



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

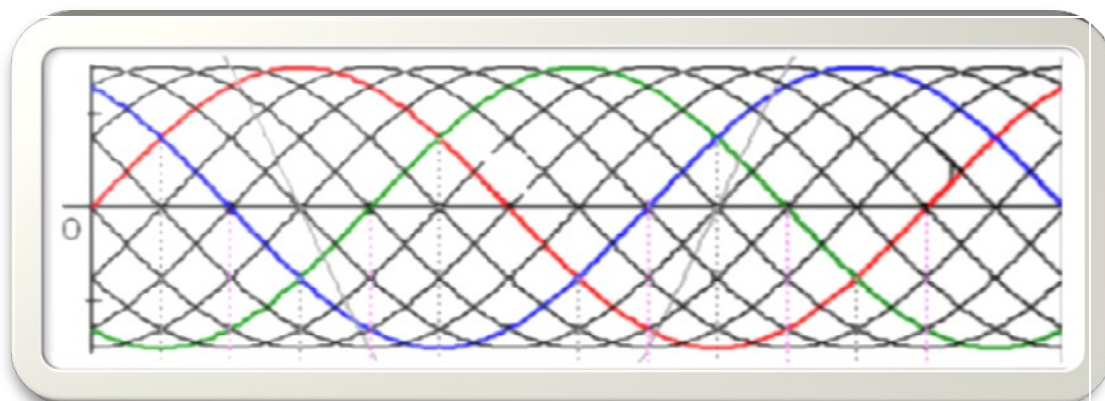
DEPARTEMENT: GENIE ELECTRIQUE & GENIE MECANIQUE PRODUCTIQUE

FILIERE GENIE INDUSTRIEL

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
LICENCE-ES SCIENCES TECHNIQUES EN GENIE INDUSTRIEL**

ALIMENTATION ÉLECTRIQUE A COURANT CONTINU

A FAIBLE ONDULATION



Présenté par :

Monsieur **ANDRIANIRINA** Mamy Manantsoa

Rapporteurs : Monsieur **RAJAONARIVELO** Jean André
Monsieur **RANDRIANAIVORAVELONA** Fanja

Promotion 2008

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

**DEPARTEMENT : GENIE ÉLECTRIQUE ET MECANIQUE
PRODUCTIQUE.**

FILIERE : GENIE INDUSTRIEL

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE D'OBTENTION DU DIPLÔME DE
LICENCE-ES SCIENCES TECHNIQUES EN GENIE INDUSTRIEL**

**ALIMENTATION ÉLECTRIQUE A COURANT CONTINU
A FAIBLE ONDULATION**

Présenté et réalisé par :

ANDRIANIRINA Mamy Manantsoa

Président du jury : Monsieur **ANDRIAMITANJO** Solofomboahangy

Rapporteurs : Monsieur **RAJAONARIVELO** Jean André
Monsieur **RANDRIANAIVORAVELONA** Fanja

Examineurs: Monsieur **RAKOTONIAINA** Solofo Hery
Monsieur **RAVALOMANANA** Olivier

Date de soutenance : 10 Octobre 2009

REMERCIEMENTS

Gloire à Dieu car par sa Grâce j'ai pu mener à terme ce travail et mes années d'études à l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo .

Aussi, j'adresse mes vifs et sincères remerciements à :

- Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Directeur de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo de m'avoir autorisé à soutenir ce mémoire ,
- Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon, Chef de Département Génie Électrique, et Monsieur JOELIARITAHAKA Rabeatoandro, Chef du Département en Génie Mécanique et Productique, d'avoir bien voulu suivre avec volonté mes trois années d'études,
- Monsieur RAMBELO Crescent, Chef de Département Atelier de la JIRAMA, qui m'a accordé une stage au sein de la Société afin de pouvoir réaliser le travail du mémoire,
- Monsieur RAJAONARIVELO Jean André, qui m' a guidé à la concrétisation de ce mémoire et m'a procuré les documents nécessaires, même dans ses innombrables occupations,
- Monsieur RANDRIANAIVORAVELONA Fanja et à tous les Agents de la JIRAMA qui m'ont aidé de leurs conseils,
- Monsieur ANDRIAMITANJO Solofomboahangy, qui a accepté de présider cette séance,
- Monsieur RAKOTONIAINA Solofo Hery , et Monsieur RAVALOMANANA Olivier qui malgré leurs préoccupations ont accepté de faire partie des membres du jury,

- Mes chers parents et tous les membres de ma famille, qui m'ont toujours soutenu financièrement et moralement tout au long de mes études, à tous mes amis et enfin à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	A
TABLE DES MATIERES	B
LISTE DES FIGURES	C
LISTE DES TABLEAUX	D
LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES	E
ABSTRACT	F
INTRODUCTION	1
..... CHAPITRE 1. LE MOTEUR A COURANT CONTINU	
.....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Constitution.....	2
1.2.1 L'inducteur ou circuit d'excitation.....	2
1.2.2 L'induit ou circuit de puissance.....	3
1.2.3 Le collecteur et les balais.....	3
1.3 Principe et classification.....	4
1.3.1 Principe de fonctionnement.....	4
..... a. Fonctionnement en moteur	4
..... b. Fonctionnement en génératrice	5
1.3.2 Classification d'un MCC	6
1.4 Mise en équation.....	7
1.4.1 Schéma électrique équivalent.....	7
1.4.2 Expression de la force électromotrice induite.....	8
1.4.3 Expression de la force contre électromotrice.....	8

1.4.4 Expression des couples.....	9
1.5 Bilan des puissances	9
1.6 Caractéristique des moteurs.....	10
1.6.1 Caractéristique de fonctionnement.....	10
..... a. Caractéristique de vitesse d'un MCC à excitation parallèle, $n = f(I)$	11
..... b. Caractéristique de couple $T = f(I)$	11
c. Caractéristique mécanique $T = f(I)$	11
1.6.2 Caractéristique de démarrage.....	12
1.6.3 Caractéristique de réglage de la fréquence de rotation.....	12
1.6.4 Inversion du sens de marche et freinage d'un MCC.....	13
1.7 Caractéristique d'un MCC à excitation parallèle selon le cahier de charge	13
..... CHAPITRE 2 : DIMENSIONNEMENT ET REALISATION	
.....	14
2.1 Montage à commutation parallèle double.....	14
2.1.1 Schéma du principe.....	14
2.1.2 Étude du fonctionnement.....	15
2.1.3 Étude des tensions.....	17
..... a. Chute de tension en charge	18
..... b. Tension maximale	18
..... c. Tension efficace	18
..... d. Tension inverse	18
2.1.4 Étude des courants.....	19

..... a. courant dans les diodes.	19
..... b. courant moyen dans les diodes	21
..... c. Courant efficace secondaire	21
..... d. Courant efficace primaire	21
2.1.5 Choix des diodes	22
2.1.6 Courant et facteur de puissance au secondaire du transformateur.....	22
2.2 Montage à commutation série.....	24
2.2.1 Schéma du principe.....	24
2.2.2 Étude du fonctionnement.....	25
2.2.3 Étude des tensions	27
..... a. Chute de tension	27
..... b. Tension maximale	28
..... c. Tension efficace	28
..... d. Rapport de transformation	28
..... e. Tension inverse	28
2.2.4 Étude des courants.....	29
..... a. Courant redressé nominal	29
..... b. Courant moyen dans les diodes	29
..... c. Courant efficace secondaire	29

..... d. Courant efficace primaire	29
..... e. Courant et facteur de puissance au secondaire	30
2.2.5 Choix des diodes	32
2.3 Calcul du transformateur.....	32
2.3.1 Puissance apparente du transformateur.....	32
2.3.2 Section du noyau magnétique	33
2.3.3 Nombre de spires par volt.....	33
2.3.4 Nombre de spires par phase au primaire	33
2.3.5 Nombre de spires par phase au secondaire	34
2.3.6 Calcul de la section du fil	35
..... a. Section dans le secondaire S3	35
..... b. Section dans le secondaire PD3	35
..... c. Section dans le primaire	35
2.3.7 Qualité des tôles du circuit magnétique	35
..... a. Avantages	35
..... b. Les caractéristiques de tôles utilisées dans le calcul	36
..... c. Calcul du circuit magnétique	36
2.3.8 Calcul des pertes dans le fer	37
..... a. Pertes par Hystérésis	37
..... b. Pertes par courant de Foucault	37

.....c. Pertes totales	37
2.3.9 Montage des tôles	39
a. Manière de découper les tôles	39
.....b. Section des colonnes	40
.....c. Assemblage colonne cuirasse	40
c. Disposition des bobinages	41
2.4 Répartition des spires sur les noyaux	42
2.4.1 Division des spires au primaire.....	42
2.4.2 Division des spires au secondaire	42
2.4.3 Variation de la résistance des fils de cuivre avec la température.....	43
.....a. Calcul de la résistance par phase à 75°C au primaire	44
.....b. Calcul de la résistance par phase à 75°C au secondaire S3	44
.....c. Calcul de la résistance par phase à 75°C au secondaire PD3	44
2.5 Chute de tension en fonctionnement normal.....	44
2.5.1 Réactance des fuites par phase dans le montage S3.....	45
2.5.2 Chute de tension due aux réactances.....	45
2.5.3 Chute de tension due aux résistances.....	45
2.5.4 Chute due aux diodes	45
2.5.5 Rendement du transformateur pour le montage S3	46
2.5.6 Réactance des fuites par phase dans le montage PD3.....	47
2.5.7 Chute de tension due aux réactances	47
2.5.8 Chute de tension due aux résistances	47
2.5.9 Chute due aux diodes	48
2.5.10 Rendement du transformateur pour le montage PD3.....	49

2.6 Fonctionnement en court-circuit.....	49
2.6.1 Cas du redresseur S3.....	49
.....a. Courant efficace secondaire	50
.....b. Courant efficace primaire	50
.....c. Courant de court-circuit moyen	50
.....d. Courant moyen de court-circuit	50
2.6.2 Cas du redresseur PD3.....	50
.....a. Courant efficace secondaire	50
.....b. Courant efficace primaire	51
.....c. Courant de court-circuit moyen	51
.....d. Courant moyen de court-circuit	51
.....e. Caractéristique du transformateur d'alimentation	51
2.7 Mise en série d'un redresseur type série S3 et d'un type parallèle double PD3.....	51
2.7.1 Fonctionnement.....	52
.....a. Condition de fonctionnement	52
.....b. Étude des tensions	53
.....c. Interprétation des courbes.....	54
.....d. Etude des courants	57

2.7.2 Comparaison des deux redresseurs à diode entre le type série et le type parallèle double.....	58
2.7.3 Avantage de la mise en série.....	60
2.7.4 Raison du travail et choix des redresseurs	61
CHAPITRE 3 COMMANDE DE PUISSANCE A L' AIDE D'UN CONTACTEUR.....	62
3.1 Introduction.....	62
3.2 Définition.....	62
3.3 Constitution d'un contacteur.....	63
3.4 Principe de fonctionnement	63
3.5 Schéma de base d'un démarrage de moteur à courant continu	64
3.6 Fonctionnement du circuit de puissance	65
3.7 Fonctionnement du circuit de commande	66
3.8 Choix d'un contacteur.....	67
3.9 Caractéristique des contacteurs KM1, KM2 et KM3	67
CHAPITRE 4..... DEVIS DE LA REALISATION	70
CHAPITRE 5 IMPACT ENVIRONNEMENTAL	72
4.1 Source des impacts.....	72
4.2 Impact négatif	72
a. Valeurs de la résistance du corps humain	72
b. Tension de contact	72
c. Les effets du contact électrique sur le corps humain	73
d. Effet de l'utilisation d'un convertisseur statique	73
4.3 Mesure d'atténuation.....	73
CONCLUSION.....	75
BIBLIOGRAPHIE.....	i

WEBOGRAPHIE.....	ii
ANNEXES.....	iii

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : schéma du circuit d'excitation ou inducteur.....	2
Figure 2 : schéma d'induit ou circuit de puissance	3
Figure 3 : Schéma détaillé d'un moteur à courant continu.....	4
Figure 4 : principe de fonctionnement d'un MCC en moteur.....	5
Figure 5 : principe de fonctionnement d'un MCC en génératrice.....	6
Figure 6 : machine à excitation indépendante.....	6
Figure 7 : machine à excitation shunt ou en dérivation.....	7
Figure 8 : machine excitation en série	7
Figure 9 : machine à excitation composée (compound)	7
Figure 10 : modèle de Thévenin	8
Figure 11 : schéma du bilan de puissance d'un MCC.....	10
Figure 12 : courbe Caractéristique de vitesse : $n = f(I)$	11
Figure 13 : courbe Caractéristique de couple : $T = f(I)$	11
Figure 14 : courbe Caractéristique mécanique : $T = f(n)$	12
Figure 15 : schéma du montage PD3.	14
Figure 16 : montage PD3 tension redressé	17
Figure 17 : courant dans les diodes	20
Figure 18 : fonctionnement du courant au secondaire	23
Figure 19 : allures d'ondes des courants dans le secondaire.	23
Figure 20 : schéma du montage S3.	24
Figure 21 : montage S3, tension redressé	27

Figure 22 : fonctionnement du courant au secondaire	30
Figure 23 : allure des courants au secondaire	31
Figure 24 : Pertes en fonction de l'induction pour les différentes tôles.	38
Figure 25 :Circuit magnétique.....	39
Figure 26 ; Découpages de joints.....	39
Figure 27 : Découpage à trois colonnes	40
Figure 28 :Section à trois gradins.....	40
Figure 29 :Assemblage des tôles.....	41
Figure 30 :Bobinage concentrique ou en tonneau.....	41
Figure 31 :Abaque de variation de la résistance des fil de cuivre.....	43
Figure 32 :Rendement pour le montage S3.....	47
Figure 33 :Rendement pour le montage PD3.....	49
Figure 34 : Schéma de fonctionnement pour le groupement en série.	52
Figure 35 : Chronogramme de la tension redressée pour le groupement en série	54
Figure 36 : Représentation du courant dans un enroulement primaire en fonction de l'enroulement secondaire.....	57
Figure 37 : Vue général d'un contacteur	62
Figure 38 : Symbole d'un contacteur tripolaire.....	63
Figure 39 : Circuit de puissance	65
Figure 40 : Circuit de commande.....	66
Figure 41 : abaque montrant la durée de vie électrique en million de manœuvre en fonction du courant coupée.....	68
Figure 42 : abaque montrant la durée de vie électrique en million de manœuvre en fonction de la puissance	6

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les couples d'un moteur à courant continu.....	9
Tableau 2 : Equation des puissances.....	10
Tableau 3 : Phase de fonctionnement du montage PD3 à diodes.....	16
Tableau 4 : Phase de fonctionnement du montage S3 à diodes.....	26
Tableau 5 : Nombre de spire au secondaire.....	34
Tableau 6 : Récapitulatif de valeurs calculées précédemment.....	42
Tableau 7 : Déroulement de la mise en série.....	56
Tableau 8 : Comparaison entre S3 et la mise en série.....	59
Tableau 9 : Coût des matériels utilisés.....	70
Tableau 10 : Coût des opérations.....	71
Tableau 11 : Valeur de la tension de contact.....	73
Tableau 12 : Effet du courant sur le corps humain.....	73

LISTES DES NOTATIONS ET SYMBOLES

Chapitre 1

B : Induction du champ magnétique

I : Courant d'excitation

df : Force élémentaire de Laplace

dl : Élément de longueur

I : Courant d'induit

e : Force électromotrice

ϕ : Flux magnétique

E : Force électromotrice induite

E' : Force contre électromotrice

U : Tension d'induit

R : Résistance d'induit

Ω : Vitesse angulaire

p : Nombre de paire de pôle

a : Nombre de voies d'enroulement

N_{ind} : Nombre des conducteurs d'induit

n : Vitesse de rotation de l'induit

ω : Pulsation angulaire

C_{em} : Couple électromagnétique

C_r : Couple résistant

C_j : Couple dynamique
 J : Moment d'inertie de toutes les masses tournantes
 P_e : Puissance électrique absorbée
 P_{exc} : Perte dans les circuits d'excitation
 P_{ci} : Perte dans le circuit d'induit
 P_f : Perte fer
 P_m : Perte mécanique
 P_{em} : Puissance électromagnétique
 P_{mu} : Puissance mécanique utile

 η : Rendement

 R_h : Rhéostat de démarrage

Chapitre 2

V_m : Tension maximale

 v_{Si} : Tension secondaire ($i = 1, 2, 3$)

 v_{Di} : Tension au borne d'une diode

 U_{di} : Tension redressée

 U_{d0} : Tension redressée à vide

 V : Tension efficace

 V_{imax} : Tension inverse maximale

I_d : Courant redressé

i_{moy} : Courant moyen

I_S : Courant efficace secondaire

I_p : Courant efficace primaire

f_S : Facteur de puissance secondaire

S_n : Section du noyau magnétique

K_f : Coefficient de foisonnement = 0.95

N : Nombre de spire par volt

P_{ap} : Puissance apparente

S_f : Section du fil

δ : Densité du courant

μ_v : Densité correspond au poids du fer

P_{fer} : Perte fer

P_N : Poids du noyau

P_c : Poids de la culasse

ρ : Résistivité du cuivre

$(1 + \alpha \theta)$: augmentation de la résistivité du cuivre à la température $\theta = ^\circ C$.

r : Résistance par phase à 75°C

$N_2 \omega$: Réactance des fuites par phase

$\Delta_1 U_d$: Chute de tension due aux réactances

$\Delta_2 U_d$: Chute de tension due aux résistances

$\Delta_3 U_d$: Chute due aux diodes

f_l : Facteur de puissance en ligne

τ : Taux d'harmoniques des courants en ligne

Chapitre 3

K M n : Contacteur de numéraux n

I_n : Intensité nominale absorbée par le primaire

E : Endurance ou durée de vie électrique

U_s : Tension assignée d'emploi

ABSTRACT

From making together the three phase transformer and the commutator, we can change the shape of the energy out come the three phase current for supply the direct current machine.

We choose to put on serial the commutator with kind of double parallels and the commutator with serial can shift kind others given the redressed voltage wave, so that all redressed voltage may less be wavy.

The power control systems are made by the contactor to transfer the energy.

INTRODUCTION

L'électronique de puissance est basée sur l'usage de composant de type semi-conducteur. Actuellement, les performances atteintes sont telles qu'un semi-conducteur formé par quelques millimètres carrés peut tenir des tensions dépassant le millier de volts et conduire des courants de plusieurs centaines d'ampère.

L'avantage essentiel de l'électronique de puissance est de modifier la forme d'un signal électrique de forte puissance avec une faible dépense d'énergie.

Dans le domaine de l'électricité industrielle, de nombreuses applications nécessitent une modification des formes d'énergie. L'une des fonctions de l'électronique de puissance est le redressement non commandé qui correspond à la conversion alternatif – continu. Les changements de présentation de l'énergie électrique sont effectués statiquement par les transformateurs et les convertisseurs à semi conducteur. D'où le présent travail intitulé : « ALIMENTATION ÉLECTRIQUE A COURANT CONTINU A FAIBLE ONDULATION ».

En effet, ce travail a pour but d'étudier un système formé par la mise en série de deux redresseurs triphasés à diodes de type parallèle double PD3 et du type série S3 alimenté par le même transformateur. Le premier chapitre repose sur les généralités des machines à courant continu, dans le deuxième chapitre nous allons étudier les tensions et courants de chaque redresseur afin de dimensionner le transformateur et les diodes. Le troisième est consacré à l'étude du basculement. Dans le quatrième chapitre sera établi le devis de la réalisation et enfin, dans le dernier chapitre les impacts environnementaux.

CHAPITRE 1 GENERALITES SUR LES MOTEURS A COURANT CONTINU

1.1 Introduction

Le moteur à courant continu est une machine réversible, elle peut fonctionner indifféremment soit comme réceptrice (ou moteur), soit comme génératrice (ou dynamo). Effectivement, les moteurs fonctionnant en courant continu transforment l'énergie électrique en énergie mécanique. Le MCC apporte une très grande souplesse de fonctionnement, il est de plus en plus associé à des équipements électroniques qui permettent une variation et une régulation de vitesse précise.

1.2 Constitutions

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales.

- L'inducteur
- L'induit
- Le dispositif collecteur/brushes

1.2.1 Inducteur ou circuit d'excitation

C'est un aimant ou un électroaimant (bobinage parcouru par un courant continu i). Il est situé sur la partie fixe de la machine, il est généralement appelé stator. La partie fixe est destinée à créer le flux magnétique dans le rotor.

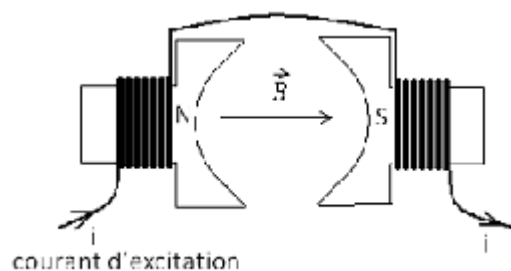


Figure 1 : Schéma du circuit d'excitation ou inducteur

1.2.2 L'induit ou circuit de puissance

L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine). C'est dans cette partie qu'il y a lieu la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique pour les moteurs et inversement pour les générateurs.

C'est un bobinage parcouru par un courant continu I (courant d'induit).

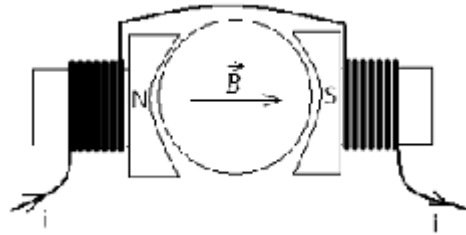


Figure 2 : Schéma d'induit ou circuit de puissance

1.2.3 Le collecteur et les balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.

Les balais sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.

Les dispositifs collecteurs et balais permettent donc de faire circuler un courant dans l'induit.

La carcasse ou culasse assure simultanément deux fonctions :

Magnétique : elle permet aux lignes de force du champ magnétique de se refermer, d'où une section minimale à respecter.

Mécanique : c'est le bâti de la machine sur lequel viennent se fixer les pôles, les flasques, la plaque à bornes

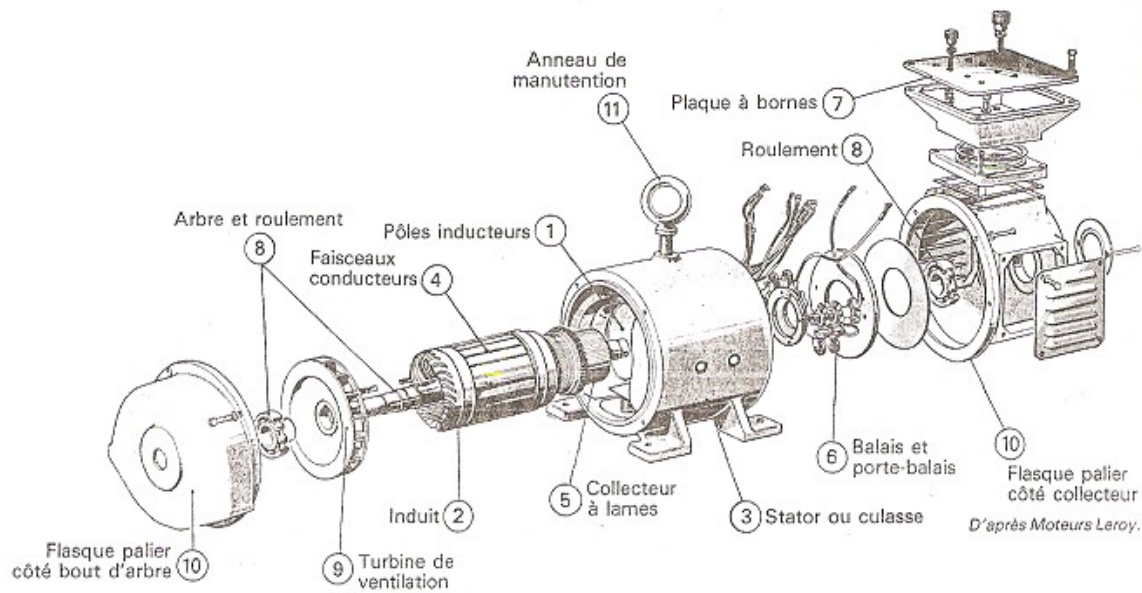


Figure 3 : Schéma détaillé d'un moteur à courant continu.

1.3 Principe et classification

1.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu est basé sur la loi de Laplace suivant :

Tout élément de circuit parcouru par un courant d'intensité I , placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ est soumis à une force $\vec{df}$, dite de Laplace

$$\vec{df} = I \vec{dl} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

avec : $\vec{df}$ perpendiculaire au plan défini par $\vec{B}$ et $\vec{dl}$

$\vec{df}$ est de module $B.I.dl. \sin(\widehat{\vec{dl}, \vec{B}})$

Son axe de rotation est donné par la règle de la main droite.

a. Fonctionnement en moteur

Soit une spire du bobinage d'induit :

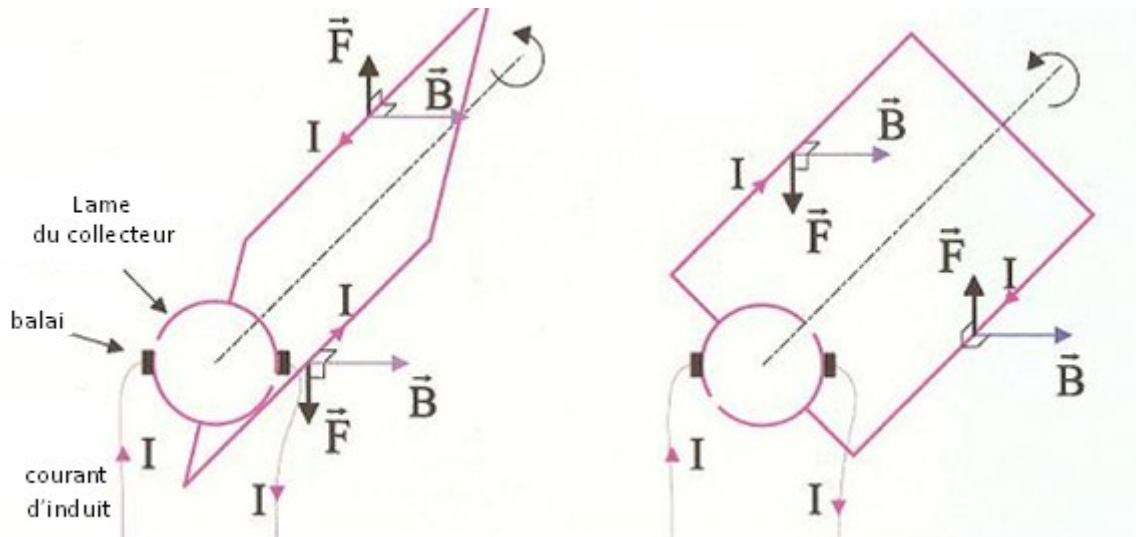


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un MCC en moteur

Le schéma précédent indique que le champ magnétique inducteur B en interaction avec le courant inducteur I donne :

- forces électromagnétiques ou force de Laplace
- couple électromagnétique
- rotation du rotor

b. Fonctionnement en génératrice

Le principe utilisé est le phénomène d'induction électromagnétique :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ loi de Faraday} \quad (2)$$

Soit une spire du bobinage d'induit :

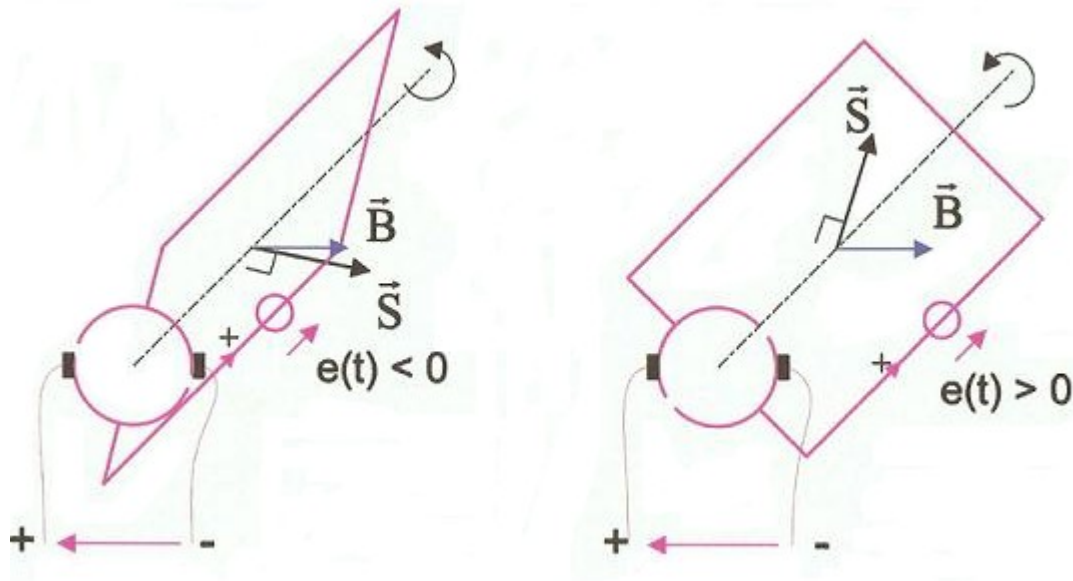


Figure 5 : Principe de fonctionnement d'un MCC en génératrice

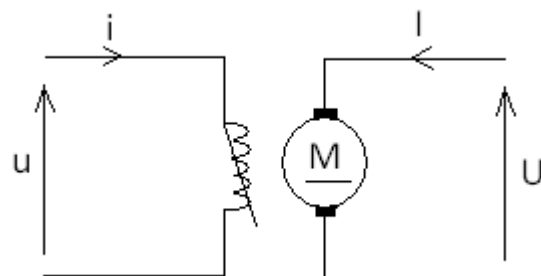
Le champ d'inducteur plus rotation de la spire donne :

- Variation du flux magnétique $\varphi = B \cdot S$.
- Création d'un fém. induite alternative

Le collecteur permet d'obtenir un fém. de forme continue.

1.3.2 Classification d'un MCC

On peut classer les moteurs à partir du mode de branchement de l'enroulement d'excitation par rapport à l'induit. Il existe des moteurs à excitation série, en dérivation et composée.



Circuit d'excitation

circuit d'induit

Figure 6 : Machine à excitation indépendante

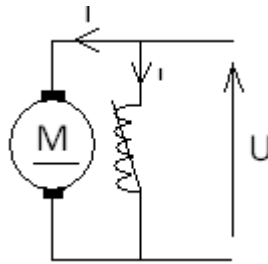


Figure 7 : Machine à excitation shunt ou en dérivation

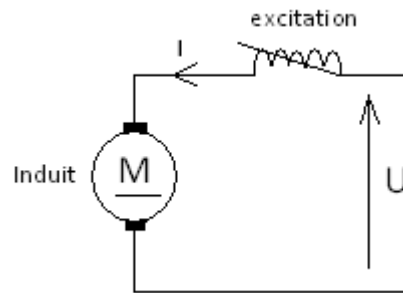


Figure 8 : Machine excitation en série

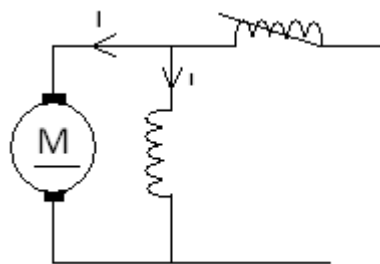


Figure 9 : Machine à excitation composée (compound)

1.4 Mise en équation

1.4.1. Schéma électrique équivalent

Les matériaux ferromagnétiques de la machine sont supposés linéaires. On utilise un modèle de Thévenin.

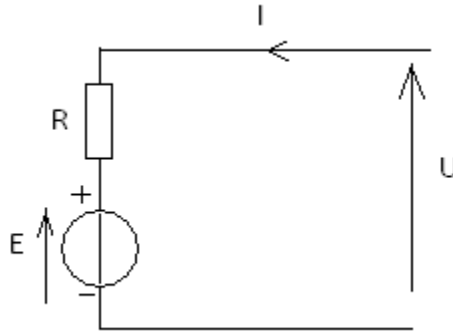


Figure 10 : Modèle de Thévenin

D'après la Loi des branches :

$$\boxed{U = E + RI} \quad (3)$$

- Fonctionnement en moteur :

$$I > 0; P_e = UI > 0, \text{ alors } E < U$$

- Fonctionnement en génératrice :

$$I < 0; P_e = UI < 0, \text{ alors } U < E$$

1.4.2 Expression de la force électromotrice induite

La loi de Faraday énonce que l'apparition d'un courant induit i dans un circuit entraîne une apparition d'une f.é.m. induite.

$$\boxed{E = \frac{pN}{2\pi a} \Omega \phi} \quad (4)$$

1.4.3 Expression de la force contre électromotrice

La loi de Lenz énonce que tout circuit fermé traversé par un champ magnétique de flux variable est siège d'un courant d'induit i , tel que son flux propre s'oppose à la variation du flux inducteur. Dans le cas d'un MCC, la f.c.é.m. et la variation d'un flux sont obtenues par la rotation du rotor.

$$\text{D'où } \boxed{e = N \frac{d\phi}{dt}} \quad (5)$$

1.4.4 Expression des couples

Il existe trois différents couples qui agissent sur l'arbre d'un MCC tel que :

- Couple électromagnétique
- Couple résistant
- Couple dynamique

On résume dans le tableau suivant leurs équations :

TYPES	EQUATION
Couple électromagnétique	$C_{em} = K' \phi I = \frac{p}{a} \times \frac{N}{2\pi}$
Couple résistant	Couple résistant constant : $C_r = K$ Couple résistant parabolique : $C_r = Kn^2$ Couple résistant hyperbolique : $C_r = \frac{K}{n}$
Couple dynamique	$C_j = J \frac{d\omega}{dt}$

Tableau 1 : Les couples d'un moteur à courant continu

1.5 Bilan des puissances

Selon le cahier de charge, le type du moteur est à excitation parallèle. Les puissances mises en jeu dans le moteur sont les suivants :

- Puissance absorbée
- Pertes électriques (perte joule à l'induit et à l'inducteur)
- Puissance électromagnétique

- Pertes collectives (dans le fer et mécanique)
- Puissance mécanique utile

On résume dans le tableau suivant leurs équations.

TYPES	EQUATION
Puissance électrique absorbée	$P_s = U(I_a + i_{exc})$
Pertes électriques	Dans les circuits d'excitation : $P_{exc} = U_{exc} I_{exc}$ Dans le circuit d'induit : $P_{ci} = R_a I_a^2$
Pertes fer et perte mécanique	$P_0 = P_f + P_m$
Puissance électromagnétique	$P_{em} = E' I_a$
Puissance mécanique utile	$P_{m.u} = P_{em} - P_0$

Tableau 2 : Equation des puissances

Le bilan des puissances est donné par le schéma synoptique suivant :

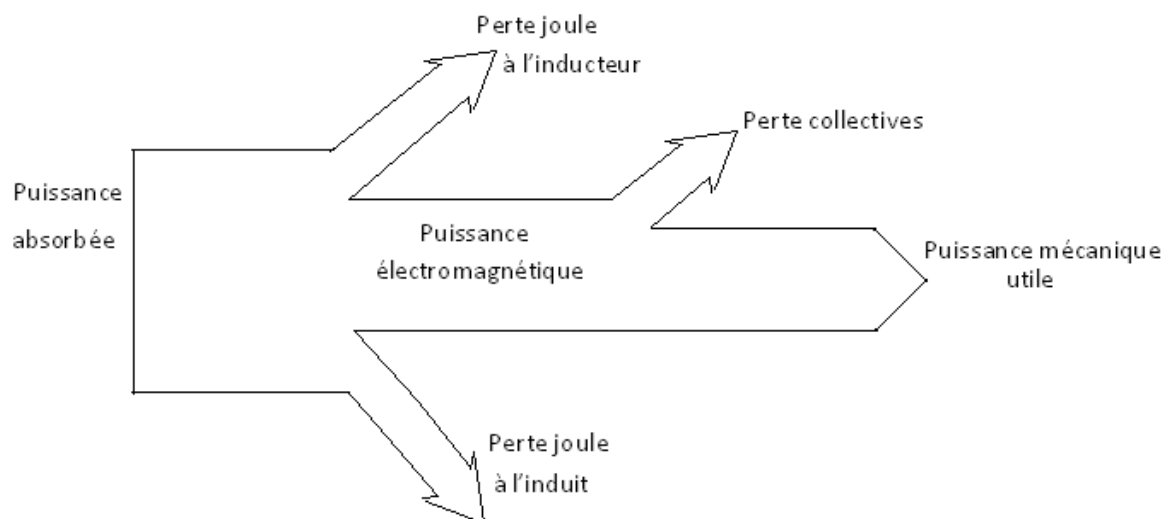


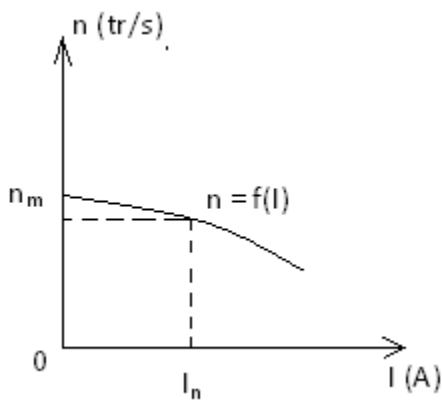
Figure 11 : Schéma du bilan de puissance d'un MCC

1.6 Caractéristiques des moteurs

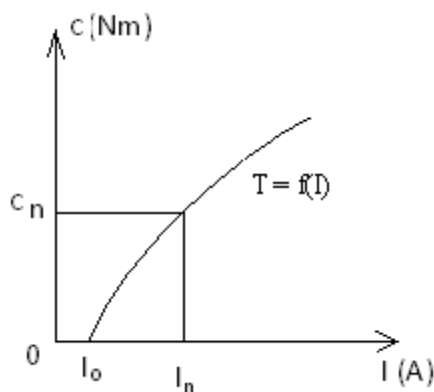
Pour mener à bien le fonctionnement d'un moteur il faut étudier les caractéristiques suivant :

1.6.1 Caractéristiques de fonctionnement

Ce sont les courbes qui traduisent graphiquement les relations entre les variables : courant absorbé, vitesse et couple moteur.

a. Caractéristique de vitesse d'un moteur à excitation parallèleFigure 12 : Courbe Caractéristique de vitesse : $n = f(I)$

Avec $n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{U - K_a I_a}{K\phi}$ (6) car d'après l'équation de f.c.é.m. $E = I_a - K_a$ et $K = \frac{Z}{a} N = \text{constante}$

b. Caractéristique de couple : $T = f(I)$ Figure 13 : Courbe Caractéristique de couple : $T = f(I)$

Le couple est proportionnel au flux et au courant absorbé,

Son équation est $T = K' \Phi I$ (7), avec $K' = \frac{Z}{a} \times \frac{N}{2\pi}$

c. Caractéristique mécanique : $C = f(n)$

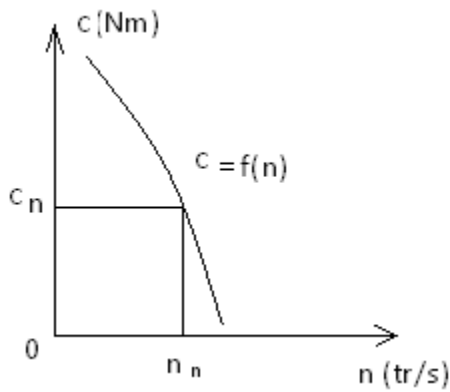


Figure 14 : Courbe Caractéristique mécanique : $C = f(n)$

Elle relie les grandeurs mécaniques que l'on mesure sur l'arbre de sortie du moteur

Rendement du moteur : $\eta = f(I)$

$$\eta = \left(1 - \frac{P_o + P_{exc} + R_a I_a^2 + \Delta U_b I_a}{U(I_a + i_{exc})} \right) \times 100 \quad (8)$$

1.6.2 Caractéristique de démarrage

Le courant absorbé en fonctionnement est :

$$I = \frac{U}{R} \quad (9), \text{ c'est-à-dire le moteur tourne}$$

A la mise sous tension, c'est-à-dire que le moteur est alimenté mais à l'arrêt, la f.é.m. est nulle

$$\text{D'où : } I = \frac{U}{R},$$

la résistance R de l'induit est très faible, d'où une intensité de démarrage très élevée.

Pour limiter le courant de démarrage à une valeur comprise entre $1.2 I_n < I_d < 2 I_n$, on monte une résistance en série dans le circuit d'induit du moteur appelé rhéostat de démarrage (R_h).

Pour le cas d'un moteur shunt l'excitation doit être maximale au démarrage.

1.6.3 Caractéristique de réglage de la fréquence de rotation

L'expression donnant la fréquence de rotation est :

$$n = \frac{U \cdot t \cdot (K + K_n)}{C \cdot \phi} \quad (10)$$

1.6.4 Inversion du sens de marche et freinage des MCC

Pour inverser le sens de rotation, on inverse le courant dans l'induit, sans inverser le courant d'excitation, ou en inverse le sens du courant d'excitation sans inverser le courant d'induit, inversion que l'on réalise sur la plaque à bornes.

En ce qui concerne le freinage, on utilise l'un des procédés suivants :

- Freinage rhéostatique
- Freinage à contre-courant
- Freinage par récupération

1.7 Caractéristique d'un MCC à excitation shunt selon le cahier des charges

Circuit d'induit

$$U = 220[V] ; I_a = 40[A]$$

Circuit d'excitation :

$$U_{exc} = 440[V] ; I_{exc} = 0.29[A]$$

$$\text{Puissance nominale : } P_n = 3[kW]$$

$$\text{Vitesse de rotation : } n = 1500[rev \cdot min^{-1}]$$

CHAPITRE 2 DIMENSIONNEMENT ET REALISATION

Avant d'aboutir à la mise en série des deux redresseurs, il nous faut étudier chaque type de redressement. L'un à commutation parallèle double et l'autre à commutation série.

2.1 Montages à commutation parallèle double (pont de Graëtz) :

En triphasé, le redresseur du type parallèle double (PD3) ou pont à six diodes est l'un des plus courants.

2.1.1 Schéma du principe

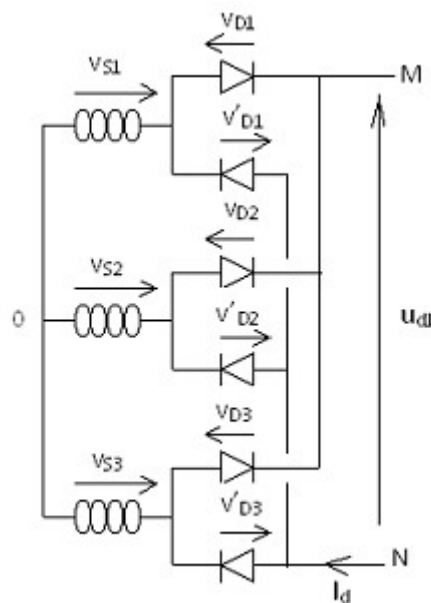


Figure 15 : Schéma du montage PD3.

Le montage redresseur PD3 à diodes est constitué de 6 diodes, connectées deux par deux en inverse, à chacune des phases du secondaire d'un transformateur triphasé, dont les enroulements sont regroupés en étoile. Le débit de D_1 ou D_2 ou D_3 rend la tension $v_M - v_0$ égale à la plus grande des trois tensions, v_{s1} , v_{s2} ou v_{s3} . De même, le débit de la diode correspondante à D'_1 , D'_2 , D'_3 , rend $v_N - v_0$ égal à la plus négative des tensions v_{s1} , v_{s2} ou v_{s3} .

2.1.2 Étude du fonctionnement

Comme nous avons un réseau triphasé, on obtient au secondaire du transformateur un système triphasé équilibré de tension(v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}) , qu'on notera :

$$v_{s1}(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (11) \quad v_{si}: \text{tension instantanée au secondaire}$$

$$v_{s2}(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (12) \quad V_m: \text{tension maximale [V]}$$

$$v_{s3}(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (13) \quad \omega: \text{pulsation} \left[\frac{rd}{s} \right]$$

$\varphi: \text{phase à l'origine [rd]}$

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont résumées par le tableau suivant :

Intervalles	Diodes passantes	Tension redressée	Tensions aux bornes des diodes bloquées
$\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}$	D_1, D'_2	$u_{d1} = -v_{D'_2} - v_{S_2} + v_{S_1} - v_{D_1} \cong v_{S_1} - v_{S_2}$	$v_{D2} \cong v_{S_2} - v_{S_1}$ $v_{D3} \cong v_{S_3} - v_{S_1}$ $v_{D'1} \cong v_{S_2} - v_{S_1}$ $v_{D'3} \cong v_{S_2} - v_{S_3}$
$\frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6}$	D_1, D'_3	$u_{d1} = -v_{D'_3} - v_{S_3} + v_{S_1} - v_{D_1} \cong v_{S_1} - v_{S_3}$	$v_{D2} \cong v_{S_2} - v_{S_1}$ $v_{D3} \cong v_{S_3} - v_{S_1}$ $v_{D'1} \cong v_{S_3} - v_{S_1}$ $v_{D'3} \cong v_{S_3} - v_{S_2}$
$\frac{5\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{7\pi}{6}$	D_2, D'_3	$u_{d1} = -v_{D'_3} - v_{S_3} + v_{S_2} - v_{D_2} \cong v_{S_2} - v_{S_3}$	$v_{D1} \cong v_{S_1} - v_{S_2}$ $v_{D3} \cong v_{S_3} - v_{S_2}$ $v_{D'1} \cong v_{S_3} - v_{S_1}$ $v_{D'2} \cong v_{S_3} - v_{S_3}$

$\frac{7\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2}$	D_2, D'_1	$u_{d1} = -v_{D'_1} - v_{S_1} + v_{S_2} - v_{D_2} \cong v_{S_2} - v_{S_1}$	$v_{D1} \cong v_{S1} - v_{S2}$ $v_{D3} \cong v_{S3} - v_{S2}$ $v_{D'2} \cong v_{S1} - v_{S2}$ $v_{D'3} \cong v_{S1} - v_{S3}$
$\frac{3\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{11\pi}{6}$	D_3, D'_1	$u_{d1} = -v_{D'_1} - v_{S_1} + v_{S_3} - v_{S_1} \cong v_{S_3} - v_{S_1}$	$v_{D1} \cong v_{S1} - v_{S3}$ $v_{D2} \cong v_{S2} - v_{S3}$ $v_{D'2} \cong v_{S1} - v_{S2}$ $v_{D'3} \cong v_{S1} - v_{S3}$
$\frac{11\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{13\pi}{6}$	D_3, D'_2	$u_{d1} = -v_{D'_2} - v_{S_2} + v_{S_3} - v_{D_3} \cong v_{S_3} - v_{S_2}$	$v_{D1} \cong v_{S1} - v_{S3}$ $v_{D2} \cong v_{S2} - v_{S3}$ $v_{D'1} \cong v_{S2} - v_{S1}$ $v_{D'3} \cong v_{S2} - v_{S3}$

Tableau 3 : Phase de fonctionnement du montage PD3 à diodes

On peut tracer alors les courbes de la tension en fonction du temps :

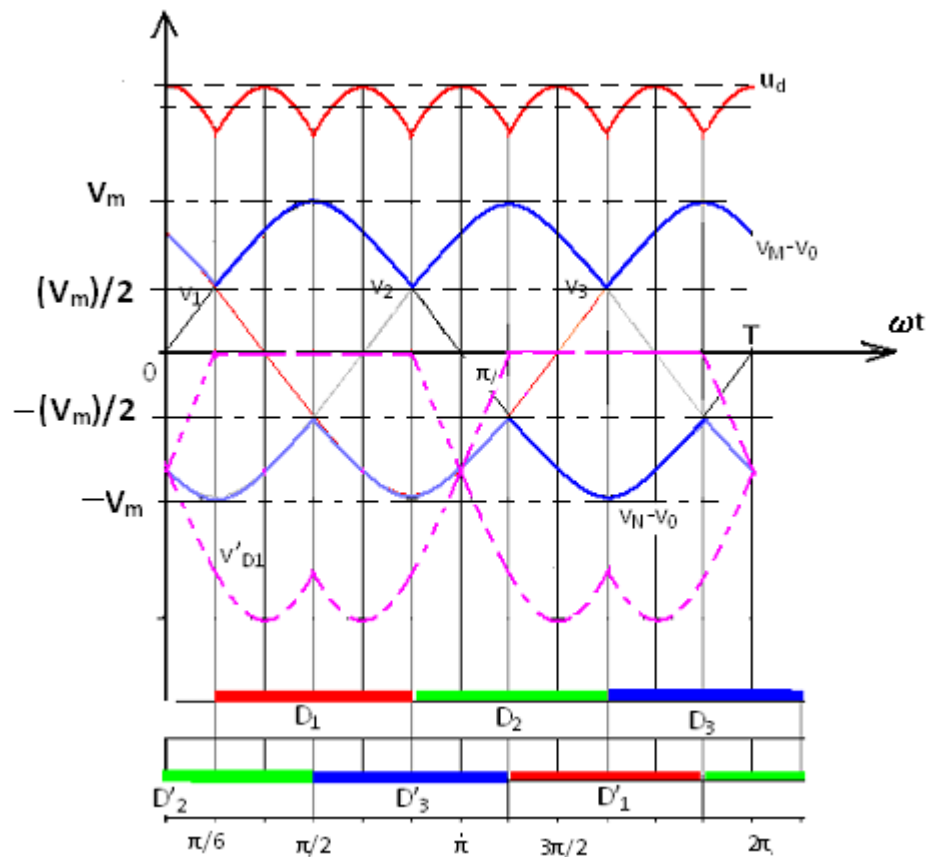


Figure 16 : Montage PD3 tension redressée

V : valeur efficace de la tension simple

V_m : tension maximale

v_{Di} : tension inverse de la diode

V_{moy} : valeur moyenne de la tension redressée

U_d : tension continue

Les 3 diodes D_1, D_2, D_3 forment un commutateur plus positif, qui laisse passer à tout instant la plus positive des tensions, et les diodes D'_1, D'_2, D'_3 forment un commutateur plus négatif à tout instant la différence entre ces deux tensions .

2. 1.3 Étude des tensions

A l'entrée, nous avons un réseau alternatif d'alimentation triphasé 380 [V], 50 [Hz] ;

Puis on adopte ce type de redressement pour avoir à la sortie, une tension continue de 110 [V] avec un courant continu $I_n = 20$ [A].

a. Chute de tension en charge

On prend une chute de tension en charge probable ΔU_d , composée de :

ΔU_R : chute ohmique environ 2,5% ; ΔU_L : chute inductive environ 1,5% ΔU_D : chute de tension aux bornes des diodes qui est de l'ordre de 2,5(V).

Approximativement on prend $\Delta U_d = \Delta U_R + \Delta U_L + \Delta U_D = 5\% U_d$

D' où la tension redressée à vide est :

$$U_{d0} = U_d + \Delta U_d \quad (14)$$

$$U_{d0} = 110 + 5.5$$

$$U_{d0} = 115.5 \text{ [V]}$$

b. Tension maximale

$$V_m = \frac{\pi U_{d0}}{2q \sin \pi/q} \quad (15)$$

$$\text{an : } V_m = \frac{\pi \times 115.5}{2 \times 3 \times \sin \pi/3}$$

$$\text{Donc } V_m = 69.831 \text{ [V]}$$

c. Tension efficace

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (16) \quad \text{an : } V = \frac{69.83}{\sqrt{2}} \quad V = 49.38 \text{ [V]}$$

d. Tension inverse

$$V_{imax} = 2 V_m \cos \frac{\pi}{2q} \quad (17)$$

$$\text{an : } V_{imax} = 2 V_m \cos \frac{\pi}{2 \times 3}$$

$$V_{imax} = 120.951 \text{ [V]}$$

2.1.4 Étude des courants

a. Courant dans les diodes

Durant chaque période T , chacune des diodes D_1, D_2, D_3 débite le courant continu I_d à tour de rôle. Chacun des courants i_1, i_2, i_3 est égal à I_d pendant $T/3$ nul pendant le reste du période. De même le retour du courant I_d nécessite la conduction de l'une des trois diodes D'_1, D'_2, D'_3 , le courant de sortie étant considéré comme constant, de valeur I_d . On déduit à partir de ce fonctionnement les formes d'ondes des courants.

i_1, i_2, i_3 : sont respectivement les courants dans les diodes D_1, D_2, D_3

i'_1, i'_2, i'_3 : sont respectivement les courants dans les diodes D'_1, D'_2, D'_3

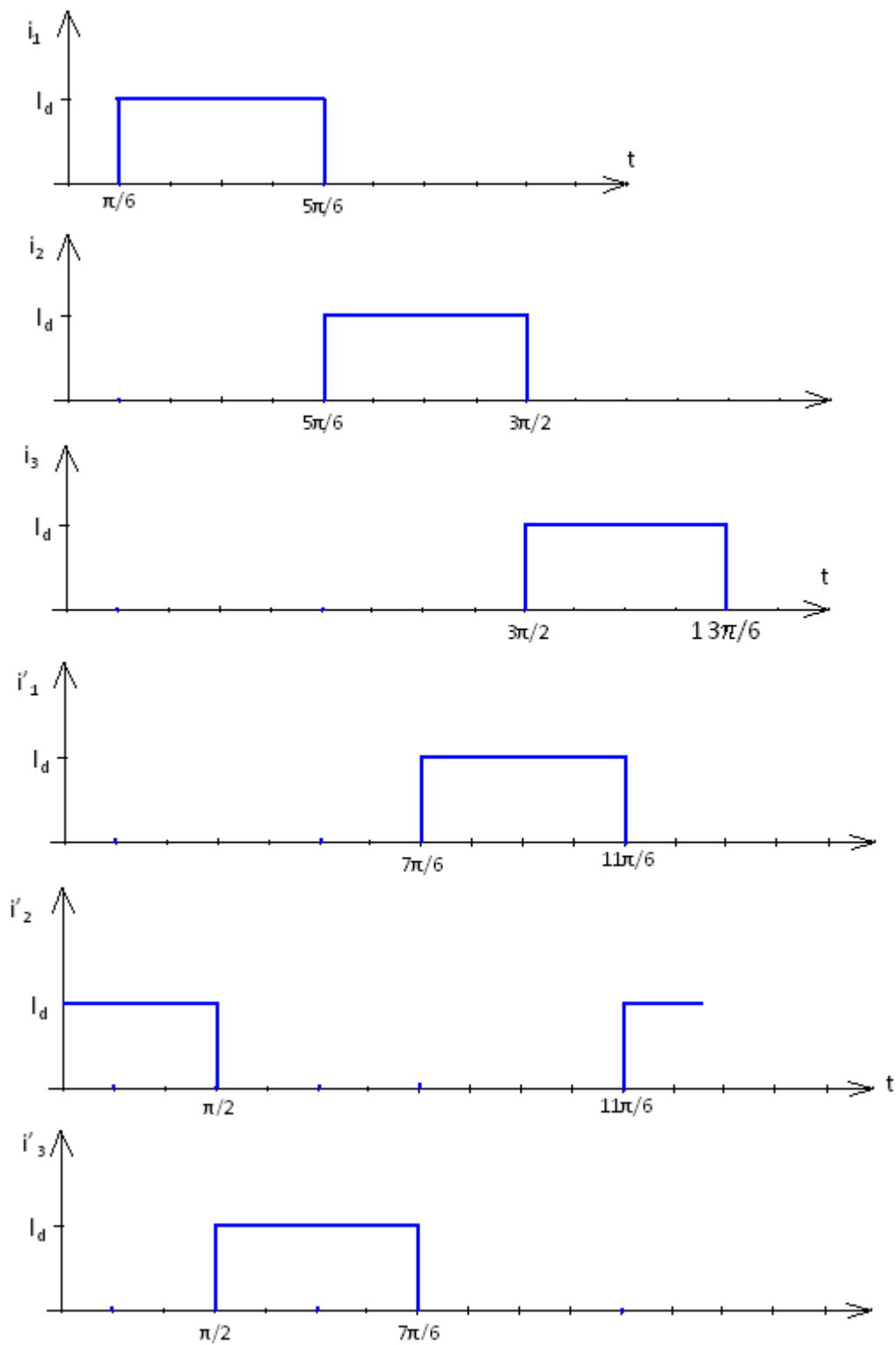


Figure 17 : Courant dans les diodes

b. Courant moyen dans les diodes

L'intensité moyenne d'un courant variable est égale à l'intensité que doit avoir un courant continu constant pour transporter dans le même temps la même quantité d'électricité

Son expression est :

$$i_{moy} = \frac{1}{T} \int i_{\alpha}(t) dt \text{ avec } \alpha = 1, 2, 3$$

$$\boxed{i_{moy} = \frac{I_d}{q}}, \quad (18)$$

$$\text{an: } i_{moy} = \frac{20}{3},$$

$$\boxed{i_{moy} = 6.67 [A]}$$

c. Courant efficace secondaire

La valeur efficace des courants secondaires est donc

$$\boxed{I_s = \sqrt{\frac{1}{T} (I_d^2 2 \frac{T}{q})}} \quad (19)$$

$$I_s = I_d \sqrt{\frac{2}{q}}$$

$$\text{an : } I_s = 20 \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$\text{donc } \boxed{I_s = 16.33 [A]}$$

d. Courant efficace primaire

Concernant le redresseur PD3, à chaque instant l'un des trois courants secondaires égale à I_d , l'autre $-I_d$, donc $n_2 i_{S1} + n_2 i_{S2} + n_2 i_{S3} = 0$ et les courants dans les bobines primaires sont les mêmes quel que soit le couplage

$$n_1 i_{P1} = n_2 i_{S1}, \quad n_1 i_{P2} = n_2 i_{S2}, \quad n_1 i_{P3} = n_2 i_{S3}$$

$$I_p = \frac{n_2}{n_1} I_S = \frac{n_2}{n_1} I_d = \frac{n_2}{n_1} I_d \sqrt{\frac{2}{3}} ; \text{ alors } \boxed{I_p = \frac{n_2^2}{n_1} I_S} \quad (20)$$

$$I_p = 0.224 \times 16.33 \quad \boxed{I_p = 3.67 [A]}$$

2.1.5 Choix des diodes

Rappel sur la caractéristique d'un semi-conducteur de puissance

Avant de choisir la diode, il est indispensable de suivre les conditions favorables pour éviter le phénomène de claquages.

- ✓ La diode est le semi-conducteur élémentaire constitué par une seule jonction PN. A l'état passant, c'est-à-dire de l'anode A vers la cathode K, il faut veiller à ce que la valeur de i_K (courant dans le sens de A vers K) ne dépasse pas le courant direct moyen tolérable par la diode.
- ✓ A l'état bloqué, il faut veiller à ce que la tension inverse reste inférieure à la tension inverse maximale que peut supporter la diode.

A partir du tableau de sélection des diodes de redressement standard, chacune des 6 diodes a les caractéristiques suivantes :

- Courant moyen à l'état passant $i_{\text{moy}} = 12(A)$
- Référence : BYW 88-400
- Tension inverse $V_{\text{RRM}} = 100-1000(V)$

A cause des surcharges normales et de la faible constante de temps thermique des diodes, on doit majorer le courant moyen des diodes.

Pour des raisons de sécurité on majore de 50 % environ la tension inverse des diodes.

2.1.6 Courant et facteur de puissance au secondaire du transformateur

Dans le cas du montage PD3, le sens du courant va s'orienter comme suit :

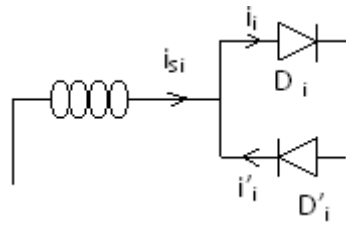


Figure 18 : Fonctionnement du courant au secondaire

Les courants dans le secondaire d'indice i et les diodes D_i et D'_i dans chaque enroulement secondaire étant réunis à deux diodes parcourues par un courant pendant deux intervalles de durée T/q .

Ainsi, $i_{si} = +I_d$ quand la diode D_i conduit et $i_{si} = -I_d$ quand la diode D'_i conduit. D'où les formes d'ondes des courants dans le secondaire du transformateur :

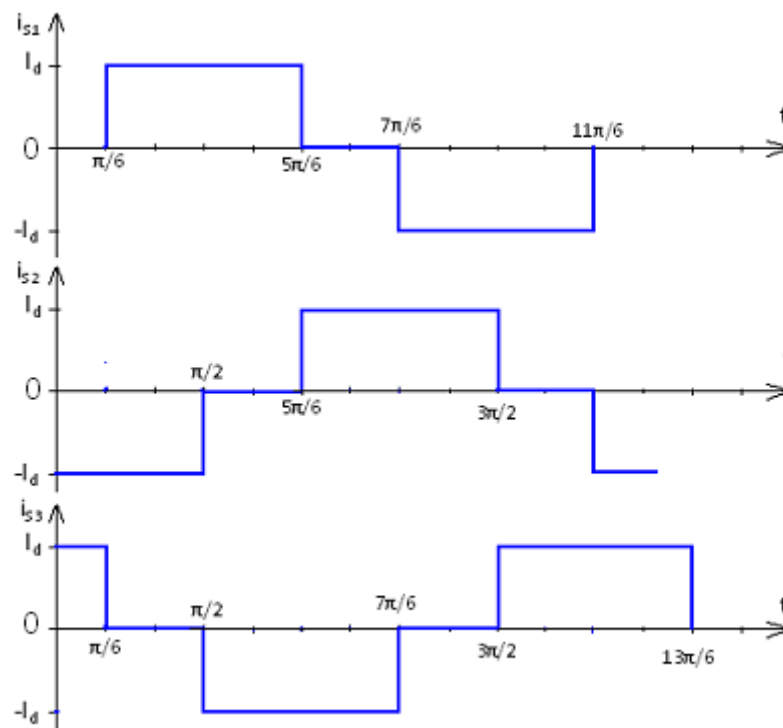


Figure 19 : Allures d'ondes des courants dans le secondaire.

Le facteur de puissance secondaire est donné par :

$$f_s = \frac{U_{d0} I_d}{q V I_s} = \frac{\frac{2q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q} I_d}{q \frac{V_m}{\sqrt{2}} I_d \sqrt{\frac{2}{q}}}$$

à pour valeur : $f_s = \frac{2}{\pi} \sqrt{q} \sin \frac{\pi}{q}$ (21)

$$f_s = \frac{2}{\pi} \sqrt{3} \sin \frac{\pi}{3}$$

$f_s = 0.955$ f_s est voisin de l'unité pour q faible, mais il diminue si on augmente q .

2.2 Montage à commutation série

Le type de montage considéré est le redresseur à diode S3 ou pont à commutation série en triphasé.

2.2.1 Schéma du principe

Ce montage est constitué de 6 diodes connectées deux par deux à chacun des nœuds des enroulements secondaires groupés en triangle d'un transformateur.

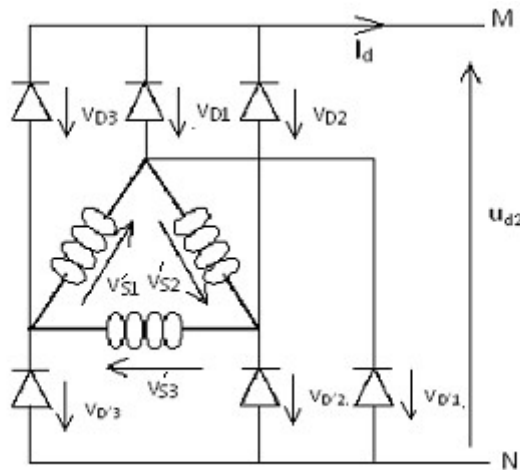


Figure 20 : Schéma du montage S3.

Le principe de fonctionnement est basé sur la détection par les diodes du point de potentiel le plus positif relié au point M et du point de potentielle le plus négatif relié au point

N. Donc les diodes D_1, D_2, D_3 conduisent dès que v'_{s1}, v'_{s2} ou v'_{s3} deviennent positifs, et D'_1, D'_2, D'_3 dès que v'_{s1}, v'_{s2} ou v'_{s3} deviennent négatifs.

2.2.2 Étude du fonctionnement

À partir du réseau triphasé, on obtient au secondaire du transformateur un système triphasé équilibré de tension (v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}) comme avant :

$$v'_{s1}(t) = V_m \sin(\omega t); v'_{s2}(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); v'_{s3}(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (22)$$

,Les différentes phases de fonctionnement du montage sont résumées par le tableau suivant :

Intervalles	Diodes passantes	Tension redressée	Tensions aux bornes des diodes bloquées
$0 \leq \omega t < \frac{\pi}{3}$	D_1, D'_2	$u_{d2} = -v_{D'_2} - v'_{s2} - v_{D_1} \cong -v'_{s2}$	$v_{D2} \cong v'_{s2}$ $v_{D3} \cong v'_{s1}$ $v_{D'_1} \cong v_{s2}$ $v_{D'_3} \cong -v'_{s3}$
$\frac{\pi}{3} \leq \omega t < \frac{2\pi}{3}$	D_1, D'_3	$u_{d2} = -v_{D'_3} + v'_{s1} - v_{D_1} \cong v'_{s1}$	$v_{D2} \cong v_{s2}$ $v_{D3} \cong -v'_{s1}$ $v_{D'_1} \cong -v'_{s1}$ $v_{D'_3} \cong v'_{s3}$

$\frac{2\pi}{3} \leq \omega t < \pi$	D_2, D'_3	$u_{d2} = -v_{D'_3} - v'_{S_3} - v_{D_2} \cong -v'_{S_3}$	$v_{D1} \cong -v'_{S2}$ $v_{D3} \cong v'_{S3}$ $v_{D'1} \cong -v'_{S1}$ $v_{D'2} \cong -v'_{S3}$

$\pi \leq \omega t < \frac{4\pi}{3}$	D_2, D'_1	$u_{d2} = -v_{D'_1} + v'_{S_2} - v_{D_2} \cong v'_{S_2}$	$v_{D1} \cong -v_{S2}$ $v_{D3} \cong v_{S3}$ $v_{D'2} \cong -v_{S2}$ $v_{D'3} \cong v_{S1}$
$\frac{4\pi}{3} \leq \omega t < \frac{5\pi}{3}$	D_3, D'_1	$u_{d2} = -v_{D'_1} - v_{S_1} - v_{D_3} \cong -v_{S_1}$	$v_{D1} \cong v_{S1}$ $v'_{D2} \cong -v'_{S3}$ $v_{D'2} \cong -v_{S2}$ $v_{D'3} \cong v_{S1}$
$\frac{5\pi}{3} \leq \omega t < 2\pi$	D_3, D'_2	$u'_{d2} = -v_{D'_2} + v'_{S_3} - v_{D_3} \cong v'_{S_3}$	$v_{D1} \cong v_{S1}$ $v_{D2} \cong -v'_{S3}$ $v_{D'1} \cong v'_{S2}$ $v_{D'3} \cong -v'_{S3}$

Tableau 4 : Phase de fonctionnement du montage S3 à diodes

La tension redressée U_d , s'additionnant à chaque instant à des tensions positives, est formée de 6 sommets par période T . Le montage suivant montre le redresseur S3 qui redresse les trois tensions engendrées dans des enroulements en triangle :

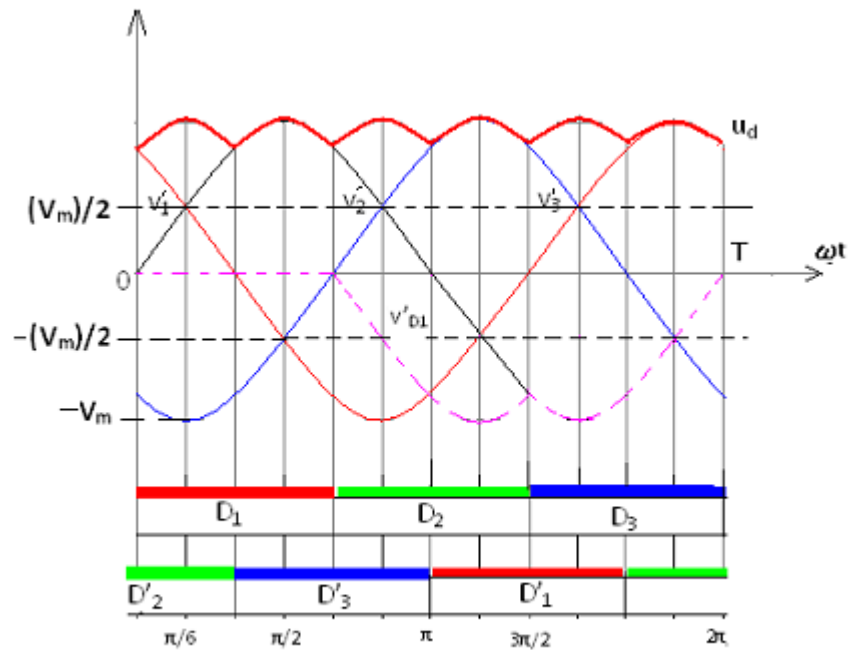


Figure 21 : Montage S3, tension redressée

2.2.3 Étude des tensions

Le déroulement adopté pour l'étude des redresseurs permet de calculer les éléments d'un montage.

a. Chute de tension en charge

Comme le montage précédent, on prend une chute de tension en charge probable ΔU_d :

ΔU_R : chute ohmique environ 2,5% ; ΔU_L : chute inductive environ 1,5% ΔU_D : chute de tension aux bornes des diodes qui est de l'ordre de 2,5(V).

Approximativement on prend $\Delta U_d = \Delta U_R + \Delta U_L + \Delta U_D = 5\% U_d$

D' où la tension redressée à vide est :

$$\boxed{U_{d0} = U_d + \Delta U_d} \quad (23)$$

$$U_{d0} = 110 + 5.5$$

$$\boxed{U_{d0} = 115.5 [V]}$$

b. Tension maximale

La valeur moyenne U_{do} est donnée par la valeur positive moyenne de chaque tension multipliée par le nombre de tensions alternatives, tel le que :

$$U_{do} = \frac{\pi}{q} V_m \quad (24)$$

$$V_m = \frac{q}{\pi} U_{do}$$

$$\text{an : } V_m = \frac{\pi}{3} 115.5$$

$$\text{Donc : } V_m = 120.95 [V]$$

c. Tension efficace

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (25) \text{ an : } V = \frac{120.95}{\sqrt{2}}$$

$$\text{d' où } V = 85.53 [V]$$

d. Rapport de transformation à vide du transformateur :

$$m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V}{U} \quad (26)$$

$$\text{alors : } \frac{n_2}{n_1} = \frac{85.53}{220}$$

$$\text{donc : } m = 0.389 [V]$$

e. Tension inverse maximale des diodes :

La tension aux bornes d'une diode a pour expressions successives les diverses sommes ou leurs inverses des tensions polyphasées se présentant dans l'ordre de succession des phases, la tension inverse maximale est donc égale à la valeur maximale de la tension redressée. Suivant la parité du nombre q de phases, cela donne

$$V_{imax} = \frac{V_m}{2 \sin(\frac{\pi}{2q})} \quad (27)$$

an: $V_{imax} = \frac{120.95}{2 \sin(\frac{\pi}{6})}$ $V_{imax} = 120.95 [V]$

2.2.4 Étude des courants

a. Courant redressé nominal

Chaque diode écoule le courant redressé supposé constant I_d , pendant T/q .

$$I_d = 20 [A]$$

b. Courant moyen dans les diodes

$$i_{moy} = \frac{I_d}{q} \quad (28)$$

an : $i_{moy} = \frac{20}{3}$ $i_{moy} = 6.67 [A]$

c. Courant efficace secondaire

$$I_s = \frac{I_d \sqrt{q^2 - 1}}{2q} \quad (29)$$

an : $I_s = \frac{20\sqrt{8}}{6}$ $I_s = 9.43 [A]$

d. Courant efficace primaire

On déduit les courants primaires des courants secondaires à l'aide des relations d'ampères-tours. Pour le redresseur S3, il y a compensation des ampères-tours par noyau :

$$n_1 i_{p1} = n_2 i_{s1}; \quad n_1 i_{p2} = n_2 i_{s2}; \quad n_1 i_{p3} = n_2 i_{s3}$$

$$I_p = \frac{n_1}{n_2} \times I_s \quad (30)$$

Donc $I_p = 0.389 \times 9.43$ $I_p = 3.67 [A]$

e. Courant et facteur de puissance au secondaire

En raison de l'agencement en triangle des enroulements secondaires du transformateur, le courant redressé I_d se répartit en deux courants d'intensité $I_d/3$ et $2 I_d/3$.

Dans le cas de l'intervalle $0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3}$, $i_{s1} = i_{s3} = I_d/3$

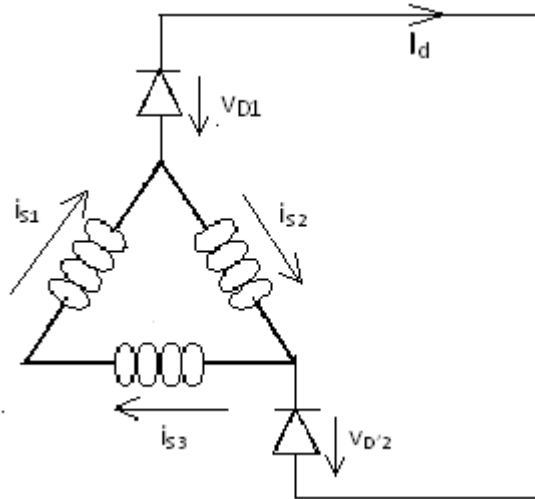


Figure 22 : Fonctionnement du courant au secondaire

Chaque enroulement est donc parcouru successivement par des courants $\pm \frac{I_d}{3}$ et $\pm 2 \frac{I_d}{3}$, en fonction des diodes qui sont passantes. C'est-à-dire, par période T , il y a $2q$ intervalles de durée $T/2q$. Donc chaque phase occupe au cours d'une période les $2q$ cas possibles.

Pour $q=3$, elle est donc parcourue par

- $+\frac{q-1}{2q} I_d = +\frac{I_d}{3}$ pendant $\frac{q+1}{2} I_d = 2$ intervalles
- $+\frac{q+1}{2q} I_d = +\frac{2I_d}{3}$ pendant $\frac{q-1}{2} I_d = 1$ intervalle
- $-\frac{q-1}{2q} I_d = -\frac{I_d}{3}$ pendant $\frac{q+1}{2} I_d = 2$ intervalles
- $-\frac{q+1}{2q} I_d = -\frac{2I_d}{3}$ pendant $\frac{q-1}{2} I_d = 1$ intervalle

On obtient dans les secondaires, les formes d'ondes de courant suivantes :

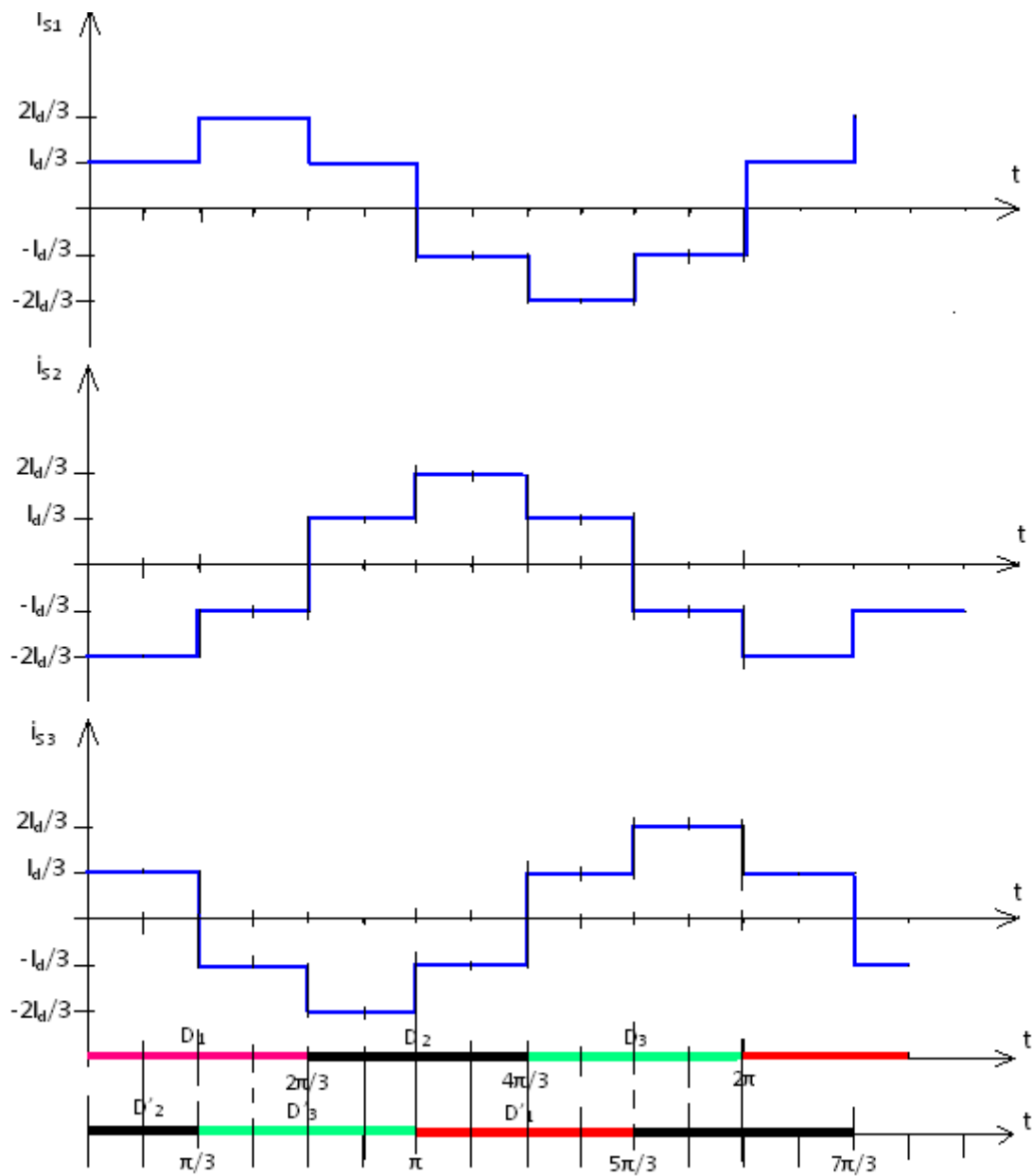


Figure 23 : Allure des courants au secondaire S3

Le facteur de puissance secondaire est :

$$f_s = \frac{U_{d0} I_d}{q V I_S} = \frac{\frac{q}{\pi} V_m I_d}{q \frac{V_m I_d}{\sqrt{2} 2}} \quad (31)$$

$$f_s = \frac{2\sqrt{2}}{2}$$

Donc $f_s = 0.90$:

2.2.5 Choix des diodes

Les caractéristiques des diodes qu'on choisit dans le montage PD3 sont admissibles pour le montage S3. On prendra 6 diodes de courant moyen 12 [A], de tension inverse 100 – 1000 [V].

- Référence : BYW 88-400
- Tension inverse $V_{RRM} = 100-1000(V)$

A cause des surcharges normales et de la faible constante de temps thermique des diodes, on doit majorer le courant moyen des diodes.

Pour des raisons de sécurité on majore de 50 % environ la tension inverse des diodes.

2.3 Calcul du transformateur

En général, le transformateur est utilisé pour assurer une tension convenable à l'entrée des montages que ce soit en parallèle double ou en série.

2.3.1 Puissance apparente du transformateur

$$P_{ap} = 3 \times V \times I_s \quad (32)$$

V : valeur efficace de la tension secondaire

I_s : courant efficace secondaire

$$\text{Pour le montage PD3 : } P_{ap} = 3 \times 49.378 \times 16.33$$

$$P_{ap} = 2419.028 [VA]$$

$$\text{Pour le montage S3 : } P_{ap} = 3 \times 85.525 \times 9.43$$

$$P_{ap} = 2419.50 [VA]$$

En supposant que les déphasages courants et tensions sont les mêmes

Alors la puissance apparente totale du transformateur est :

$$P_{ap} = P_{ap(S3)} + P_{ap(PD3)} \quad (33)$$

$$P_{ap} = 2419.028 + 2419.502$$

$$P_{ap} = 4838.53 [VA]$$

On prend un circuit magnétique triphasé type 5 kVA

2.3.2 Section du noyau magnétique

$$S_n = Kf \times C \times \sqrt{\frac{VA}{3f}} \quad (34)$$

$$S_n = 0.95 \times 5.8 \times \sqrt{\frac{5000}{3 \times 50}}$$

Kf = coefficient de foisonnement égal à 0,95

C = constante de Richter , valeur comprise entre : $4,5 < C < 6$

$$S_n = 30 [cm^2]$$

2.3.3 Nombre de spires par volt

La formule de Boucherot est :

$$N = \frac{10^8}{4.44 B S f} \quad (35)$$

$$N = \frac{10^8}{4.44 \times 10000 \times 30 \times 50}$$

$$N = 1.502 [spires/volt]$$

2.3.4 Nombre de spires par phase au primaire

$$n_1 = U_1 \times N \quad (36)$$

$$n_1 = 220 \times 1.502$$

$$n_1 = 330.4[\text{spires}]$$

2.3.5 Nombre de spires par phase au secondaire

le tableau ci- dessous montre les relations entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire afin de déterminer le nombre de spires de chaque enroulement secondaire

Montage du type PD3	Montage du type S3
Couplage : Etoile-Etoile Yy	Couplage : Etoile-Triangle Yd
<u>En désignant par :</u> m : le rapport de transformation interne M : le rapport de transformation externe U_2 : la tension composée secondaire U_1 : la tension composée primaire V_1 : la tension sur une phase au primaire V_2 : la tension sur une phase au secondaire n_2 : nombre de spires d'un bobine au secondaire n_1 : nombre de spires d'un bobine au primaire	
<u>Relation entre le couplage :</u>	
$M = \frac{U_2}{U_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = m$	$\frac{U_2}{U_1} = M = \frac{m}{\sqrt{3}}$

$n_2 = n_1 \times \frac{V_2}{V_1}$ $n_2 = 330 \times \frac{49,38}{220}$ $n_2 = 74,07 \text{ spires}$	$n_2 = n_1 \times \frac{U_2 \sqrt{3}}{U_1}$ $n_2 = 330 \sqrt{3} \times \frac{85,53}{380}$ $n_2 = 128,65 \text{ spires}$

Tableau 5: Nombre de spires au secondaire

2.3.6 Calcul de la Section du fil

La section est proportionnelle à l'intensité du courant et inversement proportionnelle à la densité de courant admise.

$$S_f = \frac{I}{\delta} \quad (37)$$

I : intensité du courant [A]

S_f : section du fil [mm²]

δ : Densité du courant [A/mm²]

Pour une puissance de 100 à 10.000[VA] la densité du courant admise est 3[A/mm²]

a. La section dans le secondaire S3 est

$$S_f = \frac{9,45}{3}$$

$$S_f = 3,14[mm^2]$$

b. La section dans le secondaire PD3 est

$$S_f = \frac{16,35}{3}$$

$$S_f = 5,4[mm^2]$$

c. La section dans le primaire est

$$S_f = \frac{3,67}{3}$$

$$S_f = 1,22[mm^2]$$

2.3.7 Qualité des tôles du circuit magnétique

Pour construire le circuit magnétique du transformateur, il est mieux de disposer les tôles magnétiques à grains orientées ou tôles magnétiques au silicium car elles sont plus avantageuses par rapport aux tôles classiques non orientées.

a- Ces avantages sont :

Pertes en Watts très réduites dans le sens du laminage ;

Perméabilité améliorée dans le sens du laminage.

b- Les caractéristiques de tôles utilisées dans le calcul sont comme suit :

- Qualités : tôles ordinaires, acier au silicium

Fe-Si avec 1% Si : Pertes de 3,6W/Kg à 10000 Gauss

2% Si : Pertes de 2,6W/Kg à 10000 Gauss

- Densité : 7,5 Kg/dm³
- Résistivité électrique : 48 $\mu\Omega \cdot cm$
- Facteur de foisonnement : 0,95
- Température : -55 $^{\circ}C$ à 150 $^{\circ}C$
- Epaisseur normalisée : 0,5 mm

c. Calcul du circuit magnétique

Puisque toute la puissance transformée prend la forme d'un flux magnétique pour passer du primaire au secondaire, la section du circuit magnétique doit être en fonction de la puissance transmise. Il faut que la surface des fenêtres soit suffisante pour y loger les bobinages.

- Noyau

Avec la section nette $S_n = 30 [cm^2]$

Son poids

$$P_N = \mu_v \times S_n \times l \times N \quad (38)$$

μ_v : Densité correspond au poids du fer [kg /dm³]

S_{nN} : Section [dm²]

l : longueur du noyau

N : nombre du noyau

$$P_N = 7.5 \times 0.5 \times 1.45 \times 3$$

$$P_N = 16.31 [kg]$$

- Culasse

Sa section nette est $S_{nc} = 6 \times 5$

$$S_{nc} = 30 [cm^2]$$

La section du culasse est proche de la forme carrée, ainsi on observe que le meilleur rendement est obtenu lorsque la section du circuit est carrée.

Poids :

$$P_c = 0 \times S_n \times l \times \rho \quad (39)$$

δ : Densité correspond au poids du fer, environ $7,5[\text{kg}/\text{dm}^3]$

S_n : section $[\text{dm}^2]$

l : longueur du Culasse

n : nombre du Culasse

$$P_c = 1,5 \times 0,30 \times 3,4 \times 2$$

$$P_c = 15,3[\text{kg}]$$

Le poids du circuit magnétique est donc : $P_c + P_N = 24,3(\text{Kg})$

2.3.8 Calcul des pertes dans le fer

Pour améliorer l'efficacité de la transformation d'énergies, il faut réduire les pertes d'énergies qui se dégagent dans le transformateur sous forme calorifique.

Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles, c'est-à-dire, les sections des spires des enroulements doivent être aussi fortes que possible, les longueurs des spires petites avec les résistivités des conducteurs faibles. Les différentes pertes dans les matériaux magnétiques sont :

a. Pertes par Hystérésis

Elles sont dues au manque de linéarité existant entre B (densité de l'induction du champ magnétique) et H (intensité du champ magnétique), ainsi qu'au cycle d'hystérésis. Les pertes qui en résultent, sont proportionnelles à la surface du cycle, en nombre de cycles d'écrit et au volume des matériaux.

Les pertes peuvent être calculées par la formule de STEINMETZ.

$$P_H = K_H V f B_m \quad (40)$$

b. Pertes par courant de Foucault

La variation de flux d'induction donne naissance dans toute masse métallique à une force électromotrice induite qui engendre des courants internes (courant de volume).

Pour une induction périodique, on a : $P_F = K_F V f^2 B_m^2 \quad (41)$

c. Pertes totales

Les pertes magnétiques à vide sous la tension nominale U_{1N} sont les mêmes qu'en régime nominal car le flux magnétique et l'induction dans le circuit magnétique sont indépendants du régime de fonctionnement du transformateur. Quand aux pertes électriques à vide dans l'enroulement primaire sont égales à $P_{JV} = R_1 \tilde{I}_{1V}^2$; ces pertes peuvent être négligées parce que les courants à vide étant très petits et sont inférieurs aux pertes en régime nominal.

Alors les pertes à vide $P_{1V} = U_{1N} I_{1V} \cos \varphi_{1V}$, sont égales aux pertes dans le fer

$$\text{Donc } P_{\text{Fer}} = P_H + P_E \quad (42)$$

La courbe ci-dessous donne les pertes en fonction de l'induction pour les différentes qualités de tôles.

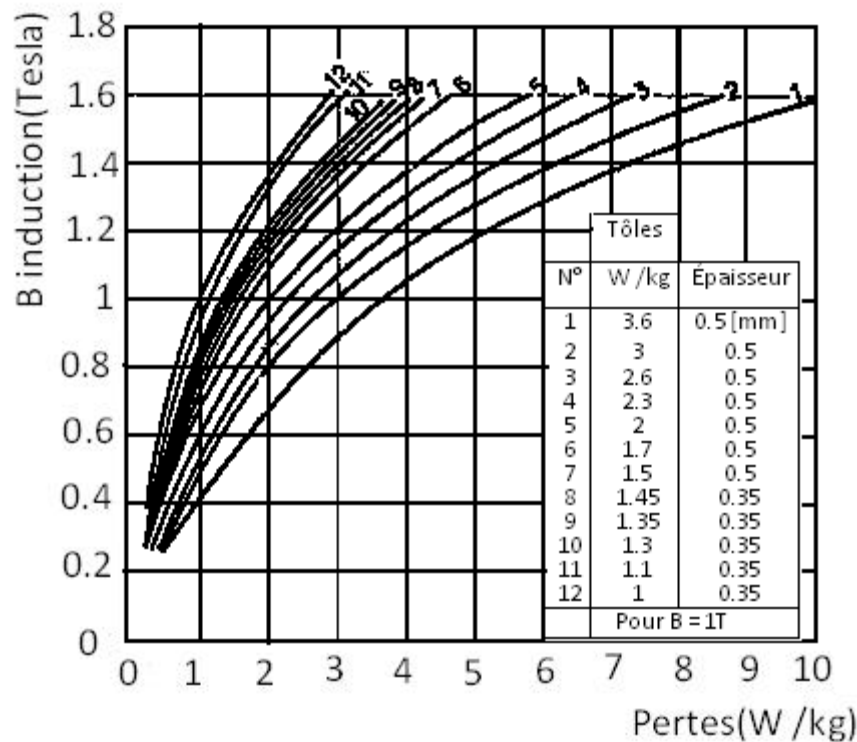


Figure 24 : Pertes en fonction de l'induction pour les différentes tôles.

D'après la courbe 1, en prenant une induction de 1T, nous avons des pertes de 3,6W/kg et à 1,4T nous avons des pertes de 7,3W/kg. On peut déduire que les pertes croissent très vite avec l'induction. C'est pourquoi on ne dépasse pas 1.4T (14000 Gauss), valeur qui présente déjà des pertes doubles par rapport à 1T.

D'où les pertes dans le fer, compte tenu du 15% d'augmentation dû aux pertes supplémentaires :

$$P_{\text{fer}} = KQ(P_N B_m^2 + P_c B_m) \quad (43)$$

Avec K: pourcentage d'augmentation dû aux pertes supplémentaires

Q : qualité de la tôle équivalente à 1,3 Watt

On prend pour induction maximale dans les noyaux $B_m = 1.1T$, alors dans le culasse

$$B'_m = 1,1 \frac{S_N}{S_C} = 1,1 \frac{30}{36} = 0,92 \text{ T}$$

$$P_{\text{fer}} = 1.15 \times 1.5 \times (9.79 \times 1.1 + 15.5 \times 1.1)$$

$$P_{\text{fer}} = 45.5 \text{ [W]}$$

2.3.9 Montage des tôles

Le circuit comporte 3 colonnes placées dans un même plan et fermées par deux culasses horizontales, le serrage des culasses et l'assemblage des noyaux sont obtenus par des matériaux non magnétiques.

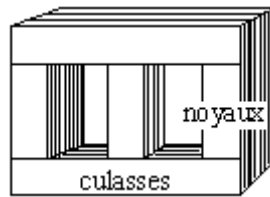
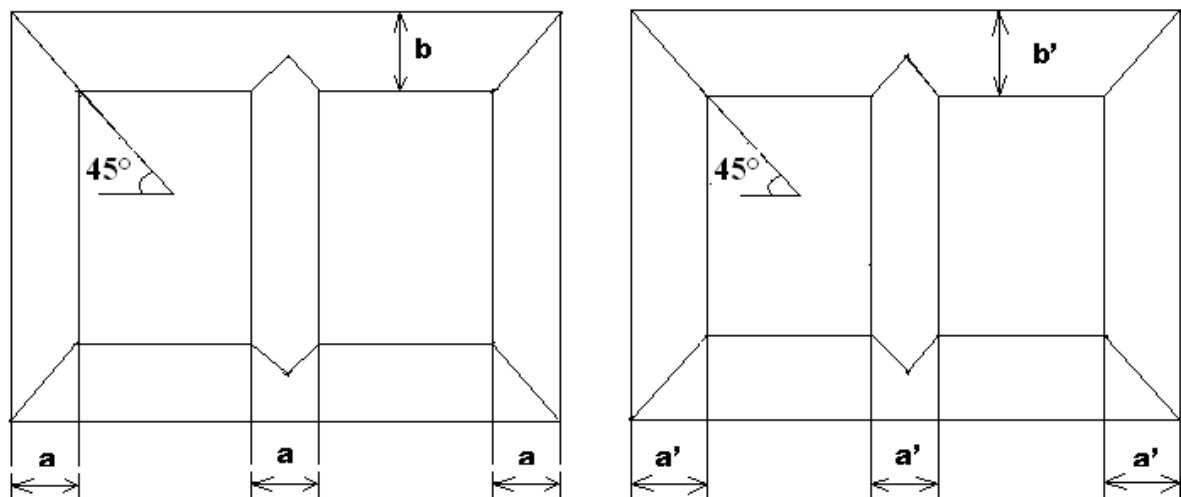


Figure 25: Circuit magnétique

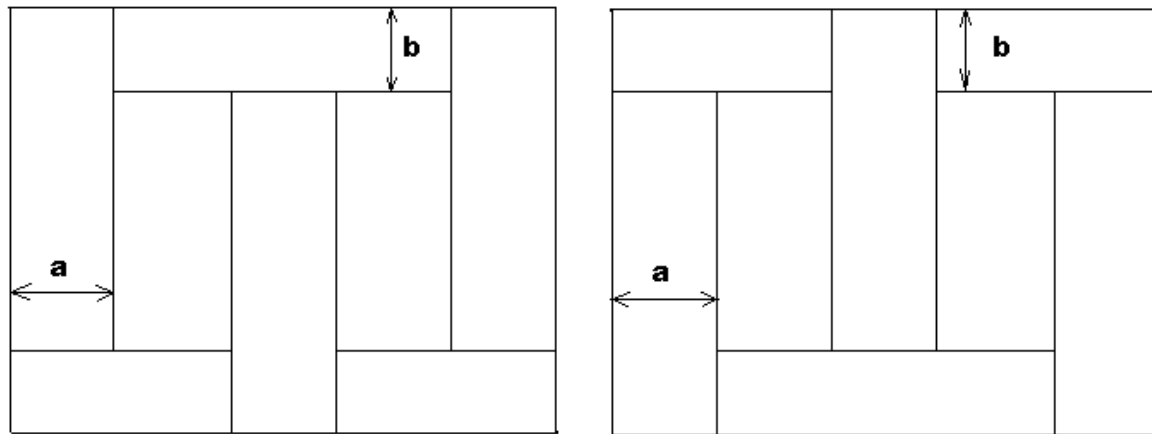
a- Manière de découper les tôles

En triphasé il y a plusieurs manières de découper et monter les tôles mais les plus utilisées sont le découpage à trois colonnes et les découpages de joint à coupe oblique de 45°.



$$a \neq a' ; b \neq b'$$

Figure 26: Les découpages de joint à coupe oblique de 45°.



Première empilages

Deuxième empilage

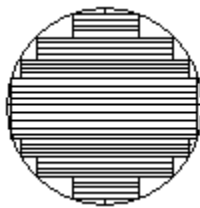
Figure27 : Découpage à trois colonnes

On a choisi le découpage à trois colonnes par sa rapidité et les déchets lors de la découpe sont réduits.

b. Section des colonnes :

Les bobinages sont à section circulaire pour des raisons aux efforts électrodynamiques entre spires en cas de court-circuit et pour une réalisation facile.

Pour avoir une meilleur utilisation du fer, on doit se rapprocher de la section circulaire c'est-à-dire on y parvient en réalisant des gradins. Pratiquement, les bobinages sont de section circulaire à 3 gradins.

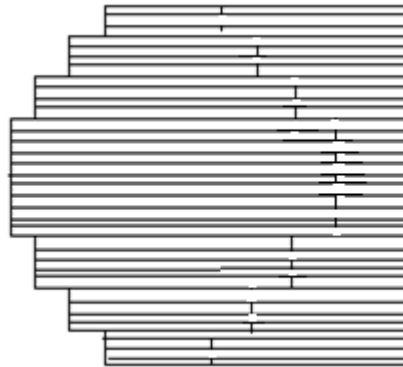
Figure28 : Section à 3 gradins

c. Assemblage colonne cuirasse :

Il y a deux méthodes pour faire assembler les noyaux et les culasses, la réalisation de joints magnétiques enchevêtrés et les joints à coupe oblique. Ces joints réduisent le plus possible l'entrefer dans un circuit magnétique qui permet d'obtenir la réluctance minimale du circuit.

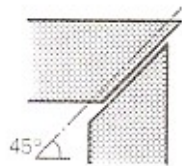
L'assemblage s'effectue toujours en croisant les joints.

Jointts enchevêtrés : les extrémités des tôles des colonnes et de la culasse sont enchevêtrées les unes avec les autres.

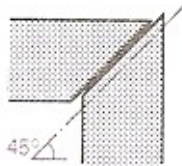


Les joints à coupe oblique :

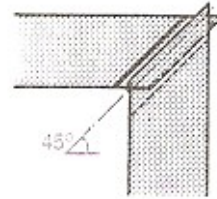
Dans le cas de tôles orientées qui favorisent le passage du flux, le joint doit être en angle de 45° . Dans ces conditions, il y a un faible recouvrement, obtenu en décalant le joint.



Premier assemblage des tôles



Deuxième assemblage



Les deux assemblages superposés

Figure 29 : Assemblage des tôles

d- Disposition des bobinages

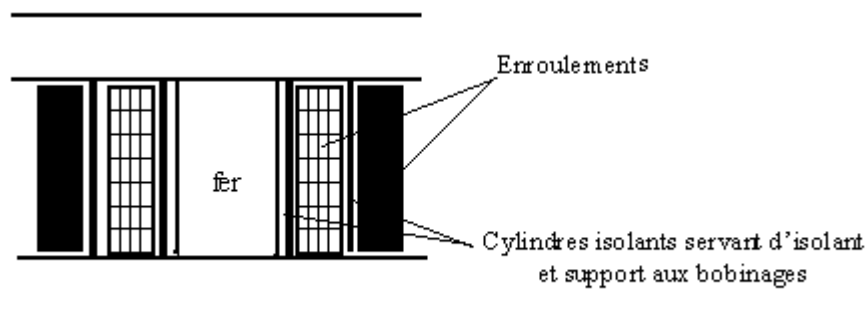


Figure 30 : Bobinage concentrique ou en tonneau

2.4 Répartition des spires sur les noyaux

Avant de faire la répartition des spires sur les noyaux, il est mieux de rappeler les valeurs calculées précédentes.

	Primaire	Secondaire	
		S3	PD3
Nombre de spires	330	128	74
Section [mm^2]	3,14	-	-
Diamètre [mm]	2	—	—
Section /2 [mm^2]	—	1.57	2.5
Diamètre [mm]	—	1.4	1.8

Tableau 6 : Récapitulatif des valeurs calculées précédemment.

A cause des matériels existants on utilise au primaire les fils de diamètre « 200/100 »

2.4.1 Division des spires au primaire

On répartit les 330 spires en 5 couches de 66 spires. Entre les couches, on met une feuille isolante mince de 0.1[mm]. En hauteur il faut prévoir 5% de jeu environ ; en épaisseur on compte que l'interpénétration des couches compense le jeu :

- Hauteur : $66 \times 0.20 \times 1.05 = 13.86[\text{cm}]$
- Épaisseur : $5 \times 0.2 + 0.01 \times 4 = 1.04[\text{cm}]$
- Rayon intérieur du bobinage : $R_{\text{int}} = 3,2[\text{cm}]$
- Rayon extérieur : $3,2 + 1.04 = 4,24[\text{cm}]$
- Rayon moyen : $3,2 + 0.5 \times 1.04 = 3.72[\text{cm}]$

Intervalle primaire et secondaire :

C'est par cet intervalle qu' on peut régler N_2 donc ΔU_d . On maintiendra un intervalle de 0.5 [cm] grâce à des réglettes de cette épaisseur fixées sur le primaire avant d'entreprendre le bobinage du secondaire :

- Rayon intérieur du secondaire : $4,24 + 0,5 = 4,74 [cm]$

2.4.2 Division des spires au secondaire

Pour les deux enroulements secondaires on utilise deux fils en parallèle.

- ❖ Concernant le type S3, on bobine côte à côte les deux fils ronds mis en parallèle. Les 128 spires forment 2 couches de 49,5 spires occupant toute la hauteur , et une 3^{ème} couche incomplète de 29 spires régulièrement répartie sur la hauteur.

- Épaisseur : $3 \times 0,14 + 0,01 \times 2 = 0,44 [cm]$

- Rayon extérieur : $4.74 + 0.44 = 5.18 [cm]$
- Rayon moyen : $4.74 + 0.44 \times 0.5 = 4.96 [cm]$
- Rayon intérieur du secondaire PD3: $5.18 + 0.5 = 5.68 [cm]$
- ❖ Concernant le type PD3, on bobine côte à côte les deux fils ronds mis en parallèle. Les 74 spires forment 1 couche de 38,5 spires occupant toute la hauteur et une 2^{ème} couche de 35,5 spires régulièrement répartie sur la hauteur.
- Épaisseur : $2 \times 0.18 + 0.01 \times 1 = 0.37 [cm]$
- Rayon extérieur : $5.68 + 0.37 = 6.05 [cm]$
- Rayon moyen : $5.68 + 0.37 \times 0.37 = 5.87 [cm]$

2.4.3 Variation de la résistance des fils de cuivre avec la température

Il est intéressant de contrôler la température d'un enroulement en fonctionnement, afin d'être certain que la température limite admise par le fil émaillé n'est pas dépassée. C'est dans ce but qu'on a besoin d'utiliser l'abaque suivant :

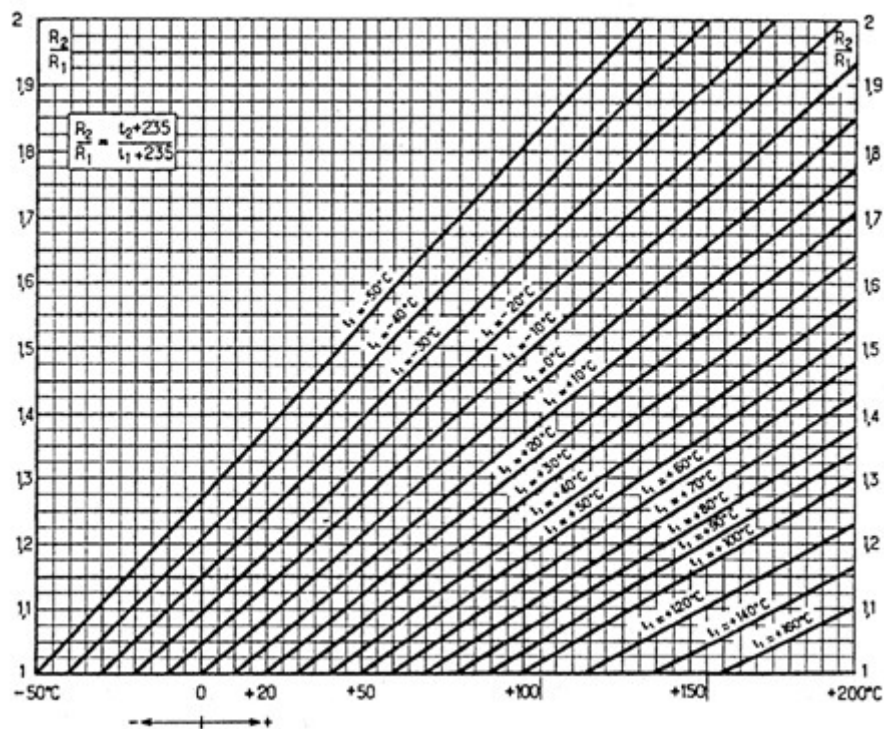


Figure 31 : Abaque de variation de la résistance des fils de cuivre avec la température

Si la résistance d'un conducteur à 0°C est R_0 elle est à la température t_1 :

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1) \quad (44)$$

Avec $\alpha = \frac{1}{234.5} = 0.004264$ pour le cuivre.

A la température t_2 on a :

$$\kappa_2 = \kappa_0(1 + \alpha t_2)$$

Le rapport de ces deux valeurs est :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1} = \frac{\frac{1}{\alpha} + t_2}{\frac{1}{\alpha} + t_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1}$$

Donc la résistivité du cuivre augmente avec la température

a. Calcul de la résistance par phase à 75°C au primaire

$$r = \frac{\rho}{S} (1 + \lambda \theta) (N \times 2\pi \times R_{moy}) \quad (45)$$

$\frac{\rho}{S}$: résistance du bobinage

ρ : résistivité du cuivre

$(1 + \alpha \theta)$: augmentation de la résistivité du cuivre à la température $\theta = 75^\circ\text{C}$

$$r_1 = \frac{1.4 \times 10^{(-8)}}{3.14 \times 10^{(-6)}} (1 + 0.004 \times 75) (330 \times 2\pi \times 3.72 \times 10^{(-2)})$$

$$r_1 = 0.447 \text{ [}\Omega\text{]}$$

b. Calcul de la résistance par phase à 75°C au secondaire type S3

$$r_2 = \frac{1.4 \times 10^{(-8)}}{2 \times 1.57 \times 10^{(-6)}} (1 + 0.004 \times 75) (128 \times 2\pi \times 4.96 \times 10^{(-2)})$$

$$r_2 = 0.251 \text{ [}\Omega\text{]}$$

c. Calcul de la résistance par phase à 75°C au secondaire type PD3

$$r_2 = \frac{1.4 \times 10^{(-8)}}{2 \times 2.5 \times 10^{(-6)}} (1 + 0.004 \times 75) (74 \times 2\pi \times 5.87 \times 10^{(-2)})$$

$$r_2 = 0.099 \text{ [}\Omega\text{]}$$

2.5 Chute de tension en fonctionnement normal

La réactance des fuites par phase dans le cas d'un enroulement concentrique simple est donnée par :

$$X_2 = 8\pi^2 n_2^2 \times \frac{r}{h} \left(\alpha + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \omega 10^{(-7)} \quad (46)$$

X_2 : réactance des fuites

n_2 : nombre d'enroulement secondaire

r : rayon intérieur du secondaire

h : hauteur des bobinages

a : intervalle entre les enroulements

e_1 : épaisseur du conducteur au primaire

e_2 : épaisseur du conducteur au secondaire

ω : pulsation

2.5.1 Réactance des fuites par phase dans S3

$$N_2 \omega = 8\pi^2 128^2 \times \frac{0.047}{0.138} \left(0.008 + \frac{0.0104 + 0.0044}{3} \right) 100 \times 10^{(-7)}$$

$$N_2 \omega = 0.0437 [1L]$$

2.5.2 Chute de tension due aux réactances

$$\Delta_1 U_d = \frac{q}{2\pi} N_2 \omega I_d \left(1 - \frac{r}{q} \right) \quad (47)$$

$$\Delta_1 U_d = \frac{3}{2\pi} 0.0437 I_d \frac{2}{3}$$

$$\Delta_1 U_d = 0.0139 I_d$$

2.5.3 Chute de tension due aux résistances

$$\Delta_2 U_d = \frac{2}{3} \left[r_2 + r_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \right] I_d \quad (48)$$

$$\Delta_2 U_d = \frac{2}{3} \left[0.231 + 0.447 \left(\frac{128}{330} \right)^2 \right] I_d$$

$$\Delta_2 U_d = 0.199 I_d$$

2.5.4 Chute due aux diodes

Pour un courant moyen de 12 [A], les diodes utilisées ont une chute de tension directe de 1[V]. On admet la linéarité de la chute de tension à partir du seuil de 0.7 [V].

La résistance dynamique moyenne $R_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$.

$$\Delta_3 U_d = 2(V_D + R_D I_D) \quad (49)$$

$$\Delta_3 U_d = 2\left(0.7 + \frac{0.5}{12} I_D\right)$$

$$\Delta_3 U_d = 1.4 + 0.05 I_D$$

D'où l'équation du début de la caractéristique de tension :

$$U_d - U_{d0} = \Delta U_d$$

$$U_d = \frac{5}{\pi} \times V \sqrt{2} \times \frac{N_2}{N_1} - \Delta U_d \quad (50)$$

avec $\Delta U_d = \Delta_1 U_d + \Delta_2 U_d + \Delta_3 U_d$

$$U_d = \frac{5}{\pi} \times 220 \times \frac{128}{330} \sqrt{2} - (0.0139 I_d + 0.199 I_d + 1.4 + 0.05 I_d)$$

$$U_d = 115.24 - 1.4 - 0.263 I_d$$

$$U_d = 113.84 - 0.263 I_d$$

Pour $I_d = 20 [A]$,

$$U_d = 108.58 [V]$$

Or $\Delta U_d = U_{do} - U_d$,

$$\Delta U_d = 115.24 - 108.58$$

Donc $\Delta U_d = 6.7 [V]$

La chute de tension en pourcentage est

$$\frac{\Delta U_d}{U_d} = \frac{6.7}{108.58} = 0.06$$

$$\Delta U_d = 6 \% U_d$$

L'écart par rapport aux 110(V) demandés ne nécessite pas une reprise des calculs, les chutes de tension sont surévaluées.

2.5.5 Rendement du transformateur pour le montage S3

Le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + P_{fer} + R_d I_d^2 + (\Delta_3 U_d) I_d} \quad (51)$$

$$\eta = \frac{108,58 \times 20}{(108,58 \times 20) + 45.3 + (0.298 \times 400) + (1.4 + 0.005 \times 20)20}$$

$$\eta = 95\%$$

D'où la caractéristique $\eta(I_d)$

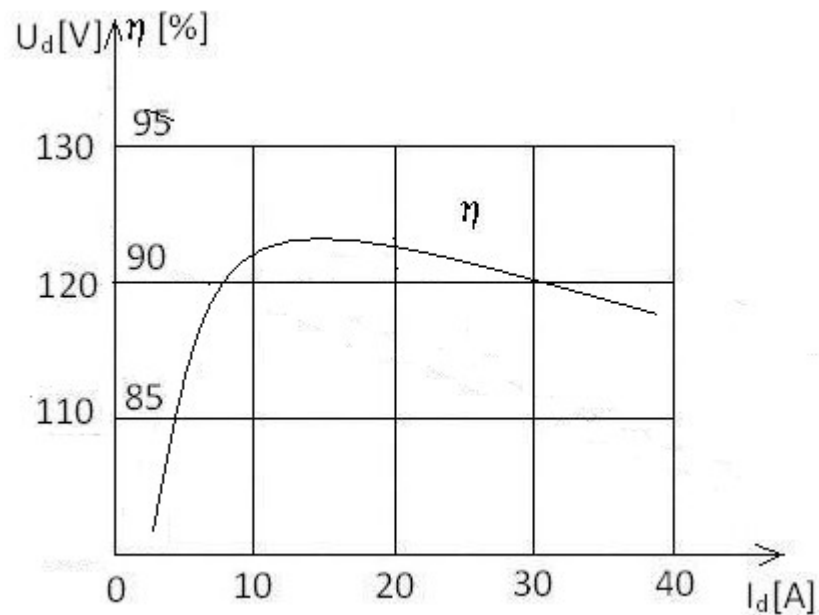


Figure 32 : Rendement pour le montage S3

2.5.6 Réactance des fuites par phase dans PD3

$$N_2 \omega = 8\pi^2 74^2 \times \frac{0.0568}{0.138} \left(0.005 + \frac{0.0104 + 0.0037}{3} \right) 100 \times 10^{(-7)}$$

$$N_2 \omega = 0.0173 [\Omega]$$

2.5.7 Chute de tension due aux réactances

$$\Delta_1 U_d = \frac{4}{\pi} N_2 \omega I_d$$

$$\Delta_1 U_d = \frac{5}{\pi} 0.0173 I_d$$

$$\Delta_1 U_d = 0.0165$$

2.5.8 Chute de tension due aux résistances

$$\Delta_2 U_d = 2 \left[r_2 + r_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \right] I_d$$

$$\Delta_2 U_d = 2 \left[0.099 + 0.447 \left(\frac{74}{330} \right)^2 \right] I_d$$

$$\Delta_2 U_d = 0.245 I_d$$

2.5.9 Chute due aux diodes

Pour un courant moyen de 12 [A], les diodes utilisées ont une chute de tension directe de 1[V]. On admet la linéarité de la chute de tension à partir du seuil de 0.7 [V].

La résistance dynamique moyenne $R_D = \Delta V_D / \Delta I_D$.

$$\Delta_3 U_d = 2(V_0 + R_D I_D)$$

$$\Delta_3 U_d = 2\left(0.7 + \frac{0.5}{12} I_D\right)$$

$$\Delta_3 U_d = 1.4 + 0.05 I_D$$

D'où l'équation du début de la caractéristique de tension :

$$U_d - U_{d0} = \Delta U_d$$

$$U_d = \frac{2q}{\pi} \times V \sqrt{2 \times \frac{N_2}{N_1}} - \Delta U_d \quad (52)$$

$$\text{avec } \Delta U_d = \Delta_1 U_d + \Delta_2 U_d + \Delta_3 U_d$$

$$U_d = \frac{6}{\pi} \times 220 \times \frac{14}{330} \sqrt{2} - (0.0165 I_d + 0.242 I_d + 1.4 + 0.05 I_d)$$

$$U_d = 126.04 - 1.4 - 0.309 I_d$$

$$U_d = 124.6 - 0.309 I_d$$

$$\text{Pour } I_d = 20 \text{ [A]}, U_d = 118.46 \text{ [V]}$$

$$\text{Or } \Delta U_d = U_{d0} - U_d,$$

$$\Delta U_d = 126.04 - 118.46$$

$$\text{Donc } \Delta U_d = 7.58 \text{ [V]}$$

La chute de tension en pourcentage est

$$\frac{\Delta U_d}{U_d} = \frac{7.58}{118.46} = 0.064$$

$$\Delta U_d = 6.4 \% U_d$$

L'écart par rapport aux 110(V) demandés ne nécessite pas une reprise des calculs, les chutes de tension sont surévaluées.

2.5.10 Rendement du transformateur pour le montage PD3

Le rendement est donné par

$$\eta = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + P_{fer} + R_d I_d^2 + (\Delta_s U_d) I_d} \quad (53)$$

$$\eta = \frac{118.46 \times 20}{(118.46 \times 20) + 45.57 + (0.12 \times 400) + (1.4 + 0.005 \times 20)20}$$

$$\eta = 95\%$$

D'où la caractéristique $\eta(I_d)$:

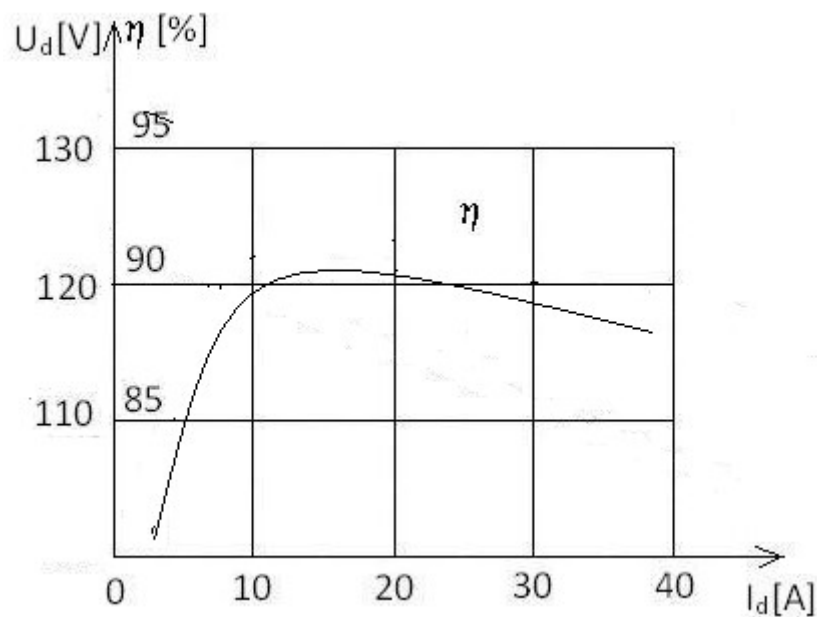


Figure 33 : Rendement pour le montage PD3

2.6 Fonctionnement en court-circuit

2.6.1 Pour le cas du redresseur S3

À cause de la valeur relative élevée des résistances, on tient compte de leur effet en

remplaçant dans les relations $I_{N2} \omega$ par $\angle 2$.

$$\text{On a } Z_2 = \sqrt{N_2^2 \omega^2 + R_2^2} \quad (54)$$

$$\text{Alors } Z_2 = \sqrt{0.0437^2 + 0.298^2}$$

$$Z_2 = 0.301 \Omega$$

a. Courant efficace secondaire

$$I_S = \frac{V}{Z_T} = \frac{89,925}{0,301} \quad (55)$$

$$I_S = 298,75 \text{ [A]}$$

b. Courant efficace primaire

$$I_P = I_S \times \frac{N_2}{N_1} = 284,14 \times \frac{120}{330} \quad (56)$$

$$I_P = 103,21 \text{ [A]}$$

c. Courant de court-circuit moyen

$$I_{d,cc} = q i_{moy,cc} = \frac{2q}{\pi} \times \frac{V_m}{Z_T} \times \sin \frac{\pi}{q} \quad (57)$$

$$I_{d,cc} = \frac{6}{\pi} \times \frac{120,951}{0,301} \times \sin \frac{\pi}{3} = 664 \text{ [A]}$$

d. Courant moyen de court-circuit

$$i_{moy,cc} = \frac{I_{d,cc}}{3} \quad (58)$$

$$i_{moy,cc} = \frac{394,58}{3}$$

$$I_{moy,cc} = 221,54 \text{ [A]}$$

Les diodes de 12(A) peuvent supporter 221,54 (A) pendant le temps nécessaire à l'ouverture du discontacteur monté entre le réseau et les bornes primaires.

2.6.2 Pour le cas du redresseur PD3

Comme le redresseur précédent, à cause de la valeur relative élevée des résistances, on tient compte de leur effet en remplaçant dans les relations $V_{2\omega}$ par $V_{2\omega}$.

$$\text{On a } Z_2 = \sqrt{N_2^2 \omega^2 + R_2^2} \quad (59)$$

$$\text{Alors } Z_2 = \sqrt{0,0173^2 + 0,121^2}$$

$$Z_2 = 0,122 \text{ [}\Omega\text{]}$$

a. Courant efficace secondaire

$$I_S = \frac{V}{Z_a} = \frac{40.576}{0.122} \quad (60)$$

$$I_S = 404.737 [A]$$

b. Courant efficace primaire

$$I_P = I_S \times \frac{N_2}{N_1} = 404.737 \times \frac{14}{330} \quad (61)$$

$$I_P = 90.76 [A]$$

c. Courant de court-circuit moyen

$$I_{d,cc} = q i_{moy,cc} = \frac{q}{\pi} \times \frac{V_m}{Z_s} \quad (62)$$

$$I_{d,cc} = \frac{3}{\pi} \times \frac{69,831}{0,122} = 546,59 [A]$$

d. Courant moyen de court-circuit

$$i_{moy,cc} = \frac{I_{d,cc}}{3} \quad (63)$$

$$i_{moy,cc} = \frac{546,59}{3} = 182,19 [A]$$

Les diodes de 12(A) peuvent supporter 182,19 (A) pendant le temps nécessaire à l'ouverture du discontacteur monté entre le réseau et les bornes primaires.

e. Caractéristique du transformateur d'alimentation :

Les caractéristiques finales du transformateur d'alimentation sont :

- Transformateur triphasé.
- Fréquence 50Hz
- Puissance apparente nominale : 5KVa
- Tension primaire nominale : 380 V
- Tension secondaire à vide : 115V alternatif pour chaque couplage .
- Tension de court-circuit à 75 % : 0,8 %

2.7 Mise en série d'un redresseur du type série S3 et d'un type parallèle double PD3

On regroupe en série le redresseur PD3 et le redresseur S3 pour ajouter leurs tensions redressées. Les montages groupés sont alimentés par la même source alternative.

2.7.1 Fonctionnement

Le transformateur triphasé porte sur chaque noyau un primaire et deux secondaires, l'un de n_{2d} tours, l'autre de n_{2y} tours. Les enroulements de n_{2d} tours sont couplés en triangle, ceux de n_{2y} tours en étoile.

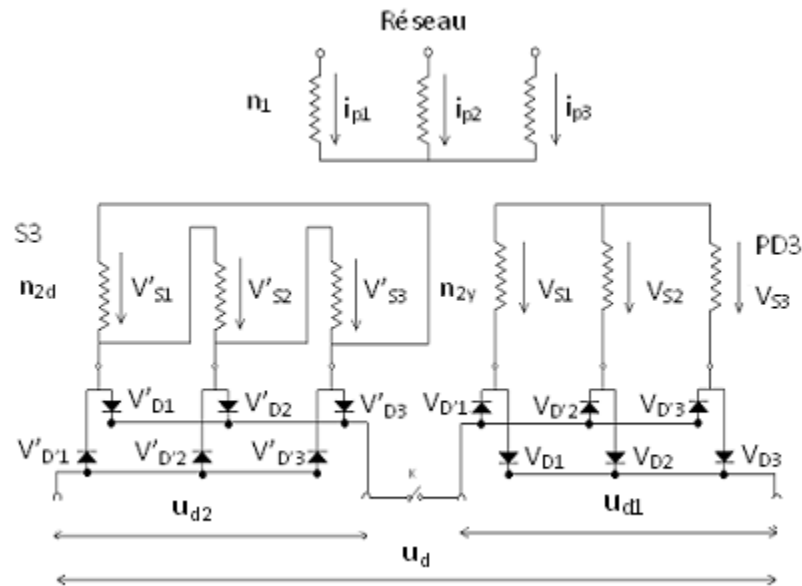


Figure 34 : Schéma de fonctionnement pour le groupement en série.

a. Condition de fonctionnement

La mise en série impose que la valeur moyenne de la tension en sortie de chacun des ponts soit identique,

Les valeurs moyennes des tensions de sortie de chaque pont sont données par reliées aux valeurs efficaces des tensions aux bornes des enroulements .

Pour PD3, $u_{d1} = \frac{3V_y\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi}$, V_y est la valeur efficace de la tension aux bornes d'un enroulement secondaire couplé en étoile.

Pour S3, $u_{d2} = \frac{3V_d\sqrt{2}}{\pi}$, avec V_d est la valeur efficace de la tension aux bornes d'un enroulement secondaire couplé en triangle.

Les relations des tensions pour les transformateurs sont :

$$\frac{V_y}{V} = \frac{n_{2y}}{n_1} \text{ et } \frac{V_d}{V} = \frac{n_{2d}}{n_1}$$

Avec n_{2y} et n_{2d} les nombres de spires pour les secondaires et V la valeur efficace des tensions simples au primaire

Les valeurs moyennes des tensions redressées deviennent :

$$u_{d1} = \frac{3 \frac{u}{n_1} V \sqrt{2} \sqrt{3}}{\pi} \quad \text{et} \quad u_{d2} = \frac{3 \frac{u}{n_1} V \sqrt{2}}{\pi}$$

Leur égalité conduit à la relation :

$$\frac{3 \frac{n_{2y}}{n_1} V \sqrt{2} \sqrt{3}}{\pi} = \frac{3 \frac{n_{2d}}{n_1} V \sqrt{2}}{\pi}$$

Donc pour que les deux tensions redressées partielles aient même valeur moyenne, il faut que :

$$\left[\frac{3}{\pi} V_{m(S3)} = \frac{6}{\pi} V_{m(PD3)} \frac{\sqrt{3}}{2} \right] (64)$$

$$\Rightarrow V_{m(S3)} = \sqrt{3} V_{m(PD3)}$$

$$\Rightarrow n_{2(S3)} = \sqrt{3} n_{2(PD3)}$$

Application numérique :

$$V_{m(S3)} = 120.951$$

$$\text{Alors, } V_{m(PD3)} = \frac{120.95}{\sqrt{3}} = 69.83[V]$$

$$n_{2(S3)} = 128.44$$

$$\text{Alors, } \boxed{n_{2(PD3)} = \frac{120}{\sqrt{3}} = 73,9[spires]}$$

b. Etude des tensions :

On va représenter les tensions $U_{d1}(t)$ et $U_{d2}(t)$ afin d'en déduire $U_d(t)$ en utilisant le chronogramme et le tableau ci- dessous .

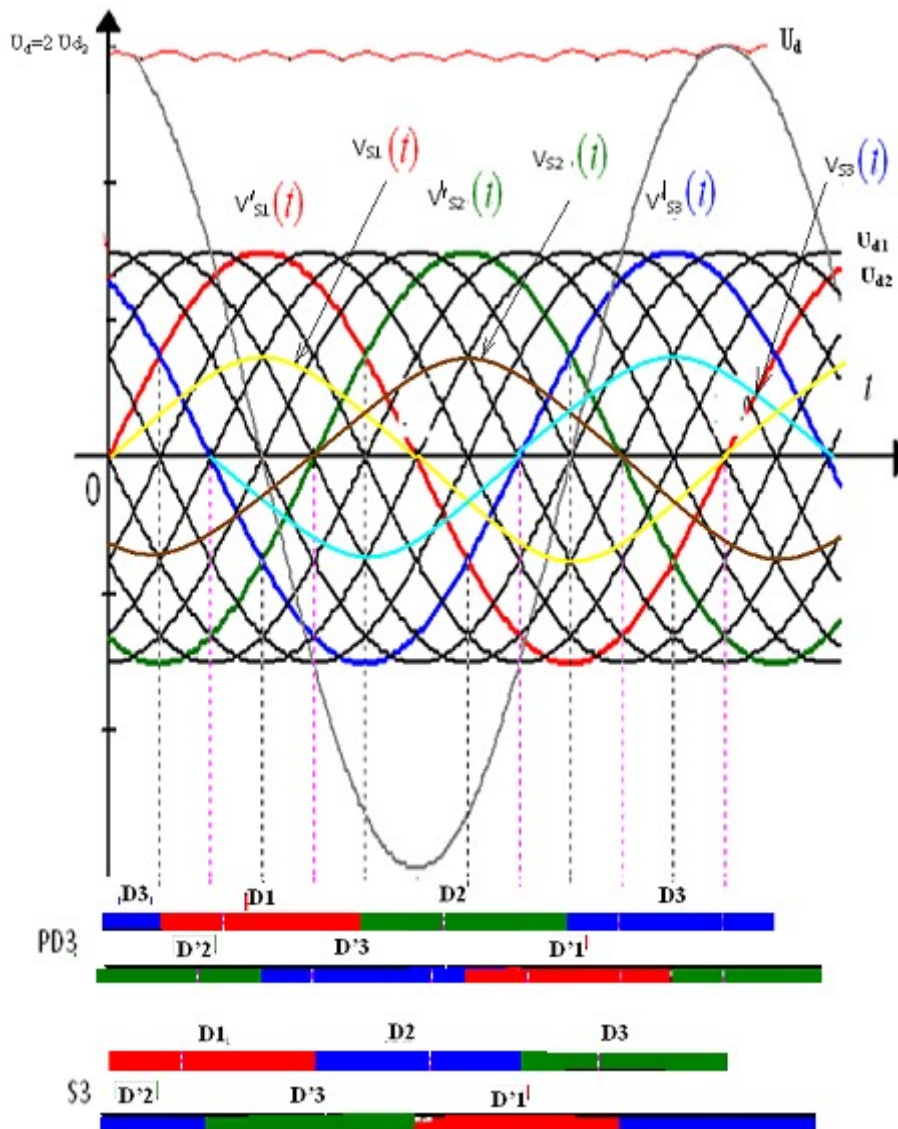


Figure 35 : Chronogramme de la tension redressée pour le groupement en série

c. Interprétation de ces courbes :

Voici la légende des intervalles de conduction

- zone supérieure : diodes à cathodes communes du PD3

En rouge: D₁ reliée à a₁ (figure 36)

En Vert : D₂ reliée à b₁

En bleu :D₃ reliée à c₁

- En dessous : diodes à anode communes du PD3

En rouge: D'_1 reliée à a_1 (figure 36)

En Vert : D'_2 reliée à b_1

En bleu : D'_3 reliée à c_1

- zone supérieure : diodes à cathodes communes du S3

En rouge: D_1 reliée à a_2 (figure 36)

En Vert : D_2 reliée à b_2

En bleu : D_3 reliée à c_2

- En dessous : diodes à anode communes du S3

En rouge: D'_1 reliée à a_2 (figure 36)

En Vert : D'_2 reliée à b_2

En bleu : D'_3 reliée à c_2

Ensuite, ce chronogramme est expliqué par le tableau ci- dessous :

Intervalles de conduction		0	T/6	T/3	T/2	2T/3	5T/6	T	7T/6	4T/3	3T/2	5T/3	11T/6	2T
Diodes passantes	PD3	D_1, D'_2	D_1, D'_2	D_1, D'_3	D_1, D'_3	D_2, D'_3	D_2, D'_3	D_2, D'_1	D_2, D'_1	D_3, D'_1	D_3, D'_1	D_3, D'_2	D_3, D'_2	
	S3	D_1, D'_2	D_1, D'_2	D_1, D'_3	D_1, D'_3	D_2, D'_3	D_2, D'_3	D_2, D'_1	D_2, D'_1	D_3, D'_1	D_3, D'_1	D_3, D'_2	D_3, D'_2	
Tension redressée	U _{d1}	$v_{S_3} - v_{S_2}$	$v_{S_1} - v_{S_2}$	$v_{S_1} - v_{S_2}$	$v_{S_1} - v_{S_3}$	$v_{S_1} - v_{S_3}$	$v_{S_2} - v_{S_3}$	$v_{S_2} - v_{S_3}$	$v_{S_2} - v_{S_1}$	$v_{S_2} - v_{S_1}$	$v_{S_3} - v_{S_1}$	$v_{S_3} - v_{S_1}$	$v_{S_3} - v_{S_2}$	
	U _{d2}	$-v_{S_2}$	$-v_{S_2}$	v_{S_1}	v_{S_1}	$-v_{S_3}$	$-v_{S_3}$	v_{S_2}	v_{S_2}	$-v_{S_1}$	$-v_{S_1}$	v_{S_3}	v_{S_3}	
Angles de déphasages	PD3		U _{d1} est en avance de 30° par rapport à la tension $v_{S_1}(t)$		U _{d1} est en retard de 30° par rapport à la tension $v_{S_1}(t)$		U _{d1} est en avance de 30° par rapport à la tension $v_{S_2}(t)$		U _{d1} est en retard de 30° par rapport à la tension $v_{S_2}(t)$		U _{d1} est en avance de 30° par rapport à la tension $v_{S_3}(t)$		U _{d1} est en retard de 30° par rapport à la tension $v_{S_3}(t)$	
	S3	U _{d2} est en opposition de phase par rapport à $v'_{S_2}(t)$		U _{d2} est en phase par rapport à $v'_{S_1}(t)$		U _{d2} est en avance de 30° par rapport à la tension $v'_{S_2}(t)$		U _{d2} est en phase par rapport à $v'_{S_2}(t)$		U _{d2} est en avance de 30° par rapport à la tension $v'_{S_3}(t)$		U _{d2} est en phase par rapport à $v'_{S_3}(t)$		

Tension redressée Totale	U_d	$-2v_{S_2}$	$-2v_{S_2}$	$2v_{S_1}$	$2v_{S_1}$	$-2v_{S_3}$	$-2v_{S_3}$	$2v_{S_2}$	$2v_{S_2}$	$-2v_{S_1}$	$-2v_{S_1}$	$2v_{S_3}$	$2v_{S_3}$	
--------------------------	-------	-------------	-------------	------------	------------	-------------	-------------	------------	------------	-------------	-------------	------------	------------	--

Tableau 7 : Déroulement de la mise en série

La tension redressée $u_d(t)$ est obtenue en faisant la somme des tensions $u_{d1}(t)$ du montage PD3 et $u_{d2}(t)$ du montage S3.

On peut utiliser chaque montage indépendamment, mais pour avoir une tension d'alimentation au secondaire qui est égale à 220[V] continu on branche en série.

$$u_d = u_{d1} + u_{d2} \quad (65)$$

d. Etude des courants :

Le schéma ci-dessous représente les enroulements primaires et secondaires du transformateur avec les traits en pointillés indiquent que les enroulements sont placés sur la même colonne du circuit magnétique. Il en est de même pour B, b_1, b_2 et C, c_1, c_2

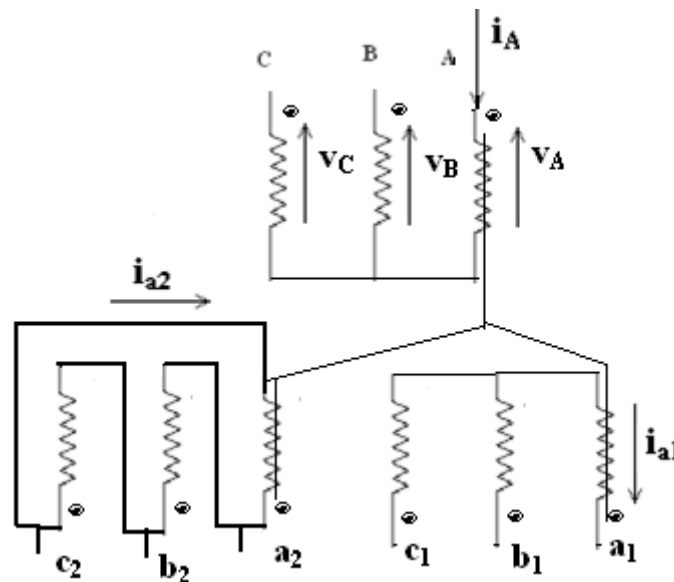


Figure 35 : Représentation du courant dans un enroulement primaire en fonction de l'enroulement secondaire

L'étude des courants des deux types de redresseurs dans une période $2T$ était déjà fait ce qui montre que les deux montages sont aptes à débiter le même courant redressé. Mais il est mieux de démontrer que le facteur de puissance primaire est très voisin de l'unité.

La loi de compensation des ampères tours permet d'écrire :

$$n_{2d}i_{a2} + n_{2y}i_{a1} = n_1i_A \quad (66)$$

$$\text{soit } i_A = \frac{n_{2d}}{n_1} i_{a2} + \frac{n_{2y}}{n_1} i_{a1}$$

donc on peut tirer les intensités i_{a1} et i_{a2} suivant les intervalles :

Pour i_{a1} : sur $\left[0, \frac{\pi}{6}\right], \left[\frac{5\pi}{6}, \frac{7\pi}{6}\right]$ et $\left[\frac{11\pi}{6}, 2\pi\right]$; $i_{a1} = 0$

De $\frac{\pi}{6}$ à $\frac{5\pi}{6}$: $i_{a1} = I_d$ et de $\frac{7\pi}{6}$ à $\frac{11\pi}{6}$: $i_{a1} = -I_d$

Pour i_{a2} :

Sur $\left[0, \frac{\pi}{3}\right], \left[\frac{2\pi}{3}, \pi\right]$: $i_{a2} = I_d/3$; sur $\left[\frac{\pi}{3}, 2\pi/3\right]$: $i_{a2} = \frac{2}{3}I_d$

sur $\left[\pi, \frac{4\pi}{3}\right], \left[\frac{5\pi}{3}, 2\pi\right]$: $i_{a2} = -I_d/3$; sur $\left[\frac{2\pi}{3}, 5\pi/3\right]$: $i_{a2} = \frac{2}{3}I_d$

Entre 0 et $\frac{\pi}{6}$ le courant i_A est constitué de trois paliers dont les valeurs sont :

Palier inférieur (entre 0 et $\frac{\pi}{6}$) : $i_A = \frac{u_{2d} i_d}{n_1 3}$

Palier intermédiaire (entre $\frac{\pi}{6}$ et $\frac{\pi}{3}$) : $i_A = \frac{u_{2d} i_d}{n_1 3} + \frac{u_{2y} i_d}{n_1 3} = \frac{u_{2d} i_d}{n_1 3} + \frac{u_{2d}}{\sqrt{3}n_1} I_d$

Palier supérieur (entre $\frac{\pi}{3}$ et $\frac{\pi}{2}$) : $i_A = \frac{u_{2d} i_d}{n_1 3} + \frac{u_{2d}}{\sqrt{3}n_1} I_d$

On retrouve les mêmes valeurs absolues pour l'intervalle $(\frac{\pi}{2}, \frac{2\pi}{3})$.

Sa valeur efficace :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \left[\frac{\pi}{6} \left(\frac{n_{2d}}{n_1} \frac{I_d}{3} \right)^2 + \frac{\pi}{6} \left(\frac{n_{2d}}{n_1} \frac{I_d}{3} + \frac{n_{2d}}{\sqrt{3}n_1} I_d \right)^2 + \frac{\pi}{6} \left(\frac{n_{2d}}{n_1} \frac{2I_d}{3} + \frac{n_{2d}}{\sqrt{3}n_1} I_d \right)^2 \right]}$$

$$I_{eff} = \frac{n_{2d}}{n_1} i_d \frac{\sqrt{4+2\sqrt{3}}}{3} \quad (67)$$

$$\text{D'où le facteur de puissance au primaire } K = \frac{P}{S} = \frac{u_d I_d}{3 \frac{n_1}{n_{2d}} V_{2d} I_{eff}} \quad (68)$$

$$K = \frac{6\sqrt{2}}{\pi\sqrt{4+2\sqrt{3}}} = 0,989$$

2.7.2 Comparaison des deux redresseurs à diodes entre le type série et le type parallèle double

Avant d'aborder à la comparaison, on explique qu'il y a trois critères principaux permettant de juger un redresseur

- L'indice de la tension redressée n :

Plus n est grand, plus U_d se rapproche de la tension constante. Le filtrage de la tension et le lissage du courant deviennent inutiles.

Pour les redresseurs alimentés en triphasé, l'augmentation de l'indice n augmente le rang des premiers harmoniques des courants pris au réseau et réduit les perturbations apportées à celui-ci.

- le facteur de puissance secondaire F_s :

A puissance active débitée donnée, plus f_s est voisin de l'unité, plus est réduite la puissance des enroulements sièges des tensions à redresser. Or le poids, le coût de ces enroulements et les pertes Joules qui y sont produits sont proportionnels à la puissance apparente.

- Le rapport de court-circuit K_{cc}

Ce rapport indique la forme de la caractéristique totale de tension. A chute de tension en fonctionnement normal donnée, plus K_{cc} est faible, plus en cas de court-circuit, les courants sont limités et les diodes sont faciles à protéger.

	Redresseur série S3	Redresseur S3 et PD3
alimentation	alimentation triphasé : 380 V, 50 Hz sortie : 220 V, 20 A	alimentation triphasé : 380 V, 50 Hz sortie sur chaque redresseur : 110 V, 20 A
Indice de la tension redressée « n » :	$n = 6$	$n = 12$
Facteur de puissance secondaire « f_s » :	$f_s = 0.955$	$f_s = 0.955$
Rapport de court-circuit « K_{cc} » :	$K_{cc} = 0.55$	$K_{cc} = 0.55$

Facteur de puissance en ligne « f_l »	$f_l = 0.955$	$f_l = 0.989$
Taux d'harmonique des courants en ligne « τ »	$\tau = 0.31$	$\tau = 0.15$

Tableau 8 : Comparaison entre S3 et la mise en série

Pour l'alimentation par le réseau triphasé, le fondamental de chaque courant en ligne est en phase avec la tension simple correspondante. Le facteur de puissance en ligne f_l a pour valeur

$$f_l = \frac{U_{do} I_d}{3V_P I_L} = \frac{3V_P I_1}{3V_P I_L} = \frac{I_1}{I_L} \quad (69)$$

ou I_L désigne la valeur efficace des courants en ligne

$$f_l = \frac{n}{\pi} \sin \frac{\pi}{n} \quad (70)$$

Dans le cas de S3 :

$$f_l = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6}$$

$$f_l = 0.955$$

Dans le cas de S3 et PD3 :

$$f_l = \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12}$$

$$f_l = 0.989$$

Le taux d'harmoniques des courants en ligne $\tau = \frac{\sqrt{I_1^2 - I_L^2}}{I_L}$, est lié à f_l par :

$$\tau = \frac{\sqrt{1 - f_l^2}}{f_l} \quad (71)$$

Dans le cas de S3 :

$$\tau = \frac{\sqrt{1 - 0.955^2}}{0.955}$$

$$\tau = 0.31$$

Dans le cas de S3 et PD3 :

$$\tau = \frac{\sqrt{1 - 0.989^2}}{0.989} \quad (72)$$

$$\tau = 0.15$$

La qualité des courants pris au réseau triphasé (f_l grand, τ faible) est d'autant meilleure que l'indice de la tension redressée est plus élevé.

2.7.3 Avantage de la mise en série

Quand un même primaire alimente plusieurs secondaires absorbant des ampères tours de formes différentes, le courant primaire se rapproche de la sinusoïde et le facteur de puissance primaire est très voisin de l'unité.

On met en série deux redresseurs fournissant des ondes de tension redressé décalées pour que la tension redressée totale soit moins ondulée que les tensions partielles.

L'indice d'ondulation est égal à 12 alors que pour le PD3 et le S3, il est égal à 6.

Le facteur de puissance de chaque secondaire est meilleur que celui d'un redresseur seul ayant un indice d'ondulation égal à 12.

2.7.4 Raison du travail et choix des redresseurs

Puisque nous avons des matériels électriques tournants comme les machines à courant continu (machine didactique) qui se diffèrent par leur alimentation, il y a des moteurs alimentés en 110V continu et il y a aussi des moteurs alimentés sous 220V continu. Alors, cette demande nous a permis de dimensionner les redresseurs qui les correspondent.

CHAPITRE 3 COMMANDE DE PUISSANCE A L'AIDE D'UN CONTACTEUR

3.1 Introduction

Par l'intermédiaire d'un réseau de distribution électrique, l'énergie mise à la disposition des industriels ne peut être connectée en permanence sur l'ensemble des récepteurs. Il est donc nécessaire d'employer des systèmes de commutation de puissance permettant le transfert et l'interruption de l'énergie électrique en provenance du réseau vers le ou les récepteurs.

Ce sont les interrupteurs, disjoncteurs et surtout les contacteurs qui assurent cette fonction appelée « commutation de puissance ». Dans notre cas on utilise les contacteurs.

3.2 Définitions

Le contacteur est un appareil mécanique de connexion, qui va permettre à partir de la commande en « tout ou rien » d'un électro-aimant d'établir ou d'interrompre par l'intermédiaire de contact de circuit entre le réseau d'alimentation et le récepteur.

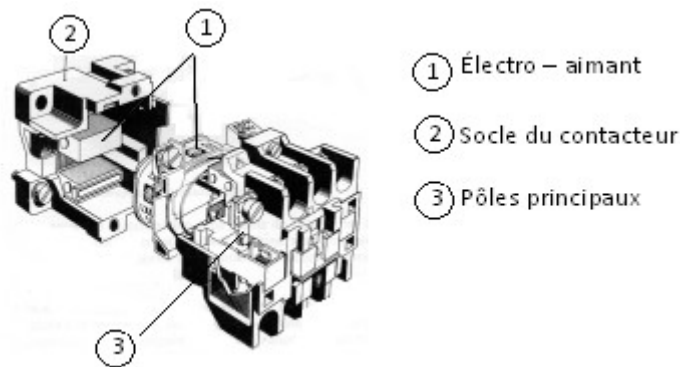


Figure 37 : Vue générale d'un contacteur

3.3 Constitution d'un contacteur

Le contacteur est constitué de trois éléments principaux, qui sont l'électro-aimant, les pôles et les contacts auxiliaires.

- L'électro-aimant est l'élément moteur du contacteur, il comprend essentiellement un circuit magnétique et une bobine. Sa forme varie en fonction du type de contacteur et peut éventuellement différer selon la nature du courant d'alimentation, alternatif ou continu.
- Les pôles sont chargés d'établir ou de rompre le courant dans le circuit de puissance. En conséquence, ils sont dimensionnés pour permettre le passage du courant nominal du contacteur en service permanent sans échauffement anormal. Les pôles comportent une partie fixe et une partie mobile, cette dernière munie de ressorts qui transmettent une pression convenable au niveau des courants. Ceux-ci sont soit à simple coupure soit à double coupures.
- Les contacts auxiliaires assurent les auto-alimentations, les asservissements, les verrouillages des contacteurs ainsi que la signalisation dans les équipements d'automatisme.

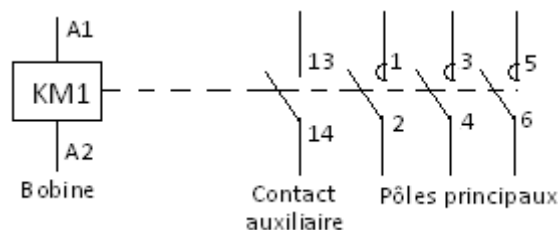


Figure 38 : Symbole d'un contacteur tripolaire

3.4 Principe de fonctionnement

Lorsque la bobine de l'électro-aimant est alimentée, le contacteur se ferme, établissant par l'intermédiaire de pôles, le circuit entre le réseau d'alimentation et le récepteur. La partie mobile de l'électro-aimant qui entraîne les parties mobiles des pôles et des contacts auxiliaires ou, dans certains cas le dispositif de commande de ces derniers, se déplace :

- soit par rotation, en pivotant sur un axe,
- soit par translation, en glissant parallèlement aux parties fixes,

- soit par un mouvement conjugué des deux.

Dès que la bobine est privée de tension, le circuit magnétique se démagnétise et le contacteur s'ouvre sous l'effet :

- des ressorts de pressions des pôles,
- du ressort de rappel de l'armature mobile,

3.5 Schéma de base d'un démarrage de moteur à courant continu

Les systèmes suivants montrent le circuit de puissance et le circuit de commande par la présence de trois contacteurs, l'un KM1 est indépendant qui commande la marche et l'arrêt en général, mais l'autre est composé de KM2 et de KM3 relié par un verrouillage mécanique, qui commande la mise en marche de l'une des deux tensions différentes.

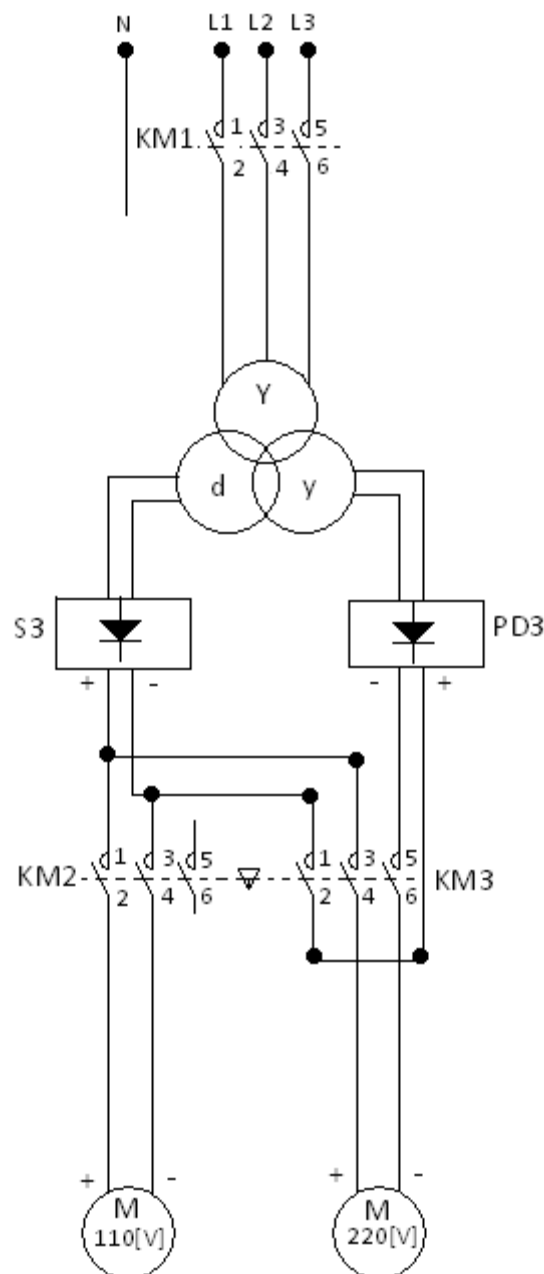


Figure 39 : Circuit de puissance

3.6 Fonctionnement du circuit de puissance

Fermeture de KM1 : couplage du transformateur triphasé – alimentation des deux redresseurs.

Fermeture de KM2 ou de KM3 : mise sous tension du moteur. Lorsque KM2 est fermé, un moteur alimenté par l'intermédiaire du redresseur S3 fonctionnant sous 110 [V] continue. Lorsque KM3 est fermé, un moteur fonctionnant sous 220 [V] est alimenté par l'intermédiaire des deux redresseurs mise en série.

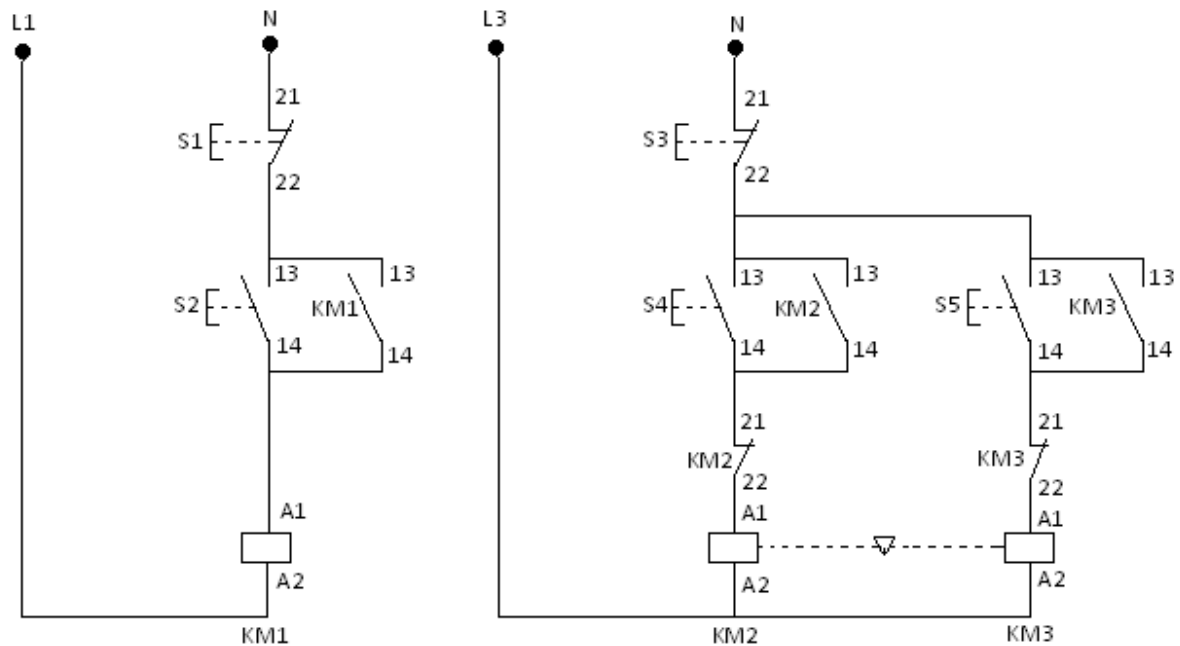


Figure 40 : Circuit de commande

3.7 Fonctionnement du circuit de commande

- Le circuit de commande de KM1 est alimenté par le réseau L1 pour commander la fermeture de KM1. Nous avons le déroulement suivant :

Impulsion sur S2

Fermeture de KM1 : marche générale du circuit

Auto - alimentation de KM1 (13 – 14).

- Le circuit de commande de KM2 et KM3 est alimenté par le réseau L3 qui est relié après la distribution de KM1. Nous avons le déroulement suivant :

Impulsion sur S4 ou sur S5

Fermeture de KM2 ou de KM3 (13 – 14)

Verrouillage de KM2 ou de KM3 (21 – 22)

Auto - alimentation de KM2 (13 – 14)

Arrêt : impulsion sur S3 (21 – 22)

Arrêt général du fonctionnement : impulsion sur S1 (21 – 22)

3.8 Choix d'un contacteur

Le choix d'un contacteur est fonction :

De la nature et de la tension du réseau.

De la puissance installée.

Des caractéristiques de la charge.

Des exigences du service désiré de la catégorie d'emploi du contacteur.

3.9 Caractéristiques des contacteurs KM1, KM2 et KM3

Concernant KM1 :

- Fonction : commutateur des réseaux, contacteur pour primaire de transformateur, indépendamment de la charge raccordée au secondaire, la pointe de courant magnétisante lors de la mise sous tension du primaire d'un transformateur peut atteindre, au cours de la première demi-onde, 25 à 30 fois l'intensité nominale.
- Catégorie : on sait que, $U = 380V$ triphasé, puissance du transformateur est 5 KVA, charge au secondaire est moteur 220V, alors l'intensité nominale absorbée par le primaire du transformateur est de :

$$I_n = \frac{P}{U\sqrt{3}} = \frac{5000}{380 \times \sqrt{3}} = 7.6[A] \quad (73)$$

La valeur de l'intensité de crête de la première demi – onde :

$$I_n \times \text{pointe} = 7.6 \times 30 = 228[A]$$

Le projet de norme internationale admet de prendre pour courant d'emploi du contacteur 0.45 de son courant nominal d'emploi en catégorie AC3.

Courant d'emploi en catégorie AC3 : $7.6/0.45 = 16.89 [A]$

Nous choisirons un contacteur dont le courant d'emploi en catégorie AC3 sera égal ou supérieur à 16.89 [A].

Donc KM1 est de référence LC1 D16.

- La durée de vie électrique est :

d'après l'abaque ci-dessous, on peut tirer l'endurance électrique des pôles du contacteur

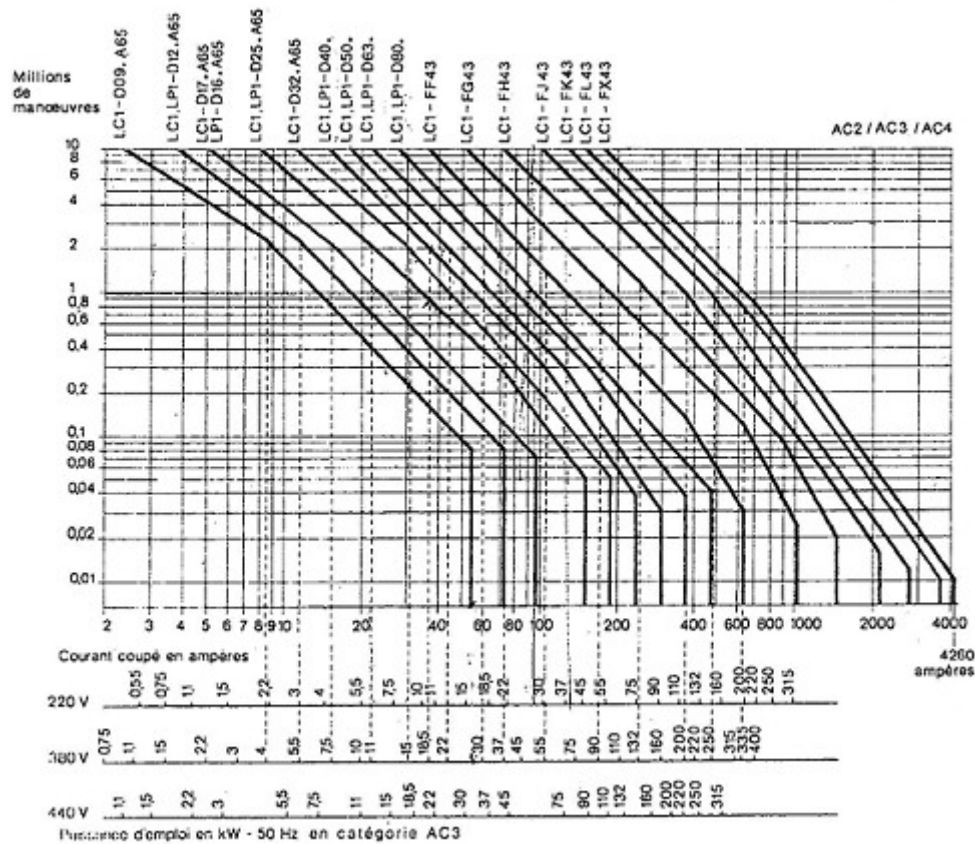


Figure 41 : Abaque montrant la durée de vie électrique en million de manœuvre en fonction du courant coupée.

Donc l'endurance électrique est :

$$E = 1.5 \times 10^6 \text{ manoeuvres}$$

Concernant KM2 et KM3 :

- Fonction : les deux contacteurs ne peuvent pas fonctionnés simultanément mais il y a le phénomène de permutation à cause du verrouillage mécanique qui commande l'alimentation du moteur à courant continu sous 110 V pour KM2 et sous 220 V pour KM3

- Catégorie : avec le récepteur de type moteur shunt, on maintient la catégorie DC3. Le moteur shunt de 3 [KW] absorbe 16 [A], il est alimenté par un contacteur 40 [A].

La tension assignée d'emploi $U_e = 220V$, courant coupé $I = 2,5 \times I_e = 40[A]$

Donc nous choisirons pour le contacteur KM2 et KM3 le type LC1 DC3

- La durée de vie électrique est :

d'après l'abaque ci-dessous, on peut tirer l'endurance électrique des pôles du contacteur

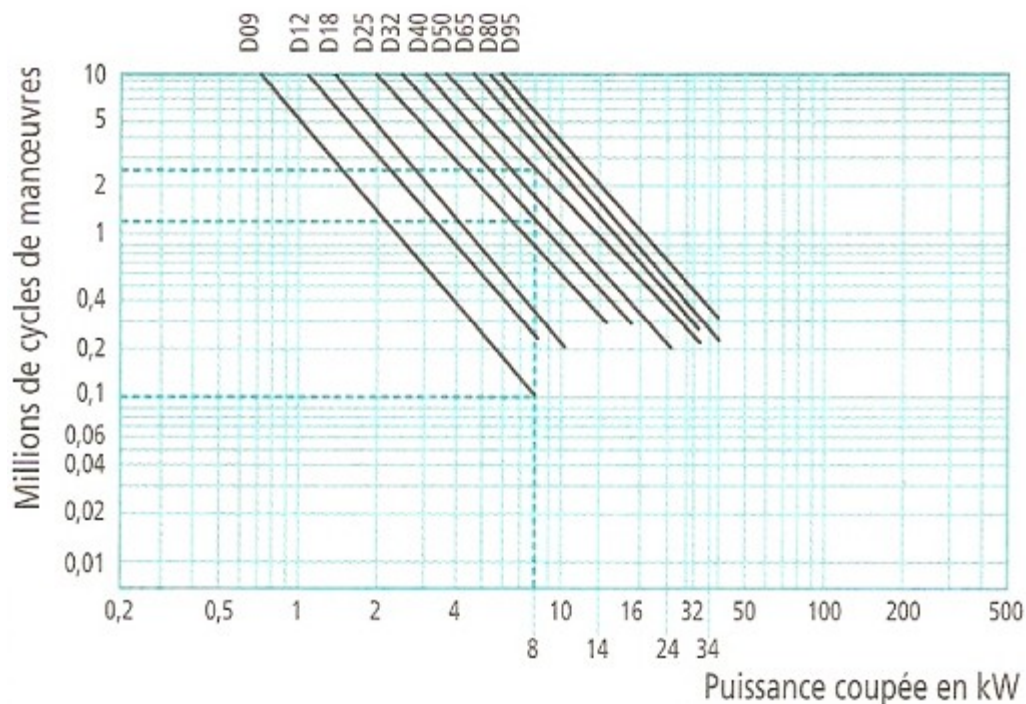


Figure 42 : Abaque montrant la durée de vie électrique en million de manœuvre en fonction de la puissance .

La puissance coupée est 8800 [W], donc la durée de vie électrique est $1,7 \times 10^6$ manœuvre.

CHAPITRE 4 DEVIS DE LA REALISATION

Les matériels utilisés :

Matériaux	Nombre	Prix unitaire(Ar)	Prix total (Ar)
Tôle magnétique	30 Kg	1.500	45.000
Bois pour fermeture	2(m)	2.000	2000
Tiges filetés	4	800	3.200
Cuivre Ø10	1	10.000	10.000
Contre plaqué	1	2.000	2.000
Papier isolant avec épaisseur différent	2		8.000
Carton pour séparation	1	10.000	10.000
Gaine (souple de Ø 5)	5(m)		9.000
Ruban de Jaconas	6(m)	1.200	7.200
Fil de cuivre de Ø 200/100	3 × 2.5Kg	30.000	225.000
Fil de cuivre de Ø 140/100	3 × 2.8Kg	30.000	252.000
Fil de cuivre de Ø 250/100	3 × 1.7Kg	30.000	153.000
TPN 10/10	1	20.000	20.000
Colle blanche 1/8Kg	1	500	500
Peinture blanche ¼ Kg	1	2.500	2.500

Peinture noire ¼ Kg	1	2.500	2.500
Contacteurs LC1-D16	1	20.000	20.000
Contacteurs LC1-DC3	2	25.000	50.000
Fil de connexion	10(m)		15.000
Fer cornière de 25	1	8.000	8.000
Diode BYW-88	12	5.000	60.000
Radiateur	1	10.000	10.000
TOTAL en Ariary			912.400

Tableau 9 : Coûts des matériels utilisés

Opérations	Heure	Cout/Heure(Ar)	Cout Total (Ar)
Découpage	16	2500	40.000
Tournage	32	6.000	192.000
Montage	8	5.000	40.000
Ponçage	8	4.000	32.000
Autre	7	4.000	28.000
TOTAL en Ariary			332.000

Tableau 10 :Coûts des opérations

Le coût total de la réalisation est :1.244.400(Ar)

CHAPITRE 5 IMPACT ENVIRONNEMENTAL

L'environnement est l'ensemble des milieux naturels et artificiels, y compris les milieux humains qui touchent le développement sur tous les domaines.

La constitution et les principes généraux de Droit environnemental imposent à chacun de participer à la sauvegarde de l'environnement surtout à la lutte contre les pollutions industrielles dans les milieux où il vit. Le thème concernant l'alimentation électrique à courant continu à faible ondulation fait partie du domaine de l'électronique de puissance. Il est donc nécessaire d'étudier les impacts environnementaux engendrés par l'utilisation du système formé par les réseaux et les matériels électrotechniques.

4.1 Sources des impacts

Il y a les lignes de transport des énergies qui alimentent les transformateurs.

Les phénomènes d'induction magnétique, c'est - à - dire l'apparition des ondes qui se propagent aux alentours de la machine.

Lorsque le moteur est en marche, des couples résistants élevés peuvent causer une vibration et des nuisances sonores.

4.2 Impact négatif

a. Valeurs de la résistance du corps humain

Le corps humain constitué de la peau, des tissus, du sang, des muscles, peut se définir comme une impédance. Cette impédance varie avec la tension, le trajet du courant, la surface de contact et des autres paramètres. Mais pour simplifier, nous prendrons une impédance dont l'ordre de grandeur est environ $1000[\Omega]$ dans les conditions humides et $2000[\Omega]$ dans les conditions sèches.

b. Tension de contact

Les tensions limites conventionnelles sont respectivement de valeurs différentes suivant qu'il s'agit de locaux ou emplacements de travail mouillés ou non mouillés. Le tableau suivant montre le type de courant et la valeur de la tension à partir de laquelle elle devient dangereuse.

Dans les locaux mouillés		Dans les autres locaux	
Nature de courant	Valeur de la tension	Nature de courant	Valeur de la tension
Courant alternatif	A partir de 25 [V]	Courant alternatif	A partir de 25 [V]
Courant continu	A partir de 50 [V]	Courant continu	A partir de 12 [V]

Tableau 11 : Valeur de la tension de contact

c. Les effets du courant électrique sur le corps humain

Les risques physiologiques dépendent de la valeur et du temps de passage du courant dans le corps humain.

Type de courant	Effet
$I_d(\text{courant de défaut}) < 0.5[\text{mA}]$	Il n'y a pas de perception du passage du courant dans le corps.
$0.5 \text{ à } 10 [\text{mA}]$	Le courant est perçu sans réaction.
$10 \text{ à } 30 [\text{mA}]$	Contraction musculaire.
$30 \text{ à } 75 [\text{mA}]$	La personne ne peut plus lâcher l'appareil en défaut, risque d'asphyxie.
$75 \text{ à } 1000 [\text{mA}]$	Risque d'arrêt cardiaque.

Tableau 12 : Effet du courant sur le corps humain

d. Effet de l'utilisation d'un convertisseur statique

Il y a création de l'harmonique de courant c'est –à – dire que les courants harmoniques provoquent des surcharges thermiques dans le transformateur et les câbles, puis il y a aussi

création des harmoniques de tension qui se manifeste par la répercussion des tensions harmoniques sur les appareils industriels alimentés par le réseau.

4.3 Mesure d'atténuation

La sécurité des personnels et du matériel est assurée différemment en fonction du régime de neutre utilisé dans une installation électrique. Il ya 3 régimes de neutres à savoir :

Régime TT : le neutre de l'alimentation est relié à la terre. Les masses de l'installation sont aussi reliées à la terre. Aussitôt qu'un défaut d'isolement survient, il doit y avoir coupure : c'est la coupure du premier défaut.

Régime TN : le neutre de l'alimentation est relié à la terre et les masses sont reliées au neutre.

Régime IT : le neutre est isolé ou relié à la terre par une impédance ($1500[\Omega]$ à $2000[\Omega]$). Les masses sont reliées à la terre. Le premier défaut ne présente pas de danger, mais il doit être signalé et recherché pour être éliminé.

Le problème des harmoniques pris par un redresseur ou un groupement à la source qui l'alimente est pourtant très important lors de l'alimentation par un réseau mais pour résoudre ce problème, on met en aval du réseau un filtre anti-harmonique et en amont du transformateur d'alimentation un filtre passe – bas.

CONCLUSION

Ce présent travail nous a permis d'améliorer encore nos connaissances sur l'électronique de puissance, dans la conception d'un transformateur triphasé et sur les redresseurs à diodes. Grâce à la mise en série de deux redresseurs, l'un de type parallèle double et l'autre du type série, qui fournissent des ondes de tension redressées de faible ondulation. La performance de chacun de ce système formé par les six ondulations de tension n'est pas avantageuse que celle d'un redresseur ayant un indice d'ondulation égal à douze.

Les systèmes de commande de puissance permettant le transfert ou l'interruption de l'énergie électrique en provenance du réseau vers les récepteurs sont assurés par les contacteurs.

Cependant, ce travail peut être prolonger par l'étude de comportement d'un système formé par le redressement commandé .

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Guy SEGIUER : « L'Électronique de Puissance, les fonctions de base et leurs principales applications », Paris, Edition Bordas, année 1990.
- [2] René BOURGEOIS ; Denis COGNIEL : « Mémotech Électrotechnique », Casteilla, 1990.
- [3] R. BESSON : « Technolonogie des Composants Électronique », Edition Radio, 1990.
- [4] Alain HEBERT ; Claude NAUDER : « Machines Électriques, Électronique de Puissance », Edition Bordas, 1985.
- [5] Francis MILSANT, « Électrotechnique, Électronique de Puissance », Edition Marketing, 1993.
- [6] Guy SEGIUER : « Les Convertisseur de l'Électronique de Puissance », Lavoisier, 1988.
- [7] Michel GIRARD, « Électronique Industrielle », Ediscience International, 1987.
- [8] Philippe BARRET, « Régime transitoires des Machines Tournantes Électronique », Eyrolles, 1987.
- [9] GAROT, « Mesures et Essais, Castella, 1991.
- [10] WILDI, « Électrotechnique, Presses de l'Université de Laval, 1991.
- [11] LUCAS et CHARRUAULT, « L'Électronique de l'électricien, Delagrave, 1988.
- [12] NIARD et MOREU, « Électronique », Nathan, 1985.

WEBOGRAPHIE

- [1] Google : Transformateurs de Puissance
- [2] <http://pagesperso.orange.fr/Moteur> à courant continu/
- [3] <http://pagesperso.orange.fr/fabrice.sincere/application-builder>
- [4] www.redressement.info
- [5] www.électronique de puissance.com

ANNEXES

ANNEXES 1

Tableau de caractéristiques des diodes de redressement standard

Types	I_o	V_{RRM}	I_{FSM}	V_F / I_F max.	I_R / T_j	BOÎTIER
	(A)		(A)	(V) (A)	(mA) (°C)	
1 N 5401 1 N 5402 5404 5406 5407	3	100 200 400 600 800	200	1,2 3	0,5 150	DO 27 A plastique (CB 197)
BY 214 - 50 100 200 400 600 800	6	50 100 200 400 600 800	400	1,2 20	0,25 100	AG plastique (CB 257)
BY 239 - 200 400 600 800	10	200 400 600 800	140	1,45 30	0,5 125	DO 220 AB plastique (CB 227)
BY 88 - 50 - 100 200 300 400 600 800 - 1 000	12	50 100 200 300 400 600 800 1 000	230	1,25 35 3	125	DO4 métal (CB 33)
1 N 248 B 249 B 250 B 1 N 1195 A - - - - - 1 N 1198 RN 820 1 120	20	50 100 200 300 600 800 1 000	450	1,5 70 5	150	DO5 métal (CB 34)
1 N 1183 - - - - - 1 N 1190 1 N 3768 1 N 3768	40	50 à 600 800 1 000	700	1,5 110 5	150	DO5 métal (CB 34)

SGS - Thomson Microelectronics

Tableau de sélection des diodes de redressement standard

$V_{RRM}=200$ à 1000 V

I_o (A)	BOÎTIER FORME	RÉFÉRENCE DIODE	V_{RRM} (V)
3 A	 DO 27 A	1 N 540 - 2 4 6 7	200 400 600 800
6 A	 AG	BY 214 - 200 400 600 800	200 400 600 800
10 A	 DO 220 AB	8Y 239 - 200 400 600 800	200 400 600 800
12 A	 DO 4	BYW 88-400	de 100 - 200 à 1 000 V
20 A	 DO 5	1 N 1195 1 N 1196 1 N 1197 1 N 1198	200 400 600 800
40 A	 DO 5	1 N 1183 1 N 1188 1 N 1190	50 V 400 V 600 V

ANNEXE 2

Définition des catégories d'emploi des contacteurs :

Elles tiennent compte de la valeur des courants que les contacteurs doit établir ou couper lors des manœuvres en charge.

En courant alternatif,

Catégorie AC1	Elle s'applique à tous les récepteurs dont le facteur de puissance est au moins égale à 0.95
Catégorie AC3	Elle régit le démarrage, le freinage en contre courant, ainsi que la marche par à coups des moteurs à bagues. Au démarrage, $I_d = 2I_n$, à la coupure $I_c = 2I_n$: la coupure est difficile
Catégorie AC3	Elle concerne les moteurs à cage avec coupure moteur « lancé ». Au démarrage $I_d = (5 \text{ à } 7)I_n$, à la coupure, $I_c = I_n$ la coupure reste facile.
Catégorie AC4	Cette catégorie concerne le démarrage, le freinage en contre courant, et la marche par à coups des moteurs à cage, à la fermeture et à l'ouverture, le courant est à 5 à 7 fois le courant nominal. La coupure est sévère.

catégorie d'emploi en courant alternatif.

En courant continu, il y a :

La catégorie DC1 qui s'applique à tous les récepteurs en courant continu dont la constante de temps L/R est inférieure ou égale à 1[ms].



Courant assigné d'emploi en AC3 A		9	12	18	25	32	40	50	65	80
Tension assignée d'emploi	Nbre de pôle en série	Courant d'emploi en DC1								
225 [V]	1	4	4	55	5	5	5	5	5	5
	2	8	8	8	15	15	35	40	40	45
	3	10	10	10	22	22	40	50	50	55
125 [V]	1	6	6	8	8	8	8	8	8	8
	2	12	12	12	25	25	40	50	60	80
	3	15	15	15	27	27	45	60	65	85

La catégorie DC3 qui régit le démarrage, le freinage, la marche par « à coups » des moteurs shunts. Les courant établis ou coupés sont 2.5 fois le courant nominal. La constante de temps L/R est $\geq 2[ms]$.

La catégorie DC5 concerne le démarrage, le freinage des moteurs série dont la constante de temps est reste $\leq 7.5 [ms]$.

Courant assigné d'emploi en AC3 A		9	12	18	25	32	40	50	65	80
Tension assignée d'emploi	Nbre de pôle en série	Courant d'emploi en DC2, DC3, DC4, DC5								
225 [V]	1	0.75	0.75	0.75	1	1	1	1	1	1
	2	1.5	1.5	1.5	3	3	4	5	5	7
	3	6	6	6	10	10	20	25	25	35

125 [V]	1	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	2	8	8	8	15	15	20	25	25	40
	3	12	12	12	20	20	30	35	35	60

Endurance électrique :

La durée de vie électrique est le nombre moyen de manœuvres en charge que les pôles de puissance peuvent effectuer sans entretien. Cette durée de vie électrique dépend de la puissance coupée calculée selon la catégorie d'emploi.

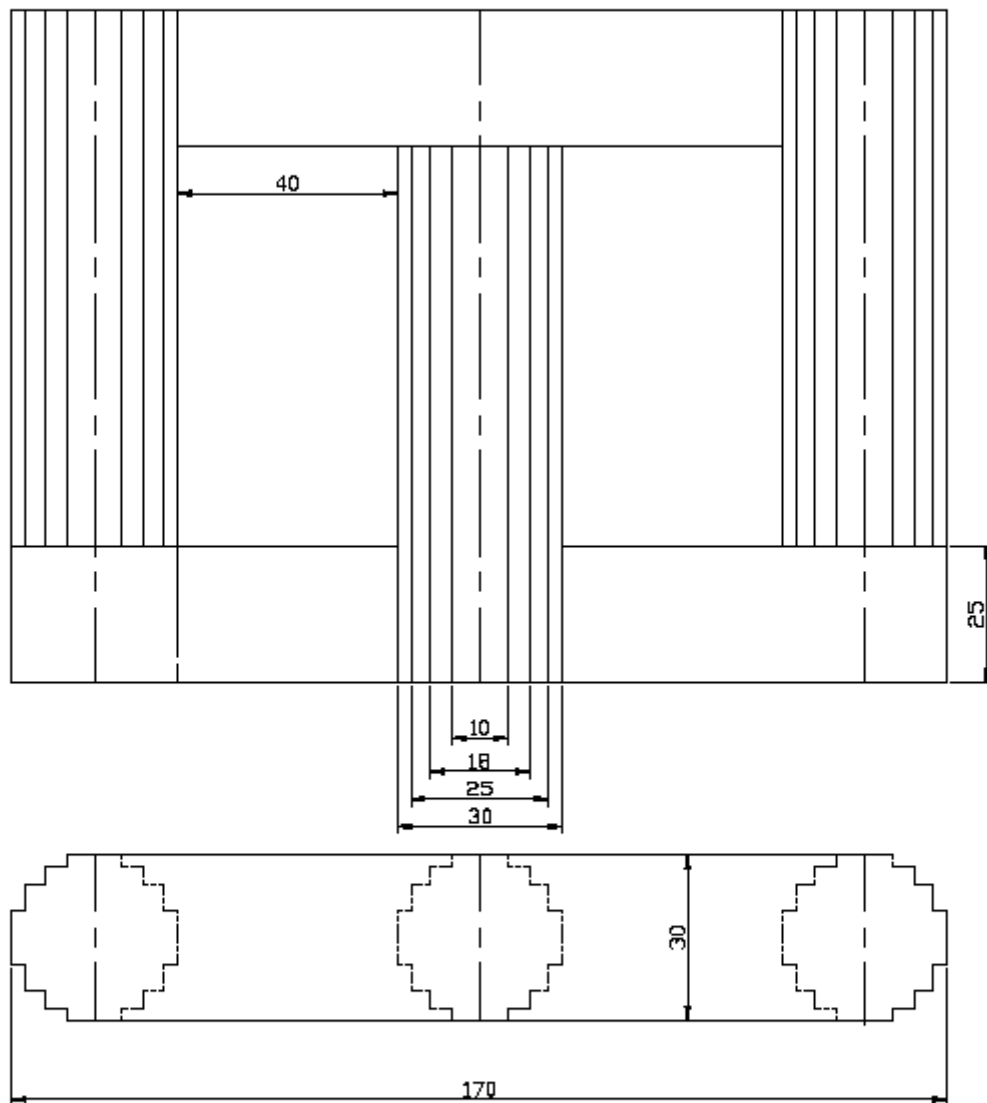
Type de récepteur commandé	tension	Courant coupé	Puissance coupée
DC1 Charge non ou faiblement inductives	U_g	I_g	$U_g \times I_g$
DC2 Moteur shunt, coupure moteur lancé	$0.1 U_g$	I_g	$0.1 U_g I_g$
DC3 Moteur shunts, inversion.	U_g	$2.5 I_g$	$U_g \times 2.5 I_g$
DC4 Moteur série, coupure moteur lancé	$0.3 U_g$	I_g	$0.3 U_g \times I_g$
DC5 Moteurs série, inversion.	U_g	$2.5 I_g$	$U_g \times 2.5 I_g$

U_g : tension assignée d'emploi

I_g : courant assigné d'emploi

ANNEXES 3

ELEMENTS DU TRANSFORMATEUR



CIRCUIT MAGNETIQUE

ECHELLE 1:2

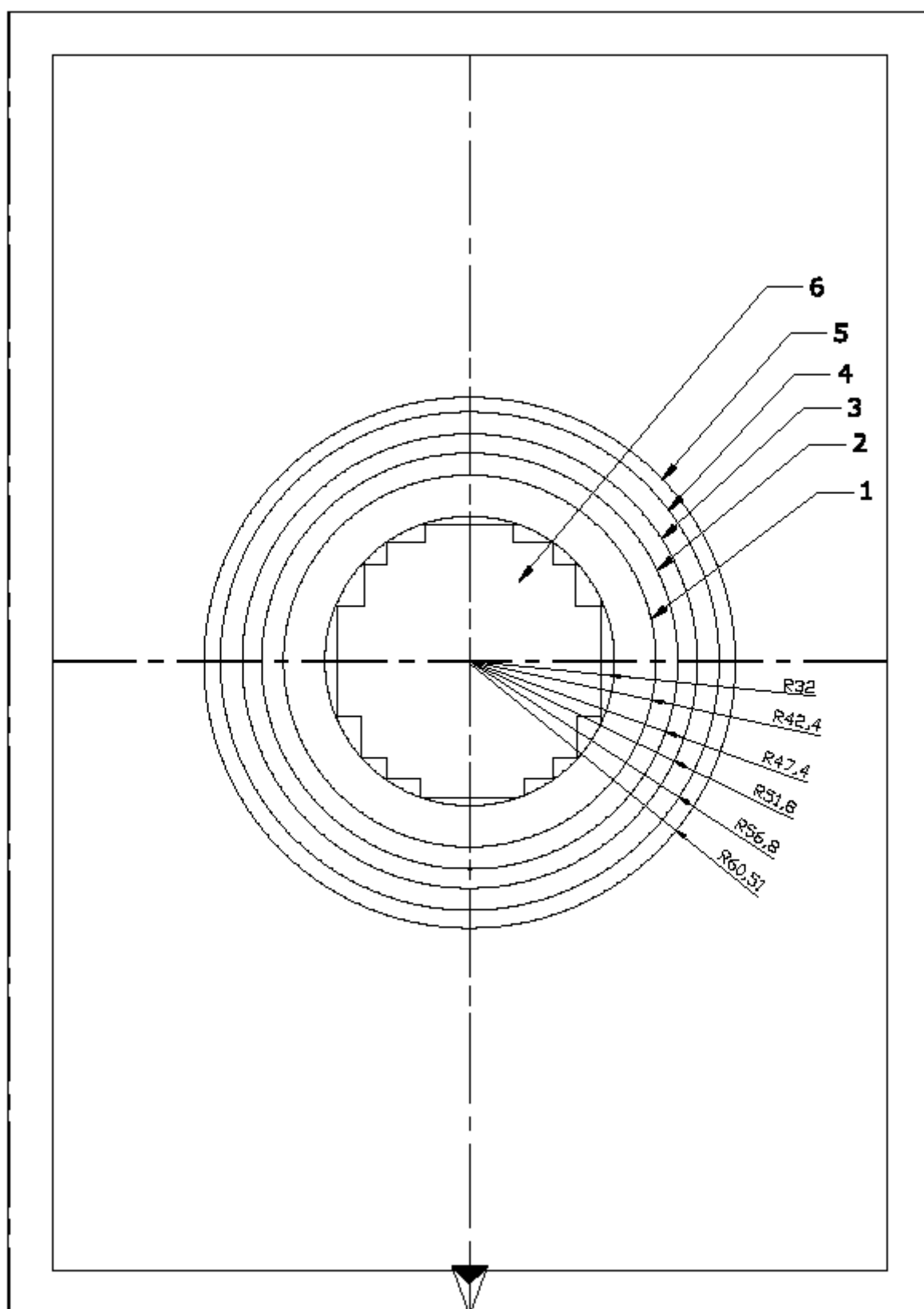
ESFA

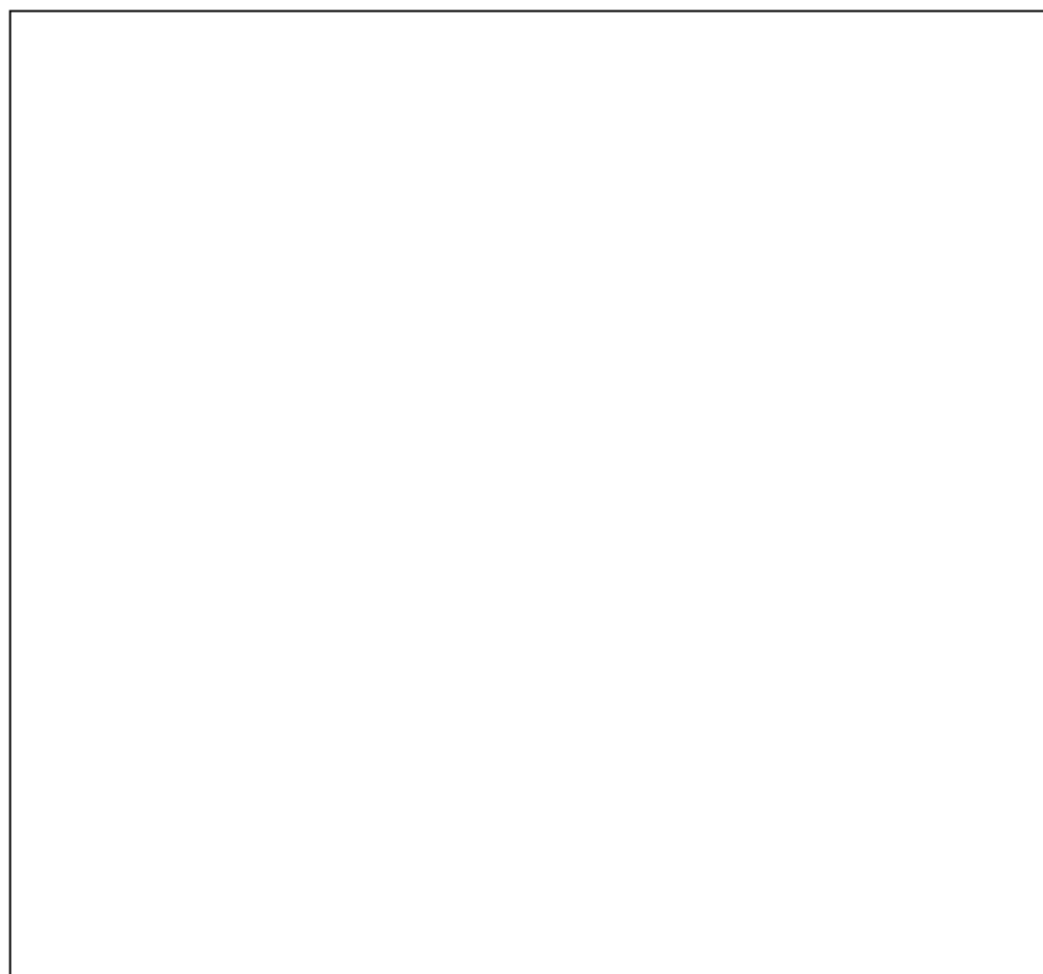
Nom: ANDRIANIRINA
Mamy Manantsoa

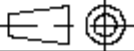


03.09.09

P:01





6	Noyau magnétique	3	Acier au Silicium	NF C 28 920
5	Enroulement secondaire P03	3	Cuivre	
4	Réglettes entre secondaire	3	Bois	
3	Enroulement secondaire S3	3	Cuivre	
2	Réglette entre primaire et secondaire	3	Bois	
1	Enroulement primaire	3	Cuivre	
Rep.	Désignation	Nb	Matière	Observation
Enroulement du transformateur triphasé			Ech: 01	E.S.P.A
			Nom: ANDRIANIRINA Mamy Manantsoa	
			03.09.09	P:12



Auteur : ANDRIANIRINA Mamy Manantsoa

Contact : 033 07 887 39

Etablissement : Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo

Filière : Génie Industriel

Titre du mémoire :

ALIMENTATION ELECTRIQUE A COURANT CONTINU A FAIBLE ONDULATION

RESUME

A partir de la combinaison d'un transformateur triphasé et des redresseurs à diodes, on peut changer la forme de l'énergie issue du réseau pour alimenter un courant continu.

Nous choisirons la mise en série d'un redresseur du type parallèle double et d'un type série fournissant des ondes de tension redressée décalées pour que la tension totale soit moins ondulée.

Les systèmes de commande de puissance permettant le transfert de l'énergie sont effectués par les contacteurs

ABSTRACT

From making together the three phase transformer and the commutator, we can change the shape of the energy out come the three phase current for supply the direct current machine.

We choose to put on serial the commutator with kind of double parallels and the commutator with serial can shift kind others given the redressed voltage wave, so that all redressed voltage may less be wavy.

The power control systems are made by the contactor to transfer the energy.

Mots clés :Redressement, Transformateur triphasé, Moteur à courant continu, Contacteur, Diodes

Nombre de page : 75

Nombre de figure : 42

Nombre de tableaux : 12

Rapporteurs : Monsieur RAJAONARIVELO Jean André
Monsieur RANDRIANAIVORAVELONA Fanja