

Etude d'une microliaison à courant continu: Contribution à la réalisation d'une maquette didactique

[Study of a DC micro-link: Contribution to the creation of a didactic model]

KADIATA MUTEBA Jean De Dieu¹, KABULO MUTAMBA Timothée², and TSHAMBULA MIJI FOTA Grégoire³

¹Ingénieur en Techniques Appliquées, option électrotechnique, Assistant à l'Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

²Ingénieur en Techniques Appliquées, option électrotechnique, Assistant à l'Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

³Ingénieur en Techniques Appliquées, option électrotechnique, Assistant à l'Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In this article, we present an electrical engineering project that is instructive and complex because it calls on several electrical engineering disciplines, namely: electrical engineering, power electronics, harmonic pollution, filtering, etc. This is a presentation of the study of a DC micro-link carried out as part of a graduate thesis in electrical engineering at the Higher Institute of Applied Techniques of Kolwezi (ISTA/KOLWEZI). The subject is sufficiently ambitious to illustrate a large number of electrical engineering disciplines and to allow an interesting theoretical study. The detailed study of the assembly is presented in this document, together with its overall diagram.

KEYWORDS: Teaching model, DC link, power electronics, static converter, harmonics, harmonic filter.

RESUME: Nous présentons dans cet article un projet d'électrotechnique dont la particularité est d'être instructif et complexe car faisant appel à plusieurs disciplines du génie électrique à savoir: électrotechnique, électronique des puissances, pollution harmonique, filtrage, etc.

Il s'agit ici de la présentation de l'étude d'une microliaison à courant continu réalisée dans le cadre d'un travail de fin d'études de deuxième cycle en génie électrique à l'Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kolwezi. Ce sujet est suffisamment ambitieux pour pouvoir illustrer un nombre important de discipline du génie électrique et permettre une étude théorique intéressante.

L'étude détaillée du montage est présentée dans ce document ainsi que son schéma global.

MOTS-CLEFS: Maquette didactique, liaison à courant continu, électronique de puissance, convertisseur statique, harmoniques, filtre harmonique.

1 INTRODUCTION

L'électronique de puissance est une branche de l'électrotechnique en perpétuelle évolution et offre un grand champ d'application dans la conversion statique de l'énergie électrique; elle trouve ses applications les plus diverses dans plusieurs

domaines de la vie tels que: l'électrolyse, le traitement galvanique des surfaces, les liaisons à courant continu, la charge des batteries d'accumulateurs, les alimentations de secours, etc.

Devant cette multiplicité d'applications, le technicien chargé de la conduite, de l'entretien et de la maintenance des équipements de l'électronique de puissance, devra disposer d'une bonne assise théorique et pratique dans ce domaine. C'est-à-dire il doit posséder une bonne base en électronique de puissance et en électrotechnique, des méthodes de travail et un savoir-faire sur ces équipements. Ce qui nécessite pour les institutions chargées de la formation technique et scientifique de disposer du matériel didactique adéquat pour la formation pratique de leurs apprenants (techniciens, ingénieurs, professionnels,...). C'est pourquoi ayant constaté que certaines institutions d'enseignement supérieur et universitaire en République Démocratique du Congo disposent insuffisamment ou pas du tout du matériel didactique nécessaire à la formation des apprenants en électronique de puissance, alors que l'acquisition des compétences dans ce domaine nécessite la réalisation de quelques heures de manipulations de laboratoire sur un matériel didactique approprié, il a été initié au sein de l'ISTA/Kolwezi, l'étude d'une microliaison à courant continu qui, une fois concrétisée, pourra servir de matériel didactique en électronique de puissance.

Il s'agit de dimensionner un système d'électronique de puissance qui sera constitué de deux stations de conversions, l'une fonctionnant en redresseur triphasé tout thyristors, l'autre en onduleur non autonome triphasé, et qui présentera le moins de pollution harmonique possible.

2 PRESENTATION DU SYSTEME ETUDIE-DONNEES DE BASE

2.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le système étudié est très complexe car il comprend deux stations de conversion, l'une fonctionnant en redresseur et l'autre en onduleur.

Chaque station de conversion est constituée:

- D'un transformateur à trois enroulements triphasés;
- De deux ponts redresseurs triphasés à thyristors (PD3 et S3);
- De deux déclencheurs de thyristors;
- D'un filtre harmonique;
- Des fils conducteurs;
- Des appareillages de commande, de protection, de contrôle et de mesure;
- Des bobines de lissage.

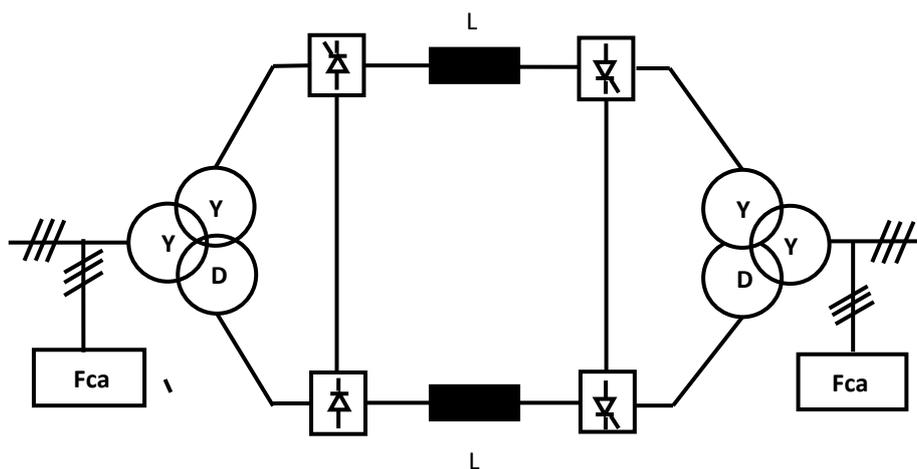


Fig. 1. Schéma de principe d'une liaison à courant continu

2.2 SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN CONVERTISSEUR

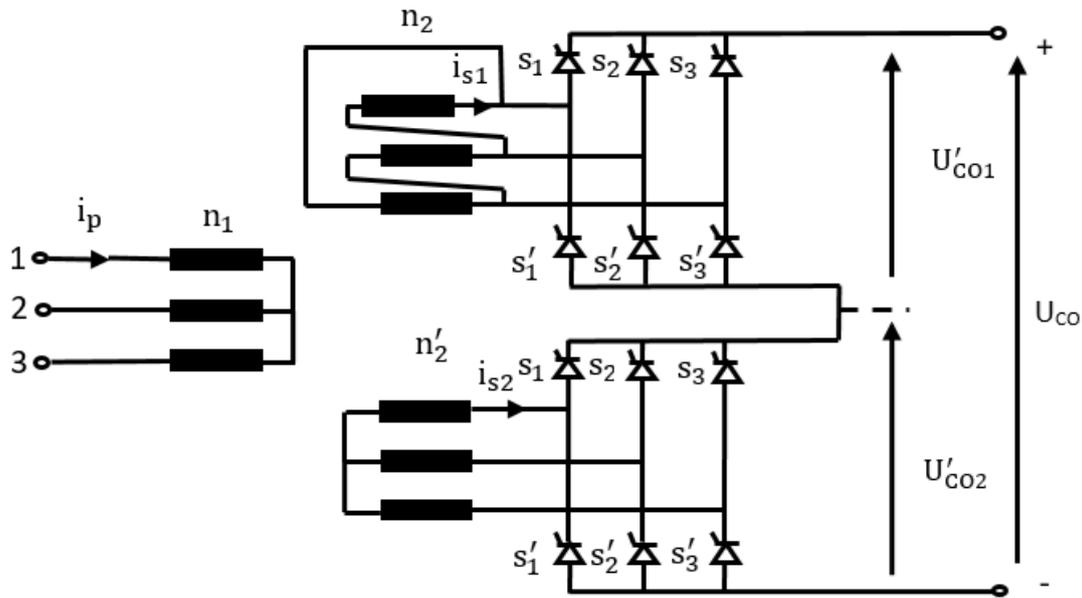


Fig. 2. Schéma de principe d'un convertisseur

2.3 DONNÉES DE BASE-CAHIER DES CHARGES

L'objet de cette étude consiste à dimensionner une micro-liaison à courant continu qui comprendra deux stations de conversion présentant les caractéristiques suivantes:

2.3.1 STATION REDRESSEUR

- Alimentation: triphasée 380V, 50Hz.
- Sortie: continue >200 V, 10 A;
- Puissance >2000 W;
- Chute de tension et ondulations réduites de la tension continue par groupement en série des convertisseurs PD3 et S3, filtrage F_{cc} et lissage.
- Harmoniques réduites dans le réseau primaire par filtrage Fca et groupement en série d'un PD3 et un S3.

2.3.2 STATION ONDULEUR

- Alimentation: continue 200 V, 10 A
- Sortie triphasée: 380 V, 50 Hz
- Puissance 2000 W aux pertes près;
- Chute de tension et harmoniques réduites par groupement en série des convertisseurs PD3 et S3, par filtrage.

L'induction maximale admise dans les transformateurs est de 1,2 Teslas dans les noyaux et les culasses.

3 DIMENSIONNEMENT ET CHOIX DES ELEMENTS DU SYSTEME

3.1 LA STATION REDRESSEUR

Le calcul consiste à déterminer les éléments d'un montage qui, à partir d'un réseau alternatif de tension et de fréquence déterminées, doit fournir un courant continu I_c sous une tension continue U_c (coté redresseur) ou à partir d'un réseau continu de tension U_c et de courant I_c doit fournir une tension alternative à une fréquence donnée.

Le dimensionnement se fait donc par étapes:

3.1.1 CHOIX DU MONTAGE DU CONVERTISSEUR

Le montage est choisi en fonction des données de base spécifiées dans le cahier des charges. Il s'agit de dimensionner deux convertisseurs commandés constitués chacun d'un groupement en série d'un montage PD3 et d'un montage S3. L'un des montages doit fonctionner en redresseur et l'autre en onduleur. Le montage onduleur doit absorber côté continu un courant nominal de 10A sous une tension continue nominale de 200V. Sa puissance est donc de 2kW.

On aura donc pour toute l'installation: 24 thyristors et 2 transformateurs dodécaphasés.

3.1.2 ETUDE DES TENSIONS

3.1.2.1 TENSION DE SORTIE À VIDE DE LA STATION REDRESSEUSE.

La puissance doit être transportée sous une tension de 200V. C'est la tension qu'on doit avoir aux bornes d'entrée de la station onduleur en charge.

- La chute de tension idéalement admise dans la liaison à courant est de 1%.
- La tension redressée aux bornes de la station émettrice (redresseur) a pour valeur en charge: $U'_{c1}=200(1+0,01)=202V$

On peut estimer que la chute de tension ohmique dans les transformateurs 3^{ème} de l'ordre de 6 % de la tension appliquée d'après les normes NFC52-100 et NFC 52-200.

- On prévoit 1% de chute inductive (enroulements concentriques).

Dans ce cas, il faudra compter sur les résistances des enroulements pour limiter les courants de court-circuit.

La chute de tension dans deux thyristors en série est de l'ordre de 3 volts.

$$\Delta U = n_p \times \Delta U_D = 2 \times 1,5 = 3V$$

Avec n_p : nombre de semi-conducteurs en série.

Pour 4 thyristors en série: $U_{sc} = 6V$

D'où la tension de sortie à vide: $U_{co} = (U'_{c1} + (\Delta U_R + \Delta U_{sc} + \Delta U_i)) / \cos \alpha$

Avec $\alpha = 15^\circ$, $\cos \alpha = 0,966$

$$\Delta U_R = (6/100) U'_{c1} = 0,06 \times 202 = 12,12V$$

$$\Delta U_{sc} = 6V$$

$$\Delta U_i = 0,01 U'_{c1} = 202/100 = 2,02V$$

$$D'où U_{co} = (202 + 12,12 + 6 + 2,02) / 0,966 = 229,96V$$

La station émettrice (redresseur) comprendra deux montages redresseurs (PD3 et S3) montées en série. Ces deux montages délivreront chacun des tensions redressées égales (U_{co1} et U_{co2}).

$$U_{co1} = U_{co2} = U_{co}/2 = 229,96/2 = 114,97V$$

3.1.2.2 TENSIONS SECONDAIRES ET PRIMAIRE DES TRANSFORMATEURS

a) Montage S₃

- La tension composée maximale secondaire est:

$$V_{s2max} = U_{s2max} = \frac{\pi}{q} U_{co1} = V_{s2max} = U_{s2max} = \frac{\pi}{q} \cdot U_{co1} = \frac{3,14}{3} \times 114,97 = 120,3V$$

$$V_{s2} = U_{s2} = U_{s2max} / \sqrt{2} = 120,3 / \sqrt{2} = 85,08V, \text{ c'est la tension efficace secondaire.}$$

- Rapport de transformation: $m_1 = U_s / V_p$

$$\text{Avec } V_p = U_p / \sqrt{3} = 380 / 1,732 \approx 220V \text{ et } m_1 = 85,08 / 220 = 0,386 \text{ et } n_2 = 0,386 n_1$$

- Tension inverse maximale: $V_{imax} = U_m = 120,3 \text{ V}$

b) Montage PD3

Nous savons que pour ce montage: $U_{co} = 2q/\pi \times V_m \times \sin \pi/q$

Ce qui donne la tension simple maximale secondaire:

$$V_m = \pi \times U_{co} / 2q \cdot \sin(\pi/q) = 3,14 \times 114,97 / 2 \times 3 \times \sin(\pi/3) = 69,48 \text{ V}$$

La tension simple efficace secondaire est: $V'_{s2} = V'_m / \sqrt{2} = 69,48 / 1,41 = 49,13 \text{ V}$

- Tension inverse maximale est: $V_{imax} = 2V'_m \times \cos(\pi/6)$

$$V'_{imax} = 2V'_m \cdot \sqrt{3}/2 = V'_m \cdot \sqrt{3} = 69,48 \cdot \sqrt{3} = 120,3 \text{ V}$$

- Rapport de transformation: $m_2 = V_{s2} / V_p = 49,13 / 220 = 0,2233$ avec $m_2 = n'_2 / n_1$
 $n'_2 = 0,2233 n_1$

3.1.3 ETUDE DES COURANTS

Le courant redressé i_c est constant et égal à sa valeur moyenne $I_c = 10 \text{ A}$.

3.1.3.1 COURANTS SECONDAIRES

a) Courant moyen dans les thyristors

Chaque thyristors débite I_c pendant $T/3$ d'où les diverses valeurs du courant dans les thyristors: $i_{moy} = I_c / q = 10 / 3 = 3,33 \text{ A}$

b) Courant max: $i_{max} = I_c = 10 \text{ A}$, c'est le courant max dans chaque thyristor

c) Courants efficace: $I = I_c / \sqrt{q} = 10 / \sqrt{3} = 5,773 \text{ A}$

d) Courants efficaces dans les enroulements

✓ **Montage S3**

La valeur efficace du courant secondaire en triangle est: $I_{s1} = I_c / 2 (\sqrt{q^2 - 1} / q) = 10 / 2 \cdot \frac{\sqrt{8}}{3} = 4,714 \text{ A}$

✓ **Montage PD3**

Le courant secondaire a pour valeur efficace: $I_{s2} = I_c \sqrt{\frac{2}{q}} = 10 \sqrt{\frac{2}{3}} = 8,164 \text{ A}$

3.1.3.2 COURANTS PRIMAIRES

3.1.3.2.1 COURANTS PARTIELS

a) Montage S₃ (étoile-triangle)

Il y a compensation des ampères-tours par noyau: $I_{p1} = (n_2/n) \times I_{s1} = 0,386 \times 4,714 = 1,82 \text{ A}$

b) Montage PD3 (transformateur étoile-étoile)

$$i'_{p1} = n'_2 \cdot i'_{s1}; n_1 \cdot i'_{p2} = n'_2 \cdot i'_{s2}; n_1 \cdot i'_{p3} = n'_2 \cdot i'_{s3}$$

$$I'_{p1} = (n'_2/n_1) \cdot I_{s2} = 0,223 \cdot 10 = 1,82 \text{ A}$$

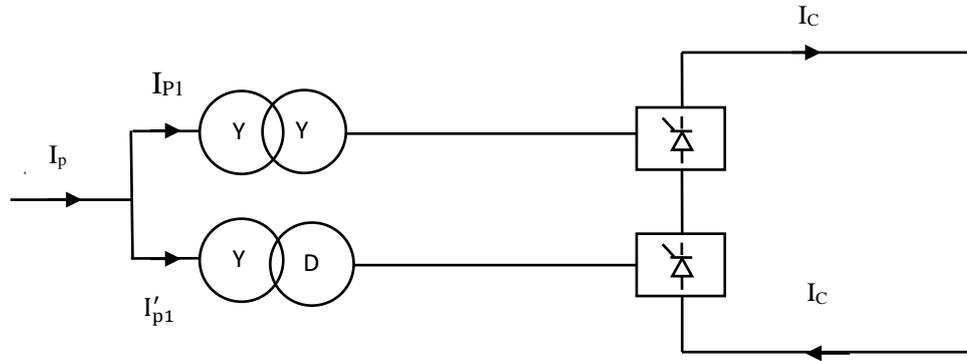
C'est la partie de l'intensité du courant primaire appelé par l'enroulement secondaire en étoile.

3.1.3.2.2 COURANT TOTAL PRIMAIRE

PREMIÈRE APPROCHE DE SOLUTION

Il est la somme des courants primaires partiels des différents montages (PD3et S₃): superposition des appels de courants primaires des deux secondaires.

$$I_p = I_{p1} + I'_{p1} = 1,82 + 1,82 = 3,64 \text{ A}$$



DEUXIÈME APPROCHE DE SOLUTION

Calculée à partir de sa forme d'onde, la valeur efficace du courant primaire est:

$$I_p = m \cdot I_c \sqrt{\frac{4+2\sqrt{3}}{3}} = 3,55 \text{ A}$$

3.1.4 CHOIX DES THYRISTORS

Pour déterminer le courant moyen ainsi que la tension inverse de définition des thyristors, nous avons tenu compte d'un coefficient de sécurité égale à 2.

Ce qui donne: $V_{\text{imax}} = 120,3 \times 2 = 240,6 \text{ V}$

On prendra aussi un courant moyen de $3,33 \times 2 = 6,66 \text{ A}$.

Nous référant aux catalogues des fabricants des thyristors, notre choix s'est porté sur des thyristors 2N1848A ayant un courant moyen de 10 A et une tension inverse maximale ($V_{\text{RRN}} = V_{\text{DRM}}$) de 300 V. Nous utiliserons donc pour la station émettrice, 12 thyristors du type 2N1848A.

3.1.5 CHOIX DU TRANSFORMATEUR

La puissance apparente (P_{a1}) du transformateur est la puissance maximale que le transformateur peut fournir au circuit extérieur.

- Courant primaire: $I_p = 3,55 \text{ A}$
- Tension composée primaire: 380 V
- Puissance apparente: $S_{a1} = \sqrt{3} U_p \cdot I_p = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 3,52 = 2316,8 \text{ VA}$

Etant donné que la puissance primaire est égale à la puissance apparente secondaire, aux pertes près, notre choix se porte sur un transformateur ayant une puissance normalisée de 2,5 kVA.

3.2 LA STATION RECEPTRICE (ONDULEUR)

Elle sera constituée des mêmes matériels que la station émettrice (redresseur). On utilisera pour ce faire des équipements ayant les mêmes caractéristiques.

On aura donc:

- Un transformateur dodecaphasé de 2,5kVA, 380V/85,08 /85,08V, fréquence: 50Hz
- 12 thyristors de courant moyen 10A et de tension inverse maximale 300V.
- Deux déclencheurs de thyristors
- Des dispositifs de protection.

3.3 CABLAGE ET PROTECTION DU SYSTEME

3.3.1 CÂBLAGE

a) Conducteurs reliant les secondaires des transformateurs aux montages redresseurs.

- Intensité du courant de ligne: 8,165A
- Densité du courant adoptée: 3A /mm²
- Section des fils: $S/\Delta = 8,165/3 = 2,72\text{mm}^2$

Cette section est théorique, il faut choisir la section normalisée légèrement supérieure donnée par les fabricants des conducteurs. On prendra $S = 4\text{mm}^2$

b) Conducteurs reliant les deux stations émettrice et réceptrice.

Ce sont les conducteurs par où transite la puissance continue.

- Courant nominal en ligne: 10A
- Densité de courant adoptée: 3A /mm²
- Longueur des fils 1 x 2m soit 2 m pour les deux fils.
- Section des fils: $S/\Delta = 10/3 = 3,33\text{mm}^2$,

On utilisera deux fils souples de 4 mm² de section normalisée et de 1m de longueur chacun. Soit 2 m de fils souples de 4 mm².

c) Fils d'alimentation de la station redresseur et de sortie de la station onduleur.

➤ **Station redresseur**

- Courant de ligne: $I_p = 3,55\text{A}$
- Densité du courant adoptée 2,6A /mm²
- Section des fils: $S = I_p/\Delta = 3,55/2,6 = 1,37\text{mm}^2$

On peut utiliser trois fils souples de 2,5mm² de section et de 2m de longueur chacun. Soit en tout 6m de fils souples.

➤ **Station onduleur**

- Courant de sortie: $I_2 = 3,55\text{A}$
- Densité de courant: 2,6A /mm²
- Section des fils: $S = I_2/\Delta = 3,55/2,6 = 1,37\text{mm}^2$

On utilisera comme pour la station redresseuse trois fils souples de 2,5mm² de section normalisée et de 2 m de longueur chacun. Soit en tout 6 m de fils de souples.

3.3.2 CHOIX DES PROTECTIONS

Les composants doivent être protégés contre les surintensités et les surtensions.

3.3.2.1 PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITÉS

Pour protéger les composants contre les surintensités, on utilise des fusibles, des disjoncteurs ou tout autre équipement.

CONDITIONS À REMPLIR PAR LE FUSIBLE

Il doit remplir les conditions suivantes:

- Supporter continuellement le courant nominal de l'installation.
- Sa capacité d'accumulation thermique ($I^2 \cdot t$) doit être inférieure à celle du dispositif à protéger.
- La tension du fusible durant l'arc doit être assez grande pour dissiper l'énergie du circuit.
- Une fois que le courant est coupé le fusible doit être capable de supporter la tension de réamorçage.

CHOIX DES FUSIBLES

- Le courant nominal de ligne est: 5,77A
- La capacité thermique du thyristor est: $112A^2 \cdot s$,

Notre choix se portera sur des fusibles rapides ayant un courant nominal de 6A et une capacité d'accumulation thermique inférieure à $112 A^2 \cdot s$.

On utilisera en tout 24 fusibles, chacun sera monté en série avec chaque thyristor.

3.3.2.2 PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS

Pour protéger les thyristors contre les surtensions, il faudra monter en parallèle avec eux des varistances ou des conducteurs Gemov (metal oxyde varistor).

SCHÉMA DE MONTAGE DES PROTECTIONS

Nous allons montrer comment les fusibles et les varistances seront montés sur chaque redresseur.

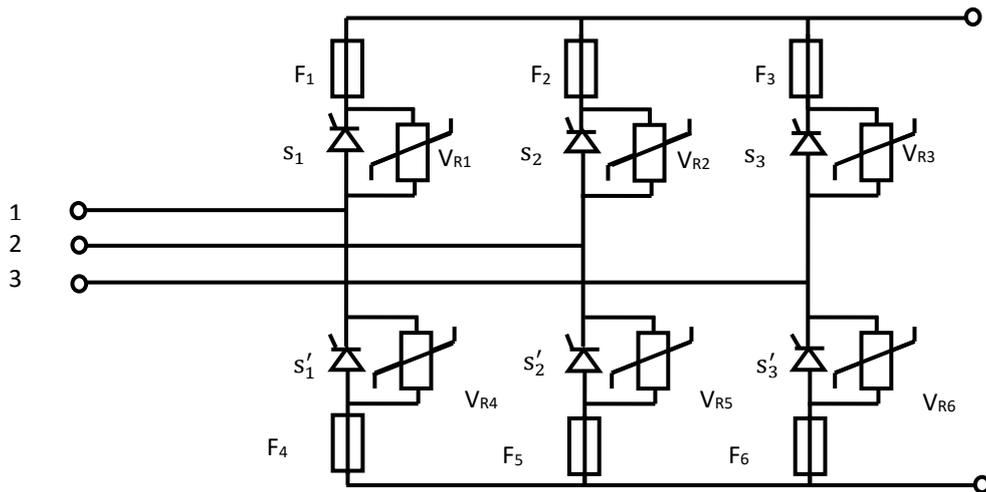


Fig. 3. Branchement des fusibles et des varistances sur un redresseur

Légende:

- $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$: Fusibles rapides
- $V_{R1}, V_{R2}, V_{R3}, V_{R4}, V_{R5}, V_{R6}$: Varistances

CHOIX DES VARISTANCES

Nous référant aux caractéristiques des varistances à oxyde métallique d'après REO inductive component, notre choix s'est porté sur la varistance S14K460 étant donné que dans le choix des thyristors nous avons considéré une tension inverse maximale de 300V.

3.4 CHOIX DU DECLENCHER NUMERIQUE DES THYRISTORS

Les thyristors utilisés possèdent une tension maximale de gâchette de 3V et un courant maximal de gâchette de 80mA. Nous avons choisi un déclencheur numérique des thyristors capable de délivrer une tension de sortie de 3V et un courant de gâchette de 80mA.

Pour l'ensemble de notre installation nous utiliserons quatre déclencheurs numériques de thyristors dont deux par station de conversion et un par pont redresseur.

3.5 REFROIDISSEMENT DES THYRISTORS

3.5.1 POSITION DU PROBLÈME

Pour ce qui nous concerne, nous utiliserons un refroidissement naturel dans l'air ambiant.

3.5.2 CHOIX DU DISSIPATEUR THERMIQUE OU RADIATEUR.

3.5.2.1 EVALUATION DE LA PUISSANCE DISSIPÉE (P_{dis})

La tension aux bornes d'un semi-conducteur à l'état passant est de 0,8 à 1,5.

La valeur efficace du courant dans le thyristor est: $I=5,77A$.

La puissance dissipée dans le semi-conducteur est: $P_{dis}= I.V_{AK}=5,77.1,5=8,66W$

S'il faut tenir compte d'autres pertes nous pouvons majorer la puissance calculée de 50%.

D'où: $P_{dis}=1,5.8,66=12,99$ soit 13watts.

Ce qui nécessite d'utiliser un dissipateur pour maintenir la température de la jonction du semi-conducteur à une valeur acceptable.

3.5.2.2 MODÉLISATION THERMIQUE

La dissipation de puissance dans un semi-conducteur est limitée par la température de la jonction.

En général, la température maximale de la jonction (T_{jmax}) en fonctionnement est égale à 150° C.

Pour les thyristors choisis, elle est de 125° C et est fournie par le fabricant du composant.

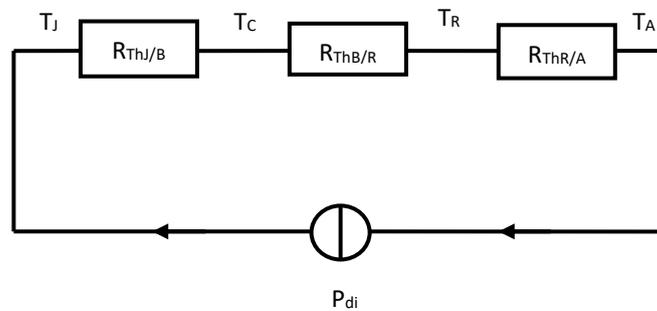


Fig. 4. Schéma équivalent thermique du thyristor

Loi d'ohm thermique: $T_J - T_A = P_{dis} (R_{ThJ/B} + R_{ThB/R} + R_{ThR/A})$

Dans laquelle: $T_J=125^{\circ}C$: température maximale de jonction du thyristor et $T_A=25^{\circ}C$: température ambiante. En prenant une marge de sécurité de 20°C, la température ambiante sera de 45 °C.

$P_{dis}=13W$: puissance dissipée par le composant.

$R_{ThJ/B}$ ou $R_{ThJ/C}$: résistance thermique Jonction-Boitier.

$R_{ThB/R}$ ou $R_{ThC/R}$: résistance thermique Boitier-Radiateur. C'est la résistance de contact entre le composant et le radiateur. Elle peut être améliorée par l'emploi de graisse thermique.

$R_{ThR/A}$ ou $R_{ThD/A}$: résistance thermique Radiateur- Ambiance. C'est la résistance du radiateur donnée par le constructeur. Elle dépend des dimensions du radiateur.

De la loi d’ohm thermique ci-dessus tirons la résistance thermique du Boitier ($R_{ThR/A}$)

$$R_{ThR/A} = (T_j - T_A) / P_{dis} - (R_{ThJ/B} + R_{ThB/R})$$

$$R_{ThR/A} = (125-45) / 13 - (2,02+1,15) = 2,98^\circ\text{C/W}$$

Nous référant au tableau de choix des dissipateurs notre choix se portera sur le radiateur de type CB 80 étant donné qu’il sera monté horizontalement.

3.6 LA POLLUTION HARMONIQUE DU SYSTEME- FILTRAGE

3.6.1 PROPAGATION DES HARMONIQUES ET PERTURBATIONS PRODUITES

Les convertisseurs statiques utilisés pour effectuer la conversion alternatif-continu et vice versa sont formés de ponts redresseurs complets, dispositifs fortement pollués. Ce sont des sources de courants harmoniques.

3.6.2 ANALYSES HARMONIQUES ET FRÉQUENTIELLES DES COURANTS ALTERNATIFS

3.6.2.1 MONTAGE PD3 (TRANSFORMATEUR ÉTOILE-ÉTOILE)

ANALYSE HARMONIQUE

Dans la décomposition en série de Fourier de ce signal, seuls les termes en sinus subsistent.

Le courant secondaire est donné par:

$$i'_{s2} = 11\sin\omega t - 2,2\sin 5\omega t - 1,58\sin 7\omega t + 0,22\sin 11\omega t + 0,85\sin 13\omega t - 0,65\sin 17\omega t - 0,58\sin 19\omega t + 0,48\sin 23\omega t + 0,44\sin 25\omega t \dots$$

$$\text{Si } n_2/n_1 = 0,2233$$

Le courant i''_p appelé au primaire est donné par:

$$i'_p = (n_2/n_1) \cdot i'_{s1} = 0,2233 i'_{s1}$$

$$i'_p = 0,2233 (11\sin\omega t - 2,2\sin 5\omega t - 1,57\sin 7\omega t + \sin 11\omega t + 0,85\sin 13\omega t - 0,65\sin 17\omega t - 0,58\sin 19\omega t + 0,48\sin 23\omega t + 0,44\sin 25\omega t + \dots)$$

$$i'_{p1} = 2,46\sin\omega t - 0,49\sin 5\omega t - 0,35\sin 7\omega t + 0,22\sin 11\omega t + 0,19\sin 13\omega t - 0,14\sin 17\omega t - 0,13\sin 19\omega t + 0,11\sin 23\omega t + 0,1\sin 25\omega t + \dots$$

CONCLUSION TECHNIQUE

Le convertisseur PD3 génère dans le réseau qui l’alimente des harmoniques de rang 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... dont les amplitudes sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Rang et amplitude des courants harmoniques d’un PD3

k	1	5	7	11	13	17	19	23	25
i''_p	2,46	-0,49	-0,35	0,22	0,19	-0,14	-0,13	0,11	0,1

L’amplitude de ces harmoniques va en diminuant au fur et à mesure que leur rang augmente.

Les harmoniques 5, 7, 17, 19 sont affectés du signe négatif tandis que les harmoniques 1, 11, 13, 23 et 25 sont affectés du signe positif.

3.6.2.2 MONTAGE S₃ (TRANSFORMATEUR ÉTOILE-TRIANGLE)

ANALYSE HARMONIQUE

Le développement en série de Fourier, nous montre que le courant dans l'enroulement secondaire est:
 $i_{s1} = 6,37\sin\omega t + 1,274\sin 5\omega t + 0,91\sin 7\omega t + 0,58\sin 11\omega t + 0,49\sin 13\omega t + 0,375\sin 17\omega t + 0,335\sin 19\omega t +$
 $0,277\sin 23\omega t + 0,255\sin 25\omega t + \dots$

Le courant dans l'enroulement primaire est: $i_p'' = n_2/n_1 \cdot i_{s1} = 0,386i_{s1}$

$i_p'' = 2,46\sin\omega t + 0,49\sin 5\omega t + 0,35\sin 7\omega t + 0,22\sin 11\omega t + 0,19\sin 13\omega t + 0,14\sin 17\omega t + 0,13\sin 19\omega t + 0,11\sin 23\omega t +$
 $0,1\sin 25\omega t + \dots$

CONCLUSION TECHNIQUE

Le convertisseur S3 génère dans le réseau qui l'alimente des harmoniques de rang 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... dont les amplitudes sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2. Rang et amplitudes des courants harmoniques d'un S3

k	1	5	7	11	13	17	19	23	25
i_p''	2,46	0,49	0,35	0,22	0,19	0,14	0,13	0,11	0,1

L'amplitude de ces harmoniques va en diminuant au fur et à mesure que leur rang augmente. Tous les harmoniques sont affectés du signe positif.

3.6.2.3 LE COURANT PRIMAIRE DU TRANSFORMATEUR

CALCUL

C'est la superposition des courants i_p' et i_p'' : $i_p = i_p' + i_p''$

$i_p = (2,46\sin\omega t + 0,49\sin 5\omega t + 0,35\sin 7\omega t + 0,22\sin 11\omega t + 0,19\sin 13\omega t + 0,14\sin 17\omega t + 0,13\sin 19\omega t +$
 $0,11\sin 23\omega t + 0,1\sin 25\omega t + \dots) + (2,46\sin\omega t - 0,49\sin 5\omega t + 0,35\sin 7\omega t + 0,22\sin 11\omega t + 0,19\sin 13\omega t - 0,14\sin 17\omega t -$
 $0,13\sin 19\omega t + 0,11\sin 23\omega t + 0,1\sin 25\omega t + \dots)$

$i_p = 4,92\sin\omega t + 0,44\sin 11\omega t + 0,38\sin 13\omega t + 0,22\sin 23\omega t + 0,2\sin 25\omega t + \dots$

CONCLUSIONS TECHNIQUES

L'onde du courant primaire ne comprend que les harmoniques 11, 13, 23, 25, ... en plus de grandeur fondamentale. Le terme fondamentale a pour amplitude: 4,92 A

Sa valeur efficace est 3,49A

La valeur efficace du courant primaire du transformateur est: $I_{eff} = \sqrt{12,18} = 3,49A$

Cette onde fondamentale est déphasée d'un angle α par rapport à la tension d'alimentation. C'est elle qui apporte la puissance au montage.

3.7 FILTRAGE

3.7.1 INTRODUCTION

Les montages redresseurs produisent une tension et un courant continus et pulsatifs. Les spécifications du cahier des charges nous recommandent de dimensionner un système d'électronique de puissance qui présentera moins de pollution harmonique possible.

Pour éliminer les harmonique 5, 7, 17, 19, ... nous avons procédé à un groupement en série des deux montages redresseurs PD3 et S3. Les harmoniques restants sont d'ordre 11, 13, 23, 25, etc.; pour les éliminer il faudra utiliser un filtre harmonique courant alternatif F_{ca} .

Dans la liaison à courant continu, le groupement en série des montages PD3 et S3 donne une onde de tension d'ordre 12, donc présentant le moins d'ondulation. Pour éliminer ces ondulations, on devra utiliser une bobine ou inductance de filtrage. Le but de ce filtre est de régulariser le débit d'énergie fournie par le redresseur au montage onduleur (charge).

Le filtre doit donc absorber de l'énergie pendant que la tension et le courant diminuent. Il tend ainsi à maintenir la tension ou le courant constant dans la charge.

Les filtres les plus communs utilisent des inductances et des condensateurs.

Les filtres harmoniques peuvent être passifs ou actifs.

3.7.2 CALCUL DE LA BOBINE DE LISSAGE

Pour un redressement triphasé double alternance, l'inductance de lissage se calcule par la relation suivante:

$$L_1=L_2 = \frac{0,0033.U_{co}}{f.\Delta I_L}$$

Avec: U_{co} , tension de sortie du montage redresseur; f : fréquence en Hz; ΔI_L : ondulation du courant continu.

Étant donné que les deux stations sont constituées chacune de deux montages redresseurs à double alternance montés en série, leurs inductances de lissage doivent s'additionner.

$$D'où L=L_1+L_2= 2 \frac{0,0033.U_{co}}{f.\Delta I_L} = \frac{0,0066.U_{co}}{f.\Delta I_L}$$

Applications numériques:

- $U_{co}=111,07V$; $f=50Hz$; I_{moy} dans un thyristor =3,33A;
- $\Delta I_L=0,034 I_{moy}$, en se fixant un taux d'ondulation de 3,4%.

D'où $L=0,0066 \times 114,97/50 \times 0,034 \times 3,33=0,134H$, Soit une bobine de 134mH.

3.7.3 DÉPOLLUTION HARMONIQUE DES RÉSEAUX ALTERNATIFS

L'élimination des harmoniques restants est obtenue par l'association en série des montages PD3 et S3, il nous faudra concevoir des filtres de courants qui auront pour tâche de réduire l'amplitude de ces harmoniques. L'une des approches de solution serait d'utiliser un piège à harmonique qui consiste à prendre un filtre résonant LC série qui possède une impédance nulle à la fréquence de résonance, que l'on choisit alors égale à $n \times f$ (filtre utilisé pour l'harmonique n).

Avec n: rang de l'harmonique; f: fréquence du réseau.

L'impédance nulle du filtre à cette fréquence a pour effet de mettre en court-circuit les harmoniques n du courant qui, de ce fait, ne remonte plus vers le réseau d'alimentation.

3.7.3.1 SCHÉMA ÉQUIVALENT DE L'INTERACTION ALIMENTATION –FILTRE-REDRESSEUR

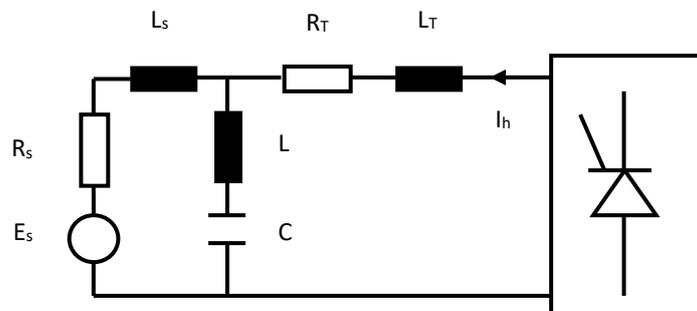


Fig. 5. Schéma équivalent de l'ensemble alimentation-filtre-redresseur

Les stations émettrices ou réceptrices se comportent comme des sources de courants harmoniques.

Les filtres L_n, C_n doivent court-circuiter les courants harmoniques de rang n qui cherchent à atteindre le réseau alternatif.

3.7.3.2 CALCUL DU FILTRE RÉSONANT LC

3.7.3.2.1 CONDITION DE RÉSONANCE

A la résonance nous avons: $L_n \cdot C_n \cdot \omega_n^2 = 1$

Avec: $\omega_n = n\omega = 6,28 \cdot n \cdot f$ rad/s; pulsation de la fondamentale; $n=11,13,23,25, \dots$: rang de l'harmonique

Il faut donc que les éléments L_n et C_n du filtre assurent: $L_n \cdot C_n = 1 / (n \cdot \omega)^2$

Une infinité de valeurs sont possibles pour le choix de L_n et C_n et l'impédance du filtre à 50Hz est donnée par la relation:

$$Z_n = \frac{(L_n \cdot C_n \cdot \omega^2 - 1)}{C_n \cdot \omega} \text{ en valeur absolue}$$

Puisque le produit $L_n \cdot C_n$ est constant, il devient nécessaire de prendre C_n aussi faible que possible pour assurer Z_f élevée à 50Hz (le filtre ne doit pas court-circuiter le courant fondamental).

3.7.3.2.2 EVALUATION DES PARAMÈTRES L_n ET C_n

ÉLIMINATION DE L'HARMONIQUE 11

$$n=11 \quad \omega = 314 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{11} = 11 \cdot \omega = 11 \cdot 314 = 3454 \text{ rad/s}$$

$$L_{11} \cdot C_{11} = \frac{1}{\omega_{11}^2} = 1/3454^2 = 83 \cdot 10^{-9}$$

On peut se fixer une valeur $C_{11} = 200 \mu\text{F}$

$$\text{Dans ce cas } L_{11} \text{ sera égale à } L_{11} = 1 / C_{11} \cdot \omega_{11}^2 = 83 \cdot 10^{-9} / C_{11} = 83 \cdot 10^{-9} / 200 \cdot 10^{-6} = 0,415 \cdot 10^{-6} = 415 \text{ mH}$$

Pour réduire l'harmonique 11, on devra connecter en parallèle sur le réseau d'alimentation une bobine d'inductance $L_{11} = 415 \text{ mH}$ montée en série avec un condensateur de capacité $C_{11} = 200 \mu\text{F}$.

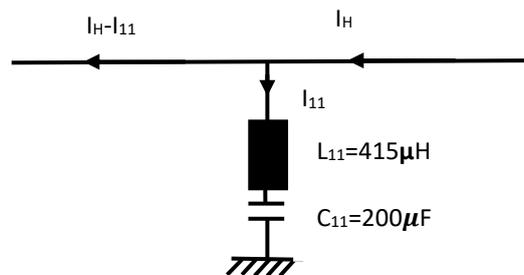


Fig. 6. Filtre harmonique 11

ÉLIMINATION DE L'HARMONIQUE 13: $N=13$; $\Omega=314 \text{ RAD/S}$

$$L_{13} \cdot C_{13} = 1 / \omega_{11}^2 = 1 / (13 \cdot 314)^2 = 6 \cdot 10^{-8}$$

Prenons toujours $C_{13} = 200 \mu\text{F}$

$$\text{Dans ce cas: } L_{13} = 6 \cdot 10^{-8} / C_{13} = 6 \cdot 10^{-8} / 200 \cdot 10^{-6} = 300 \text{ mH}$$

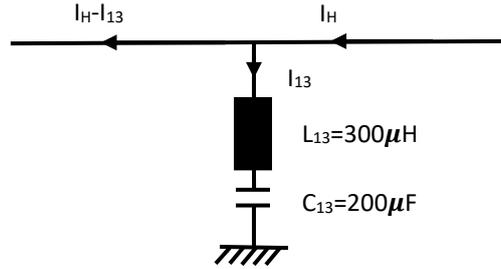


Fig. 7. Filtre harmonique 13

Pour réduire l'harmonique 13, on devra connecter en parallèle avec le réseau une bobine d'inductance de 300mH en série avec une capacité de 200μF.

ELIMINATION DE L'HARMONIQUE 23: N=23; Ω=314RAD/S

$$L_{23} \cdot C_{23} = 1/\omega_{23}^2 = 1/(23 \cdot 314)^2 = 19 \cdot 10^{-9}$$

En prenant $C_{23} = 200 \mu\text{F}$

$$\text{Dans ce cas } L_{23} = 19 \cdot 10^{-9} / C_{23} = 19 \cdot 10^{-9} / 200 \cdot 10^{-6} = L_{23} = 95 \text{mH}$$

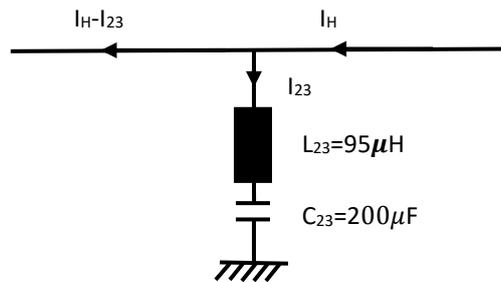


Fig. 8. Filtre harmonique 23

La réduction de l'harmonique 23 se fera à l'aide d'un filtre LC série qui sera constituée d'une bobine d'inductance de 95mH montée en série avec une capacité de 200μF. L'ensemble LC série est montée en parallèle avec le réseau.

ELIMINATION DE L'HARMONIQUE 25: N=25; Ω=314RAD/S

$$L_{25} \cdot C_{25} = 1/\omega_{25}^2 = 1/(25 \cdot 314)^2 = 16 \cdot 10^{-9}$$

Prenons toujours $C_{25} = 200 \mu\text{F}$

$$\text{Dans ce cas } L_{25} = 16 \cdot 10^{-9} / C_{25} = 16 \cdot 10^{-9} / 200 \cdot 10^{-6} = 8 \cdot 10^{-5} = 80 \text{mH}$$

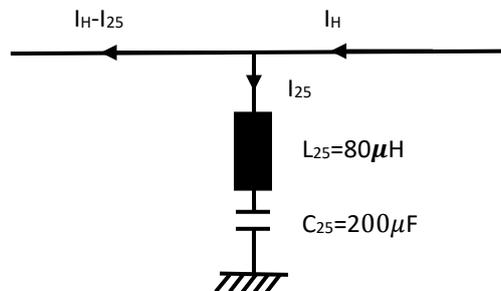


Fig. 9. Filtre harmonique 25

Pour la réduction de l'harmonique 25 on utilisera un filtre LC série qui sera constituée d'une bobine d'inductance de 80mH montée en série avec une capacité de 200 μ F. L'ensemble LC série est montée en parallèle avec le réseau.

3.8 GROUPEMENT DES FILTRES PASSIFS

Les différents filtres seront groupés en étoile. Nous aurons donc 4 groupements étoiles tant du côté station redresseur que du côté station onduleur

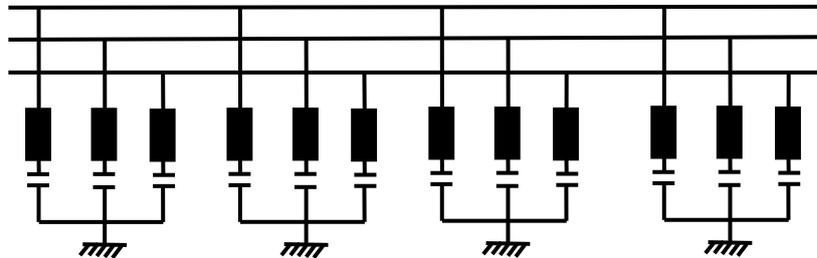


Fig. 10. Montage des filtres passifs

4 CONCLUSION

Le thème: « Etude d'une micro-liaison à courant continu et contribution à la réalisation d'un matériel didactique » est un bel exercice d'apprentissage sur dimensionnement des équipements de l'électrotechnique. C'est un système très complexe car faisant appel à plusieurs disciplines du génie électrique. C'est pourquoi, vu la complexité du sujet, nous nous sommes attelés uniquement:

- Au dimensionnement et au choix des éléments du système à savoir: thyristors, transformateurs, fils conducteurs de connexions et câblage, protection contre les surtensions et les surintensités, bobines de lissage, filtres harmoniques, etc.
- A l'étude de la pollution harmonique du système à travers laquelle nous avons procédé aux analyses harmoniques et fréquentielles des montages PD₃ et S₃ ainsi que leur association. De cette analyse nous avons bel et bien constaté que le groupement en série des montages PD₃ et S₃ élimine les harmoniques 5, 7, 17, 19, ...; quant aux harmoniques restants, ils doivent être éliminés par filtrage.
- Aux calculs des bobines de lissage pour réduire l'ondulation de la tension continue et des paramètres LC des filtres harmoniques passifs à résonance série qui serviront à l'atténuation des harmoniques de courant dans les réseaux alternatifs.

Notre système sera constitué:

- De deux transformateurs dodécaphasés présentant les caractéristiques suivantes:
 - Puissance apparente 2,5 kVA
 - Tension primaire: 380 V
 - Tensions composées aux deux secondaires: 85,07V
 - Fréquence: 50 Hz.
- De 24 thyristors type 2N1848A ayant un courant moyen de 10 A et une tension inverse maximale de 300 V et dont la constante thermique est de 112 A2s.
- Des organes de protection contre les surintensités et les surtensions.
- Des fils conducteurs de câblage et de connexion dont les sections théoriques ont été calculées et les sections pratiques choisies.
- De 4 déclencheurs de thyristors pouvant délivrer un courant de 80mA et une tension de 3V.
- Des filtres harmoniques LC à résonance série dont les inductances et capacités ont été calculées.
- De deux bobines de lissage. Les stations de conversion (redresseur et onduleur) seront constituées des mêmes matériels.

REFERENCES

- [1] Guy Séguier, L'électronique de Puissance, Ed. Dunod, Paris, 1978.
- [2] Laroche Jacques, Electronique de puissance: convertisseurs, Ed. Dunod, Paris, 2005.
- [3] Ney Henry, Les équipements de Puissance, Ed. F. Nathan, Paris, 1980.
- [4] R. Beycart, Calcul des petits transformateurs, Ed. Dunod, Paris, 1954.
- [5] Wildi Theodore, L'électrotechnique, Ed. De Boeck, Canada, 1979.
- [6] Solaz Philippe, Contribution à l'étude des perturbations électromagnétiques conduites: usine d'électrolyse Aluminium Pechiney de Lannemezan, 2004.