



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A. Mira-Bejaia
Faculté de la technologie
Département de génie électrique

Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme de Master en
Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Thème

Etude des dispositifs d'atténuation des perturbations interactives sur une charge sensible

Réalisé par :

M^{lle} BAA Naima

Encadrée par :

M^r ADLI M.

M^r ZIANE KHODJA A.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je remerciée DIEU, qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je remerciée mon cher père, ma chère mère, qui m'ont beaucoup aidée par leur compréhension, leurs sacrifices et leur patience, sans lesquels ce travail n'aurait jamais vu le jour.

*Je tiens à remercier mes encadreurs : Mr : **ADLI** et Mr : **ZIANE KHODJA** pour leurs aides, leurs encouragements, leurs orientations et leur disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'ils m'ont toujours manifesté ...*

Je remercie également tous les membres du jury qui ont accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

A travers ce mémoire, j'adresse mes reconnaissances à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis la première classe de primaire jusqu'à aujourd'hui.

J'aimerais exprimer enfin mes remerciements à tous mes frères, mes sœurs, mes camarades, mes amis et mes copines qui m'ont apporté aide et conseil durant la réalisation de ce travail, à tous ce qui m'ont soutenu de près ou de loin, surtout dans les moments les plus difficiles.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail:

-  *A la lumière de ma vie, mes chers parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide. Je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*
-  *A mes grand-mères: yama Tata et yama Zaza.*
-  *A mes chers frères: dada Moussa, dada Foudil, dada Nadir et notre petit Ghilas.*
-  *A mes chères sœurs: nana Hakima et nana Souad.*
-  *A mes oncles (zizi Amar et zizi Hamo), mes tantes, mes cousins et mes cousines, en particulier les petits Didine, Mami et Yani.*
-  *A toute la famille BAA.*
-  *A tous mes collègues de la promotion électrotechnique 2012 et en particuliers tous mes amis et frères de groupe option réseau électrique (Dawad, Tahar, Djahid, Kamel, Manad, Moussa, Salim...).*
-  *A tous mes amis et mes copines.*

Liste des abréviations

ASC	Advanced Série Compensators
BT	Basse Tension
CSPR	Compensateur Statique de Puissance Réactive
DPF	facteur de déplacement de la puissance
DVR	Dynamique Voltage Restorer
EPRI	Electric Power Research Institute
FA	filtre actif
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems
FAP	Filtres Actifs Parallèles
FAS	Filtres Actifs Série
FP	filtre passif
HT	Haut Tension
HTA	Haut Tension A
HTB	Haut Tension B
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPFC	Interline Power Flow Controller
MLI	modulation de largeur d'impulsion
MT	Moyenne Tension
PST	Phase Shifting Transformer
PV	photovoltaïque
SSC	Statique Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Séries Compensator
STATCOM	Static Condenser
SVC	Static Var Compensator
TCR	Thyristor controlled Reactor)
TCSC	Thyristor Controlled Série Capacitor
TCSR	Thyristor controlled Sèrie Reactor
TDH	Taux de distorsion harmonique
TDH U	Taux de distorsion harmonique tension
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TSSC	Thyristor Swiched Série Capacitor
UPFC	Unified Power Flow Controller
UPQC	unified power quality conditionner

Liste des figures

Fig. I.1 Structure de réseau	4
Fig. I.2 Schéma d'un poste HT/MT	7
Fig. I.3 Schéma de principe d'une rame MT	8
Fig. I.4 Poste THT/MT	9
Fig. I.5 Représentation de la ligne par phase	12
Fig. I.6 Réseau de distribution à structure radiale	13
Fig. I.7 Réseau en antenne	13
Fig. I.8 Réseau bouclé.....	14
Fig. I.9 Réseau maillée	14
Fig. II.1 Les différents types de perturbation	19
Fig. II.2 Creux de tension	19
Fig. II.3 Amplitude d'un creux de tension provoqué par un court-circuit et par le démarrage d'un moteur de forte puissance	20
Fig. II.4 Caractéristiques de démarrage d'un moteur asynchrone	21
Fig. II.5 Exemple de surtension.....	22
Fig. II.6 Exemple de variations rapide de la tension	23
Fig. II.7 Opérations successives permettant de calculer le pst	25
Fig. II.8 Calcul de chutes de tension	25
Fig. II.9 Détermination de la chute de tension sur une ligne.....	26
Fig. II.10 Perturbation de tension dans les réseaux	27
Fig. II.11 Fluctuations de fréquence	28
Fig. II.12 Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases	29
Fig. 1.13 Décomposition en composantes symétriques	29
Fig. II.14 Spectre de fréquence d'un courant non sinusoïdal	34
Fig. II.15 Exemple de signal déformé	34
Fig. II.16 Décomposition d'un signal déformé.....	35
Fig. II.17 Dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire	36
Fig. III.1 Filtre actif série	40
Fig. III.2 Filtre actif parallèle	41
Fig. III.3 Combinaison parallèle-série actifs	42
Fig. III.4 Filtre actif série et filtre passif parallèle.....	44
Fig. III.5 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.....	44
Fig. III.6 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	45
Fig. III.7 Puissance transitée entre deux réseaux	46

Liste des figures

Fig.III.8	Schéma de base d'un SVC	48
Fig. III.9	Caractéristique d'un SVC	49
Fig.III.10	Structure de base d'un STATCOM.....	50
Fig.III.11	Structure de TCSC	51
Fig.III.12	Structure de TSSC.....	51
Fig.III.13	Structure du TCSR	52
Fig.III.14	Structure de SSSC.....	53
Fig.III.15	Présentation d'un DVR	54
Fig.III.16	Schéma unifilaire d'un DVR.....	54
Fig.III.17	Contrôleur universel de puissance UPFC	55
Fig.III.18	Schéma d'IPFC	56
Fig.III.19	Schéma de principe d'un déphaseur	56
Fig. IV.1	Schéma bloc d'un réseau simple soumis à une perturbation de tension	58
Fig.IV.2	Schéma bloc d'un réseau en présence d'un DVR	59
Fig.IV.3	Schéma bloc du DVR.....	59
Fig.IV.4	Tension à la source avec une surtension de 15% entre 0.1 et 0.2 s.....	61
Fig.IV.5	Perturbation de la tension aux bornes de la charge sensible (t=0.1s à t=0.2s).....	61
Fig.IV.6	Tension perturbée délivrée par la source en présence du DVR	62
Fig.IV.7	Tension aux bornes de la charge sensible malgré la surtension du réseau.....	62
Fig.IV.8	La tension a la source avec un creux de tension de 15% entre 0.1 et 0.2 s.....	63
Fig.IV.9	Creux de tension de 15% aux bornes de la charge sensible entre 0.1 et 0.2 s.....	64
Fig.IV.10	Tension délivrée par la source avec creux de 15% en présence du DVR	64
Fig.IV.11	Tension aux bornes de la charge sensible grâce à la présence du DVR.....	65

Liste des tableaux

Tab I.1 Les Niveaux De Tension En CA Selon La Norme UTEC 18 510.....	2
Tab II.1 Vue d'ensemble des principales perturbations électriques de la tension	18
Tab II.2 propagation des creux de tension	25
Tab II.3 formules de calcule de chute de tension	26
Tab II.4 chute de tension admissible dans les réseaux BT	27
Tab III.1 Synthèse Des Domaines d'application De Différentes Technologies De FACTS	57

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I : Généralités

Introduction	1
I.1. Généralité.....	1
I.1.1 Grandeurs électrique	1
I.1.2 Disposition spatiale	2
I.1.3 Données temporelles	2
I.1.4 Les niveaux de tension utilisés dans les réseaux	2
I.1.5 Documentation et mesure des paramètres de fonctionnement.....	3
I.2 Définition	3
I.3 Structure d'un réseau électrique.....	4
1) Production.....	4
2) Transport, Répartition et Distribution de l'énergie électrique.....	5
2.1) Le réseau de transport	5
2.2) Les réseaux d'interconnexion	5
2.3) les réseaux de répartition.....	6
2.4) les réseaux de distribution	6
I.4 Les éléments d'un réseau électrique	7
1. Poste source de MT	7
2. Réseau MT.....	9
3. poste MT/BT	11
4. Réseau BT	11
I.5 La topologie d'un réseau électrique	12
1. Architecture radiale	12
2. Réseau bouclés	13
3. Structure maillée.....	14
I.6 Développement des réseaux.....	15
Conclusion.....	15
Chapitre II : Notion sur les perturbations influençant sources et réseau	
Introduction	16
II.1 Qualité d'énergie	16
II.1.1 Qualité de la tension	16
II.1.2 Qualité de courant	17
II.2 Classification des perturbations électrique.....	17

SOMMAIRE

II.2.1 Les creux de la tension	19
II.2.2 Les surtensions	21
II.2.3 Fluctuation rapides de la tension ou flicker.....	23
II.2.4 Chute de tension	25
II.2.5 Variation de la fréquence	28
II.2.6 Déséquilibre.....	29
II.2.7 Les Harmoniques.....	32
Conclusion.....	37

Chapitre III : dispositifs d'atténuation des perturbations

Introduction	38
III.1 Les filtre.....	38
III.1.1 les filtres passifs.....	38
III.1.2 Les filtres actifs.....	39
1) Principe de fonctionnement du filtre actif	40
2) Classification des filtres actifs.....	40
3) Effet de l'impédance de réseau sur le filtre Actif.....	42
4) Avantages des filtres actifs.....	43
5) Les inconvénients des filtres actifs.....	43
III.1.3 Combinaison hybride active et passive.....	43
1) Le filtre actif série avec le filtre passif parallèle	44
2) Filtre Actif Série en série avec filtre passif parallèle	44
3) Filtre Actif Parallèle avec un Filtre Passif Parallèle.....	44
III.2 système de transmission flexible en courant alternatif (FACTS).....	45
III.2.1 définitions et généralités	45
III.2.2 Rôle des dispositifs FACTS.....	47
III.2.3 classification des dispositifs FACTS	47
III.2.3.1 Dispositifs FACTS Shunt	48
1) Compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator) .	48
2) Compensateur Statique Synchrone (STATCOM).....	49
III.2.3.2 Dispositifs FACTS séries.....	50
1) Compensateurs séries à base de thyristor	51
1.1) TCSC (Thyristor Controlled Série Capacitor).....	51
1.2) TSSC (Thyristor Swiched Série Capacitor)	51

SOMMAIRE

1.3) TCSR (Thyristor controlled Série Reactor).....	52
2) Condensateurs séries à base de GTO thyristor	52
2.1) SSSC (Static Synchronous Séries Compensator).....	52
2.2) DVR (Dynamique Voltage Restorer).....	53
III.2.3.3 Dispositifs FACTS combinés Série-Parallèle (hybride).....	54
1) UPFC (Unified Power Flow Controller)	55
2) IPFC (Interline Power Flow Controller).....	55
III.2.3.4 Transformateur déphaseur (PST).....	56
III.2.4 Synthèse.....	57
Conclusion.....	57
Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats	
Introduction	58
IV.1. présentation du réseau à simuler	58
IV.2. représentation et principe de fonctionnement de DVR.....	59
VI.3. surtension au niveau de la source.....	60
1. sans DVR.....	60
2. Insertion du DVR	62
VI.4. Creux de tension au niveau de la source	63
1. Sans DVR	63
3. Insertion du DVR	64
VI.5. Interprétation des résultats	65
1. Cas d'une perturbation sans insertion d'un DVR.....	65
2. Cas d'une perturbation en présence du DVR	65
Conclusion.....	66
Conclusion générale	

Introduction générale

Introduction générale

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissance circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermique, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le système réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de lignes, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique.

Cependant le réseau peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une partie étendue, et qui peuvent avoir un impact critique pour tout le système électrique. Ces perturbations peuvent être, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau de distribution.

Jusqu'à la fin des années 80, les seuls moyens permettant de remplir ces fonctions étaient des dispositifs électromécaniques, à savoir les transformateurs avec régleur en charge, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permet pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour ; ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance. Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves.

Cette solution passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences.

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les filtres ainsi que les dispositifs FACTS « Flexible Alternating Current Transmission System ». Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils procurent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre.

Mais on se pose toujours quelques questions telles que :

- Quelles sont les différentes perturbations dans le réseau électrique? Quelles sont leurs origines? Leurs conséquences?
- Comment atténuer ces différentes perturbations?
- Quels rôles jouent les filtres et les systèmes FACTS?

Notre travail consiste à étudier les dispositifs d'atténuation des perturbations interactives sur une charge sensible en particulier les dispositifs FACTS et plus

Introduction générale

particulièrement le DVR. Il s'agit de son influence pour atténuer les perturbations (surtension et creux de tension) subies par une charge sensible.

De manière à atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre, consiste à décrire les différents éléments constitutifs du réseau électrique qui seront introduit lors de sa modélisation en vue de la simulation.

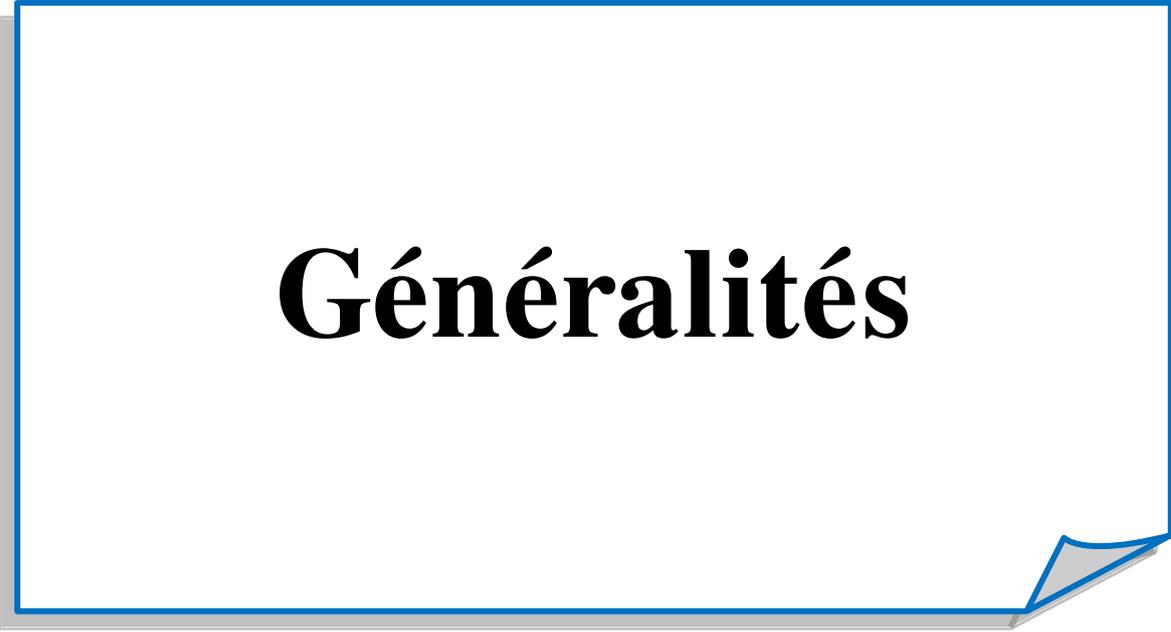
Dans seconde chapitre, on va étudier la qualité d'énergie électrique et les différentes perturbations ayant une influence sur la stabilité de réseau (leurs définitions, leurs origines ainsi que leurs conséquences). On note: les creux de tension, le flicker, les surtensions, les chutes de tension, les variations de la fréquence, les déséquilibres et les harmoniques.

Le troisième chapitre concernera les différentes méthodes d'atténuation des perturbations et notre intérêt sera porté sur l'utilisation des filtres actifs et les dispositifs FACTS.

Dans le quatrième chapitre, nous ferons une application d'un DVR sur une ligne électrique pour voir l'atténuation d'un système FACTS-Série des perturbations dans un réseau en simulant le système à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK. Ce chapitre sera clos par une interprétation des résultats obtenus.

Nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I



Généralités

Introduction

Depuis de nombreuses années, le développement de l'énergie électrique dans le monde a conduit à un vaste système de production, transport et distribution d'énergie électrique. Cette énergie est produite en même temps qu'elle est consommée. En effet, la fonction générale d'un réseau électrique est d'acheminer l'énergie électrique des centres de production jusqu'aux centres consommations et d'assurer la liaison à toute instant et l'équilibre production-consommation. De plus le réseau électrique à un rôle de transformation puisqu'il permet de livrer aux utilisateurs un bien de consommation adapté à leur besoins.

I.1. Généralités

Un réseau électrique peut être de petite puissance ou très puissant (a l'échelle d'un pays). Dans tous les cas, ces caractéristiques s'expriment en terme de :

- Grandeurs électriques
- Disposition spatiale
- Données temporelles

I.1.1 Grandeurs électriques

La fréquence f (en Hertz(HZ)), c'est le nombre de période par seconde, 50 ou 60 HZ selon les pays.

La tension le transport des puissances importantes sur de longues distances nécessite des tensions élevées. Il faut donc des transformateurs pour passer d'une tension à une autre ; or ils ne fonctionnent qu'avec des courants alternatifs.

On peut avoir différents types de réseaux selon le niveau de la tension

A. Le réseau HT (Haute Tension) qui est utilisé pour le transport et la répartition de l'électricité, il se compose en 2 sous réseaux :

- **Le réseau HTB (Haute Tension B)** qui sert a l'alimentation générale du niveau national (réseau 400 kV). Au niveau régional (réseau 63 kV ou 90 kV).
- **Le réseau HTA (Haute Tension A)** qui est le réseau de distribution local en moyenne tension.

B. Le réseau BT (Basse Tension) (tension inférieur à 1000V) qui sert à la distribution électrique dans les quartiers ou communes.

Ces grandeurs de base sont influencées par l'intensité du courant qui circule dans les lignes et les câbles ; laquelle est liée aux puissances actives ou réactives générées, transportées et consommées.

La puissance active est produite par les alternateurs à partir d'énergie thermique ou mécanique, et consommé généralement sous forme thermique ou mécanique par les récepteurs.

La puissance réactive est produite ou consommé dans tous les éléments de réseau.

I.1.2. Disposition spatiale la structure topologique es à échelle

- Des pays, des régions
- Des sites industriels (centaine de mètres à dizaine de kilomètres)

Il ya trois niveaux dans l'acheminement d'énergie :

- Le transport
- La répartition
- La distribution

I.1.3. Données temporelles

La variation de l'équilibre entre l'offre et la demande énergétique entrainent des perturbations des grandeurs électriques que sont la fréquence et la tension que l'on doit maintenir dans des pays acceptables. [1]

I.1.4. Les niveaux de tension utilisés dans les réseaux

La norme UTEC 18 510 [2] définit les niveaux de tension en courant alternatif comme suit :

Nom	Abréviation	Valeur de la tension composée
- Haute Tension B	HTB	$> 50\text{kV}$
- Haute Tension A	HTA	$1\text{kV} < \text{HTA} < 50\text{kV}$
- Basse Tension B	BTB	$500\text{ V} < \text{BTB} < 1000\text{V}$
- Basse Tension A	BTA	$50\text{ V} < \text{BTA} < 500\text{V}$
- Très Basse Tension	TBT	$\leq 50\text{ V}$

Tab I.1 Les niveaux de tension en ca selon la norme UTEC 18 510

La notation de l'ancienne norme CEI38 [2] est les suivantes

A. HT pour une tension composée comprise entre 35 kV et 225 kV.

Les valeurs normalisées sont 45kV, 56 kV, 110kV, 132kV, 150kV, 220kV.

B. MT pour une tension composée comprise entre 1kV et 35 kV.

Les valeurs normalisées sont 3.3kV, 6.6kV, 11kV, 22kV, 33kV.

C. BT pour une tension composée comprise entre 100V et 1000V.

Les valeurs normalisées sont 400V, 690V, 1000V.

Remarque la tension de la source d'alimentation est liée à la puissance de livraison. [2]

I.1.5. Documentation et mesure des paramètres de fonctionnement

- **Mesure élémentaire**

- 1) Puissance transités apparente (S en VA), active (P en W), réactive (Q en VAr)
- 2) Valeur de tension efficace et de courant
- 3) Cosinus (angle de déphasage entre la tension et le courant), indicateur de la puissance réactive.
- 4) Taux de charge (%) ou profil de charge
- 5) Durée de fonctionnement (heures/an)
- 6) Creux et pics de tension, coupures
- 7) Taux de distorsion harmonique tension (TDH U), (éventuellement taux de distorsion harmonique de courant)
- 8) Déséquilibre de phase
- 9) Température de fonctionnement.

- **Indicateurs globaux de performance du système**

Les données collectées forment une base à partir de laquelle devient possible d'évaluer les indicateurs de performance suivants pour le réseau

- 1) Puissance apparente, active et réactive
- 2) Cosinus (angle de décalage entre la tension et le courant)
- 3) Courant
- 4) Déséquilibre de phase
- 5) Coupures courtes, longues (durée max / min / moy)
- 6) Nombre et importance des creux et pics de tension
- 7) Taux de distorsion harmonique (TDH). [3]

I.2. Définition

Un réseau est un ensemble des composants nécessaire pour produire l'énergie électrique par des (centrales nucléaires, thermique, hydroélectrique, ou production décentralisées : éoliennes, petite hydraulique, Cogénération...), a des lieux de consommation (communes, entreprise...). [4]

Cet ensemble comprend des transformateurs, des lignes de transmission, des générateurs, des moteurs, des moyens de mesure et de contrôle, des protections contre les courts circuits et la foudre...etc. Un réseau électrique comporte trois sous système :

- Production
- Transport, Répartition et Distribution
- Consommation

I.3. Structure d'un réseau électrique

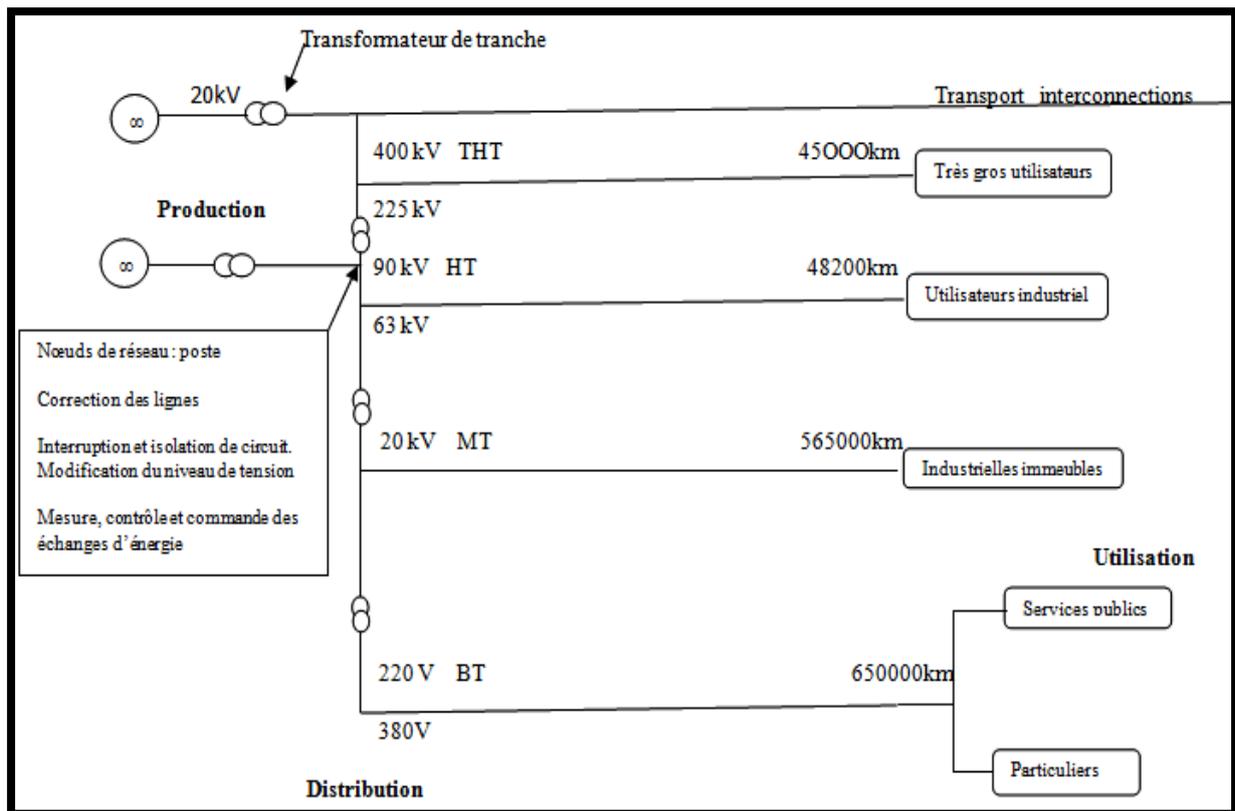


Fig. I.1 Structure de réseau [5]

1) Production

La production doit en tout instant être capable de satisfaire la demande (consommation + pertes). Elle doit donc prévoir des moyens de production pour couvrir l'extrême pointe de la demande. [4]

On regroupe sous le nom de production décentralisée les sources de petite puissance installées près des centres de consommation. Les principales technologies utilisées actuellement, soit : la géothermie, les éoliennes, les piles à combustibles et les panneaux solaire. [6]

Génération d'énergie

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En effet, une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas. [7] [8]

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets

- Elles sont inépuisables
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux
- Elle offre une importante indépendance énergétique.

De grandes progrès ont été faites dans le domaine de la production d'énergie renouvelables, parmi les technologies utilisées on trouve ; La géothermie, les piles à combustibles, les éoliennes et les panneaux solaires. [9]

2) Transport, Répartition et Distribution de l'énergie électrique

Pour des raisons économiques et techniques les centrales sont placées a proximité de la source et pour des raisons écologiques (environnement, sécurité) elles sont placées loin des centres de consommation. [4][5]

2.1) Le réseau de transport

Le réseau de transport d'électricité est situé en amont des réseaux de distribution. Il a pour mission d'acheminer l'énergie et de permettre de réaliser à chaque instant l'égalité de la production et de la consommation sur l'ensemble de territoire en respectant des contraintes fortes sur le maintien de la tension. Il doit de ce fait présenter une forte garantie de fonctionnement non seulement en régime normal, mais également lors d'incidents d'exploitation qui entraînent la perte d'une ou plusieurs lignes à très haute tension ou l'arrêt imprévu d'un ouvrage de production. Ils sont constitués de lignes a grande capacité de transit (puissance) afin de réduire les pertes en lignes, le transport est généralement de type aérien.

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Leurs exploitation est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching a partir duquel l'énergie électrique gérée et surveillée en permanence.

2.2) Les réseaux d'interconnexion

Il constitue l'ossature principale pour l'interconnexion des grands centres de production.

L'interconnexion permet :

- D'accroître la sécurité d'alimentation des usagers en cas de défaillance de l'une des centrales productrice.
- Les secours mutuel entre les pays interconnectés disent que l'une d'eux enregistre un déficit de production ou une consommation accrue (grande).

Afin de limiter les risques de panne (blackout)

- Les échanges d'énergies internationaux dans le cadre du marché d'électricité.

2.3) les réseaux de répartition

Ils sont destinés à répartir l'énergie en quantité sur des distances plus courtes. Ces réseaux ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Ils doivent de ce fait assurer l'alimentation de territoire qu'ils desservent qui sont en général des zones importantes de consommations comme par exemple des grandes agglomérations ou des concentrations d'installations industrielles qui du fait de leur importance économique doivent être alimentées en permanence. Pour assurer cette fonction en permanence, même lors de la défaillance de certaines lignes de transport, les réseaux de répartition auront une topologie de réseau bouclé.

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité des sites urbains). Les protections sont de même nature que celle utilisées sur les réseaux de transport. Les centres de conduite étant régionaux.

2.4) les réseaux de distribution

Le réseau de distribution actuel a été conçu afin d'acheminer l'énergie électrique depuis les moyens de production raccordés au réseau de transport, vers des clients raccordés à des niveaux de tension de type BTB (0.4 – 1kV) ou HTA (1 kV – 50kV) [10]

Nous distinguons dans les réseaux de distribution deux entités principales que sont les postes et les liaisons.

Les postes sont des lieux où se réalisent des connexions entre des liaisons différentes. On désigne ici par le terme liaison, les branches du réseau qu'elles soient constituées chacune par une ligne aérienne, un câble souterrain ou un transformateur (ou même éventuellement un convertisseur alternatif/continu).

Les connexions sont essentiellement réalisées par des jeux de barres qui matérialisent les nœuds du réseau. Chaque liaison est raccordée au jeu de barre à travers un appareil de coupure qui permet de la séparer de réseau.

Le choix déterminant dans la structure d'un poste est la fiabilité du réseau donc celle de la sécurité de connexions, c'est-à-dire des raccordements entre les liaisons et les jeux de barres. Cette sécurité dépend du nombre de jeux de barres, de la façon dont ceux-ci sont raccordés entre eux et raccordés aux liaisons. Elle dépend aussi de la nature des appareils de coupure placés entre les liaisons et les jeux de barres :

- **Un disjoncteur** est capable de couper les courants de court circuit
- **Un interrupteur** est capable de couper les courants de charge
- **Un sectionneur** ne peut être manœuvré que hors tension.

On distingue 3 types de postes :

- **Poste de coupure** qui est un ensemble de jeux de barres et de cellules départ

- **Poste de transformation** ensemble de 2 postes de coupure à des tensions différentes reliées par une des transformateurs
- **Poste d'alimentation ou poste sources** poste de transformation conçu pour que l'énergie le traverse normalement toujours dans le même sens. Le poste d'alimentation est donc la source du réseau qu'il alimente
- **Tableau** ensembles des cellules d'un poste HTA ou BT surtout si ce matériel est de dimension réduite.

Dans les réseaux de distribution nous trouvons plusieurs types de configurations topologiques mais toutes ont une structure arborescente ou radiale. [5][4]

I.4. Les éléments d'un réseau électrique

Généralement, le réseau est composé de manière hiérarchisée dans le sens de transit de l'énergie les éléments suivants

1. Poste source de MT

Ces postes sources sont alimentés par les réseaux de répartition HT, (soit à 90 ou 63 kV). Dans les zones urbains très denses, il peut être intéressant de sauter cet échelon de répartition et de réaliser des injections directes THT/MT (225 kV/MT). Ces deux types de postes présentent quelques différences des conceptions du fait des fonctions à assumer (puissances plus importantes à desservir pour les postes THT/MT).

1.1 Poste HT/MT

En phase initiale, ce type de poste fig. (I.2) est constitué d'un transformateur (T1) alimenté par une ligne HT (HT1). Avec l'augmentation des charges à desservir, on peut y adjoindre un deuxième transformateur (T2), puis, en stade final, un troisième transformateur (T3) généralement en double attache.

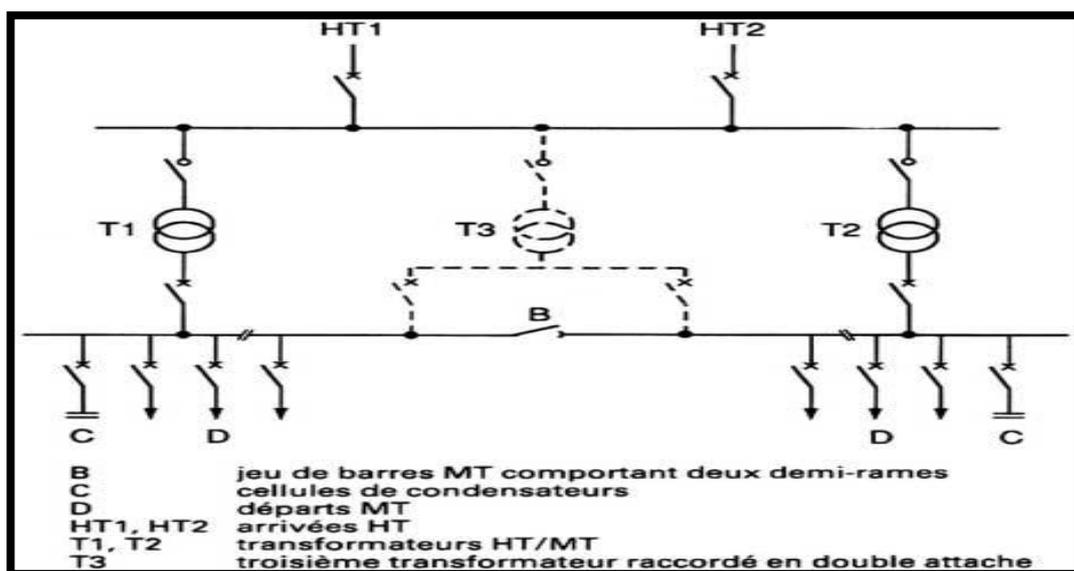


Fig. I.2 Schéma d'un poste HT/MT

En même temps que le 2^{ème} transformateurs, on raccorde généralement une 2^{ème} arrivée HT (HT2). Dite garantie ligne, opérant en cas de défaut sur la première, le ou les transformateurs débitent sur un tableau MT qui forme un jeu de barre composé de rames.

Chaque rame est un ensemble d'une dizaine de cellules environs, organisée en deux demi-rames reliée entre elles par un organe de couplage, en sectionnement de barre (fig. I.3). La demi-rame élémentaire comprend :

- Une arrivée de transformateurs
- Plusieurs départs MT
- Une cellule de condensateurs (compensation de l'énergie réactive)
- Eventuellement, un disjoncteur shunt.

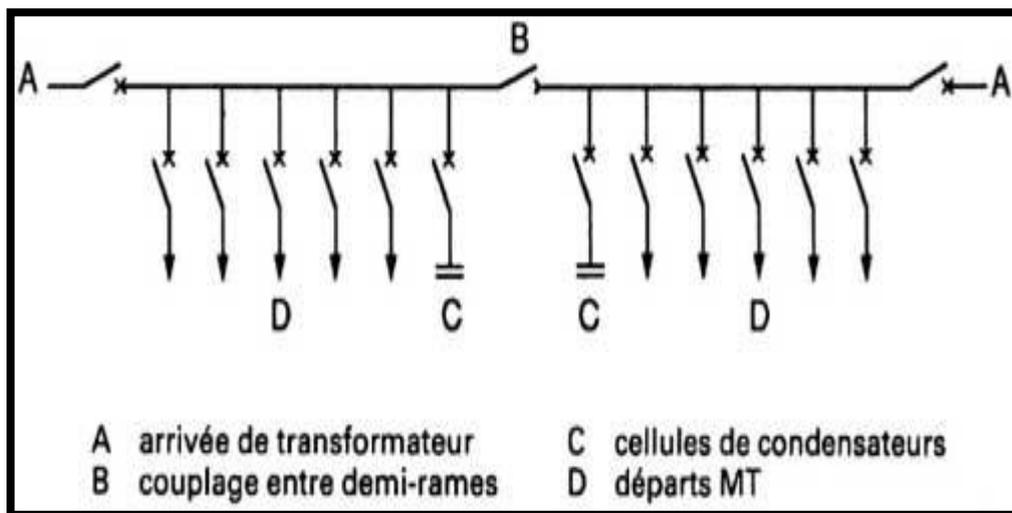


Fig. I.3 Schéma de principe d'une rame MT

1.2 Poste THT/MT

Ces postes sont conçus pour desservir des puissances nettement plus importantes (280 MVA) que les postes HT/MT, notamment dans les grandes agglomérations. La structure de poste THT/MT, comme celle de poste HT/MT, est évolutive en fonction de l'augmentation des charges à desservir.

A partir d'un stade initial, dans lequel le poste ne comporte qu'une alimentation THT et un seul transformateur, une évolution progressive peut s'effectuer jusqu'à un stade final comprenant deux (voire trois) alimentations et quatre transformateurs. La structure d'un poste en stade finale est représentée sur la figure (fig. I.4.a) pour la partie THT et sur la figure (fig. I.4.b) pour la partie MT.

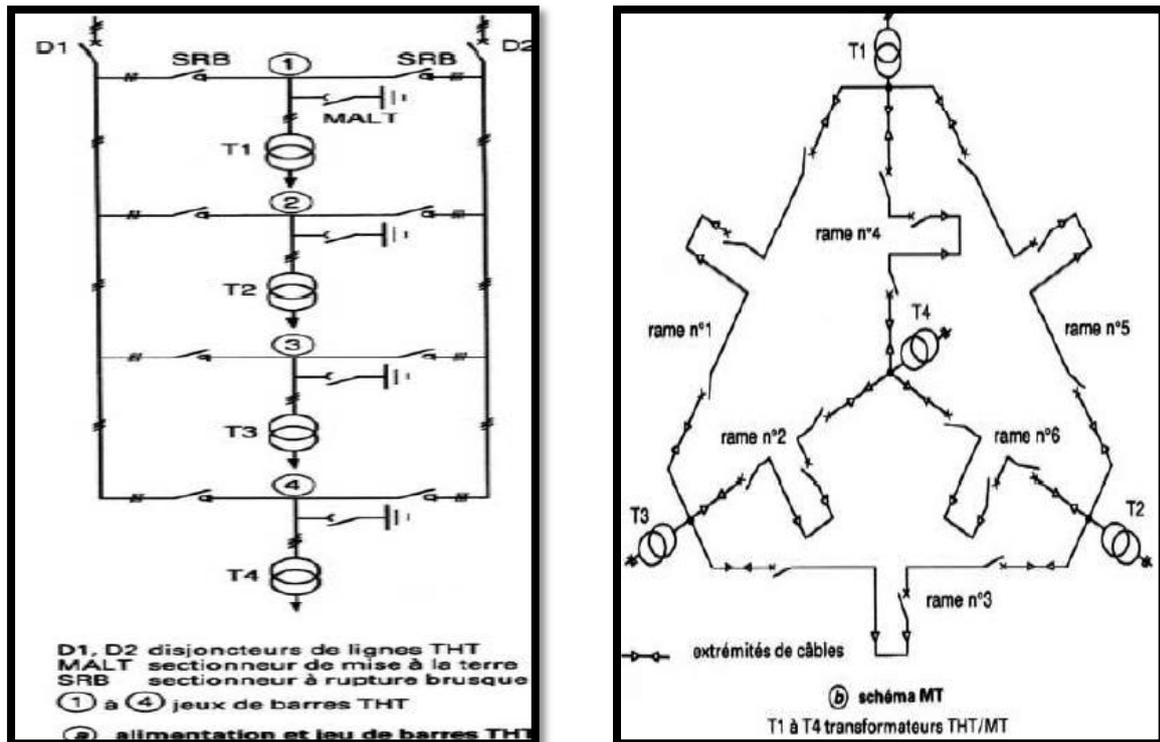


Fig. I.4 poste THT/MT

Remarque l'emplacement idéal d'un poste source nouveau est normalement au centre de gravité des charges à desservir sur sa zone d'action prévue. En effet, l'optimum économique résulte d'un compromis intégrant, en plus de cout du poste, les couts de développement des réseaux HT et MT nécessaire, compte tenu de leur situation existante.

2. Réseau MT

2.1 Réseau MT aérien

Ce sont essentiellement des impératifs d'ordre géographique qui ont influencés la conception technique et structurelle des réseaux aérienne MT. En particulier l'étendue des territoires, la densité des populations et la puissance unitaire des clients à desservir. C'est ainsi que sont nées deux doctrines :

- **La doctrine nord- américaine**, à neutre distribué
- **La doctrine française et, en général, européenne**, à trois fils, le neutre n'étant pas distribué.

En général, les structures développées dans le monde peuvent s'apparenter à l'une ou l'autre de ces doctrines.

Réseau de type Nord-Américain

L'objectif est de distribuer le plus possible en moyenne tension, en multipliant les postes de livraison MT/BT, afin de limiter la longueur des antennes BT à 200m et, en conséquence, de diminuer les postes.

Réseau de type Européen

La conception européenne se distingue de la doctrine Nord-Américaine essentiellement par le fait qu'au poste source de point neutre est relié à la terre par une impédance, limitant ainsi le courant de défaut entre phases et terre. Ce choix résulte notamment de considérations axées sur la fiabilité et la sécurité des personnes.

2.2 Réseau MT souterrain

C'est évidemment dans les zones urbanisées que la technique du câble MT isolé enterré est le plus fréquemment employée. En effet, les réseaux aériens sont, en général, proscrits en agglomération pour des raisons d'encombrements de l'espace, d'esthétique et de sécurité.

Les différences de structure entre réseaux aériens et souterrains proviennent essentiellement, par nature de la nécessité de faire face à des indisponibilités beaucoup plus longues en système souterrains pour localiser une avarie éventuelle et en effectuer la répartition (10 à 20h) ou bien pour réaliser des travaux programmés.

Une caractéristique fondamentale d'un réseau MT souterrain est le nombre de voies d'alimentation utilisable pour desservir une même charge (poste MT/BT) :

- **Les structures à une voie d'alimentation**, c'est-à-dire purement radial en antenne, est simple et économique, mais n'offre pas de possibilité de reprise de service en cas d'incident ; c'est pourquoi sauf cas particuliers rares, elle est proscrite en souterrain.
- **Les structures à deux voies d'alimentation**, sont les plus fréquents ; on y distingue deux grandes familles : les réseaux en double dérivation et les réseaux en coupure d'artère.
- **Les structures à vois d'alimentation multiples**, sont les plus rares, mais assurent une qualité de service encore meilleure.

a) Réseau en double dérivations

La façon la plus simple d'obtenir deux voies distinctes d'alimentation consiste à doubler le réseau radial en antenne à partir du jeu de barres du poste source.

b) Alimentation par voies multiples

Cette structure offre de grandes possibilités d'exploitation, mais exige des compétences accrues de la part du personnel.

c) Réseau de coupure d'artère

Un câble partant d'un poste source HT/MT passe successivement par les postes MT/BT à desservir, puis rejoint une seconde source d'alimentation qui peut être soit un départ différent du même poste HT/MT, soit un autre poste HT/MT, soit un câble de secours.

3. poste MT/BT

Ils sont l'interface entre les réseaux MT et BT. Ils ont essentiellement un rôle de transformation MT/BT auquel peuvent éventuellement être associées une fonction d'exploitation MT (point de coupure) et une fonction de répartition BT, suivant la charge à desservir.

Une des caractéristiques essentielles des postes MT/BT est leur puissance nominale.

Types de poste MT/BT

On peut citer plusieurs types de postes MT/BT de niveau de complexité croissante

a) poste sur poteau (dit H61)

C'est le plus simple, utilisé en réseau aérien. Son principe de conception est de considérer qu'il fait partie intégrante de la ligne. Ce type de poste, simple et peu coûteux. Les puissances normalisées sont 63 ; 100 ; 160 kVA.

b) Poste bas simplifié sous capot

Généralement préfabriqué, raccordé exclusivement sur des réseaux MT, ce type de poste, permet de délivrer des puissances (160, 250, 400 kVA) supérieur à celle de H61 dans des conditions encore économiques.

4. Réseau BT

On rencontre à travers le monde les deux systèmes de distribution BT : monophasé et triphasé.

Le choix entre les deux systèmes déverse :

- Cohérence avec le système de distribution MT et la technique choisie de transformation MT/BT
- Topologie des charges justifiant économiquement l'un ou l'autre des deux systèmes
- Contraintes liées aux appareils d'utilisations (moteurs...).

Ainsi, en Europe, les réseaux BT sont très généralement triphasés, alors que la distribution BT monophasé est très répandue en Amérique de Nord. [11][12]

Structure générale d'un réseau privé de distribution

Dans le cas général avec une alimentation en HTB, un réseau privé de distribution comporte :

- Un poste de livraison HTB alimenté par une ou plusieurs sources, il est composé d'un ou plusieurs jeux de barres et de disjoncteurs de protection
- Une source de production interne
- Un ou plusieurs transformateurs HTB/HTA

- Un tableau principal HTA composé d'un ou plusieurs jeux de barres
- Un réseau de distribution interne en HTA alimentant des tableaux secondaires ou des postes HTA/BT
- Des récepteurs HTA
- Des transformateurs HTA/BT
- Des tableaux et des réseaux Basse Tension
- Des récepteurs Basse Tension. [4]

Ligne de transport

Une ligne électrique entre les nœuds i et j sera donc représentée par le schéma en π comme indiqué sur la figure (I.5) comprenant une impédance série ou longitudinale $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ (avec R_{ij} et X_{ij} respectivement résistance totale et inductance total de la ligne) et une admittance en parallèle $Y_{10} = Y_{20} = (G + jB)/2$. Avec (G et B étant respectivement la conductance totale et la susceptance totale d'ordre direct de la ligne).

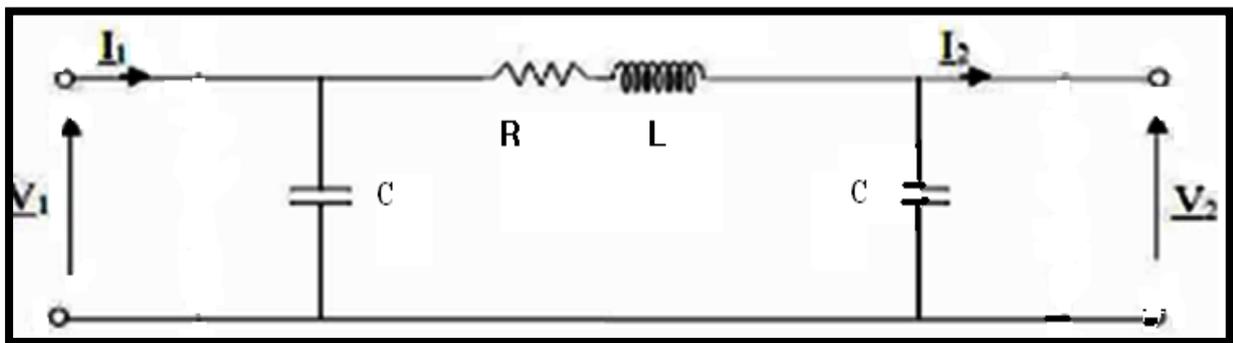


Fig. I.5 Représentation de la ligne par phase

I.5. La topologie d'un réseau électrique

La conception du réseau électrique permet d'atteindre une plus ou moins grande disponibilité de l'énergie électrique. Le coût économique du réseau dépend naturellement de sa complexité. Le choix d'une architecture de réseau est donc un compromis entre des critères techniques et économiques. Choisissez dans les listes et sous-listes suivantes de type d'architecture de votre réseau.

1. Architecture radiale

On site les structures suivantes :

- En simple antenne
- En double antenne
- En double alimentation
- En double alimentation avec double jeu de barre. [3]

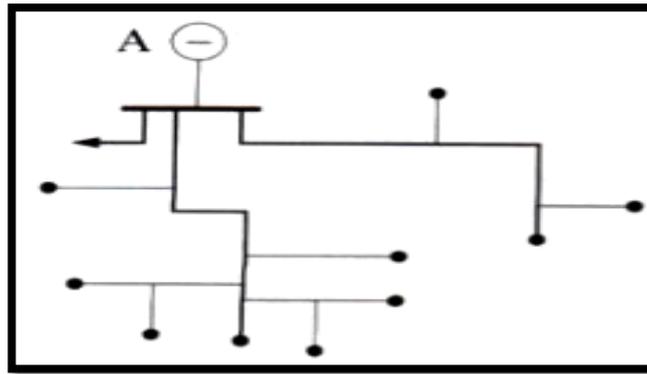


Fig. I.6 réseau de distribution à structure radiale [13]

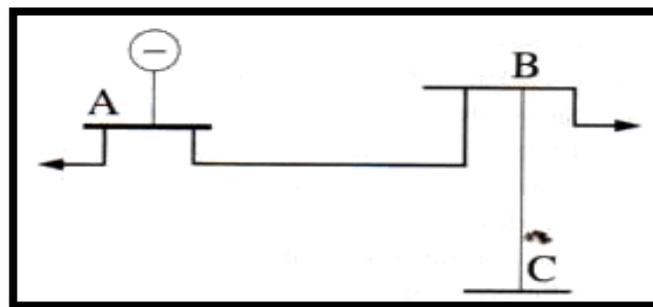


Fig. I.7 Réseau en antenne [13]

La structure arborescente

Ce type de structure est utilisé pour alimenter à partir d'un poste d'alimentation l'ensemble des consommateurs d'une rue, d'un lotissement ou quelque fois d'une zone d'activités.

L'avantage d'une telle topologie est sa simplicité et son faible cout. Par contre lorsqu'un défaut se produit en un point quelconque de l'arborescence tous les usagers qui se trouvent en aval du défaut vont être coupés pendant toute la durée de l'élimination du défaut. Il peut également arriver, si le défaut est grave que les clients situés en amont soient aussi touchés par le déclenchement des dispositifs de protections. Cependant dans chacune de ces situations, le nombre de consommateurs touchés est relativement faible. Par ailleurs, pour améliorer la sécurité d'alimentation des clients il est souvent implanté des possibilités de bouclage du réseau de manière à ce qui permet, lors la mise hors tension d'un tronçon de ligne, de ne pas interrompre l'alimentation. [13]

2. Réseau bouclé

Elle consiste à insérer des points de bouclage (par boîte de coupure, ou dans les postes) ouverts en fonctionnement normal, entre deux départs du même poste MT/BT ou deux poste voisins.

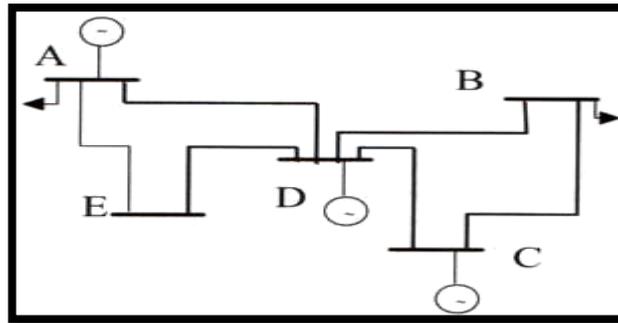


Fig. I.8 Réseau bouclé [13]

- Réseau en boucle ouverte

Il est aussi appelé coupure d'artère. Son principe de fonctionnement est à deux voies d'alimentations. En temps normal, les boucles sont ouvertes. Ce qui rend la protection et l'exploitation plus faciles. Ce réseau est un peu plus compliqué que le précédent, un peu plus coûteux et un peu plus difficile à exploiter, mais il assure une meilleure construction du service très souvent ce schéma est associé à une distribution de type souterrain. [4]

- Réseau en boucle fermé

La figure I.8 montre la structure d'un réseau avec une alimentation par les nœuds A, C, D qui desservira les réseaux de distribution à partir des nœuds A, B, E. Il est important de constater que même si l'on perd l'alimentation par l'arrivée de nœud A il sera possible d'alimenter le réseau au départ de ce même nœud à partir de D. De même si un incident rend impossible l'acheminement à partir des nœuds C et D, le réseau en aval du nœud B pourra être desservi à partir de l'arrivée A.

3. Structure maillée

Cette structure très coûteuse a été réalisée dans des cas où l'on souhaite un niveau de qualité de service très élevé (certains grands villes).

L'inconvénient d'une telle structure est de présenter en certains points du réseau une faible impédance de court-circuit et donc de favoriser, en cas de défaut, l'apparition de courant de court-circuit élevé. Il faudra donc dimensionner les protections en conséquence. [13]

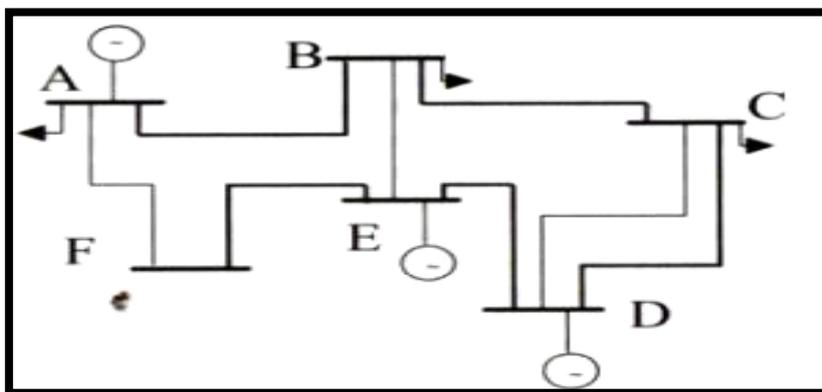


Fig. I.9 Réseau maillée [13]

I.6. Développement des réseaux

- 1) Les réseaux doivent se développer pour trois raisons essentielles :
 - Assurer la desserte des nouveaux clients ou le raccordement des nouveaux producteurs connectés sur le réseau de distribution.
 - Renforcer le réseau pour tenir compte de l'augmentation des charges déjà existantes sur le réseau.
 - Améliorer la qualité de la fourniture en fonction des attentes des clients, à la fois en réduisant les coupures longues, mais aussi les imperfections de l'onde de tension.
- 2) Pour cela, le distributeur doit prévoir l'évolution de la demande, établir une relation entre la consistance des ouvrages et le niveau de qualité délivrée.

Les contraintes auxquelles ils doivent faire face sont :

- Les intensités de courant excessives dans les ouvrages à la suite de la surcharge, provoquant des échauffements trop importants.
 - Les chutes de tension trop importantes sur des réseaux trop longs ou trop chargés, gênant des clients raccordés notamment en extrémités de réseau.
 - Les temps de coupure excessifs sur des réseaux très vétustes ou trop longs, infligeant aux clients des interruptions préjudiciables à leurs comforts et au fonctionnement normal des installations industrielles.
- 3) Pour développer le réseau, le distributeur dispose des moyens suivants :
 - Créer de nouveaux réseaux, cela augmente également la capacité et réduit les chutes de tension.
 - Renouveler des réseaux vétustes, ce qui diminue la fréquence des pannes.
 - Augmenter l'automatisation du réseau (installation d'appareils commandés à distance), ce qui permet de réduire les temps de coupure pour mener à bien tous ces travaux, le distributeur doit prendre en compte les contraintes environnementales qui vont conduire à développer en priorité le réseau souterrain.
 - 4) Actuellement, EDF construit 90% des réseaux HTA neufs en souterrain et 66% des réseaux BT en souterrain ou en technique de pose sur façade.

L'évolution actuelle des réseaux est caractérisée par un taux d'accroissement de charges assez limite, mais un renforcement des exigences de qualité. [14]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents éléments constitutifs des réseaux électriques. Nous avons vu les différents types des réseaux selon la tension, l'architecture leur topologie.

La stabilité des réseaux est caractérisée par les variations de puissances actives et réactives transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions, des courants et des fréquences associées à ces puissances. C'est l'objectif du prochain chapitre.

CHAPITRE II

**Notions sur les
perturbations
influençant sources et
réseaux**

Introduction

La sensibilisation à la qualité de l'énergie électrique est devenue incontournable dans l'électrotechnique d'aujourd'hui. Nous exposons dans ce chapitre la position du problème de la qualité de l'énergie électrique. Au préalable nous nous attacherons à présenter les principales perturbations rencontrées, leurs définitions, leurs causes et leurs conséquences.

II.1 Qualité d'énergie

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité de courant.

II.1.1 Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tension constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

- **Amplitude**

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

- **Fréquence**

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés.

- **Forme d'onde**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus

sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

- **Symétrie**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

II.1.2 Qualité de courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ».

II.2 Classification des perturbations électriques

On distingue quatre familles de perturbation électrique :

- Les variations de l'amplitude (creux de tension, coupure brèves et surtension, flicker)
- Les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale
- Les modifications de la forme d'onde (harmonique, inter harmonique, bruits)
- La dissymétrie du système triphasé déséquilibre (de phase et d'amplitude).

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en basant sur leur durée :

- Les perturbations transitoires
- Les perturbations de courte durée
- Les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.

Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

- les défauts au sein des réseaux électriques
- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...)
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements). [15]

Le tableau II.1 récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la tension est également indiquée en pu (per unit) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude.

Duré	Type de Perturbations	Amplitude	Origine	Conséquences
10ms - 1min	Transitoires (impulsions et oscillations)	-	Déclenchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutation	Dysfonctionnements Gênants
	Creux de tension	0.1 – 0.9 Pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Coupures brèves	<0.1 pu	Courts-circuits	Arrêts d'équipements, pertes de production
Régime établi	Surtensions	1.1 – 1.8 Pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour Les matériels
	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou Monophasées	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Variations rapides de tension (Flicker)	0.1 – 7 %	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0 – 20%	Charges non linéaires (structures d'électronique de puissance, arcs électriques)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles Fonctionnels
	Inter harmoniques	0 – 2%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Bruit	0 – 1%	Fours à arc, charges non Linéaires	Echauffements, pertes, vieillissements
	Variations de la Fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

Tab. II.1 Vue d'ensemble des principales perturbations électriques de la tension [15]

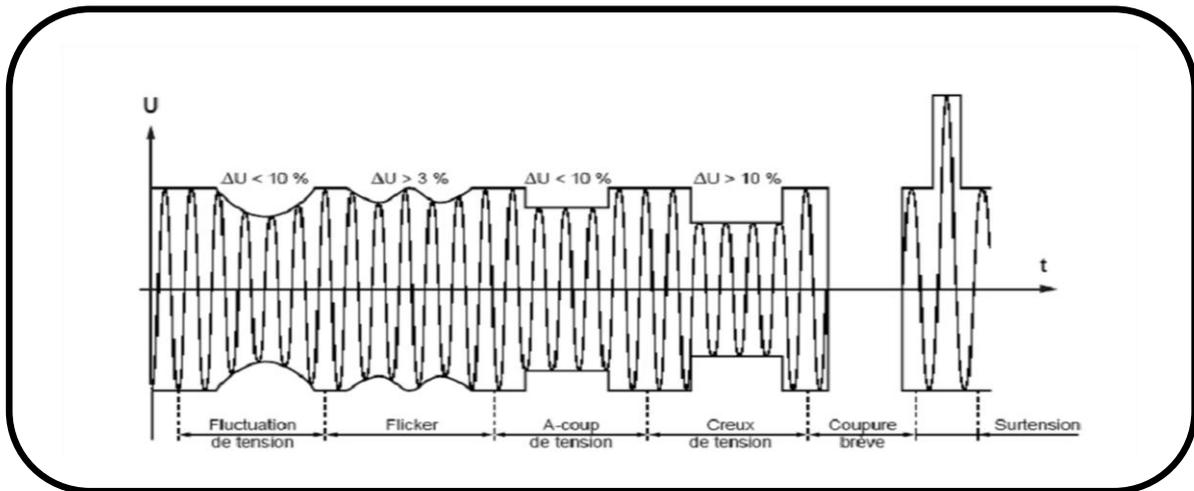


Fig. II.1 Les différents types de perturbation [16]

II.2.1 Les creux de la tension

1) Définition

Les creux de la tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. [17]

Schématiquement on peut les définir par une diminution de l'amplitude de la tension pendant un intervalle de temps compris entre deux à coups de tension consécutifs de sens contraire et à l'intérieur duquel la tension est en permanence inférieure à la valeur de la tension en régime normal. [18]

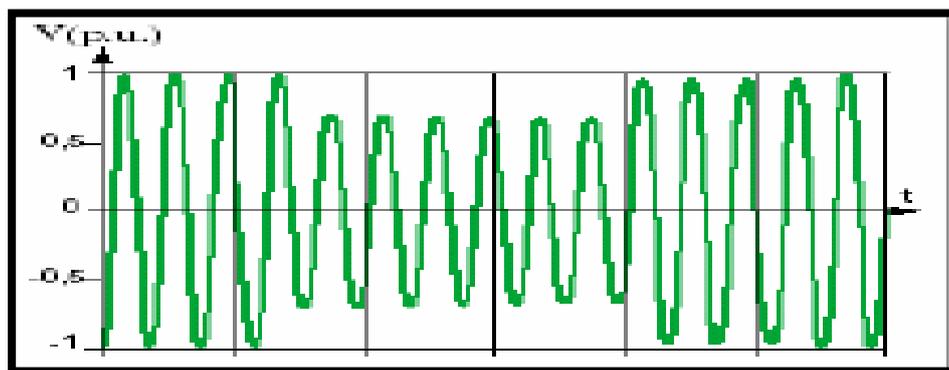


Fig. II.2 Creux de tension [19]

Ils sont caractérisés par leurs amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concernés. [19]

Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100%) pendant 1s à 10mn on parle de coupure brève, et entre 10 ms et 1s de coupure très brève. [20]

Elle est caractérisée par une diminution brutale de la tension d'alimentation à une valeur située entre 90% et 10% de la tension déclaire, pour une durée de 10ms jusqu'à 1mn. [18][16]

Les valeurs inférieure à 10ms pour les durées, 10% pour les chute se tension. Ne sont pas prise en compte pour les raisons suivants :

- Les perturbations inférieures à 10 ms sont considérées comme des régimes transitoires
- Les chutes de tension inférieure à 10% sont considérées par la majorité des équipements électriques.

Les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont donc :

- sa profondeur : ΔU (ou son amplitude U), l'amplitude de creux de tension est liée à la nature de défaut et à la puissance de court-circuit du réseau.
 - sa durée ΔT , définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est inférieure à 90 %.
- [21]

2) Origine des creux de tension et leurs conséquences

Les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (voir figure II.3a). Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (voir figure II.3b). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de secondes et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.

Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.

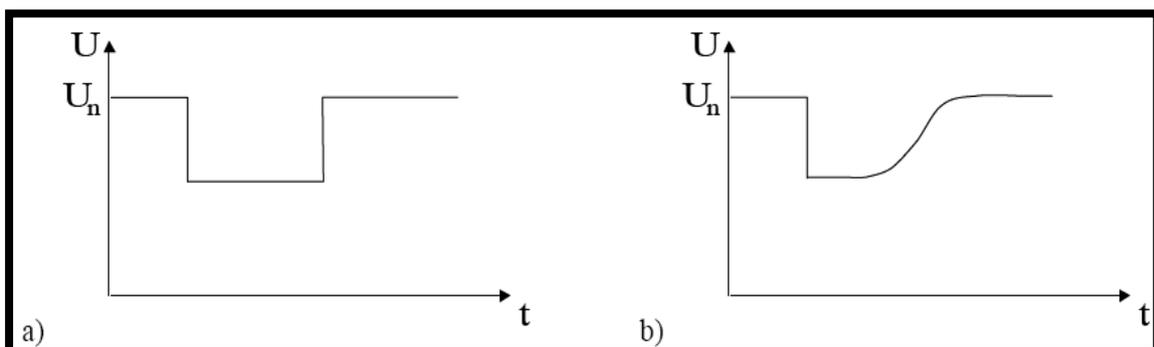


Fig. II.3 Amplitude d'un creux de tension provoqué par a) un court-circuit
b) le démarrage d'un moteur de forte puissance [15]

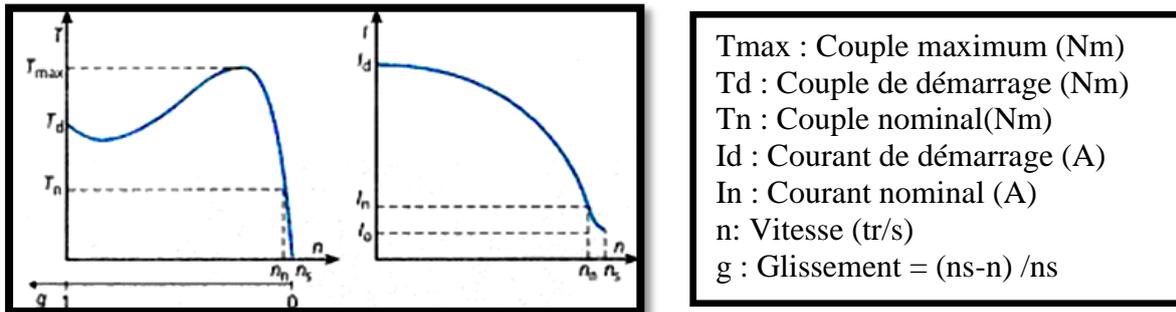


Fig. II.4 Caractéristiques de démarrage d'un moteur asynchrone [22]

Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes. [15]

3) Estimations de l'amplitude du creux

On estime l'amplitude des creux de tension par le pourcentage de réduction de tension, et leur durée, par le temps pendant lequel la tension efficace de l'une des phases tombe en dessous du seuil de 90 % de la tension nominale. On poursuit l'estimation jusqu'à ce que la tension excède à nouveau ce seuil. Pour un même événement, l'amplitude des creux de tension mesurés en phase-neutre et en phase-phase diffèrent. Les valeurs mesurées en phase-phase sont généralement plus représentatives de l'effet des creux de tension sur les charges industrielles. [23]

4) Valeurs indicatives

Le nombre annuel de creux de tension est imprévisible et varie énormément d'un endroit à l'autre. En zone urbaine, là où le réseau de distribution est majoritairement souterrain, on observe en moyenne de 1 à 4 creux de tension par mois. Dans les zones rurales, ce nombre est plus important. En général, les creux de tension durent moins d'une seconde et présentent une amplitude inférieure à 60%. [24]

II.2.2 Les surtensions

1) Définition

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1.1 pu à 1.8 pu. Autrement dit ce sont des perturbations qui se superposent à la tension du réseau. Dans les réseaux électriques on distingue deux modes de surtension :

- En mode commun entre les conducteurs actifs et la terre
- En mode différentielle, entre les différents conducteurs actifs.

Mais dans les deux cas, les dégâts occasionnés proviennent d'un claquage diélectrique entraînant des destructions de matériel sensibles et notamment des composants électroniques. Pour se protéger

correctement des diverses surtensions apparaissant sur les réseaux, il est nécessaire de bien les connaître et de les caractériser. [25] [26]

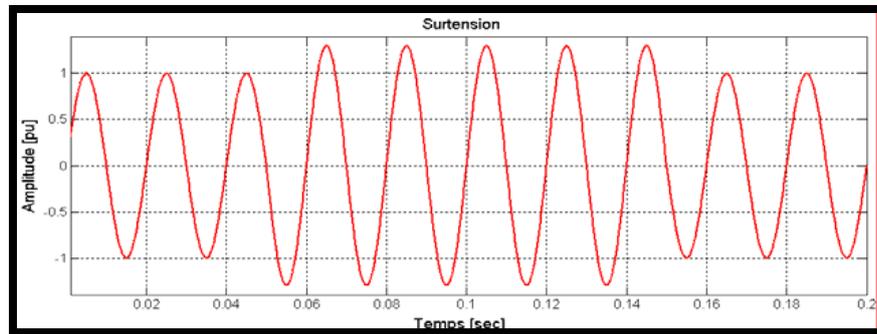


Fig. II.5 Exemple de surtension [15]

2) origine des surtensions

Les surtensions peuvent être d'origine interne ou externe.

- **origine interne**

Ces surtensions sont causées par un élément du réseau considéré et ne dépendent que des caractéristiques et de l'architecture du réseau lui-même.

A titre d'exemple, la surtension qui apparaît à la coupure du courant magnétisant d'un transformateur.

- **origine externe**

Ces surtensions sont provoquées ou transmises par des éléments externes au réseau, dont on peut citer à titre d'exemple :

- surtension provoquée par la foudre
- propagation d'une surtension HT à travers un transformateur vers un réseau interne d'usine.

3) classification des surtensions

La norme CEI 71-1 [25] donne la classification des surtensions selon leur durée et leur forme.

Selon la durée, on distingue les surtensions temporaires et les surtensions transitoires :

- **surtension temporaire** surtension à fréquence industrielle de durée relativement longue (de quelques périodes à quelques secondes).
- **surtension transitoire** surtension de courte durée ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie.

Les surtensions transitoires sont divisées en :

- surtension à front lent
- surtension à front rapide
- surtension à front très rapide.

4) conséquences des surtensions

Les surtensions dans les réseaux électriques provoquent des dégradations du matériel, une baisse de la continuité de service et un danger pour la sécurité des personnes.

Les conséquences peuvent être très diverses suivant la nature des surtensions, leur amplitude et leur durée. Elles sont résumées dans ce qui suit :

- claquage du diélectrique isolant des équipements dans le cas où la surtension dépasse leur tenue spécifiée
- dégradation du matériel par vieillissement, causé par des surtensions non destructives mais répétées
- perte de l'alimentation suite aux coupures longues causées par la destruction d'éléments du réseau
- perturbation des circuits de contrôle - commande et de communication à courants faibles par conduction ou rayonnement électromagnétique
- contraintes électrodynamiques (destruction ou déformation de matériel) et thermiques (fusion d'éléments, incendie, explosion) causées essentiellement par les chocs de foudre. [25]

II.2.3 Fluctuations rapides de la tension ou flicker

1) Définition

La mise en marche de charges variables comme des fours à arc, des imprimantes laser ou des micros - onde provoque des variations rapides de tension électrique. Ce phénomène appelé papillotement et il est quantifié par la valeur de flicker.

En plus de conséquences éventuelles sur les équipements industriels, ces variations peuvent entraîner des effets négatifs sur l'homme (mal de tête, irritabilité et parfois même épilepsie). Ces troubles ressentis par le système visuel humain et aux variations d'intensité lumineuse de l'éclairage. [26]

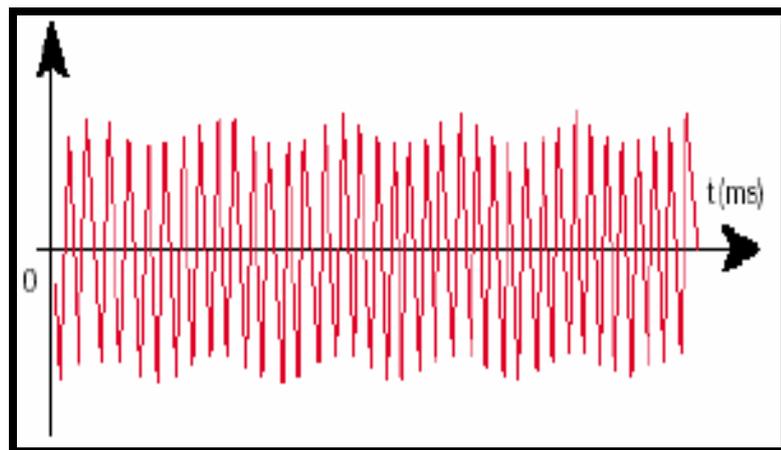


Fig. II.6 Exemple de variations rapide de la tension [27]

2) Les origines

Les fluctuations de tension ont deux origines; Les problèmes du réseau de transport et de perturbations sur le réseau. Pour le premier type, c'est le fournisseur d'électricité qui est responsable, pour la seconde ce sont les usagers. [28]

Le flicker résulte surtout des fluctuations rapides de faible amplitude de tension d'alimentation provoquées

- 1- soit par la variation fluctuante de puissance appelée par divers récepteurs : four à arc, soudeuses, moteurs, etc...
- 2- soit par la mise sous et hors tension de charges importantes : démarrage moteur, manœuvre de batteries de condensateurs en gradins, etc.... [29]

3) Classification des variations rapides

Les variations rapides de tension ont des origines différentes et sont classées en deux catégories :

- Le papillotement en fonctionnement établi « continuons opération » (type1)

Ce sont les variations rapides de tension engendrées en fonctionnement établi, elles sont dues aux variations de la puissance produite par les aérogénérateurs en raison des fluctuations de vent et de leur aérodynamisme.

- Le papillotement lors des opérations de couplage « switching opérations » (type2)

Ce sont les variations de tension engendrées lors des opérations de couplage/ découplage, elles sont consécutives aux variations de vent.

Ces variations sont dues aux brusques variations de puissance active et réactive qui apparaissent lors de la magnétisation des machines, de l'enclenchement /déclenchement de gradins de condensateurs, de la monter/ baisse de charge des machines. [30]

4) mesure de flicker

La méthode de mesure doit pouvoir quantifier le gêne ressenti et prendre en compte le mécanisme de la vision. Pour cela les flickers doit être évalué sur une période de temps suffisamment longue.

De plus, en raison de sa nature aléatoire (car le papillotement provoquée uniquement par certaines charges), le niveau instantané de flicker peut varier considérablement et de façon imprévisible pendant cette période. Un intervalle de la minute a été jugé comme étant un bon compromis pour évaluer ce qui est appelé de flicker courte durée où pst. Il est assez long pour éviter d'accorder d'importance à des variations isolées de tension. Il est également long pour permettre à une personne non avertie de remarquer la perturbation et son persistance. La période de 10 minutes sur laquelle à été basée l'évaluation de la sévérité du flicker de courte durée est valable pour l'estimation des perturbations causé par des sources individuelle tell que les luminaires, pompe à chaleur ou appareils électrodomestique.

Dans le cas où l'effet combiné de plusieurs charges perturbatrices fonctionnant de manière aléatoire (par exemple des poste de soudure où des moteurs) doit être pris en compte ou quand il s'agit de sources de flicker à cycle de fonctionnement long ou variable (four électrique à arc), il est nécessaire d'évaluer la perturbation ainsi créés sur une plus longue durée. La durée de mesure est

alors définis à 2 heures, durée considère comme appropriée au cycle de fonctionnement de la charge ou durée pendant laquelle un observateur peut être sensible au flicker longue durée ou pst.

Cet aspect normatif se retrouve dans les analyseurs de qualité de réseau sous la forme d'une fonctionnalité flicker. Elle permet de réaliser directement les calculs selon la norme. [26]

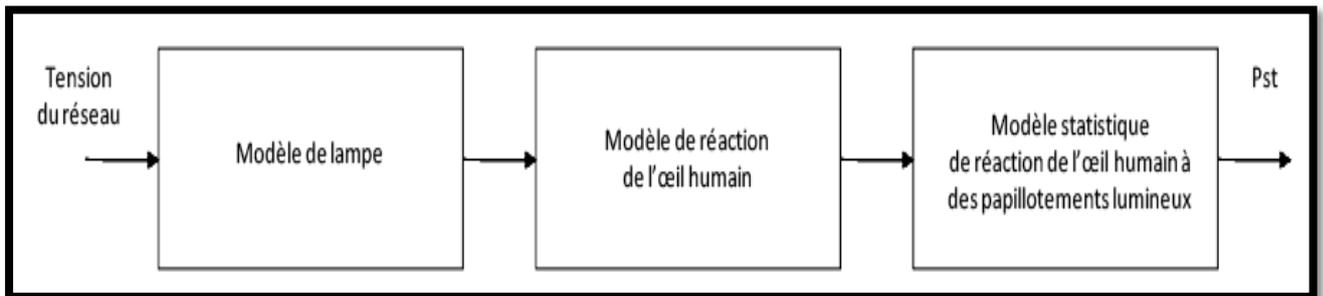


Fig. II.7 Opérations successives permettant de calculer le Pst

La figure précédente représente le diagramme fonctionnel mis en place par l’UIE pour mesurer le flicker. [31]

II.2.4 Chute de tension

1) Définition

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation de courant dans la ligne provoque une chute de la tension. [27]

Alors on peut définir la chute de la tension de la manière suivante ; Lors qu’un circuit est traversé par un courant de service (Ib) il ya chute de tension entre sa source et le récepteur.

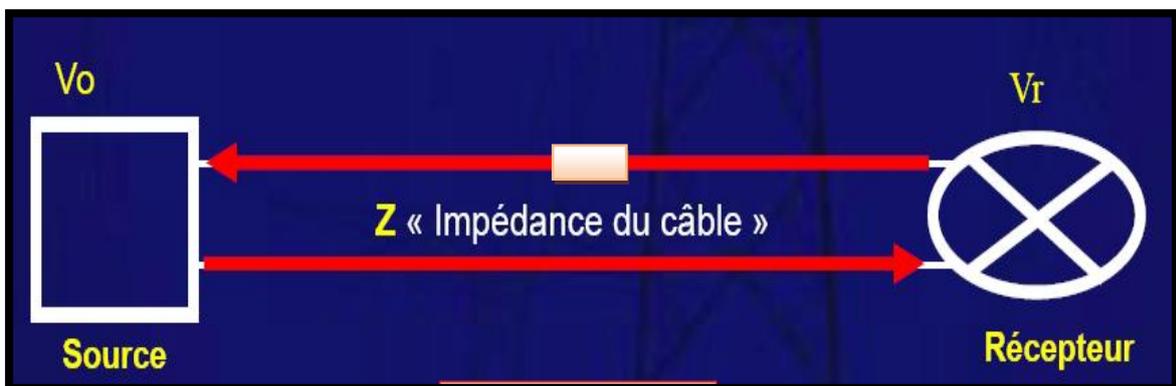


Fig. II.8 Calcul de chutes de tension

$$\Delta V = V_0 - V_r$$

Pour calculer la chute de tension (ΔU) on utilise la loi d’ohms $\Delta U = Z * I_b$. [32]

Or le bon fonctionnement d'un récepteur (sur tout un moteur) est conditionné par la valeur de la tension à ses bornes.

Il est donc nécessaire de limiter les chutes de tension en ligne par un dimensionnement correct des câbles alimentations. [33]

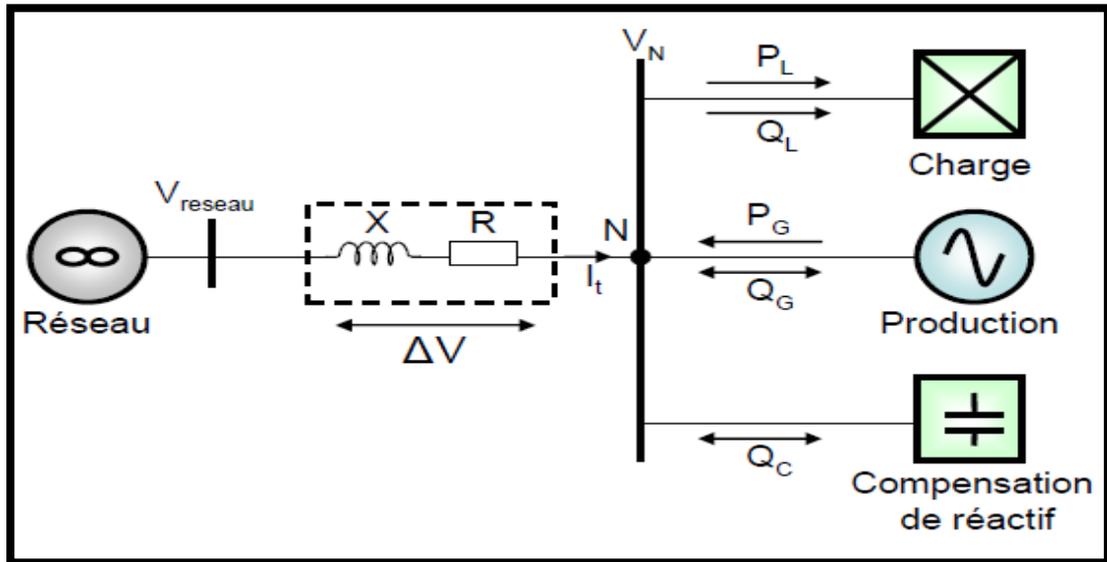


Fig.II.9 Détermination de la chute de tension sur une ligne

2) calcul de la chute de tension en ligne en régime permanent

La chute de tension en ligne en régime permanent et a prendre en compte pour l'utilisation en récepteur dans des conditions normales (limites fixées par les constructeurs des récepteurs).

Le tableau ci – contre donne les formules usuelles pour le calcul de la chute de tension.

Alimentation	Chute de tension en v	En %
Monophasé : phase et neutre	$\Delta V_I = 2I_{BL} (R \cos\phi + X \sin\phi)$	$100U/V_n$
Triphasé : trois phases (avec ou sans neutre)	$\Delta U_I = \sqrt{3}I_{BL} (R \cos\phi + X \sin\phi)$	$100U/U_n$

Tab. II.3 Formules de calcul de chute de tension

U_n : tension nominale entre phases

V_n : tension nominale entre phase et neutre

Conformément a la norme NFC 15-100 8 525 [25], la chute de tension entre l'origine et l'installation et tout point d'installation ne doit pas être supérieure aux valeurs de tableau suivant :

	Eclairage	Autre usages
A- Installation alimentées directement par un branchement à basse tension, a partir d'un réseau de distribution publique à basse tension	3%	5%
B- Installation alimentées par un poste de livraison ou par un poste de transformation à partir d'une installation à haute tension (l'origine de l'installation est le point de raccordement HTA)	6%	8%

Tab. II.4 chute de tension admissible dans les réseaux BT [25]

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évaluée dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrale débitent est relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales. [27]

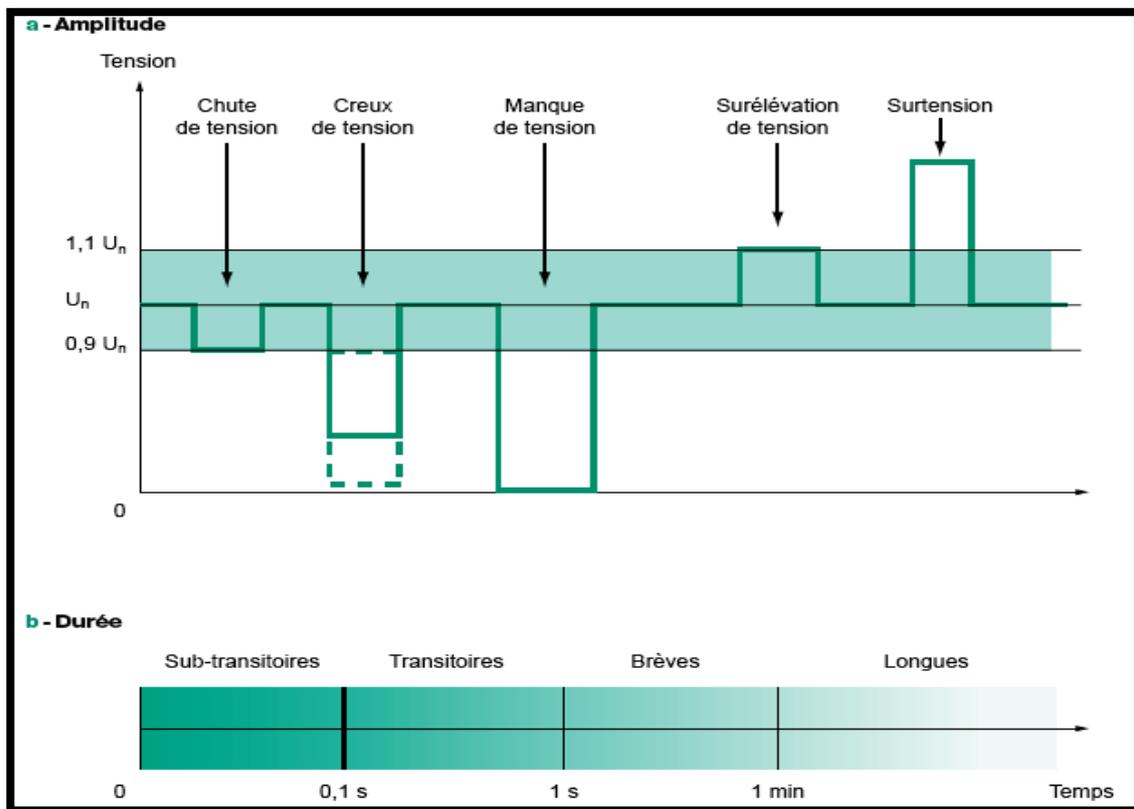


Fig. II.10 Perturbation de tension dans les réseaux [1]

II.2.5 Variation de la fréquence

1) Définition

Les variations de fréquence ne perturbent pratiquement plus aucun équipement électronique. D'anciennes consoles de visualisation et certains variateurs ou gradateurs supportaient mal les variations de phase. L'inertie des gros moteurs tend à laisser les à-coups de phase provoqués par les variations brutales de la puissance consommée. Désormais seuls certains automatismes de basculement entre le réseau normal et un réseau secouru restent sensibles aux instabilités de fréquences. [28]

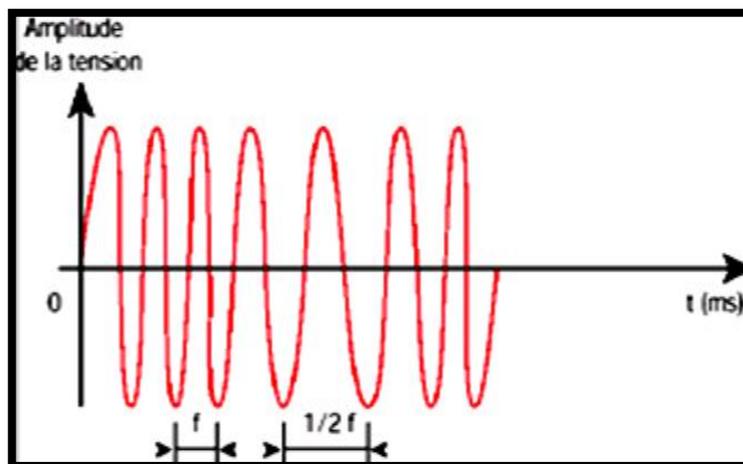


Fig. II.11 fluctuations de fréquence [18]

2) Causes de variation

Le maintien de la fréquence d'un réseau dépend de l'équilibre établi entre la charge et la puissance des centrales. Comme cet équilibre évolue dans le temps, il en résulte de petites variations de fréquence dont la valeur et la durée dépendent. par ailleurs, le réseau peut être soumis à des variations plus importantes dues à des défauts ou des variations de charge ou de production qui causent des variations de fréquence temporaires dont l'amplitude et la durée dépendent de la sévérité de la perturbation.

3) Méthode d'évaluation

L'évaluation est fondée sur la mesure de la valeur moyenne de la fréquence fondamentale de la tension en réseau évaluée sur des échantillons de 12 cycles consécutifs. [24]

Un des problèmes des variations de fréquence est que les harmoniques se déplacent en fréquence avec un décalage proportionnel à leur rang. Les mesures des courants harmoniques deviennent difficiles et erronées en cas de fréquence instable. Pour la même raison, le calage en fréquence de filtres anti-harmoniques devient insatisfaisant. [28]

II.2.6 Déséquilibre

1) Définition

Lorsque les 3 tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les une par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre de système triphasé.

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courant non équilibré dans les impédances de réseau. [34]

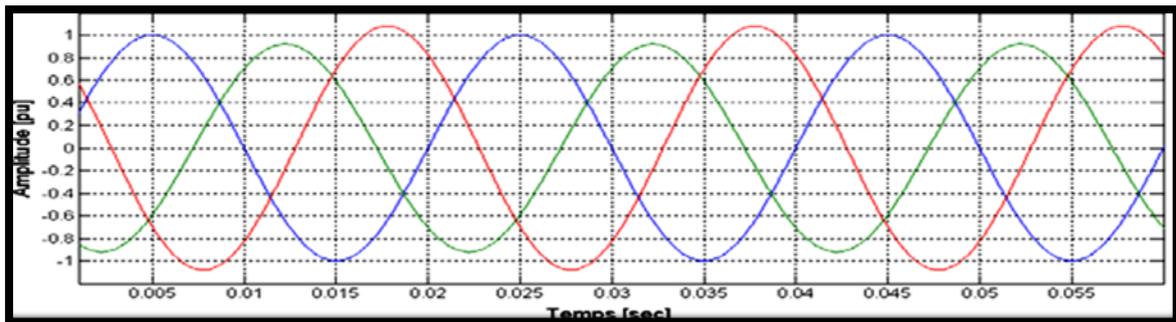


Fig. II.12 Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases [15]

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les 3 tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les 3 phases successives n'est pas de 120° . [15]

Les déséquilibres sont essentiellement dus à la circulation de courant non équilibré par les impédances de réseau et ont pour conséquence des couples de freinage parasites et des échauffements que des moteurs ou toutes autres machines asynchrone. [35]

2) Composantes symétriques

Un système déséquilibré de tension et de courant peut être décomposé en trois systèmes équilibrés :

- **Système directe** qui tourne dans le même sens que le système de référence
- **Système inverse** qui tourne dans le sens inverse par rapport au système de référence
- **Système homopolaire**

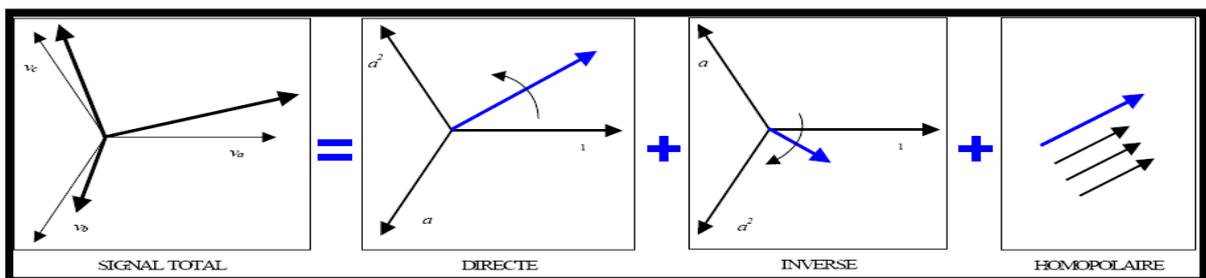


Fig. 1.13 Décomposition en composantes symétriques

- pour un système direct $V_A = V_A^{(1)} ; V_B = a^2 V_A^{(1)} ; V_C = a V_A^{(1)}$
- pour un système inverse $V_A = V_A^{(2)} ; V_B = a V_A^{(2)} ; V_C = a^2 V_A^{(2)}$
- pour un système directe $V_A = V_A^{(0)} ; V_B = V_A^{(0)} ; V_C = V_A^{(0)}$

$$a = e^{j120}$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A^{(1)} \\ V_A^{(2)} \\ V_A^{(0)} \end{bmatrix}$$

3) Niveau de déséquilibre

Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et à la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. [15]

- Le déséquilibre homopolaire affecte le système des tensions simple, il modifie le rendement des charges monophasées. Un déséquilibre homopolaire important produit de déséquilibre inverse.
- Le déséquilibre inverse affecte le système des tensions composées. Il perturbe le rendement des charges raccordées entre phases.

La valeur de déséquilibre inverse induit par le déséquilibre homopolaire dépend de régime de neutre du système électrique, il est représenté par un inducteur appelé taux de déséquilibre ou taux de composante inverse. [36]

4) Le degré et le taux de déséquilibre

On définit un degré de déséquilibre inverse ou un degré de déséquilibre homopolaire.

- Le degré de déséquilibre inverse est le rapport entre la composante inverse de fondamental de la tension et sa composante directe ; $\Delta U_i = U_{1i} / U_{1d}$ [37]

La norme EN50160 fixe le taux de déséquilibre inverse admissible à 2% sur les valeurs efficaces calculées sur 10 minutes pour 95% de temps d'une semaine. Il est généralement convenu qu'un déséquilibre inférieure à 2% ne suscite au problème. [35]

- Le degré de déséquilibre homopolaire est le rapport entre la composante de la homopolaire fondamentale de la tension et sa composante directe ; $\Delta U_0 = U_{10} / U_{1d}$ [37]

La formule approchée suivante $\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{moy}}{V_{moy}}$ peut aussi être utilisée

Avec V_i tension de la phase i et $V_{moy} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$ [21]

Un réseau équilibré à des composantes inverse et homopolaire nulles, il n'est composé que d'une composante directe. Un déséquilibre est essentiellement provoqué par la dissymétrie de la consommation sur les trois phases en aval de transformateurs, en particulier par des charges monophasées mal réparties entre les phases.

On peut évaluer grossièrement le taux de déséquilibre τ (exprimé en pourcent) par la relation très simple $\tau = \frac{P_n}{P_{cc}}$.

Avec P_n puissance nominale de la charge monophasée qui crée le déséquilibre.

P_{cc} puissance de court-circuit de l'alimentation triphasé qui alimente cette charge. [28]

Les taux les plus élevés sont observés sur le réseau BT alimentés après un transformateur de faible puissance avec une majorité de branchements monophasés.

Dans les cas difficiles, le couplage « Zig-zig », permet d'atténuer le déséquilibre pour le réseau amont. [36]

En pratique, un taux de déséquilibre de tension de 1% pendant une longue période, et 1.5% de moins de quelque minute est acceptable. [21]

5) Les causes

Les déséquilibres de tension qui s'appliquent aux tensions triphasées ont deux causes principales, les asymétries d'impédance des lignes du réseau et les déséquilibres de charge. [24]

Ils sont généralement dus à des charges monophasés car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase déferente, d'où un déséquilibre des trois tensions, le déséquilibre des tensions peut également être du à des charges triphasés, lorsque celui-ci ne sont pas symétrique. [15]

La tension inverse(ou homopolaire) est provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courant inverse (ou homopolaire) produits par les charges déséquilibrées qui conduisent à des courants non identique sur les 3 phases. [21]

6) Les effets des déséquilibres

Les conséquences sont l'augmentation de l'échauffement des machines asynchrones, l'existence de couple inverse est conduisent à la dégradation prématurée des machines. [37]

En effet, la réactance inverse d'une machine asynchrone est équivalente à sa réactance pendant la phase de démarrage. Le taux de déséquilibre en courant sera donc plusieurs fois celui de la tension d'alimentation. Les courants de phase pouvant alors différer considérablement. Ce qui accroît l'échauffement de la ou les phases parcourues par le courant le plus élevés et réduit la durée de vie de la machine. [21]

Le déséquilibre de tension engendre des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase. [15]

II.2.7 Les Harmoniques

Les récepteurs non linéaires tels que fours à arc, éclairage, convertisseurs, redresseurs, ... absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation des récepteurs. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension. [21]

Le signal déformé peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'un composant continu éventuel (théorème de Fourier).

On distingue le fondamental (composante sinusoïdale de fréquence égale à celle de signal) des harmoniques (composantes de fréquence multiple de celle de signal). [25]

Ceci revient à dire que ; tout signal périodique de période $T=1/f$ peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f .

Mathématiquement ils s'écrivent $S(t)=\alpha_0+\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$

Avec $\alpha_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt$; $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(n\omega t) dt$; $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(n\omega t) dt$ [26]

1) Définitions

Une tension déformée $v(t)$ de période T ($T=20$ ms à $f=50$ Hz) peut donc s'écrire de la façon suivante $V(t)= V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \theta_n)$

V_0 amplitude de la composante continue

θ_n Phase de V_n à l'instant initial ($t=0$)

De façon identique un courant déformé $i(t)$ peut s'écrire $i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \theta_n)$

1. Composante fondamentale ou le fondamental

V_1 est la composante fondamentale du signal $v(t)$, c.-à-d. La valeur efficace de la sinusoïde de fréquence égale à celle du réseau d'alimentation.

2. Composante harmonique ou harmonique

V_n pour $n \geq 2$ est la composante de rang n du signal $v(t)$, c.-à-d. la valeur efficace de la sinusoïde de fréquence égale à n fois celle du réseau d'alimentation.

3. Rang d'un harmonique

Nombre entier égal au rapport entre la fréquence de l'harmonique et la fréquence du fondamental. n est donc le rang de l'harmonique. [21]

4. valeur efficace d'un signal périodique

La valeur efficace du signal $v(t)$ est par définition $V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$

Le théorème de Parseval nous dit que $\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt = V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2$

On a donc la relation suivante $V_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}$ en considérant $V_0 = 0$

De même $I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$ en considérant $I_0 = 0$

Note la valeur efficace est parfois appelée valeur RMS (root mean square), qui est la notation anglaise $I_{\text{eff}} = I_{\text{RMS}}$ et $V_{\text{eff}} = V_{\text{RMS}}$.

5. taux de distorsion

Le taux de distorsion caractérise le niveau de pollution du réseau. Il existe deux définitions.

- **taux de distorsion suivant la norme DIN [25]** (Deutsches Institut für Normung)

Taux de distorsion en tension $D_v (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}}{V_{\text{eff}}}$

Taux de distorsion en courant $D_I (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_{\text{eff}}}$

- **taux de distorsion suivant la norme CEI 1000-2-2 [25]**

Taux de distorsion en tension $\tau_v (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$

Taux de distorsion en courant $\tau_I (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$

Le taux de distorsion défini par la norme CEI représente le rapport entre la valeur efficace des Harmoniques et la valeur efficace du fondamental (signal non déformé). Cette valeur caractérise bien le niveau de pollution apporté au réseau.

- **Le passage du taux DIN au taux CEI s'effectue de la façon suivante**

$$\frac{1}{D_v^2} = \frac{1}{\tau_v^2} + 1$$

$$\frac{1}{D_I^2} = \frac{1}{\tau_I^2} + 1$$

Le taux de distorsions CEI peut être supérieur à 100 %.

Pour des taux de distorsion faibles, les deux définitions donnent des valeurs presque identiques. Par contre, pour des taux de distorsion élevés les valeurs sont très différentes.

Par exemple pour $\tau_I = 10\%$ on trouve $D_I = 9,95\%$
 Pour $\tau_I = 120\%$ on trouve $D_I = 77\%$ [25]

6. Taux individuelle d'harmonique

Le taux harmonique de rang n est $V_n(\%) = 100 * V_n / V_1$

7. inter harmonique

Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle de fondamental. 130hz, 170hz, 220hz. [21]

Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par les récepteurs. [28]

8. Infra harmonique

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle de fondamental 10hz, 20hz...

La présence d'inter-harmoniques ou d'infra-harmoniques dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à T, ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaire à celle du développement en série de fourrier.

9. Spectre de fréquence

C'est la présentation graphique de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang. En général la valeur de chaque harmonique est exprimée par son taux individuel (en pourcentage de fondamental). [21]

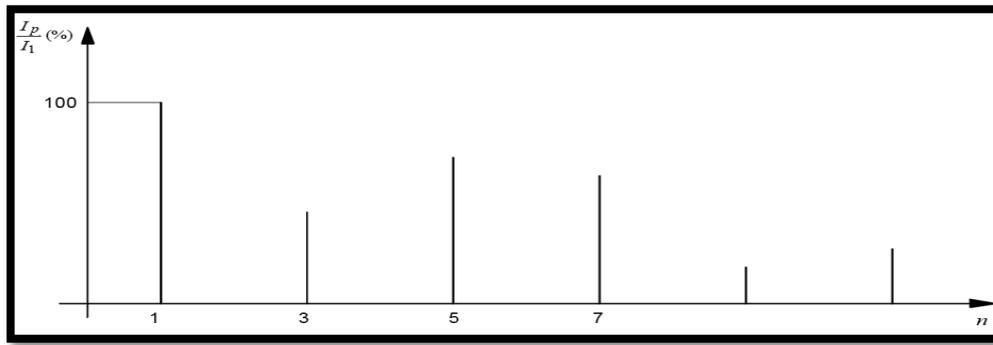


Fig. II.14 Spectre de fréquence d'un courant non sinusoïdal [21]

2) Définition d'harmoniques

Sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaire.

Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïde qui se propage dans le réseau et déformé ainsi l'allure de la tension.

La borne supérieure est fixée par la norme EN50 160 au 40eme rang. C.à.d. à 3khz pour la fréquence industrielle [24]

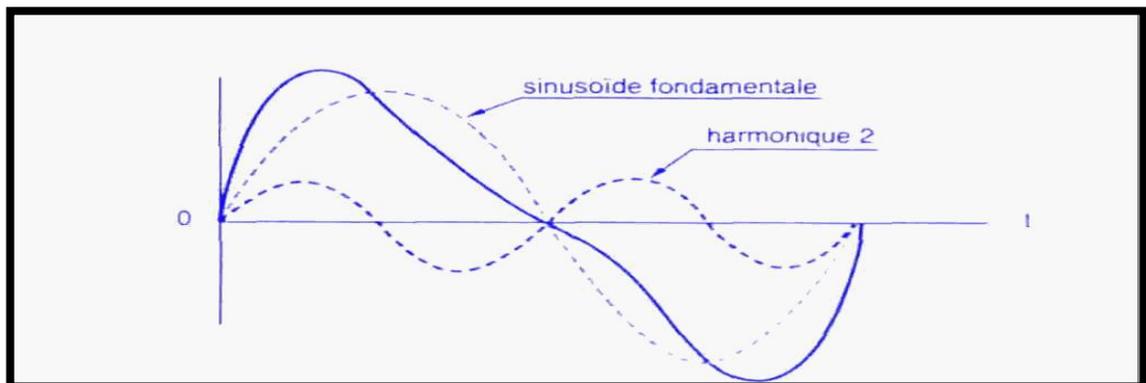


Fig. II.15 Exemple de signal déformé [25]

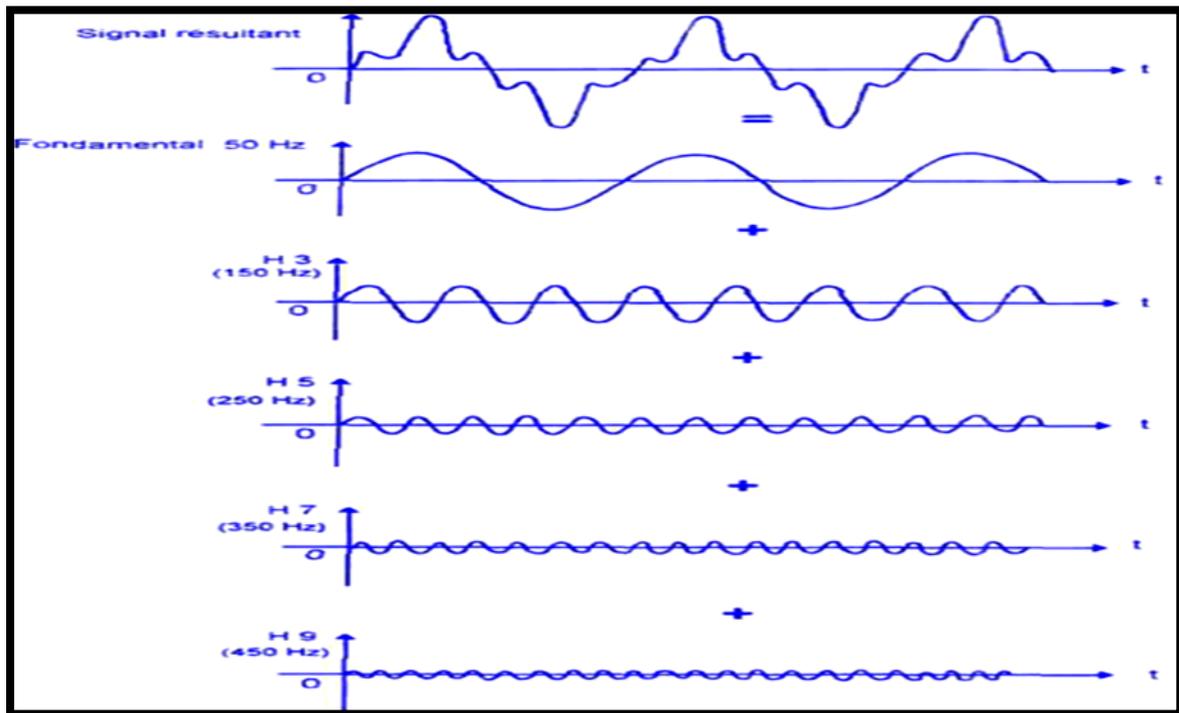


Fig. II.16 Décomposition d'un signal déformé [26]

3) Puissance en présence d'harmonique

En présence d'harmoniques, S^2 n'est pas la résultante de P^2+Q^2 . On introduit la notion de puissance de distorsion ou déformante D telle que $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

S est la puissance déformante ou de distorsion.

P et Q ne dépend pas de fondamental du courant, de tension (supposée sinusoïde) et de l'angle θ .

L'angle θ est le déphasage entre le fondamental du courant et la tension.

D dépend uniquement des courants harmoniques.

Le facteur de puissance est $FP = P/S$.

Le facteur de puissance (FP) ne doit pas être confondu avec $\cos\phi$ appelé ainsi facteur de déplacement de la puissance (DPF). [25]

4) Effet des harmoniques

On distingue les effets instantanés et les effets à terme :

- **Les effets instantanés** font suite à un phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipements (condensateurs, disjoncteurs). D'autres troubles fonctionnels sont liés à la déformation de l'onde de tension telle que couples pulsatiles sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesures (selon leur bande passante), perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation.
- **Les effets à termes** se traduisent par une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

La norme EN50160 fixe les niveaux de tension harmonique jusqu'au 25^{ème} rang et indique que le taux global de distorsion harmonique ne doit pas dépasser 8%. [24]

5) les principales sources d'harmonique

Ce sont des charges, qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines industriels ou domestiques.

1. Les charges industrielles

- Equipement électronique de puissance variateur de vitesse à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentation à découpage
- Charges utilisant l'arc électronique et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmonique.

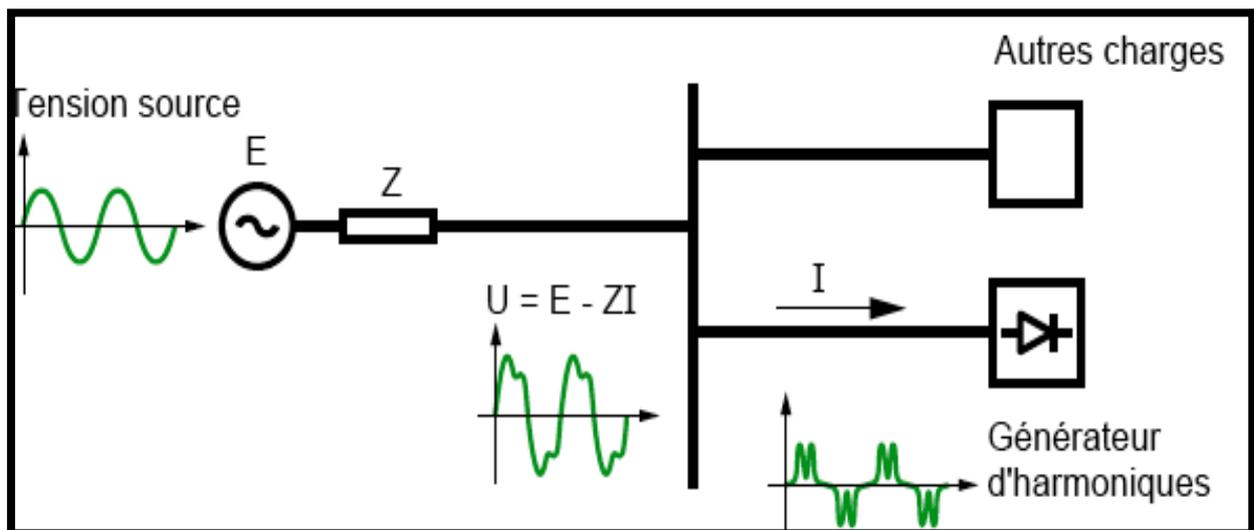


Fig. II.17 dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire [1]

2. Les charges domestiques

Muni de convertisseurs ou d'alimentation à découpage : téléviseur, four à micro-onde, bloque à induction, ordinateur, imprimante, photocopieuse, gradateur de lumière, équipement électroménager, lampe fluorescente.

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielle leurs effets cumulés de fait de leurs grands membres et de leur utilisation simultanée sur de long période en font des sources et des distorsions harmoniques importantes.

A noter que l'utilisation de ce type d'appareille croix en membre et parfois en puissance unitaire.

6) Les niveaux d'harmonique

Il varie généralement selon le mode de fonctionnement de l'appareil, lors de la fourni et la saison (climatisation).

La source générée pour la plupart, des harmoniques du rang impair.

La mise sous tension de transformateurs ou les charges polarisé (redresseur mono alternance) ainsi que les fours à arc génèrent aussi (en plus des rangs impairs) l'harmonique de rang paire. [28]

7) Conséquence de la perturbation harmonique de courant sur le réseau

Pour chaque harmonique de courant traversant l'impédance de réseau, il apparaît une tension harmonique V_h $V_h = Z_h * I_h$

Z_h impédance harmonique de réseau

La circulation des courants harmonique dans le réseau entraîne donc une déformation de l'onde de tension.

Cela peut être préjudiciable au bon fonctionnement des récepteurs sensible branché sur ce même réseau.

Conséquence pour le conducteur de neutre

L'un des effets les plus connus et celui de circulation des courants harmonique de rang 3 et multiplier de 3 dans le conducteur de neutre. Il peut être bien supérieur au courant circulant dans les phases.

Lorsqu'un circuit alimente des appareils susceptibles de générer des courants harmoniques, la section des conducteurs déterminée d'après le courant nominal doit être majorée.

La NFC 15100 [25] permet lorsque le conducteur de neutre est peu chargé de choisir une section moitié de celle des conducteurs de phase. Elle ne peut être appliquée que si le matériel électrique ne produise aucun harmonique ou des harmoniques de valeurs réduite.

8) Correction de l'harmonique

Ce problème peut être abordé de deux façons :

- On pourrait essayée de réduire l'impédance de réseau. En théorie si l'impédance est nulle, la tension et le courant seraient complètement découplés et les harmoniques de courant n'auraient aucuns effets sur la tension. Cette solution n'est pas abordable car elle exigerait des modifications très importantes et onéreuse.
- Ajouter des bifurcations au système de façon à introduire des voix privilégiées de circulation de l'harmonique de courant qui évitent le réseau.

Conclusion

Nous avons étudiée dans le présent chapitre plusieurs types de perturbations qu'un réseau électrique peut rencontrer et nous avons cité leurs causes et leurs origines. Ces perturbations ont des conséquences néfastes considérables sur l'ensemble source-réseau-charge. On caractérise ces perturbations par leur influence sur la qualité de la tension et l'évolution de cette dernière depuis sa fourniture jusqu'à sa consommation. Les réseaux électriques sont souvent pollués par des harmoniques, creux de tension, surtension, déséquilibre...

Pour éviter certains dysfonctionnements que peuvent provoquer ces pollutions, les planificateurs et les distributeurs de l'énergie électrique ont établis des moyens pour atténuer ces perturbations et les corriger en aval de la charge. Parmi ces dispositifs on cite les filtres ainsi que la nouvelle technologie des FACTS basée sur l'électronique de puissance. Cet aspect sera l'objet d'étude du chapitre III.

CHAPITRE III

Dispositifs d'atténuation des Perturbations

Introduction

L'expansion des réseaux de transport d'énergie pousse les gestionnaires de réseau à exploiter le système au plus près de ses limites thermiques et dynamiques, alors que les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et à la continuité de service. [38]

Dans ce présent chapitre nous allons en premier lieu, voir les modes de compensation de la puissance réactive et d'harmonique, à savoir, les filtres et en particulier les filtres actifs. En deuxième lieu, nous allons détailler quelques définitions sur les différents types de FACTS suivant leurs classifications, soit en série, parallèle ou hybride.

III.1 Les filtres

Afin de limiter les effets harmoniques et réactifs d'un courant perturbé, il a été développé différents systèmes de filtrage. On va ainsi présenter rapidement les différents types de filtres pour s'attarder plus longuement sur les filtres actifs. [39]

III.1.1 Les filtres passifs

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible.

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients:

- Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire
 - Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre
 - Le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées
 - équipements volumineux
 - inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.
- [34]

Les filtres passifs, constitués d'une inductance L et d'un condensateur C , ont traditionnellement été utilisés pour absorber les harmoniques générés par des charges industrielles non linéaires, ceci étant dû à leur faible coût et à leur grande efficacité.

Le principe consiste à insérer en amont de la charge un ou plusieurs circuits de composants passifs accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série est placé en parallèle sur le réseau.

Cependant, il possède un certain nombre de défauts qui sont cités ci-dessous :

- L'impédance de la source influence fortement les caractéristiques de compensation du filtre passif. L'impédance de la source dépendante de l'impédance du réseau électrique et est habituellement non connue. De plus, les filtres passifs sont aussi sensibles aux tolérances de l'inductance L et du condensateur C
- La conception d'un filtre passif nécessite d'effectuer des études poussées du système à filtrer. Développer un filtre passif n'est pas quelque chose qui peut se généraliser à tout système. Pour chaque système à filtrer, il faut développer son propre filtre
- Le filtre passif peut provoquer une résonance parallèle avec la source causant l'amplification d'harmoniques de courants du côté de la source à des fréquences spécifiques
- Le filtre passif possède un ensemble de résonances avec la source soulevant la possibilité d'exciter cette résonance sous certaines conditions
- Les filtres passifs accordés sur une fréquence dominante de la charge ont tendance à attirer les harmoniques de courants des charges ambiantes

Les défauts mentionnés ci-dessus peuvent aussi causer une surcharge des filtres passifs. Par conséquent, les filtres passifs sont toujours accordés sur une fréquence juste en dessous de la fréquence de l'harmonique dominant de la charge (par exemple, les filtres passifs sont accordés sur l'harmonique 4.7 au lieu d'être accordés sur l'harmonique d'ordre 5).

Les filtres passifs ne constituent pas un moyen viable et efficace pour la compensation d'harmoniques de charges industrielles et en général, les charges telles que des systèmes de distribution. En revanche, ils sont parfaitement adaptés pour les systèmes de transmission de hautes tensions pour lesquelles les études de systèmes détaillés sont faites une fois pour toutes et dont l'effort d'ingénierie est seulement une petite fraction du coût total du système. [40]

III.1.2 Les filtres actifs

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation de perturbations du réseau électrique. [41]

L'intérêt principal des filtres actifs réside dans leurs faibles coûts et la possibilité de les réaliser dans un volume très réduit.

L'inconvénient est qu'il faut les alimenter et se contenter de filtrer des signaux d'amplitude limitée des composants actifs. [42]

Ces filtres ont pour but d'injecter sur le réseau soit :

- Des harmoniques de courant dans le cas d'un filtre actif parallèle
- Des harmoniques de tension dans le cas d'un filtre actif série
- Soit les deux dans le cas de filtres hybride. [40]

Dans cette partie de chapitre, nous allons introduire les filtres actifs parallèles, série, combiné parallèle-série et les structures hybride actif-passif.

1) Principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal. [43]

2) Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir de type de convertisseur qu'ils utilisent, de leurs topologies ou encore de leurs nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en Série, en Parallèle ou mixte. [43]

2.1) Filtres actifs série (FAS)

Les filtres actifs série sont une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et les creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même, mais peuvent parfois être provoquées par les charges elle mêmes. [41]. Ils sont placés en série entre la source et la charge non linéaire pour forcer le courant de la source à être sinusoïdal. [43]

Ils injectent une tension, sur le réseau, qui est ajoutée à la tension de source pour maintenir une tension purement sinusoïdale aux bornes de la charge. Le but est de protéger les installations de la tension fournie par le réseau.

Cependant, le filtrage actif série ne permet pas de compenser les harmoniques de courant créés par la charge. [40]

Il se comporte donc, comme une source de tension contrôlable. [43]

Le principe des FAS est montré en figure III.1 ci-dessous

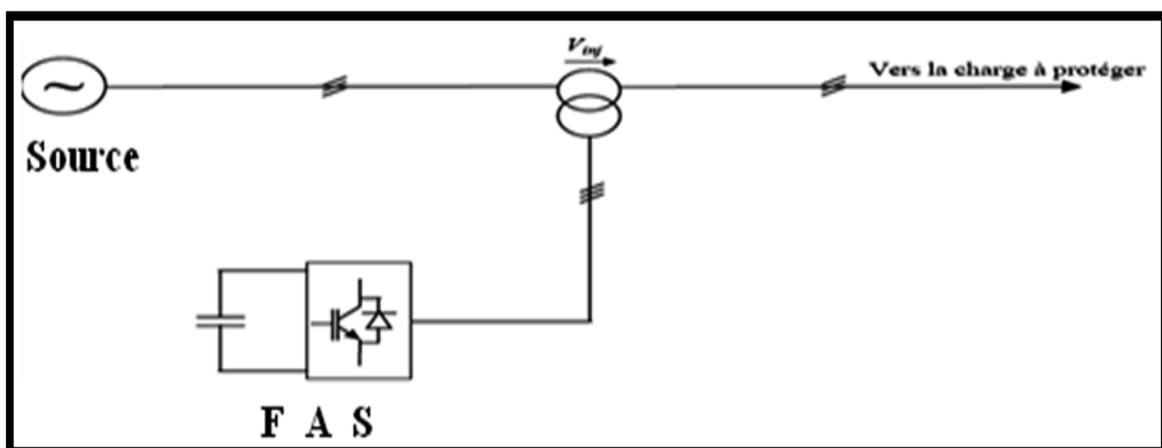


Fig. III.1 Filtre actif série

2.2) Filtres actifs parallèles (FAP)

Contrairement aux FAS, les FAP sont surtout utilisés pour éliminer les courants harmoniques engendrés par les charges génératrices des courants harmoniques. Il peut cependant, dans certaines conditions être utilisés pour compenser la puissance réactive, pour amortir les résonances parallèles ou série due à l'interaction entre la ligne et le filtre et pour balancer des courants déséquilibrés. Le FAP est un onduleur modulé en largeur d'impulsion (MLI) qui est placé en parallèle avec la charge. [43]

Les redresseurs MLI

Grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion, un convertisseur AC- DC à absorption sinusoïdale a été rendu possible. C'est une solution très efficace, cependant elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours.

Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diodes et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue. Cette solution permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC- DC et il ne peut agir sur les harmoniques créés par d'autres sortes de charges polluantes. [44]

Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure III.2 est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux- ci. Le courant côté réseau devient alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif de FAP consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produit par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance de réseau située en amont du point de connexion du filtre actif. [41]

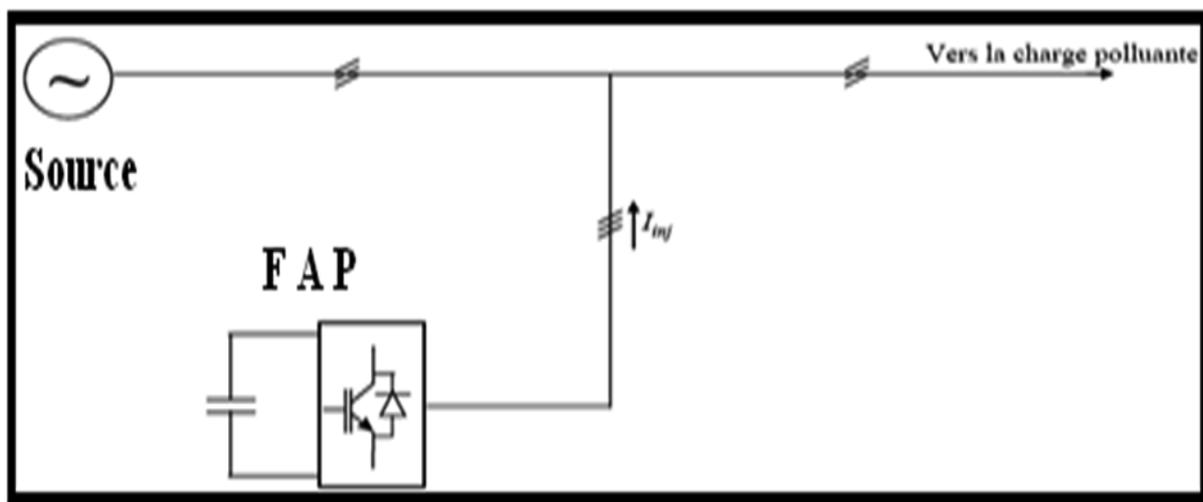


Fig. III.2 Filtre actif parallèle

Les filtres actifs parallèles ont l'avantage d'apporter seulement le courant de compensation et un peu du fondamental du courant fournit pour compenser les pertes de système. Il est aussi possible

de connecter plusieurs filtres en parallèle pour approvisionner en courants importants, ce qui rend ce type de circuit adapté pour une large gamme de puissance. [40]

Le filtre actif parallèle peut en même temps compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important. Il peut être utilisé suivant deux modes de fonctionnement

A. Filtre dédié

Si les harmoniques à filtrer sont connus à priori, la commande du filtre actif est dédiée. L'exemple type est la suppression des premiers harmoniques du courant absorbé par un redresseur alimentant une charge fortement inductive. Dans ce cas, les harmoniques peuvent être approximativement estimés à partir de l'amplitude et la phase du courant fondamental.

B. Filtre adaptatif

Ce filtre est capable d'identifier par lui-même les harmoniques et de s'adapter automatiquement à leurs éventuelles harmoniques en opposition de phase.

Cette nouvelle solution plus performante est en cours d'étude et dans certains cas, au stade industriel grâce notamment à l'apport de l'évolution des techniques de commande et de mise en œuvre des semi-conducteurs de puissance. [41]

2.3) la combinaison parallèle-série actif (Conditionneur Universel de la Qualité d'Onde) UPQC

La combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle dénommé: conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC) de son origine anglaise « unified power quality conditioner » permet d'aller chercher plusieurs fonctions simultanément servant à améliorer la qualité de la tension (compensation d'harmonique, de puissance réactive, régulation et stabilisation de tension, etc.... [43]

Alors profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci. [41]

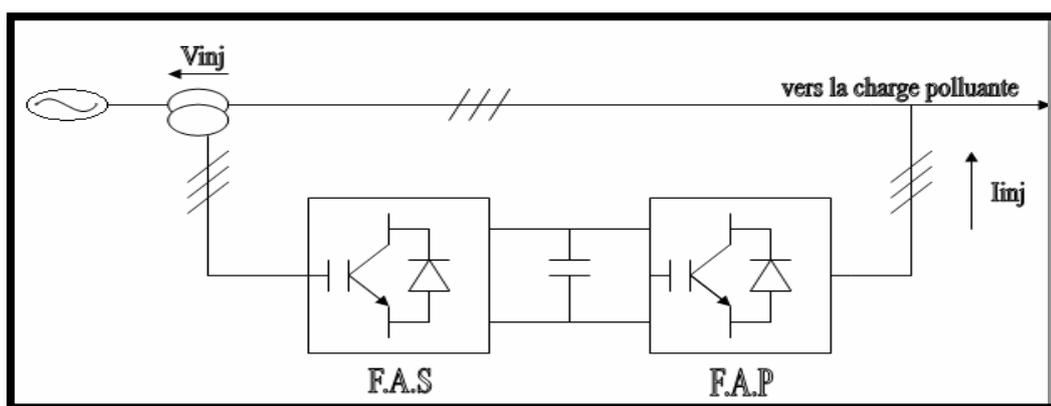


Fig. III.3 Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

3) Effets de l'impédance de réseau sur le filtre actif

L'effet de l'impédance du réseau est moindre que dans le cas du filtre passif. Le risque de résonance entre le filtre actif et l'impédance du réseau est inexistant. Ceci n'est pas un facteur aussi déterminant lors de la conception, mais l'efficacité de compensation d'harmoniques du filtre actif est

tout de même reliée à l'impédance du réseau et aussi par le type de charges génératrices d'harmoniques. [43]

4) Avantages des filtres actifs

Les filtres actifs présentent un ensemble d'avantages indéniables sur les filtres passifs :

- Ils sont plus fiables (toutes les chaînes de fabrications sont automatisées)
- Ont une grande qualité, leur coût est nettement moindre
- Les éléments parasites (résistances, capacités ou inductances parasites) sont moindres, vu la petite taille des circuits; On peut les intégrer si nécessaire sur la puce électronique portant un processeur numérique. [42]

5) Les inconvénients des filtres actifs

On leur trouve également certains défauts :

- Les composants actifs (ampli opérationnel) ont une bande passante réduite, au contraire les composants passifs sont utilisés pour les applications haute fréquence (jusqu'à 500MHz)
- Les circuits actifs sont très sensibles à la précision sur leurs composants, c'est-à-dire que leurs caractéristiques peuvent varier beaucoup si les composants utilisés n'ont pas leurs valeurs nominales (ce qui arrive toujours en pratique, si on considère que la précision garantie par les fabrications sur les résistances et condensateurs est souvent de l'ordre de 10%)
- Les composants actifs nécessitent une source d'énergie
- Les amplitudes des signaux traitables par les filtres actifs sont de l'ordre du volt (au-delà de cette valeur, ils peuvent produire de la distorsion). Les résistances et les amplificateurs opérationnels produisent par ailleurs du bruit. Ceci tend à limiter la dynamique des signaux utilisables, ce qui n'est pas le cas pour les filtres passifs. [39]

III.1.3 Combinaison hybride active et passive

Afin de réduire la dimension et par conséquent la prise des filtres actifs, l'association des filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. [41]

Dans ce cas, le rôle de filtre actif est de maintenir et d'améliorer les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge, et de réseau tandis que le filtre passif s'occupe de la compensation d'une bonne partie des harmoniques. [43]

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- Le filtre actif série avec un filtre passif parallèle
- Le filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

1) Le filtre actif série avec le filtre passif parallèle

Pour réduire la complexité de la combinaison de filtre présentée précédemment, le filtre actif série, qui constitue une haute impédance pour les harmoniques de hautes fréquences, est accompagné par un filtre passif parallèle. Dans cette combinaison représentée par la figure III.4 le rôle du filtre actif série est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par le filtre passif accordé à leurs fréquences. [40] [44]

Cette configuration permet de minimiser la puissance de filtre actif car une grande partie des courants harmoniques est absorbée par les filtres passifs. [34]

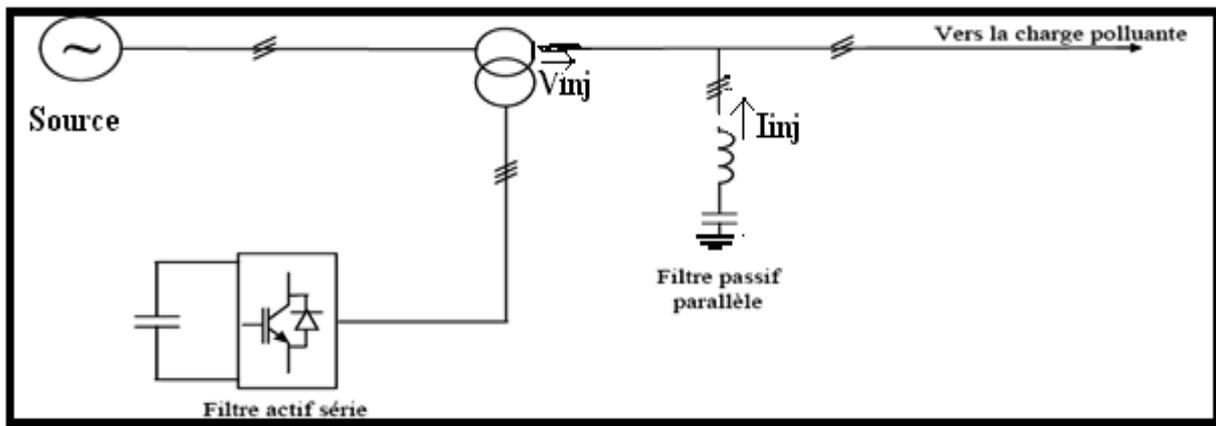


Fig.III .4 Filtre actif série et filtre passif parallèle [44]

2) Filtre Actif Série en série avec filtre passif parallèle

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure III.5, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore les dimensions du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

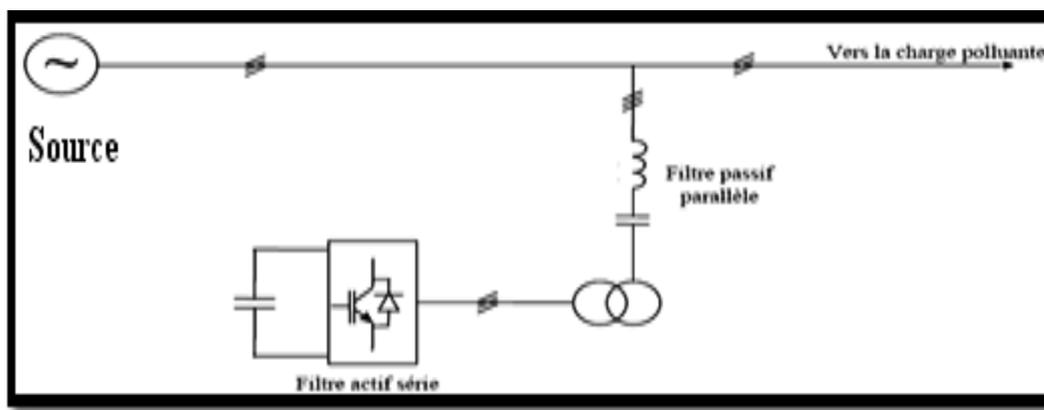


Fig.III.5 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle [41]

3) Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Dans cette combinaison, montrée en figure III.6, le rôle du filtre actif parallèle est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante pendant

que le filtre passif est conçu pour éliminer l'ensemble des harmoniques du courant de charge. Avec de telles combinaisons, le système peut être conçu pour de haute puissance sans excès de coût pour le découpage à haute puissance.

Le principal défaut de cette technique est qu'elle contient trop de composants de puissance, en particulier pour le filtre passif. Puisque les filtres passifs sont connectés en permanence au système, cette approche est seulement adaptée pour une charge unique avec une source d'harmoniques prédéfinie.

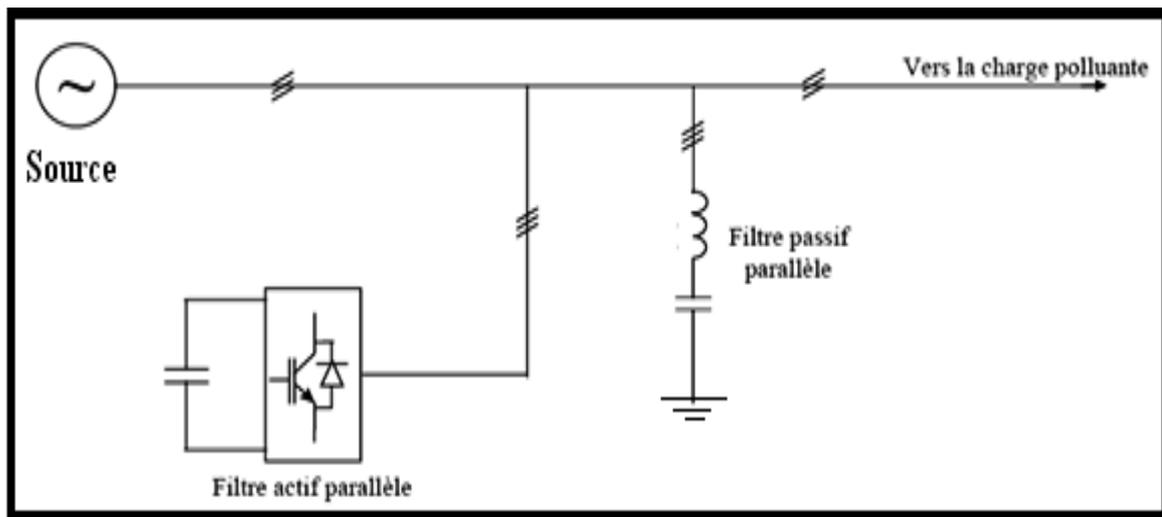


Fig. III.6 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [40] [41]

III.2 Système de transmission flexible en courant alternatif (FACTS)

Les dispositifs FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par Electric Power Research Institute (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristors. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides. Ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques. [45]

III.2.1 définitions et généralités

Selon l'IEEE (institute of electrical and electronics engineers), la définition du terme FACTS est la suivante : système de transmission en courant alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Avec leurs aptitudes de modifier les caractéristiques des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS ne peuvent pas augmenter la capacité

thermique des lignes de transport. En revanche, ils permettent d'utiliser les lignes au plus proches de leurs limites en repoussant d'autres limitations, en particulier celles liées à la stabilité.

Finalement, il faut noter que les FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes, Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant. [45]

Exploitation d'un réseau électrique

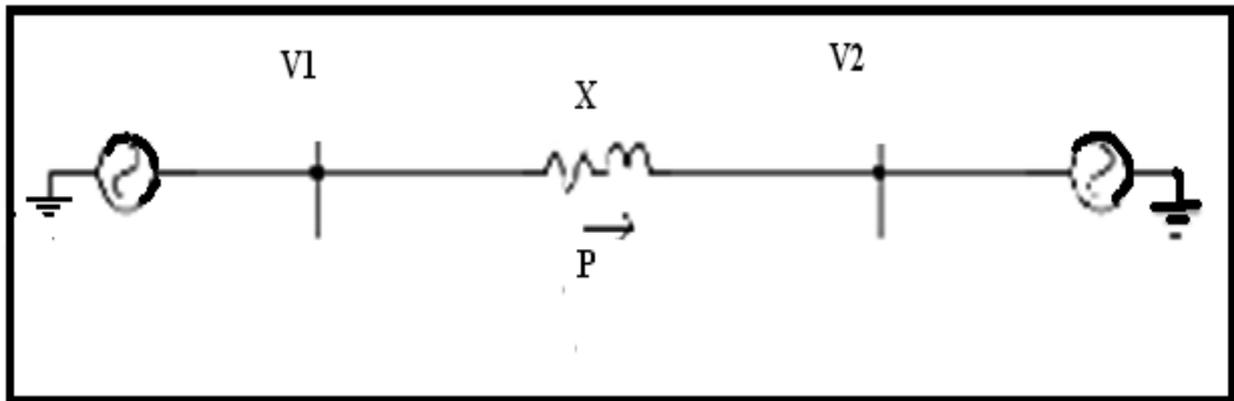


Fig.III.7 Puissance transmise entre deux réseaux

La puissance active P transmise entre deux réseaux de tensions V_1 et V_2 présentant un angle de transport δ (déphasage entre V_1 et V_2) et connectées par une liaison d'impédance X est donnée par l'équation suivante

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \sin \delta$$

Cette équation montre qu'il est possible d'augmenter la puissance active transmise entre deux réseaux :

- Soit en maintenant la tension des systèmes
- Soit en augmentant l'angle de transport (entre 0° et 90°)

Mais pour des raisons de stabilité de fonctionnement des alternateurs les angles de transport sont généralement limités à des valeurs de l'ordre de 30° à 40° .

- Soit en réduisant artificiellement l'impédance de liaison.

En modifiant un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de la puissance réactive, une optimisation des transits de la puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique de réseau.

Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charge et de contrôler les fluctuations de tension créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements. [27][38][46]

III.2.2 Rôle des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS disposent de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimé, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique. Ils permettent en particulier :

- D'accroître la réserve de stabilité transitoire
- D'amortir les oscillations de puissance
- De supporter de manière dynamique la tension.

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo synchrone. [45]

III.2.3 classification des dispositifs FACTS

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés.

- 1- La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
- 2- La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
- 3- Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Dans notre proposition, une autre classification des contrôleurs FACTS basée sur les cinq caractéristiques indépendantes.

1. Selon le type de Raccordement sur le réseau (Connexion)
2. Selon le mode de Commutation
3. Selon la Fréquences de Commutation
4. Selon le mode de Stockage d'énergie
5. Selon le mode de Connexion au Port DC.

Selon ces critères, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence :

- Les dispositifs shunts connectés en parallèle dans les postes du réseau
- Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport
- Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages. [27]

Dans ce chapitre, nous essayons de présenter les FACTS les plus utilisées appartenant à chaque catégorie.

III.2.3.1 Dispositifs FACTS shunt

Les compensateurs parallèles sont utilisés depuis longtemps dans les réseaux électriques principalement pour contrôler les tensions aux niveaux désirés lorsque les conditions du système changent. Des réactances fixes ou mécaniquement commutées sont appliquées pour réduire au minimum les surtensions du système dans des conditions de faible charge et des condensateurs shunt fixes ou mécaniquement commutés sont appliqués afin de maintenir des niveaux de tension dans des conditions de forte charge. Dans les deux cas, les compensateurs shunts produisent une impédance réactive shunt, variable qui est ajustée en fonction des conditions du réseau de transport. Parmi les dispositifs shunts on peut citer

1) Compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator)

Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) (acronyme anglais de Static Var Compensator SVC) est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau. Le SVC permet entre autre la connexion des charges éloignées des centres de production et la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de charges.

Selon l'IEEE il est défini comme un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive, shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds.

Le SVC est le premier dispositif FACTS qui apparaît dans les années 1970 pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles les laminoirs et les fours à arc. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage. [27][45]

Structure

Le SVC est constitué par l'association des dispositifs TCR (Thyristor controlled Reactor), TSC (Thyristor Switched Capacitor), banes de capacités fixe et filtre d'harmonique, représenté sur la figure III.8. [47]

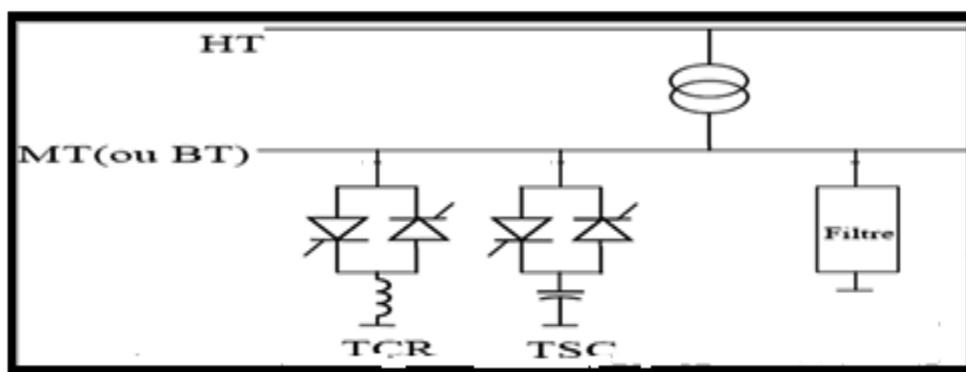


Fig.III.8 Schéma de base d'un SVC

Caractéristique

Si le SVC fonctionne en réglage de tension, le système de contrôle ajuste le courant dans le SVC de façon à ce que courant et tension suivent la courbe caractéristique présentée par la figure III.9.

La courbe caractéristique est une droite dont la pente et la tension de référence peuvent être ajustées par le système de contrôle.

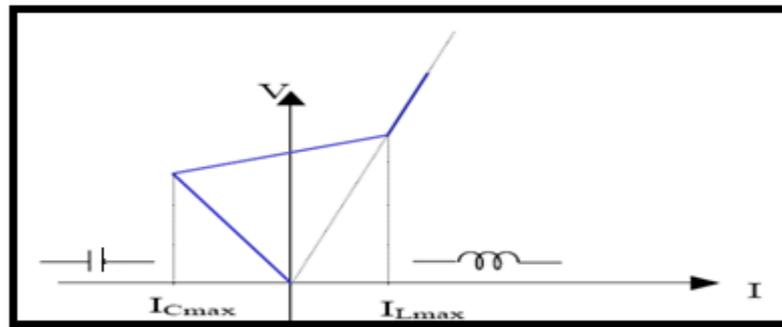


Fig. III.9 Caractéristique d'un SVC

Trois zones de caractéristique sont distinctes :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau
 - Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et TSC
 - Une zone où le TCR donne son énergie maximale et les condensateurs sont déconnectés.
- [47]

2) Compensateur statique synchrone (STATCOM)

Le STATCOM (Statique Synchronous Compensator), autrefois appelé compensateur statique de puissance réactive avancé, est également désigné par les acronymes SSC et STATCOM (Static Condenser).

Selon l'IEEE le STATCOM est défini comme un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de la tension du réseau.

Le STATCOM correspond à l'équivalent statique exact de la machine synchrone classique fonctionnant en compensateur, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue de tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance. [45][27][47]

Structure

Le STATCOM est basé sur la structure d'un convertisseur de tension triphasé. Il est constitué d'un convertisseur alternatif-continu à commutation forcée, raccordé côté continu à un élément de stockage d'énergie, analogue à une machine synchrone qui engendre une ensemble équilibré de trois tension sinusoïdales, à la fréquence fondamentale, avec des amplitudes et des angles de phase réglables à travers un transformateur de couplage, Figure III.10. [27][47][46]

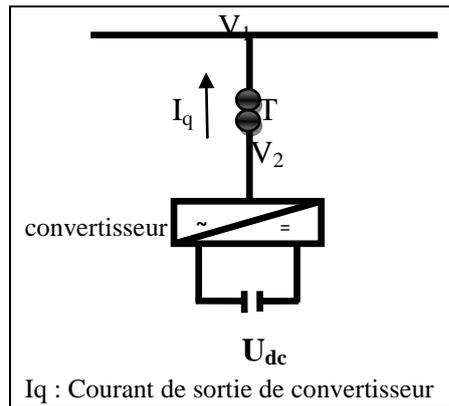


Fig.III.10 Structure de base d'un STATCOM

Caractéristique

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie V_2 de l'onduleur, laquelle est en phase avec la tension V_1 du réseau. Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

$V_1 < V_2$ le courant circule du convertisseur vers le réseau

Le STATCOM produit alors de la puissance réactive (comportement capacitif).

$V_1 > V_2$ le courant circule du réseau vers le convertisseur

Le STATCOM consomme alors de la puissance réactive (comportement inductif).

$V_1 = V_2$ aucun courant ne circule entre le convertisseur et le réseau ; (aucun échange d'énergie réactive).

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance.

III.2.3.2 Dispositifs FACTS séries

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif dans les longues lignes. Pour remédier à ce problème, la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne. Les dispositifs FACTS de compensation série sont des évolutions des condensateurs série fixes. [45]

Le principe de fonctionnement de ces systèmes de compensation s'appuie sur l'insertion à la ligne d'une tension capacitive qui compense la chute de tension inductive.

L'intérêt essentiel de ces dispositifs réside, principalement dans :

- La régulation de la tension en régime permanent et la compensation des chutes de tension
- L'amélioration de la stabilité de l'angle de rotation transitoire
- Le contrôle du flux d'énergie.

Les différents types de compensations séries utilisés aujourd'hui sont

1) Compensateurs séries à base de thyristor

Les plus connus sont

1.1) TCSC (Thyristor Controlled Série Capacitor)

Le TCSC utilise des condensateurs à valeurs fixes placés en parallèle à des inductances contrôlées par un variateur de courant à thyristors. Ces compensateurs sont aussi appelés (ASC) (Advanced Série Compensators). [48]

IEEE définit le TCSC comme étant un compensateur à réactance capacitive qui consiste en une série de condensateurs et en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive. [45]

Structure

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur.

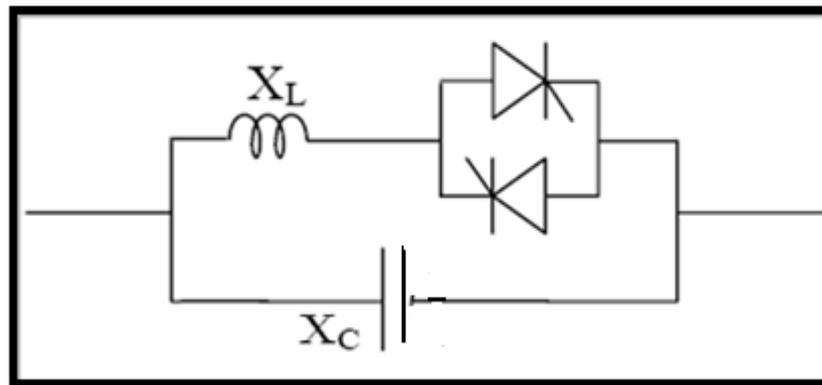


Fig.III.11 Structure de TCSC [47]

1.2) TSSC (Thyristor Switched Série Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° . [47]

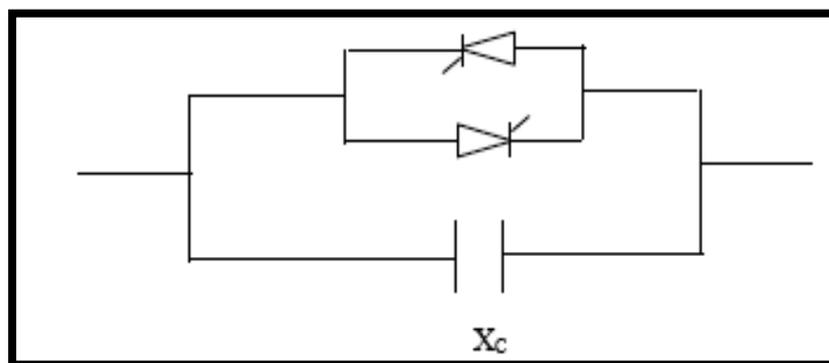


Fig.III.12 Structure de TSSC [27]

IEEE définit le TSSC comme un compensateur capacitif qui se compose de plusieurs condensateurs en série. Chaque condensateur commandé par un commutateur de thyristor qui assure une compensation par palier.

Le TSSC est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. [45]

1.3) TCSR (Thyristor controlled Série Reactor)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive Série variable.

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180° , il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable x_1 agit comme un limiteur de courant de défaut.

Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180° , la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90° ou elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

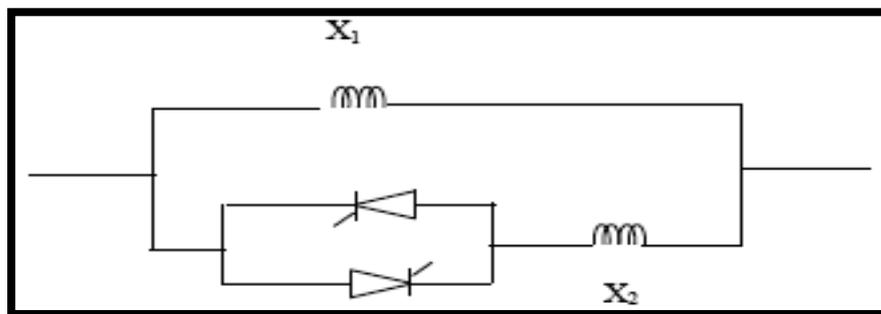


Fig.III.13 Structure du TCSR [34]

2) Condensateurs séries à base de GTO thyristor

2.1) SSSC (Static Synchronous Série Compensator)

Ce type de compensateur série (compensateur synchrone statique série) est le plus important dispositif de cette famille. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport.

L'IEEE définit le SSSC comme étant un générateur synchrone statique fonctionnant sans source d'énergie électrique extérieure comme les compensateurs série, dont la tension de sortie est contrôlable indépendamment du courant de ligne afin d'augmenter ou de diminuer la chute de tension globale, et ainsi de contrôler la puissance électrique transmise. [27][49]

Structure et fonctionnement

Le SSSC est formé d'un convertisseur de tension inséré en série dans la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur.

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Une source d'énergie est nécessaire pour maintenir la tension continue aux bornes du condensateur et pour compenser les pertes du convertisseur. [47][45]

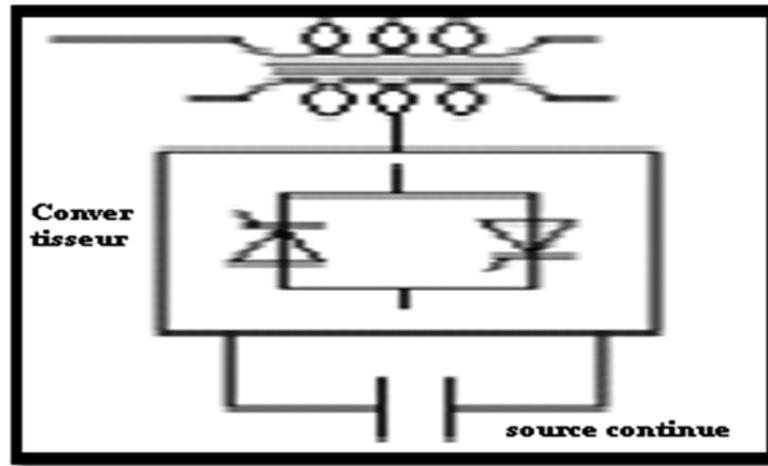


Fig.III.14 Structure de SSSC

Caractéristique

L'avantage de ce compensateur est de ne peut introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonction. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau.

Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension V n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de ligne. [47]

Application d'un SSSC

Les principales applications d'un SSSC sont :

- Commande dynamique du flux d'énergie et de la tension
- Amélioration de la stabilité de l'angle de charge
- Atténuation des oscillations électromécaniques
- Injection de tensions capacitatives ou inductives dans la ligne. [49]

2.2) DVR (Dynamique Voltage Restorer)

Lorsque le dispositif de compensation inséré en série est construit à base d'éléments passifs commutés, son action est de modifier l'impédance des lignes. Le DVR est basé sur un onduleur, la tension qui est injectée en série sur la ligne pourra immuniser la charge des perturbations de type harmonique de tension, creux de tension.... Plus la compensation sera importante et plus le stockage de l'énergie dans la partie continue de convertisseur devra être élevé. Dans certain cas, si l'on souhaite pouvoir injecter de la puissance active, l'utilisation d'un système d'alimentation auxiliaire au niveau de la tension du bus continu devra être envisagée.

Structure

La figure III.15 représente les principaux éléments constituant un DVR. Il est composé d'un onduleur de tension triphasé contrôlé par une commande MLI et alimenté par une source de tension continue. Ce système est couplé au réseau à travers un filtre de tension de deuxième ordre et un transformateur de couplage dont le secondaire est inséré en série au réseau qui alimente la charge électrique à protéger.

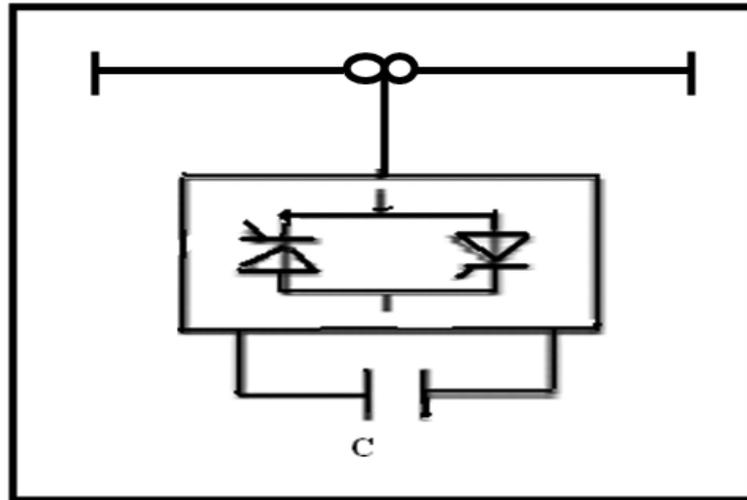


Fig.III.15 présentation d'un DVR

Principe de fonctionnement

Le DVR permet d'injecter, en série au réseau, une tension fidèlement opposée à la perturbation enregistrée dans ce dernier. La détection, l'identification et la génération de cette tension est obtenue grâce à un dispositif de détection associé à une commande pilotant l'onduleur qui reproduit la perturbation à compenser.

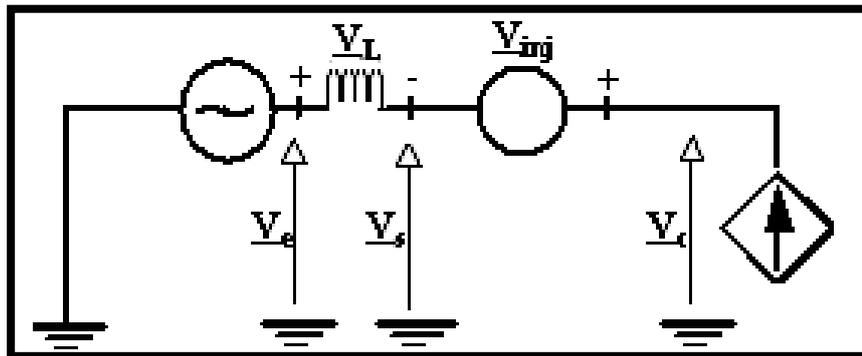


Fig.III.16 Schéma unifilaire d'un DVR

Le fonctionnement du réseau compensé à l'aide d'un DVR est ainsi caractérisé par l'équation suivante

$$\overline{V}_c = \overline{V}_s + \overline{V}_{inj}$$

Où : \overline{V}_c , \overline{V}_s et \overline{V}_{inj} représentent respectivement la tension aux bornes de la PDE, la tension du réseau et la tension injectée par le DVR. [50]

III.2.3.3 Dispositifs FACTS combinés série-parallèle (hybride)

Les dispositifs FACTS cités précédemment (Série ou Parallèle), permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunt et série), il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées. [49][27]

1) UPFC (Unified Power Flow Controller)

Le contrôleur de transit de puissance unifié a été proposé par Laszla Gyugyi en 1990. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique :

- la tension
- l'impédance de la ligne
- le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

En effet, l'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de ligne.

En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance. [49]

D'après l'IEEE l'UPFC étant une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplés via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM. [45]

Structure

L'UPFC consiste en deux sources synchrones couplées au réseau à l'aide de deux transformateurs respectivement en dérivation et en série liés entre eux par un redresseur et un onduleur ayant en commun le circuit continu constitué d'une capacité de stockage, (voir figure III.17).

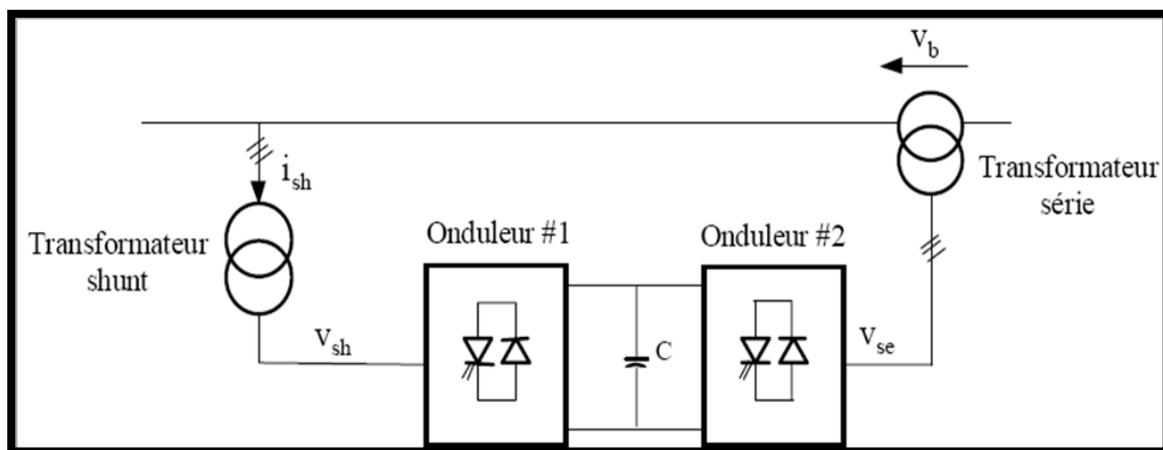


Fig.III.17 contrôleur universel de puissance UPFC [27]

Il pourra alterner différentes fonctions : par exemple ; la fonction Shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que la partie série pourra être utilisée afin d'amortir les oscillations de puissances. [47]

2) IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC est formé de plusieurs SSSC, chacun d'eux fournissant une compensation Série à une ligne différente. En d'autre terme l'IPFC sous sa forme générale utilise des convertisseurs DC/DC placé en série avec la ligne à compenser.

L'IPFC permet de transférer de la puissance active entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissances active et réactive sur les lignes ou pour décharger vers une autre moins chargée. Les tensions injectées possèdent une composante en quadrature et une composante en phase avec les courants respectifs des lignes. [27][47]

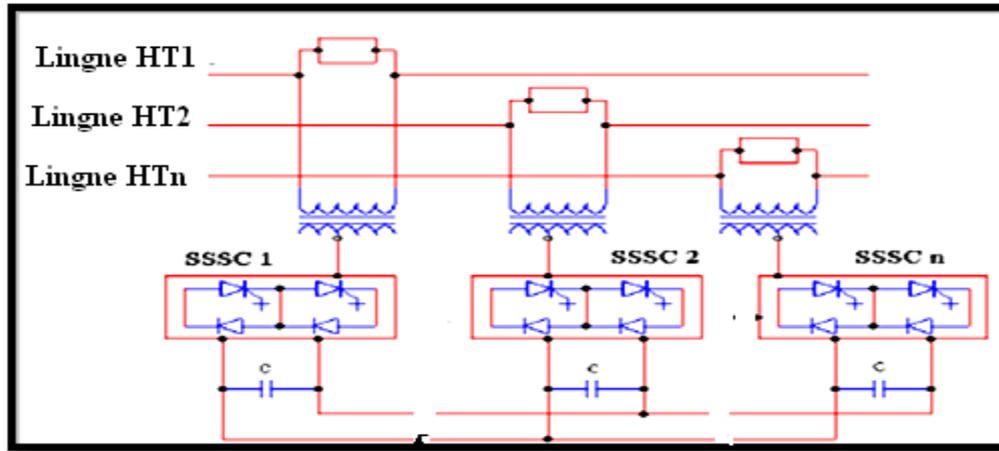


Fig.III.18 Schéma d'IPFC

III.2.3.4 Transformateur déphaseur (PST)

C'est un transformateur de régulation de l'angle de déphasage (ou angle de charge) entre les potentiels de deux nœuds liés par une ligne dans laquelle il est inséré.

Il permet d'introduire une tension d'amplitude réglable rapidement par gradins en quadrature avec la tension de réseau. Cette tension est obtenue par alimentation du transformateur-décaleur à l'aide de la tension composée entre deux phases. (figure.III.19)

Le déphasage désiré s'obtient par l'extraction d'une tension ligne-terre sur une phase et en injectant une partie de celle-ci en série dans une autre phase.

Les transformateurs déphaseurs ont un rôle analogue aux FACTS ; contrôler les transits d'énergies dans un réseau électrique. Il s'agit de transformateur assez classiques, dont le rapport de transformation est voisin de 1, mais dont les tensions d'entrée et de sortie sont déphasées d'un angle en général réglable. Le contrôle de cet angle permet de modifier le transit de puissance.

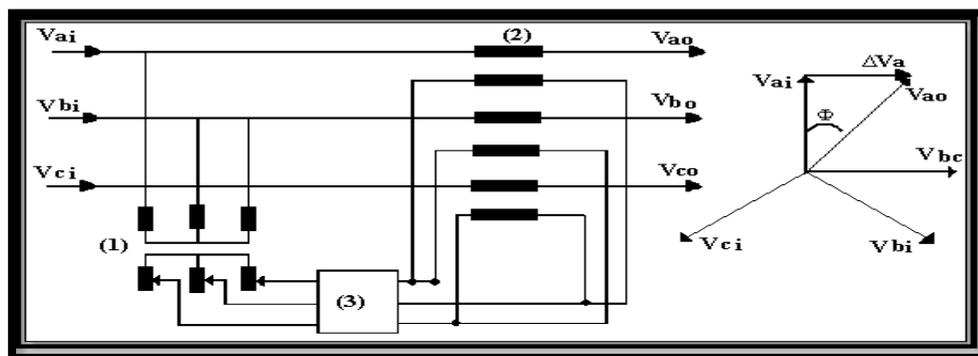


Fig.III.19 Schéma de principe d'un déphaseur [47]

- (1) transformateur de magnétisation
- (2) transformateur série
- (3) réseau de commutation

V_a tension à travers le transformateur série ; V_{ai}, V_{bi}, V_{ci} : tensions ligne-terre ;

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} : tensions ligne-terre ; Φ : déphasage.

III.2.4 Synthèse

Les différents dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre ont tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis.

Le tableau III.1 synthétise les domaines d'application de différentes technologies de FACTS. [27][45][49]

Dispositifs	Contrôle de charge	Contrôle de tension	Stabilité transitoire	Amplitude des oscillations
SVC	+	+++	+	++
STATCOM	+	+++	+	++
TCSC	++	+	+++	++
SSSC	+++	+	+++	++
UPFC	+++	+++	+++	+++
IPFC	+++	+	+++	++
PST	+++	+++	+	+

Tab III.1 Synthèse des domaines d'application de différentes technologies de FACTS

Conclusion

La stabilité de la tension est un aspect de la stabilité et de sécurité des grands réseaux d'énergie électrique.

Dans ce chapitre nous avons en premier lieu présenté les filtres et leurs différents types (passifs et actifs). Nous avons après définis les filtres actifs existants ainsi que la combinaison hybride (actifs - passifs) et en suite entrepris une étude détaillée sur les dispositifs à base d'électronique de puissance (leurs définitions, classification,...) et leur influence sur les réseaux électriques dans le but d'amélioration du transit de puissance.

CHAPITRE IV

Simulation

et

Interprétation des résultats

CHAPITRE IV Simulation et interprétation des résultats

Introduction

Le but de ce chapitre est de simuler à l'aide du logiciel MATLAB-Sim Power System, l'influence de l'insertion d'un DVR sur les perturbations de la tension d'un réseau électrique sur une charge sensible.

Les simulations effectuées sont établies comme suit:

- Application d'une perturbation de tension (creux de tension, surtension) au niveau de la source et identification de leurs influences sur une charge sensible.
- insertion d'un DVR en amont de la charge sensible, pour visualiser l'atténuation des perturbations injectées à la source (creux de la tension, surtension).

IV.1. présentation du réseau à simuler

Dans notre cas de simulation, nous utilisons un réseau triphasé classique composé d'une source triphasée sinusoïdale variable en amplitude, en phase et en fréquence. Nous nous sommes intéressés à une variation en amplitude pour créer la perturbation (un creux de tension et une surtension) de + ou - 15% de la tension la tension nominale (30 kV) pour une durée de 0.1s c'est-à-dire 5 périodes à une fréquence de 50Hz. Le réseau est constitué de 3 lignes triphasées raccordées auxquelles sont raccordées des charges triphasées.

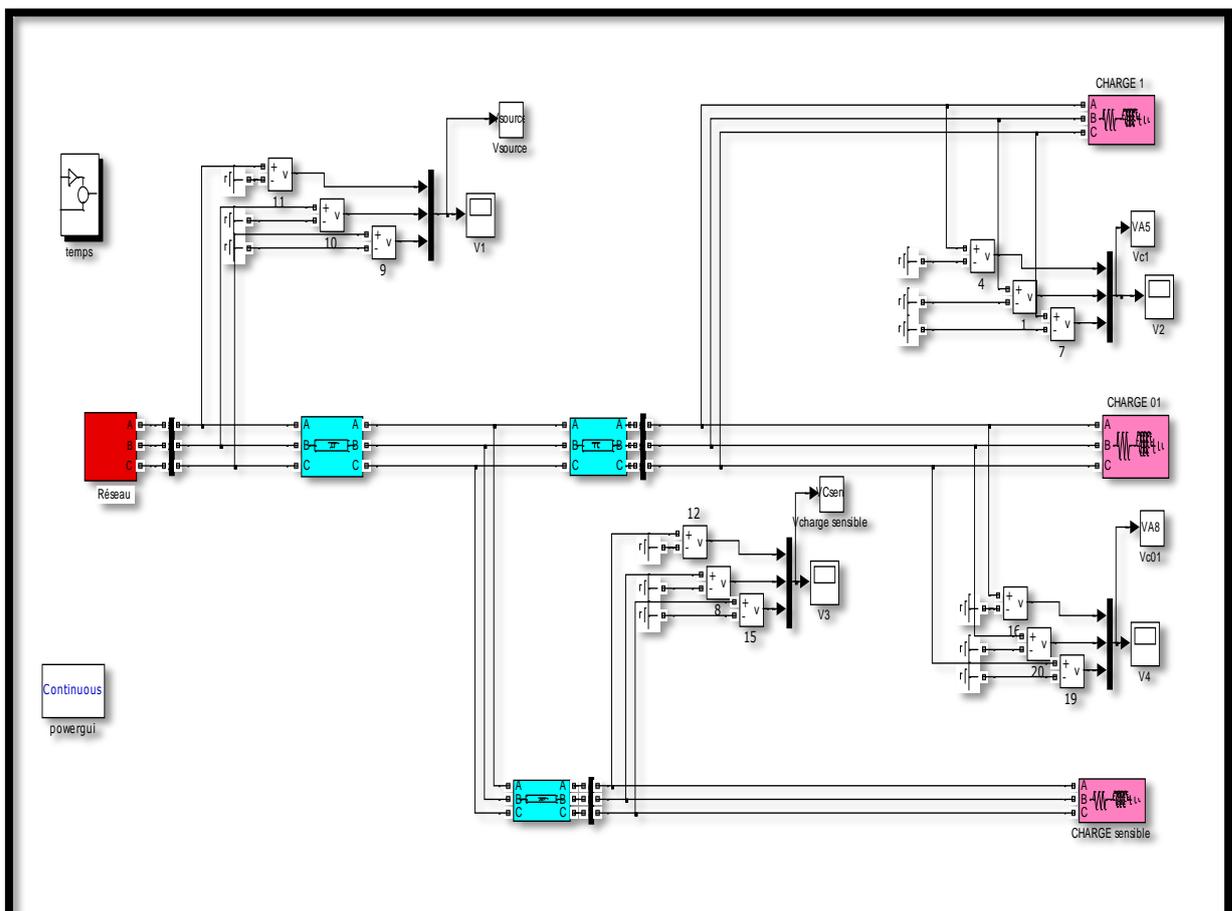


Fig. IV.1 Schéma bloc d'un réseau simple soumis à une perturbation de tension

CHAPITRE IV Simulation et interprétation des résultats

IV.2. représentation et principe de fonctionnement de DVR

Dans le cadre d'atténuation de perturbations étudié précédemment on insère un DVR en amont de la charge sensible comme indiquée à la figure IV.2.

On s'intéresse au DVR commandé en courant car il permet d'injecter en série une tension commandable en amplitude et en phase, pour compenser toutes sortes de perturbations de tension du réseau.

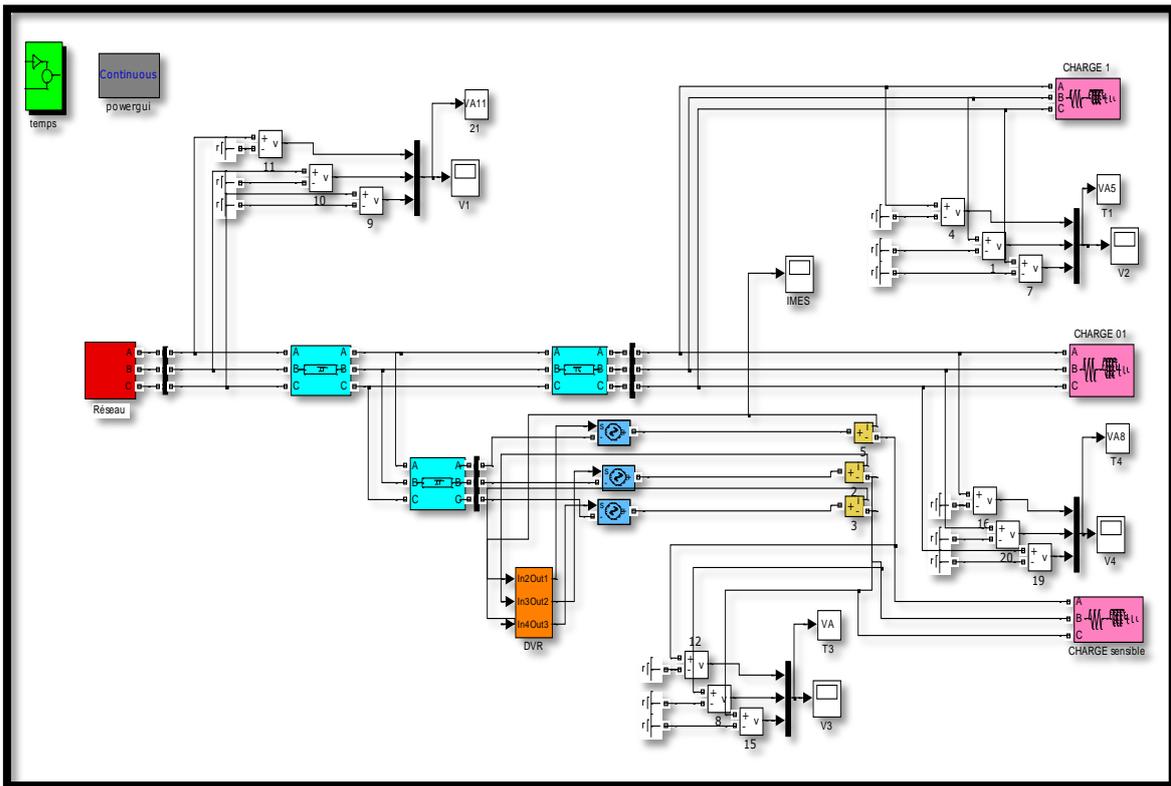


Fig.IV.2 Schéma bloc d'un réseau en présence d'un DVR

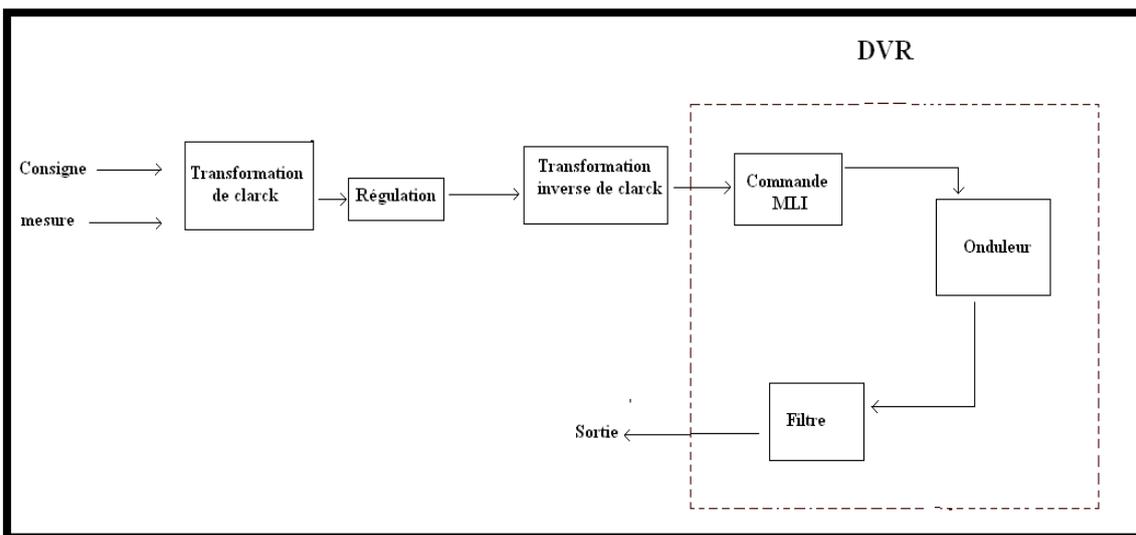


Fig.IV.3 Schéma bloc du DVR

Principe de fonctionnement

On injecte des courant mesurés de la charge sensible qui vont être transformées en I_α et I_β à l'aide de la transformée de Clarke.

$$[I_{1,2,3}] = [T]^{-1} * [I_{\alpha,\beta,0}]$$

Avec

$$[T] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T]^{-1} = [T]^t = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} (I_1 - \frac{1}{2}(I_2 + I_3))$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_2 - I_3)$$

$$I_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_1 + I_2 + I_3)$$

Les valeurs calculées de I_α et I_β vont être comparées à une valeur de consigne calculée à partir des paramètres de la charge sensible (transformé a l'aide de la transformé de Clarck). La valeur résultante (passée par une transformé inverse de Clarck) nous permet d'avoir une modulatrice à transmettre à une commande MLI pour avoir des courants qui générés par un onduleur qui nous fournit une tension filtrée par un filtre LC. La tension à la sortie du DVR est nulle s'il n'y a pas de perturbation car le courant mesuré est égal au courant de la consigne en phase et en amplitude. A l'instant de défaut, les variations subies par les courants mesurés amèneront le DVR à produire une tension adéquate en amplitude et en phase pour compenser la perturbation et garder la tension invariable au niveau de la charge sensible.

VI.3. surtension au niveau de la source

1. sans DVR

Une surtension triphasée est introduite pendant 5 périodes au niveau de la source. L'allure de la tension triphasé est représenté en figure IV.4.

CHAPITRE IV Simulation et interprétation des résultats

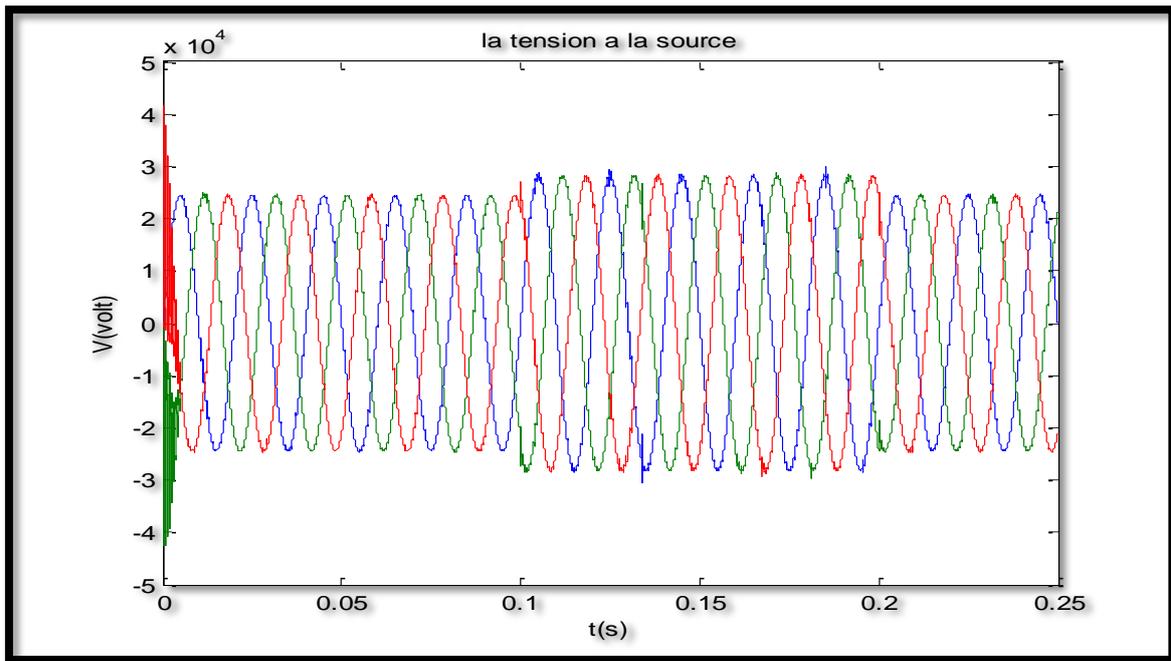


Fig.IV.4 Tension à la source avec une surtension de 15% entre 0.1 et 0.2 s

Nous avons relevé aussi la tension aux bornes de la charge sensible et nous voyons bien que la perturbation est intégralement transmise à la charge sensible malgré la longueur de la ligne (Fig. IV.5). Ce qui justifie la nécessité de l'insertion du dispositif permettant la compensation de cette perturbation.

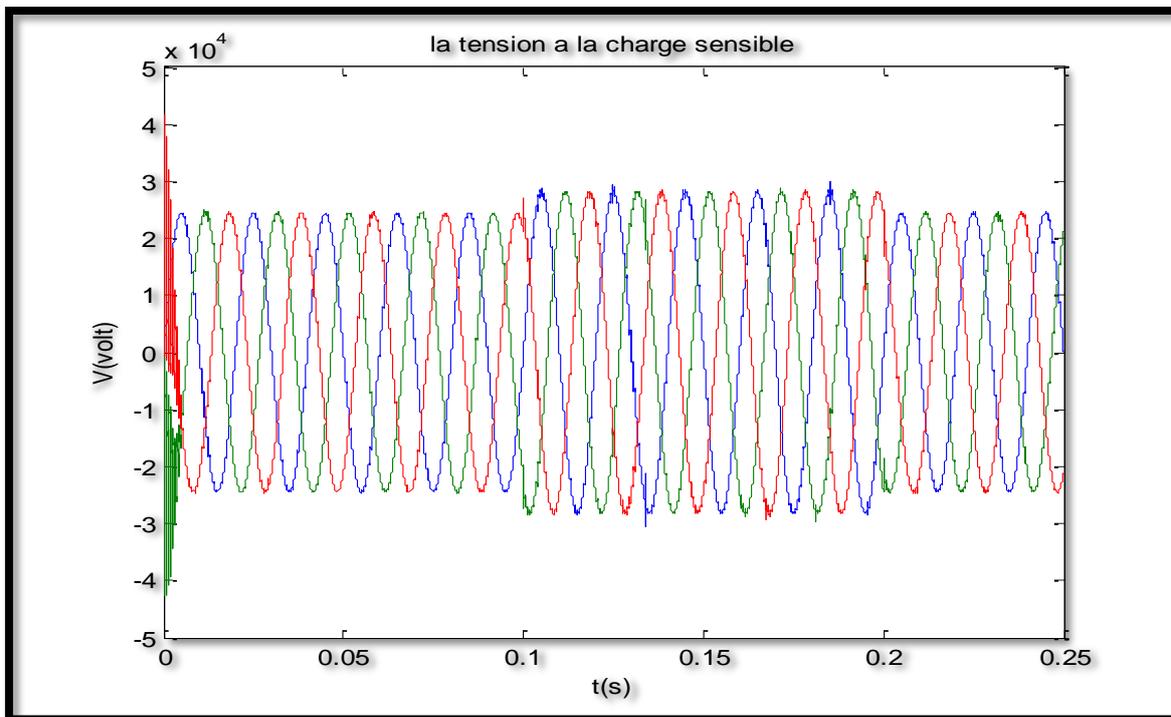


Fig.IV.5 Perturbation de la tension aux bornes de la charge sensible ($t=0.1$ s à $t=0.2$ s)

CHAPITRE IV Simulation et interprétation des résultats

2. Insertion du DVR

Après avoir inséré le dispositif DVR, nous avons refait la simulation du système tout en maintenant la surtension de 15% au niveau de la tension de la source. La tension de la source est représenté en figure IV.6

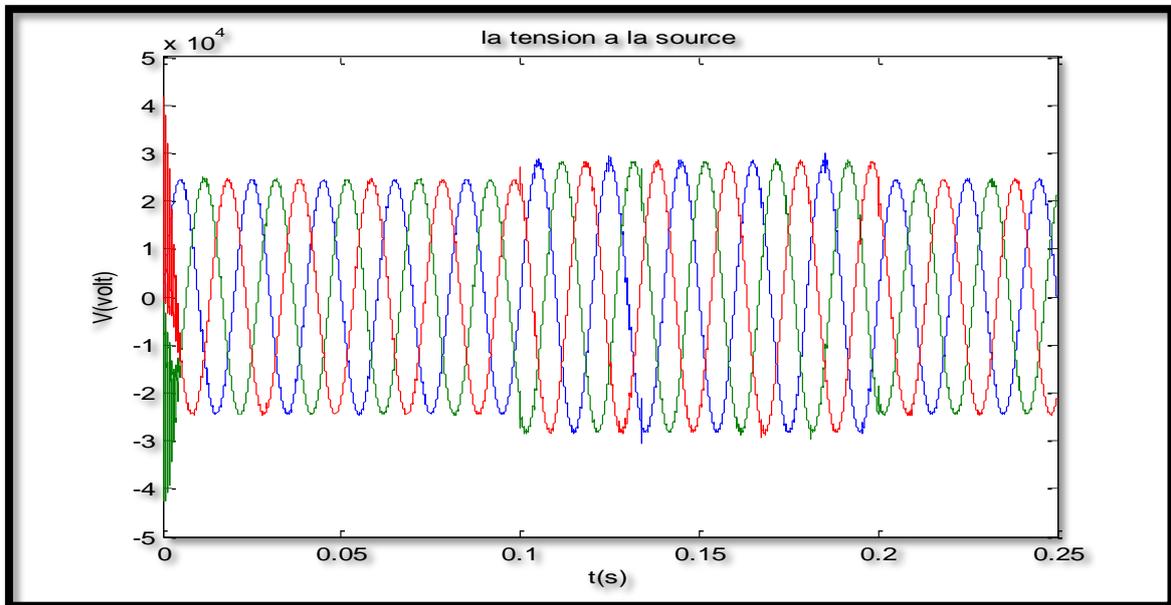


Fig.IV.6 Tension perturbée délivrée par la source en présence du DVR

On s'aperçoit bien que la tension aux bornes de la charge sensible est parfaitement stable, et que la surtension produite par la source ne pourra plus l'affecter (Fig. IV 7)

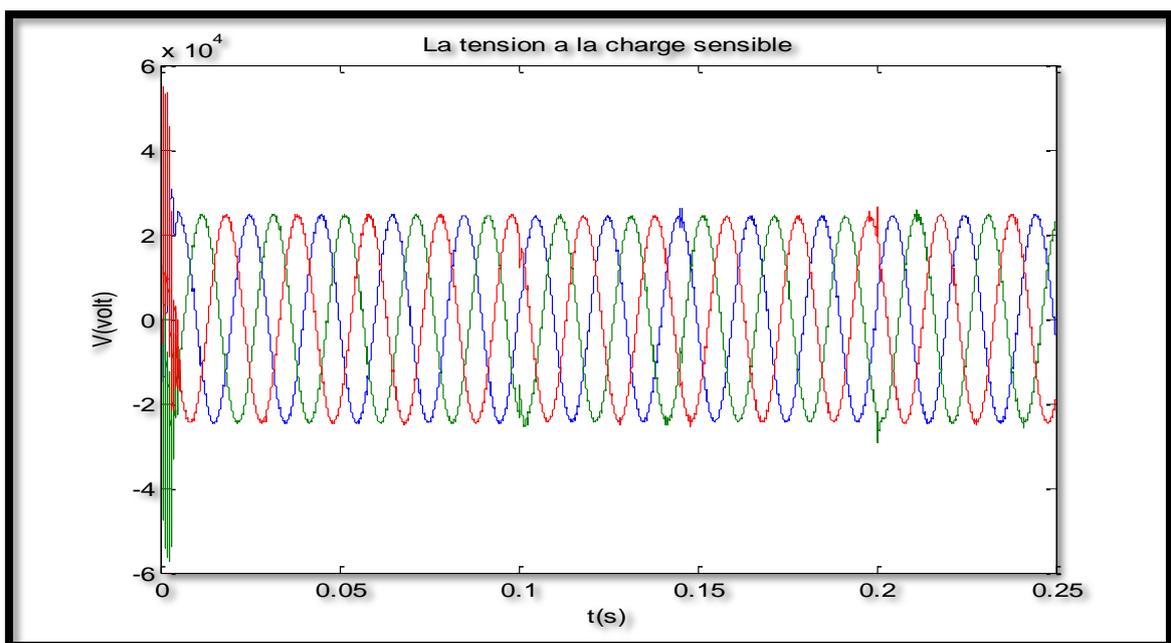


Fig.IV.7 Tension aux bornes de la charge sensible malgré la surtension du réseau

CHAPITRE IV Simulation et interprétation des résultats

On peut conclure que le DVR réagit bien et permet donc de protéger avec efficacité toute charge sensible ne supportant pas les surtensions qui pourront survenir accidentellement dans le réseau de distribution.

VI.4. Creux de tension au niveau de la source

Pour évaluer la réaction du DVR dans un autre sens, nous avons introduit un autre sens de la perturbation en créant un creux de tension sur le même réseau. Un creux de 15% pendant la même durée que pour la surtension est envisagé. Cela se traduit par la programmation de la tension de source avec les caractéristiques suivantes:

Les valeurs de tension en PU [1 0.85 1 1] en fonction de temps jusqu'aux 0.25s [0 0.1 0.2 0.25] d'où on aura un creux de tension entre 0.1 et 0.2s. On a enlevées les courbes suivantes :

1. Sans DVR

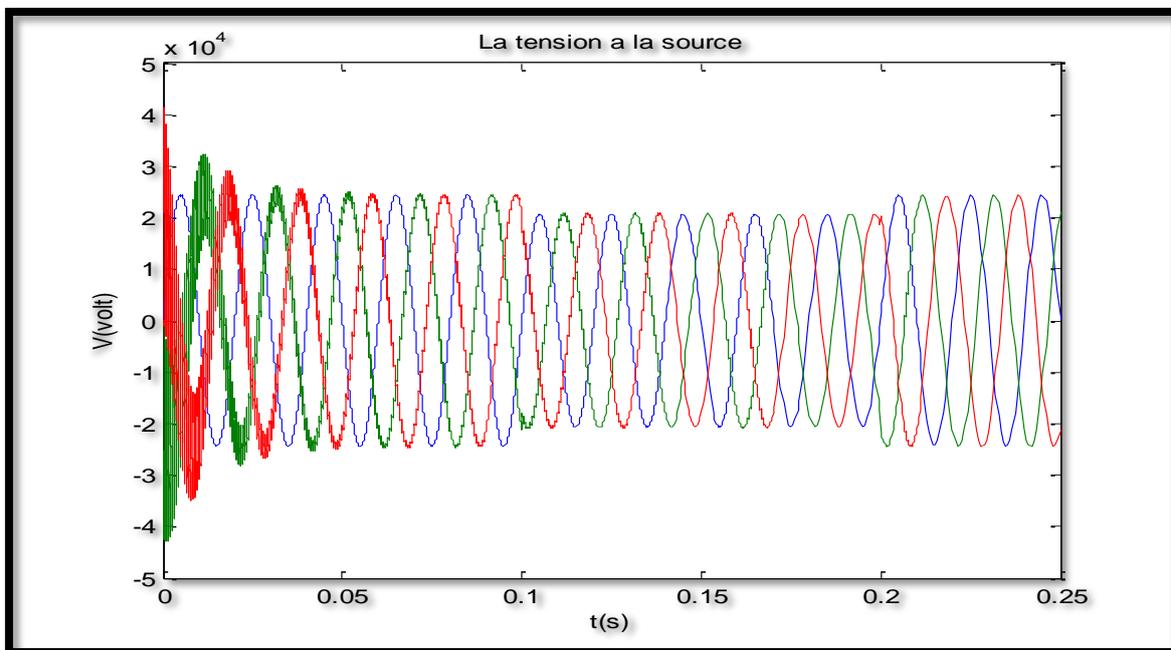


Fig.IV.8 La tension a la source avec un creux de tension de 15% entre 0.1 et 0.2 s

Le creux de tension comme prévu se répercute intégralement sur la tension de la charge sensible (Fig. IV.9).

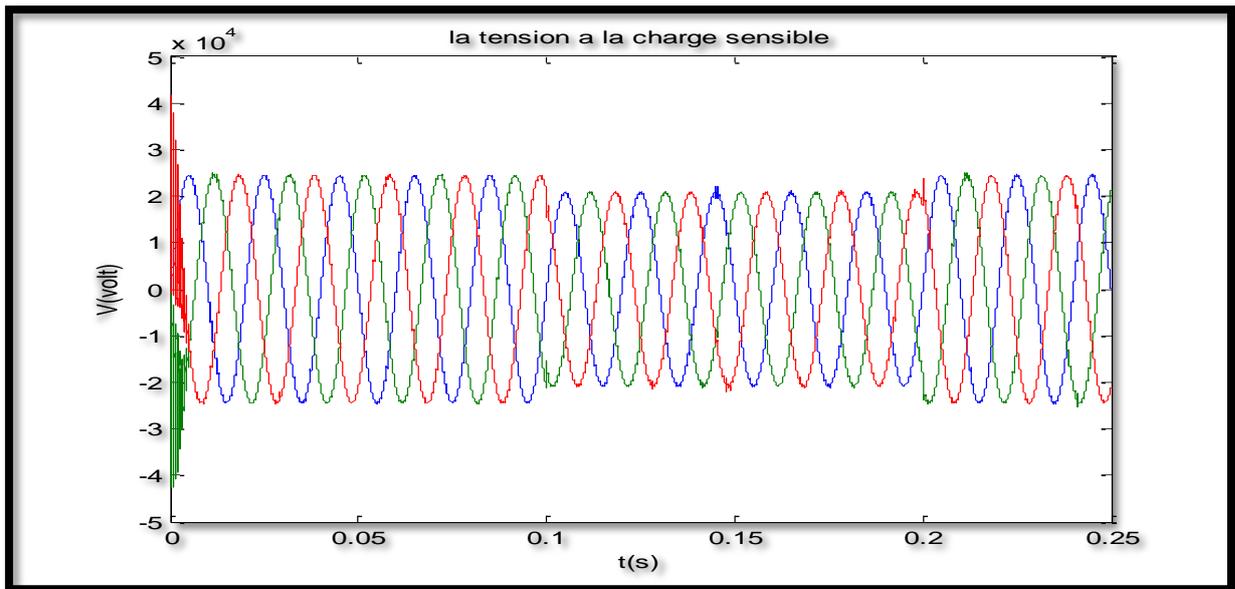


Fig.IV.9 Creux de tension de 15% aux bornes de la charge sensible entre 0.1 et 0.2 s

2. Insertion du DVR

Le DVR est introduit dans le réseau afin de vérifier sa réaction lors du creux de tension. La tension de la source présente comme précédemment la perturbation (Fig. IV.10).

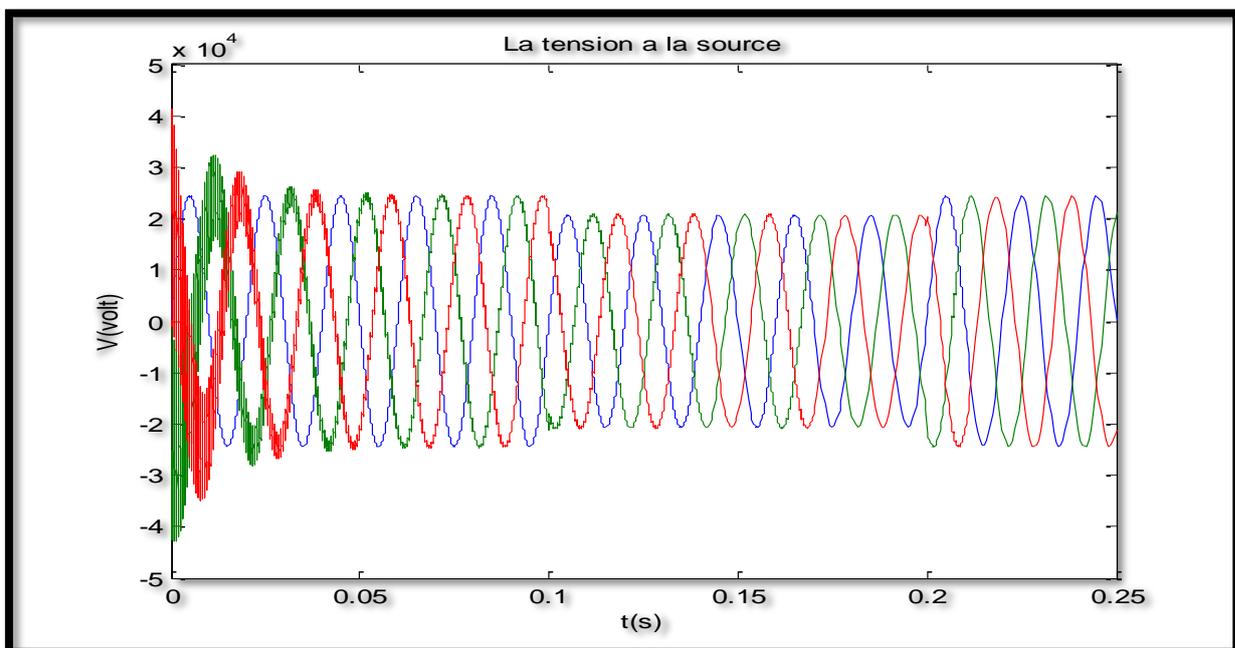


Fig.IV.10 Tension délivrée par la source avec creux de 15% en présence du DVR

Contrairement à la tension obtenue précédemment, avant l'insertion du DVR, le creux de tension n'apparaît pas dans la tension aux bornes de la charge sensible (Fig.IV.11)

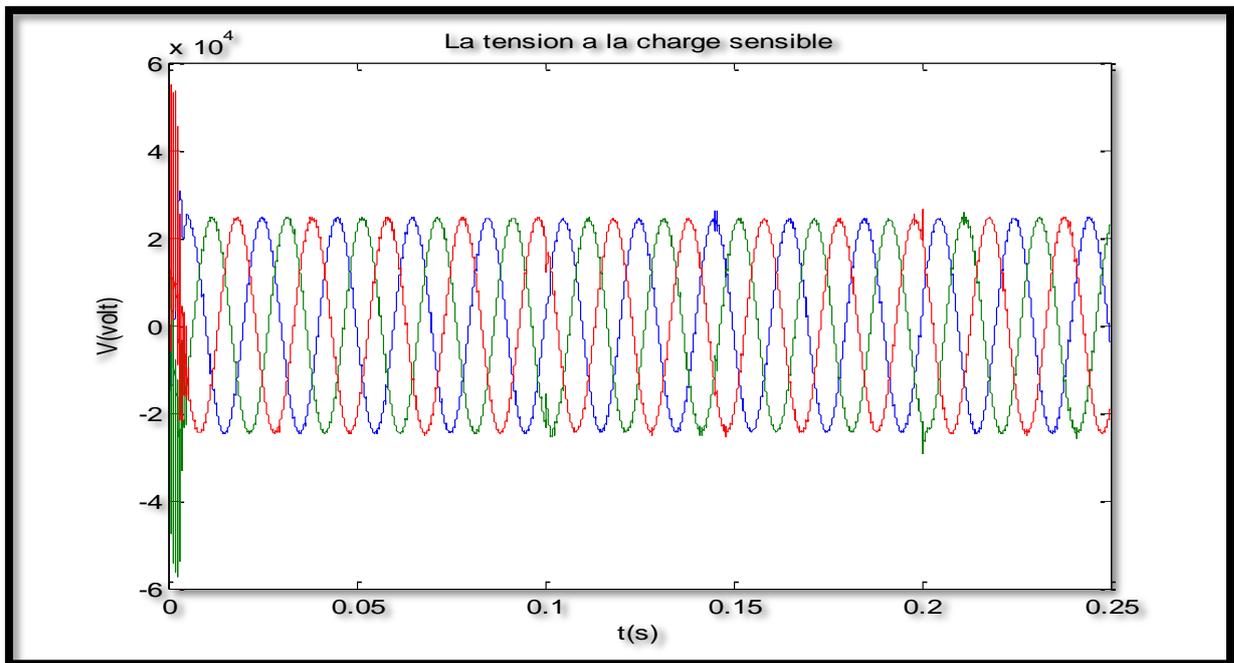


Fig.IV.11 Tension aux bornes de la charge sensible grâce à la présence du DVR

La figure IV.11 montre bien l'action du DVR qui a réussi à maintenir la tension invariable aux bornes de la charge sensible malgré la présence d'un creux de tension de 15% de la tension nominale au niveau de la source. Ce creux se propage sur toutes les autres charges du réseau sauf celle pour laquelle un DVR a été inséré.

VI.5. Interprétation des résultats

Pour les différents cas de perturbations imposées au réseau que nous avons simulé, représentés précédemment par des schémas de montage de chaque type, nous avons analysé les tensions tant à la source qu'au niveau de la charge sensible et cela en l'absence et en présence du DVR.

1. Cas d'une perturbation sans insertion d'un DVR

Dans le cas d'une perturbation de tension dans notre étude une surtension et un creux de tension, il est sorti clairement des résultats de simulation que la perturbation se propage intégralement sur toutes les charges présentes dans le réseau

2. Cas d'une perturbation en présence du DVR

L'implantation d'un DVR en amont d'une charge sensible à protéger a pour but la stabilisation de la tension et en compensant toute sorte de perturbation de tension pouvant nuire à la charge.

CHAPITRE IV Simulation et interprétation des résultats

Les résultats de simulation ont montré la réaction positive du DVR qui arrive à maintenir la tension invariable aux bornes de la charge sensible et ce qu'il s'agisse d'un creux ou d'une surtension. Le DVR arrive à agir dans les deux sens, c'est-à-dire remonter le niveau de tension s'il diminue et inversement.

Il est intéressant de noter la rapidité de la réaction du DVR, puisque sa réaction est quasi-instantanée.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude de la stabilité de tension pour un réseau triphasé. Celle-ci consiste à évaluer la limite de stabilité et à étudier l'influence d'un DVR sur une charge sensible.

Il est apparu, d'après les résultats obtenus que:

- une perturbation de tension au niveau de la source influe sur la tension absorbée par la charge
- le DVR permet de régler la tension en amont d'une charge sensible.
- Le réglage est réussi tant pour une augmentation que pour une diminution de la tension
- Le DVR possède une bonne dynamique qui lui permet une correction rapide.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude de la qualité d'énergie électrique et ses dégradations ainsi que l'étude des dispositifs d'électronique de puissance tels les FACTS est un sujet très important. Depuis plus de dix ans plusieurs travaux sont effectués dans ce sens, nous avons orienté nos travaux vers l'étude de l'influence des éléments FACTS-Série sur les réglages de la tension et son maintien dans un réseau perturbé.

Par cette étude nous pensons avoir cerné théoriquement les perturbations dans un système électrique (creux de tension, chute de tension, les harmoniques ...etc.), ainsi que les dispositifs d'atténuation des perturbations (Filtres passifs et actifs et les dispositifs FACTS).

Nous avons montré l'apport des FACTS à l'amélioration de la stabilité de la tension. Les FACTS améliorent le niveau de sécurité des réseaux et sont aussi en mesure de contrôler la forme d'onde des tensions et des courants en agissant comme des filtres actifs. De plus, ils permettent l'amélioration de la stabilité des réseaux en contrôlant rapidement les perturbations, et offrent ainsi la possibilité d'utiliser, à leur pleine capacité, les équipements et les lignes de transport existants.

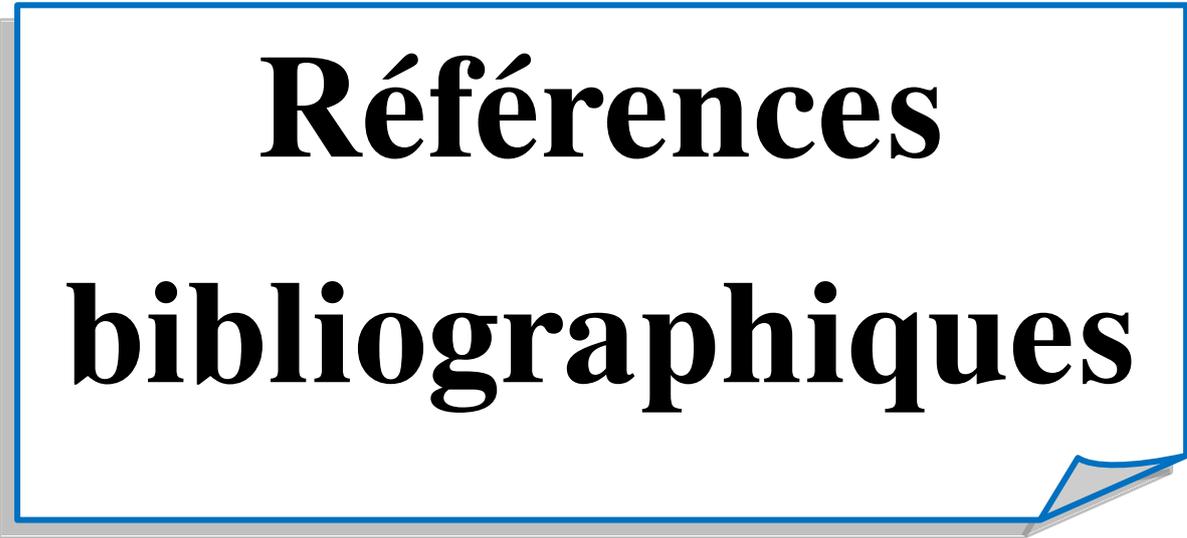
Les travaux de simulations numériques ont porté sur l'influence d'un DVR sur une charge sensible.

La première partie de simulation a été consacrée à l'influence d'une perturbation de la tension sur la tension transitée à la charge dans lequel nous avons noté que toute sorte de perturbation au niveau de la source influe directement et avec la même forme de perturbation et la même ampleur sur la charge.

La deuxième partie a été réservée pour l'étude de l'influence du DVR pour la correction de la tension et l'élimination de la perturbation à la charge sensible. Nous avons remarqué que le DVR permet de réguler la tension automatiquement quelque soit la nature de la perturbation.

Enfin, par ce travail nous avons approché un problème important et d'actualité à savoir, la résolution des problèmes de qualité de tension.

Références bibliographiques



Références bibliographiques

[1] Collection technique. Merlin GERIN, SQUARET

« Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels »

Cahier technique N° 185 - 1997

[2] Guide de conception des réseaux électriques industriels T & D 6 883 427/A

« Les architectures de réseaux »

[3] LE PROGRAMME EUROPEEN « DEXA MCP »

« Dissemination, Extension And Application Of The Motor Challenge Program »

Module Technique : Réseau De Distribution Electrique Industriel. France - 2007

[4] Sihem BOURI

« Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis »

Université Jilali Liabès – Doctorat - 2007

[5] CAIRE R

« Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution »

Thèse de doctorat INP Grenoble - 2004

[6] Theodore Wildi

« L'électrotechnique Wildi » **4^{eme} édition**

[7] Guide de conception des réseaux électriques industriels T & D 6 883 427/A 9

« Stabilité dynamique des réseaux industriels »

[8] Adam MIRECKI

« Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance »

Institut National Polytechnique De Toulouse –Doctorat - 2005

[9] F.BELHADI et T.ABERBOUCHE

« Production d'électricité par énergie renouvelable ».

PFE ingénieur d'état Bejaia-2002

Références bibliographiques

[10] **Octavian ENACHEANU**

« Modélisation fractale des réseaux électriques »;

Université Joseph Fourier, Grenoble - Doctorat - 2008

[11] **Philippe CARRIVE**

« Réseaux de distribution ; Structure et planification »

Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique **D 4 210 ; Grenoble - 1991**

[12] **Émile GAIN**

« Réseaux de distribution ; Conception et dimensionnement »

Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique **D 4 220 - 1993**

[13] **Jean-Claude SABONNADIÈRE et Nouredine HADJSAID**

« Lignes et réseaux électriques 1; ligne d'énergie électrique »

Editeur : Hermès-lavoisier. Volume1 - 2007

[14] **Alain DOULET**

« Réseaux de distribution »

Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique **D 4 200 Version archivée1 – 2010**

[15] **Vanya Ignatova**

« Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique »

L'UJF-Doctorat préparée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble - 2006

[16] « Qualité de la tension/Qualité de l'électricité »,

ATT 00254 - 2008

[17] **Houari BOUDJELLA**

« Contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) »

Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbès - Magister - 2008

Références bibliographiques

[18] Chauvin-Arnoux

« Perturbations BF : la qualité de la tension se mesure ! » **2007**

[19] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet

« Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) »
Techniques de l'ingénieur D 4 315 Version archivée - 2001

[20] Roland CALVAS

« Cahier technique n° 141 « Les perturbations électriques en BT»
Schneider Electric - 2001

[21] Cahier technique n° 199

« La qualité de l'énergie électrique ».

[22] C Haouy

« Démarrage d'un moteur asynchrone » BTS électrotechnique

[23] IREQ

« Méthodes de mesures des caractéristiques et cibles de qualité de tension fournie par le réseau d'Hydro-Québec » **2000**

[24] Vice-Présidence Distribution Direction Plans Et Stratégies D'affaires Orientations Du Réseau

« Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d'Hydro-Québec ».

A Caractéristiques électriques MT et BT - 2001

[25] Philippe FERRACCI

Guide de conception des réseaux électriques industriels T & D 6 883 427/A « Les harmoniques »

Schneider ELECTRIC - 2001

Références bibliographiques

[26] Chauvin ARNOUX

Surveillance de la qualité électrique « tension, flicker, transitoires, harmoniques... restons au courant ».

Mesures 730 France - 2000

[27] Rachida HAIMOUR

« Contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs facts dans un réseau électrique »

Oran-magister - 2009

[28] Alain CHAROY

CEM parasites et perturbation des électrons tom4 « alimentation, foudre, remèdes »

2^{ème} édition, collection : EEA, DUNOD-France - 2007

[29] Wierda RENE

Cahier technique merlin Gerin N°176 « flicker ou scintillement des sources lumineuses »

realisation : sodipe-valence. DTE-12-95-3500 Imp : CLERC - 1995

[30] Prise en compte de l'identité visuelle d'ERDF

« Étude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée en HTA. Identification »

ERDF-PRO-RES_12^E ; Version : V3 France - 2008

[31] ZBIGNIEW Hanzelka & ANDREJ Bien

« Méthodologie de mesure du flicker »

AGH université de sciences et technologie-Pologne - 2008

[32] Jacques BOURBON

« La chute de tension » **2009**

[33] Distribuer l'énergie Schneider

« Détermination de la chute de tension en ligne » ; **version - 2004**

Références bibliographiques

[34] Djaar OULD ABDESLAM

« Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension »

Université de Haute-Alsace U.F.R. des Sciences et Techniques -Doctorat - 2005

[35] Eric FELICE et Philippe REVILLA

« Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique »

Version numérique - 2009

[36] Les déséquilibres Extrait « La pratique des régimes de neutre » 2008

[37] Bertrand CHARIER

Qualité de l'Energie Electrique et Enseignement de l'Electrotechnique

[38] E. CATZ. Non-Membre. IEEE

« Evolutions technique du système de transport et de distribution d'électricité »

Pour AREVA T&D. EDP France - 2006

[39] F. SAGNARD

« Introduction à la Synthèse des Filtres Actifs »

Polytechnique de Mons Thierry Dutoit, TCTS Lab ; Notes de cours, Première édition - 2007

[40] M. Damien Flieller

« Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre »

Projet de Fin d'Études Université cathodique de Louvain-Belgique - 2006

[41] : Mohamad ALAA EDDIN ALALI

« Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) »

Université Louis Pasteur – Strasbourg I- Doctorat - 2002

Références bibliographiques

[42] **Paul BILDSTEIN**

« Synthèse et réalisation des filtres actifs »

Techniques de l'Ingénieur E 3 130 France - 1997

[43] **Steeve BEAULIEU**

« Étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique »

Mémoire présente comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie ; université du quebec a chicoutiml - 2007

[44] **B. KETEM, N. MEHENNI**

« Application des onduleurs multi niveaux au filtrage actif des réseaux ».

Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'USTHB - 2005

[45] **Rabah BENABID**

«Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques ».

Mémoire de Magister en Electrotechnique de l'Université de Jijel - 2007

[46] **Michel CRAPPE**

« Stabilité et sauvgarde des réseaux électrique »

Herme science. Lavoisier - 2003.

[47] **Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI**

« Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ».

Thèse Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I-2003

[48] ⁽¹⁾**Rolf GRUBAUM**, ⁽²⁾**Jacques PERNOT**,

« Compensation série contrôlée par thyristors : une approche nouvelle pour optimiser le transport d'énergie »

(1) ABB power systemes AB SUEDE

(2) ABB Energie France 2001

Références bibliographiques

[49] Lamia KARTOBI

« Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques »

Thèse de magister En Réseaux Electriques et Haute Tension à l'USTHB - 2006

[50] M. ADLI ; R. ALKAMA et A. ZIANE-KHODJA

« Apport d'un DVR dans la production d'énergie distribuée »

Laboratoire de Génie Electrique de Bejaia - 2012