UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Perturbation du réseau triphasé basse tension par les charges alimentées. Phénomènes,effets et méthodes d'atténuation

Hakizimana, Charles; Niyongabo, Gérard; Sous la direction du : Ir. Rédempteur Vondoro

2005-04
UB, ITS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2283

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

INSTITUT TECHNIQUE SUPERIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTROMECANIQUE

PERTURBATIONS DU RESEAU TRIPHASE BASSE TENSION PAR LES CHARGES ALIMENTEES

« Phénomènes, effets et méthodes d'atténuation »

Par

Charles HAKIZIMANA

et

Gérard NIYONGABO

Directeur de Projet

Ir. Rédempteur VONDORO

Co-Directeur

Ir. Christian NTAGWIRUMUGARA

Projet de fin d'études
présenté publiquement
en vue de l'obtention du grade
d'Ingénieur Industriel
en Génie Electromécanique

Bujumbura, Avril 2005

Dédicace

- Au Dieu tout puissant
- A ma grand-mère Antoinette NDENGAKO
- A tous mes parents
- A tous mes frères et sœurs
- A tous mes amis

Je dédie ce travail.

NIYONGABO Gérard

Dédicace

- A mes regrettés parents
- A mes frères et Sœurs
- Au regretté KANA André
- A tous mes amis

Je dédie ce travail

HAKIZIMANA Charles.

REMERCIEMENTS

La rédaction du présent travail n'aurait pas été possible sans les efforts et la motivation de nombreuses personnes auxquelles nous tenons à exprimer notre profonde gratitude.

Nous adressons d'abord nos sincères remerciements à l'Ingénieur VONDORO Rédempteur, Directeur du Projet, qui malgré ses multiples obligations a bien répondu positivement à notre appel pour l'aboutissement de ce travail.
Que l'Ingénieur Christian NTAGWIRUMUGARA, Co- directeur de ce travail trouve ici notre satisfaction pour les conseils combien constructifs qu'il n'a jamais cessé de nous prodiguer.

Notre reconnaissance s'adresse aussi à tous les professeurs de l'Institut Technique Supérieur pour la formation tant morale qu'intellectuelle qu'ils nous ont dispensée lors de notre séjour à l'Université du Burundi.

Nous pensons également à nos parents qui nous ont envoyés à l'école et nous ont suivis jusqu'aujourd'hui ; qu'ils trouvent ici nos remerciements.

Enfin, à toutes personnes qui de près ou de loin nous ont soutenus durant notre formation, nous disons merci.

TABLE DES MATIERES

Page

Dédicace..... i

Dédicace ii

REMERCIEMENTS iii

PREAMBULE 1

I[ère] Partie : Aperçu sommaire des perturbations du réseau..... 3

CHAP.I. Définitions des grandeurs électriques affectées par les Perturbations 4

I.0. Introduction 4

I.1. Définitions 4

I.1.1. La fréquence 4

I.1.2. L'amplitude des trois tensions 5

I.1.3. La symétrie du système triphasé 5

I.1.4. La forme d'onde 7

CHAP.II. Perturbations possibles du réseau par les charges 8

II.0. Introduction 8

II.1. Définition de la perturbation 9

II.1.1. Perturbation électrique 9

II.1.2. Perturbation électromagnétique 9

II.2. Réseaux industriels Basse Tension (B.T.) 9

II.3. Les perturbations de fréquence 10

II.4. Les perturbations d'amplitude 10

II.4.1. Les creux de tensions et coupures brèves 11

II.4.2. Les surtensions 13

a) surtensions brèves 13

b) surtensions très brèves 13

II.5. Les perturbations de l'onde sinusoïdale 18

II.5.1. Les distorsions harmoniques 18

a) Définition 18
b) Rang de l'harmonique 19
c) Expression de la grandeur déformée 19
d) Spectre 19
e) Valeur efficace d'une grandeur déformée 20
f) Origines 21
II.6. Perturbations particulières aux systèmes polyphasés 24
II.6.1. Les déséquilibres de courant et tension 24
II.6.2. Les déséquilibres de phase 25
II.7. Flicker ou scintillement des sources lumineuses 26
II.7.1. Définition du flicker 26
II.7.2. Les fluctuations de tension à l'origine du flicker 26
a) Explication mathématique de l'origine du Flicker 27
II.7.3. Autres origines du flicker 29
a) Dysfonctionnement du système d'éclairage 29
b) Flicker provoqué par les infraharmoniques et les interharmoniques 29
II.7.4. Les perturbateurs 29
II.8. Variations lentes de tension 30

CHAP.III. SENSIBILITE DES EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES DE PUISSANCE ET D'AUTRES RECEPTEURS AUX PERTURBATIONS DU RESEAUX 32
III.1. Effets instantanés 32
III.1.1. Effets des creux de tension 32
III.1.2. Effets des harmoniques 35
a) Vibration et bruit 35
b) Perturbations induites sur les lignes à courants faibles 35
c) Sensibilité des convertisseurs 36

III.1.3. Effets des surtensions 38

III.2. Effets à action différée (à terme) 38

III.2.1. Effets à terme des harmoniques 39

a) Effets sur les condensateurs 39

b) Effets sur les machines et les transformateurs 39

c) Effets sur les câbles et en particulier le conducteur neutre.....40

III.2.2. Effets d'un déséquilibre de tensions 42

III.2.3. Les effets des déséquilibres de phase 42

III.2.4. Effets de coupures brèves et du flicker 43

a) Effets des coupures brèves 43

b) Effets du flicker, sensibilité des sources lumineuses 44

II[ème] Partie : Etude technique d'atténuation et de protection contre les effets des perturbations au Centre de Télécommunications de BUJUMBURA I de l'ONATEL et au Centre de Télécommunications par satellite de KABONDO 46

CHAP. I. PRESENTATION GENERALE DE L'ENTREPRISE ONATEL 47

I.1. Historique brève 47

I.2. Schéma de l'installation électrique de puissance 48

I.3. Inventaire des principaux récepteurs et équipements générateurs des perturbations 50

I.3.1. A la station d'énergie 50

I.3.2. Autres récepteurs et équipements 50

I.4. Schéma synoptique station d'énergie 51

CHAP.II. DISPOSITIFS ET METHODES D'ATTENUATION DES PERTURBATIONS 52

II.1. Atténuation du flicker 52

II.1.1. Choix du mode d'éclairage 52

II.1.2. Onduleur 53

II.1.3. Modification du perturbateur 53

II.1.4. Modification du réseau 53

II.1.5. Le convertisseur de phase 55

II.1.6. Le compensateur statique (S.V.C.) 66

II.2. Réduction des harmoniques 59

II.2.1. Les solutions traditionnelles 60

a) Agir sur la structure de l'installation 60

b) Utilisation d'inductances anti-harmoniques 60

c) Filtres passifs d'harmoniques 61

II.2.2. Convertisseurs propres et compensateurs actifs.....61

a) Convertisseurs « propre » 62

b) Le compensateur actif « Shunt » 64

c) Mise en œuvre d'un compensateur « Shunt » 66

d) Point d'insertion d'un compensateur Shunt 68

e) Exemple d'application 71

II.3. Déséquilibres des courants et des tensions 72

II.3.1. Régime établi 73

II.3.2. Compensation de charges monophasées 73

II.3.3. Compensateur statique 74

II.3.4. Limites tolérables du déséquilibre 75

II.4. Atténuation des creux de tension 75

II.4.1. Moteurs 76

II.4.2. Charges importantes 77

II.4.3. Charges particulières 77

II.5. Atténuation des variations brusques de tension 78

II.6. Atténuation des surtensions 81

II.6.1. Principe fondamental 81

II.6.2. Arc électrique 82

II.6.3. Tension de rétablissement 82

CHAP. III. MECANISME DE PROTECTION CONTRE LES PERTURBATIONS 84

III.1. Protection contre les creux de tension et coupures brèves.. 84

III.1.1. Considérations générales 84

III.1.2. Solutions chez l'industriel 85

III.2. Variations lentes 95

III.3. Variations brusques de tension 98

III.4. Protection contre les autres perturbations 99

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 103

PREAMBULE

Dans le présent travail, nous nous proposons de donner les méthodes d'atténuation, ou d'élimination des perturbations agissant pendant des durées bien déterminées, qui sont engendrées par certains appareils récepteurs et qui altèrent la qualité de la tension d'alimentation.

Personne n'ignore que lorsqu'une installation est chaque fois perturbée, elle devient à la longue sujette à certains défaillances.
Ces perturbations se manifestent lorsque les appareils prélèvent des courants dissymétriques sur les trois phases ou absorbent des courants dont l'amplitude varie brusquement de manière importante, ou bien dont la forme d'onde est très différente d'une sinusoïde.

Ces méthodes s'appuieront sûrement sur les méthodes existant déjà et nous proposons d'autres dispositifs pour minimiser voir supprimer ces anomalies afin de maintenir une bonne qualité de la tension.

Les principaux équipements qui sont à l'origine de ces perturbations sont recensés dans l'Entreprise ONATEL, d'où l'application sera faite au cas des installations de ladite Entreprise.

Ce travail comprend deux parties :

- La première partie est constituée de trois chapitres.

- Le premier chapitre consiste en la présentation de tous les paramètres caractérisant une alimentation électrique et qui permettent de voir l'étendue du sujet que nous étudions.

- Le deuxième chapitre se veut de présenter toutes les anomalies d'une alimentation électrique, de les définir et de parler des équipements ou des récepteurs générateurs de ces perturbations.

- Au troisième chapitre, nous exposons les effets des perturbations sur le réseau et sur les autres équipements alimentés, abordés sous l'angle des différents phénomènes.

- La deuxième partie est subdivisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre traite de l'étude sur l'alimentation en énergie électrique et l'inventaire des récepteurs et équipements qui engendrent les perturbations.

- Au deuxième chapitre, nous proposons les solutions envisageables par des dispositifs et méthodes pour atténuer, ou éliminer complètement les perturbations.

- Le troisième chapitre traite des mécanismes de protection contre ces perturbations.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et quelques recommandations.

I^ERE PARTIE :

APERÇU SOMMAIRE DES PERTURBATIONS DU RESEAU

CHAP.I. : DEFINITIONS DES PARAMETRES ELECTRIQUES AFFECTES PAR LES PERTURBATIONS

I.0. Introduction

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé. La qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend évidemment de celle de la tension au point de livraison. Or la qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions d'exploitation du réseau, soit du fonctionnement de certains récepteurs particuliers qui d'ailleurs fait l'objet du sujet de notre travail. Or, des récepteurs, mais aussi des appareils de contrôle, de commande et de protection, sont sensibles à la qualité de la tension qui leur est appliquée.

La connaissance de tous les paramètres électriques et la prise en compte des contraintes d'alimentation en énergie électrique s'avèrent donc nécessaires car ils permettent de caractériser une alimentation électrique.

I.1. Définitions

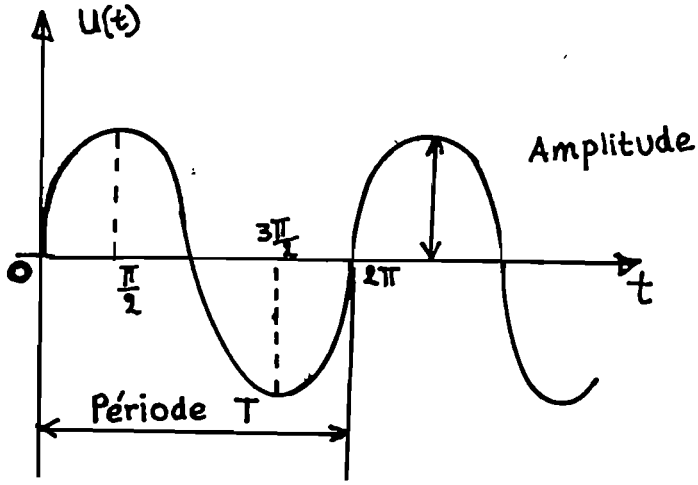
I.1.1. La fréquence

La fréquence d'une grandeur périodique est le nombre de périodes de cette grandeur contenue dans une seconde en sachant que la période de cette même grandeur est le temps constant qui sépare deux instants consécutifs où la grandeur passe par le même sens (Fig.I.1.). La fréquence s'exprime en hertz (H_Z).

Pour trouver la fréquence, il suffit de diviser une seconde par la durée d'une période.

$$f=\frac{1}{T} \quad (1)$$

Fig.I.1. Diagramme d'une grandeur périodique sinusoïdale



I.1.2. L'Amplitude des trois tensions

C'est la valeur de la tension (valeur maximale positive ou négative) par laquelle passe une grandeur alternative. La valeur maximale d'une grandeur est représentée par U_m ou $\hat{U}$; I_m ou $\hat{I}$.

I.1.3. La symétrie du système triphasé

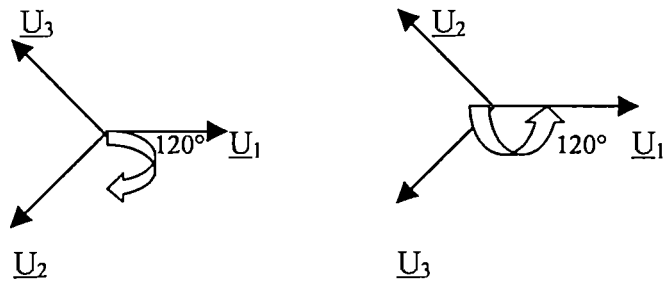
Le système est symétrique si les valeurs efficaces des grandeurs sinusoïdales sont égales et si le déphasage entre deux grandeurs consécutives vaut $K\frac{2\Pi}{m}$ où K, appelé **ordre de succession** des phases, est égal au nombre d'arcs $\frac{2\Pi}{m}$ correspondant au déphasage de deux grandeurs de numéros consécutifs.

Par convention, on appelle système **direct** un système dont le diagramme des phaseurs est ordonné dans le sens trigonométrique négatif (sens des aiguilles d'une montre).

En d'autres termes, dans un système direct, les grandeurs passent successivement par un maximum dans l'ordre de numérotation. Dans le cas contraire, le système est dit **inverse.**

On appelle système **homopolaire** un système dans lequel toutes les grandeurs sont en phase. Le type le plus courant de sources polyphasées utilise trois tensions équilibrées égales en amplitude et déphasé de $\frac{2\Pi}{3}$ =120°, formant un système triphasé symétrique.

Fig.I.2. : Système triphasé direct et inverse d'ordre 1.



a. b.

Pour un système direct d'ordre 1, on a

$$\underline{U}\,1 = U \exp(j\Psi)$$

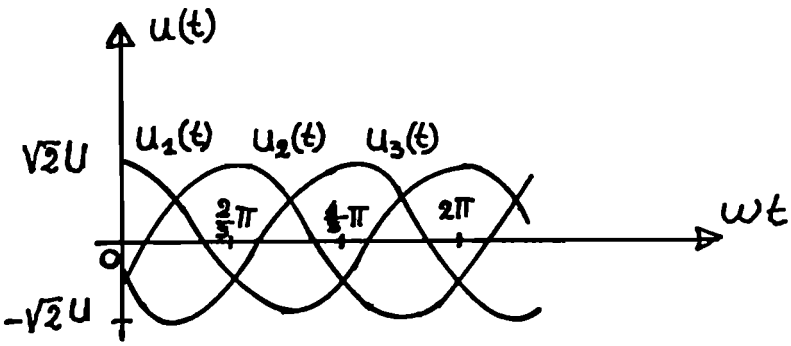
$$\underline{U}\,2 = U \exp[\,j\,(\Psi - 2\,\underline{\Pi}\,)\,]$$
$$3$$

$$\underline{U}\,3 = U \exp[\,j\,(\Psi - 4\,\underline{\Pi}\,)\,]$$
$$3$$

Le graphe correspondant des tensions instantanées est représenté sur la figure (Fig.I.3) pour $\Psi = 0$. En tout instant, la somme des trois tensions est nulle.

$$U_1 + U_2 + U_3 = 0$$

Fig. I.3



I.1.4. La forme d'onde

On entend par onde, la propagation dans l'espace d'une perturbation d'une certaine grandeur physique. Jusqu'à présent, nous n'avons pas donné à la fonction d'onde une dépendance explicite. C'est-à-dire que nous n'avons pas spécifié sa forme mais il faut que l'onde de tension et de courant ait une forme sinusoïdale ou la plus proche d'une sinusoïdale.

Fig. I.4.

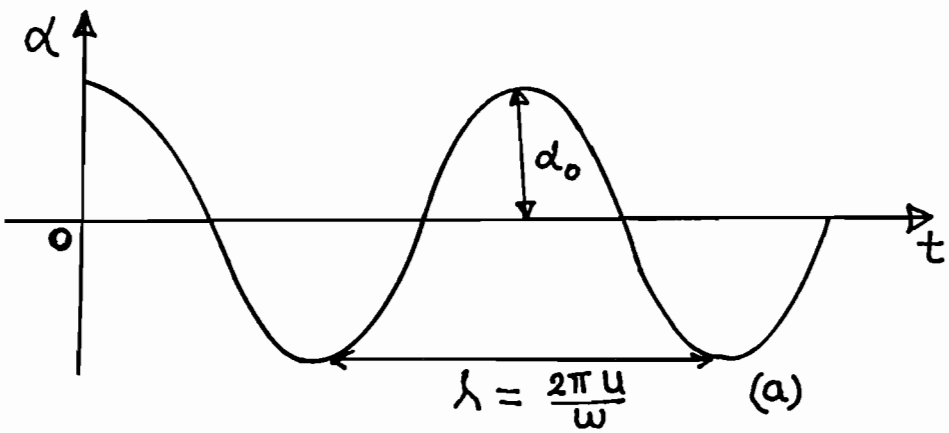
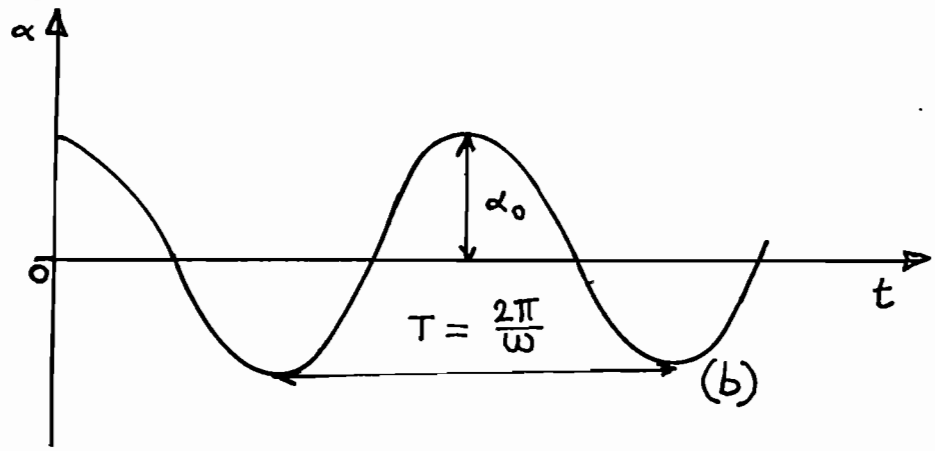


Fig.I.5.



La quantité $\alpha = \alpha_0 \cos(\omega t - KZ)$ en fonction de Z et de t. La longueur d'onde α est la distance au bout de laquelle KZ varie de 2 Π.

$K\lambda = 2\,\Pi$.

CHAP.II. : PERTURBATIONS POSSIBLES DU RESEAU PAR LES CHARGES

II.0. Introduction

Les perturbations susceptibles d'affecter la tension d'un réseau sont engendrées par des phénomènes qui peuvent être schématiquement classés dans les deux catégories suivantes :

- la première correspond aux phénomènes aléatoires ayant des causes accidentelles. Il s'agit des défauts prenant naissance, soit dans les éléments du réseau (lignes, câbles, transformateurs...) soit dans les installations des consommateurs. Ils provoquent parfois des creux de tension et des coupures de longue durée.

- la deuxième regroupe des phénomènes existant soit en permanence, soit pendant des instants de durées bien déterminées et qui sont engendrées par certains appareils installés principalement chez les utilisateurs d'énergie électrique.

Tous les réseaux sur lesquels sont raccordés des appareils récepteurs, c'est-à-dire les réseaux à haute, moyenne et basse tensions sont susceptibles de subir ces genres de perturbations. Cependant, excepté en basse tension, la plupart des appareils raccordés au réseau sont de type triphasés pratiquement équilibrés. Il en résulte que les déséquilibres de tension sont plus rares dans les réseaux à haute et à moyenne tension que dans les réseaux à basse tension. Par contre, tous les réseaux quel que soit leur niveau de tension sont également affectés par les fluctuations rapides de tension et les harmoniques.

Nous nous limiterons aux perturbations du réseau triphasé basse tension car c'est ce niveau de tension qui est couramment sollicité par les utilisateurs d'énergie électrique.

II.1. Définition de la perturbation

Une perturbation peut se présenter sous deux formes :

- Perturbation électrique
- Perturbation électromagnétique

II.1.1. Perturbation électrique

C'est tout phénomène perturbateur qui fait sortir l'onde de tension (ou de courant) du secteur de ses caractéristiques nominales.

II.1.2. Perturbation électromagnétique

C'est tout phénomène perturbateur de nature électrique, magnétique ou électrostatique qui peut affecter le secteur et/ou le fonctionnement des appareils électriques et électroniques.

II.2. Réseaux industriels basse tension (B.T.)

Le domaine de la basse tension concerne les tensions :

- Alternatives : $\leq$ 1000V (fréquence $\leq$ 10KH$_Z$)
- Continues $\leq$ 1500 V

Elles sont aussi appelées « tensions assignées ». La plus usitée des valeurs en B.T. est « 230/400 V », on trouvera encore diverses valeurs de tensions normalisées.

Norme européenne : 220/380 V, 50 H$_Z$

Norme anglaise : 240/415 V, 50 H$_Z$

Norme japonaise : 100/200 V, 50 et 60 H$_Z$

Norme américaine (U.S.A.) : 120/240 V et 480 V, 60 H$_Z$

Mais ces tensions varient autour de la tension nominale en fonction de la structure et de la charge du réseau (longueur des conducteurs et variations de la charge) et des systèmes régulateurs du réseau public (ou privé).

En Europe, on indique qu'en exploitation normale, pour chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage Un ± 10 %. A titre d'exemple, en France, on annonce une plage de variation de ± 10 % mais on admet, que temporairement, les tensions puissent s'écarter de ± 20 % de la tension nominale.

Il faut noter que les variations sont à associer à la notion de durée.

Exemples : Régime permanent : $U_n \pm 10$ %

Délai de cinq minutes : $U_n \pm 20$ %

Dans les pays en voie de développement, il est fréquent d'observer des variations plus fortes que ± 20 %.

II.3. Les perturbations de la fréquence

Concernant la fréquence, les variations lentes autour de la valeur nominale 50 ou 60 H_Z sont également faibles. Dans la plupart des pays européens, dont les réseaux sont interconnectés, on précise 50 H_Z ± 1 % pendant 95 % d'une semaine et 50 H_Z + 4 % et – 6 % en cas de perturbation très importantes. Pour des réseaux autonomes, par exemple sur une île, ces perturbations (variations) peuvent être bien plus importantes.

II.4. Les perturbations d'amplitude

Les réseaux sont perturbés par des variations de charge en exploitation normale, mais aussi par des phénomènes aléatoires dont l'origine est accidentelle, les courts-circuits par exemple.

Un réseau B.T. est soumis à deux causes de perturbations quelle que soit leur origine. Les deux principales perturbations d'amplitude sont :

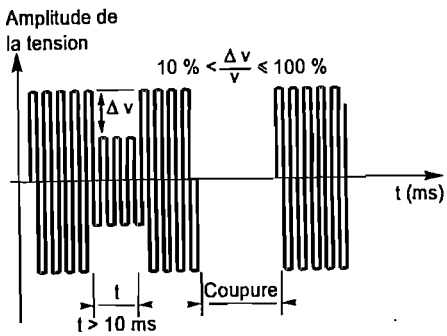
- les creux de tension et coupures brèves
- les surtensions

II.4.1. Les creux de tensions et coupures brèves

Le creux de tension est généralement défini comme une baisse de tension de 10 % à près de 100 % de la valeur nominale de la tension pendant un temps compris entre 10 ms et quelques secondes, suivie d'un retour dans la plage de variation normale.

Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100 %) pendant 1 sec à 1 min, on parle de **coupure brève** et entre 10 ms et 1 sec, coupure très brève.

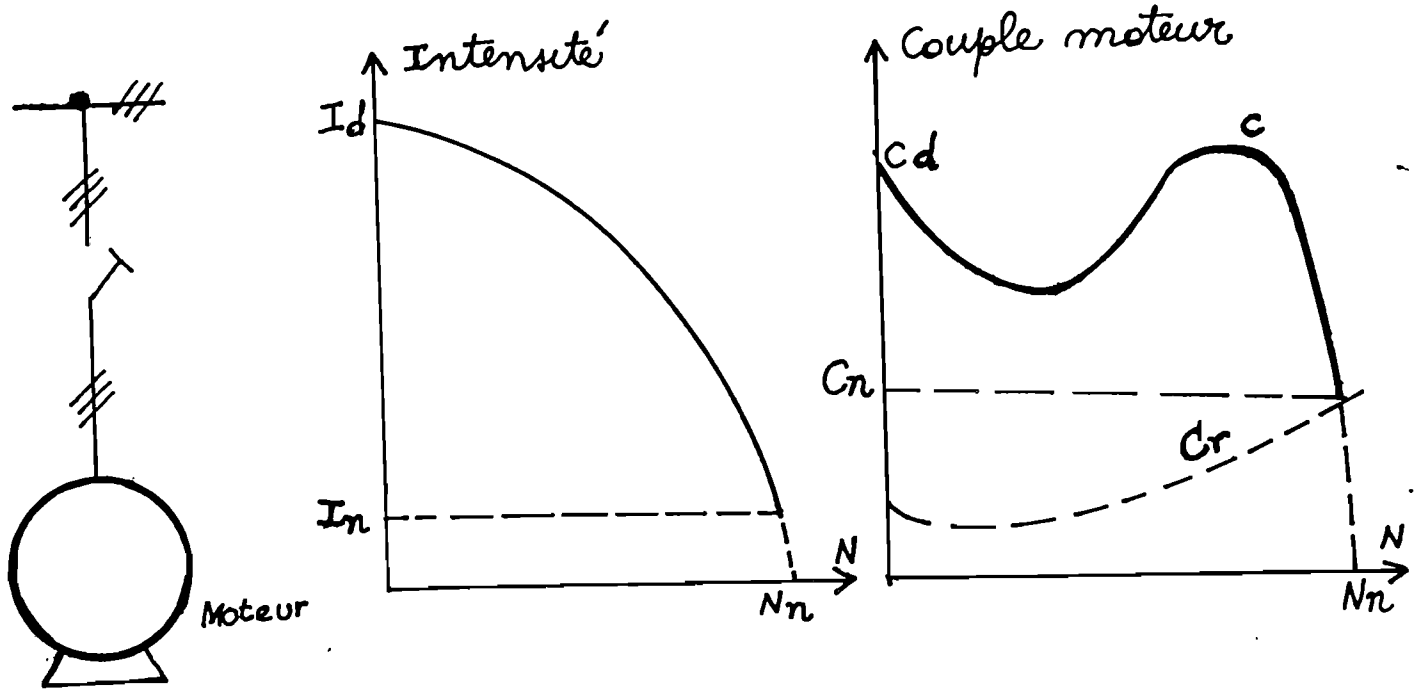
Fig. I.6. Creux de tension (ΔV) et coupure



Les causes de ces perturbations sont nombreuses, on notera ici certains appareils installés chez les utilisateurs de l'énergie électrique.

Un simple démarrage de gros moteurs directement alimentés par le **T.G.B.T.** provoque un creux de tension dont la « reprise au vol » (réalimentation après une coupure brève) provoque un appel de courant parfois important (jusqu'à plusieurs fois le courant nominal).

Fig. I.7. Démarrage direct d'un moteur à cage.



En cas d'une mise sous tension directe du moteur, on constate pendant presque toute la durée de montée en vitesse

- Une intensité très forte

  $4\ I_n < Id < 10\ I_n$

- Un facteur de puissance faible

  $0{,}15 < \cos \varphi < 0{,}3$.

Un calcul de simulation sur un modèle simplifié de réseau, comprenant les charges et le moteur en phase de démarrage permet d'estimer ces chutes de tension. Pour une première approche, la connaissance de la puissance de court-circuit du circuit S_{cc} aux bornes du moteur ou au point de raccordement de l'entreprise sur le réseau public donne une valeur de la chute de tension relative.

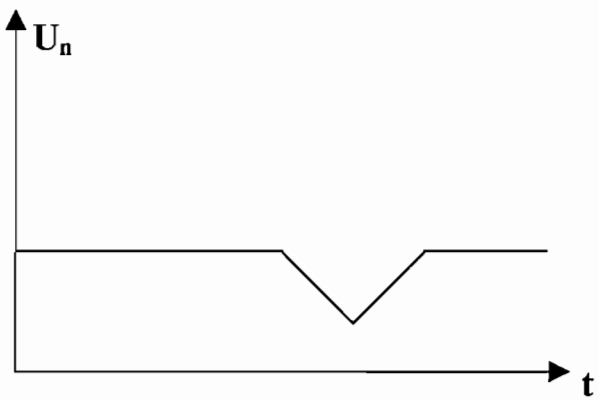
$\frac{\Delta U}{U}$ en ces points par la relation $\frac{\Delta U}{U}=\frac{S_d}{S_{cc}+S_d}$ (2)

U

Sd étant donné par la relation

$$S_d=\frac{P_n}{\eta_n}\cdot\frac{1}{\cos\varphi_n}\cdot\frac{I_d}{I_n} \quad (3)$$

Fig. I.8. Coupure brève avec gros moteur et reprise au vol



II.4.2. Les surtensions

Une surtension est définie comme un dépassement plus ou moins long de Un + 10 %.

a) Surtension brève

C'est une onde de tension transitoire caractérisée par une montée rapide suivie d'une décroissance plus lente généralement de caractère périodique.

b) Surtension très brève

Elle est définie comme une onde de tension transitoire caractérisée par une montée rapide suivie d'une décroissante plus lente généralement périodique.

Dans les réseaux électriques, on distingue des surtensions de manœuvre (d'origine interne) et des surtensions d'origine externe.

Les surtensions d'origine interne ne dépendent que du réseau lui-même. On citerait en particulier :

- Les surtensions consécutives à des phénomènes de résonance dûs aux éléments du circuit comprenant des inductances et des capacités (ligne à vide par exemple).
- Les surtensions liées à des phénomènes de ferro-résonance provoqués par la présence de circuits magnétiques saturables
- Les montées à la tension composée des phases saines dans un réseau à neutre résistant en cas de défaut phase-terre (surtensions temporaires).

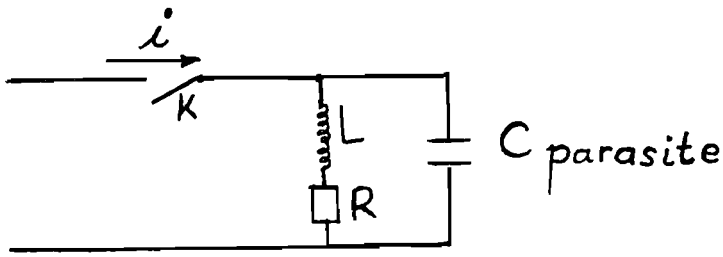
Les surtensions d'origine externe comprennent essentiellement les surtensions d'origine atmosphérique liées aux orages. Lors de la manœuvre d'un récepteur, la naissance des surtensions au moment de la coupure des faibles courants inductifs est une chose compliquée. Ce n'est pas simplement le retour brutal à zéro d'une certaine intensité provoquant la libération de l'énergie correspondante dans l'inductance de la charge qui est important.

La rigidité limitée de l'intervalle entre les contacts du disjoncteur, l'aptitude du disjoncteur à couper des intensités à haute fréquence, la transmission des phénomènes transitoires entre les phases sont autant de facteurs qui jouent un rôle important dans la naissance des surtensions.

Il est à noter aussi que les disjoncteurs qui ne présentent pratiquement aucune tendance à arracher le courant peuvent provoquer des surtensions dangereuses.

- Les bobines des relais et des contacteurs ont une impédance de caractère selfique, et interrompre un « courant selfique » provoque presque toujours des surtensions importantes.

Fig.I.9. Schéma équivalent d'un relais



L = 100 mH

R = 180 Ω

C parasite = 250pF

i = 150 mA

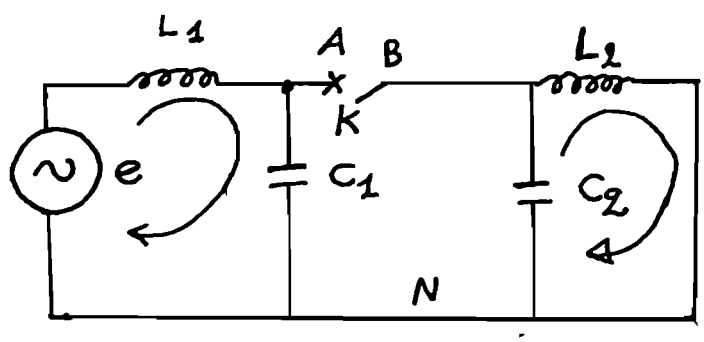
Lorsque le courant est coupé brutalement par l'interrupteur **K**, l'énergie ½ **Li²** se transforme en énergie ½ **C V²** d'où une surtension avec

$$V = i\sqrt{\frac{L}{C}} = 0{,}15\sqrt{\frac{10^{-1}}{0{,}25.10^{-9}}} \quad (4)$$

Les surtensions observées peuvent atteindre près de 10KV sur un circuit de 230 V. Ces auxiliaires de commande devraient être antiparasités par les constructeurs. Ainsi, un circuit RC, ou une varictance placé en parallèle sur leur bobine permet d'absorber la surtension.

Sur les réseaux B.T. et H.T., à vide ou faiblement chargés, interrompre un faible courant inductif n'est pas facile et entraîne la création de surtensions souvent multiples (Trains d'ondes).

Fig. I.10. Soit le schéma équivalent d'un circuit monophasé.



L_1, C_1 : inductance et capacité du réseau amont

L_2, C_2 : inductance et capacité du réseau aval.

Lorsqu'on ouvre l'interrupteur K, le courant continue à circuler dans L_2 avec, aux bornes de C_2, la tension V_{BN}.

$$V_{BN} = i\sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \quad \sin \omega_2 t \qquad (5)$$

Il en va de même en ce qui concerne le réseau amont avec aux bornes de C_1 la tension :

$$V_{AN} = i\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad \sin \omega_1 t \qquad (6)$$

A l'instant de l'ouverture, les tensions V_{BN} et V_{AN} évoluent en opposition et la tension V_{AB} devient vite suffisamment importante pour qu'il y ait un réallumage de l'arc (réamorçage entre les contacts de l'appareil de coupure).

Comme le courant à couper est faible, les contacts s'écartent et le battement entre les deux tensions $\mathbf{V_{BN}}$ et $\mathbf{V_{AN}}$ sont des éléments qui font que l'arc s'éteint, puis les tensions remontent et le phénomène redémarre.

Plusieurs cycles appelés réamorçages peuvent ainsi se produire, ceci jusqu'à ce que l'énergie dissipée par l'arc et l'écartement des contacts qui augmente, arrêtent le phénomène. Le résultat est l'apparition de trains d'ondes de tension et de fréquence élevées ($\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$) véritables générateurs de parasites.

L'existence de différents circuits à vide avec self ou transformateur, et d'appareils de coupure à ouverture lente fait que ce phénomène est assez fréquent. Il est même observé lors de la coupure du courant de court-circuit ; lorsqu'en fin de coupure, le courant devient suffisamment faible pour être arraché.

- Couper un courant de court-circuit peut aussi présenter des risques de surtensions :

- Il faut agir très vite avant que le courant n'atteigne l'intensité de court-circuit présumée.

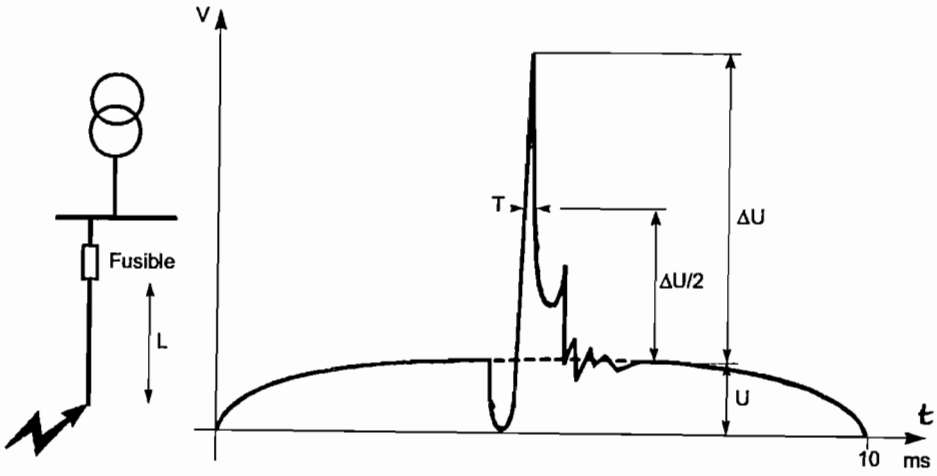
- Il faut insérer dans le circuit une tension d'arc qui n'est pas toujours facile à maîtriser selon les conditions de coupure, car cette surtension d'arc constitue une surtension de plusieurs centaines de volts pour les disjoncteurs et parfois de plusieurs **KV** pour les fusibles.

Tableau I.1. : Surtensions relevées avec deux dispositifs de protection testés sur la même installation d'essai.

	Disjoncteur C32L	Fusible GL 20A
I_{CC} présumée KA	11	4
Cosφ	0.25	0,3
U (V)	380 + 10 %	380 + 10 %
Surtension (V) $U + \Delta U$	400 à 650	2100 à 2650

Sur ce point, il faut noter que, plus le court-circuit se produit près des bornes aval de l'appareil de coupure, plus la surtension est élevée et brève, ce qui est illustré par la figure I.11.

Fig. I.11.



Ainsi les résultats présentés sur la figure ci-dessous montrent que la surtension est fonction de la distance séparant le lieu de défaut et l'appareil de protection car on a relevé que pour un défaut présent sur un câble de section 1,5 mm^2 en aval du fusible 10A.

Avec L = 0 $\quad \frac{\Delta U+U}{U}=\frac{1700+220\sqrt{2}}{220\sqrt{2}}=6,4$ et T= 50 µs

Avec L = 20m $\quad \frac{\Delta U+U}{U}=2$ et T= 200 µs

II.5. Les perturbations de l'onde sinusoïdale

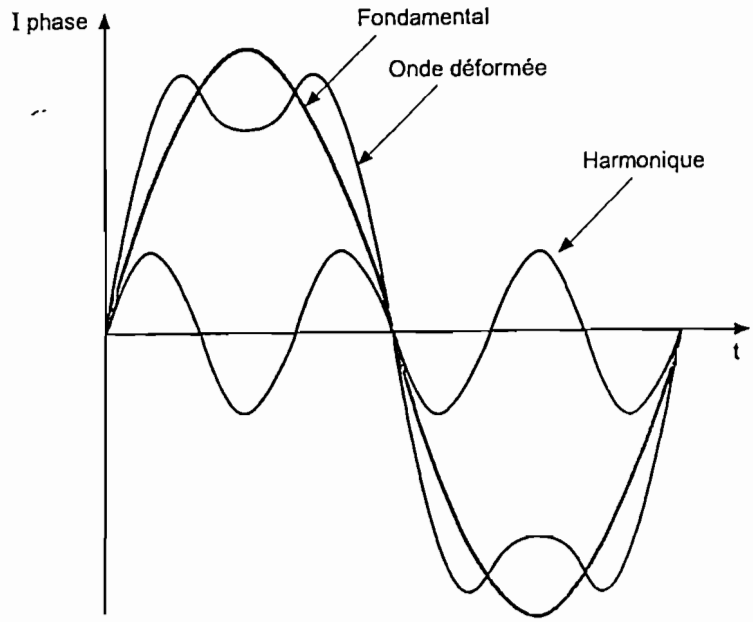
II.5.1. Les distorsions harmoniques

a) Définition

On entend par distorsion harmonique, les déformations de l'onde de tension, dont l'analyse spectrale révèle des fréquences rigoureusement multiples de la fondamentale.

Une caractéristique de ces distorsions est leur propension à se prêter à des phénomènes cumulatifs dans les réseaux par coïncidences spectrale et temporelle, lorsqu'elles sont émises par des appareils différents.

Fig. I.12. Image d'une onde déformée



b) Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 H_Z)

$$N=\frac{f_n}{f_1}$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1.

c) Expression de la grandeur déformée

Le développement en série de FOURIER de tout phénomène périodique est de la forme :

$$\mathbf{Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=40} Y_n \sqrt{2} \sin (n \omega t - \varphi n)} \qquad \mathbf{(7)}$$

Où

Y_0 = amplitude de la composante continue ; généralement nulle en distribution électrique en régime permanent.

Y_n = Valeur efficace de la composante de rang n,

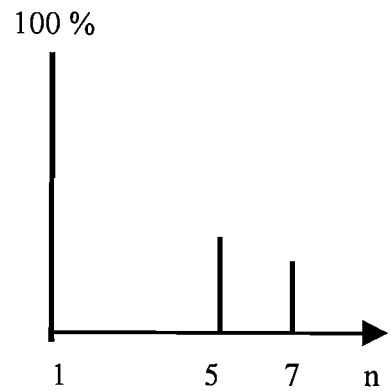
φ_n = déphasage de la composante harmonique au temps initial

L'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence. Selon les normes, on prend en considération les harmoniques jusqu'au rang 40.

d) Spectre

C'est l'histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang.

Fig. I.13. L'amplitude est souvent donnée, relative à celle du fondamental



e) Valeur efficace d'une grandeur déformée

La valeur efficace de la grandeur déformée conditionne les échauffements, donc habituellement les grandeurs harmoniques sont exprimées en valeurs **EFFICACES**. Pour une grandeur maximale sinusoïdale, la valeur efficace est la valeur maximale divisée par racine de deux.

Pour une grandeur déformée et en régime permanent, l'énergie dissipée par effet **joule** est la somme des énergies dissipées par chacune des composantes harmoniques, soit :

$$\mathbf{R\,I^2\,t = RI^2_1\,t + RI^2_2\,t + ...+ RI^2_n t} \qquad \mathbf{(8)}$$

d'où

$$\mathbf{I^2 = I^2_1 + ...+ I^2_n}$$

$$\mathbf{ou\ encore : I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I^2_n}}$$

dans la mesure où la résistance est considérée comme une constante.

La mesure de la valeur efficace de la grandeur déformée s'effectue, soit directement par des appareils dits à vraie valeur efficace ou thermiques ou à l'aide d'analyseurs de spectre.

f) Origines

Si les générateurs (alternateurs) sont parfaits, ils délivreront aux réseaux auxquels ils sont connectés des tensions parfaitement sinusoïdales. Malheureusement, les tensions (ondes) observées de façon permanente sur les réseaux ne sont jamais parfaitement sinusoïdales car les générateurs (alternateurs) sont plus ou moins imparfaits. Sans ignorer aussi que les transformateurs sont imparfaits.

Certains récepteurs comme les convertisseurs statiques de puissance, les condensateurs, les tubes fluorescents, les redresseurs à commande de phase, etc..., sont des appareils générateurs d'harmoniques ou qui en absorbent.

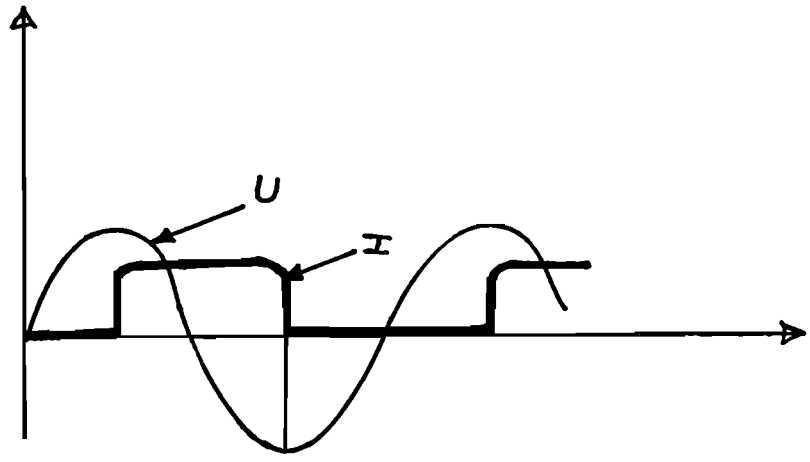
- **Les condensateurs**

Les courants harmoniques sont d'autant mieux absorbés par un condensateur que leur fréquence est élevée. Le courant absorbé par les condensateurs est donc une caricature de la tension du réseau sur lequel ils sont placés. Associés à des inductances, ils composent des filtres « **nettoyeurs de réseaux** » et absorbent alors un courant non sinusoïdal.

- **Les redresseurs à commande de phase**

Dans la grande majorité des cas, ils débitent sur un circuit selfique et absorbent successivement sur chaque phase un courant rectangulaire. A chaque commutation des semi-conducteurs, la sinusoïde de la tension d'alimentation est affectée d'une brève interruption (empiètement anodique).

Fig. I.14 Ondes de tension et de courant déformées par un redresseur à commande de phase.



Cette figure donne une représentation des ondes de tension et de courant.

- **Les tubes fluorescents**

Les arcs électriques absorbent des courants non sinusoïdaux particulièrement chargés en harmoniques. Le montage en « duo » et la compensation n'évitent pas que les tubes fluorescents génèrent des harmoniques.

Actuellement, pour la plupart des points du réseau situés au voisinage de sources d'harmoniques, les amplitudes des tensions harmoniques sont en général voisines d'une valeur dénommée « valeur basse » et dépassent rarement une valeur plus élevée, dénommée « valeur haute ». La définition de ces deux valeurs « basse » et « haute » est la suivante :

*** Valeur basse**

Valeur assez souvent rencontrée au voisinage des charges perturbatrices importantes et associée à une probabilité d'effets perturbateurs.

***Valeur haute**

Valeur rarement dépassée dans les réseaux, correspondant à une probabilité non négligeable de produire des effets perturbateurs.

De plus, pour permettre de faire une distinction entre phénomène transitoire et harmoniques, il est convenu que les valeurs d'amplitude précitées correspondent à la valeur efficace moyenne U_h de chaque tension harmonique ou au taux global moyen de distorsion τ mesurés ou calculés pendant des intervalles de temps Δt de 3 secondes, soit

$$U_h = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U^2_h(t)\, dt} \qquad (9)$$

U_h : tension efficace harmonique

t : temps

Δt : Variation du temps

Tabl.I.2. Valeurs des tensions d'harmoniques aux points de fourniture

Réseau B.T.	Taux global de distorsion τ	Valeur basse : 5 % Valeur haute : 8 %	
Harmoniques impairs			Harmoniques pairs
Multiples de 3		**Non multiples de 3**	
Rang	Tension relative(% Un)	Rang	Tension relative (% Un)	Rang	Tension relative % Un
3	5	5	6	2	2
9	1,5	7	5	4	1
15	0,5	11	3,5	6 à 24	0,5
21	0,5	13	3		
		17	2		
		19	1,5		
		23	1,5		

II.6. Perturbations particulières aux systèmes polyphasés

II.6.1. Les déséquilibres de courant et tension

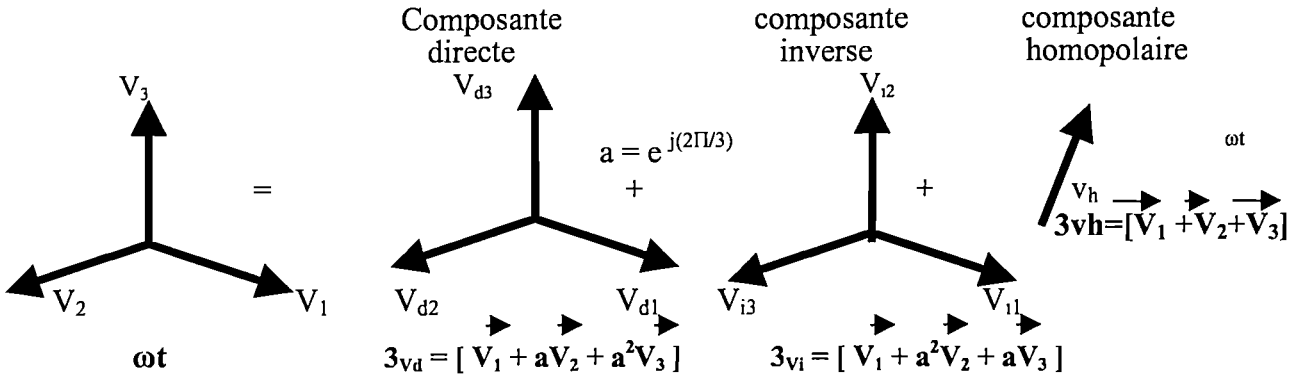
Les réseaux électriques sont généralement triphasés, ils alimentent des récepteurs triphasés mais aussi beaucoup de récepteurs monophasés. Le raccordement des charges dissymétriques sur un réseau triphasé donne lieu à des chutes de tension différentes sur les trois phases, donc à un déséquilibre des tensions et les courants absorbés sur les trois phases sont donc d'amplitudes différentes.

En général, les réseaux à moyenne et haute tension ne sont pas affectés par des déséquilibres notables. Par contre, dans les réseaux à Basse Tension, il y a davantage de risques de déséquilibres car les charges monophasés y sont très nombreuses.

Ces déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courants qui provoquent principalement des couples de freinages parasites et des échauffements dans les moteurs à courants alternatifs. Au niveau de l'Europe, on précise que dans les conditions normales d'exploitation, pour chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces calculées sur une durée de 10 min de la composante inverse de la tension d'alimentation doit se situer entre 0 et 2 % de la composante directe. On estime qu'au niveau des réseaux B.T. le taux de déséquilibre $(\frac{Vi}{Vd})$, s'il est essentiellement fluctuant, a une valeur moyenne comprise entre 0,5 et 2 %. Les taux les plus élevés sont observés sur les réseaux B.T. alimentés par un transformateur de faible puissance avec une majorité de branchements monophasés.

U. B.

Fig.I.15. : Rappel des différentes composantes directe, inverse et homopolaire du système triphasé.



II. 6.2. Les déséquilibres de phase

Nombreuses machines pour soudage étant monophasées, il apparaît sur le réseau, un déséquilibre du fait que ces machines ne sont pas équitablement réparties sur les trois phases.

En conséquence, si **U** et **I** sont respectivement la tension d'alimentation de la machine et le courant d'appel en soudage, la puissance nécessaire au réseau d'alimentation triphasé est égale à $\mathbf{U.I.}\sqrt{3}$.

Un tel réseau est mal utilisé et la puissance disponible pour d'autres utilisateurs est réduite. En outre, en raison des chutes de tension, il apparaît aussi un déséquilibre de tension pouvant être nuisible pour les autres utilisateurs.

Les valeurs admissibles du déséquilibre des phases ne peuvent être fixées que cas par cas, en fonction des caractéristiques du réseau (puissance disponible, autres utilisateurs, etc).

II.7. Flicker ou scintillement des sources lumineuses

II.7.1. Définition du flicker

Le flicker ou papillotement de lumière est définit comme « impression subjective de fluctuation de la luminance ». C'est un phénomène de gêne physiologique visuelle ressenti par les utilisateurs des lampes alimentées par une source commune à l'éclairage et à une charge perturbatrice.

La gêne correspondant au scintillement se manifeste sur les lampes B.T. Par contre les charges perturbatrices peuvent se trouver connectées à tout niveau de tension.

Dans cette définition du flicker ne rentrent que les fluctuations :

- d'amplitude < 10 %
- de période < 1 heure

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

- Soit par la variation fluctuante de puissance appelée par divers récepteurs : Fours à arc, soudeuses, moteurs.

- Soit par la mise en et hors tension des charges importantes : démarrage moteurs, manœuvre de batteries de condensateurs.

Depuis 50 ans, le flicker a fait l'objet de nombreuses publications. C'est un phénomène maintenant bien défini (CEI 868), analysé, mesurable, pour lequel il existe des éléments de prévision et des remèdes.

II.7.2. Les fluctuations des tension à l'origine du flicker

Les variations de tension périodiques et rapides peuvent se manifester sous deux formes principales à savoir :

- variations périodiques ou erratiques permanentes conduisant à une décomposition spectrale dans une bande de 0,5 H_Z à 25 H_Z.

Elles sont dues à des charges (ou ensemble de charges) dont l'utilisation se caractérise par une variation permanente d'appel de puissance. (Ex : fours à arc, machines à souder,...)

- les variations de tension par à-coups

Il s'agit ici des à-coups de tension se produisant de façon systématique ou erratiques (intervalles entre à-coups supérieurs à quelques secondes).

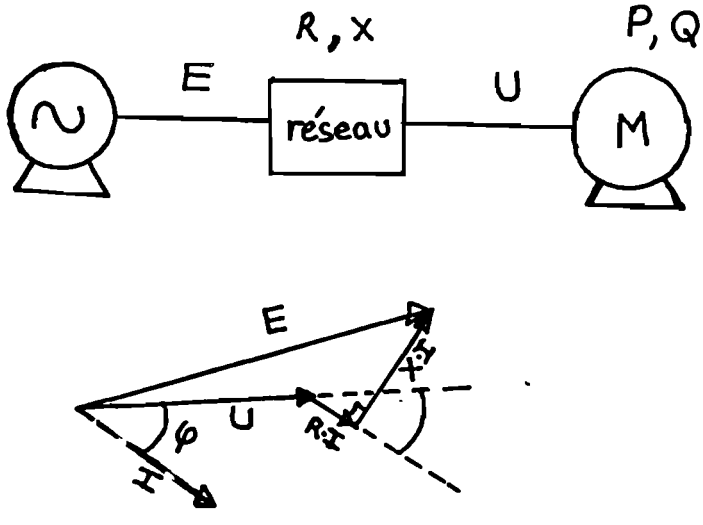
Ces variations sont dues à des mises en services de charges importantes

(Ex : démarrage moteur, manœuvre de batterie de compensation,...)

a) Explication mathématique de l'origine du flicker

Les sources de ces fluctuations sont les équipements électriques dont le fonctionnement nécessite d'importantes variations cycliques de courants qui, parcourant l'impédance du réseau **(R,X)**, provoquent les variations de tension **ΔU**.

Fig. I.16 : Les variations de tension à l'origine du flicker sont dues aux variations du courant I parcourant l'impédance du réseau (R,X)



U = tension nominale du réseau (de fonctionnement)

E = tension à vide du réseau

ΔU = chute de tension (= E-U)

P = Puissance active de la charge sous la tension nominale U

Q = Puissance réactive de la charge sous la tension nominale U

Cos φ = facteur de puissance de la charge

I = Courant nominale de la charge

$\mathbf{S_{cc}}$ = Puissance de court-circuit du réseau amont

R = résistance totale du réseau amont

X = réactance totale du réseau amont

Si on considère que l'angle entre E et U est faible :

$$\mathbf{\Delta U = E - U \approx R.I.\cos\varphi + X.I.\sin\varphi} \qquad \mathbf{(10)}$$

On peut écrire :

$$\mathbf{P = U\,I.\cos\varphi \text{ et } Q = U.I.\sin\varphi} \qquad \mathbf{(11)}$$

Ce qui donne : $\Delta U = \frac{R.P. + XQ}{U}$ (12) et en valeur relative

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P. + XQ}{U^2} \quad (13)$$

Remarques :

1. En H.T., la résistance R est négligeable vis-à-vis de l'impédance X, l'équation se transforme en

   $$\frac{\Delta U}{U} = \frac{XQ}{U^2} = \frac{Q}{S_{cc}} \quad (14)$$

   C'est la variation de la puissance réactive qui est prépondérante et doit donc être contrôlée ;

2. En **B.T.**, R n'est pas négligeable . Il faut alors agir sur les puissances active et réactive, **P** et **Q.**

II.7.3. Autres origines de Flicker

a) Dysfonctionnement du système d'éclairage

Une fluctuation du flux lumineux peut également être due à un mauvais fonctionnement du système d'éclairage. C'est la première hypothèse à vérifier en cas de problème.

Par exemple : les lampes fluorescentes comportent un ballast.

- Les tubes avec ballast ferromagnétique traditionnel, outre le clignotement observé en fin de vie, peuvent générer du flicker lorsqu'ils sont associés à un gradateur. En effet, l'ionisation du gaz devient incertaine lorsque la commande de phase ampute une partie de la sinusoïde.
- Les tubes avec ballast électronique sont généralement insensibles aux variations de leur tension d'alimentation. Il existe des ballasts pouvant utiliser des gradateurs à commande de phase ; dans ce cas, des papillotements ont pu être observés en présence d'harmoniques.

b)Flicker provoqué par les infraharmoniques et les interharmoniques

Il a été démontré et constaté que dans certaines conditions, la présence d'interharmoniques dans la tension d'alimentation est aussi une source de flicker. En particulier, les lampes à incandescence sont sensibles dans la bande de fréquence comprise entre 20 H_Z et 80 H_Z alors que les fluorescentes le sont pour des fréquences supérieures à 100 H_Z. Les lampes à ballast inductif semblent plus sensibles à ce phénomène que celles avec ballast capacitif.

II.7.4. Les perturbateurs

- **le four à arc :**

Il est le principal générateur de flicker. Les fluctuations de tension, que son fonctionnement fait naître, sont d'autant plus ressenties que la puissance des fours est élevée, en particulier par rapport à la puissance de court-circuit du réseau.

- **Machines à charges fluctuantes :**

Les moteurs puissants ou groupes de moteurs, à démarrages et arrêts fréquents, ou à charge variable, ainsi que les machines à couple résistant alternatif (compresseurs), peuvent produire du flicker.

- **Machines à souder**

Les soudeuses à arc de puissance relativement faible sont peu gênantes (sauf utilisation intensive chez un abonné B.T.). Par contre, les cycles répétitifs de soudeuses par résistance, à des fréquences comprises entre 0,1 et 1H_Z sont à l'origine du flicker.

- **Régulateurs de puissance à thyristors :**

Pour échapper aux inconvénients de la « commande de phase » (harmoniques et parasites HF), les régulateurs à thyristors (parfois appelés gradateurs) fonctionnent en « commande syncopée » chaque fois que leur charge le permet. Les thyristors à commande syncopée sont allumés pendant des périodes entières (régulation par train d'onde entiers), mais les temps de conduction sont très brefs, répétés à des fréquences de quelques H_Z. Ils sont donc générateurs de flicker. Par exemple, pour éviter ce phénomène dans le domaine du chauffage électrique, les normes imposent aux constructeurs des systèmes de régulation tels que la puissance ne soit pas commutée plus d'une fois toutes les vingt secondes.

Les autres appareils perturbateurs autres que les précédents sont ceux à couple pulsatoire et ceux à charge non fluctuante mais dont le fonctionnement est intermittent : certains appareils électroménagers commandés par un système tout ou rien.

II.8. Variations lentes de tension

Il est en fait de constatation courante que l'application à un appareil d'utilisation de l'énergie électrique, d'une tension trop basse ou d'une tension trop haute, est gênante. Si en effet, la tension est insuffisante, les moteurs ne démarrent pas et risquent d'être détériorés, les lampes éclairent mal ; les appareils thermiques (cuisinières, radiateurs) ne chauffent pas suffisamment.

Une tension trop élevée, par contre, entraîne le plus souvent un vieillissement prématuré des matériels. Entre ces deux extrêmes, il existe, pour chaque type d'appareils une plage de tension dans laquelle le fonctionnement est correct.

En effet, il est rare qu'un appareil fonctionne correctement pour une tension limite donnée et ne fonctionne plus du tout en deçà ou au-delà.

On imagine plus simplement qu'il existe une valeur de la tension pour laquelle le fonctionnement est le meilleur. Si la tension s'éloigne un peu de cette valeur optimale, le fonctionnement devient légèrement moins bon, puis mauvais et cela d'autant plus que l'écart s'accroît.

CHAP. III. SENSIBILITE DES EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES DE PUISSANCE ET D'AUTRES RECEPTEURS AUX PERTURBATIONS DU RESEAU.

Les principaux effets de ces imperfections de tension sur le fonctionnement des appareils d'utilisation et des équipements électroniques peuvent être instantanés ou à action différée.

III.1. Effets instantanés

Ils matérialisent sous des formes multiples qui peuvent varier en fonction de la nature même de la perturbation de tension.

III.1.1. Effets des creux de tension

La diminution brutale de l'amplitude de la tension pouvant aller jusqu'à une disparition totale de la tension (coupures brèves) est un phénomène d'une durée généralement comprise entre 10 ms et 20 sec. C'est le résultat notamment de courts-circuits provoquant le fonctionnement des protections du réseau souvent associés à des réenclencheurs automatiques.

Quand un tel creux de tension se produit en réseau, alors qu'un convertisseur fonctionne en onduleur ou alimente une machine tournante, il peut circuler des courants très importants causant la fusion des fusibles de protection des semi-conducteurs.

C'est la raison pour laquelle le freinage assuré par un onduleur récupérant sur le réseau ne peut pas être considéré comme un freinage de sécurité.

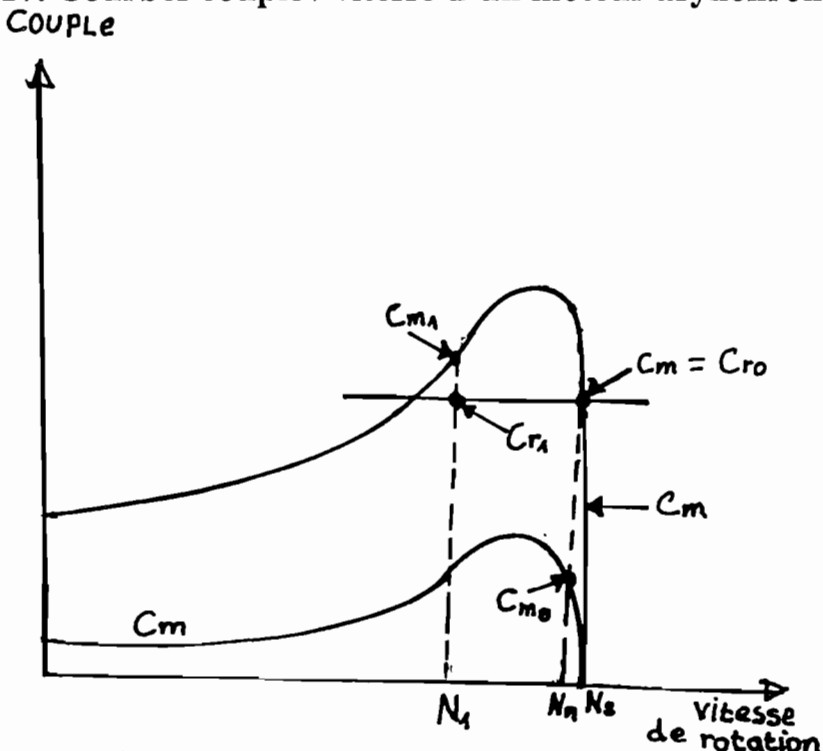
Pour les moteurs synchrones et asynchrones, selon leur importance, ceux-ci sont équipés des dispositifs auxiliaires susceptibles de comporter tout ou partie des éléments comme les appareils des manœuvre (contacteur ou disjoncteur), le système de graissage ou de ventilation, les dispositifs de protection (relais à minimum de tension ou à maximum de courant), le système de démarrage (automatique ou non).

Il est évident que lors de l'apparition de certaines perturbations dans le réseau d'alimentation, le déclenchement intempestif de circuits auxiliaires ou le fonctionnement de systèmes de protection dont le réglage est incorrect entraînent immédiatement l'arrêt du moteur.

Lors de l'apparition d'un creux de tension, le couple moteur, approximativement proportionnel au carré de la tension, subit une diminution brutale qui provoque le ralentissement du moteur. Ce ralentissement, fonction de l'amplitude et de la durée du creux est essentiellement gouverné par le moment d'inertie des masses tournantes et par la caractéristique couple /vitesse de la machine entraînée.

Dans le cas le plus défavorable, le moteur peut « décrocher », le nouveau couple qu'il développe s'avérant inférieur au couple résistant de l'organe entraîné.

Fig. I.17. Courbes couple / vitesse d'un moteur asynchrone.



- du couple moteur C_m en fonction de la vitesse de rotation N et correspondant à la tension nominale U_n.
- Du couple moteur C_m en fonction de la vitesse de rotation et correspondant à une tension U inférieure à U_n.

- Du couple résistant $\mathbf{C_r}$ de la machine entraînée, en fonction de la vitesse de rotation.

Lors de l'apparition d'un creux de tension, le couple moteur passe brusquement de la valeur $\mathbf{C_m}$ à la valeur $\mathbf{C_{mo} < C_{ro}}$. L'ensemble moteur- machine entraînée va donc ralentir et, lors du rétablissement de la tension, le couple moteur reprend brusquement une valeur $\mathbf{C_{m1}}$, alors que le couple résistant a une valeur $\mathbf{C_{r1}}$.

Le moteur ne peut accélérer et reprendre sa vitesse de rotation normale que si $\mathbf{C_{m1}}$ est supérieur à $\mathbf{C_{r1}}$.

Lors de la réapparition de la tension du réseau, chaque moteur absorbe un courant d'autant plus proche de son courant de démarrage sous pleine tension que le glissement atteint en fin de perturbation est élevé.

Cette phase de réaccélération n'entraîne pas a priori de conséquences graves sauf si un nombre important de moteurs sont mis simultanément en service. Dans ce cas, la somme des appels de courant de tous les moteurs au moment de redémarrage peut provoquer le déclenchement des protections générales de l'installation avec conséquences sur le processus industriel.

Ces surintensités peuvent également conduire à des chutes de tensions dans les impédances amont (en particulier celles des transformateurs) telles que la reprise du régime soit difficile et contraignante (faible différence entre couple moteur et résistant, provoquant une reprise avec suréchauffement) ou même impossible (le couple moteur étant alors inférieur à celui correspondant à la tension nominale).

Pour les moteurs synchrones, les effets sont quasiment identiques à ceux décrits dans le cas des moteurs asynchrones, en remarquant toutefois que les moteurs synchrones peuvent supporter des creux de tension plus importants (de l'ordre de 50 %) sans décrocher en raison de l'inertie liée à leur puissance généralement importante, des possibilités de surexcitation et de la proportionnalité de leur couple avec la tension.

En cas de décrochage, le moteur s'arrête et il faut reprendre tout le processus de démarrage qui est assez complexe.

III.1.2. Effets des harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés. Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension.

Les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques : par exemple un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3% avec un taux de 5% d'harmonique 5 sur le courant et la tension.

Les récepteurs de télécommande centralisée à fréquence musicale utilisée par les distributeurs d'énergie peuvent être perturbés par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par le système.

a) Vibration et bruit

Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques génèreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques donneront des vibrations dans les machines tournantes.

b) Perturbations induites sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle-commande)

Les perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courants faibles chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courants et tensions déformés. Les paramètres tels que : longueur du cheminement parallèle, distance entre les deux circuits, fréquence des harmoniques (le couplage augmente avec la fréquence), sont à prendre en compte.

c) Sensibilité des convertisseurs

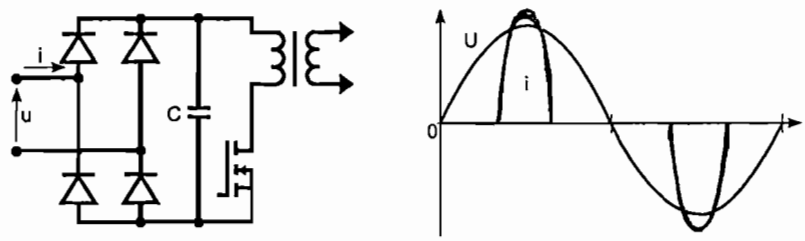
Il peut exister un risque de bouclage entre la régulation du convertisseur et les éléments de puissance du réseau. Une composante harmonique de tension cause, à travers la régulation du convertisseur, l'apparition d'un courant harmonique à la même fréquence. Ce courant circulant dans l'impédance du réseau augmente la tension harmonique du réseau. Le phénomène s'accroche sur une fréquence qui peut d'ailleurs être non-harmonique.

Quand le convertisseur fonctionne, la commutation d'un semi-conducteur à un autre n'est pas instantanée : pendant cette durée, l'effet du convertisseur est de provoquer un court-circuit entre deux phases du réseau ; la tension du réseau ne suit plus alors une sinusoïde parfaite mais présente une déformation appelée « encoche de commutation ».

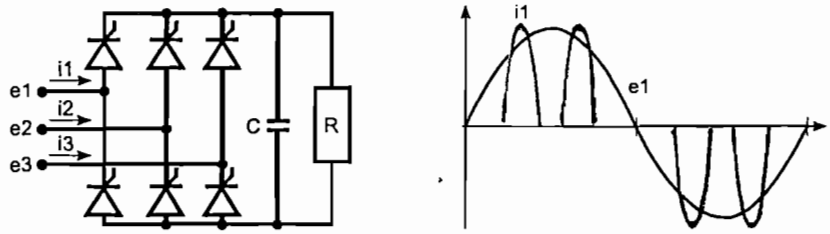
Quand on installe plusieurs convertisseurs sur le même réseau, il faut prendre garde à ces problèmes de commutation (par exemple action sur l'angle de retard à l'allumage ou sur les impulsions de commande des semi- conducteurs). Les figures (schémas) suivantes illustrent les types de convertisseurs et l'allure de courant.

Fig. I.18 Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires.

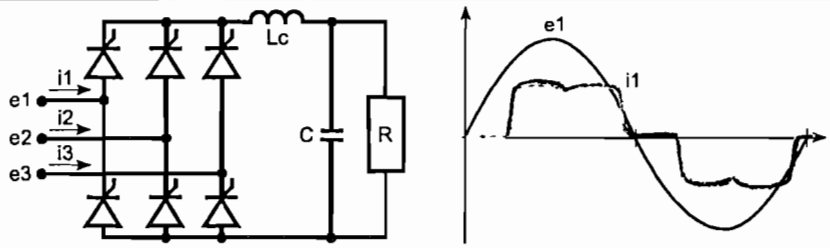
2 : Redresseur d'alimentation à découpage, par exemple :
- ordinateur
- électroménager



3 : Redresseur triphasé avec condensateur en tête par exemple : variateur de vitesse pour moteurs asynchrones



4 : Redresseur triphasé avec inductance de filtrage en continu, par exemple : chargeur de batterie.



5 : Redresseur triphasé avec inductance de lissage en alternatif, par exemple : ASI de forte puissance

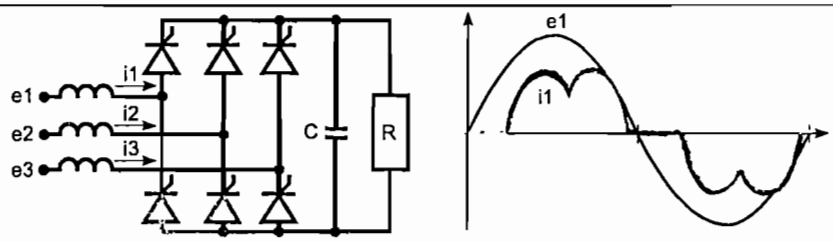


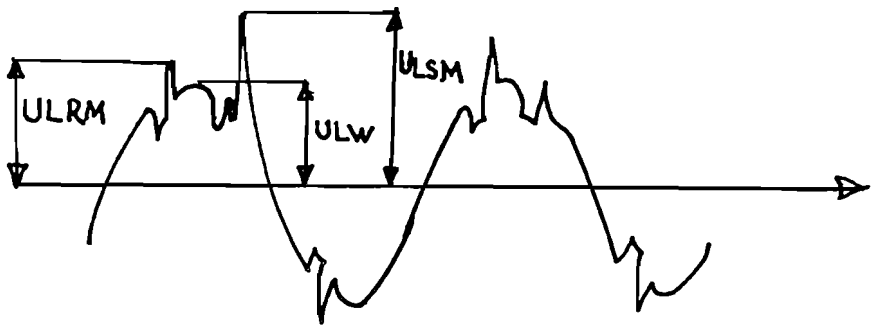
Fig. I.19 Exemple de spectre harmonique des courants absorbés par les charges de la figure I.18.

N°	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19
1	54	18	18	11	11	8	8	6	6
2	75	45	15	7	6	3	3	3	2
3	0	80	75	0	40	35	0	10	5
4	0	25	7	0	9	4	0	5	3
5	0	33	3	0	7	2	0	3	2

III.1.3. Effets des surtensions

La tension entre phases du réseau d'alimentation, mesurée entre les bornes d'entrée du convertisseur raccordé à la charge, peut présenter des déformations telles que représentées sur la figure ci-dessous.

Fig. I.20 : Tension du réseau aux bornes du convertisseur



La tension U_{LSM} peut provenir de la manœuvre d'un disjoncteur.

Où U_{LRM} : tension de pointe répétitive

U_{LSM} : tension de pointe non répétitive

U_{LW} : tension de crête

III.2. Effets à action différée (à terme)

Ils sont de nature thermique. Les principaux responsables en sont les harmoniques dans les condensateurs et les machines tournantes, les déséquilibres dans les machines tournantes. On peut également mentionner que la remontée de tension constituant l'ultime partie de tout creux de tension peut provoquer une surintensité dans les machines tournantes. Ceci donne lieu à des échauffements et des efforts électrodynamiques de brèves durées, susceptibles d'engendrer une fatigue de matériel préjudiciable à terme.

Ces effets ne se manifestent de façon appréciable qu'à partir d'un certain niveau d'amplitude des perturbations considérées, niveau qui peut d'ailleurs être variable selon la sensibilité des appareils susceptibles d'être perturbés.

III.2.1. Effets à terme des harmoniques

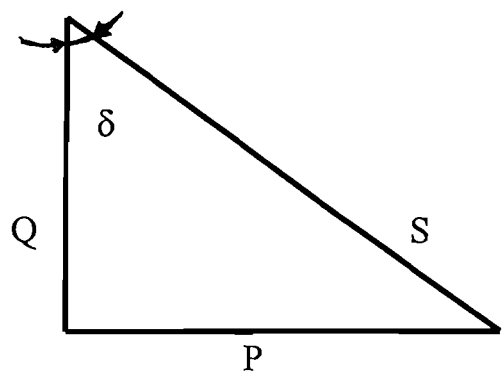
Hormis la fatigue mécanique des matériaux due aux vibrations, l'effet à terme est l'échauffement.

a) Effets sur les condensateurs

L'impédance des condensateurs diminue lorsque la fréquence augmente. De ce fait, si la tension est déformée, des courants harmoniques relativement importants circulent dans ces condensateurs destinés à améliorer le cos φ.

Par ailleurs, la présence d'inductances dans les différentes parties de l'installation fait apparaître des risques de résonances avec les condensateurs, ce qui peut augmenter fortement l'amplitude d'une harmonique dans les condensateurs. Ces pertes, causes de l'échauffement, sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans le diélectrique. Elles sont définies par l'angle de perte δ du condensateur, angle dont la tangente est le rapport entre les pertes et l'énergie réactive produite. On peut citer des tg δ de l'ordre de 10^{-4} du fondamental. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

Fig. I.21. : Triangle des puissances P, Q, S d'un condensateur.



$$tg\delta=\frac{P}{Q} \quad (15)$$

P : Puissance active

Q : Puissance réactive

S : Puissance apparente

b) Effets sur les machines et les transformateurs

Les harmoniques génèrent des pertes supplémentaires dans les machines, dans leurs stators (cuivre et fer) et principalement dans leurs circuits rotoriques (cage, amortisseurs, circuits magnétiques) par suite des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs d'harmoniques et le rotor. Notons que les mesures rotoriques (température, courants induits), sont difficiles sinon impossibles.

Dans les transformateurs, les pertes supplémentaires sont dues à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), à l'hystérésis et aux courants de FOUCAULT (dans le circuit magnétique).

Aujourd'hui, c'est la prolifération des appareils de faible puissance qui est la principale responsable de l'augmentation de la distorsion de tension dans les réseaux.

Pour tenir compte de ces différentes pertes, une formule empirique permet de calculer le coefficient de déclassement K à appliquer à un transformateur.

$$K=\frac{1}{\sqrt{1+0.1\sum_{n=2}^{n=\infty} H_n{}^{2}\, n^{1.6}}} \quad (16) \text{ avec } H_n = \frac{I_n}{I_1}$$

c. Effets sur les câbles et en particulier le conducteur neutre

Les courants harmoniques créent des pertes supplémentaires dans les conducteurs, accentuées par l'effet de la peau. Plus grave, lorsque les charges monophasées absorbent des courants harmoniques 3 et multiples de 3, ces courants se trouvent en phase et s'additionnent dans le conducteur de neutre.

A titre d'exemple, 75 % d'harmonique 3, le courant circulant dans le neutre vaut 2,25 fois le fondamental. Le courant dans chacune des phases vaut seulement :

$$\sqrt{1 + 0{,}75^2} = 1{,}25 \text{ fois le fondamental}$$

Une attention particulière doit donc être apportée au dimensionnement du conducteur neutre en présence de charges déformantes. Le régime **TN-C** est fortement déconseillé.

Le tableau suivant illustre les aspects chiffrés des degrés d'immunité d'appareillages vis-à-vis des tensions harmoniques U_N de rang N.

III.2.2. Effets d'un déséquilibre de tensions

Le réseau triphasé n'est pas toujours équilibré : il peut apparaître des tensions homopolaires et des tensions inverses. Les tensions homopolaires n'ont pas d'effets sur le fonctionnement des convertisseurs. Par contre, la présence d'une tension inverse provoque l'apparition de courants harmoniques non caractéristiques côté alternatif, et de tensions harmoniques non caractéristiques côté continu.

La norme française N F C 53-220 sur les convertisseurs à semi-conducteurs ; indique qu'un convertisseur doit fonctionner correctement tant que la tension inverse côté réseau n'excède pas 5 % de la tension directe. En cas de défaut du réseau, des taux instantanés supérieurs peuvent être observés. Par contre, en régime permanent, les distributeurs d'énergie électrique considèrent généralement qu'un taux de 2 % est rarement dépassé.

Pour les moteurs (synchrones et asynchrones), le système inverse crée un champ tournant dont la rotation s'effectue en sens inverse de celle du rotor. Par suite, apparaissent dans ce dernier, des courants de fréquence sensiblement égale au double de la fréquence d' alimentation du moteur. Ces courants peuvent provoquer des échauffements supplémentaires, notamment dans les cages à encoches profondes et les doubles cages pour lesquelles le coefficient d'augmentation de résistance due à l'effet pelliculaire peut atteindre des valeurs comprises entre 3 et 7 à 100 H_Z.

Le système homolaire n'exerce aucune influence en raison du couplage (triangle ou étoile, neutre ou non relié à la terre) des moteurs.

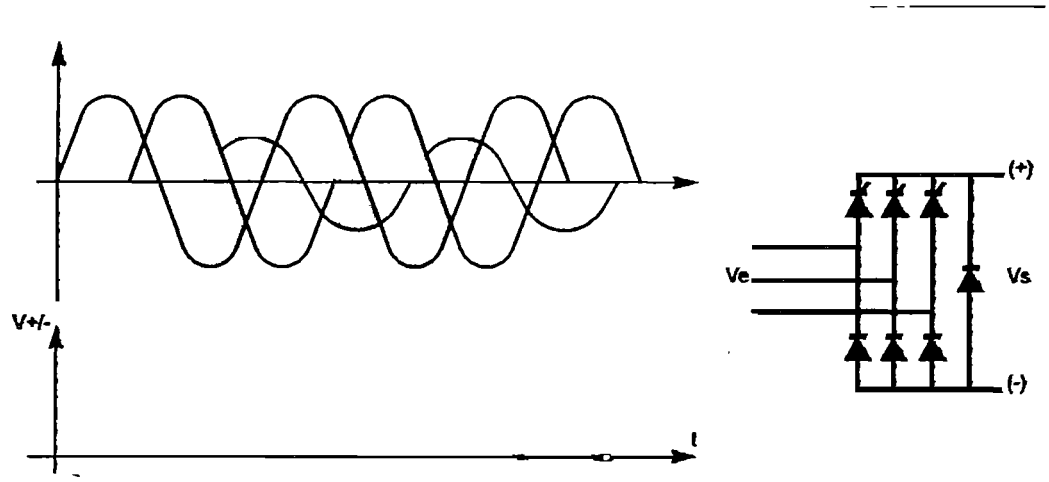
III.2.3. Les effets des déséquilibres de phase.

Outre les effets des composantes inverses sur les moteurs, le déséquilibre de tensions triphasées perturbe le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase (voire fig. ci-dessous).

De plus les harmoniques, qui modifient le passage à zéro des tensions, peuvent perturber la synchronisation de l'allumage de thyristors.

Dans le domaine des protections contre les risques électriques, ce type de perturbation est gênant car les déséquilibres de courant limitent l'utilisation du montage de Nicholson (mise en commun de quatre transformateur de courant) pour détecter des courants résiduels dus à un défaut d'isolement.

Fig. I.22 : Effet d'un déséquilibre de tensions sur un redresseur en pont de Graetz semi-contrôlé



III.2.4. Effets de coupures brèves et du flicker

a) Effets des coupures brèves

Quand la tension d'alimentation s'annule, elle ne supprime pas immédiatement la tension aux bornes du moteur. En effet, le flux rémanent du rotor ne peut s'éteindre instantanément à cause de la masse importante de fer.

Le champ tournant créé par le rotor induit alors dans le stator une force électromotrice résiduelle dont l'amplitude décroît exponentiellement avec la constante de temps $L/_R$ du rotor. La fréquence décroît de la même manière avec la vitesse de rotation.

Si au moment de la réapparition de la tension du réseau, cette dernière se trouve en opposition de phase avec une tension résiduelle dont l'amplitude a peu décrû, il se produit alors une surintensité élevée pouvant atteindre deux fois la pointe de démarrage du moteur, soit 12 à 15 fois son intensité de service.

Alors, on observe non seulement pour le moteur des échauffements supplémentaires et des efforts électrodynamiques dans les bobines, pouvant engendrer des ruptures d'isolation et des à-coups de couple dangereux pouvant conduire à des contraintes mécaniques anormales (en particulier sur les accouplements et les réducteurs) mais également des effets similaires sur un certain nombre d'organes auxiliaires tels que conducteurs, capteurs, etc...

b) Effets du flicker, sensibilité des sources lumineuses

Les fluctuations de tension n'ont généralement pas d'influence sur le bon fonctionnement des appareils connectés, la variation étant inférieure aux limites contractuelles de variation de tension d'alimentation. Par contre, ces fluctations peuvent pour différents types d'éclairage affecter le flux lumineux. Le tableau (I.4) regroupe les principales caractéristiques des différentes sources lumineuses et leurs comportements selon la tension.

En résumé, il est possible d'écrire que toutes les sources lumineuses sont sensibles aux variations de tension, et dans l'ordre décroissant de sensibilité :

- les lampes à vapeur de mercure ou de sodium, mais elles éclairent des lieux où le papillotement est peu gênant (espaces extérieurs, monuments, routes, etc) ;
- les lampes à incandescence, fluorescentes.

Les récepteurs de télévision ainsi que les écrans des systèmes informatiques ont une certaines sensibilité au flicker, elle est très variable suivant les appareils, aucune étude n'a été faite à ce sujet.

Tableau I.4. Principales caractéristiques et comportement aux variations de tension des différentes sources lumineuses.

Sources lumineuses	fluorescence	Incandescence	Vapeur de sodium à basse pression	vapeur de sodium à haute pression	vapeur de mercure à haute pression
type de lampes	rectiligne, circulaire, monoculot, compact miniature ou de substitution	Standard, fantaisie halogène BT ou TBT		avec différents culots	ballon fluorescent lumière mixte à iodures métalliques avec différents culots
puissance électrique (w)	de 4 à 65	de 5 à 2000	de 18 à 180	de 35 à 1000	de 35 à 3 500
efficacité lumineuse $Im.W^{-1}$	de 35 à 104	de 8 à 25	de 100 à 200	de 37 à 150	de 11 à 120
Comportement à la mise sous tension	le plein flux lumineux est obtenu lors de l'amorçage. Un courant de préchauffage de quelques secondes peut atteindre 2 In	le plein flux lumineux est immédiat. La surintensité peut atteindre 14 In.	un délai de 5 à 10 minutes est nécessaire après la mise sous tension, pour obtenir le plein flux lumineux. Il n'y a pas de surintensité notable.	un délai de 5 à 7 minutes est nécessaire après la mise sous tension, pour obtenir le plein flux lumineux. La surintensité peut atteindre 1,2 à 1,3 In.	un délai de 1 à 4 minutes est nécessaire après la mise sous tension, pour obtenir le plein flux lumineux. La surintensité peut atteindre 1,5 à 1,7 In.
Comportement vis à vis des fluctuations de la tension d'alimentation	n'est perturbée que par des fluctuations 2 à 3 fois plus fortes (par rapport à l'incandescence) en raison de la rémanence lumineuse du dépôt fluorescent.	particulièrement sensible aux faibles variations de tension répétées en raison de la faible constante thermique des filaments (10 à 200 ms).	très sensible, puisque son inertie thermique est celle du plasma de la décharge lumineuse.	Idem à vapeur de sodium à basse pression	Idem à vapeur de sodium à basse pression.

II^{ème} partie :

ETUDE TECHNIQUE D'ATTENUATION ET DE PROTECTION CONTRE LES EFFETS DES PERTURBATIONS AU CENTRE DE TELECOMMUNICATIONS DE BUJUMBURA I DE L'ONATEL ET AU CENTRE DE TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITE DE KABONDO

CHAP.I. PRESENTATION GENERALE DE L'ENTREPRISE ONATEL

I.1. Historique brève

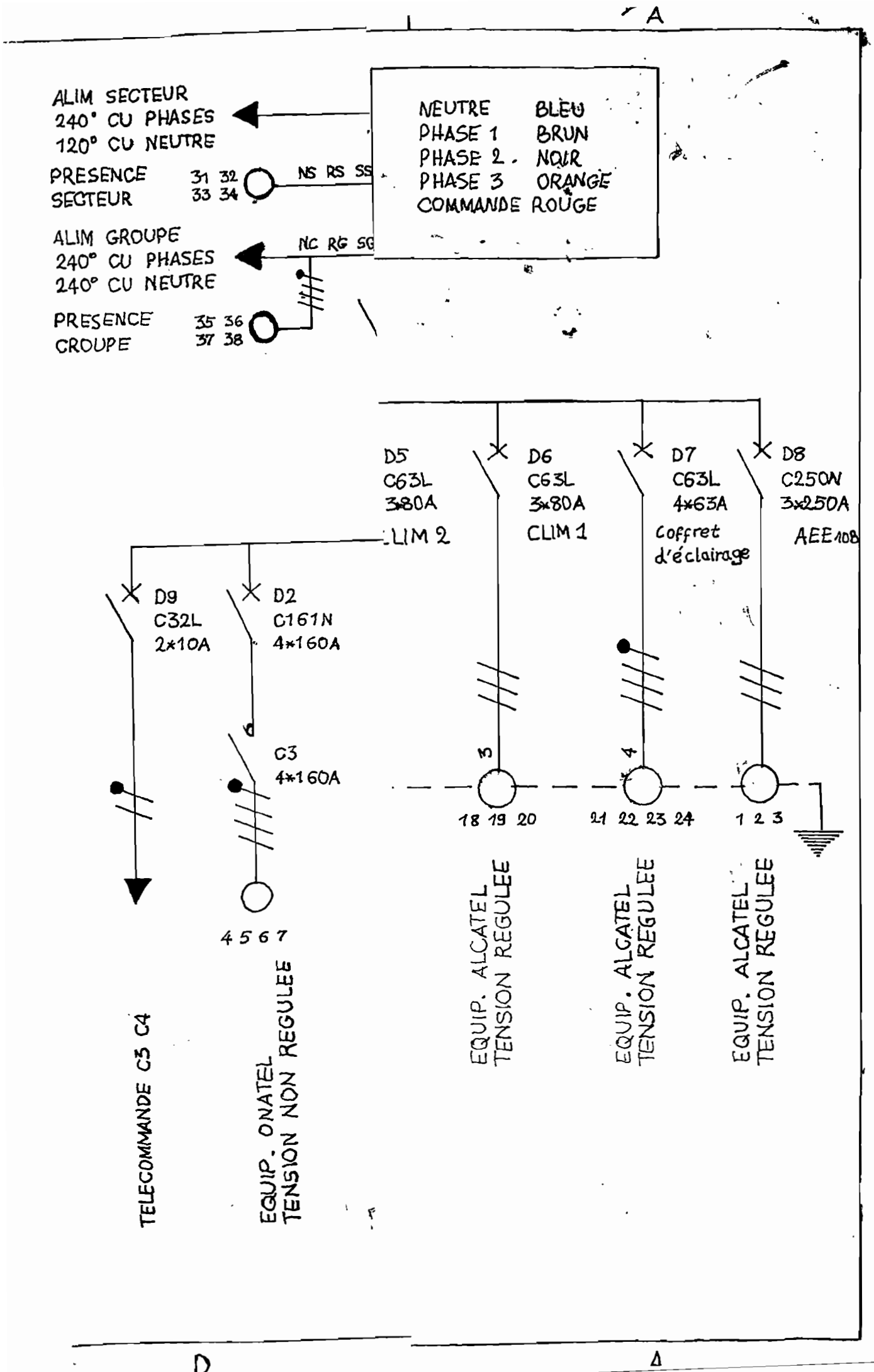
L'Office National des Télécommunications (ONATEL) a été crée le 8/11/1979. Elle est un établissement public à caractère industriel et commercial, doté d'une personnalité morale et placé sous la tutelle administrative du Ministre ayant les télécommunications dans ses attributions.

L'ONATEL a pour objet la gestion des télécommunications. Par télécommunications, il faut entendre les transmissions de message de tous les genres par supports matériels (fils, câbles, ou autres), ou par radio, dans le cadre d'un service public.

Dans le cadre de ces transmissions de message, l'ONATEL exploite le Téléphone, le Télex et la Télécopie ou Fax. Concernant l'Internet, avec un backbone national disponible pour ses clients, l'ONATEL est aussi un fournisseur d'accès aux services Internet (Dial up, Cybercafé, I.S.P.). Ces derniers temps, l'ONATEL, tout comme les autres opérateurs de réseaux publics, a abandonné le service Télex qui est actuellement une technologie obsolète.

I.2. Le schéma électrique de l'installation de puissance

Ce schéma nous montre la répartition des équipements et leurs protections.


A
ALIM SECTEUR
240° CU PHASES
120° CU NEUTRE
PRESENCE SECTEUR
31 32 33 34
NS RS SS
NEUTRE BLEU
PHASE 1 BRUN
PHASE 2 NOIR
PHASE 3 ORANGE
COMMANDE ROUGE
ALIM GROUPE
240° CU PHASES
240° CU NEUTRE
NC RG SG
PRESENCE GROUPE
35 36 37 38
D5 C63L 3x80A CLIM 2
D6 C63L 3x80A CLIM 1
D7 C63L 4x63A Coffret d'éclairage
D8 C250N 3x250A AEE108
D9 C32L 2x10A
D2 C161N 4x160A
C3 4x160A
3
4
18 19 20
21 22 23 24
1 2 3
4 5 6 7
TELECOMMANDE C3 C4
EQUIP. ONATEL TENSION NON REGULEE
EQUIP. ALCATEL TENSION REGULEE
EQUIP. ALCATEL TENSION REGULEE
EQUIP. ALCATEL TENSION REGULEE
D
A

I.3. Inventaire des principaux récepteurs et équipements générateurs des perturbations

I.3.1. A la station d'énergie

- Trois redresseurs $48V_{DC}$ – 200A en parallèle
- Trois onduleurs $48V_{DC}$ / $220V_{AC}$ monophasés 50 H_Z en parallèle d'une puissance unitaire de 3,3 KVA.
- Un convertisseur $48V_{DC}$ / 130 V_{DC} – 20A

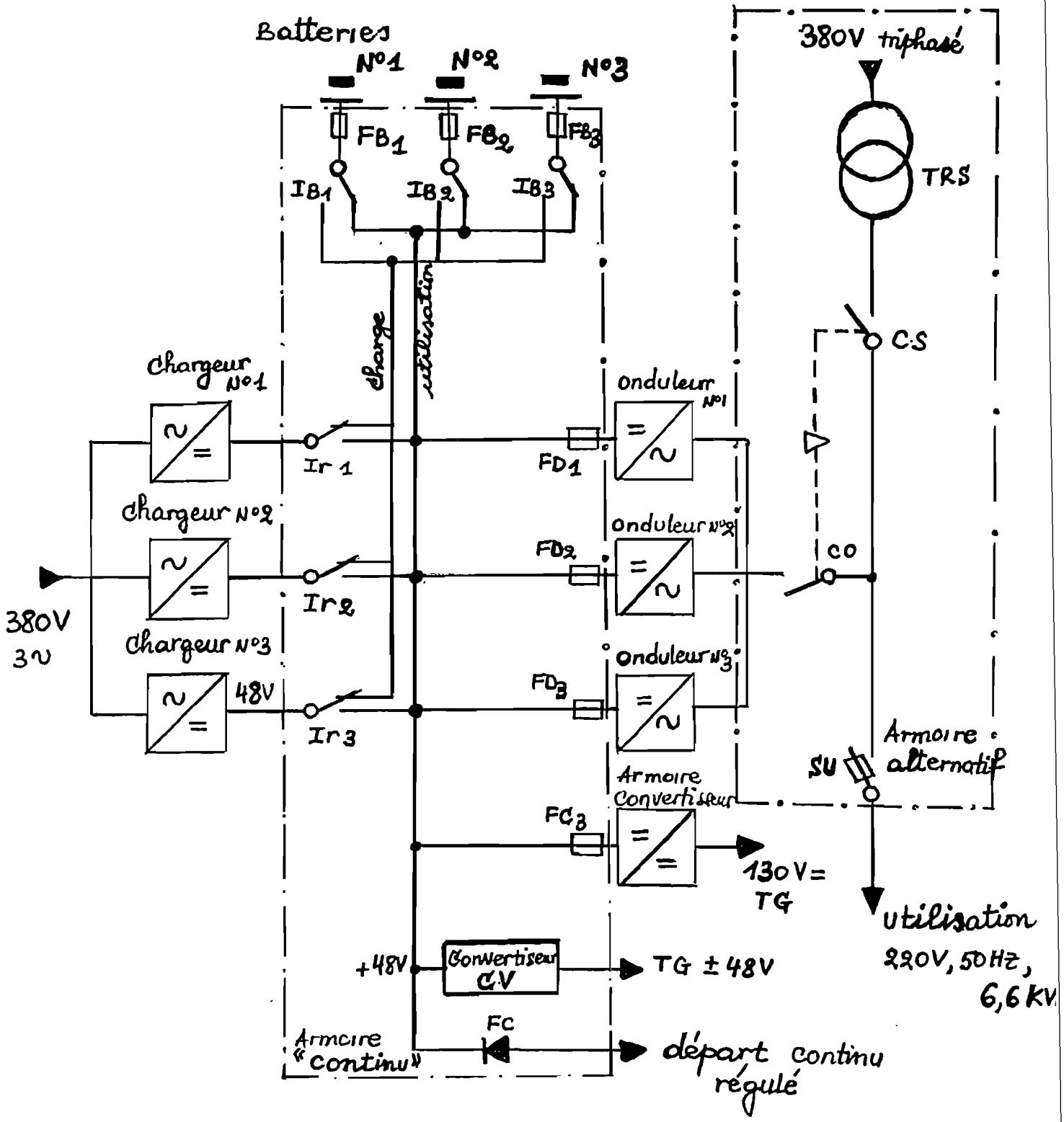
I.3.2. Autres récepteurs et équipements

- Redresseurs triphasés 380V, 50 H_Z

Mode de redressement	Triphasé graëtz	Hexaphasé avec décalage de phase de + 15°	
Elément de redressement	Mixte, 3 diodes et 3 thyristors	6 thyristors	
Calibre nominal In	160A	250A	600A
Courant permanent en limitation	170A	265A	630A
Réglage de tension	49,5V à 54 V		

- Quatre gros climatiseurs triphasés 380-415V d'une puissance de 15 KW chacun.
- Un bâti équipé pour 5 onduleurs modulaires $48V_{DC}$ / 220 V_{AC} mono 50 H_Z d'une puissance unitaire de 1,5 KVA.

Le schéma synoptique de la station d'énergie illustre le mode adopté pour le branchement de ces équipements.



I.4. SCHEMA SYNOPTIQUE STATION D'ENERGIE

CHAP.II. DISPOSITIFS ET METHODES D'ATTENUATION DES PERTURBATIONS

II.1. Atténuation du Flicker

Différents remèdes sont envisageables. Ils sont présentés dans les paragraphes suivants en commençant par les plus faciles à mettre en œuvre.

II.1.1. Choix du mode d'éclairage

Puisqu'il existe des sources lumineuses plus ou moins sensibles au flicker (Fig.I.22), la solution évidente et la première à considérer est de bien les choisir. Le tableau de la figure I.22 indique que les lampes fluorescentes ont une sensibilité aux variations de tension deux à trois fois plus faible que les lampes à incandescence. Elles s'avèrent donc à être le meilleur choix. De plus, la recherche des fabricants, pour améliorer l'efficacité lumineuse et réduire les dimensions de leurs produits, a abouti à la création des « ballasts électroniques » ou alimentations HF (> 20 H_Z) des fluorescents (tubes ou lampes fluo-compactes) :

- efficacité améliorée de 10 %
- réduction de consommation de l'ordre de 20 %.

Le comportement des sources lumineuses ainsi réalisées, vis-à-vis du phénomène de scintillement, est aussi amélioré, mais il faut noter que :

- leur cosφ est voisin de 0,5
- les courants harmoniques qu'elles génèrent sont très importants
  (H_3 = 30 % H_1).
- pour adapter le niveau d'éclairement elles doivent être associées à des gradateurs spéciaux.

II.1.2. Onduleur

Dans le cas où la gêne due au flicker reste limitée à un groupe d'utilisateurs bien identifié, il est envisageable de « nettoyer » le départ éclairage par la mise en œuvre d'un régulateur de tension ou d'un onduleur. L'investissement d'une telle installation peut être relativement faible, mais cette solution n'est qu'un remède.

II.1.3. Modification du perturbateur

Le flicker peut être atténué en modifiant le cycle de fonctionnement de la charge perturbatrice : rythme de soudure, rapidité de remplissage du four,...

Lorsque le démarrage direct et fréquent d'un moteur est cause de flicker, un mode de démarrage réduisant la surintensité peut être adopté.

Dans certains cas particuliers, une charge tournante peut provoquer des fluctuations de tension (par exemple un compresseur volumétrique). Un volant d'inertie sur son arbre moteur les réduit sensiblement.

II.1.4. Modification du réseau

Selon la structure du réseau, deux méthodes sont envisageables :

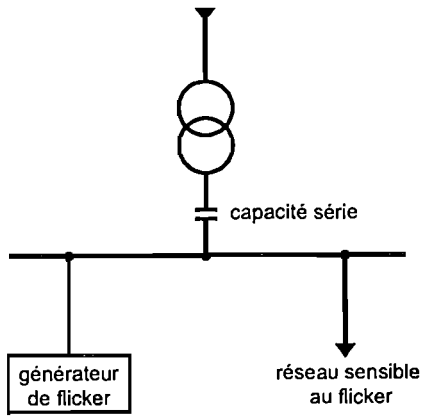
- soit éloigner voire isoler la charge perturbatrice des circuits d'éclairage.
- soit augmenter la puissance de court-circuit du réseau en diminuant son impédance au point de couplage commun (PCC)

Pour cela, différents schémas sont possibles :

- L'introduction de capacité en série dans le réseau en amont du PCC à la charge perturbatrice et aux circuits sensibles au flicker, peut réduire de moitié les fluctuations de tension. Cette solution présente un avantage supplémentaire, mais aussi un inconvénient :

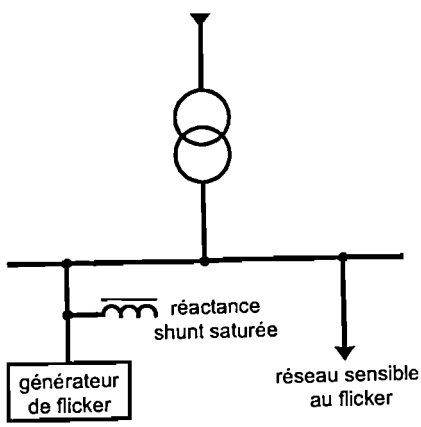
- l'avantage : elle assure en plus, une production d'énergie réactive.
- l'inconvénient : il faut protéger les condensateurs contre les courts-circuits.

Fig. II.1. a)



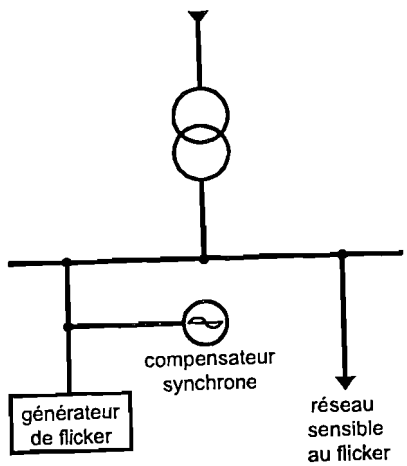
- Le raccordement d'une réactance shunt saturée au plus près de la source du flicker peut réduire d'un facteur de 10 les fluctuations supérieures à la tension nominale ; mais elles est inopérante pour les fluctuations inférieures parce que la self ne sature pas. Ces réactances présentent des inconvénients : elles consomment du courant réactif, elles produisent des harmoniques, et leur prix est plutôt élevé.

Fig. II.1.b.



- La mise en parallèle d'un compensateur synchrone au plus près de la source du flicker conduit à une réduction des fluctuations de 2 à 10 % et jusqu'à 30 % avec des systèmes modernes de contrôle électroniques. Le compensateur est parfois complété de réactances (linéaires) d'amortissements installés sur l'alimentation. Actuellement les compensateurs synchrones sont remplacés par des compensateurs statiques. Mais ils peuvent s'avérer encore intéressants s'ils sont déjà installés et peuvent être remis en service.

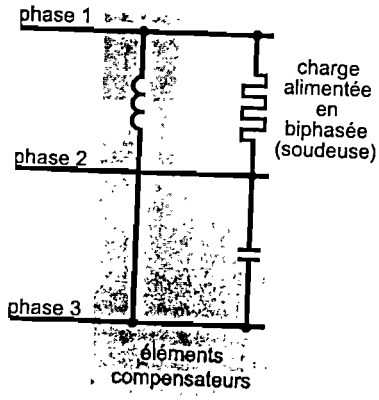
Fig. II.1.c.



II.1.5. Le convertisseur de phase

Les chutes de tension produites par des charges fluctuantes monophasées sont fortement réduites par des convertisseurs de phase, groupes tournants, transformateurs à couplages spéciaux ou ***pont de steinmez***. Ce dernier permet le rééquilibrage d'une charge résistive monophasée.

Fig. II.2. Montage en pont de Steinmetz pour la compensation d'une charge biphasée (schéma de principe).



Ainsi une charge monophasée :

$$\mathbf{S_m = P_m + j\ Q_m}$$

peut être compensée par une charge **–jQ** sur la même phase. Il en résulte une charge monophasée purement résistive $\mathbf{P_m}$ qui peut être compensée en ajoutant admittances selfique et capacitive sur les deux autres branches. Ce montage équivaut à une charge triphasée équilibrée purement résistive de $\frac{P_m}{\sqrt{3}}$

Quand la charge monophasée $\mathbf{S_m}$ est fortement fluctuante, un dispositif d'électronique de puissance peut permettre une compensation dynamique, pratiquement en temps réel. Idem en triphasé déséquilibré. Dans ce cas, le pont de steinmetz devient un « **compensateur statique** ».

II.1.6. Le compensateur statique (S.V.C.)

Cet équipement appelé S.V.C. (Static Var Compensator) est destiné à faire une compensation automatique de la puissance réactive. Son emploi permet également une réduction du flicker de 25 % à 50 %.

Une formule donne une valeur estimative du coefficient de réduction du flicker réalisé avec un SVC :

$$R_{svc}=1+0.75.\frac{S_{svc}}{S_f}$$

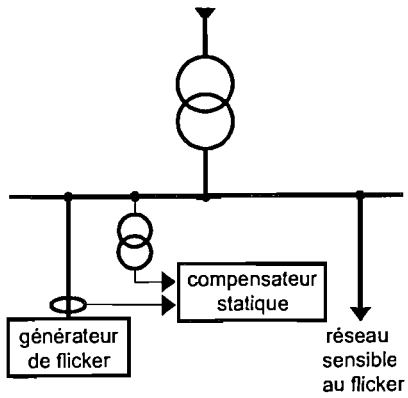
avec

R_{SVC} = facteur de réduction

S_{SVC} = Puissance du compensateur (en var)

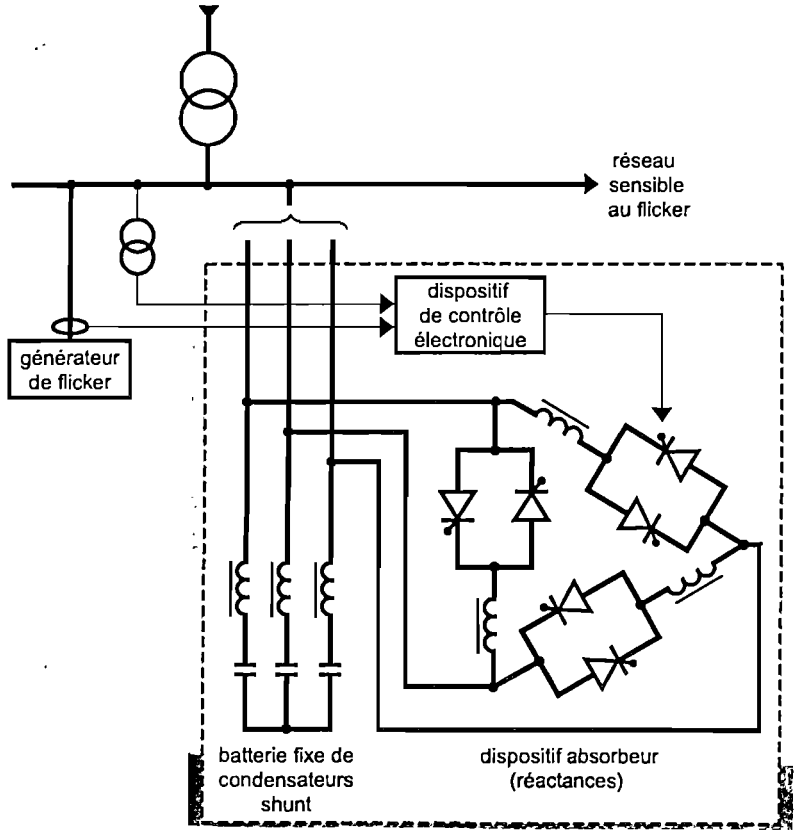
S_f = Puissance du générateur du flicker (en VA)

Fig. II.3. Schéma d'installation d'un compensateur statique



Son schéma de principe est celui de la figure II.4. Il comporte des inductances de compensation, une batterie fixe de condensateurs shunt montée en filtre et un dispositif électronique à base de thyristors. Le dispositif électronique a pour rôle de faire varier la consommation d'énergie réactive des inductances pour maintenir pratiquement la puissance réactive absorbée par l'ensemble générateur du flicker batterie fixe de condensateurs, et inductances de compensation.

Fig. II.4. : Schéma simplifié d'un compensateur statique



Cette compensation phase par phase est d'intérêt évident avec les fours à arc dont les régimes de fonctionnement sont particulièrement déséquilibrés. Les performances d'un tel compensateur sont remarquables, à titre d'exemple le tableau de la figure II.5. qui regroupe quelques caractéristiques exigées pour une aciérie polonaise (**études et matériel Merlin Gerin**)

Fig. II.5. Performances obtenues par l'utilisation d'un compensateur statique pour four à arc

Tension nominale du réseau contrôlé	30 kV,
Puissance du SVC	50 MVAr,
Facteur de puissance	$\cos\varphi \geq 1{,}5$ %
Taux de distorsion en tension	THD $\leq 1{,}5$ %
Fluctuations de tension	$\Delta U / U_N \leq 2$ %
Déséquilibre de tension	$U / U_N \leq 1{,}5$ %
Pst (en 30 KV)	1.1

Le tableau ci-dessous (figure II.6) résume, en fonction du type de la charge à l'origine du flicker, les remèdes qu'il est possible d'apporter, et leur rentabilité.

Fig. II.6. Remède en fonction du type de charge à l'origine du flicker

Remèdes	charges fluctuantes							
	Démarrage moteur		moteur à charge fluctuante		four à arc		soudeuse	
Modification du perturbateur	+	c	-		+	b	+	b
Volant d'inertie	-		+	a	-		-	
Convertisseur tournant	+	c	+	c	+	b	+	c
Modification du réseau	+	b	+	b	+	a	+	b
Capacité série	+	b	+	b	+	c	+	b
Réactance shunt saturée	-		-		+	a	-	
Réactance de découplage	c	+	-		c	+	+	c
Compensateur synchrone	+	c	c	+	+	a	+	b
Convertisseur de phase	-			+	+	c	+	b
Compensateur statique	+	b	+	b	+	a	+	b

- : techniquement inadapté + : techniquement possible

a : souvent économique b : parfois rentable c : rarement rentable

II.2. Réduction des harmoniques

Aujourd'hui tout électricien doit connaître les solutions de réduction d'harmoniques, soit pour prendre les bonnes dispositions lors de l'installation de matériels pollueurs, soit pour concevoir une installation nouvelle en toute connaissance de cause.

II.2.1. Les solutions traditionnelles

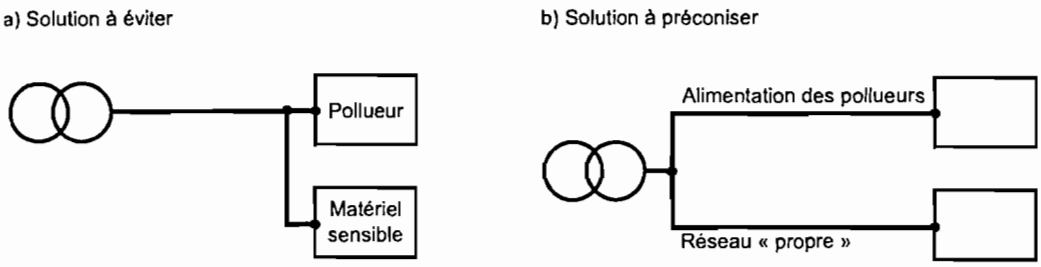
Les solutions ci-après sont fonction du but recherché et des pollueurs/ pollués en présence. Elles utilisent des composants passifs : inductances – condensateurs – transformateurs et/ou jouent sur le schéma de l'installation.

Dans la plupart des cas, l'objectif est de diminuer le taux de distorsion en tension au niveau d'un point de raccordement de plusieurs charges.

a) Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur. Une alimentation par câble distinct est préférable. Quand on est en présence d'un pollueur de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur **MT/BT**.

Fig. II.7. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.



b) Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le cosφ, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents. Les fréquences typiques d'accord sont pour un fondamental 50 H_Z : 135 H_Z (rang 2,7), 190 H_Z (rang 3,8) et 225 H_Z (rang 4,5).

II.2.1. Les solutions traditionnelles

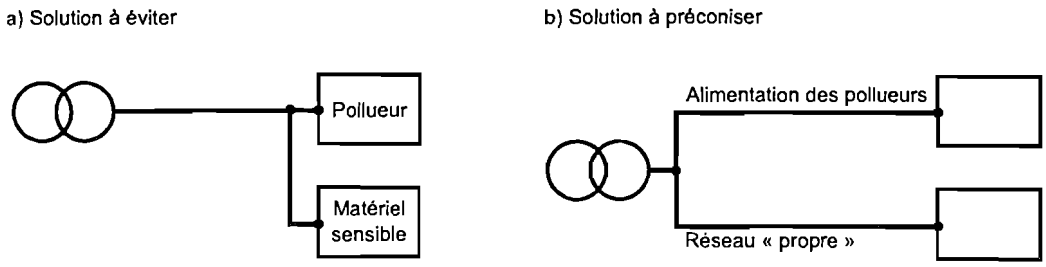
Les solutions ci-après sont fonction du but recherché et des pollueurs/ pollués en présence. Elles utilisent des composants passifs : inductances – condensateurs – transformateurs et/ou jouent sur le schéma de l'installation.

Dans la plupart des cas, l'objectif est de diminuer le taux de distorsion en tension au niveau d'un point de raccordement de plusieurs charges.

a) Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur. Une alimentation par câble distinct est préférable. Quand on est en présence d'un pollueur de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur **MT/BT**.

Fig. II.7. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.



b) Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le cosφ, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents. Les fréquences typiques d'accord sont pour un fondamental 50 H_Z : 135 H_Z (rang 2,7), 190 H_Z (rang 3,8) et 225 H_Z (rang 4,5).

Ainsi, pour le fondamental la batterie de condensateurs peut assurer sa fonction d'amélioration du cosφ tandis que l'impédance élevée de l'inductance limite l'amplitude des courants harmoniques.

c) Filtres passifs d'harmoniques

A l'inverse du cas précédent, il s'agit ici d'utiliser un condensateur en série avec une inductance de façon à obtenir l'accord sur un harmonique de fréquence donnée. Cet ensemble placé en dérivation sur l'installation présente une impédance très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré.

Les filtres passifs contribuent à la compensation d'énergie réactive de l'installation.

II.2.2. Convertisseurs propres et compensateurs actifs

Avant de présenter plus en détail les convertisseurs propres et les compensateurs actifs, il est intéressant de constater qu'il existe une certaine identité technologique entre ces deux dispositifs.

En effet :

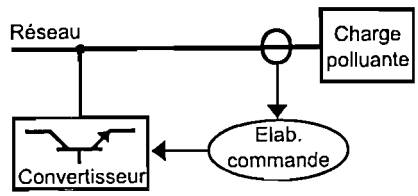
- Lorsque la stratégie de commande d'un pont redresseur impose la circulation d'un courant réduit à son seul fondamental, il s'agit alors de **prélèvement sinusoïdal**, et le redresseur est alors qualifié de « **propre** ».

- Lorsque la consigne de courant appliquée à cette même commande est par exemple égale au contenu harmonique du courant absorbé par une charge perturbatrice tierce, alors le redresseur entraîne l'annulation globale des harmoniques au point de couplage : il s'agit là de **compensateur actif.**

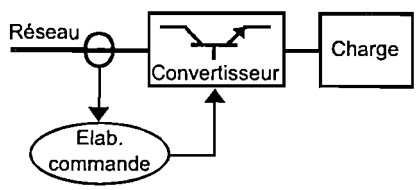
Ainsi une même topologie de puissance est susceptible de satisfaire aux deux types de besoins distincts que sont la non-pollution et la dépollution : seule la stratégie de commande diffère.

Fig. II.8. Convertisseur « propre » et compensateur actif

a) convertisseur « propre »



b) Compensateur actif « Shunt »



a) Convertisseurs « propres »

Qu'il s'agisse de redresseurs, de chargeurs de batteries, de variateurs de vitesse pour moteur à courant continu ou de convertisseurs de fréquence, l'élément en relation directe avec convertisseurs de fréquence, l'élément en relation directe avec le réseau reste un « **redresseur** ».

C'est ce même composant et plus généralement l'étage d'entrée (**puissance et commande**) qui détermine le comportement harmonique du système complet.

- **Principe du prélèvement sinusoïdal (en monophasé)**

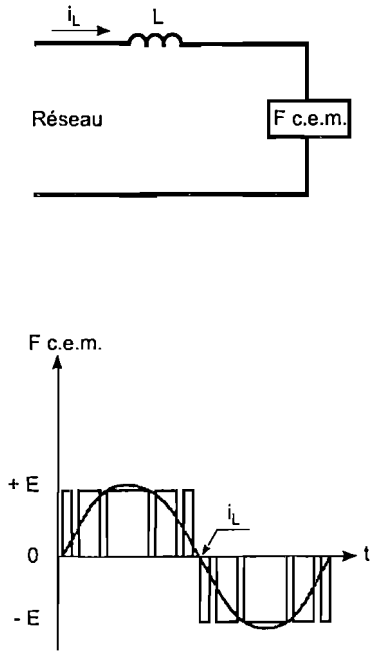
Il consiste à forcer le courant absorbé à être sinusoïdal. Les convertisseurs propres utilisent de façon générale la technique de commutation dite **MLI** (modulation de largeur d'impulsion) ; souvent nommée **PWM** (Pulse Width Modulation).

On distingue deux grandes familles de convertisseurs selon que le redresseur se comporte comme une source de tension (cas le plus général), ou une source de courant (cas spécial).

- **Convertisseur source de tension**

Dans ce cas, le convertisseur se comporte vis-à-vis du réseau comme **une force contre-électromotrice**, un générateur de tension sinusoïdal, et le courant sinusoïdal est obtenu en intercalant une inductance entre le réseau et la source de tension.

Fig. II.9. Schéma monophasé équivalent à un convertisseur MLI de tension



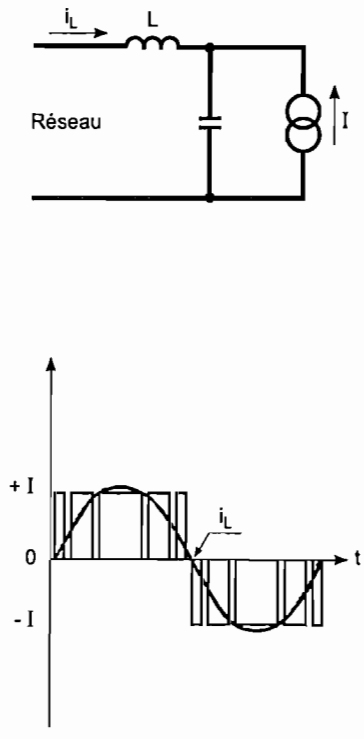
La modulation de la tension est obtenue par l'intermédiaire d'un asservissement visant à maintenir le courant au plus près de la sinusoïde de tension souhaitée.

Même si d'autres charges non linéaires élèvent le taux de distorsion de la tension du réseau, la régulation peut agir de façon à prélever un courant sinusoïdal.

- **Convertisseur source de courant**

Le convertisseur se comporte dans ce cas comme un « **générateur** » de courant haché. Un filtre passif relativement conséquent est indispensable pour restituer côté secteur un courant sinusoïdal. Ce type de convertisseur est utilisé dans des applications spécifiques, par exemple pour fournir un courant continu très bien régulé.

Fig. II.10. Schéma monophasé équivalent à un redresseur MLI de courant



b) Le compensateur actif « Shunt »

- **Principe de fonctionnement**

Nous pouvons illustrer le concept de compensateur actif « **Shunt** » à travers l'analogie électroacoustique. L'observateur n'entend plus la source de bruit **S** si une source de bruit secondaire S′ génère un contre-bruit.

Les ondes de pression générées par le haut – parleur sont de même amplitude et en opposition de phase avec celle de la source. C'est le phénomène d'interférences destructrices. Cette analogie permet d'illustrer le concept même du compensateur actif « **shunt** » : L'objectif est de minimiser sinon d'annuler du point de raccordement les harmoniques du courant (ou de la tension), par injection d'un courant (ou d'une tension) « ad-hoc ».

Fig. II.11. Principe du contre-bruit acoustique

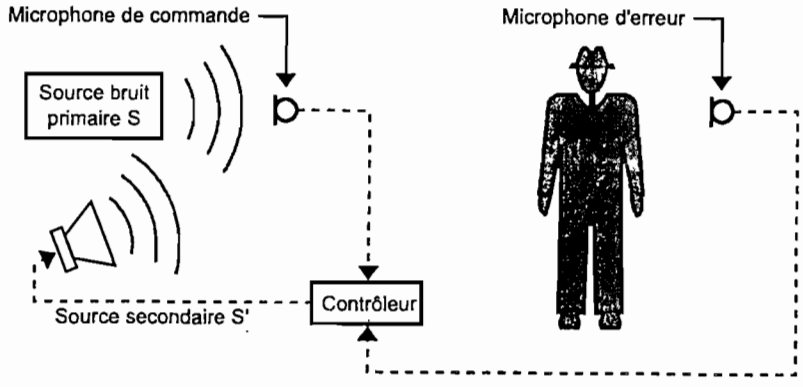


Fig. II.12. Compensateur actif dit "shunt » génère un courant harmonique qui annule les harmoniques de courant coté réseau

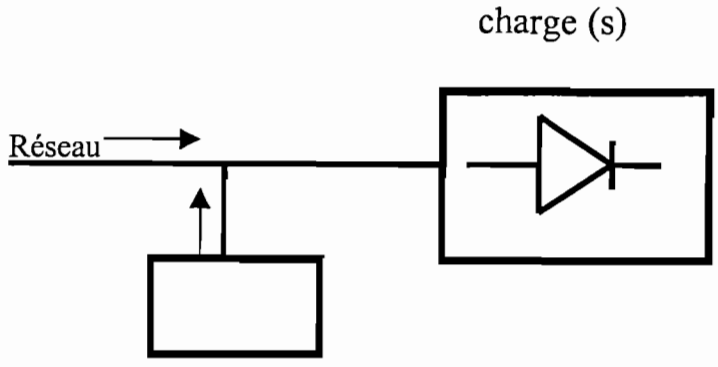
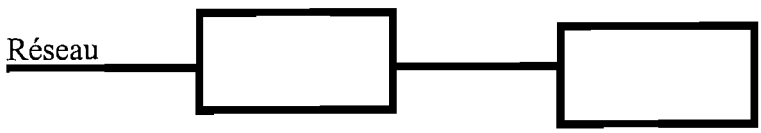


Fig. II.13. Compensateur actif dit « série »génère une tension harmonique qui garantit une tension sinusoïdale aux bornes de la charge.



Les besoins en termes de dépollution harmoniques sont multiples, car on peut souhaiter garantir :

- la non-pollution d'un réseau (propre) par une charge perturbatrice,
- le bon fonctionnement d'une charge sensible (ou d'un réseau sensible) dans un environnement pollué,
- les deux objectifs précédents de façon simultanée.

Le problème de dépollution peut ainsi se traiter à deux niveaux (exclusifs ou combinés) :

- dépollution parallèle par source de courant en aval du point considéré : c'est la solution « **shunt** »
- dépollution série par mise en œuvre d'une source de tension en amont.

Les structures que nous qualifierons d' « hybrides » sont celles qui combinent en fait la mise en œuvre simultanée des deux solutions. Elles utilisent des filtres passifs et des compensateurs actifs.

c) Mise en œuvre d'un compensateur « shunt »

Notre objectif n'est pas ici de donner un « guide de sélection » entre les différents types de dépollueurs harmoniques, tant actifs que passifs, mais plutôt de montrer les critères d'insertion de compensateurs actifs.

Un guide de choix supposerait de plus que les différentes solutions exposées soient disponibles en termes de produits. Aujourd'hui tant les solutions « traditionnelles » que les solutions hybrides nécessitent des études sérieuses et une solution adaptée. Seuls les compensateurs actifs shunts sont commercialisés (étude simple).

Ainsi, nous nous attacherons plus particulièrement à identifier les principaux paramètres que l'utilisateur potentiel de compensateurs actifs se doit de connaître et de renseigner, afin d'être à même d'effectuer un choix pertinent.

Ces paramètres sont :

- **Connaître les « mécanismes »**

La difficulté majeure des phénomènes harmoniques est certainement liée à leur très faible visibilité : en effet, s'il est souvent facile de constater une dégradation de la qualité de l'onde (de tension et/ou de courant) en un ou plusieurs points, la fonction combinatoire entre les différentes sources (autonomes ou non), charges, et la topologie du réseau n'est pas triviale. De plus, l'association entre les phénomènes harmoniques (souvent ignorés) et les dissyfonctionnements constatés dans les constituants du réseau (souvent aléatoires) n'est pas instinctive.

- **Connaître le réseau et sa topologie**

Le premier pré-requis est donc relatif à l'environnement du réseau : La mise en œuvre d'un dépollueur requiert une connaissance de l'ensemble du réseau (source, charges, lignes, condensateurs), et pas seulement une vision fragmentaire limitée à la seule zone susceptible de subir la pollution.

- **Faire un « état des lieux »**

Dans une « boîte à outils » nous aurons pris soin de placer un analyseur d'harmoniques. Ce dernier est indispensable pour quantifier la pollution en divers points d'une installation existante.

- **Identifier et caractériser les pollueurs**

Il est indispensable d'identifier le (ou les) pollueur (s) majoritaire (s), ainsi que leurs spectres respectifs. Ces derniers peuvent être obtenus par mesure, ou bien par lecture des spécifications techniques fournies par chaque constructeur.

- **Définir l'objectif de la dépollution**

Le deuxième pré-requis est relatif à l'objectif même de l'action envisagée : qu'il s'agisse de remédier à des dysfonctionnements constatés ou de se mettre en conformité avec les prescriptions d'un distributeur, ou encore d'un constructeur de récepteur non linéaire, la démarche diffère notablement. Cette réflexion doit également intégrer les évolutions du réseau à court terme.

Cette étape doit permettre d'identifier :

- le type de compensation (globale ou locale),
- le niveau de puissance au nœud considéré,
- le type de correction souhaitée (sur les distorsions de tension et/ou de courant).
- Le besoin de compensation de l'énergie réactive.

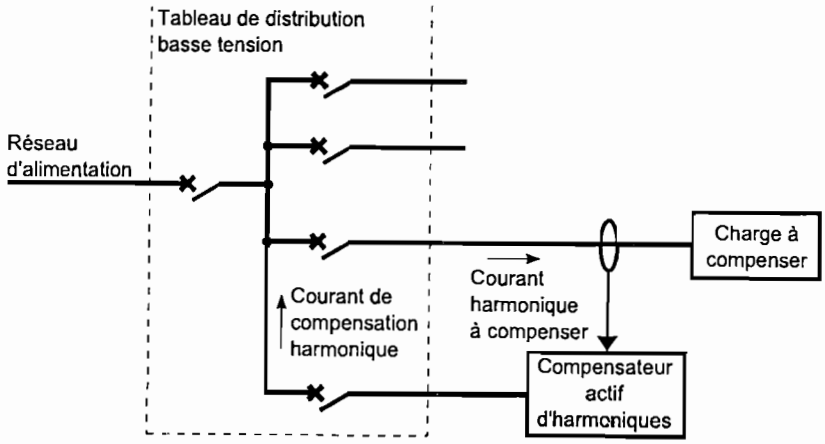
Il est donc clair que le choix d'une solution « active » (quelle qu'elle soit) ne peut être fait a priori, mais qu'il est le résultat d'une démarche analytique dans laquelle le coût du seul compensateur n'est pas forcément un facteur prépondérant. Les compensateurs actifs ont de sérieux avantages vis-à-vis des filtres passifs.

Mais il n'y a pas concurrence notamment pour les installations existantes déjà équipées de filtres passifs. L'insertion d'un compensateur actif série ou parallèle est une bonne solution.

d) Point d'insertion d'un compensateur Shunt

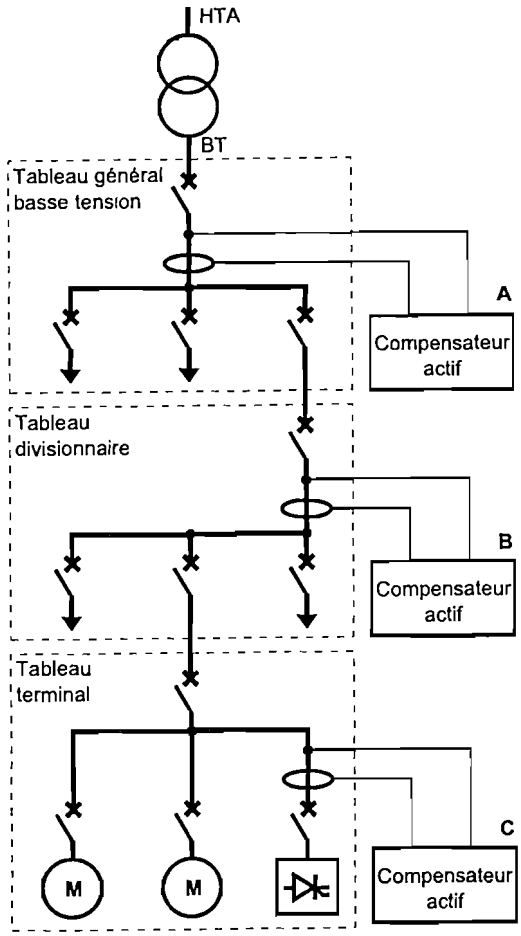
Le principe de raccordement d'un compensateur actif « Shunt » est représenté par Fig.II.14.

Fig. II.14. Raccordement d'un compensateur actif « shunt » - principe



Son insertion en mode parallèle est ici réalisée au tableau basse tension (T.B.T.) d'une installation, et la seule interaction avec le réseau à dépolluer est l'insertion des capteurs de courant. En ce qui concerne l'insertion du compensateur actif, la dépollution peut être envisagée à chaque niveau de l'arborescence que traduit la Fig.II.15.

Fig.II.15. Les différents points d'insertion d'un compensateur actif « shunt » - principe



Le mode de compensation peut être qualifié de global (**position « A »),** semi-global (**position « B »),** ou local (**position « C »),** selon le choix du point d'action. S'il est difficile d'énoncer des règles absolues, il est évident que si la pollution résulte de nombreux petits récepteurs, le « mode » sera plutôt global ; par contre, si elle résulte d'un gros pollueur, l'efficacité sera optimale en « mode »local.

e) Exemple d'application

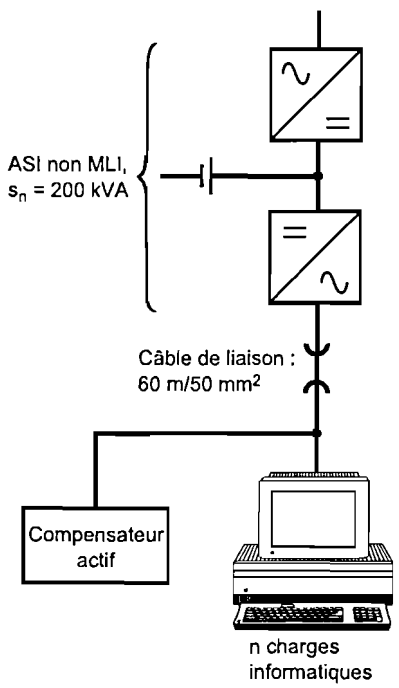
- **Réduction des distorsions liées aux canalisations**

Considérons le cas d'une A.S.I. triphasée alimentant un groupe de charges « informatiques » à l'extrémité d'une ligne de 60m. Nous constatons alors au niveau de la charge une distorsion en tension de 10,44% (entre phases) et 15,84% (entre phase et neutre). Cette dégradation a deux origines combinées :

- La sensibilité de l'A.S.I. (à régulation non M.L.I.) à la caractéristique non-linéaire du courant aval,
- La caractéristique majoritairement selfique de la ligne, qui amplifie les distorsions.

La solution proposée est représentée sur fig.II.16.

Fig. II.16 : Traitement par compensateur actif de la distorsion de tension à l'extrémité d'un câble de 60 m.



Elle repose sur l'insertion d'un compensateur actif « Shunt » au plus près des charges. Les performances sont alors tout à satisfaisantes par rapport à l'objectif : le TDH (U) tombe à 4,9 % entre phases et à 7,2 % entre phase et neutre.

II.3. Déséquilibres des courants et des tensions

Les charges monophasées, ou plus généralement les charges triphasées non équilibrées constituent pour les réseaux de distribution publics ou privés, une cause possible de difficultés, notamment du fait de déséquilibre des tensions qui, à la source sont réglées symétriquement pour les trois phases à la fois que ce soit par transformateur à régleur en charge, ou par la régulation au niveau d'une centrale ou aux nœuds des réseaux de transport.

Dans le cas d'une charge monophasée raccordée entre deux phases, on montre que le taux de tension inverse a pour valeur approchée, au point de raccordement de la charge monophasée.

$$\frac{V_i}{V_d} \neq \frac{S_n}{S_{cc}}$$

relation dans laquelle :

S_n est la puissance nominale de la charge monophasée.

S_{cc} est la puissance de court-circuit triphasé du réseau au point de raccordement de la charge.

On note que cette relation est obtenue moyennant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'impédance inverse du réseau est supposée égale à l'impédance directe, ce qui est d'autant plus vrai que les groupes générateurs sont éloignés du point de raccordement considéré.
- L'impédance de la charge monophasée est supposée grande par rapport à l'impédance du réseau d'alimentation.

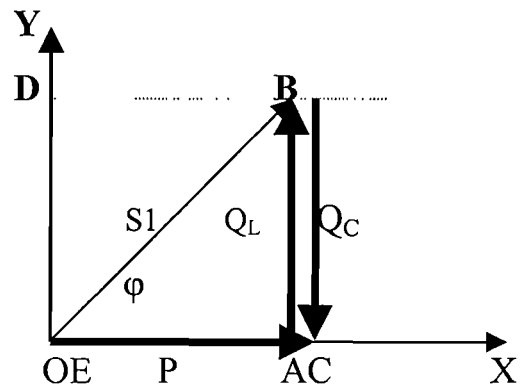
II.3.1. Régime établi

Les moyens de prévenir ces problèmes de déséquilibres sont tout d'abord de répartir au mieux les charges monophasées entre les trois phases. La première mesure consiste à limiter la puissance des charges monophasées indivisibles.

II.3.2. Compensation de charges monophasées

Dès le début de la distribution de l'énergie sous forme électrique, on avait imaginé le moyen de compenser une charge monophasée au moyen d'inductances et de capacités. En effet, une charge monophasée $\mathbf{S = P + jQ}$ peut être parfaitement compensée, au moins pour la fréquence fondamentale, par une charge capacitive $-\mathbf{jQ_c}$ en parallèle sur la charge elle-même. Il reste alors une charge purement résistive sur la phase considérée, comme le montre la figure suivante (fig.II.17.a).

Fig. II.17.a. Compensation par une charge capacitive



OD = AB : Puissance réactive inductive QL avant la compensation (en kvars)

OA : Puissance active P [KW]

OB : Puissance apparente S_1 avant le compensation [KVA]

BC = DE = OD : Puissance réactive fournie par le condensateur Q_c [Kvars]

EC = OA : Puissance apparente S_2 égale à P après la compensation

$$\mathbf{Cos\varphi_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{OA}{OC}}$$

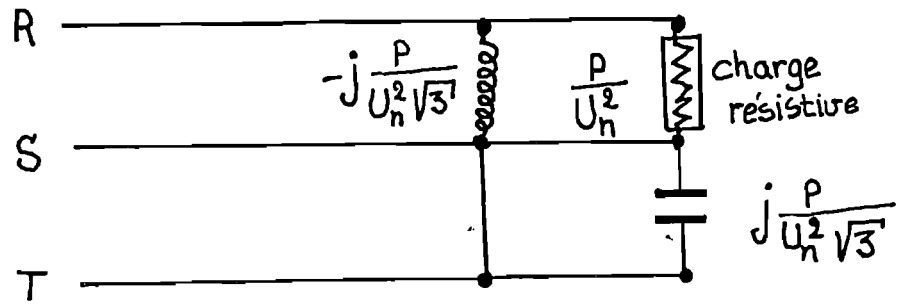
$$Cos\varphi_2 = \frac{OA}{EC} = 1$$

Alors la charge devient purement résistive après compensation.

Le procédé consiste à compléter la compensation par une admittance $-j\ \frac{P}{U^2_n\sqrt{3}}$.

sur une des autres phases et $j\ \frac{P}{U^2_n\sqrt{3}}$ sur la troisième. On montre aisément que la charge est alors équivalente à une charge triphasée équilibrée $S = \frac{P}{3}$ qui est purement résistive.

Fig. II.17.b. Compensation du déséquilibre dû à une charge résistive absorbant une puissance active P.



II.3.3. Compensateur statique

Un compensateur statique constitue un moyen parfaitement adapté, issu des développements en électronique de puissance.

Il se présente sous deux formes principales :

- L'une qui utilise des thyristors pour enclencher à l'instant voulu des condensateurs permettant la compensation.
- L'autre qui présente des performances de rapidité supérieurs, utilise également des thyristors, mais réalise un réglage continu du courant dans les inductances qui stabilisent la puissance réactive absorbée par l'ensemble charge et compensateur ; les batteries de condensateurs sont alors déclenchées seulement lors des arrêts prolongés. Les batteries sont en général aménagées en condensateurs commutés par thyristors.

II.3.4. Limites tolérables du déséquilibre

Dans l'état actuel d'industrialisation et de développement des réseaux électriques Européens, on considère que la tension inverse pour la plupart des équipements est de l'ordre de 2 %. Cette valeur est calculée par la formule des composantes symétriques et rapportée à l'une des tension, V_R par exemple.

- Tension homopolaire

  $V_O=\frac{1}{3}(V_R+V_S+V_T)$

- Tension directe

  $Vd=\frac{1}{3}(V_R+a\,V_S+a^2V_T)$

- Tension inverse

  $Vi=\frac{1}{3}(V_R+a^2V_s+a\,V_T)$

V_R, V_S, V_T étant les tensions mesurées entre phase et neutre avec leurs phases respectives. V_R, V_S, V_T sont donc en fait des vecteurs. Les termes a et a^2 sont des opérateurs de rotation $a = e^{\frac{i2\Pi}{3}}$

II.4. Atténuation des creux de tension

La cause du phénomène est le plus souvent un appel de courant très important qui peut être dû :

- au démarrage de gros moteurs,
- à l'enclenchement de charges importantes
- à l'enclenchement de charges particulières

En fait pour un même impact de charge, la perturbation est très différente selon la puissance de court-circuit disponible à l'endroit où se produit cet impact.

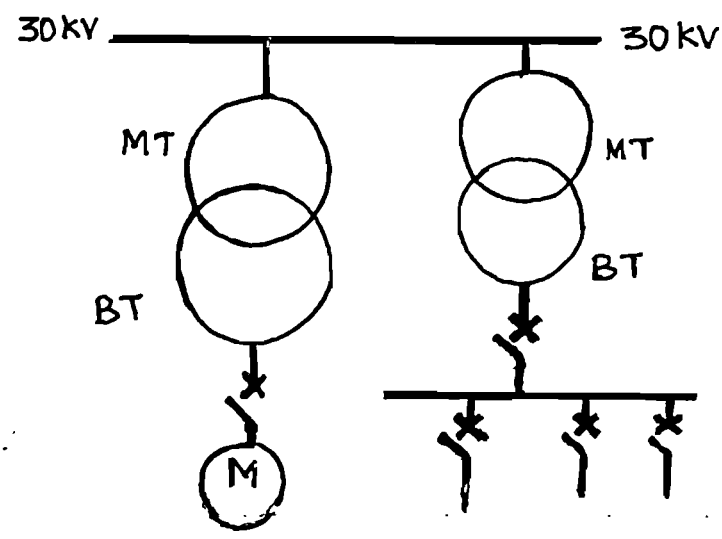
La caractéristique déterminante étant le rapport entre la puissance apparente appelée et la puissance de court-circuit disponible. Le principe est de toujours rechercher à diminuer au maximum ce rapport. On prévoit donc, chaque fois que cela est possible et économiquement envisageable :

- Une alimentation le plus en amont possible de ces charges de manière à bénéficier de la plus grande puissance de court – circuit possible.
- Une séparation entre les charges perturbatrices et les départs sensibles.

II.4.1. Moteurs

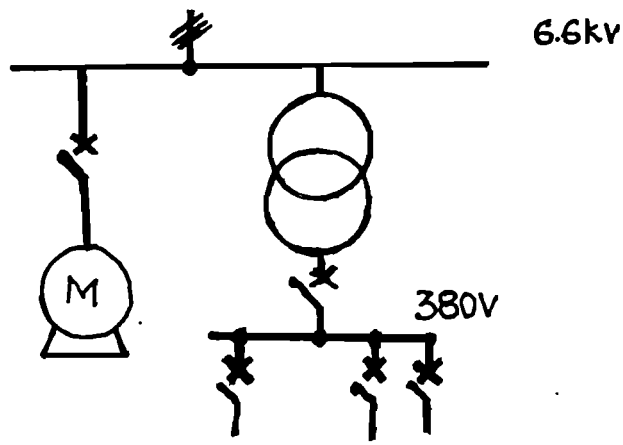
L'alimentation du moteur est prévue pour une ligne indépendante, au moyen d'un transformateur prélevant sa puissance sur un jeu de barres dont la puissance de court-circuit est grande. Dans cette configuration, les départs B.T. ne sont plus que faiblement perturbés, le réseau amont fournissant alors la puissance nécessaire au démarrage.

Fig. II.18. Raccordement d'un moteur par réseau indépendant



Si cette solution ne peut être employée, on peut également recourir à un démarrage indirect de manière à réduire l'impact de charge. Dans le cas particulier où un réseau moyenne tension (6,6 KV) existe au sein de l'usine, prévoir un moteur directement alimenté par le jeu de barres 6,6 KV.

Fig. II.19. Raccordement d'un moteur sur réseau indépendant 6,6 KV.



II.4.2. Charges importantes

En basse tensions, en fonction de la complexité de l'installation et de son évolution, on a le choix entre plusieurs systèmes :

- Automatisme à relais avec temporisation réglable
- Commutateur cyclique automatique

Par ailleurs, les différences de coût qui ne sont plus significatives sont à pondérer par le service rendu.

II.4.3. Charges particulières

Pour les charges dont les courants d'appels sont très importants et qui sont vues par l'installation pratiquement comme des courts-circuits d'une durée variable, la solution consiste à appliquer les principes généraux suivants :

- Recherche d'un niveau de puissance de court-circuit suffisant pour l'alimentation
- Séparation du reste de l'installation ou des départs sensibles

Parmi les charges particulières, on peut citer les condensateurs. Pour ces derniers :

$$\mathbf{I}\ \text{enclenchement} = V\sqrt{2}\ \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Avec :

V = tension simple

C = capacité

L = Self-inductance équivalente au réseau amont

La durée de surcharge est de l'ordre du dixième de seconde.

II.5. Atténuation des variations brusques de tension

Les variations brusques d'origine internes sont liées, dans tous les cas, à de brusques variations de puissance appelée, tant active que réactive. Convenable en monophasé dans la plupart des cas, la relation entre la variation de puissance et la variation de tension s'écrit, lorsque les phénomènes transitoires se sont éliminés :

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{R\Delta P + X\Delta P}{V^2}$$

En régime triphasé équilibré, la même relation est utilisable en désignant par P et Q les puissances actives et réactives triphasées.

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta U}{U} = \frac{R\Delta P + X\Delta Q}{U_n^2}$$

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta Q + \frac{1}{tg\varphi}\Delta P}{\frac{V^2}{X}}$$

Avec :

$\frac{\Delta V}{V}$: Variation relative de tension en %

V^2 : Carré de la tension au point où l'on calcule la variation de tension

R : Résistance du réseau d'alimentation

X : Réactance du réseau d'alimentation

ΔP : Variation de puissance active

ΔQ : Variation de puissance réactive

S_{cc} : Puissance de court-circuit du réseau d'alimentation

$tg\varphi=\frac{X}{R}$: coefficient de qualité du réseau à 50 H_z

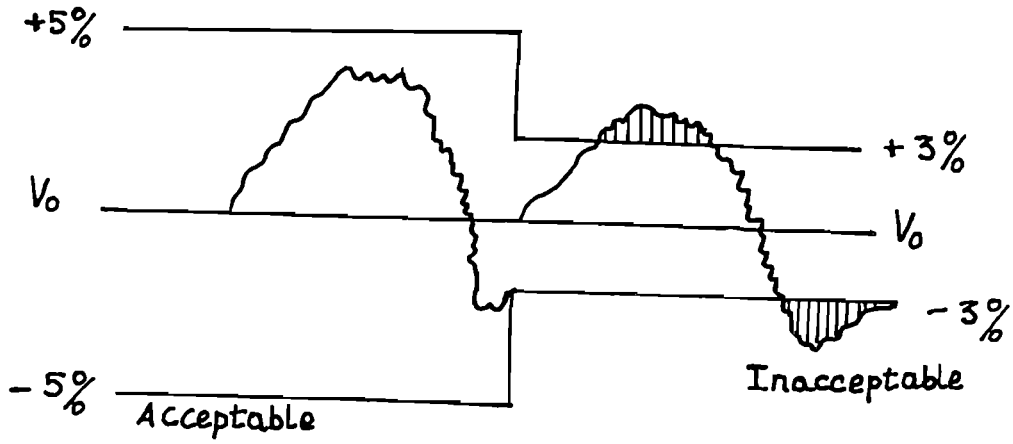
La diminution du rapport ΔV/V vise donc :

- soit à diminuer R et X, c'est-à-dire augmenter la puissance de court-circuit au niveau du point de mesure.
- Soit à diminuer **ΔP ou ΔQ** dans la plupart des cas, cela revient à atténuer la variation de la puissance réactive, car dans un réseau de bonne qualité, tgφ étant grand, le terme **ΔP**/tgφ est négligeable, ce qui permet une simplification supplémentaire.

$$\frac{\Delta V}{V}\approx\frac{\Delta Q}{S_{cc}}$$

Il est entendu que le mot « perturbation » est pris dans le sens « variation au- delà des limites admissibles » et non dans le sens « existence de variations ».

Fig. II.20. Influence de la sensibilité des équipements



Ainsi, si un récepteur est spécifié sous tension de U ± 5 %, tant que la tension d'alimentation reste comprise entre (U + 0,25) V et (U- 0,25)V, il n'y a pas de perturbation. Par contre, si un récepteur est spécifié sous tension de ± 3 % et que la tension d'alimentation va au delà de 3 %, il y a perturbations. La notion de tension en régime exceptionnel supportable par un équipement est également importante. Elle définit en effet les durées pendant lesquelles l'équipement accepte des contraintes supérieures à celles qu'il peut supporter en permanence.

De nombreuses charges présentent par nature des variations brusques de puissances. Nous appelons « brusque » toute variation telle qu'elle s'établisse avec une rapidité de l'ordre de la seconde.

Ces charges sont par exemple des charges constantes, mais enclenchées à intervalles rapprochés (climatiseurs,...)

II.6. Atténuation des surtensions

Une élévation de tension non maîtrisée de manière durable est très dangereuse pour l'installation. En effet, même si les isolations peuvent éventuellement supporter une surtension pendant un certain temps, les machines électriques (transformateurs, moteurs asynchrones) risquent d'absorber alors un fort courant magnétisant dû à la saturation de leur circuit magnétique, qui en régime normal, travaille déjà près du coude de saturation pour la tension assignée.

Une surtension de manœuvre est une surtension entre phase et fil de terre ou entre phases engendrée par une manœuvre d'appareil ou par un défaut. Les surtensions de ce type sont habituellement fortement amorties et de courte durée.

La coupure d'un courant dans un circuit selfique engendre une surtension proportionnelle à l'inductance du circuit et à la variation du courant pendant l'intervalle de temps amenant le courant d'une valeur donnée à zéro ($L \frac{di}{dt}$).

Cette surtension est plus ou moins accentuée suivant la manière dont se produit la coupure.

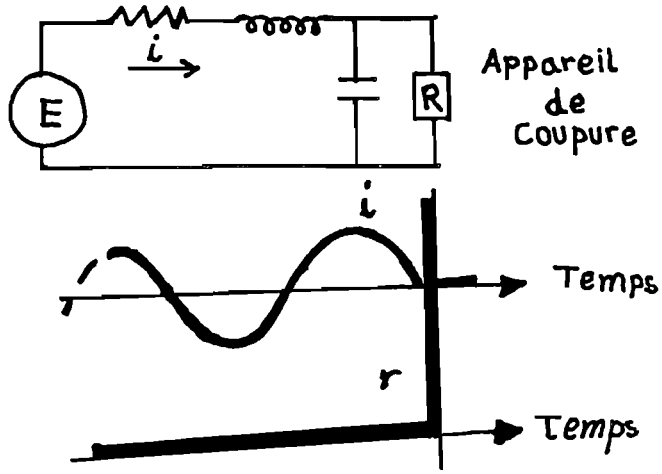
II.6.1. Principe fondamental

Pour réaliser la coupure d'un courant électrique, il suffit que la résistance de l'interrupteur, nulle avant le début de la coupure, croisse et devienne infinie. Pendant la coupure, il se dépense dans l'interrupteur une énergie d'autant plus faible que la variation de résistance est plus rapide et que la coupure se produit plus près d'un passage naturel de courant par zéro.

Un interrupteur idéal serait donc parfaitement conducteur jusqu'à l'instant précis d'un passage à zéro du courant et parfaitement isolant immédiatement après. L'énergie de coupure serait alors théoriquement nulle.

Dans la réalité un tel synchronisme est impossible. Toutefois, le meilleur moyen de l'approcher est d'utiliser les caractéristiques de l'arc électrique.

Fig. II.21. Interrupteur idéal



i : courant dans le circuit

r : résistance de l'interrupteur

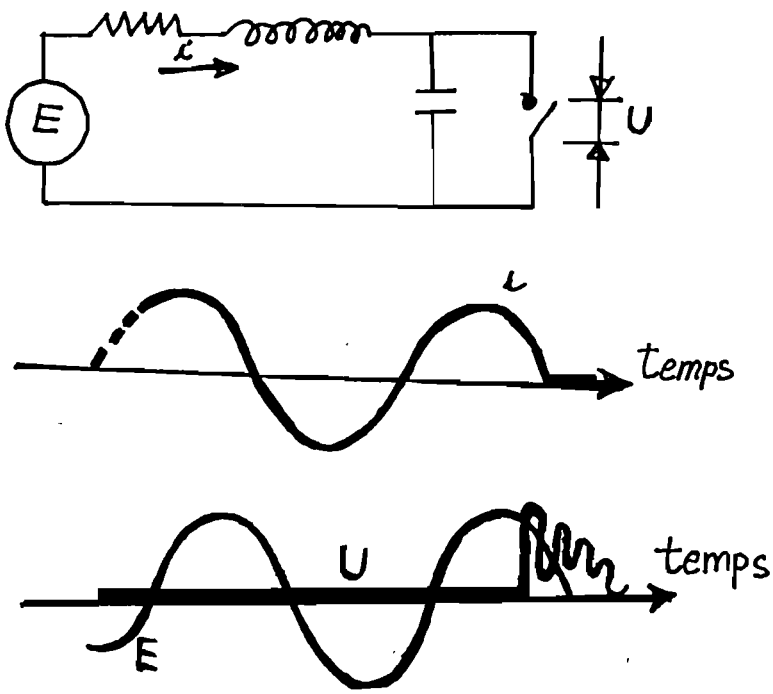
II.6.2. Arc électrique

Un arc électrique se forme inévitablement dès qu'on interrompt un circuit parcouru par un courant même très faible, il possède la caractéristique de passer au bon moment de l'état conducteur à l'état isolant.

II.6.3. Tension de rétablissement

Dès le début de la coupure apparaît aux bornes de l'appareil une tension qui tend à rejoindre la force électromotrice du réseau. Cette tension est appelée tension de rétablissement.

Fig. II.22. Tension de rétablissement



i: courant dans le circuit

E : Force électromotrice

U : tension de rétablissement

Avant d'atteindre la valeur de la force électromotrice, elle suit un régime transitoire généralement à fréquence élevée dont les différents paramètres (valeur maximale, fréquence, amortissement) dépendent principalement des caractéristiques du circuit.

Les valeurs crêtes de tension couramment observées dans les circuits électriques sont égales à 2 à 3 fois les valeurs efficaces nominales. Les défauts peuvent être également la cause de surtensions de manœuvre. En particulier, les défauts phase-terre éliminés tardivement peuvent entraîner des avaries graves pour les équipements.

CHAP.III. : MECANISME DE PROTECTION CONTRE LES PERTURBATIONS

III.1. Protection contre les creux de tension et coupures brèves

III.1.1. Considérations générales

Avant d'examiner quels sont les paramètres devant guider l'utilisateur « perturbé » dans le choix d'une solution de protection, il importe de rappeler qu'il est toujours bien préférable de se préoccuper de l'influence éventuelle des creux de tension et coupures brèves lors de la conception de l'installation plutôt que de les découvrir après la mise en service.

Les conséquences des creux de tension et des coupures brèves sont très variables selon les équipements utilisés, à savoir les manœuvres intempestives de contacteurs et de relais, les défauts de commutation des onduleurs, les défauts de fonctionnement de systèmes électroniques analogiques ou numériques et les erreurs d'exécution de calculs informatiques.

Cependant, on note que les matériels absorbant une puissance significative (cas des machines par exemple) possèdent souvent une inertie relativement importante (mécanique, thermique, etc) de sorte qu'ils sont moins sensibles que les équipements absorbant une faible puissance (appareils de coupure, de commande, de contrôle, de régulation, etc...). D'une manière générale, il est essentiel de disposer d'une alimentation exempte de creux de tension et de coupure brève pour la partie contrôle commande .

Cela est donc plus facile à réaliser (et comparativement moins coûteux) que la puissance appelée par cette dernière est faible par rapport à celle de la partie puissance.

Une telle disposition n'évite pas toujours l'arrêt du processus lors d'un creux de tension, mais elle permet de limiter les dégâts dans la mesure où les consignes, les séquences logiques, etc..., ont été sauvegardées, ce qui permet ensuite de redémarrer plus rapidement et dans les meilleurs conditions.

Les besoins diffèrent selon les cas. Il faut en particulier tenir compte de critères tels que :

- la durée de l'interruption d'alimentation
- la durée minimale de fonctionnement de l'installation de secours.

III.1.2. Solutions chez l'industriel

Il n'existe pas, a priori, de solution unique et universelle permettant de protéger une installation électrique contre les creux de tension et les coupures brèves. En fait, on constate que la solution passe par un ensemble de moyens de protection, à choisir par l'utilisateur à partir des informations que lui fournit le distributeur d'électricité (nature du réseau, puissance de court-circuit, statistiques de défauts, etc) en fonction de la sensibilité des différents équipements constituant son installation.

Les solutions possibles au niveau des installations de l'industriel peuvent être classées en deux grandes catégories, selon qu'elles font appel ou non à une réserve d'énergie.

Cycles de réenclenchement rapides et lents		
Coupures inférieures à la seconde	Exemple : de cycles de réenclenchement rapide 0,3 sec	-L'immunisation est très généralement possible et rentable, car il ne s'agit que de sauvegarder le contrôle-commande de l'installation.
Coupures de plusieurs secondes	Exemple : Cycle de réenclenchement lent 15 à 20 sec	-L'immunisation complète est relativement beaucoup plus coûteuse, du fait que le processus lui-même n'a pas l'inertie pour tenir plusieurs secondes. -Elle n'est envisageable que pour des installations de puissance raisonnable, dont le fonctionnement sans interruption est absolument vital (exemple : centre de calcul). -Dans les cas rares où cet arrêt correspondrait cependant à une perte financière importante, on peut organiser le basculement de l'alimentation sur une source auxiliaire ou sur une deuxième alimentation du réseau. La coupure de plusieurs secondes est alors remplacée par une coupure inférieure à la seconde (correspondant au basculement de l'alimentation) contre lequel le processus est immunisé.

a) Solution sans réserve d'énergie

- **Réduction de la sensibilité des variateurs électroniques de vitesse**

La sensibilité aux creux de tension et coupures brèves des variateurs électroniques de vitesse comportant des ponts pouvant fonctionner en onduleurs assistés par le réseau a été évoquée. Le défaut se traduit par la circulation d'un courant de court-circuit important pouvant provoquer la destruction des fusibles de protection des semi-conducteurs. Le remplacement de ces fusibles est coûteux et nécessite un arrêt prolongé de l'installation.

Ces difficultés peuvent être facilement résolues à l'aide de dispositifs simples peu coûteux et présentent une rapidité d'action intrinsèque très élevée, dont le rôle est la détection du défaut (manque, baisse de tension ou bien pointe de courant), et dont l'action peut être :

- L'ouverture de disjoncteurs ultra-rapides
- La suppression des impulsions de commande des thyristors dans le cas de marche en redresseur
- Le positionnement des impulsions au marqueur dans le cas de marche en onduleur
- Le court-circuitage des régulateurs

Le redémarrage s'effectue automatiquement si les ordres d'allumage des thyristors ont été mémorisés à l'aide d'une alimentation secourue.

Il importe enfin de rappeler que :

- dans tous les cas, il vaut mieux mettre en œuvre la séquence de protection dès la détection de la perturbation réseau plutôt que d'attendre l'apparition des conséquences.

***Réduction de la sensibilité des matériels informatiques**

D'une manière générale, le matériel numérique (calculateurs, automates programmables, ordinateurs, machines à traitement de texte,...) est particulièrement sensible aux creux de tension. Ceux-ci peuvent provoquer une perte ou une altération de l'information contenue dans les mémoires volatiles de ces systèmes. Si aucune disposition particulière n'est prise. Ceci peut affecter, voire arrêter, le déroulement des calculs ou des processus en cours.

Mais souvent, un certain nombre de précautions logicielles peuvent être prises qui limitent les conséquences finales des creux de tension. Ces précautions sont extrêmement diverses et peuvent varier d'un constructeur à l'autre selon le type d'installation.

Citons notamment :

- La sauvegarde systématique d'information
- Les procédures automatiques de redémarrage

Il importe de connaître ces dispositions au moment de l'acquisition du matériel, de façon à les prendre en compte lors de la rédaction des programmes.

1. Sauvegarde systématique de l'information

Cette sauvegarde consiste à transférer les informations contenues dans les mémoires volatiles vers des mémoires permanentes (disquette, bande magnétique,...)
Cette opération peut intervenir de manière périodique ou à la fin de chaque phase importante du traitement ou de l'exécution. En cas d'interruption intempestive, le système reprend sa tâche à partir de la dernière sauvegarde.
Cette procédure facilite donc le redémarrage d'une installation après incident. Toutefois, elle n'est pas toujours utilisable car elle peut conduire à des temps de traitement ou de calcul prohibitifs.

Certains systèmes informatiques possèdent également des dispositifs de détection et de sauvegarde contre les creux de tension. Ces dispositifs permettent de conserver l'état de l'information pendant un court laps de temps (10 ms), d'arrêter le processus de calcul et de traitement.

2. Procédures automatiques de redémarrage

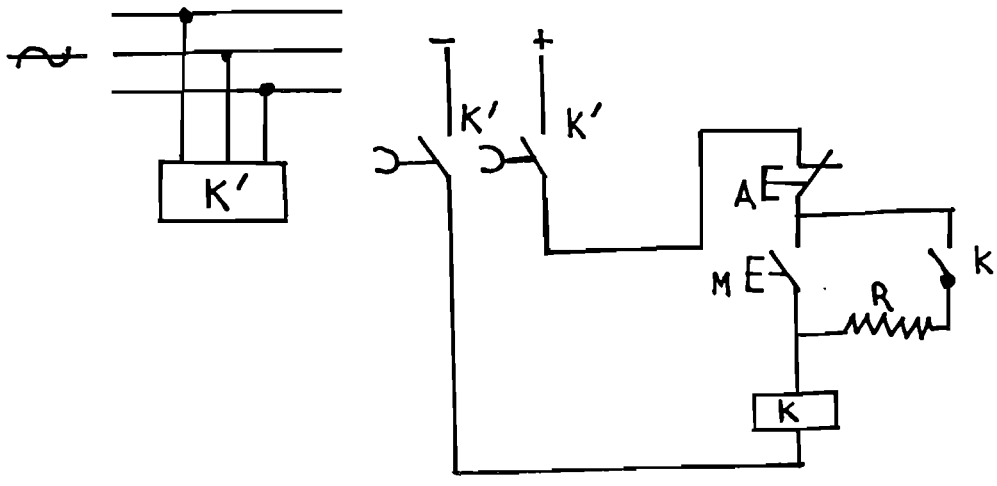
Sur de nombreux systèmes, des procédures automatiques de rechargement sont programmables et évitent toute intervention manuelle. Lors du retour de la tension, l'unité centrale du système recherche elle-même l'information dont elle a besoin sur un support mémoire permanent.

b) Solutions avec réserve d'énergie

• Cas d'un relais alimenté par une source autonome

Un contacteur K dont la bobine de commande est alimentée par une source indépendante présente évidemment une insensibilité totale aux baisses de tension affectant son circuit principal. Il y a lieu de prévoir dans ce cas un relais auxiliaire K' dont la bobine est reliée à la source alimentant le circuit principal : l'un des contacts temporisé à l'ouverture, provoque la coupure du courant de commande du contacteur lors d'une baisse de tension dont la durée excède la temporisation prévue.

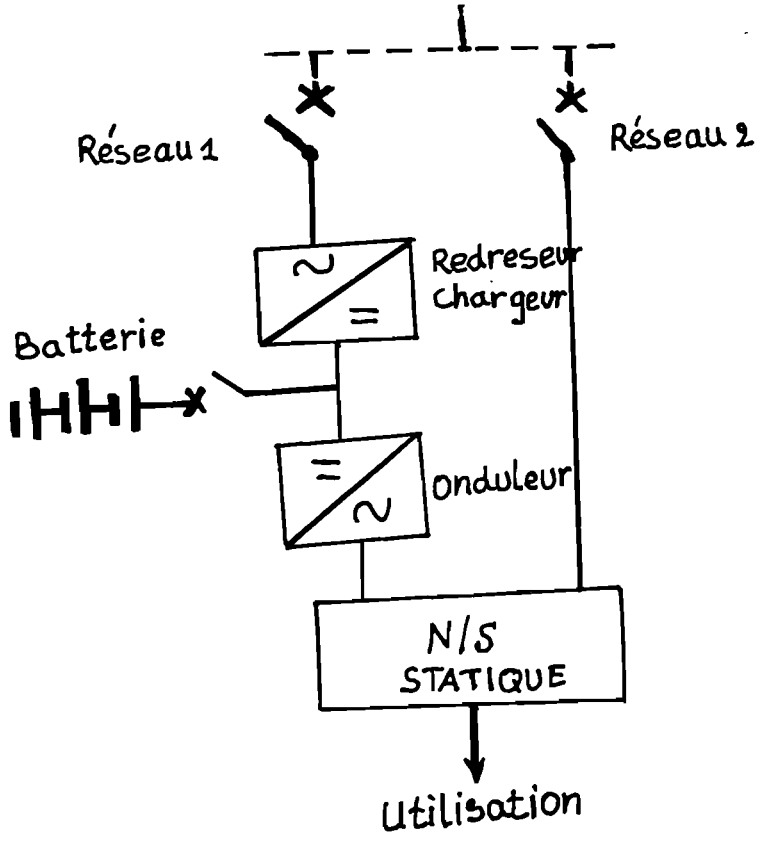
Fig. II.23. Sensibilisation aux creux de tension d'un relais alimenté par une source autonome



- **Alimentations statiques sans coupure**

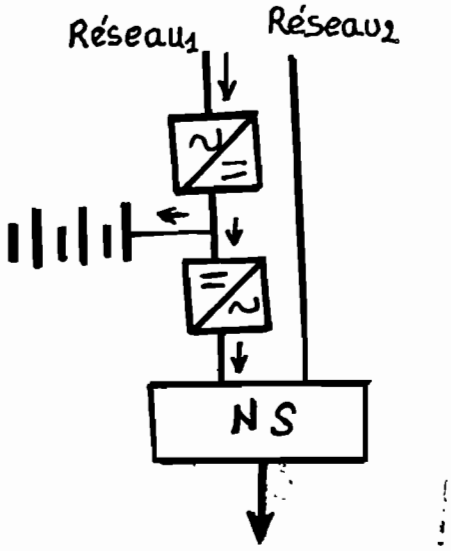
Les alimentations statiques sans coupure sont constituées d'un redresseur chargeur, d'une batterie d'accumulateurs, d'un onduleur et d'un inverseur normal-secours à contacteurs statiques.

Fig.II.24 Alimentation statique sans coupure



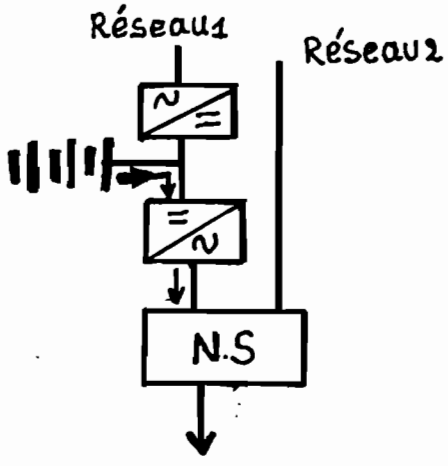
1.En fonctionnement normal, l'énergie prélevée sur le réseau public transite à travers le redresseur, l'onduleur et le contacteur statique avant de parvenir à l'utilisation.

Fig. II.25. a) Fonctionnement normal



2.Lors d'une coupure sur le réseau du distributeur, la batterie fournit l'énergie nécessaire à l'onduleur, dans les limites de son autonomie.
Aucune perturbation n'apparaît sur la tension de sortie onduleur.

Fig. II.25 b) Cas d'une coupure brève



3.Lorsque la tension revient à l'intérieur des tolérances sur le réseau, le redresseur-chargeur alimente à nouveau l'onduleur et assure la recharge de la batterie.
En cas de surcharge sur l'utilisation, celle-ci est instantanément connectée au réseau de distribution grâce au contacteur statique.

Fig. II.25 c) Retour de tension

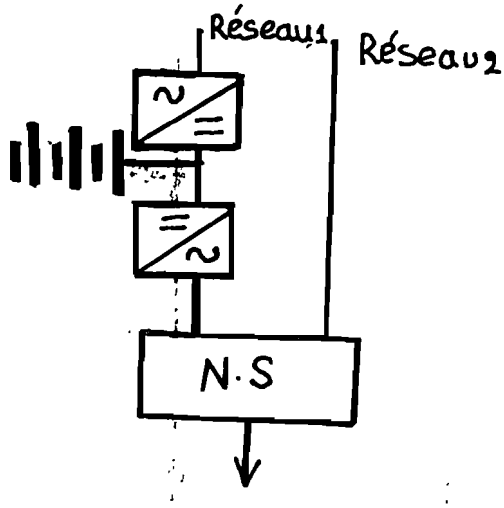
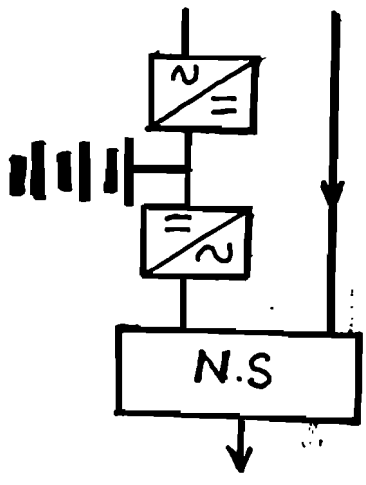


Fig. II.25 d) Surcharge momentanée du réseau



Ce transfert s'effectue sans coupure et sans recouvrement des sources. Dès que la surcharge a disparu, l'utilisation est à nouveau alimentée par l'onduleur. La probabilité pour que se produisent simultanément une défaillance du réseau et une surcharge importante est quasiment nulle.

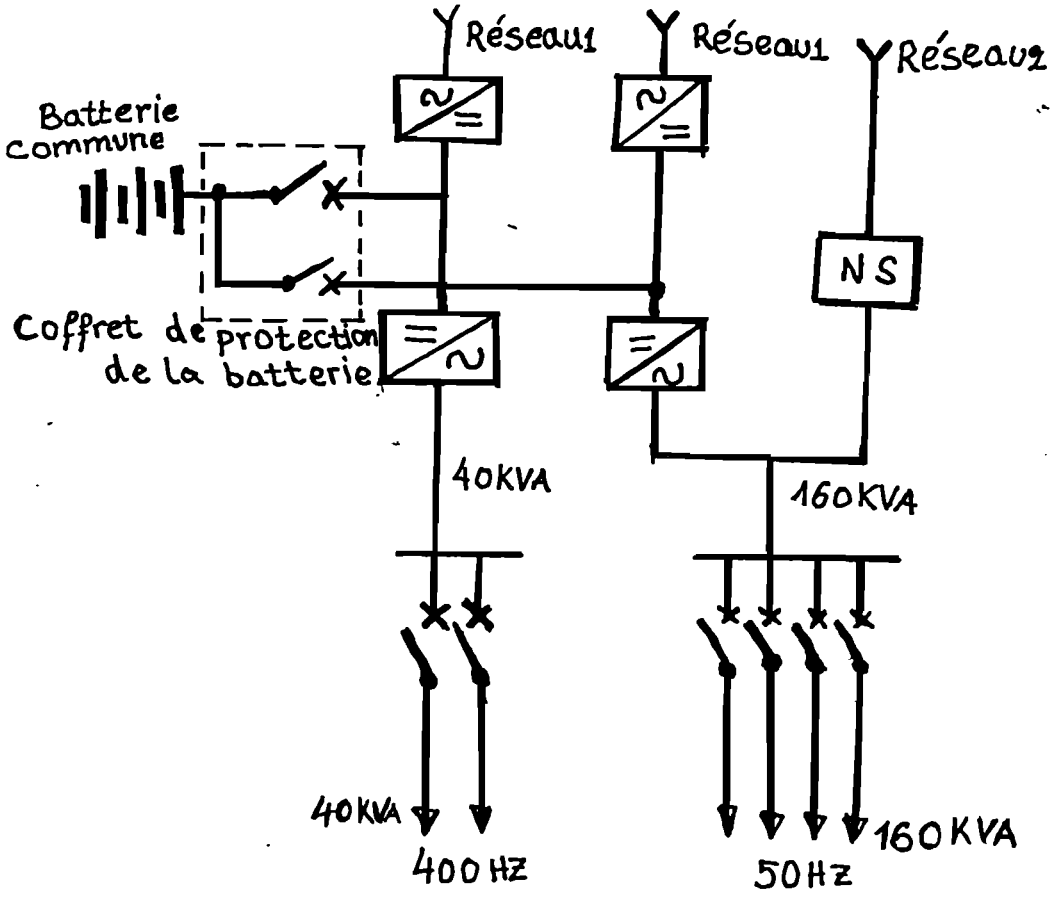
La fiabilité des alimentations statiques sans coupure est excellente et suffit dans la grande majorité des cas.

Par exemple, la possibilité d'alimentation d'une salle informatique utilisant des fréquences différentes.

- 50 H_Z pour le périphérique
- 400 H_Z pour l'unité centrale

Sur ce type d'installation, l'optimisation est déterminée par l'emploi de la même batterie sur les deux onduleurs.

Fig. II.26 Alimentation sans coupure pour deux réseaux de fréquences différentes



L'alimentation sans coupure constitue donc une solution souple, adaptable à toute configuration, facile à mettre en œuvre et à exploiter (entretien limité aux batteries) et de rendement élevé, de l'ordre de 90 % à pleine charge.

III.2. Variations lentes

L'absence d'une source perturbatrice ne signifie pas l'absence de variations sur le réseau. Les variations normales des charges peuvent entraîner en effet des variations anormales de tension sur le réseau, à la fois équilibrées, triphasées et lentes.

Ceci est en particulier le cas de charges trop dispersées, où la puissance de court-circuit trop faible entraîne en fin de distribution des variations anormales de tension. Ceci est également le cas lors de la mise en cascade des transformateurs.

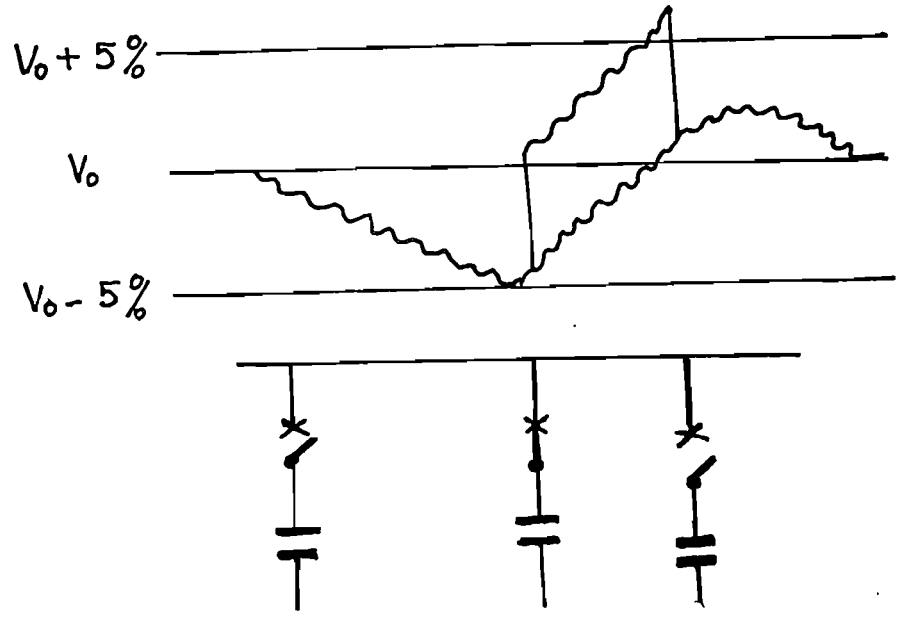
Les solutions adaptées aux variations lentes sont donc :

- Le régleur en charge du transformateur qui permet de résoudre ce problème lorsque le réseau seul a peu de branches et permet donc avec certitude de ramener la variation de tension dans les limites acceptables. Cependant un coût prohibitif des équipements de chaque transformateur peut conduire à écarter cette solution ; les régleurs restent alors en permanence sur leurs positions les plus hautes ;
- La compensation de la puissance réactive au niveau de la consommation par l'emploi de batteries de condensateurs.
- L'adoption de transformateurs à tension nominale plus élevée

Il faut toutefois vérifier l'aptitude des équipements à supporter les surtensions ou sous-tensions temporaires liées au temps de repos des appareils de manœuvre, par exemple l'enclenchement d'une batterie de condensateurs.

Le phénomène qui a demandé l'enclenchement peut avoir disparu, et la manœuvre intervient alors sur une remontée de tension, amenant ainsi une surtension permanente. La seule solution réside alors dans le déclenchement de la batterie.

Fig. II.27. Surtension due à un enclenchement à contre-temps d'une batterie de condensateurs.



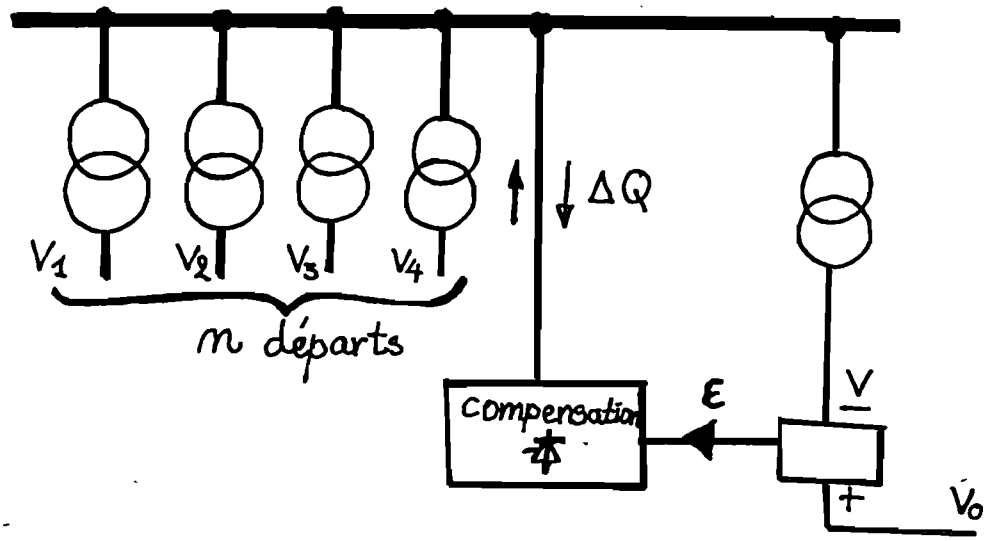
Ce type de phénomène, peu important lorsque les moyens de compensation sont faibles, peut prendre de l'importance lorsque ceux-ci se multiplient.
Il faut alors:

- soit coordonner les moyens de compensation en imposant une nouvelle loi de compensation,
- soit passer à des moyens de compensation en continu.

Une compensation au niveau supérieur de tension est également une solution. Elle permet de bénéficier du coefficient de dispersion des charges, et aboutit à un dimensionnement souvent réduit.

Cependant, vu d'un niveau plus élevé, plusieurs sources indépendantes accroissent la fréquence des variations, et il faut également admettre les tensions permanentes différentes de la tension nominale, alors que la compensation individuelle s'efforce de **conserver la tension** nominale en chaque point de consommation.

Fig. II.28 Compensation de départs multiples



III.3. Variations brusques de tension

La variation brusque **isolée** est un phénomène contre lequel il est difficile et coûteux de se prémunir. Il s'agit là d'un véritable aléa.

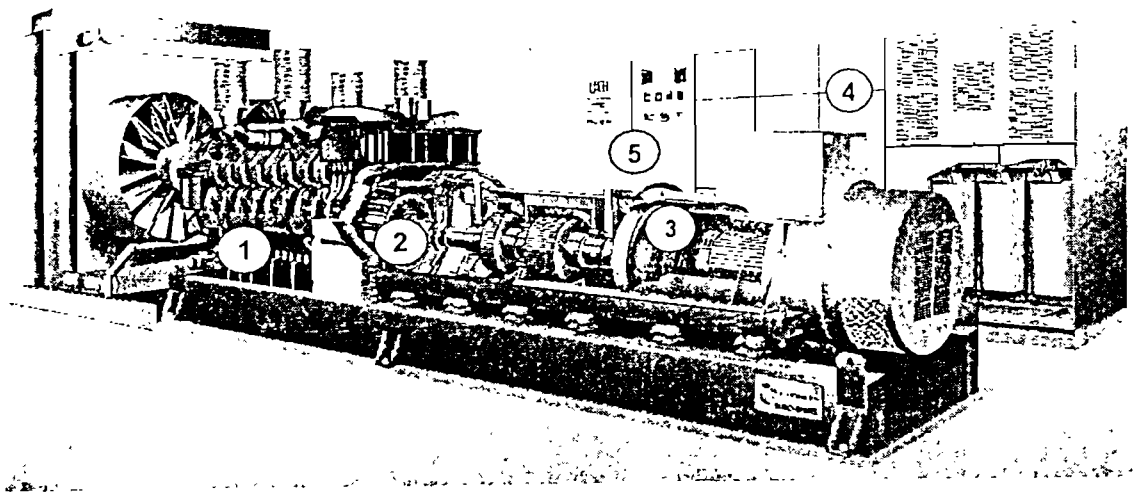
Lorsque les variations brusques prennent un caractère répétitif, il convient de se rapprocher du distributeur d'électricité afin de procéder à l'analyse de chaque cas.

On peut mettre en évidence :

- l'autopollution du réseau par l'utilisateur
- des configurations particulières entraînant des variations de tension trop élevées
- des séquences de mise en service amenant des surcharges temporaires

III.4. Protection contre les autres perturbations : Système NO-BREAK

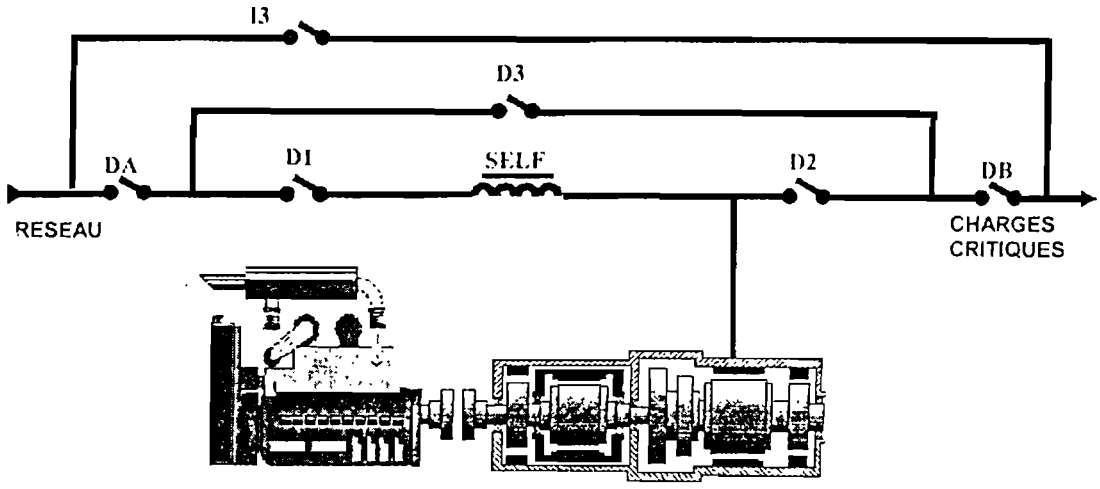
Fig. II.29 Description



Les éléments de base, représentés à la figure 1, sont les suivants :

1. un moteur diesel
2. un embrayage électromagnétique sans bagues, ni balais
3. une machine électrique spéciale, sans bagues ni balais, appelée « stato-alternateur », composée de :
   - 1 machine synchrone
   - 1 accumulateur d'énergie cinétique à excitatrice unique
4. une armoire de puissance contenant les appareils de coupure motorisés ainsi qu'une inductance
5. une armoire de commande contenant, un automate programmable et des cartes électroniques dédicacées, pour assurer le contrôle et la surveillance du système.

Fig. II.30. Fonctionnement



En "service normal" (réseau présent), les disjoncteurs amont (D_1) et aval (D_2) sont fermés. Le by-pass automatique (D_3) est ouvert et le réseau alimente les charges critiques via le système « No – Break ».

La machine synchrone fonctionne en moteur. L'arbre du stato- alternateur tourne à 1500 tr/min tandis que l'accumulateur d'énergie cinétique est maintenue à une vitesse de 2950 tr/min.

Pendant ce fonctionnement en « service normal », qui représente généralement plus de 99,9 % du temps, le système No-Break assure les fonctions essentielles suivantes :

1. Eliminer les micro-coupures

Toutes les micro-coupures d'une durée inférieure à 50 ms sont éliminées par le système, même chargé à 100 %, sans démarrage du moteur diesel.

2. Réguler la tension réseau

Lorsque la tension du réseau fluctue, le système électronique de régulation de la tension agit sur le courant d'excitation de la machine synchrone. La tension délivrée est ainsi systématiquement maintenue à ± 1 % de la valeur de consigne.
Toute variation de la tension du réseau supérieur à ± 1 % provoque l'ouverture du disjoncteur amont et le démarrage du moteur diesel.

3. Améliorer le facteur de puissance

La surexcitation du moteur synchrone permet la fourniture de la puissance réactive consommée par la charge. Il en résulte que le facteur de puissance mesuré au niveau du réseau est proche de l'unité. La machine synchrone se substitue donc parfaitement à une batterie de condensateurs connectée sur les charges critiques, tout en évitant les inconvénients de ces derniers.

4. Filtrer les phénomènes transitoires

L'ensemble « inductance- machine synchrone » assure un découplage entre le réseau et la charge en présence de transitoires rapides ou d'harmoniques.
D'une part, la charge est protégé vis-à-vis des perturbations de la tension du réseau (surtensions de foudre ou de manœuvre,...) ainsi, même dans le cas d'un réseau très perturbé, les charges critiques bénéficieront d'une alimentation de bonne qualité.

D'autre part, les appels de courant (démarrage de moteur, court-circuit,...) et les courants harmoniques dus à la charge (en cas de non linéarité) sont filtrés par le système No-Break. La pollution du réseau par les charges critiques est donc fortement réduite.

Toutes ces fonctions « POWER QUALITY » sont assurées alors que le système fonctionne avec un rendement très élevé (93 à 96,4 % selon le type de machine). En effet, la puissance active consommée par la charge ne transite pas par la machine synchrone (qui fonctionne simplement en moteur à vide).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En abordant ce travail, notre objectif était d'offrir une vue d'ensemble sur les perturbations d'origine interne pouvant affecter les réseaux et les équipements électriques, de montrer ses effets et de proposer des solutions pour les atténuer ou les éliminer.

En analysant les installations et les équipements dans les sites visités de l'ONATEL, à savoir le centre de télécommunications de BUJUMBURA I et la Station Terrienne de Télécommunications par Satellite de KABONDO, nous avons constaté que les réseaux B.T. sont très pollués car soumis à de multiples agressions d'origines diverses :

- d'exploitation (élimination des défauts,...),
- des utilisateurs (récepteurs électroniques,...).

Et dans le même temps, les exigences de qualité du produit (électricité) et de sûreté de fonctionnement des matériels électriques et électroniques, que ce soit dans le secteur secondaire et tertiaire de l'industrie, nous ont donné l'idée de faire un contrôle périodique de la qualité d'énergie consommée.

Les utilisateurs sensibilisés aux dysfonctionnement et aux pertes d'exploitation cherchent à contrôler l'énergie qui leur est délivrée. Ils diagnostiquent les grandeurs classiques (de tension, d'intensité, de puissance, de cosφ) mais également enregistrent les surtensions, les creux et les absences de tension, etc... Ils veulent aussi connaître d'autres paramètres comme le taux global d'harmoniques, le facteur de crête, le taux de déséquilibre des tensions, etc.

Comme certains récepteurs et équipements se trouvant dans l'Entreprise engendrent des perturbations inacceptables sur le réseau et sur les autres récepteurs et équipements,

nous recommandons ce qui suit :

- Améliorer l'équilibre du réseau en répartissant les petites unités de climatisations monophasées sur les trois phases.
- Insérer un compensateur actif « shunt » au plus près d'un groupe de charges « informatiques »
- Utiliser des transformateurs à primaire en étoile (sans neutre) et à secondaire en zig-zag afin de limiter la circulation des courants harmoniques.
- Penser au remplacement des dispositifs d'atténuation existant car ils sont plus anciens.

Nos recommandations sont aussi adressées :

- à la Radio-Télévision Nationale du BURUNDI (R.T.N.B.) et aux stations de radiodiffusion privées dont les interruptions fréquentes de programmes sont fort gênantes pour l'auditoire
- aux hôpitaux para-étatiques et privés dont les installations médico-chirurgicales sont souvent à la merci des aléas du secteur de mauvaise qualité avec des conséquences parfois dramatiques sur les patients ; qu'ils doivent prendre des mesures allant dans le sens de s'assurer à la fois le contrôle de la qualité de l'énergie électrique leur fournie et le bon fonctionnement de leurs équipements en prévoyant des alimentations sans interruption (A.S.I.).

Bien que notre travail ne soit pas complètement détaillé en raison de sa complexité, il pourra servir de références aux autres chercheurs qui voudront nous compléter, le sujet traité étant trop vaste pour être épuisé en une seule étude.

LISTE DES ABREVIATIONS

ONATEL	: Office National des Télécommunications
B.T.	: Basse-Tension
S.V.C.	: Static Var Compensator
H.T.	: Haute Tension
M.T.	: Moyenne Tension
M.L.I.	: Modulation de Largeur d'Impulsion
P.W.M.	: Pulse Width Modulation
A.S.I.	: Alimentation Sans Interruption
T.G.B.T.	: Tableau Général Basse Tension
H.F.	: Haute Fréquence
T.B.T.	: Tableau Basse Tension

BIBLIOGRAPHIE

[1] Guide de l'Ingénierie électrique des réseaux internes d'usines GROUPE animé par Gérard SOLIGNAC.

[2] Technique de l'Ingénieur , Réseau, appareillage D_4II
Par Marius CHANAS

[3] Notes du cours d'installation électrique 3è I.T.S. par Ir. IDI BUHANGA

[4] Champs et ondes électromagnétique par P.LORRAIN et D.R. CORSON

[5] cahiers Techniques Schneider Electric :

- R. CALVAS
  - Cahier Technique N° 141

- E BRTTEGA, J.N. FIORINA
  - Cahier Technique N° 183
  - Cahier Technique N° 152
  - Cahier Technique N ° 176

[6] Amélioration de la qualité et régulation de la tension du réseau 6,6 KV de la ville de BUJUMBURA par BITANGIMANA Damas.