

CHAPITRE IV

CALCUL ET SIMULATION DE COURANT DE DÉFAUT

IV.1.Introduction

Les dispositifs de protection surveillent en permanence l'état électrique des éléments d'un réseau et provoquent leur mise hors tension (par exemple l'ouverture d'un disjoncteur), lorsque ces éléments sont le siège d'une perturbation indésirable: court-circuit, défaut d'isolement, surtension,...etc. Le choix d'un dispositif de protection n'est pas le fruit d'une réflexion isolée, mais une des étapes les plus importantes de la conception d'un réseau électrique.

A partir de l'analyse du comportement des matériels électriques (moteurs, transformateurs, câbles, ...etc.) sur défauts et des phénomènes qui en découlent, on choisit le supraconducteur comme un dispositif de protection le mieux adapté contre le courant de défaut.

IV.2.Les court-circuits :

IV.2.1.Origines :

Les différents composants des réseaux sont conçus, construits et entretenus de façon à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Ce risque n'est donc pas nul et des incidents ou défauts viennent perturber le fonctionnement des installations électriques.

Les lignes aériennes : sont soumises aux perturbations atmosphériques (foudre, tempêtes, etc.), les régions montagneuses par exemple sont beaucoup plus exposées que d'autre à la foudre.

Les câbles souterrains : sont exposés aux agressions extérieures (d'engins mécaniques de terrassement par exemple) qui entraînent systématiquement des court-circuits permanents.

Les matériels de réseaux et des postes électriques : comportent des isolants (solides, liquides ou gaz) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre parties sous tension et masse.

Les isolants subissent des dégradations conduisant à des défauts d'isollements, [22].

IV.2.2. Caractéristiques :

Les courts-circuits sont caractérisés par leur **forme**, leur **durée** et l'**intensité du courant**.

IV.2.2.1.Types :

Un court-circuit dans les réseaux électriques peut être :

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

IV.2.2.2.Nature:

a. **Court-circuits fugitifs** : Les court-circuits fugitifs nécessitent une coupure très brève du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dixièmes de seconde).

b. **Court-circuits permanents** : Ces court-circuits provoquent un déclenchement définitif qui nécessite l'intervention du personnel d'exploitation pour la localisation du défaut et remise en service de la partie saine.

c. **Court-circuits auto-extincteurs** : C'est ceux qui disparaissent spontanément en des temps très courts sans provoquer de discontinuités dans la fourniture d'énergie électrique.

d. **Court-circuit semi permanents** : Ces court-circuits exigent pour disparaître une ou plusieurs coupures relativement longues du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dizaines de secondes) sans nécessité d'intervention du personnel d'exploitation.

IV.2.3. Conséquences sur le réseau électrique :

Les court-circuits dans les réseaux électriques ont des effets néfastes :

IV.2.3.1. Action sur le fonctionnement des réseaux électriques :

Les effets néfastes des courts-circuits sont surtout à redouter sur les réseaux électriques THT sur lesquels débitent des groupes générateurs de forte puissance.

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

Des temps d'élimination des courts-circuits de l'ordre de 100 à 150 ms sont généralement considérés comme des valeurs à ne pas dépasser sur les réseaux électriques THT, [22].

IV.2.3.2. Action sur la tenue de matériels :

Les court-circuits provoquent des surintensités, dans le cas d'un court-circuit triphasé le courant de court-circuit peut dépasser 20 à 30 fois le courant nominal (I_n). Ces surintensités amènent deux types de contraintes:

- Contraintes thermiques : dues aux dégagements de chaleur par effet Joule ($R.I^2$) dans les conducteurs électriques.

- Contraintes mécaniques : dues aux efforts électrodynamiques, ceux-ci entraînent notamment le balancement des conducteurs aériens et le déplacement des bobinages des transformateurs, ces efforts, s'ils dépassent les limites admises lors de la construction, sont souvent à l'origine d'avaries graves. De plus l'arc électrique, consécutif à un court-circuit, met en jeu un important dégagement

local d'énergie pouvant provoquer d'importants dégâts au matériel et être dangereux pour le personnel travaillant à proximité.

IV.2.3.3. Action sur la qualité de la fourniture :

Pour les utilisateurs, les court-circuits se traduisent par une chute de tension dont l'amplitude et la durée sont fonction de différents facteurs tels que la nature du court-circuit, la structure du réseau effectué, du mode mise à la terre, du mode d'exploitation, des performances des protections, ...etc.

IV.2.3.4. Action sur les circuits de télécommunications :

La présence d'un court-circuit dissymétrique entre une ou deux phases d'une ligne d'énergie électrique et la terre entraîne la circulation d'un courant homopolaire qui s'écoule à la terre par les points neutres des réseaux.

Une tension induite longitudinale, proportionnelle à ce courant, apparaît sur les lignes de télécommunication qui ont un trajet parallèle à la ligne d'énergie électrique. Cette tension peut atteindre des valeurs dangereuses pour le personnel et les installations de télécommunication.

IV.2.3.5. Action sur la sécurité des personnes :

La mise sous tension accidentelle des masses, les élévations de potentiel liées à l'écoulement des courants de court-circuit à la terre, les conducteurs tombés au sol ...etc. sont autant de situations pouvant présenter des risques pour la sécurité des personnes. Le mode de mise à la terre des points neutres joue de ce fait un rôle essentiel, [22].

IV.3. Exemple d'application sur un réseau de quatre jeux de barres:

$$V = Z.I$$

$$\sum I_{\text{Entré}} = \sum I_{\text{Sortie}}$$

$$\sum I_{\text{Entré}} = \sum \frac{V_i}{Z_i} = \sum V_i \cdot Y_i$$

Jeux de barre 01 :

$$I_1 = I_{12} + I_{13}$$

$$= Y_{12}(V_1 - V_2) + Y_{13}(V_1 - V_3)$$

$$I_1 = (Y_{12} + Y_{13}) V_1 - Y_{12}V_2 - Y_{13}V_3 \dots\dots\dots (IV.1).$$

Jeux de barre 02 :

$$I_2 = I_{21} + I_{24}$$

$$I_2 = (Y_{12} + Y_{24}) V_2 - Y_{12}V_1 - Y_{24}V_4 \dots\dots\dots (IV.2).$$

Jeux de barre 03 :

$$I_3 = I_{31} + I_{34}$$

$$I_3 = (Y_{13} + Y_{34}) V_3 - Y_{13}V_1 - Y_{34}V_4 \dots\dots\dots (IV.3).$$

Jeux de barre 04 :

$$I_4 = I_{42} + I_{43}$$

$$I_4 = (Y_{42} + Y_{43}) V_4 - Y_{42}V_2 - Y_{43}V_3 \dots\dots\dots (IV.4).$$

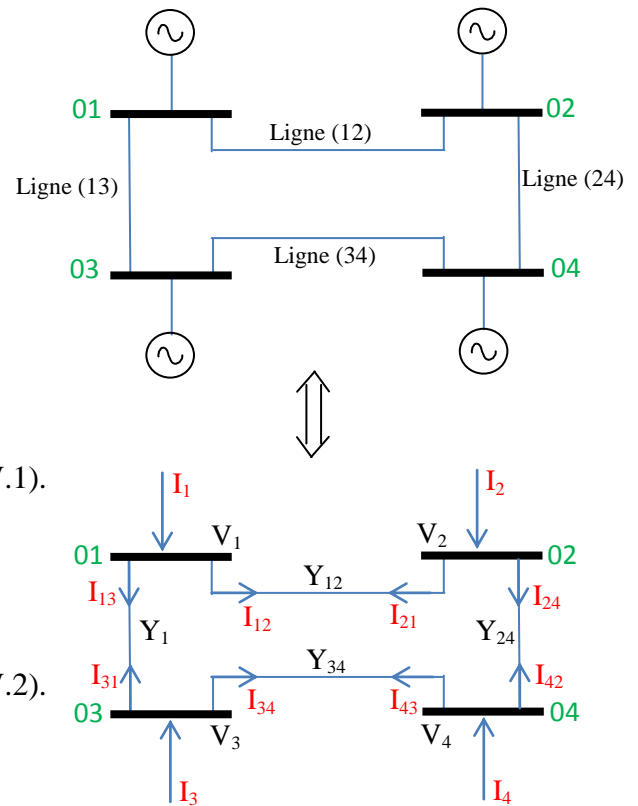


Figure IV.1. Réseau à quatre JB

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Y_{12} + Y_{13}) & -Y_{12} & -Y_{13} & 0 \\ -Y_{12} & (Y_{12} + Y_{24}) & 0 & -Y_{24} \\ -Y_{13} & 0 & (Y_{13} + Y_{34}) & -Y_{34} \\ 0 & -Y_{24} & -Y_{34} & (Y_{13} + Y_{34}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

La symétrie est vérifiée, par définition pour un réseau qui comporte quatre (04) jeux de barres, la matrice admittance Y est donnée comme suite :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= (Y_{12} + Y_{13}) & Y_{22} &= (Y_{12} + Y_{24}) & Y_{34} &= Y_{43} = -Y_{34} \\
 Y_{12} &= Y_{21} = -Y_{12} & Y_{23} &= Y_{32} = 0 & Y_{44} &= (Y_{13} + Y_{34}) \\
 Y_{13} &= Y_{31} = -Y_{13} & Y_{24} &= Y_{42} = -Y_{24} \\
 Y_{14} &= Y_{41} = 0 & Y_{33} &= (Y_{13} + Y_{34})
 \end{aligned}$$

Donc d'une manière générale :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m Y_{ij} \\ et \\ Y_{ij} = Y_{ji} = -Y_{ij} \end{array} \right. \dots \dots \dots (IV.5)$$

IV.3.1. Schéma équivalent d'une ligne électrique :

Si on tient compte le schéma équivalent d'une ligne électrique comprise entre deux (02) jeux de barres i et j.

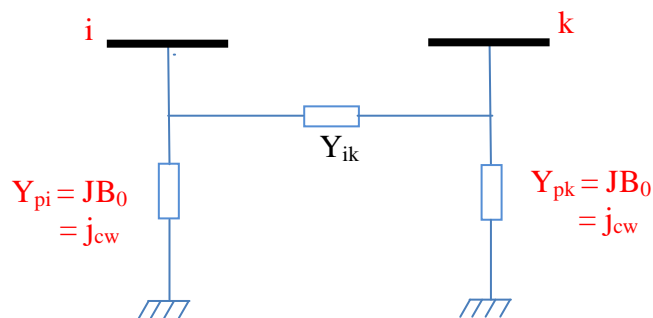


Figure IV.2. Schéma équivalent d'une ligne électrique

Donc le schéma équivalent du réseau de la **Figure IV.1** devient :

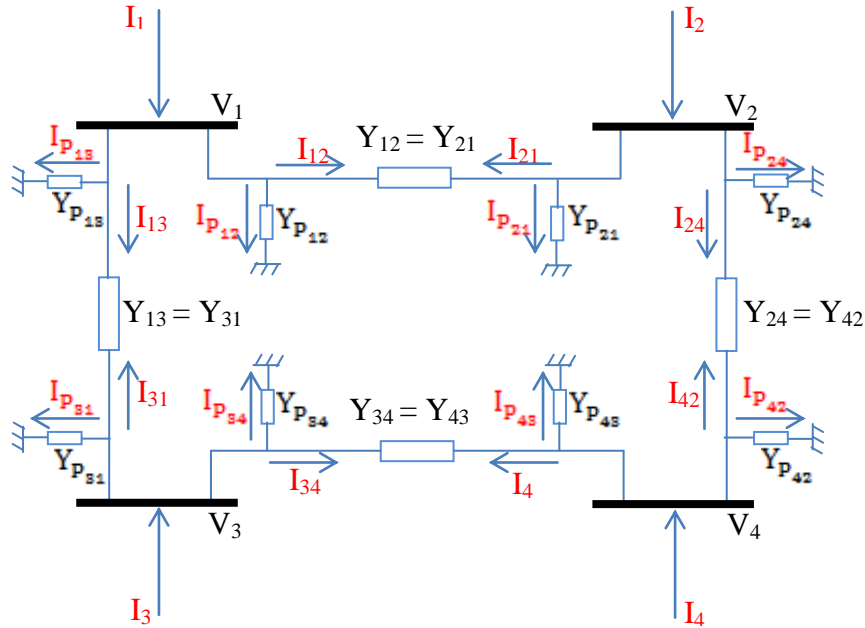


Figure IV.3. Schéma équivalent du réseau à quatre JB

$$Y_{p_{s4}} = Y_{p_{4s}}$$

$$Y_{p_{12}} = Y_{p_{21}}$$

$$Y_{p_{13}} = Y_{p_{s1}}$$

$$Y_{p_{24}} = Y_{p_{42}}$$

Pour le Jeux de Barre 01 :

$$I_1 = I_{12} + I_{13} + I_{p_{12}} + I_{p_{13}}$$

$$= Y_{12}(V_1 - V_2) + Y_{13}(V_1 - V_3) + Y_{p_{12}} V_1 + Y_{p_{13}} V_1$$

$$I_1 = (Y_{12} + Y_{13} + Y_{p_{12}} + Y_{p_{13}})V_1 - Y_{12}V_2 - Y_{13}V_3 \dots\dots\dots (IV.6)$$

Pour le Jeux de Barre 02 :

$$I_2 = I_{21} + I_{24} + I_{p_{21}} + I_{p_{24}}$$

$$= Y_{12}(V_2 - V_1) + Y_{24}(V_2 - V_4) + Y_{p_{21}} V_2 + Y_{p_{24}} V_2$$

$$I_2 = -Y_{12}V_1 + (Y_{12} + Y_{24} + Y_{p_{21}} + Y_{p_{24}})V_2 - Y_{24}V_4 \dots\dots\dots (IV.7)$$

Pour le Jeux de Barre 03 :

$$I_3 = I_{31} + I_{34} + I_{p_{13}} + I_{p_{s4}}$$

$$= Y_{13}(V_3 - V_1) + Y_{34}(V_3 - V_4) + Y_{P_{13}} V_3 + Y_{P_{34}} V_3$$

$$I_3 = -Y_{13}V_1 + (Y_{13} + Y_{34} + Y_{P_{13}} + Y_{P_{34}})V_3 - Y_{34}V_4 \dots\dots\dots (IV.8)$$

Pour le Jeux de Barre 04 :

$$I_4 = I_{43} + I_{42} + I_{P_{34}} + I_{P_{24}}$$

$$= Y_{34}(V_4 - V_3) + Y_{24}(V_4 - V_2) + Y_{P_{34}} V_4 + Y_{P_{24}} V_4$$

$$I_4 = -Y_{24}V_2 - Y_{34}V_3 + (Y_{34} + Y_{24} + Y_{P_{34}} + Y_{P_{24}})V_4 \dots\dots\dots (IV.9)$$

Pour quatre équations on 'a le système suivant :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Y_{12} + Y_{13} + Y_{P_{12}} + Y_{P_{13}}) & -Y_{12} & -Y_{13} & 0 \\ -Y_{12} & (Y_{12} + Y_{24} + Y_{P_{21}} + Y_{P_{24}}) & 0 & -Y_{24} \\ -Y_{13} & 0 & (Y_{13} + Y_{34} + Y_{P_{13}} + Y_{P_{34}}) & -Y_{34} \\ 0 & -Y_{24} & -Y_{34} & (Y_{13} + Y_{34} + Y_{P_{24}} + Y_{P_{34}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

La symétrie est aussi vérifiée.

IV.3.2. Cas Général :

Pour un réseau de 'n' jeux de barres : La matrice admittance est de (n*n) éléments.

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Ou : } Y.V = I, \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \text{ et } V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

$$I_1 = \sum_{K=1}^n Y_{1K} V_K, \quad I_2 = \sum_{K=1}^n Y_{2K} V_K, \quad \text{pour le jeu de barre } i :$$

$$I_1 = \sum_{K=1}^n Y_{iK} V_K$$

Cas d'un réseau réduit :

$$[I] = [Y][V]$$

$$\left(\begin{array}{c|c} Y_{aa} & Y_{ab} \\ \hline Y_{ba}^t & Y_{bb} \end{array} \right) \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \end{pmatrix}; \quad Y_{ab}^t = Y_{ba}$$

$$\begin{cases} Y_{aa} V_a + Y_{ab} V_b = I_a \\ Y_{ba}^t V_a + Y_{bb} V_b = I_b \end{cases} \dots\dots\dots (IV.10)$$

IV.3.3. Elimination des jeux de barres :

Elimination de jeu barre (b) :

On a :

$$\left(\begin{array}{c|c} Y_{aa} & Y_{ab} \\ \hline Y_{ba}^t & Y_{bb} \end{array} \right) \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_a \\ 0 \end{pmatrix}$$

IV.3.4. Pour un jeu de barre qui contient une charge

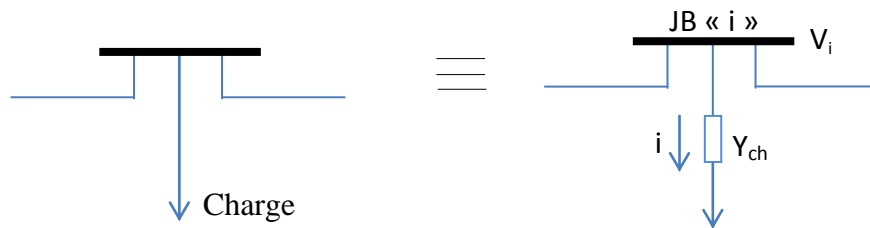


Figure IV.4. Réseau contient une charge

$$Y_{ch} * V_i = I_i$$

$P_i + jQ_i = S$ (Puissance Apparente)

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \Rightarrow P_i - jQ_i = V_i^* I_i$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i, \quad I_i = Y_{ch} V_i$$

Donc :

$$P_i - jQ_i = Y_{ch} V_i^2 \Rightarrow Y_{ch} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^2}$$

D'où :

$$Y_{ch} = \frac{P_i}{V_i^2} - j \frac{Q_i}{V_i^2} \dots\dots\dots (IV.11)$$

IV.3.5. Cas de différentes structures de jeux de barres :

IV.3.5.1. Jeu de barre de Générateur : la matrice d'admittance pour ce type de jeu de barre est donnée par :

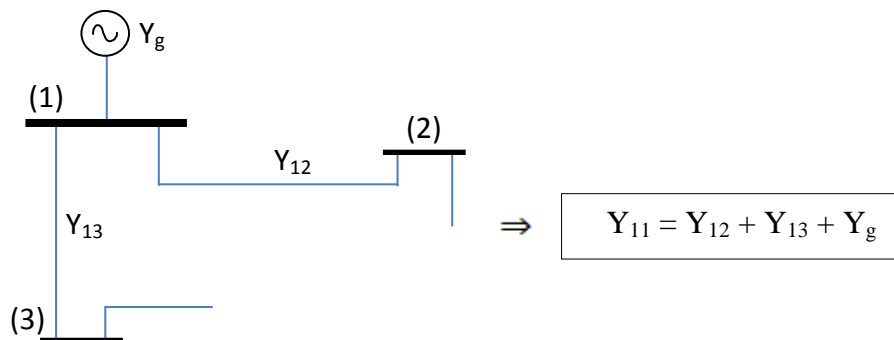


Figure IV.5. Réseau à trois JB avec générateur

IV.3.5.2. Jeu de barre de Générateur-Transformateur : Dans ce cas la matrice est donnée par cette forme :

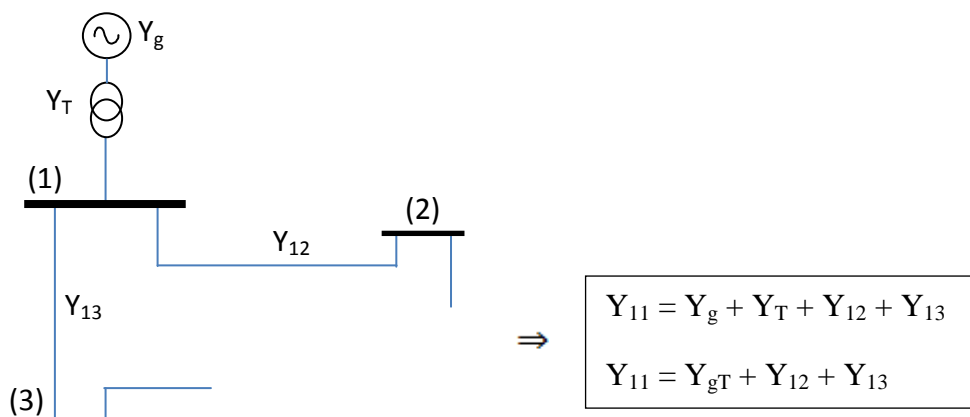


Figure IV.6. Réseau à trois JB avec transformateur et générateur

IV.3.5.3. Jeu de barre de Générateur-Transformateur-Charge : également pour cette structure la matrice admittance est donnée par :

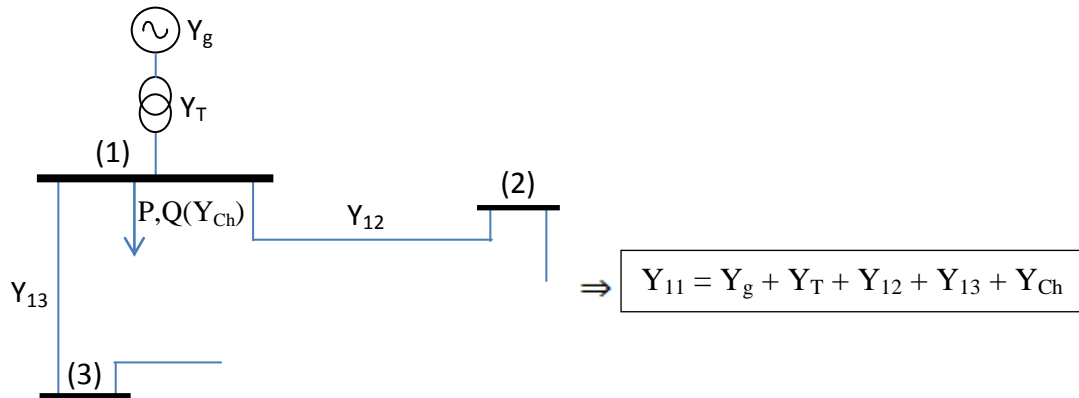


Figure IV.7. Réseau à trois JB avec transformateur, générateur et une charge

IV.4. Insertion du limiteur supraconducteur :

A prés avoir inséré le limiteur supraconducteur (LS) le schéma de la **Figure IV.1** devient :

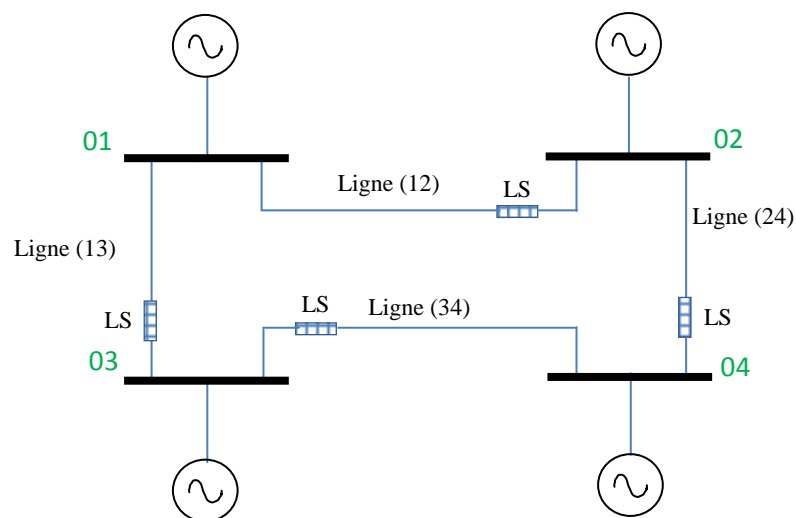


Figure IV.8. Réseau à quatre JB avec l'insertion du limiteur supraconducteur

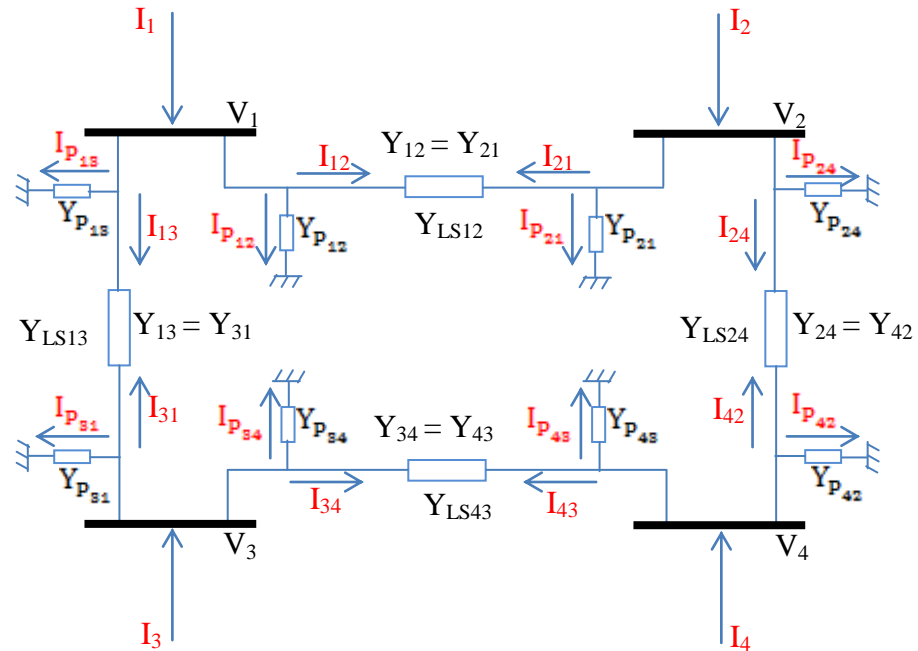


Figure IV.9. Schéma électrique du réseau à quatre JB avec l'insertion du limiteur supraconducteur

Pour le Jeux de Barre 01 :

$$I_1 = I_{12} + I_{13} + I_{P_{12}} + I_{P_{13}}$$

$$= (Y_{12} + Y_{LS12})(V_1 - V_2) + (Y_{13} + Y_{LS13})(V_1 - V_3) + Y_{P_{12}} V_1 + Y_{P_{13}} V_1$$

$$I_1 = (Y_{12} + Y_{LS12} + Y_{13} + Y_{LS13} + Y_{P_{12}} + Y_{P_{13}})V_1 - (Y_{12} + Y_{LS12})V_2 - (Y_{13} + Y_{LS13})V_3 \dots\dots\dots (IV.12)$$

Pour le Jeux de Barre 02 :

$$I_2 = I_{21} + I_{24} + I_{P_{21}} + I_{P_{24}}$$

$$= (Y_{12} + Y_{LS12})(V_2 - V_1) + (Y_{24} + Y_{LS24})(V_2 - V_4) + Y_{P_{21}} V_2 + (Y_{P_{24}} + Y_{LS24})V_2$$

$$I_2 = -(Y_{12} + Y_{LS12})V_1 + (Y_{12} + Y_{LS12} + Y_{24} + Y_{LS24} + Y_{P_{21}} + Y_{P_{24}})V_2 - (Y_{24} + Y_{LS24})V_4 \dots\dots (IV.13)$$

Pour le Jeux de Barre 03 :

$$I_3 = I_{31} + I_{34} + I_{P_{13}} + I_{P_{34}}$$

$$= (Y_{13} + Y_{LS13})(V_3 - V_1) + (Y_{34} + Y_{LS34})(V_3 - V_4) + Y_{P_{13}} V_3 + Y_{P_{34}} V_3$$

$$I_3 = -(Y_{13} + Y_{LS13})V_1 + (Y_{13} + Y_{LS13} + Y_{34} + Y_{LS34} + Y_{P_{13}} + Y_{P_{34}})V_3 - (Y_{34} + Y_{LS34})V_4 \dots\dots\dots (IV.14)$$

Pour le Jeux de Barre 04 :

$$I_4 = I_{43} + I_{42} + I_{P_{34}} + I_{P_{24}}$$

$$= (Y_{34} + Y_{LS34})(V_4 - V_3) + (Y_{24} + Y_{LS24})(V_4 - V_2) + Y_{P_{34}} V_4 + Y_{P_{24}} V_4$$

$$I_4 = -(Y_{24} + Y_{LS24})V_2 - (Y_{34} + Y_{LS34})V_3 + (Y_{34} + Y_{LS34} + Y_{24} + Y_{LS24} + Y_{P_{34}} + Y_{P_{24}})V_4 \dots\dots\dots (IV.15)$$

A partir des quatre précédentes équations on peut former la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -(Y_{12} + Y_{LS12}) & -(Y_{13} + Y_{LS13}) & 0 \\ -(Y_{12} + Y_{LS12}) & Y_{22} & 0 & -(Y_{24} + Y_{LS24}) \\ -(Y_{13} + Y_{LS13}) & 0 & Y_{33} & -(Y_{34} + Y_{LS34}) \\ 0 & -(Y_{24} + Y_{LS24}) & -(Y_{34} + Y_{LS34}) & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$Y_{11} = (Y_{12} + Y_{LS12} + Y_{13} + Y_{LS13} + Y_{P_{12}} + Y_{P_{13}})$$

$$Y_{22} = (Y_{12} + Y_{LS12} + Y_{24} + Y_{LS24} + Y_{P_{21}} + Y_{P_{24}})$$

$$Y_{33} = (Y_{13} + Y_{LS13} + Y_{34} + Y_{LS34} + Y_{P_{13}} + Y_{P_{34}})$$

$$Y_{44} = (Y_{13} + Y_{LS13} + Y_{34} + Y_{P_{34}} + Y_{LS34} + Y_{P_{24}})$$

IV.5. Calcul des courants de court de circuit

$$[I] = [Y] [V] \Rightarrow [V] = [Y^{-1}] [I] / [Y^{-1}] = [Z]$$

- La tension après le défaut de court de circuit à un jeu de barre quelconque est la superposition de la tension avant le défaut et des variations de tension causées par la F.E.M connectées au jeu de barre de défaut.

Donc :

$$V_{bus}(f) = V_{bus}(0) + V_T \dots\dots\dots (IV.17)$$

$$V_{bus}^f = V_{bus}^0 + V_T \dots\dots\dots (IV.18)$$

$V_{bus}^0 = V_{bus}(0)$: Le vecteur tension avant le défaut.

V_T : le vecteur variation causé par le défaut.

$V_{bus}^f = V_{bus}(f)$: le vecteur tension après le défaut aux différents jeux de barres.

Bus barre \equiv Jeu de barre.

$$V_{bus} = Z_{bus} \cdot I_{bus}, I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus}$$

$$V_T = Z_{bus} \cdot I_{bus}^f \dots\dots\dots (IV.19)$$

$$V_{bus} = \begin{bmatrix} V_{bus}^0 \\ V_{bus}^0 \\ \vdots \\ V_{bus}^0 \\ \vdots \\ V_{bus}^0 \end{bmatrix}; \quad V_T = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_q \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}; \quad V_{bus}^f = \begin{bmatrix} V_1^f \\ V_2^f \\ \vdots \\ V_q^f \\ \vdots \\ V_n^f \end{bmatrix};$$

$$I_{bus}^f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_q^f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}; \quad V_{bus} = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ V_2^0 \\ \vdots \\ V_q^0 \\ \vdots \\ V_n^0 \end{bmatrix}; \quad V_{bus}^f = \begin{bmatrix} V_1^f \\ V_2^f \\ \vdots \\ V_q^f \\ \vdots \\ V_n^f \end{bmatrix}$$

$$\boxed{V_T = Z_{bus} \cdot I_{bus}^f}, \quad \boxed{I_{bus}^f = Y_{bus} \cdot V_T}$$

Considérant un défaut au niveau de jeu de barre « q » du réseau : donc

$$V_T = Z_{bus} \cdot I_{bus}^f = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1q} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2q} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \dots & Z_{qq} & \dots & Z_{qn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nq} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_q^f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.20)$$

Donc l'équation :

$$V_{bus}^f = V_{bus}^0 + V_T \Leftrightarrow V_{bus}^f = V_{bus}^0 + Z_{bus} \cdot I_{bus}^f$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} V_1^f \\ V_2^f \\ \vdots \\ V_q^f \\ \vdots \\ V_n^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ V_2^0 \\ \vdots \\ V_q^0 \\ \vdots \\ V_n^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1q} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2q} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \dots & Z_{qq} & \dots & Z_{qn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nq} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_q^f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

D'où le système d'équations suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1^f = V_1^0 - Z_{1q} \cdot I_q^f \dots\dots\dots (1). \\ V_2^f = V_2^0 - Z_{2q} \cdot I_q^f \dots\dots\dots (2). \\ \dots\dots\dots \\ V_q^f = V_q^0 - Z_{qq} \cdot I_q^f \dots\dots\dots (q). \\ \dots\dots\dots \\ V_n^f = V_n^0 - Z_{nq} \cdot I_q^f \dots\dots\dots (n). \end{array} \right. \dots\dots\dots (IV.21)$$

A ce stade d'étude, le courant de défaut I_q^f ne peut aucun cas être calculé car le nombre d'inconnues est supérieur au nombre d'équations, ces inconnues sont :

$V_{bus}^f = V_i^f$, ($i = 1, 2, \dots, q, \dots, n$) et le courant de défaut I_q^f .

$$\begin{cases} V_i^f (i = 1, \dots, n) \\ I_q^f \end{cases} \text{ sont les inconnues}$$

Pour parvenir à la résolution d'un tel système, on est obligé d'introduire une nouvelle équation, celle-ci ne peut être que la tension après le défaut au jeu de barre « q » donné par la loi d'ohm :

$$V_n^f = Z_f I_q^f \quad \dots\dots\dots (IV.22)$$

On a donc :

$$(n+1) \text{ inconnues } \begin{cases} (n) & \text{tension } V_1^f \dots V_n^f \\ 1 & \text{le courant } I_q^f \end{cases} \text{ avec } (n+1) \text{ équations :}$$

$$\text{Si on prend : les deux équations : } \begin{cases} V_q^f = V_q^0 - Z_{qq} \cdot I_q^f \dots\dots\dots (1) \\ V_q^f = Z_f \cdot I_q^f \dots\dots\dots (2) \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_q^0 - Z_{qq} \cdot I_q^f = Z_f \cdot I_q^f \quad \text{or :}$$

$$\text{Le courant de défaut (c-c) : } I_q^f = \frac{V_q^0}{Z_{qq} + Z_f} \quad \dots\dots\dots (IV.23)$$

Le système d'équation (IV.21) devient :

$$V_1^f = V_1^0 - Z_{1q} \cdot \frac{V_q^0}{Z_{qq} + Z_f} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_2^f = V_2^0 - Z_{2q} \cdot \frac{V_q^0}{Z_{qq} + Z_f} \dots\dots\dots (2)$$

.....

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

.....

$$V_n^f = V_n^0 - Z_{nq} \cdot \frac{V_q^0}{Z_{qq} + Z_f} \dots\dots\dots (n)$$

D'une manière générale : la tension de défaut est :

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

Pour le jeu de barre « q » :

$$V_i^f = V_q^0 \left(1 - \frac{Z_{qq}}{Z_{qq} + Z_f} \right) = \frac{Z_f}{Z_{qq} + Z_f} V_q^0$$

Donc :

$$\text{La tension de défaut au jeu de barre « q » } V_q^f = \frac{Z_f}{Z_{qq} + Z_f} \cdot V_q^0 \quad \dots\dots\dots (IV.24)$$

IV.5.1. Détermination des courants de lignes :

Connaissant les tensions après le défaut aux différents jeux de barres, on peut calculer facilement les valeurs des courants circulant le long des lignes de transmission du réseau :

$$I_{ij} = [V_i^f - V_j^f] \cdot Y_{ij} \quad \dots\dots\dots (IV.25)$$

Où :

Y_{ij} : étant l'admittance de la branche considérée.

IV.5.2. Cas particulier :

L'impédance de défaut ($Z_f = 0$) court de circuit franc (solid fault) dans ce cas l'impédance du défaut Z_f est nulle. Donc :

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

Et

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

$$V_i^f = V_i^0 - \frac{Z_{iq}}{Z_{qq} + Z_f} V_q^0 \quad \dots\dots\dots (IV.26)$$

IV.6.Simulation et discussion des résultats :

Le logiciel PSIM, nous offre la simulation de défaut de court de circuit Biphasé et Triphasé aux niveau des jeux de barres, dans un réseau électrique et l'analyse des formes d'ondes et les amplitudes de tensions et courants de défaut, chose qui nous a permet de voir le bon comportement du matériau supraconducteur et son intérêt sur la limitation du courant de défaut.

Le modèle utilisé pour simuler le limiteur de courant de défaut avec l'utilisation des caractéristiques supraconductrices est une résistance variable **R**.

Le circuit de simulation est alimenté par une source de tension alternative à partir des générateurs **G₁**, **G₂**, **G₃** et **G₄**, à travers les transformateurs de puissances TP 19 kv/220 kv avec une résistance de ligne **R_L** et une charge **Rch₁** connectée au jeu de barre 01 (**JB1**) et **Rch₄** connectée au jeu de barre 4 (**JB₄**) .la Figure IV.10.a représente le circuit de simulation sans limiteur et la Figure IV.10.b représente le circuit de simulation avec limiteur.

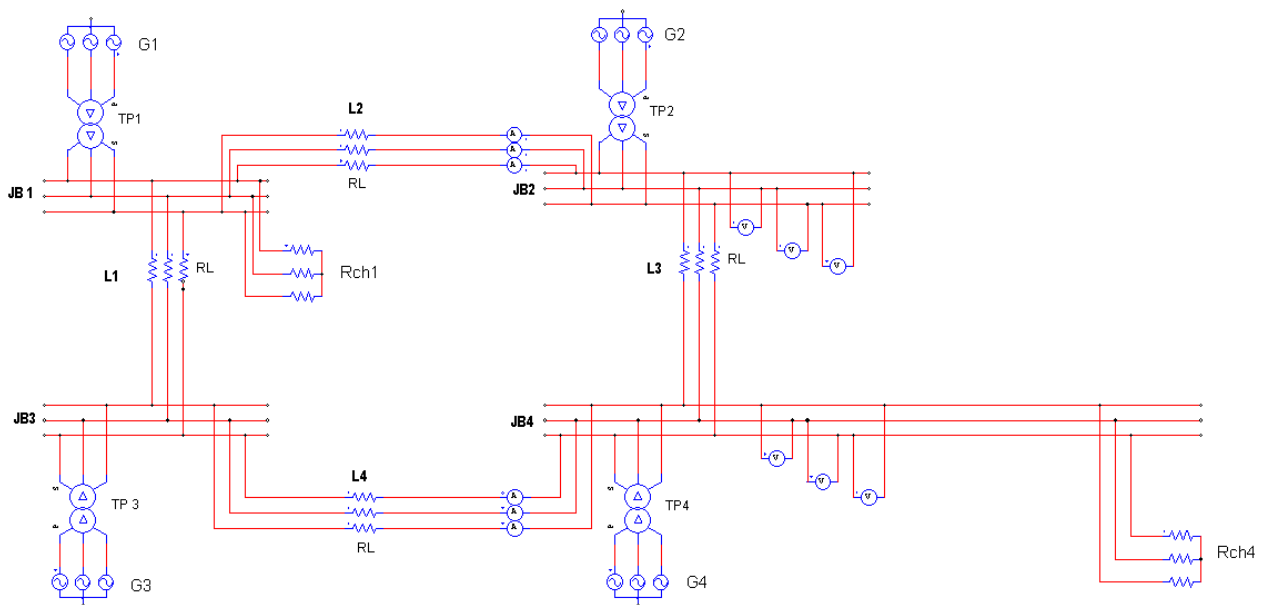


Figure IV.10.a. Circuit de simulation Sans Limiteur

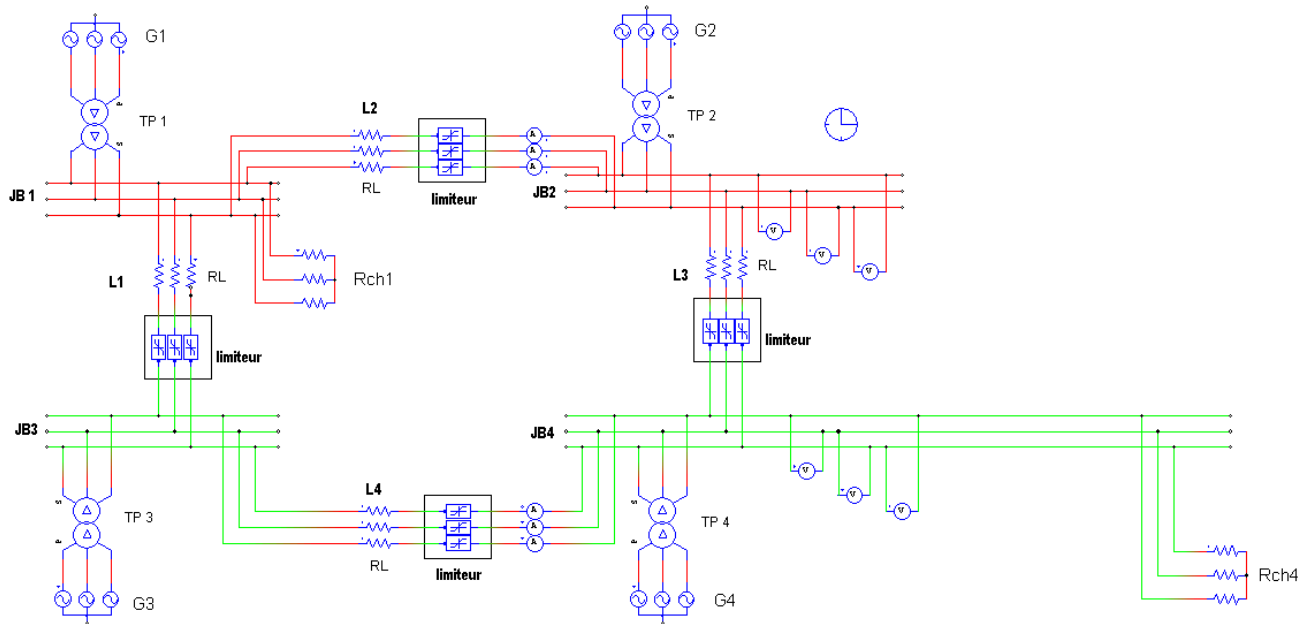


Figure IV.10.b. Circuit de simulation Avec Limiteur

Les données de simulation :

TP 19 kV/220 kV, $f = 50$ Hz ;

$R_L = 0.02 \Omega/\text{km}$; $R_{ch1} = 120 \Omega$; $R_{ch4} = 70 \Omega$

IV.6.1. Résultats de Simulation du Circuit Sans Défaut

IV.6.1.1. Circuit Sans Défaut et Sans Limiteur :

- Les courants de la ligne N°2 : Comme illustré sur le graphe suivant $I_n = 30$ A.

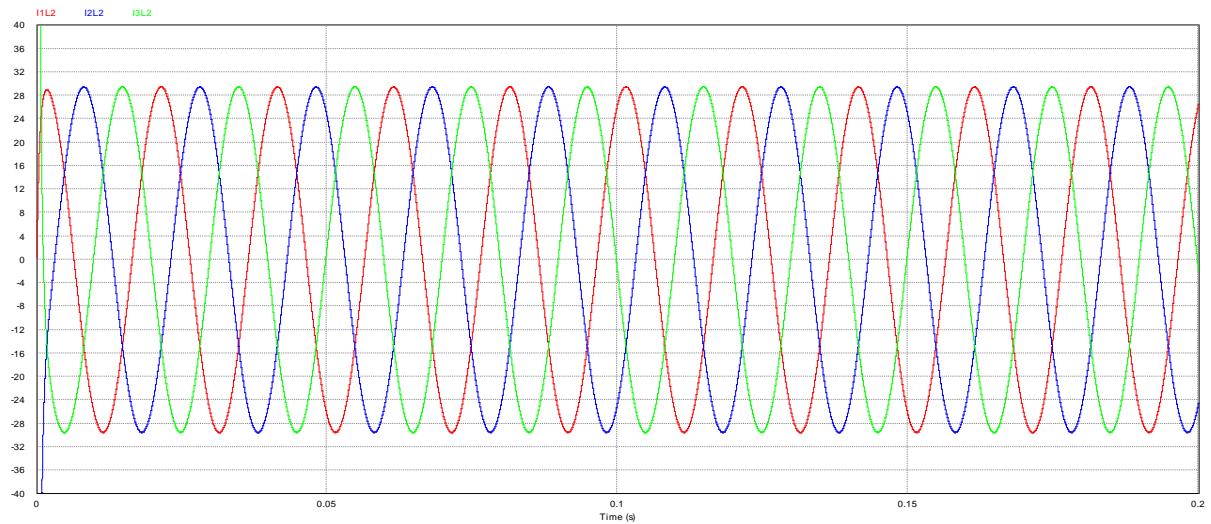


Figure IV.11. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°2.

- Les tensions de la ligne N°2 : La tension nominale de la ligne $U_n = 220$ kV.

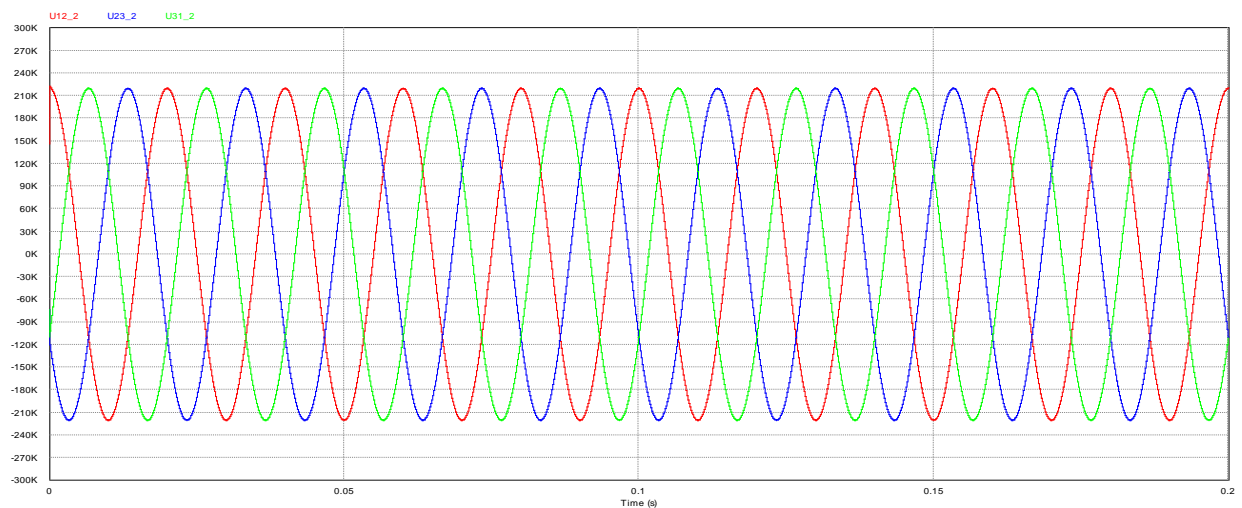


Figure IV.12. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°2.

- Les courants de la ligne N°4: Comme illustré sur le graphe suivant $I_n = 43$ A.

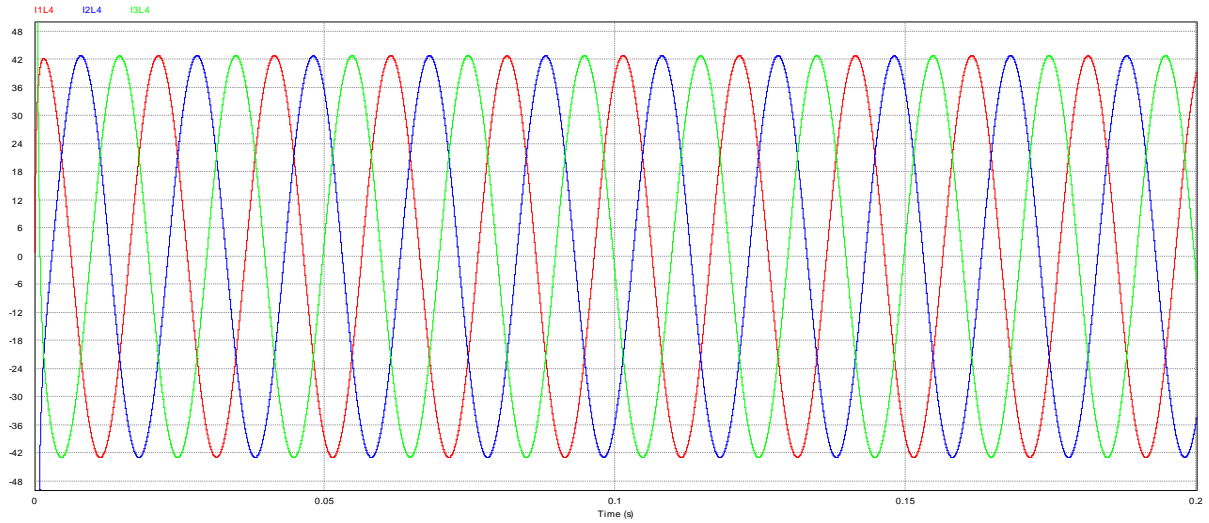


Figure IV.13. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°4.

- Les tensions de la ligne N°4: La tension nominale de la ligne $U_n = 220$ kV.

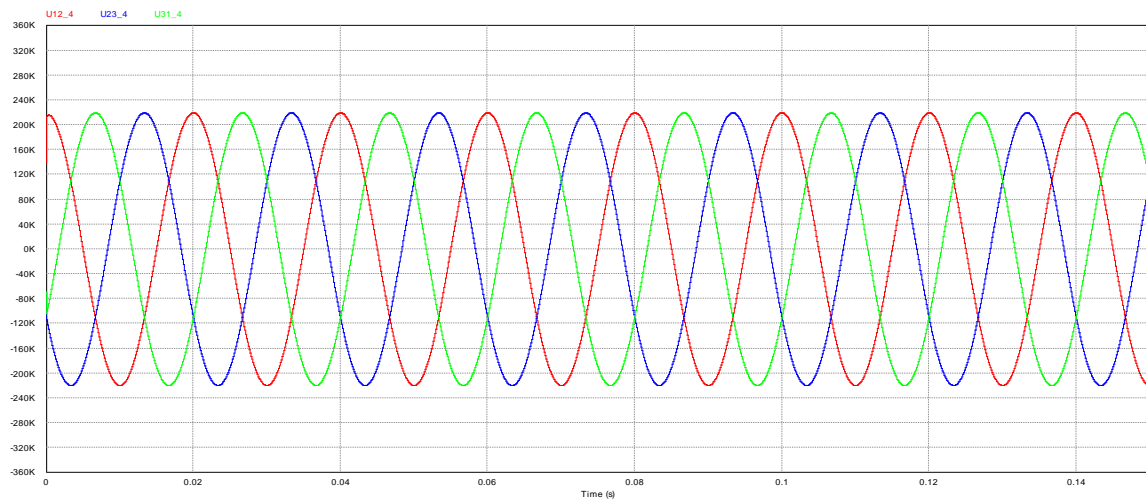


Figure IV.14. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°4.

IV.6.1.2. Circuit Sans Défaut et Avec Limiteur :

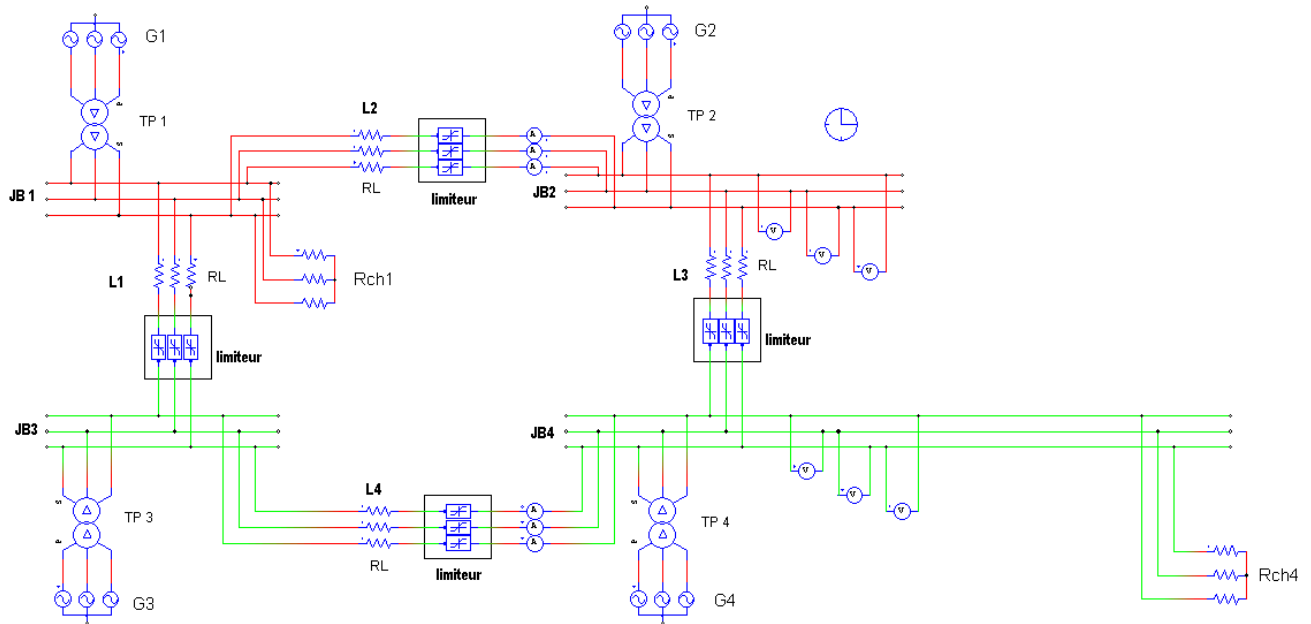


Figure IV.15. Circuit de simulation Sans Défaut et Avec limiteur

- Les courants de ligne N°2 : Comme illustré sur le graphe suivant $I_n = 30$ A.

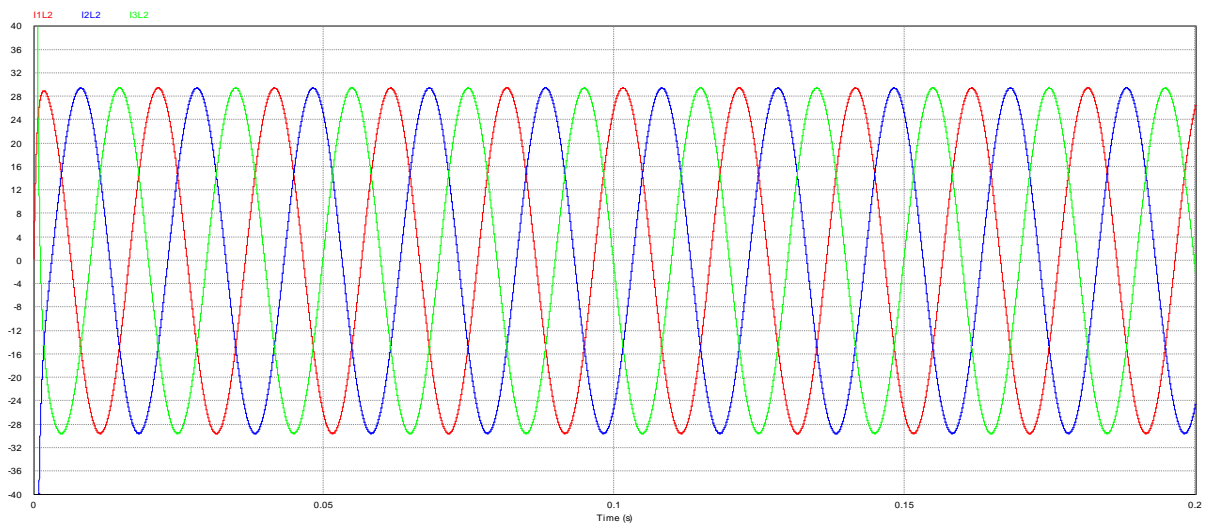


Figure IV.16. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°2.

- Les tensions de la ligne N°2

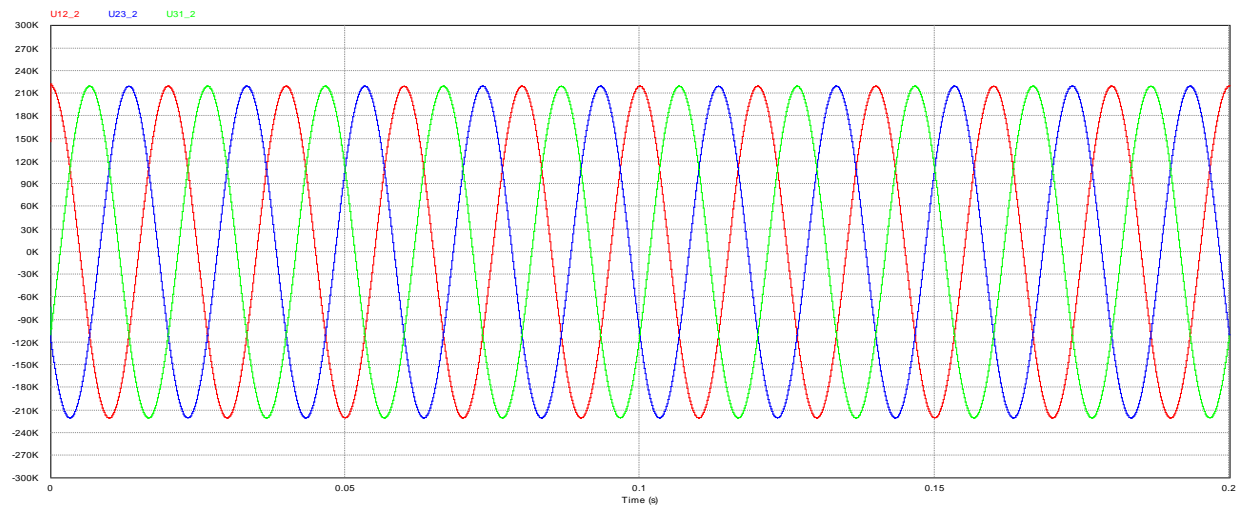


Figure IV.17. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°2.

- Les courants de la ligne N°4: Comme illustré sur le graphe suivant $I_n = 43$ A.

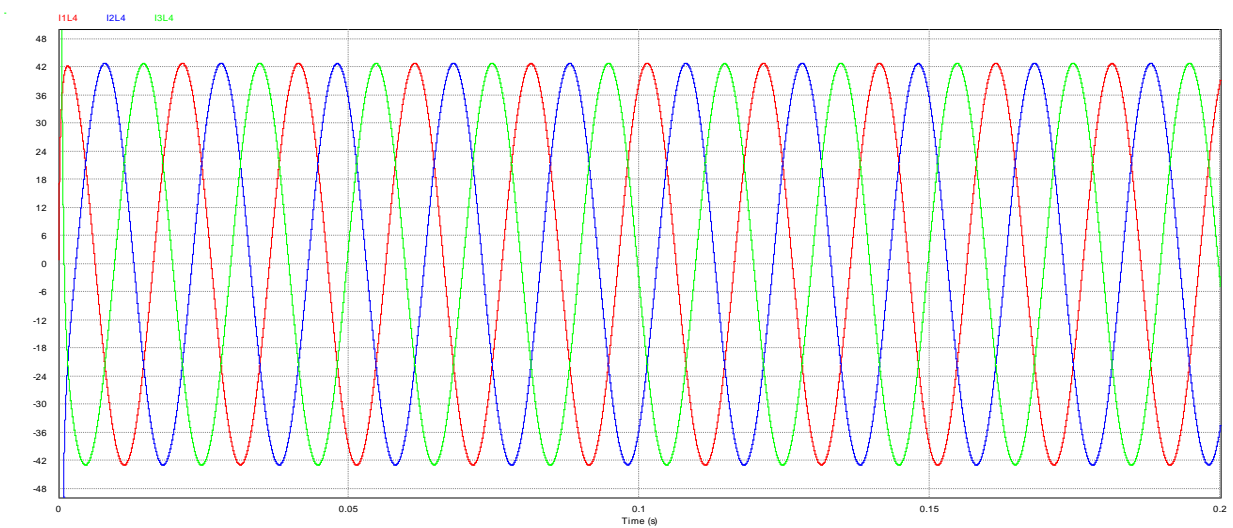


Figure IV.18. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°4.

- Les tensions de la ligne N°4

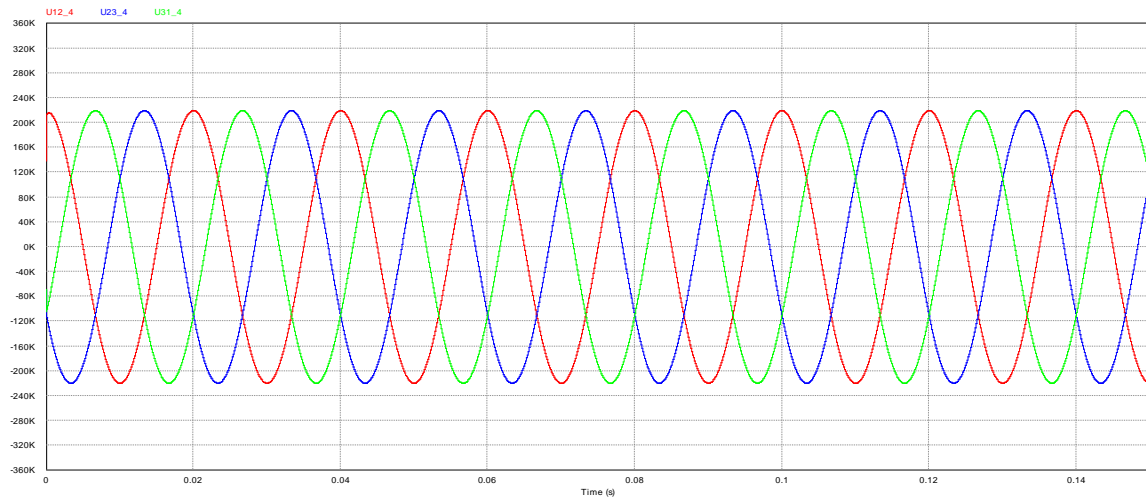


Figure IV.19. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°4.

Interprétation des résultats : On remarque que $U_n = 220$ kV et $I_n = 30$ A. Pour la ligne N°2 et $U_n = 220$ kV et $I_n = 43$ A pour la ligne N°4, sont des mêmes valeurs trouvées dans le circuit sans défaut et sans limiteur, vu que le courant consommé par la charge ne pas dépassant le courant critique, par conséquent le limiteur supraconducteur jeu un rôle d'une résistance négligeable dans le circuit.

IV.6.2. Résultats de simulation du Circuit Avec Défaut

IV.6.2.1. Court-Circuit Biphase

a- Circuit avec Défaut et Sans Limiteur

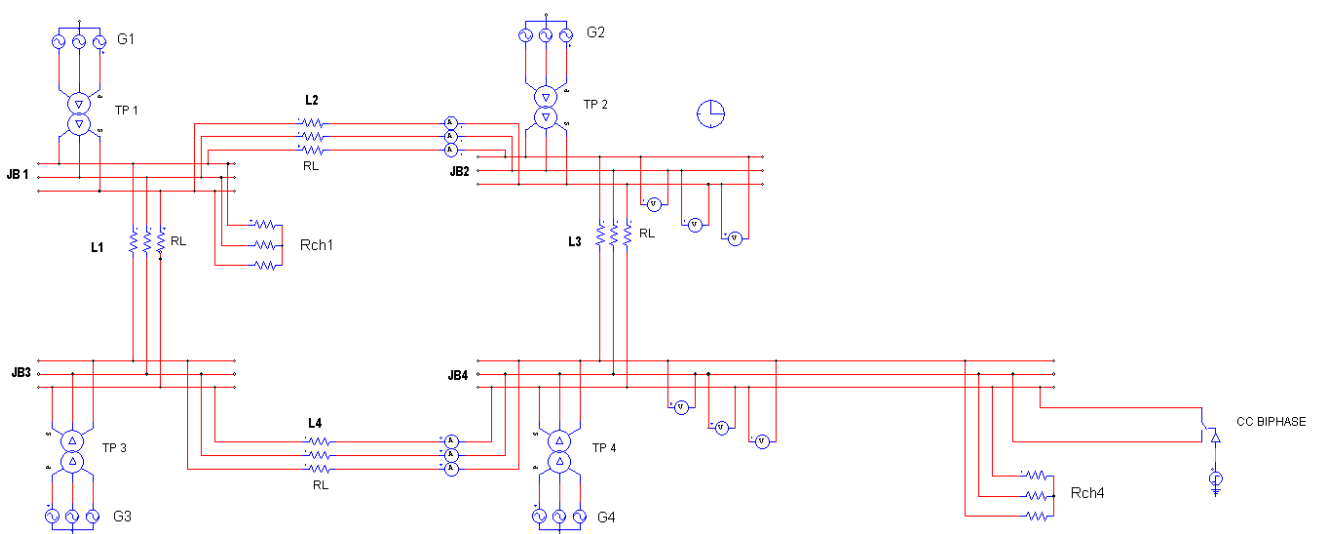


Figure IV.20. Circuit avec Défaut Biphase Sans Limiteur

Un court-circuit Biphasé au niveau du jeu de barre **JB 4** (V-W) est appliqué à l'instant $t = 0.1$ s et pour une bonne visibilité, la simulation est effectuée sur une durée de 0.5 s.

Les courants de la Ligne N°2

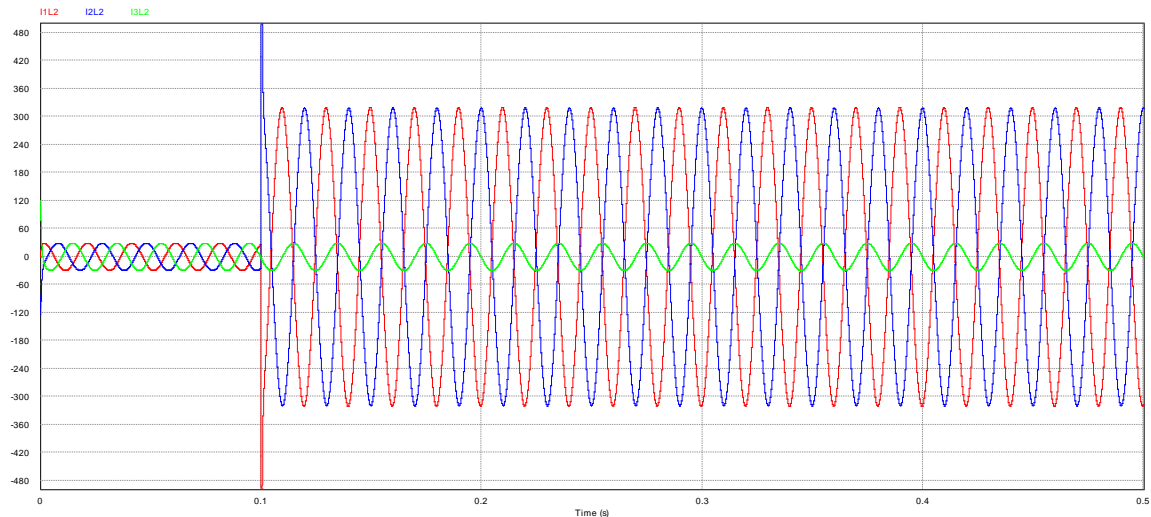


Figure IV.21. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°2.

Les tensions de la ligne N°2

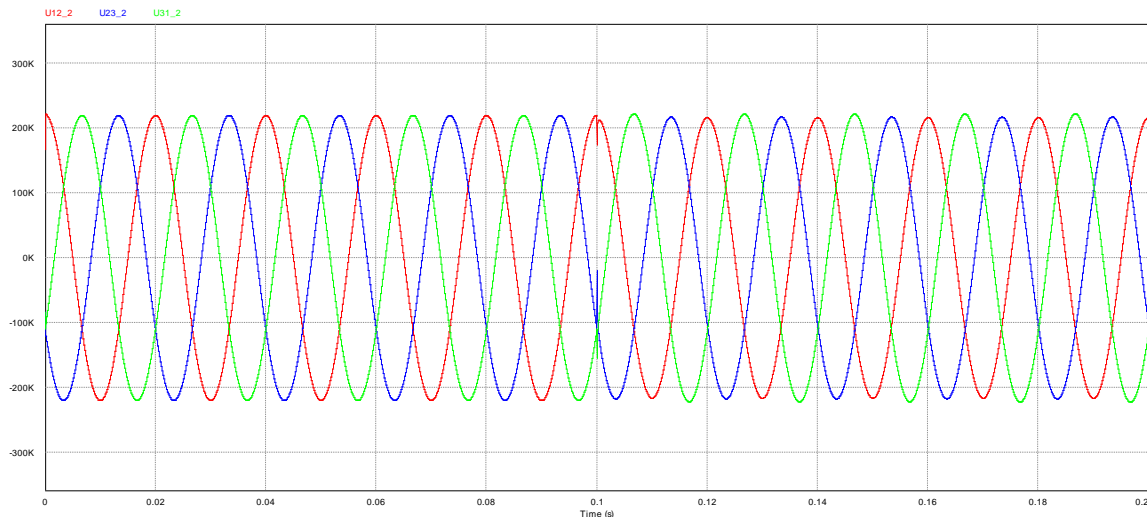


Figure IV.22. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°2.

Interprétation des résultats : Le courant nominal de la ligne N°2 est $I_n = 30$ A, jusqu'à l'application du défaut à $t = 0.1$ s à partir de cet instant, Le courant de défaut $I_{cc} = 320$ A pour les deux phases défectueuses (V-W), par ailleurs la phase (V) reste saine avec un courant de 30 A qui est la valeur nominale. Pour les tensions une petite perturbation à l'instant de défaut et après de ce dernier les tensions ils prennent ses formes initiales.

- Les courants de la ligne N°4

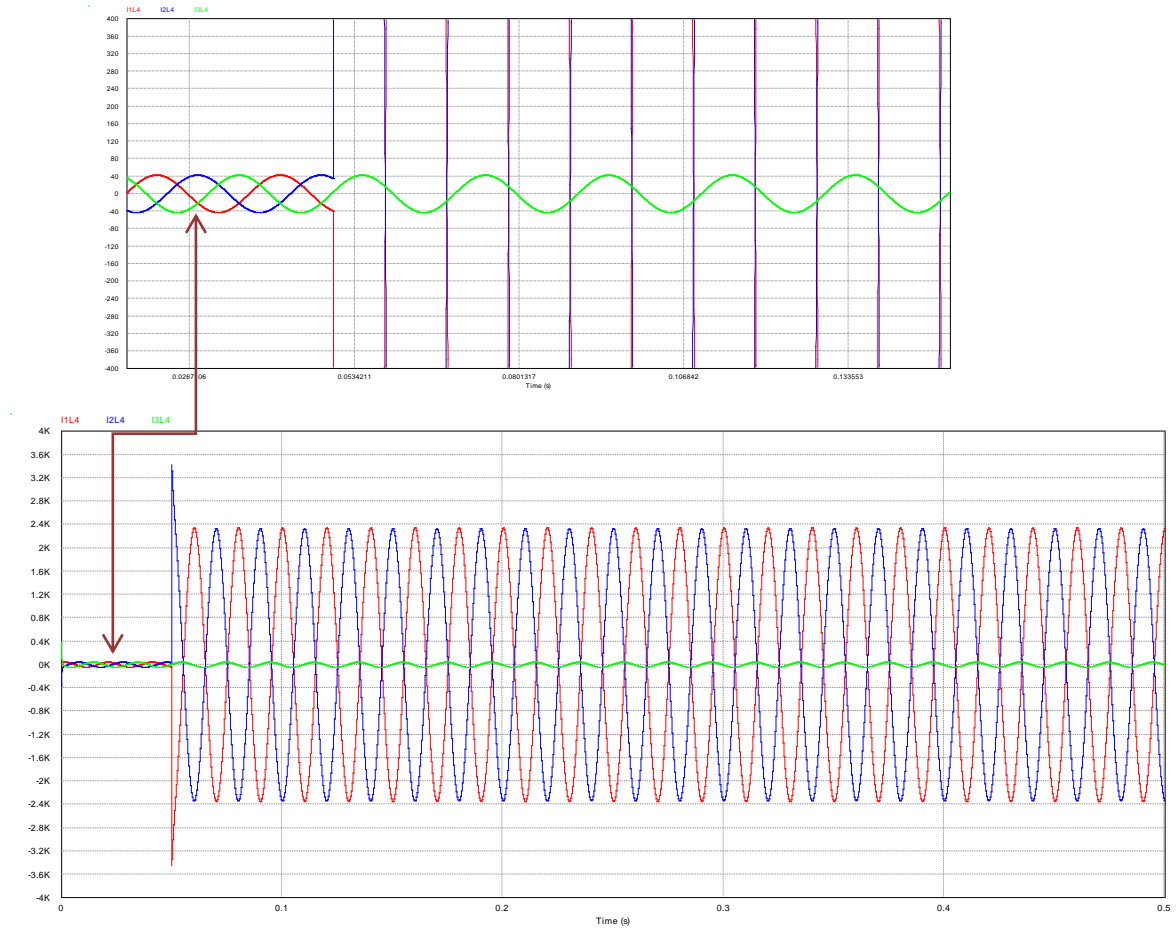


Figure IV.23. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°4.

- Les tensions de la ligne N°4

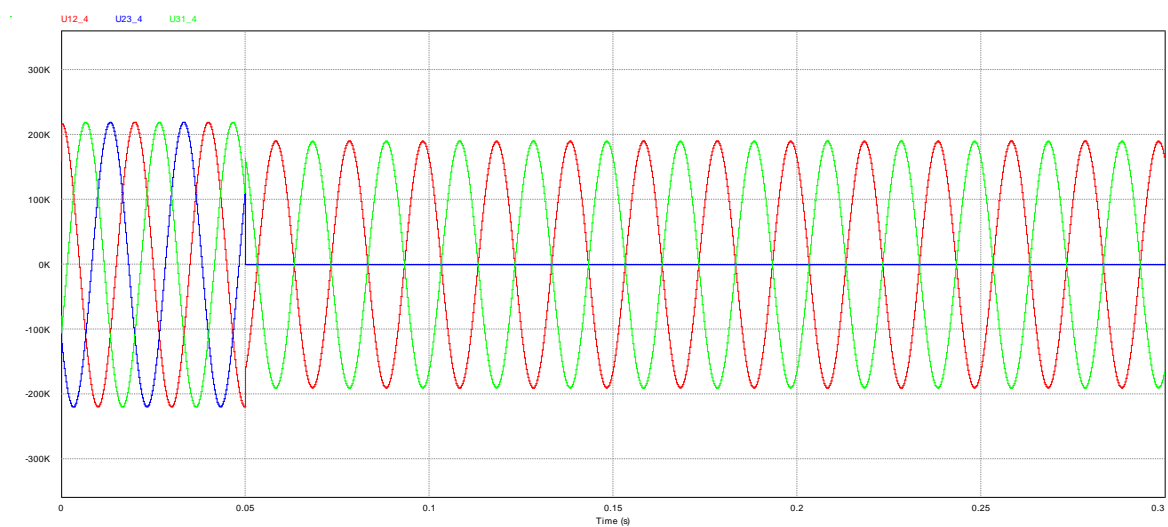


Figure IV.24. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°4.

Interprétation des résultats : Le courant nominal de la ligne N°4 est $I_n = 43 \text{ A}$, jusqu'à l'application du défaut à $t = 0.1 \text{ s}$ à partir de cet instant, Le courant de défaut $I_{cc} = 2.35 \text{ kA}$ ($I_{cc} = 40I_n$) des deux phases défectueuses (V-W), par ailleurs la phase (V) reste saine avec un courant de 43 A qui est la valeur nominale. Et pour les tensions on voit qu'un écrasement (sa valeur égale à zéro) de la tension U_{23} à cause de la mise à la terre des deux phases V et W.

b- Circuit avec Défaut et Avec Limiteur

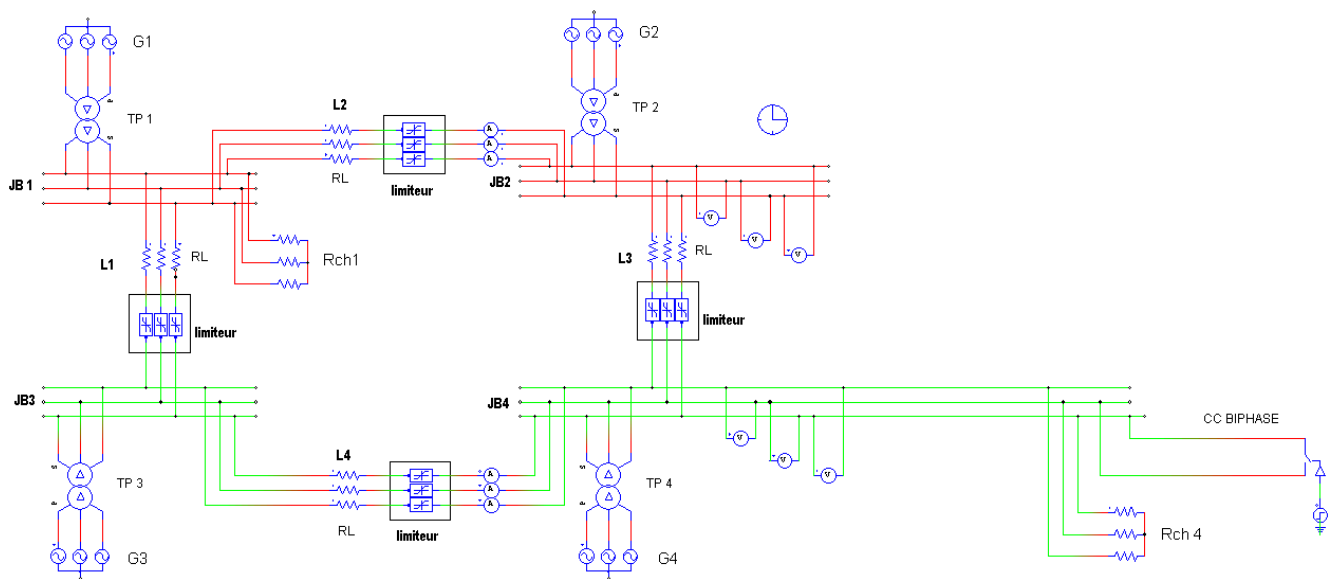


Figure IV.25. Circuit avec Défaut Biphase et Avec Limiteur

- Les courants de la ligne N°2

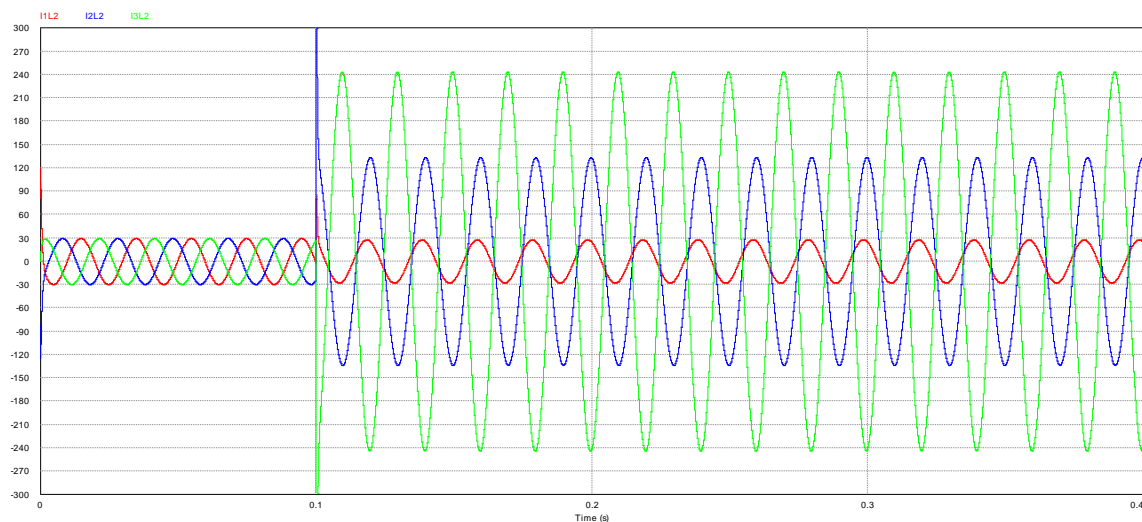


Figure IV.26. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°2.

- Les tensions de la ligne N°2

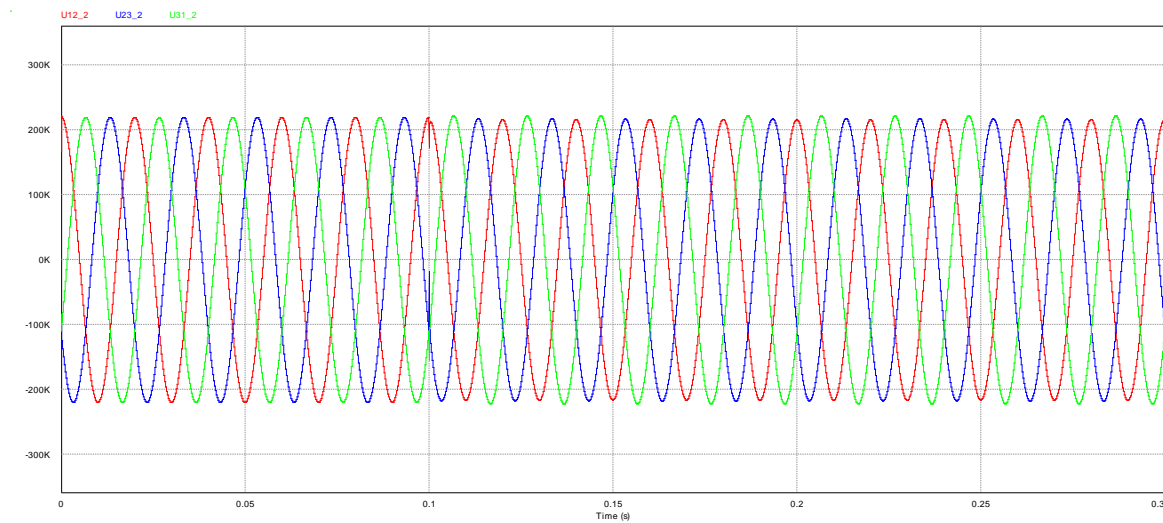


Figure IV.27. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°2.

Interprétation des résultats : Après avoir inséré le limiteur on voit clairement que le courant est limité d'une valeur de 320 A sans SFCL à une valeur $I_2 = 240$ A et $I_3 = 125$ A avec SFCL (cette différence entre I_2 et I_3 est causée par le déséquilibre) à l'instant d'application du défaut (0.1 s) le courant de défaut dépasse le courant critique, par conséquent l'intervention du limiteur du courant où il joue le rôle d'une résistance à grande valeur (la transition du supraconducteur de l'état passant à l'état purement résistif).

- Les courants de la ligne N°4

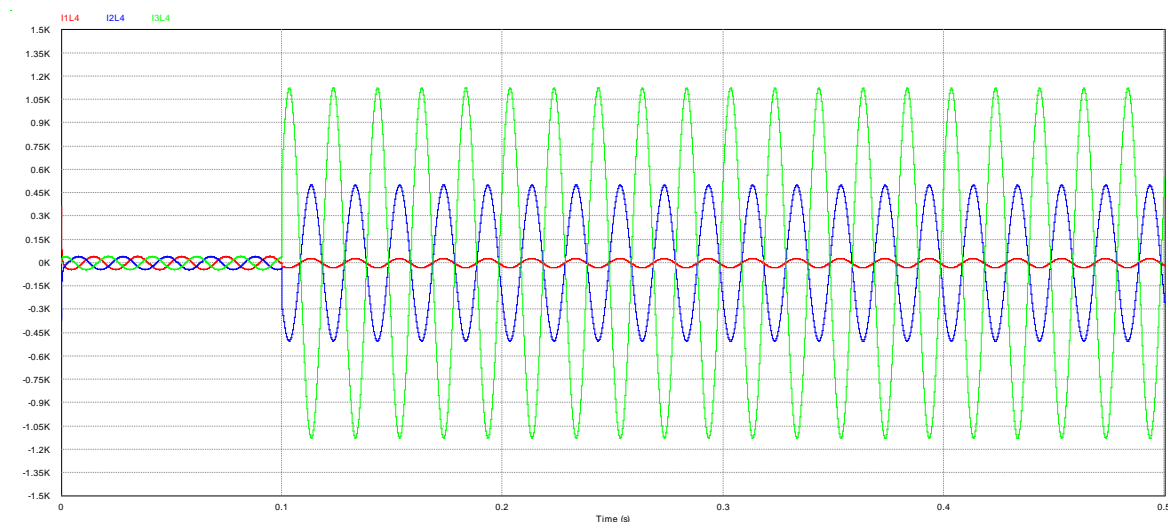


Figure IV.28. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°4.

- Les tensions de la ligne N°4

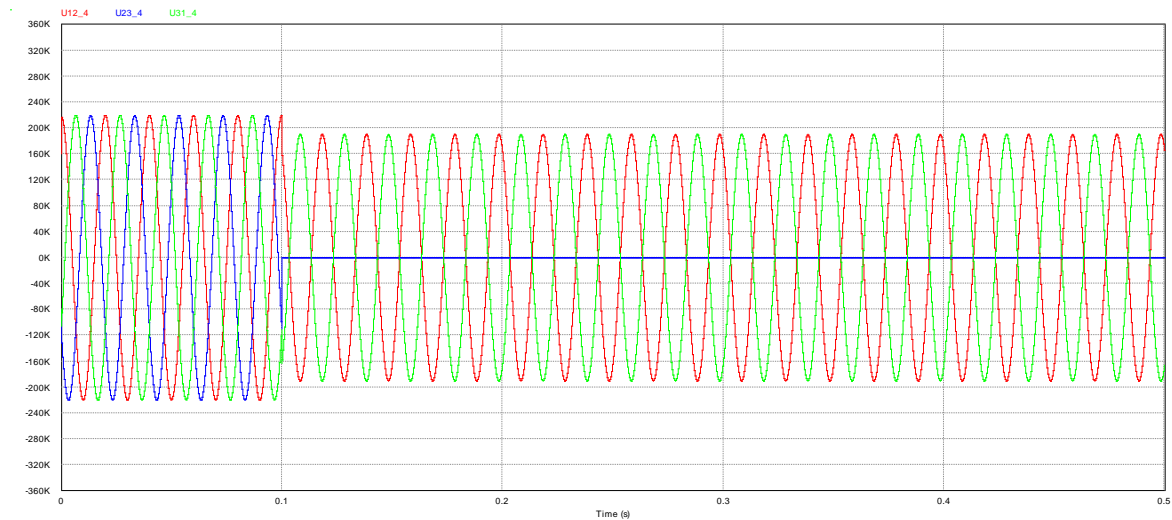


Figure IV.29. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°4.

Interprétation des résultats : Après avoir inséré le limiteur on voit clairement que le courant est limité d'une valeur de 2.35 kA sans SFCL à une valeur $I_2 = 1.1$ kA et $I_3 = 0.5$ kA avec SFCL (cette différence entre I_2 et I_3 est causée par le déséquilibre) à l'instant d'application du défaut (0.1 s) où le courant de défaut dépasse le courant critique, par conséquent l'intervention du limiteur du courant. Et pour les tensions un écrasement de la tension U_{23} également.

IV.6.2.2. Court-circuit Triphasé

a- Circuit avec Défaut et Sans Limiteur :

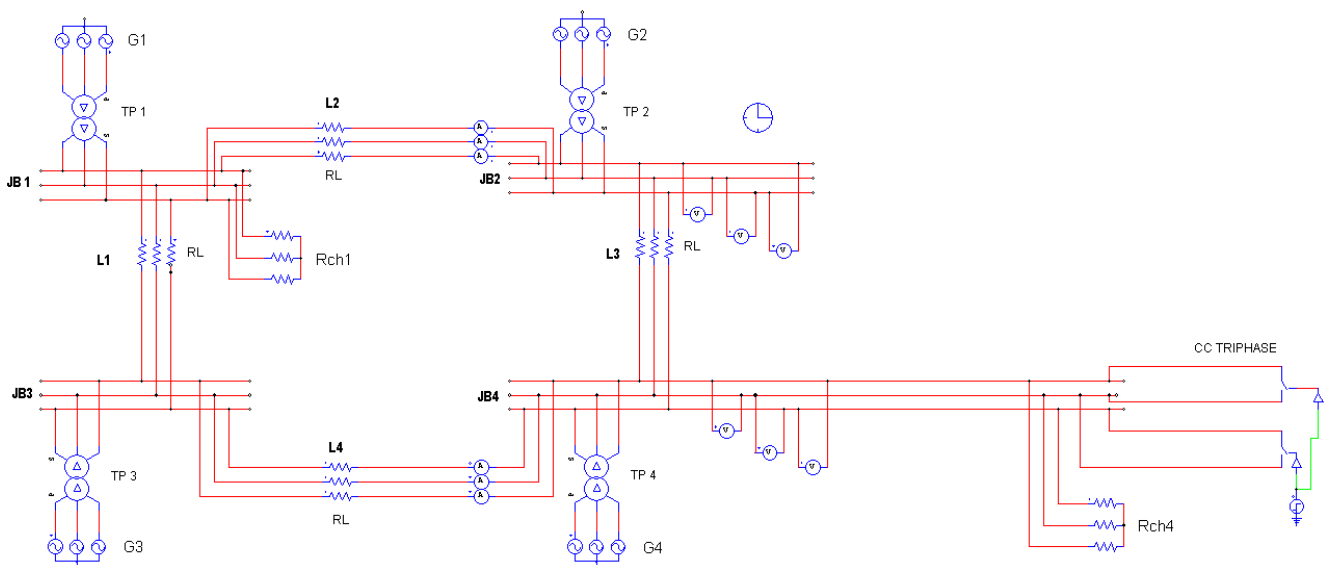


Figure IV.30. Circuit avec Défaut Triphasé et Sans Limiteur.

Un court-circuit Triphasé au niveau du jeu de barre **JB 4** (U-V-W) est appliqué à l'instant $t = 0.05$ s et pour une bonne visibilité, la simulation est effectuée sur une durée de 0.2 s

- Les courants de la ligne N°2

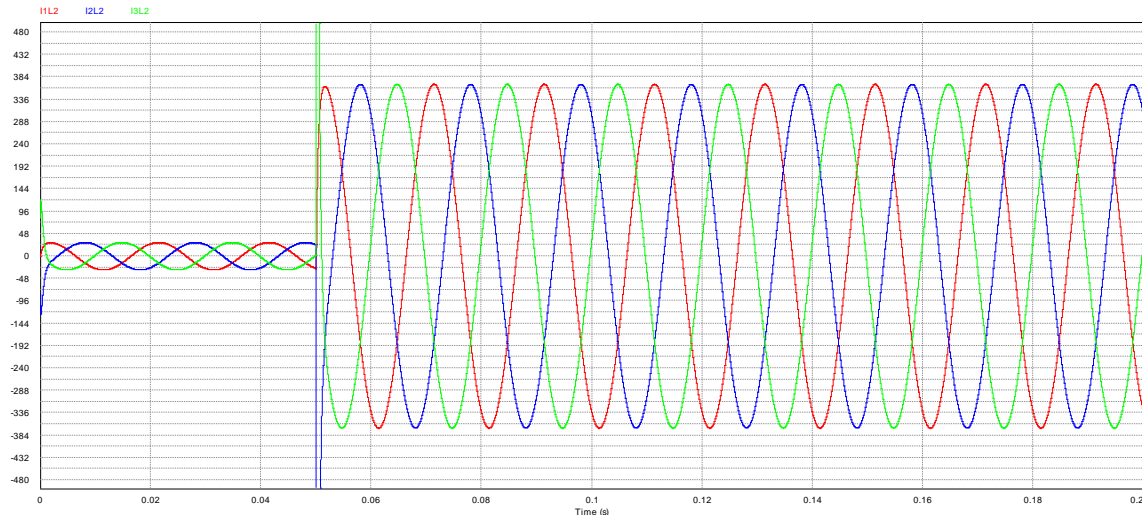


Figure IV.31. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°2.

- Les tensions de la ligne N°2

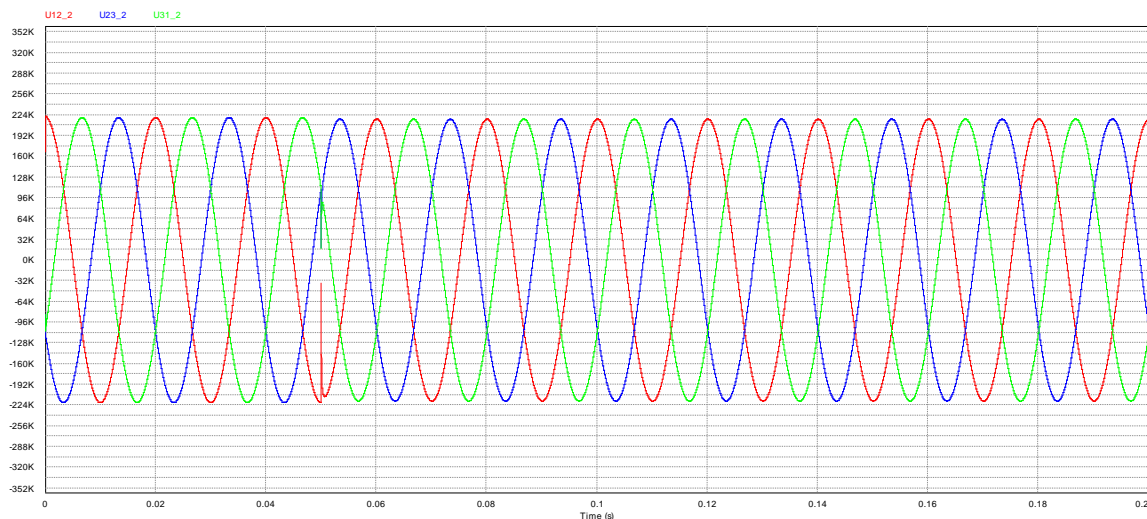


Figure IV.32. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°2.

Interprétation des résultats : Le courant nominal de la ligne N°2 est $I_n = 30$ A, jusqu'à l'application du défaut à $t = 0.05$ s, à partir de cet instant, Le courant de défaut $I_{cc} = 360$ A. Et pour les tensions on voit qu'un écrasement (sa valeur égale à zéro) des trois tensions à cause de la mise à la terre des trois phases U, V et W.

- Les courants de la ligne N°4

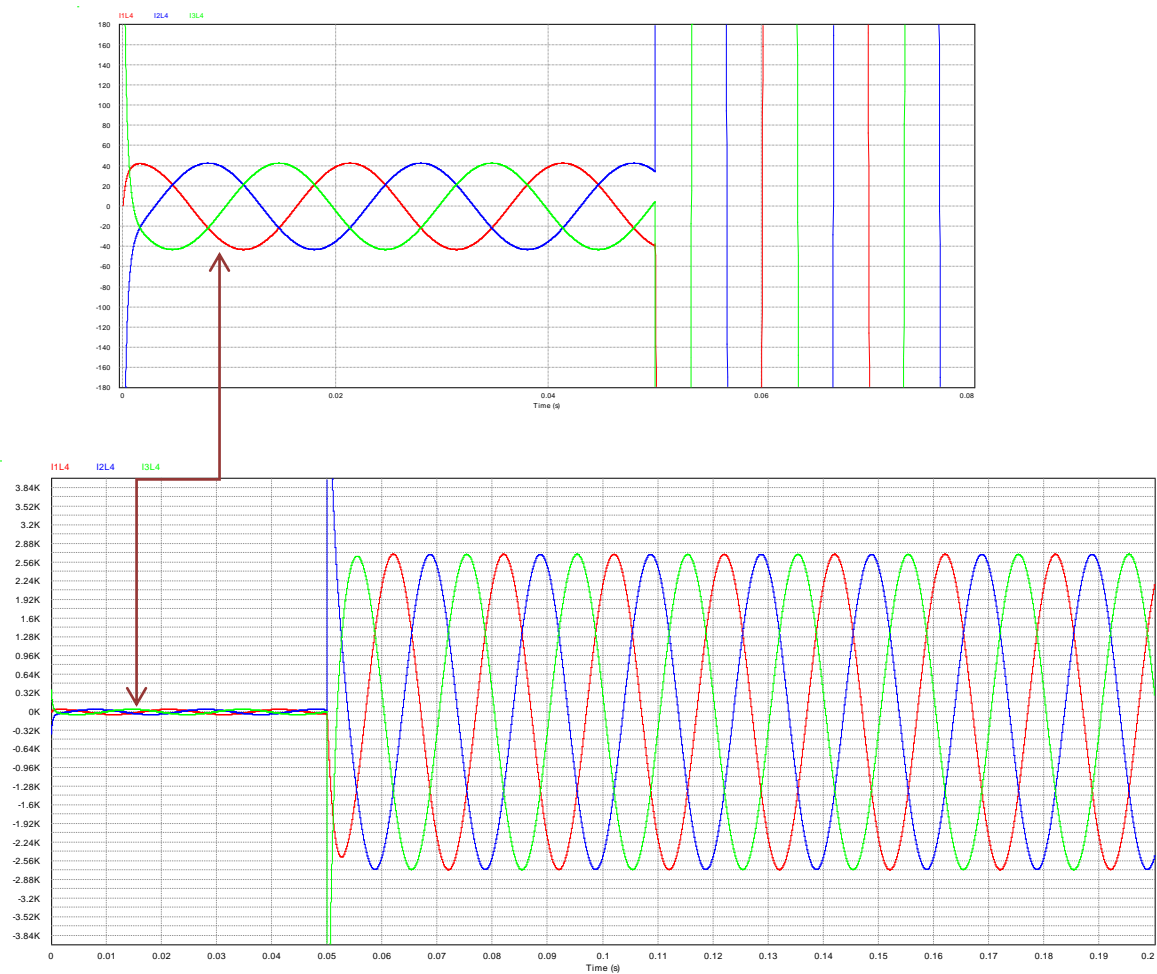


Figure IV.33. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°4.

- Les tensions de la ligne N°4

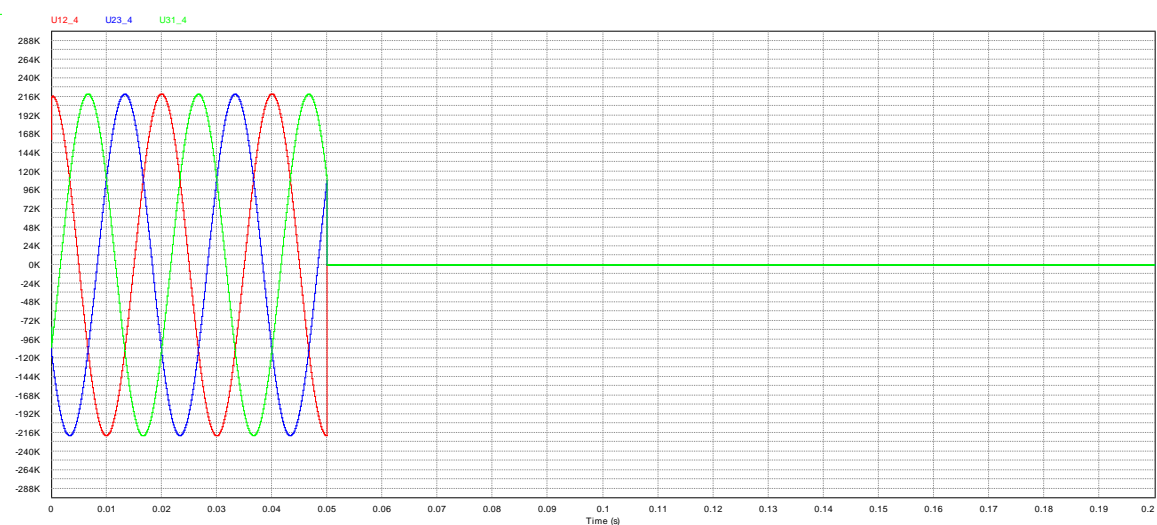


Figure IV.34. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°4.

Interprétation des résultats : Le courant nominal de la ligne N°4 est $I_n = 43 \text{ A}$, jusqu'à l'application du défaut à $t = 0.05 \text{ s}$, à partir de cet instant, Le courant de défaut $I_{cc} = 2.72 \text{ kA}$. Et pour les tensions on voit qu'un écrasement (sa valeur égale à zéro) des trois tensions à cause de la mise à la terre des trois phases U, V et W.

b- Circuit avec Défaut et Avec Limiteur :

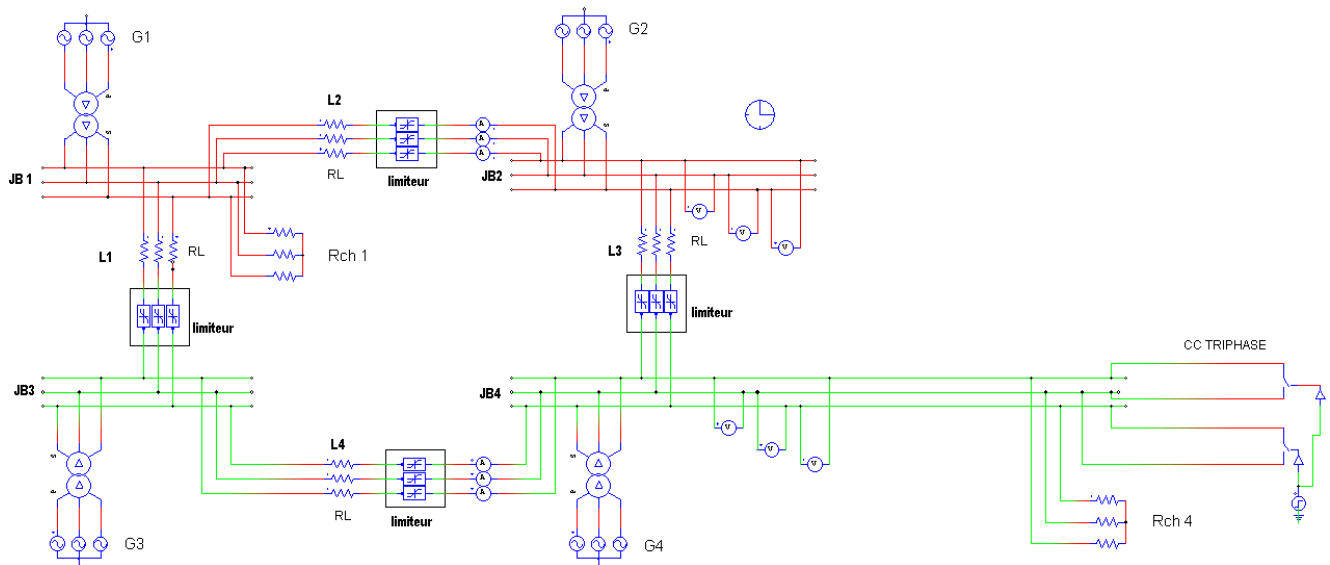


Figure IV.35. Circuit avec Défaut Triphasé et Avec Limiteur.

- Les courants de la ligne N°2

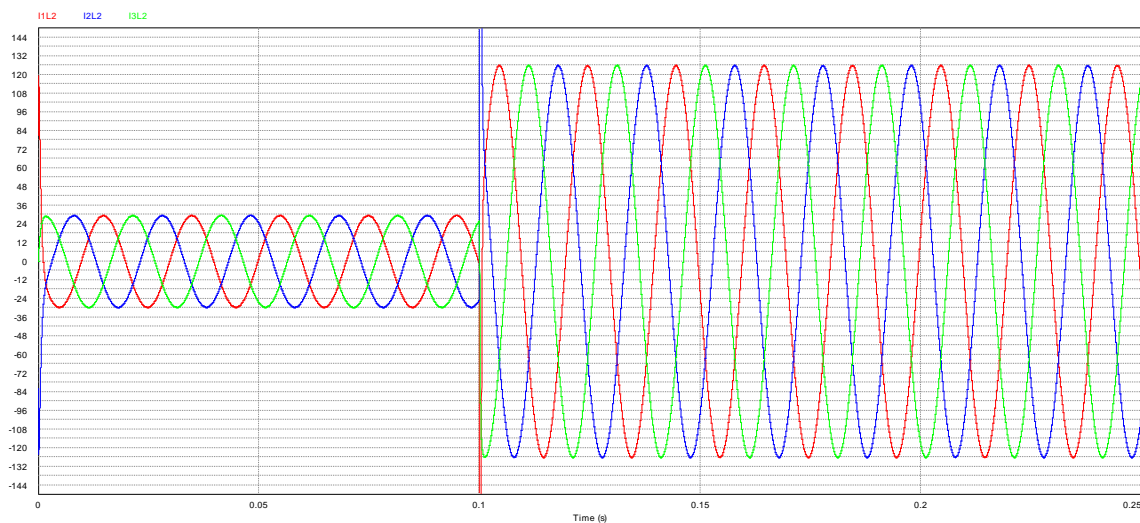


Figure IV.36. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°2.

- Les tensions de la ligne N°2

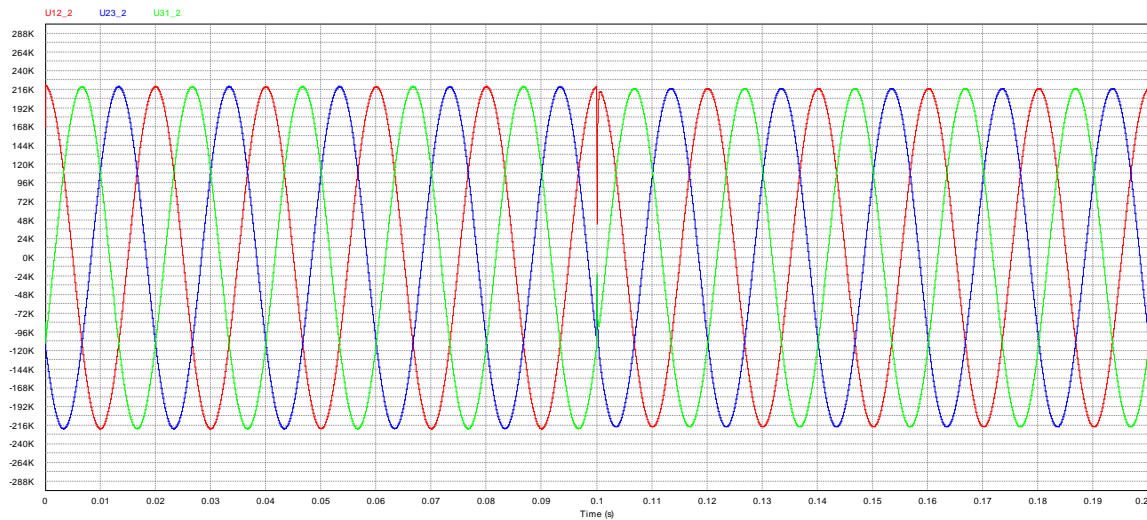


Figure IV.37. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°2.

Interprétation des résultats : Après avoir intégré le limiteur supraconducteur dans le circuit on constate clairement que, les courants pendant la période de défaut à $t \leq 0,1$ s $I_n = 30$ A. à $t \geq 0,1$ s $I_{cc} = 126$ A, les courants de court-circuit sont réduits d'un facteur important à cause de l'intervention du limiteur.

- Les courants de la ligne N°4

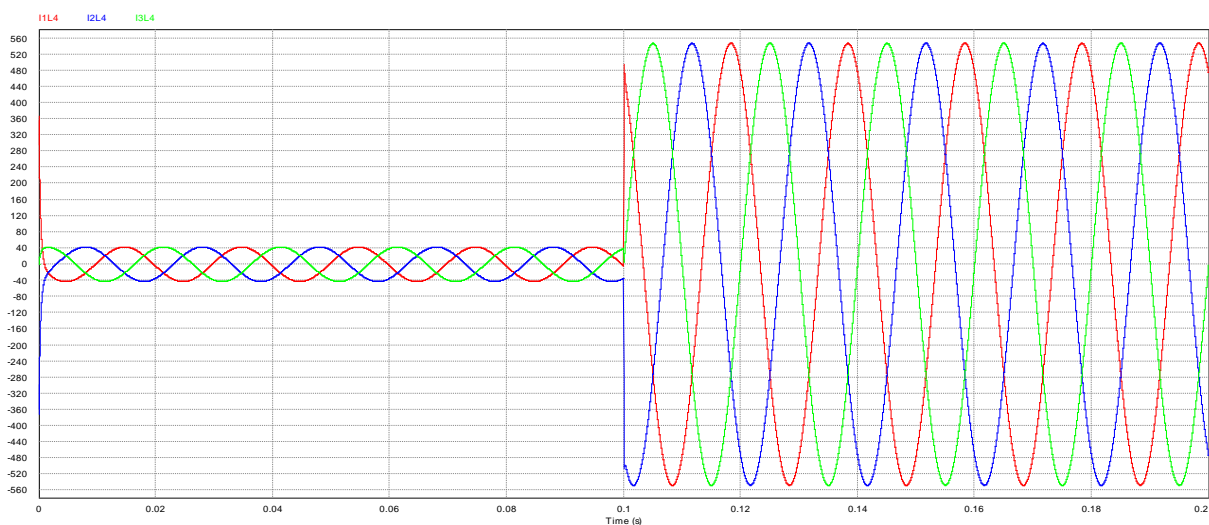


Figure IV.38. L'allure des courants I_1 , I_2 , I_3 de la ligne N°4.

- Les tensions de la ligne N°4

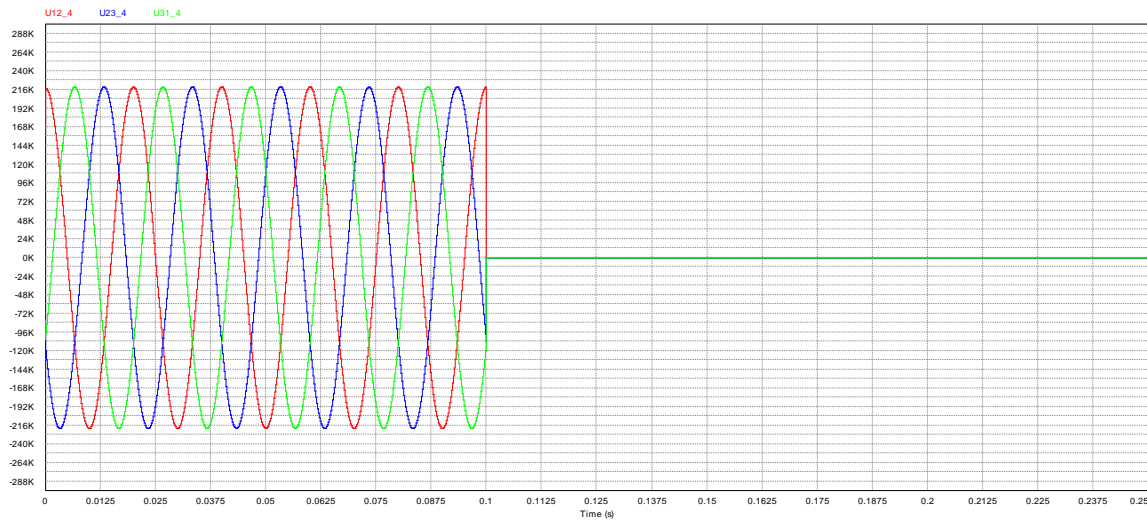


Figure IV.39. L'allure des tensions U_{12} , U_{23} , U_{31} de la ligne N°4.

Interprétation des résultats : Après avoir intégré le limiteur supraconducteur dans le circuit on constate clairement que, les courants pendant la période de défaut à $t \leq 0,1$ s $I_n = 43$ A. à $t \geq 0,1$ s $I_{cc} = 550$ A, les courants de court-circuit sont réduit d'un facteur important à cause de l'intervention du limiteur.

IV.7.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé deux méthodes de calcul du courant de court de circuit, la méthode analytique à base du calcul manuel à partir des relations mathématique et l'autre méthode à l'aide du logiciel PSIM. Grace à ce dernier nous avons pu présenter les résultats de simulation du courant de défaut dans un réseau à quatre jeux de barres et de voir le comportement et l'intérêt du limiteur supraconducteur à travers les simulations avec et sans l'insertion de ce dispositif.