

Chapitre 2 : Écoulement de puissance

(1)

L'analyse d'écoulement de puissance (répartition de puissance) fait partie des études de planification des réseaux électriques. Cette analyse d'écoulement de puissance est basée sur les calculs de la tension, l'angle de déphasage à chaque barre d'un réseau triphasé équilibré en régime permanent et les puissances actives et réactives transitées dans le réseau ainsi que les pertes (power flow ou load flow).

Classification des jeux de barres:

À chaque jeu de barre (nœud) sont définis les 4 paramètres

P : Puissance active injectée ou soustraite

Q : Puissance réactive injectée ou soustraite

V : module de la tension

δ : déphasage de la tension

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en trois catégories:

1. jeu de barre de référence (swing bus) ou nœud pivot ou slack:

Il n'y a qu'une seule barre de référence dans un réseau (on lui attribue normalement le numéro 1)

- Variables spécifiées (imposées) V_1 et δ_1 ($V_1 = 1 \text{ pu}$, $\delta_1 = 0$)

- Variables à calculer P_1 , Q_1 .

2 La barre de contrôle on prend généralement (P V)

- Variables spécifiées : P_k et V_k
- Variables à calculer : ψ_k et δ_k .

3 La barre de charge on prend charge (P ψ)

- Variables spécifiées : P_k et ψ_k
- Variables à calculer : V_k et δ_k .

Formulation à l'aide de la matrice d'admittance :

Pour la résolution d'un problème de répartition de charge, il est plus commode de travailler avec les admittances plutôt qu'avec les impédances.

Supposons que le réseau soit composé d'éléments linéaires.

Le circuit obéit alors à la loi $\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{V}$

où \underline{V} est le tension phase/terre et \underline{I} le courant injecté en un nœud. La matrice \underline{Y} est appelée matrice d'admittance aux nœuds.

La valeur des composantes de la matrice d'admittance est établie par inspection de la manière suivante :

- L'admittance propre Y_{ii} associée au nœud i est égale à la somme des admittances des branches incidentes à ce nœud.
- L'admittance de transfert Y_{ki} associée aux nœuds k et i est égale à l'admittance de la branche qui joint les deux nœuds, changée de signe.

La puissance injectée au nœud i vaut :

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^*$$

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^n \bar{Y}_{ik} \bar{V}_k$$

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i \left(\sum_{k=1}^n \bar{Y}_{ik}^* \bar{V}_k^* \right) = P_i + j Q_i$$

Nous pouvons exprimer les composantes réelles et imaginaires de la puissance injectée en chaque nœud de la manière suivante :

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

$$= V_i^2 Y_{ii} \cos \theta_{ii} + V_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

$$= V_i^2 Y_{ii} \sin \theta_{ii} + V_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

Méthodes Numériques appliquées pour la résolution de l'écoulement de puissance.

Pour résoudre les équations d'écoulement de puissance, un grand nombre de solutions numériques sont disponibles. Ce sont en gros :

- La méthode de Gauss-Jacob
- La méthode de Newton-Raphson

Méthode de Gauss Seidel :

$$I = Y \cdot V$$

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} V_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k$$

$$Y_{ii} V_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k$$

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \right]$$

Algorithme de Gauss Seidel :

- 1^{er} Etape : Formation de la matrice admittance
- 2^{em} Etape : Estimation des valeurs initiales des tensions nodales V_i^0 et S_i^0
- 3^{em} Etape : Calcul des tensions pour chaque nœud suivant la relation

$$V_i^{(z+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(z)*}} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \right]$$

on calcule l'écart entre les valeurs d'une même tension aux itérations suivantes :

$$\Delta V_i^{(z)} = V_i^{(z+1)} - V_i^{(z)}$$

on introduit le facteur d'accélération pour réduire le nombre d'itérations :

$$V_i^{k+1} = V_i^{(k)} + \alpha \Delta V_i^{(k)}$$

Chercher le facteur de convergence suivant :

$$|V_i^{k+1} - V_i^{(k)}| < \epsilon$$

4^{ème} étape :

Une fois le test de convergence est vérifié les valeurs des tensions de la dernière itération sont retenues on calcule :

Les puissances complexes

$$S_{ik} = V_{ik}^* (V_i - V_k) Y_{ik} + V_i^* V_i \frac{Y_{ii}}{2}$$

Les pertes

$$S_L = \sum S_i$$

Si on aller à l'étape 3

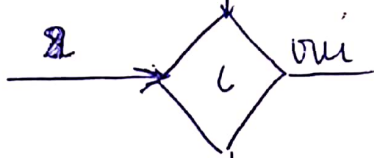
Calcul de la matrice admissible

Estimation des tensions initiales pour $i = 1, 2, \dots, m \quad i \neq S$

Calcul des paramètres des équations des tensions

Itérations $\tau = 0$

Moy $V^{(\tau)} = 0$ et $i = 1$



Résoudre l'équation de tension pour le nœud k

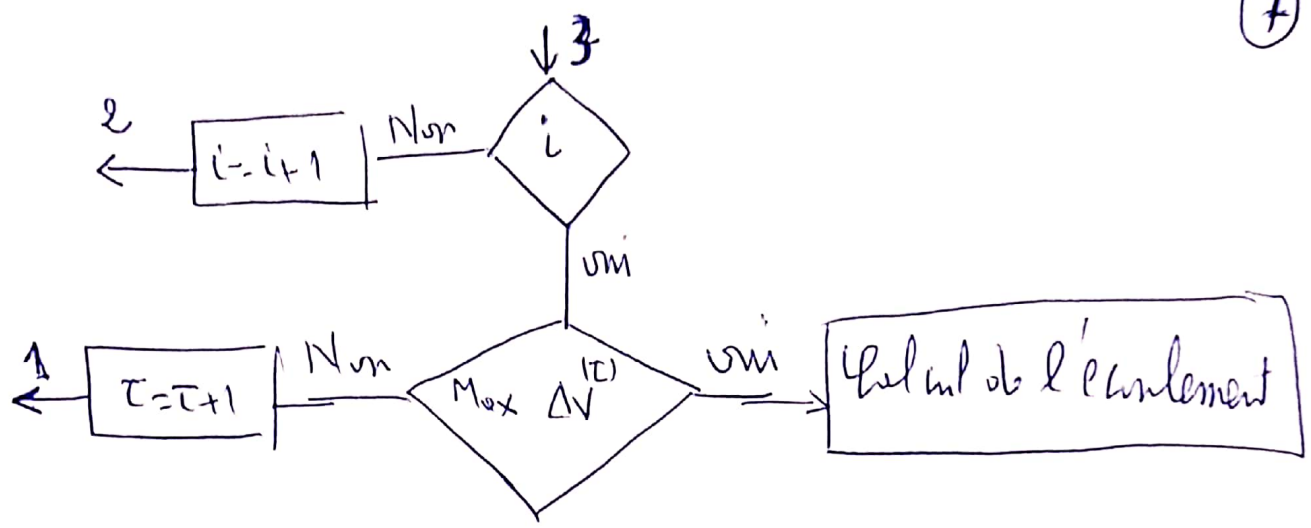
$$V_i^{(\tau+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{S_i^*}{V_i^{(\tau)}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m Y_{ij} V_j^{(\tau)} \right]$$

Calcul $\Delta V_i^{(\tau)} = V_i^{(\tau+1)} - V_i^{(\tau)}$



Moy $\Delta V^{(\tau)} = \Delta V_i^{(\tau)}$

$V_i^{(\tau)} = V_i^{(\tau+1)}$



organigramme de la méthode de Gauss Seidel.

Méthode de Newton Raphson :

Cette méthode est la plus utilisée pour résoudre les équations non linéaires. Dans les réseaux électriques, elle a été aussi la méthode préférée pour la plupart des logiciels commerciaux.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta \phi_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \phi_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial S_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial S_n} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial V_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial V_n} \right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial S_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial S_n} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial V_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial V_n} \right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial S_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial S_n} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial V_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial V_n} \right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial \phi_n}{\partial S_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial \phi_n}{\partial S_n} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial \phi_n}{\partial V_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial \phi_n}{\partial V_n} \right)^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

Le Jacobien J_1 :

Les elements diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

Les elements non diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i$$

Le Jacobien J_2 :

Les elements non diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Les elements diagonaux :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = 2 |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + \sum_{d \neq j} |Y_{id}| |V_d| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{id})$$

Le Jacobien J_3 :

Les elements non diagonaux :

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial \delta_j} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

Les elements diagonaux :

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| / |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

Le Jacobien J_Y :

Les elements non diagonaux :

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| / |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i$$

Les elements diagonaux :

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| / |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |V_i| / |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

Le test de convergence de la methode :

$$\Delta P_i = P_{ip} - P_{ica}$$

$$\Delta \Phi_i = \Phi_{ip} - \Phi_{ica}$$

P_{ip} : Puissance active planifiee

P_{ica} : " " calculée

Φ_{ip} : " reactive planifiee

Φ_{ica} : " " calculée

Le passage d'une iteration vers l'autre se fait a partir de ajustements suivants :

$$S^{(k+1)} = S^{(k)} + \Delta S^{(k)}$$

$$V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta V^{(k)}$$

le: le nombre d'éléments

objectif

Lecture des données du système

Formulation de la matrice admettant X_{jlb}

Estimation initiale des tensions et de phase au JLB

3 \rightarrow meth le nombre d'élément $k=1$

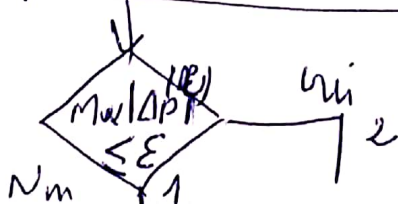
Calcul des puissances actives et réactives au JLB

$$P_i^{(k)} = |P_1^{(k)}, P_2^{(k)} \dots P_n^{(k)}| \quad i \neq \text{ref}$$

$$Q_i^{(k)} = |Q_1^{(k)} \dots Q_n^{(k)}| \quad i \neq \text{ref}$$

Calcul des différences entre les puissances estimées et les puissances calculées

Détermination de maximum variation dans le puissance



2 → Calcul des puissances des lignes et les valeurs de la tension V_k

1 → Calcul des éléments de la matrice Jacobienne

Calcul des corrections de tension et de phase

Calcul des nouvelles tensions au k

Remplacer $\delta_i^{(k)}$ par $\delta_i^{(k+1)}$
 $i \neq n$ $i = 1, 2, \dots, n$

3 ← $k = k + 1$