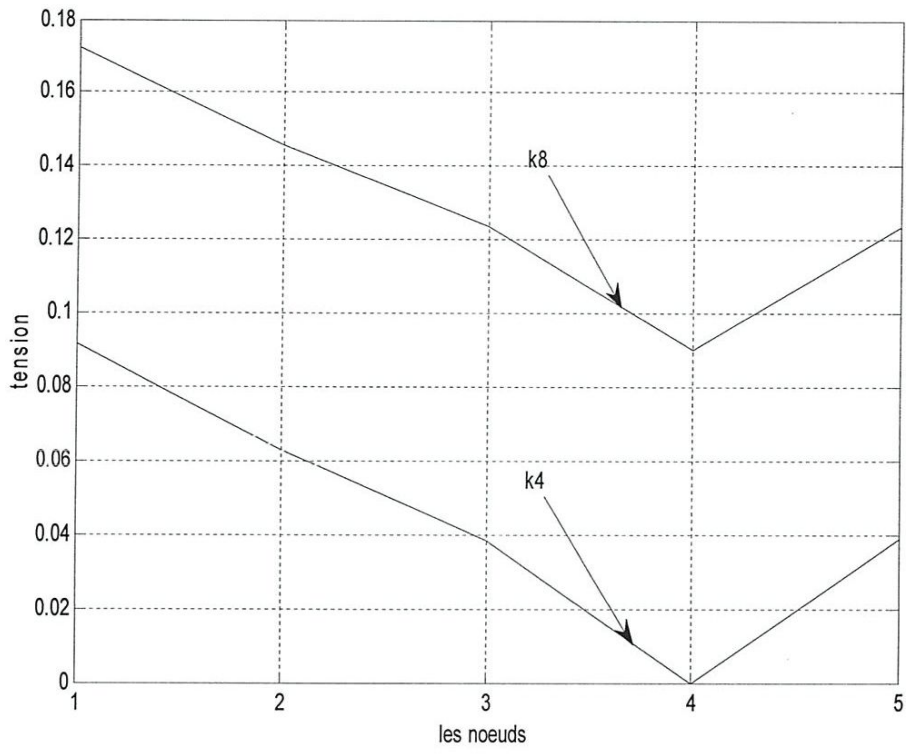
Barre No.	Tension Module	Angle degrés
1	0.1434	-4.3457
2	0.1274	-4.6073
3	0.1140	-3.9533
4	0.0933	-2.3934
5	0.0686	0.7263
6	0.1274	-4.6073
7	0.1140	-3.9533
8	0.0933	-2.3934
9	0.0000	0.0000

Courants de lignes pour le défaut au jeu de barres No. 9

De Barre	vers barre	Courant module	Angle degrés
1	2	0.2074	-83.3131
1	3	0.2434	-84.8375
G	1	1.4285	-89.2737
2	3	0.2074	-83.3131
3	4	0.4508	-84.1362
4	5	0.4508	-84.1362
5	1	0.9804	88.3666
5	9	1.4285	-89.2737
9	F	1.4285	-89.2737

Tension des nœuds





Chapitre III

La stabilité dynamique

III.1-Méthode d'analyse de la stabilité dynamique

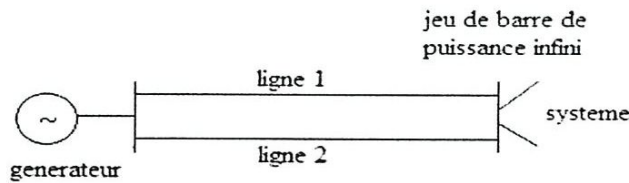


Fig.III.1 : réseau connectée à un jeu de barre de puissance infinie

Il existe des modèles réduits dynamiques ou micro-réseau qui permettent d'étudier expérimentalement les problèmes les plus variés de la stabilité.

Les équations de mouvement des générateurs sont des équations de type non linéaire, la solution ne peut pas être explicitement trouvée, même dans le cas d'une machine unique oscillant par rapport à un jeu de barre de puissance infinie. C'est très difficile d'obtenir les solutions de forme littérale et donner la méthode d'intégrations par ordinateur.

III.1.1-Méthode des aires égales

Cette méthode est utilisée pour l'évaluation de la stabilité dynamique d'un système électrique ou d'une machine synchrone. Elle est basée sur le fait que l'énergie accumulée de l'accélération du rotor doit être égale à celle dépensée pendant le freinage.

La dérivation du critère des aires égales est pratiquement utilisable pour le cas simple d'une machine raccordée à un réseau très puissant.

Cette méthode des surfaces utilise la caractéristique $p=f(\delta)$.

Tout d'abord, examinant le cas simple du fonctionnement quand l'alternateur est l'équivalent d'une station électrique fonctionnant à travers deux lignes parallèles à un récepteur de puissances infinies et tension constante fig. (III-1).

L'ouverture d'une de ces lignes peut causer la perte du synchronisme au niveau du générateur. L'équation du mouvement de la machine est définie comme suit :

$$M \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_m - P_e = P_a$$

En régime de fonctionnement normal, le générateur tourne à une vitesse synchrone avec l'angle du rotor δ_0 et la puissance mécanique P_m est égale à la puissance électrique P_e comme c'est montré au point (a) dans fig. (III.2) qui est le point de fonctionnement initial.

Si un court-circuit apparaît sur l'une des lignes, le disjoncteur sur la ligne isolée permet à la puissance de circuler à travers l'autre ligne.

Et pour bien comprendre l'étude en introduisant deux termes P_1 et P_2 tel que

$$\text{Avant le défaut } P_e = P_{max} \sin \delta$$

$$\text{Durant le défaut } P_e = P_{max1} \sin \delta = P_1 P_{max} \sin \delta$$

$$\text{Après le défaut } P_e = P_{max2} \sin \delta = P_2 P_{max} \sin \delta$$

$$\text{Où } P_1 = \frac{P_{max1}}{P_{max}}, \quad P_2 = \frac{P_{max2}}{P_{max}}$$

Et comme le défaut se présente à $t=0$, la puissance électrique produite est soudainement égale à la puissance $P_1 P_{max} \sin \delta$.

Par contre la puissance mécanique gardera sa valeur constante comme le montre la fig. (III. 2). Alors pour le temps inférieur à t_c (le temps de déclenchement du défaut). La différence entre la puissance mécanique fournie par la turbine et la puissance électrique produit l'accélération du rotor

Quand le défaut est éliminé, les puissances débitée par l'alternateur devient $P_2 P_{max} \sin \delta$, le point de fonctionnement saute de (c) à (e) sur la caractéristique et dans le même temps δ croit jusqu'au moment où la vitesse relative $d\delta/dt$ s'annule, et par conséquent le rotor ralentit quand P_e passe du point (e) à (f). Au point de fonctionnement (f) la vitesse du rotor est de nouveau synchrone bien que son angle avance vers δ_1 .

Si on vérifie le principe d'égalité des aires alors l'aire (a.b.c.d) = (d.e.h.g) $\Rightarrow A_1 = A_2$. L'annulation de la vitesse relative se ferait au point (h) et le fonctionnement serait encore stable, mais on est à la limite de la stabilité.

A l'aide de la figure (III.2) en utilisant le principe d'égalité des aires, on peut graphiquement trouver la valeur de l'angle de branchement δ_{cr} pour laquelle il est nécessaire de débrancher la ligne pour obtenir un fonctionnement stable.

La condition critique est atteinte, quand $\delta_{max} = \pi - \delta'_0$, le temps correspondant à l'état critique de la machine est appelé temps critique, ce temps est d'une importance pour les ingénieurs dans le fonctionnement d'un système de puissance.

Donc pour assurer la stabilité d'un système, il faut que la coupure du tronçon défectueux se produise en un temps inférieur à t_c .

L'angle critique peut être déterminé à partir de la caractéristique

$$\int_{abcdehf} P(\delta).d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_m - P_1 \cdot P_{max} \cdot \sin \delta - \int_{cr}^{\delta_{max}} (P_2 \cdot P_{max} \cdot \sin \delta - P_m)d\delta = 0$$

$$= P_m(\delta_{cr} - \delta_0) - P_1 \cdot P_{max}(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_0) - P_2 \cdot P_{max}(\cos \delta_{max} - \cos \delta_{cr}) + P_m(\delta_{max} - \delta_{cr}) = 0$$

$$\cos \delta_{cr} = \frac{\left(\frac{P_m}{P_{max}}\right)(\delta_{max} - \delta_0) + P_2 \cdot \cos \delta_{max} - P_1 \cdot \cos \delta_0}{P_1 - P_2}$$

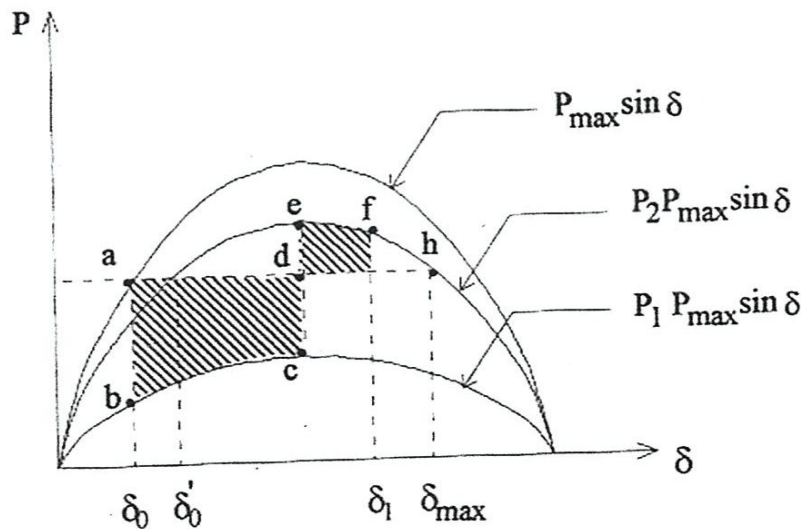


Fig. III.2.Méthode des aires égales

III.1.2-Dérivation de la fonction d'énergie

En tenant compte les hypothèses de modèle classique ci dessous:

- 1- La stabilité transitoire est décidée dans la première oscillation.
- 2- Le flux inductif du générateur est constant.
- 3- Les puissances d'amortissement sont négligées.
- 4- La puissance mécanique est constante.
- 5- Les changes sont représentés par des impédances passives.

On peut considérer le cas simple d'un alternateur couplé à un réseau infini. Les équations d'états :

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad \text{En posant} \quad M = \frac{2H}{\omega}$$

$$M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

Durant la période de perturbation (court-circuit) en supposant que $P_e=0$ on a :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{M} P_m$$

En intégrant par rapport au temps :

$$\omega = \frac{1}{M} \int_0^t P_m dt$$

C'est un accroissement de la vitesse après un temps t puisque

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = \omega \frac{d\omega}{d\delta} = \frac{1}{M} P_m$$

Autrement dit

$$M \int_0^\omega \omega d\omega = \int_{\delta_0}^\delta P_m d\delta$$

$$\frac{1}{2} M \omega^2 = \int_{\delta_0}^\delta P_m d\delta$$

Après l'isolement de défaut :

$$\omega = \omega_{cr} \text{ et } \delta = \delta_{cr}$$

Donc

$$\frac{1}{2}M\omega_{cr}^2 = P_m(\delta_{cr} - \delta_0)$$

Excès d'énergie cinétique

Après l'isolement de défaut la puissance électrique $P \neq 0$ accumulée est exprimée par :

$$E(x) = \frac{1}{2}M\omega_{cri}^2 + \int_{\delta_{cri}}^{\delta_m} (P_c - P_m)d\delta$$

Cette énergie peut être comparée à une fonction de Lyapunov

$$v(x) = \frac{1}{2}M\omega^2 + \int_{\delta_{cri}}^{\delta_m} f(\delta)d\delta$$

$$\text{telque: } f(\delta) = P_m - P_c$$

La valeur critique de $V(x) = (\delta, \omega)$ est obtenue en évaluant $V(\delta, \omega)$ au point $(\delta^m, 0)$ c'est-à-dire $V_{cr} = V_k(\omega) + V_p(\delta)$

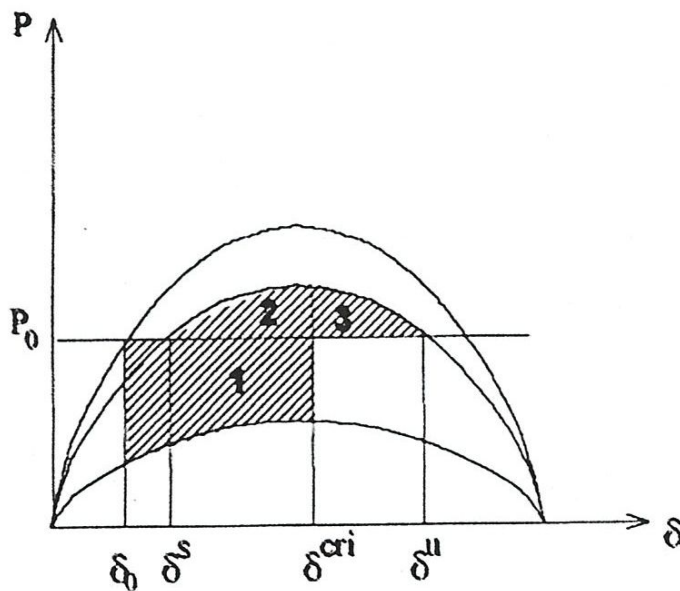


Fig. III. 3 la caractéristique $P = f(\delta)$

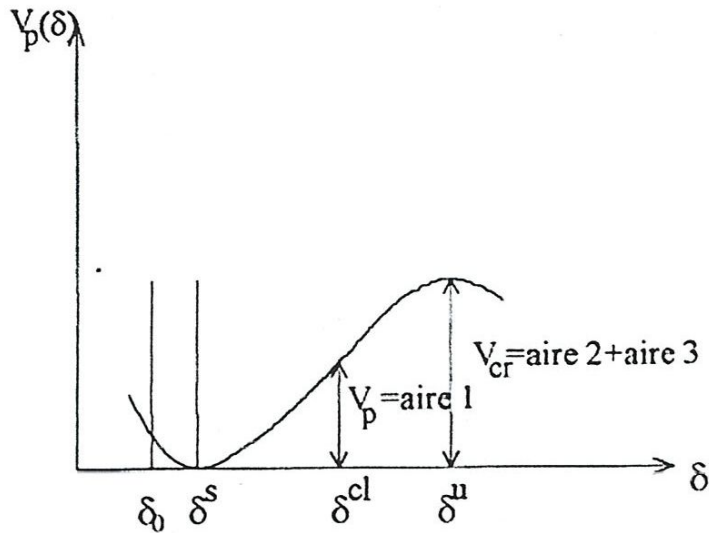


Fig. III. 4 : Energie potentielle

La fig. (III.3) est importante à ce stade et peut nous aider.

En effet l'air (2+3) représente V_{cr} et l'air (3) représente $V_p(\delta)$ tandis que l'air (1)

Peut exprimer l'énergie transitoire acquise

$$V_k = \frac{1}{2} M \omega^2$$

L'énergie potentielle $V_p(\delta)$ tracée en fonction de δ atteint une valeur maximale égale à V_{cr} pour $\delta = \delta_m$.

A un point quelconque δ_d , si le défaut est isolé, le système a une énergie totale V_d composé de la somme d'une énergie cinétique $V_k(\omega)$ et énergie potentielle $V_p(\delta)$.

Si énergie cinétique à cette instant est inférieure à $V_{cr} - V_p(\delta)$ le système est stable et éventuellement s'établit ou point à travers les forces d'amortissement dans le système.

Intégration numérique :

De nombreux systèmes physiques complexes sont décrits par des équations différentielles pour laquelle une solution ne peut pas être déterminée sous une forme analytique.

Cependant, les techniques sont valables d'obtenir des solutions approximatives pour chaque équation différentielle ou un système d'équations par des méthodes numérique.

En général, la méthode d'intégration numérique emploie un processus pas à pas pour déterminer une série de valeurs pour chaque variable dépendante à un groupe de variables indépendantes.

L'exactitude d'une solution par la méthode d'intégration numérique dépend de la méthode et de la dimension de l'intervalle, et parmi ces méthodes numériques.

III.1.3-Méthode d'Euler

La méthode d'Euler permet de transformer le système d'équation en un système d'ordre n en employant des variables auxiliaires.

$$\frac{dY}{dt} = f(t, y)$$

Où y représente un ensemble de variables et f un vecteur de fonction la méthode d'Euler permet de calculer y au point 1.

$$Y_1 = Y_0 + Y ,$$

$$Y = \left. \frac{dY}{dt} \right| . \Delta t$$

On pose $\Delta t = h$

On trouve

$$Y_1 = Y_0 + \left. \frac{dY}{dt} \right|_0 . h$$

Où h est l'intervalle de temps ($t_1 - t_0$) le nouveau point peut être employé pour calculer le point suivant etc.....

$$Y_2 = Y_1 + \left. \frac{dY}{dt} \right|_1 . h$$

$$Y_3 = Y_2 + \left. \frac{dY}{dt} \right|_2 . h$$

$$Y_n = Y_{n-1} + \left. \frac{dY}{dt} \right|_{n-1} . h$$

III.1.4- Méthode de RUNGE KUTTA

Dans la méthode de RUNGE KUTTA le changement dans les valeurs des variables dépendante et calculé à partir d'un groupe de formules données qui sont exprimées en termes de dérivés évalués aux points prédéterminés.

En général, la méthode est donnée par la relation suivante :

$$Y_{n+1} = Y_n + \frac{K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4}{6}$$

Avec

$$K_1 = f(t_0, Y_0)$$

$$K_2 = f\left(t_0 + \frac{h}{2}, Y_n + \frac{K_1}{2}\right) \cdot h$$

$$K_3 = f\left(t_0 + \frac{h}{2}, Y_n + \frac{K_2}{2}\right) \cdot h$$

$$K_4 = f(t_0 + h, Y_n + K_3) \cdot h$$

Dans notre étude nous avons utilisé la méthode d'Euler, l'application de cette méthode donne :

$$\frac{d\omega_i(t)^{(k+1)}}{dt} = \frac{\pi \cdot f}{H(i)} (P_{mi} - P_{ei}(t)^{(k+1)})$$

$$\omega_i(t)^{(k+1)} = \omega_i(t)^{(k)} + \frac{d\omega_i(t)^{(k+1)}}{dt} \cdot \Delta t$$

$$\frac{d\delta(i)^{(k+1)}}{dt} = \omega_i(t)^{(k+1)} - 2\pi f$$

$$\delta_i(t)^{(k+1)} = \delta_i(t)^{(k)} + \frac{d\delta_i(t)^{(k+1)}}{dt} \cdot \Delta t$$

III.2-Application sur une machine connectée à un jeu de barre de puissance infinie

Pour cela on considère le réseau simple suivant :

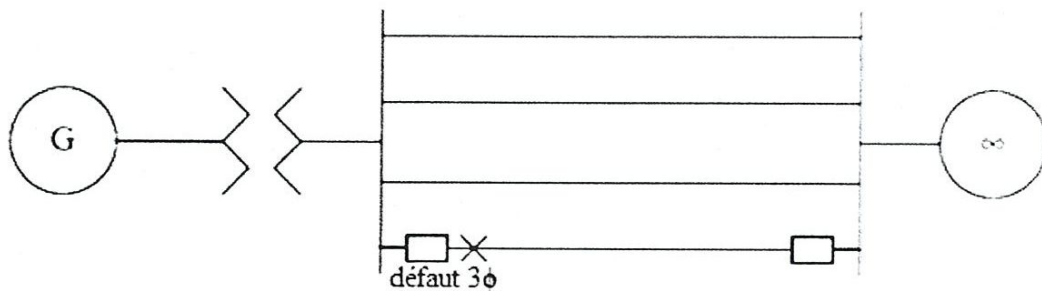


Fig.III.5 Machine connectée à un jeu de barre de puissance infinie

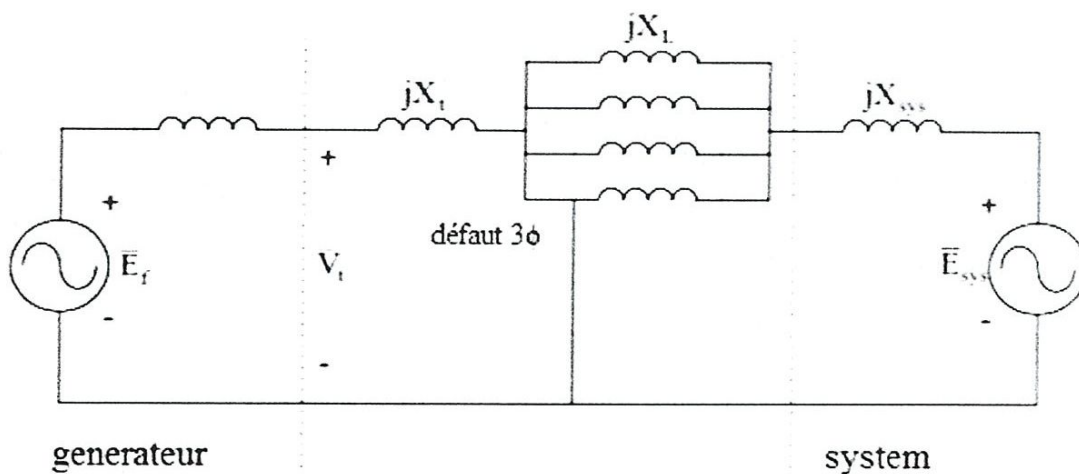


Fig.III.6 schéma équivalent du réseau

III.2.1-Données du réseau pendant le régime permanent

La puissance à la sortie de la machine

$$S=1.0$$

Facteur de puissance de la machine

$$\cos \varphi=0.8 \text{ en retard}$$

Tension aux bornes da la machine

$$V_t= 1.0 \angle 0^\circ$$

Réactance du transformateur

$$X_t=0.1$$

Réactance de la ligne

$$X_l=0.4$$

Réactance du système

$$X_{sys}=0.1$$

Réactance transitoire du générateur

$$X'_d=0.25$$

Constante d'inertie

$$H=4$$

On assume un défaut triphasé se produit à une des quatre lignes identiques de transmission, cependant quelques calculs sont nécessaires avant que le défaut se produise, à savoir,

Le courant de générateur avant le défaut

$$\bar{I}_{gen} = \frac{S}{V_t} \angle -\cos^{-1}(\varphi) = 1 \angle -36.87^\circ.$$

La tension de système et la tension interne de générateur peuvent être calculées :

$$\bar{E}_{sys} = \bar{v}_t - j \left(X_t + \frac{X_L}{4} + X_{sys} \right) \bar{I}_{gen} = 0.82 - j0.24 = 0.8544 \angle -16.31^\circ$$

Et :

$$\bar{E}_f = \bar{V}_t + (jX'_d) \bar{I}_{gen} = 1 \angle 0^\circ + (j0.25)(1 \angle -36.87^\circ) = 1 + (0.15 + j0.2) = 1.1673 \angle 9.87^\circ$$

L'angle initial de puissance égale à la différence entre l'angle de phase des deux tensions:

$$\delta_0 = 9.87^\circ + 16.31^\circ = 26.18^\circ$$

Puis, la puissance maximale

$$P_{max,0} = \frac{E_f E_{sys}}{X_{totale,0}} = \frac{(1.1673)(0.8544)}{0.25 + 0.1 + 0.1 + 0.1} = 1.81335$$

La puissance mécanique initiale peut être obtenue

$$P_{mech,0} = P_{max,0} \sin(\delta_0) = (1.81335) \sin(26.18^\circ) = 0.8$$

Le facteur de puissance initial du générateur de 0.8.

La puissance électrique au moment du défaut est nulle.

$$P_{max,f} = \frac{E_f E_{sys}}{X_{total,f}} = \frac{(1.1673)(0.8544)}{0.25 + 0.1 + \frac{0.4}{3} + 0.1} = 1.70973$$

La puissance finale d'angle égale

$$\delta_f = 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{P_{\text{mech},0}}{P_{\text{max},f}} \right) = 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{0.8}{1.70973} \right) = 152.1^\circ.$$

Il est plus pratique pour que les ingénieurs sachent ce qui l'angle maximale pour débranché le défaut et pour avoir toujours un cas stable. Un tel angle s'appelle généralement « l'angle critique de débranchement, » le δ_{cc} , Si on définit le rapport à toute la réactance initiale de réactance finale

$$R_2 = \frac{X_{\text{total},0}}{X_{\text{total},f}}$$

Si le défaut est éliminé à δ_{cc} , l'aire $A_a = A_d$, donc,

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} (P_{\text{mech},0}) \cdot d\delta - \int_{\delta_{cc}}^{\delta_f} (P_{\text{max},f} \sin\delta - P_{\text{mech},0}) \cdot d\delta = 0.$$

$$\Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} (P_{\text{max},0} \sin\delta_0) \cdot d\delta - \int_{\delta_{cc}}^{\delta_f} (P_{\text{max},0} \sin\delta_0 - R_2 \cdot P_{\text{max},0} \sin\delta) \cdot d\delta = 0.$$

$$\Rightarrow (\delta_{cc} - \delta_0) \sin\delta_0 + \sin\delta_0 (\delta_f - \delta_{cc}) + R_2 (\cos\delta_f - \cos\delta_{cc}) = 0.$$

Par conséquent, l'équation pour l'angle critique de débranchement peut être exprimée :

$$\delta_{cc} = \cos^{-1} \left(\frac{(\delta_f - \delta_0) \sin\delta_0 + R_2 \cos\delta_f}{R_2} \right).$$

Pour notre système simple, l'angle critique de débranchement est :

$$\delta_{cc} = \cos^{-1} \left(\frac{(2.6547 - 0.4569) \cdot \sin(26.18^\circ) + \left(\frac{0.55}{0.5833} \right) \cos(152.1^\circ)}{\left(\frac{0.55}{0.5833} \right)} \right) = 81.69^\circ$$

Le temps critique de débranchement, t_{cc} peut être déterminé comme suit :

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{\text{mech},0}$$

Puis

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{\text{mech},0}}{M},$$

Là où

$$\omega = \frac{d\delta}{dt}.$$

En conclusion

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{P_{\text{mech},0}}{M} t.$$

Par conséquent

$$t\delta = \delta_0 + \frac{1}{2} \frac{P_{\text{mech},0}}{M} t^2.$$

À $\delta = \delta_{cc}$; le temps critique de débranchement :

$$t_{cc} = \sqrt{\frac{2M(\delta_{cc} - \delta_0)}{P_{\text{mech},0}}}.$$

$$t_{cc} = \sqrt{\frac{2\left(\frac{4}{50\pi}\right)(1.4257 - 0.4569)}{0.8}} = 0.2483 \text{ second} = 12.4 \text{ cycles}.$$

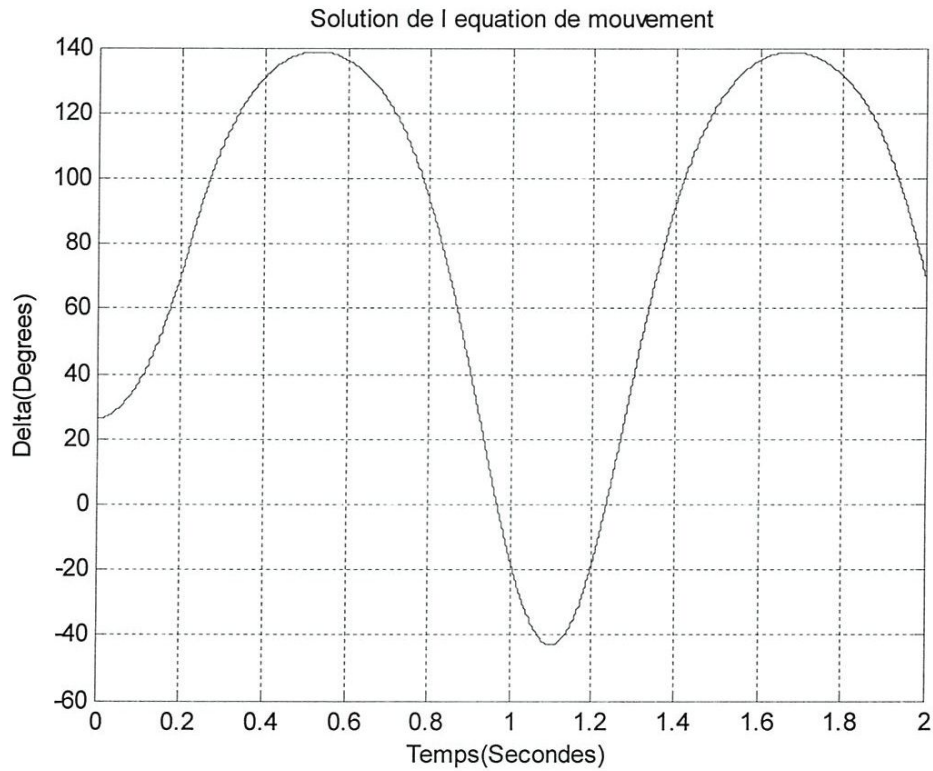


Fig.III.7 Variation de l'angle delta pour $t_c=0.2240$ secondes

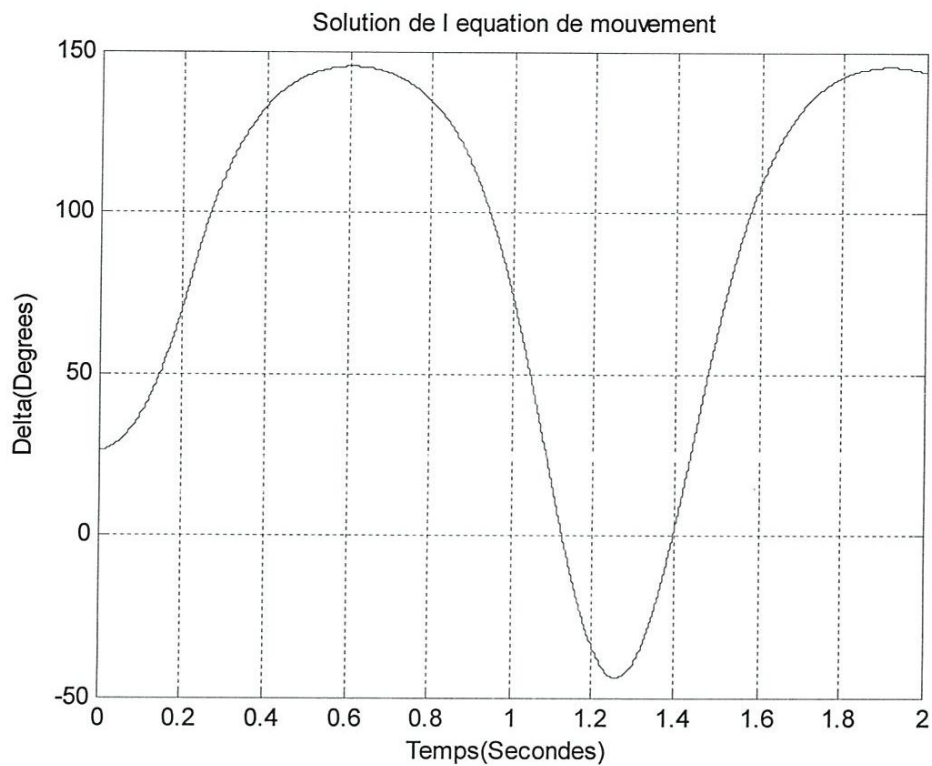


Fig.III.8 Variation de l'angle delta pour $t_c=0.2264$ secondes

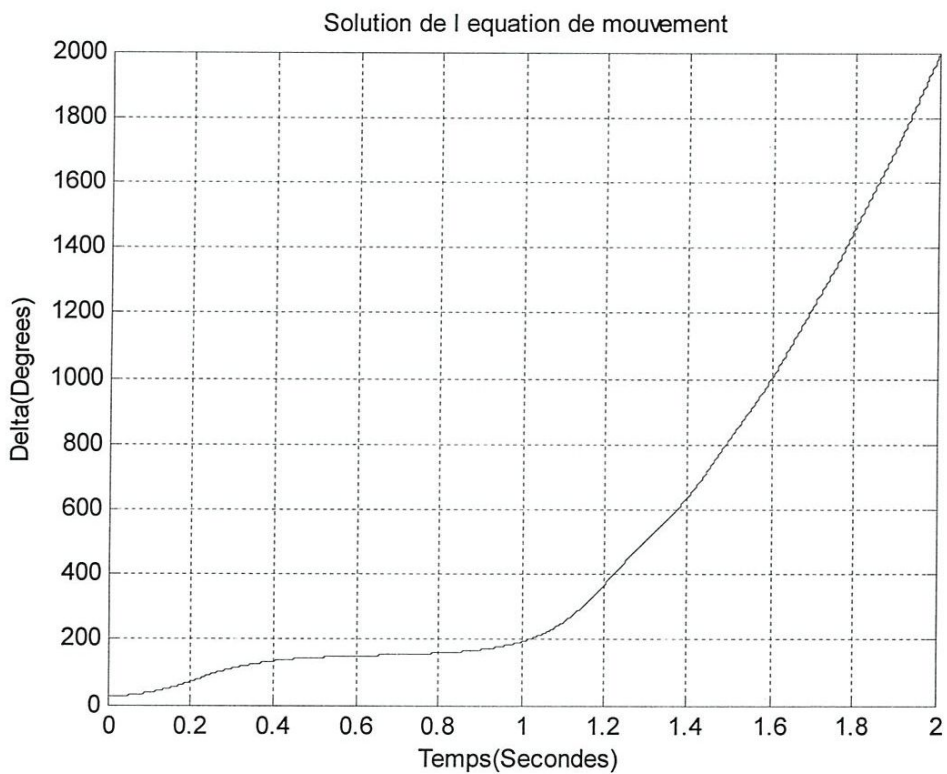


Fig.III.9 Variation de l'angle delta pour $t_c=0.2265$ secondes

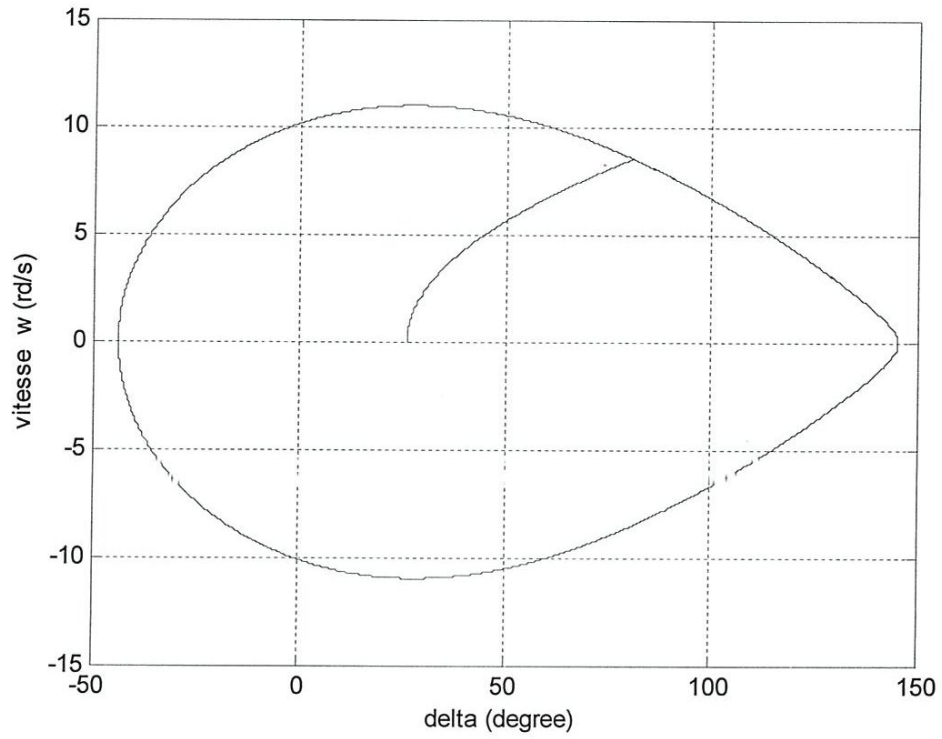


Fig.III.10 Caractéristique (delta, w) Pour $t_c=0.2240$ secondes

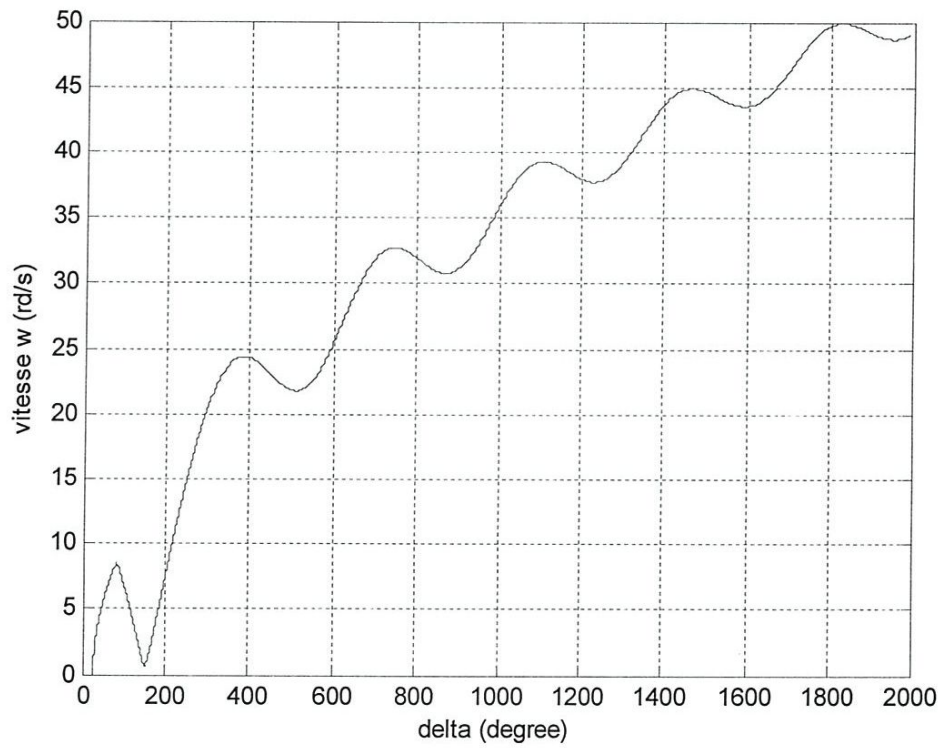


Fig.III.11 Caractéristique (delta, w) Pour $t_c=0.2265$ secondes

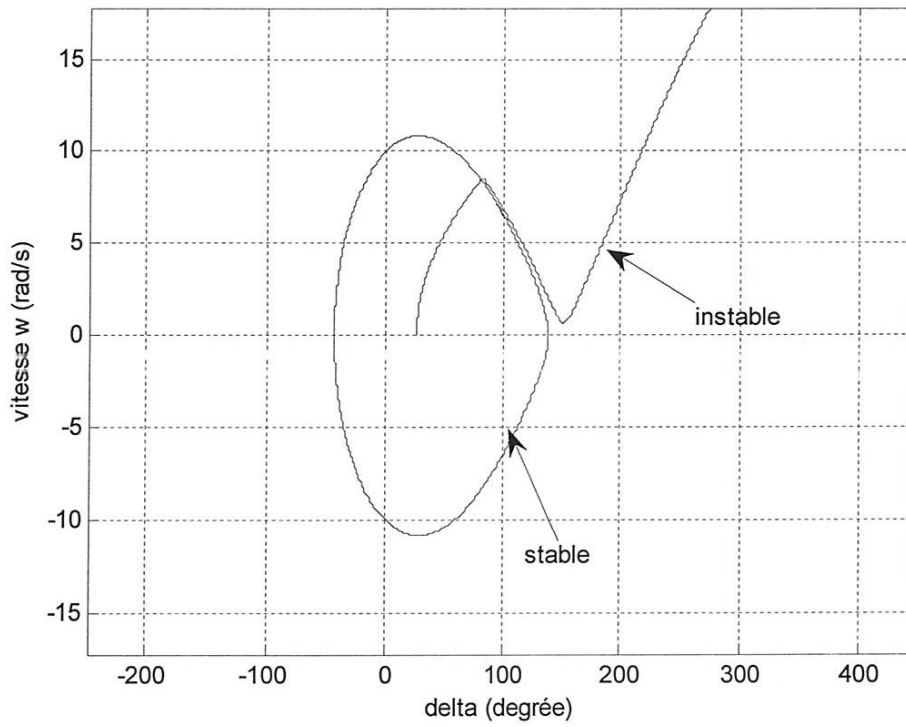


Fig.III.12 Caractéristique (delta, w)

Conclusion générale

Ce travail a permis d'élaborer un réseau de transport d'énergie électrique, et de déterminer les paramètres des lignes telles que, les résistances, inductances et capacités, nous avons déterminés ces derniers à partir des données initiales du réseau (les puissances des consommateurs et les distances des lignes) passant par la méthode du contour, l'analyse nous a conduit à connaître les puissances de transits, les tensions et les courants dans les lignes.

Nous avons vu, dans le 2^{ème} chapitre, les caractéristiques, les conséquences des défauts et la méthode utilisée pour le calcul des courants de court-circuit, ainsi le principe des composantes symétriques et asymétriques.

Ainsi les courts-circuits sont de divers types, on distingue, dans l'ensemble de ces défauts, essentiellement les courts-circuits triphasés symétriques et asymétriques, biphasés simples et doubles et monophasés.

Les défauts de courts-circuits les plus fréquents sont les monophasés, les défauts triphasés sont les moins fréquents, mais du point de vue impact sur les régimes et sur les divers équipements, les plus intenses que ceux monophasés.

Ces régimes engendrent, en plus, des pertes de puissance considérables, ainsi que des pertes de potentiel dans tout le voisinage du défaut, les données sur les courants de circulation permettent, également, d'organiser et de mieux gérer les systèmes de protection et de contrôle par le choix adéquat des seuils de fonctionnement des relais et d'autres caractéristiques dépendantes des régimes; telles, la sélectivité, la rapidité de réponse, les temporisations.

Dans le 3^{ème} chapitre on a montré l'intérêt de l'étude de stabilité dynamique dont l'objectif est de prédire le comportement des réseaux électriques. Cela permet de préconiser des solutions pour éviter les états d'instabilité, et ainsi assurer une disponibilité optimale de l'énergie électrique.

Bibliographie

- [1] Mémoire de fin d'étude (calcul des paramètres d'une ligne électrique 2008).
- [2] Cahier de cours réseaux électrique 4ème année.
- [3] Cahier de cours du module Modélisation 5ème année SAID GOUIDIA.
- [4] Analyse de la stabilité des réseaux électriques – mémoire de magister de Mr GOUIDIA SAID (1997)
- [5] Mémoire de fin d'étude (impact des courts-circuits sur les tensions nodale 2014).
- [6] Mémoire de fin d'étude (calcul des protections d'une ligne de transport électrique HTB-220kv 2014)
- [7] Bounaya K. brochure de cours analyse des régimes transitoires, 2014.