
Chapitre 1

Introduction à la Planification des réseaux
électriques

Chapitre I

Introduction à la planification des réseaux électriques

I.1. Introduction

Le secteur de l'énergie et notamment le secteur électrique est le nerf de l'économie d'un pays. Aujourd'hui, l'électricité étant un bien de consommation indispensable non stockable. Elle doit être acheminée en temps réel des centres de production vers les consommateurs finaux, industriels ou domestiques. L'offre doit pouvoir satisfaire la demande à tout moment, on peut dire alors que le réseau électrique est piloté par la consommation des activités sociales, économiques et industrielles. Une adéquation est nécessaire entre les capacités de production et les réseaux de transport et de distribution disponibles à moyen et à long terme, d'une part, et l'évolution de la demande future d'électricité, d'autre part [1].

La planification des systèmes d'énergie électrique est le processus de recherche des meilleures sources d'énergie et des équipements, leurs emplacements et l'échéancier de déploiement pour servir une demande future. C'est un processus d'optimisation et de prise de décision. La solution optimale dépend des objectifs et des préférences du planificateur [2]. Le rôle de la planification des réseaux est d'élaborer des méthodes de pensée et de calcul qui permettent de conduire aux meilleurs développements des réseaux dans le but de minimiser le coût total d'investissement, trouver une réserve en énergie propre, améliorer les performances du système, maximiser les exportations d'énergie ou de réduire au minimum les importations.

I.2. Définition

La planification est un processus qui consiste à fixer les objectifs, déterminer les moyens nécessaires pour la réalisation de ces objectifs et définir les étapes pour les atteindre. La planification est un apport de souplesse dans la gestion car elle permet d'anticiper les situations futures. Planifier consiste à choisir une ou des stratégies et à formaliser leur mise en œuvre. Planifier, c'est concevoir un futur désiré et les moyens d'y parvenir. C'est un processus de mise en œuvre de stratégies et d'élaboration de programmes d'actions destinés à les réaliser.

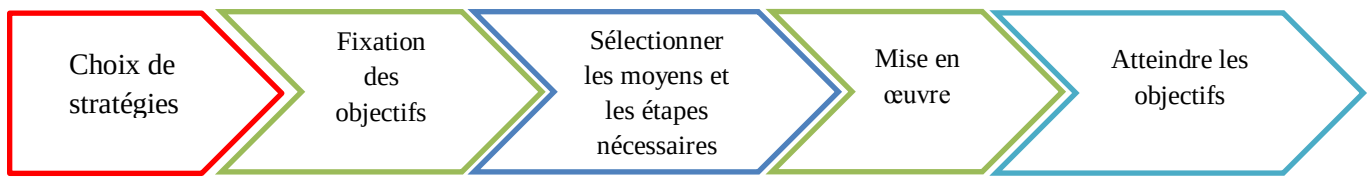


Figure I.1. Schéma de la démarche de planification

La planification doit assurer :

- La fiabilité : On doit assurer une fourniture fiable de la demande, compte tenu de son développement prévisible;
- L'économie : On doit rechercher une minimisation des coûts d'investissement et d'exploitation tout en respectant des contraintes sociales, financières, politiques, géographiques et d'environnement.

1.3. Objectifs de la planification des réseaux électriques

La planification a pour but de garantir le bon fonctionnement des réseaux notamment la stabilité du réseau, la sécurité d'approvisionnement des clients finaux, La sécurité des réseaux transfrontaliers, la sécurité des personnes et des biens, le respect des contraintes environnementales et du développement durable. Elle vise également à :

- Minimiser les coûts d'exploitation (coût des pertes, coût de l'énergie non distribuée.....) ;
- Minimiser les coûts d'investissement ;
- Prévoir les moyens financiers nécessaires pour le développement du réseau;
- Garantir une capacité adéquate par rapport aux besoins de transit et de réserve lors de raccordement d'une nouvelle installation tel que centrales de production, charges, lignes de transport ou postes de transformation ;

1.4. Echelle temporelle de la planification des réseaux électriques

La planification des réseaux électriques est scindée en plusieurs horizons temporels y compris, Planification à long terme, planification à moyen terme et planification à court terme.

1.4.1 Planification à court terme

Généralement mesuré en jours ou en semaines et peut aller jusqu'à un an comprennent des projets déjà planifiés ou autorisés. Au niveau opérationnel, la demande peut amener à

déterminer le créneau du travail et elle influe également les fonctions d'approvisionnement, d'expédition et de réception.

I.4.2 Planification à moyen terme

Généralement mesuré en années et peut aller jusqu'à 10 ans. La planification à moyen terme consiste à construire des projets déjà planifiés ou autorisés. Elle permet également de donner l'ensemble des opérations à effectuer sur le réseau sur la période de 0 à 10 ans.

I.4.3 Planification à long terme

La planification à long terme permet de construire des cibles sur un horizon dépassant en général 10 ans et plus (Peut aller jusqu'à 30 ans). Elle consiste à construire tous les projets futurs, autorisés ou non. Les études à long terme sont basées sur l'évolution de la charge, l'évolution des installations de production, la répartition géographique de la charge, l'évolution des impacts énergétiques (l'efficacité, la réduction de CO₂, etc.) ainsi que des études de simulation de réseaux.

La planification à long terme vise plus loin dans l'avenir. Donc, elle fait inclure une large gamme d'options d'analyse. Traditionnellement, dans les services publics réglementés, la planification à long terme vise à fournir des solutions à valeur durable: un vrai coût minimal pendant toute la durée d'utilisation de l'équipement. Bien au contraire, dans un marché concurrentiel, la planification à long terme vise à récupérer les investissements de capital dans la période la plus courte possible ou maximiser les revenus sur la durée de vie des investissements. Dans les deux cas, l'analyse doit tenir compte de la durée de vie utile des alternatives pour fournir une évaluation adéquate. Dans un plan à long terme, il est essentiel de prendre en compte de tous les changements possibles qui pourraient se produire dans les systèmes d'énergie électrique et de son environnement économique dans la période d'analyse. Ces changements comprennent:

- La croissance dans la demande de la charge existante,
- Les changements de comportement de la demande (à cause des mesures d'efficacité énergétique, par exemple),
- Les nouvelles charges et / ou connexions de génération,
- Les changements dans l'infrastructure du réseau (par exemple le vieillissement des équipements),
- Les changements dans les caractéristiques techniques des équipements (par exemple augmentation de l'efficacité, la réduction des émissions),
- Les changements dans les coûts de l'équipement et du carburant,

- Les changements de prix dans le marché d'énergie,
- Les changements dans l'environnement réglementaire (taxes, incitations).

Tableau I. 1. Exemples d'investissements moyen et long terme

	Planification moyen terme	Planification long terme
Horizon temporel	<u>1 à 5ans</u>	<u>Supérieur à 10 ans</u>
Exemples	- Demande de raccordement d'un consommateur ou d'un producteur - Schémas directeurs de développement du réseau pour lever les contraintes techniques. - Travaux de maintenance - Stratégie d'achat de ressources primaires - Stratégie de management des équipes	- Construction et/ou démantèlement de lignes - Modification des architectures et/ou de leurs schémas de secours par l'ajout de nouveaux départs - Fusion de départs existants - Création de postes sources

I.5. Types de planification des réseaux électriques

a) Planification sortie de terre

Lorsque le réseau électrique est nouveau, ce type de planification est proposé. Dans ce cas, le développement des infrastructures nationales (par exemple poste HTB/HTA) est basé sur des plans d'investissement décennaux qui ont pour objectif d'anticiper les évolutions de production, de consommation et de satisfaire la demande d'énergie.

b) Extension de réseau

L'extension de réseau s'aligne sur une vision à moyen et à long terme, basée sur le réseau existant. Ce type a pour objectif d'étudier l'impact de raccordement des nouveaux consommateurs ou producteurs au réseau et évaluer les réseaux électriques existants en analysant leur performance et leurs failles de façon à établir des stratégies de développement à coût minimal et choisir une solution technique à un problème posé afin de diminuer un taux de défaillance.

c) Planification opérationnelle

La planification opérationnelle est le processus qui se focalise sur des travaux d'entretien à moyen et à court terme. Elle décrit les étapes clés, les budgets et les conditions de la réussite ainsi que les problèmes rencontrés dans l'exploitation courante du réseau électrique. Il s'agit

des travaux hebdomadaires ou journaliers. Les études technico-économiques assurées par ce type de planification permettent de choisir une solution technique à un problème posé.

I.6 Enjeux et contexte politico-économique de la planification des réseaux électriques

Pour atteindre les objectifs de planification, il faut prendre en compte plusieurs spécificités inhérentes au réseau électrique :

- Le fonctionnement des réseaux électriques est complexe du fait de l'interdépendance des ouvrages et du caractère aléatoire à l'origine des dégradations de fonctionnement (perte d'éléments de réseau suite à un défaut) ;
- Les ouvrages d'un réseau électrique ont une durée de vie de 40 ans et plus. La réalisation de nouveaux ouvrages impacte l'architecture des réseaux à long terme. Donc les choix effectués engagent largement l'avenir. Le long terme est donc à prendre en considération, mais, également, le poids résultant des choix passés ;
- Les délais de réalisation des ouvrages varient entre quelques mois et plusieurs années. Le poids et la complexité de certains ouvrages nécessitent des durées de construction relativement longues. De plus, ces durées sont allongées par la nécessaire prise en compte des contraintes d'environnement (négociation avec les autorités compétentes, autorisations...). Les délais de réalisation peuvent être de plusieurs années, ce qui rend difficile la souplesse d'adaptation aux charges. Le développement de réseaux doit donc, être anticipé à moyen et long termes ;
- Le renforcement et la création des ouvrages nécessitent des investissements potentiellement lourds. Pour un problème technique donné, différentes solutions doivent donc être imaginées pour trouver un optimum technico-économique. Les investissements annuels sont donc très lourds et ils sont le résultat de l'agrégation de milliers de décisions d'importance variable (du simple raccordement d'un client au choix d'une grande option technique), prises à différents niveaux et disséminées sur l'ensemble du territoire où les problèmes peuvent se poser de manières différentes suivant les régions.
- Les choix d'investissements dégagés sont confrontés à un environnement futur incertain : écarts de prévision de consommation, connaissance des nouveaux producteurs limitée à quelques années, évolution possible du cadre réglementaire, etc. Il est donc nécessaire d'avoir une vision stratégique et de réviser régulièrement les choix de planification long terme pour tenir compte des écarts de prévision et des évolutions significatives du réseau à court et

moyen termes.. Toutes ces considérations font bien apparaître la nature des compromis à rechercher : entre le court et le long terme, entre investissements et coûts d'exploitation, entre dépenses sur le réseau et qualité du produit distribué, entre les différentes régions

- La planification des réseaux électriques se prête bien au calcul technico-économique du fait de l'importance de la composante économique dans les choix à effectuer. Mais on voit bien que beaucoup d'éléments entrant en ligne de compte sont difficilement quantifiables : obligations de service public, contraintes d'environnement, contraintes d'exploitation, etc.

De ce fait, la planification des réseaux doit rechercher des compromis, notamment entre :

- Les objectifs à court terme et les objectifs à long terme,
- Les investissements et les coûts opérationnels,
- Le coût et la qualité d'acheminement de l'électricité,

Pour y parvenir, on doit rechercher une minimisation des coûts d'investissement et d'exploitation tout en respectant des contraintes sociales, financières, politiques, géographiques et d'environnement. La planification recouvre donc de nombreuses actions :

- Prévoir le développement de la demande de l'électricité,
- Choisir les techniques de production et de transport adaptées aux conditions futures d'exploitation,
- Définir la structure générale du système,
- Définir ses possibilités et les choix d'investissement (nouveaux ouvrages et leurs lieu et date de mise en service).

I.7. Définition et structure des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution. Pour assurer sa stabilité, une bonne surveillance et un contrôle en temps réel de son fonctionnement est nécessaire.

I.7.1. Hiérarchisation du réseau électrique

La Figure. 2 illustre une vue globale du réseau électrique. On distingue quatre niveaux : production, transport, répartition et distribution.

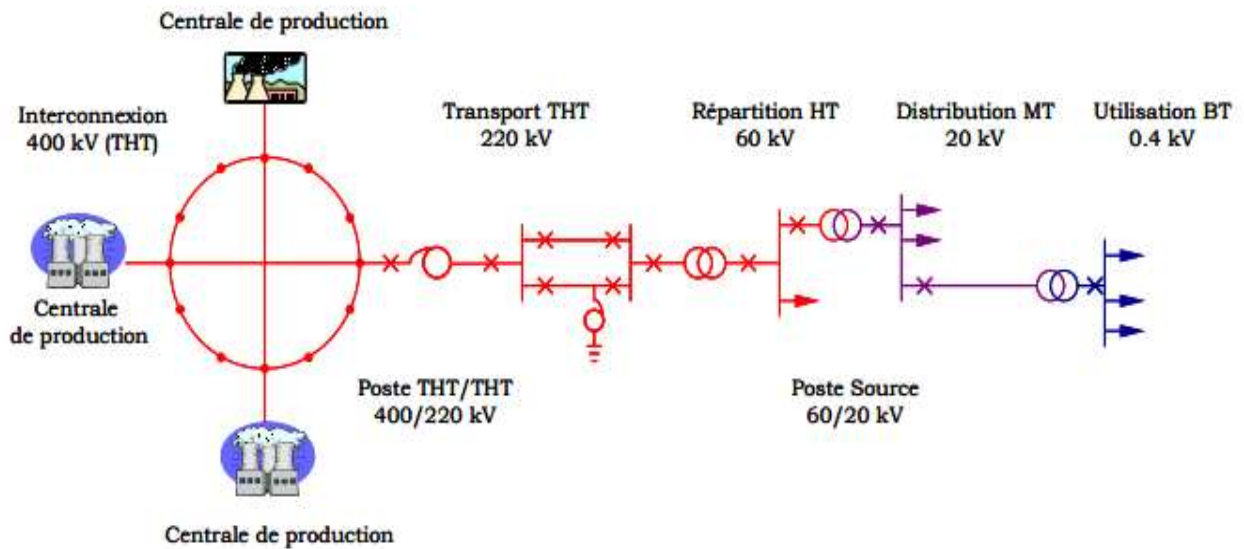


Figure I.2. Vue générale du réseau électrique

I.7.1.1. Production:

La production sert à produire l'énergie électrique grâce à des turbo-alternateurs qui transforment l'énergie mécanique des turbines en énergie électrique à partir d'une source primaire (gaz, pétrole, hydraulique. ...)

I.7.1.2 Transport

Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très haute tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance. Par exemple, le réseau de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV (voir 400 kV pour certains lignes dans le sud notamment), le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nord-américain 735 kV.

I.7.1.3. Répartition

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des postes d'interconnexion THT/HT (MT) et sert à fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des tensions de 60 et 30 kV.

I.7.1.3. Distribution

La distribution sert à alimenter les consommateurs en moyenne ou en basse tension (typiquement 400 V), grâce à des postes de transformation MT/BT.

I.7.2. Niveaux de tension

Selon la norme UTE C 18-510, les tensions dans le réseau électrique sont classées comme suit :

Type de ligne	Domaine	Abréviation	Tension alternative	Usage
Très haute tension (THT)	Haute tension B	HTB	(225kVou 400kV)	Transport d'énergie électrique à longue distance et international
Haute tension (HT)	Haute tension B	HTB	(63kVou 90V)	Transport d'énergie électrique distant, industries lourdes, transport ferroviaire
Moyenne tension (MT)	Haute tension A	HTA	(225kVou 400kV)	Transport et distribution d'énergie électrique en local: industries, PME, Services, commerces
Basse tension (BT)	Basse tension B	BTB	(690V)	Distribution d'énergie électrique : industries
Basse tension (BT)	Basse tension A	BTA	(230V, 400V)	Distribution d'énergie électrique : Maisons, artisans

I.7.3. Niveaux de conduite

Niveau	Mission
Niveau national	- L'équilibre production-consommation. - la gestion du plan de tension sur le réseau 400 kV "autoroutes de l'électricité". - respect de transits de courant sur les lignes 400 Kv. - la gestion des échanges aux frontières. - La gestion des aléas. - Le régime dégradé.
Niveau régional	• la surveillance des transits sur les réseaux 225 kV, 90 kV et 63 kV de leur zone d'action. • la maîtrise de la topologie du réseau HTB. • le pilotage de la tension par zone. • la préparation quotidienne de différents scénarios de répartition, au cas où une ligne serait indisponible. • la réorientation, dès que nécessaire, des flux

	sur d'autres lignes en respectant les règles de sécurité.
Niveau intermédiaire	Le centre de conduite intermédiaire assure la conduite des installations de transport. Il est constitué de groupements de Postes, chaque groupement de postes peut télécommander directement plusieurs postes asservis (télécommandés) et exécuter les instructions des centres de conduites.
Niveau local	Le centre de conduite local est situé dans chaque poste de transport, peut assurer la surveillance et la conduite des installations en ultime secours ou dans certaines phases de travaux.

I.7.4. Caractéristiques des grandeurs dimensionnantes :

Les conducteurs aériens et souterrains permettent de transporter l'énergie électrique. Cependant, le coût de la matière première et l'encombrement du territoire font qu'il n'est pas possible d'investir dans d'immenses plaques de conducteurs métalliques. Ainsi, les tailles de conducteurs limitées créent des imperfections sur le réseau comme la chute de tension, les puissances limitées dans le réseau et enfin les pertes. Nous allons rappeler la définition de ces imperfections dans les paragraphes qui suivent :

a) Chute de tension

Soit un conducteur électrique triphasé de longueur L alimentant une charge électrique. Le conducteur est caractérisé par sa résistance kilométrique r et sa réactance kilométrique x . La Figure 3 représente le système triphasé considéré ainsi que son schéma équivalent monophasé. En effet, un système triphasé équilibré de tension composée U (entre phases) est équivalent à trois systèmes indépendants triphasés de tension V (phase -neutre).

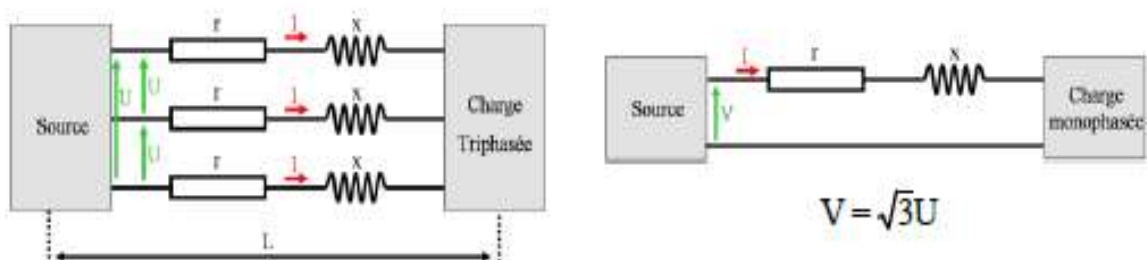


Figure I.3 . Système triphasé étudié

On peut alors dessiner le triangle de Kapp pour ce schéma monophasé comme présenté dans la Figure I-3. On approxime généralement la chute de tension entre la source et la charge à ΔV , partie de la chute de tension réelle colinéaire à V_{charge} . Cela se traduit donc par l'expression de la chute de tension suivante :

$$\Delta V = r \times L \times I \times \cos(\varphi) + x \times L \times I \times \sin(\varphi)$$

Par définition, on a :

$$\begin{aligned} S &= VI & (VA) \\ P &= VI \cos(\varphi) & (W) \Rightarrow I \cos(\varphi) = \frac{P}{V} \\ Q &= VI \sin(\varphi) & (Var) \Rightarrow I \sin(\varphi) = \frac{Q}{V} \end{aligned} \quad (I.1)$$

S = puissance apparente, P = puissance active de la charge monophasée équivalente, Q = puissance réactive de la charge monophasée équivalente. La chute de tension relative (en %) est donc :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V} &= \frac{rLI \cos(\varphi) + xLI \sin(\varphi)}{V} \\ \frac{\Delta V}{V} &= \frac{rLP + xLQ}{V^2} \end{aligned} \quad (I.2)$$

En triphasé, nous définissons :

$$\begin{aligned} U^2 &= 3V^2 \\ P_{tri} &= 3VI \cos(\varphi) = 3P \\ Q_{tri} &= 3VI \sin(\varphi) = 3Q \\ \frac{\Delta V}{V} &= \frac{3rLP + 3xLQ}{3V^2} \\ \frac{\Delta U}{U} &= \frac{rLP_{tri} + xLQ_{tri}}{U^2} \end{aligned} \quad (I.3)$$

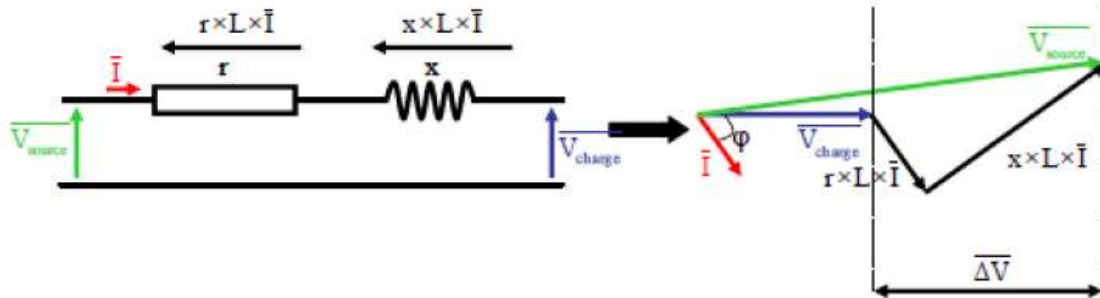


Figure. 4. Chute de tension

Ainsi on peut voir que plus les conducteurs utilisés sont longs ou impédants, plus il y aura de chute de tension.

b) Courant admissible dans un conducteur

Le courant admissible d'un conducteur est le courant maximal en régime permanent qui peut circuler dans ce dernier sans dépasser ses contraintes thermiques. Au-delà de ces températures, l'isolant et/ou le conducteur se détériorent et cela peut causer des incendies.

Ainsi, il est nécessaire de dimensionner correctement les conducteurs utilisés pour alimenter les charges afin que les courants qui circulent respectent l'intensité admissible.

c) Pertes

Les pertes électriques sont liées au caractère résistif des conducteurs. Soit un conducteur triphasé de résistance linéique r (Ω/km) et de longueur L (km) permettant d'alimenter une charge. Les pertes s'expriment par la formule suivante :

$$\text{Pertes} = 3 \times r \times L \times P \quad \text{Or on sait que : } S_{\text{charges}} = \sqrt{3}UI \quad \text{d'où } \text{Pertes} = \frac{3RS_{\text{charges}}^2}{\sqrt{3}U^2}$$

L'expression des pertes est donc :

$$\text{Pertes} = \frac{\sqrt{3}RS_{\text{charges}}^2}{U^2} \quad (1.4)$$

Ainsi, l'utilisation d'une tension élevée permet de diminuer les pertes. Par ailleurs,

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \text{Pertes} = \frac{\sqrt{3}R(P^2 + Q^2)}{U^2} \quad (1.5)$$

Ainsi, on peut également constater que le transport de puissance active et réactive augmente les pertes.

I.7.5. Conduite Des Réseaux Electriques

Les exploitants des réseaux électriques doivent procéder au contrôle des tensions et des transits de puissance pour améliorer la conduite et stabilité des réseaux électriques.

⇒ maîtriser et contrôler les transits de puissance

Les lignes électriques ont des capacités de transport physiquement limitées

Les ouvrages du réseau électriques (lignes, transformateurs et groupes) ne sont pas exploités à leurs vraies limites physiques mais avec des marges de sécurité prévoyant la perte fortuite

d'un ou de plusieurs ouvrages. Puisque, lorsqu'un ouvrage a déclenché suite à un défaut, le transit supporté initialement par cet ouvrage va se reporter sur les ouvrages voisins. Ce report automatique des flux risque à son tour de surcharger d'autres lignes interconnectées du réseau, et d'entraîner un effacement en chaîne du réseau.

⇒ Contrôler la tension

Pour des raisons diverses (stabilités, qualité de l'énergie, etc.), les exploitants du réseau doivent maintenir une tension aussi proche que possible de la tension nominale en chaque nœud du réseau.

En régime de fonctionnement exceptionnel, la valeur de la tension ne doit pas dépasser, vers les valeurs hautes, la valeur maximale de tension admissible par les matériels et vers les valeurs basses, ne doit pas franchir les valeurs pouvant provoquer

⇒ Contrôler la fréquence

Le réseau électrique fait fonctionner en parallèle un nombre important de groupes de production d'énergie, assurant, via un alternateur la conversion d'une énergie mécanique en énergie électrique. La fréquence observée sur le réseau résulte d'un équilibre entre la production et la consommation.

La stabilité des systèmes d'énergie électrique est caractérisée par une fréquence constante du réseau. L'effacement de la fréquence sera plus rapide que le déséquilibre entre production et consommation sera important.

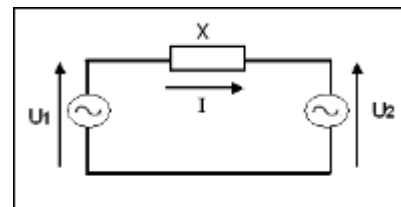
Il faut donc que toutes les unités de productions puissent continuer de fonctionner et garder le synchronisme dans un certain intervalle de fréquence autour de la fréquence nominale, par exemple, pour un réseau 50 Hz , de 48 à 52 Hz.

I.7.6. Contrôle Des Transits De Puissance

La puissance transmise par la ligne est donnée par la formule

Suivante : $P = (U_1 U_2 / X) \sin \delta$

L'équation ci-dessus montre qu'il est possible d'augmenter



la puissance active transmise entre deux réseaux soit en maintenant la tension, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement la réactance de la liaison X .

I.7.7. Contrôle De La Tension

La chute de tension ΔV est la différence entre la tension de départ et la tension d'arrivée. :

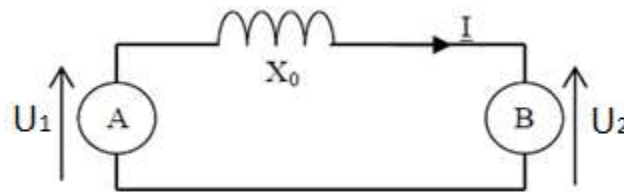
$$\overline{\Delta V} = \overline{V_1} - \overline{V_2}$$

Pour réguler la tension en un point d'un réseau, il faut y placer un composant capable de produire ou d'absorber de la puissance réactive (bobines d'inductance et condensateurs) et d'asservir celui-ci de sorte qu'il produise davantage de puissance réactive lorsque la tension tend à diminuer (et inversement).

Evaluation

EXERCICE 1

Une source de tension sinusoïdale A de valeur efficace U_1 est connectée à une autre source sinusoïdale B de même fréquence et de valeur efficace U_2 par une ligne caractérisée par sa réactance X_0 , comme indiqué ci-dessous.



- 1- Donner l'expression de la puissance P transitée de la source A vers la source B ?
- 2- Indiquer les paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour régler la puissance transmise par la ligne ?

EXERCICE 2

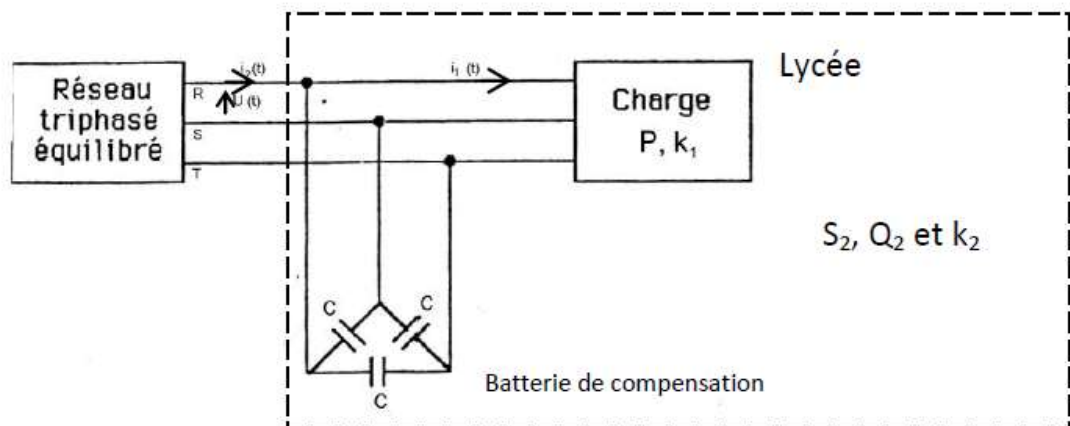
Le réseau sinusoïdal triphasé 400 V / 50 Hz alimente le lycée (charge triphasée équilibrée).

La puissance active consommée par le lycée est $P = 400$ kW.

Le facteur de puissance du lycée est $k_1 = 0.91$

- Calculez alors l'intensité I_1 du courant en ligne ainsi que la puissance réactive Q_1 consommée.
- Calculez la puissance apparente S_1 .
- On souhaite obtenir un nouveau facteur de puissance $k_2 = 0.93$.
- Quelle est la puissance P_2 consommée ? Les condensateurs ne consomment pas de puissance active: $P_2 = P$

- Calculez les nouvelles valeurs de la puissance apparente S_2 de l'installation, de l'intensité I_2 du courant en ligne, et de la puissance réactive Q_2 .



- Déduisez-en la valeur de la puissance réactive Q_c fournie par la batterie de condensateurs.
- Déterminez la capacité C des condensateurs couplés en triangle.
- Calculez l'intensité I_3 du courant en ligne si le facteur de puissance était $k_3=1$.