

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Etude Conception Et Réalisation D'une Alimentation
À Haute Tension Alternative
0-----10 KV**

Présenté par :
DHAHOUA Rabie
Soutenu le : 2 juin 2016

Devant le jury composé de :

Mr. BETKA Achour

Mr. MIMOUNE Sour-Mohamed

Mme. BOUMARAF Rabia

Pr

Pr

MCB

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2015 / 2016

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Etude Conception Et Réalisation D'une Alimentation
À Haute Tension Alternative
0-----10 KV

Présenté par :
DHAHOUA Rabie

Avis favorable de l'encadreur :
Pr.MIMOUNE Sour-Mohamed

signature

Avis favorable du Président du Jury
Pr. BETKA Achour

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Réseaux électrique**

Thème :

Etude Conception Et Réalisation D'une Alimentation
À Haute Tension Alternative
0-----10 KV

Proposé par : Pr.MIMOUNE Souri-Mohamed

Dirigé par : Pr.MIMOUNE Souri-Mohamed

RESUMES (Français et Arabe)

Nous avons réalisé une alimentation variable 220/2000 V. Cette alimentation est comparable aux alimentations existantes sur le marché. On espère que ce travail va aider de point de vue pédagogique les generations futures et surtout la spécialité réseaux électriques et à utiliser cette alimentation HT pour des testes de décharges. Cette alimentation peut être exploitée à d'autres fins est surtout pour testes de rigidité des composants électroniques isolants.

Dédicace

Je dédie le fruit de mon travail

À mes chers parents qu'ils m'ont aidés et

Supportés toute ma vie.

À ma chère maman pour ses sacrifices et ses

Efforts pendant toutes ces années.

*À mon père qu'il n'est pas épargné aucun effort
pour m'aider durant mes études, je supplie dieu de*

Leur donner le bonheur et la santé.

À mes chers frères et toute ma cher famille

À tous mes amis et mes collègues.

Rabie

Remerciement

*Avant tout, Je remercie, notre créateur ALLAH le tout
puissants que nous a donné la force et la volonté pour
terminer ce travail...*

*Je remercie mon encadreur monsieur **MMOUNE** Souri-Mohamed
pour son encouragement, sa disponibilité, ses orientations,
ses conseils et pour le temps précieux qu'il m'a consacré
durant l'année théorique et pour récolter le fruit de ce
travail ...*

*Je tiens à remercier aussi professeur **BETKA** Achour
(président de jury) et le membre du jury madame **BOUMARAF**
Rabia .*

*Je remercier tous mes enseignants durant mes années
scolaire et surtout , **Dr. NAIMI** Djeamai*

*Je remercie tous les personnes qu'ils ont facilité la
réalisation de ce travail.*

Rabia

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
I.1	Principaux domaines d'application de la haute tension	5
II.1	La différence entre la charge d'un transformateur et l'impédance de charge d'un transformateur	31
III.1	Caractéristiques Tensions primaire, secondaire et courant primaire	48

Liste des figures

N°	Titer	Page
Fig I.1.	circuit résonnant	8
Fig I.2.	redresseur à simple alternance en charge	9
Fig I.3.	courbes des tensions redressées délivrées à simple alternance en charge	9
Fig I.4.	Redresseur à double alternance en charge (pont de Graetz)	10
Fig I.5.	courbes des tensions redressées délivrées par un pont de Graetz.	10
Fig I.6.	Doubleur de Schenckel	11
Fig I.7.	Courbes des tensions redressées délivrées Par le doubleur de Schenckel	11
Fig I.8.	Cascade de Greinacher ou de Cockcroft-walton à vide	11
Fig I.9.	Multiplicateur de tension	12
Fig I.10.	Zone de décharge de couronne lumineuse	13
Fig I.11.	zones de décharge	14
Fig I.12.	Alimentation haute tension : AL/AC-3K-2000	15
Fig I.13.	Alimentation haute tension SHQ.	15
Fig I.14.	Alimentation haute tension 677B	16
Fig I.15.	Alimentation électrique AC/DC (CC1000)	16
Fig I.16.	Alimentation Trek HV	17
Fig I.17.	Alimentation PS/ER01R300Y35A	17
Fig I.18.	Alimentation (PS) HV-1565	18
Fig I.19.	Alimentation Bertan 214	18
Fig II.1.	Rôle du transformateur	20

Fig II.2.	Schéma de principe d'un transformateur	21
Fig II.3.	Symbole normalisé du transformateur	21
Fig II.4.	Circuits magnétiques et électriques liés	22
Fig II.5.	Transformateur à colonnes [Le-1999]	23
Fig II.6.	Transformateur type cuirassé	24
Fig II.7.	Schéma équivalent «Vu» du primaire de transformateur parfait	27
Fig II.8.	Schéma équivalent «Vu» du secondaire de transformateur parfait	27
Fig II.9.	Circuit équivalent du transformateur réel	30
Fig II.10.	Essai à vide d'un transformateur	33
Fig II.11.	Essai en court-circuit d'un transformateur	34
Fig III.1.	Transformateurs récupérés de la casse	37
Fig III.2.	Préparation du circuit magnétique en forme de U	39
Fig III.3.	Tôle utilisée pour la construction du circuit magnétique	40
Fig III.4.	Abaque diamètre du fil en fonction du courant	42
Fig III.5.	Bobinage primaire 315 spire avec un fil en Cuivre de 0.8 mm	43
Fig.III. 6.	Bobinage secondaire en Cuivre	44
Fig.III. 7.	Quelques isolants utilisés entre les couches de spires	45
Fig.III. 8.	Isolant à film plastique utilisé entre le bobinage et circuit magnétique	46
Fig.III. 9.	Alimentation 2 kV réalisée	47
Fig.III. 10.	La tension secondaire V2 en fonction de la tension primaire V1	49
Fig.III. 11.	Le courant primaire I1 en fonction de la tension primaire V1	49
Fig.III. 12.	Décharge couronne entre deux pointes	50

Liste Des Abréviations Et Symboles

Abréviations	
CC	Courant continue
CA	Courant alternatif
HT	Haute Tension
HF	Haute Fréquence
HVDC	High Voltage Direct Curent
Symboles	
\emptyset	Sexions de l'électrode
ϕ, φ	Le flux magnétique
V	La tension
I	Courant
N_2, n_2	Nombre de Spires secondaire
R	Résistance
W_J	l'effet joule
t	Le temps
L_1	La bobine
φ_2	étant le déphasage dû au dipôle
P	La puissance active
F	La fréquence
ϕ_{Max}	Le flux magnétique maximal
m,a	Le rapport de transformation
A_2	Le flux magnétique total
e_2	la tension aux bornes du noyau
S	La puissance apparente
i_m	Le courant magnétisant
L_m	inductance magnétisante
X_{eq}	Les réactances équivalentes
ω	La pulsion de vitesse
B_{eff}	L'induction efficace
B_{max}	L'induction maximale

ملخص

لقد أنجزنا تغذية كهربائية ذات توتر عالي V 2000/200 هذه التغذية الكهربائية ذات خصائص مشابهة لما يوجد في السوق، نتمنى ان هذا العمل ان يساعد بيذاغوجيا الجيل القادم وخاصة تخصص شبكات كهربائية في مخبر الجامعة واستعمالها في التفريغ الكهربائي، يمكن لهذه التغذية ان تستعمل في تجارب العزل الكهربائي والعوازل الشبه ناقلة.

Résumé

Nous avons realise une alimentation 220/2000 V. Cette alimentation est comparable aux alimentations existantes sur le marché. On espère que ce travail va aider de point de vue pédagogique les generations futures et surtout la spécialité réseaux électriques à utiliser cette alimentation HT pour des testes de décharges. Cette alimentation peut être exploitée à d'autres fins est surtout pour testes de régidité des composants électroniques isolants.

Sommaire

Titre	Page
Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures.....	V
Liste des symboles et abréviations.....	VII
Résumé.....	VIII
Sommaire.....	X
Introduction générale.....	2

Chapitre I : Généralité Sur La Haute tension

I.1.1 Historique.....	4
I.1.2 Définition : haute tension.....	4
I.1.3 Définition : domaine de la haute tension.....	4
I.1.4 Domaines d'application de la haute tension.....	5
I.1.5 Buts de la haute tension.....	6
I.1.6 Méthodologie de la haute tension.....	6
I.2 Générateurs de haute tension.....	7
I.2.1 Générateurs de tension alternative.....	7
I.2.1.1 Transformateur élévateur.....	7
I.2.1.2 Circuit résonnant.....	8
I.2.2 Générateurs de tension continue.....	9
I.2.2.1 Redresseur de tension alternative.....	9
I.2.3 Multiplicateur de tension.....	12
I.3 Décharge couronne.....	13
I.3.1 Définition.....	13
I.4 Quelques types d'alimentation 2Kv.....	15
Conclusion.....	18

CHAPITRE II : Principe de fonctionnement d'un transformateur

II.1.1 Introduction.....	20
II.1.2 Rôle	20
II.2.1 Principe du transformateur.....	21
II.2.1.1 Constitution.....	21
II.2.1.2 Principe sommaire.....	21
II.2.1.3 Principe de fonctionnement.....	22
II.3 Différent type des transformateurs	23
II.3.1 Transformateur à colonne.....	23
II.3.1.1 Les enroulements.....	23
II.3.1.2 Le Circuit magnétique.....	24
II.3.1.3 Limitations des transformateurs à colonnes.....	24
II.3.2 Transformateur cuirassé.....	24
II.3.2.1 Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé.....	25
II.3.3 Transformateur Parfait.....	25
II.3.3.1 Etude à vide.....	25
II.3.3.2 Modèle Equivalent Du Transformateur Parfait.....	26
II.3.3.2.1 « Vu » du primaire.....	26
II.3.3.2.2 « Vu » du secondaire.....	27
II.3.3.3 Relations du transformateur parfait.....	27
II.3.3.3.1 Relations entre les tensions.....	27
II.3.3.3.2 Relations entre les intensités des courants primaire et secondaire.....	28
II.3.3.3.3 Diagramme de Fresnel.....	28
II.3.3.3.4 Relations entre les puissances.....	29
II.3.4 Transformateur réel.....	29
II.3.4.1 Circuit équivalent du transformateur réel.....	30
II.3.4.2 Essai à vide.....	30
II.3.4.3 Essai en court circuit.....	31
II.3.4.3.1 Chute de tension secondaire : formule approchée.....	31
II.4 Notion de charge d'un transformateur.....	31
II.4.1 Tension au secondaire en fonction de la charge.....	32
II.4.2 Rendement d'un transformateur.....	32

II .4.3 Facteur de régulation d'un transformateur.....	32
II .5 Détermination des paramètres du transformateur.....	33
II .5.1 Essai à vide.....	33
II .5.2 Essai en court-circuit.....	34
Conclusion.....	34

Chapitre III : L'alimentation Haute Tension

III. 1. Introduction.....	36
III. 2. Comment réaliser une alimentation haute tension.....	36
III. 3. C'est quoi un transformateur.....	36
III. 4. Description du transformateur.....	38
III. 5. Réalisation de l'alimentation haute tension.....	38
III. 5. 1. Préparation du circuit magnétique ouvert en U.....	39
III. 5. 2. Choix des tôles et des forms.....	39
III. 5. 3. Bobinage.....	40
III. 5. 3. 1. Bobinage primaire.....	41
III. 5. 3. 2. Choix du fil du bobinage primaire.....	41
III. 5.3.3. Comment bobiner physiquement le bobinage primaire.....	43
III. 5. 4. Bobinage secondaire.....	43
III. 5. 5. Les isolants plats.....	45
III. 5 .6. Remontage des tôles.....	47
III. 5 .7. Puissance.....	47
III. 5 .8. Les pertes.....	47
III. 5 .9. Mesures.....	48
III. 6. Sécurité.....	50
Conclusions.....	50
Conclusion générale.....	52
Références et Bibliographiques.....	54

INTRODUCTION GENERAL

Introduction général

La haute tension traite des systèmes soumis à l'action des champs électriques élevés qui, pour les phénomènes traités, sont prépondérants par rapport aux champs magnétiques. Le recours à l'utilisation de la haute tension pour par exemple faciliter le transfert de l'énergie électrique dans le réseau électrique, pour charger et accélérer des particules en physique et dans les applications industrielles de l'électricité statique, nécessite la connaissance des méthodes de calcul et techniques particulières à la haute tension.

La génération de la haute tension est une technologie qui n'est pas encore maîtrisable. Le hall pédagogique du département de génie électrique de l'université de Biskra est équipé d'une installation à HT à des fins pédagogiques. Cette installation est en fin de compte une alimentation HT 140 kV variable. Cette alimentation HT variable utilise comme source la tension du secteur 220 V pour ensuite la transformer avec un transformateur élévateur spécial en une tension élevée de 140 kV. Cette installation tombe souvent en panne et par manque de techniciens qualifiés la réparation peut durer parfois un semestre.

Pour trouver une alternative à cette alimentation, on a commencé à réaliser un prototype réduit qui peut générer une tension de 10 kV à des fins pédagogiques. Par la suite de ce travail, on a pu réaliser uniquement qu'une alimentation de 2 kV variable. Pour nous cela représente un exploit très important car il nous a permis une maîtrise de cette technologie. La réalisation d'une alimentation HT variable délivrant plus de tension demande des moyens très importants mais faisables.

Ce travail est constitué de trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur la haute tension, domaine de la haute tension, quelques applications de la haute tension, la méthodologie de la haute tension, les générateurs utilisés dans le domaine de la haute tension, la production des décharges couronne et enfin quelques types d'alimentation dans le marché.

Le chapitre 2, est un exposé sur les transformateurs. Principe de fonctionnement des transformateurs et modèles électriques.

Le chapitre 3 expose le résultat obtenu pour la réalisation de notre alimentation. Cela nous semble très satisfaisant. La réalisation d'une alimentation 220/2000 V est pour nous une très bonne réussite comparée aux alimentations existantes sur le marché.

Chapitre 1

Généralité Sur La Haute tension

I.1.1 Historique

A part quelques tentatives dans l'Antiquité (Thalès de Milet), il faut attendre le 18^{ème} siècle, pour qu'entre autres l'Américain Franklin, les Français de Romas et Buffon. Le Suisse Jallabert énoncent des théories sur l'effet des points et identifient les effets liés aux machines électrostatique à ceux de la foudre et mettent leur théorie en pratique, en introduisant le paratonnerre.

A la suite des expériences de Franklin sur la foudre, ses contemporains furent particulièrement friands d'expériences d'électrostatique.

L'étude des matériaux diélectriques est née du besoin pratique d'isolants, puisque les premières expériences d'électrostatique étaient basées sur l'isolement des charges à l'aide de matériaux diélectriques. L'ambre (elektron en Grec), la cire d'abeille, le soufre et le verre furent parmi les premiers matériaux isolants à être employés en pratique.

C'est à la fin du 19^{ème} siècle seulement, que l'éclosion d'une multitude d'applications de l'électricité donnera naissance aux techniques de la haute tension [1].

I.1.2 Définition : haute tension

La haute tension traite de l'ensemble des systèmes soumis à l'action des champs électriques élevés, dont l'effet pour les phénomènes traités est en général prépondérant par rapport à l'effet des champs magnétiques [2].

I.1.3 Définition : domaine de la haute tension

Les prescriptions de l'Association Suisse des Electriciens sur les installations électriques intérieures, se basant sur les prescriptions fédérales concernant les installations électriques [3], fixent en tension alternative, un niveau de la tension efficace de service de $1000 \text{ V} = 1 \text{ kV}$ comme étant le seuil inférieur du domaine de la haute tension. Chaque pays édicte ses propres normes dans ce domaine.

Dans les installations à haute tension, on distingue des installations à courant fort et faible.

I.1.4 Domaines d'application de la haute tension

Les principaux domaines d'application de la haute tension sont présentés au tableau I.1

Tab I.1 Principaux domaines d'application de la haute tension.

Domaine	Application
Réseaux : <ul style="list-style-type: none"> - Tension alternative - Tension continue 	<ul style="list-style-type: none"> - lignes aériennes - câbles - isolateurs - transformateurs de mesure de tension - transformateurs de mesure de courant - sectionneurs - disjoncteurs - parafoudres - mises à la terre - condensateurs - transformateurs de puissance - alternateurs
Electricité statique <ul style="list-style-type: none"> - Charge 	<ul style="list-style-type: none"> - générateurs électrostatiques - moteurs électrostatiques - filtres électrostatiques - xérocopie - imprimante électrostatique - peinture électrostatique
<ul style="list-style-type: none"> - Décharge 	<ul style="list-style-type: none"> - dangers d'explosion et d'incendie - perturbations de l'électronique sensible
Physique	<ul style="list-style-type: none"> - microscope électronique - accélérateurs de particules
Médecine	<ul style="list-style-type: none"> - effets biologiques des champs électriques - diagnostique par rayons X [99] - thérapie par rayons X[99] - ozonothérapie [116] - diélectrophorèse [119] - chauffage MF [119]
Electronique	<ul style="list-style-type: none"> - tube cathodique - générateurs piézoélectriques - allumage électrique - flash électronique - lampe à décharge - filtre bactériologique UV

Foudre	<ul style="list-style-type: none">- captage de la foudre- protection contre la foudre (paratonnerre, éclateurs, parafoudre, câble de garde)
Impulsions électromagnétiques d'origine nucléaire (NEMP)	<ul style="list-style-type: none">- protection des lignes de transmission- protection des antennes- protection des appareils électroniques- cages blindées

I 1.1.5 Buts de la haute tension

L'étude de la haute tension aboutit à la conception et à la réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et à supporter des champs électriques élevés.

I.1.6 Méthodologie de la haute tension

Etant donné la non-linéarité et la complexité des phénomènes entrant en jeu dans les problèmes de la haute tension, la démarche habituellement choisie combine approches théoriques et expérimentales.

Par exemple, les étapes du dimensionnement d'un système d'isolation à haute tension comportent :

- La détermination de l'ensemble des contraintes de tension ;
- le choix de matériaux et un premier dimensionnement sur la base d'un calcul théorique approximatif;
- la construction d'un prototype;
- les essais de courte durée aux limites de tension;
- la modification d'un prototype;
- les essais de durée accélérés;
- la modification éventuelle;
- l'homologation finale;
- la mise en fabrication;
- le contrôle durant l'exploitation.

I.2 Générateurs de haute tension

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans :

- a) les laboratoires de recherche scientifique ;
- b) les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leur utilisation (isolateur, câble, transformateur, appareils de coupure ...).

Remarque:

Par mesure de sécurité, les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé.

c) de nombreuses applications utilisant la haute tension (rayons X, effet couronne, générateur d'ozone, séparation électrostatique, laser...).

Il y a trois types de tensions conventionnelles :

- Tension alternative
- Tension continue
- Tension de choc

I.2.1 Générateurs de tension alternative

I.2.1.1 Transformateur élévateur

Le transformateur élévateur représente la source de haute tension la plus répandue et la plus utilisée dans la pratique. Ce sont des transformateurs de faible puissance (de quelques centaines de VA à quelques kVA) dont l'objectif principal est de procurer une haute tension au détriment du courant qui est de l'ordre du milliampère généralement. Ces transformateurs qui sont destinés principalement aux laboratoires d'essais, doivent avoir une très bonne isolation car ils sont appelés à supporter les nombreux claquages qui surviennent lors des tests.[4]

La forme de la HT délivrée par un transformateur HT est généralement différente de la forme sinusoïdale, sans toutefois dépasser les tolérances permises. Ces transformateurs possèdent généralement une borne de l'enroulement qui est reliée à la terre.

I.2.1.2 Circuit résonnant

Dans les essais réalisés en haute tension, quelques fois il se produit une explosion de l'équipement teste, suite à l'apparition d'une forte surtension générée par résonance électrique.

Le phénomène de résonance est mis à profit pour produire de très hautes tensions (Fig I.1) ; une impédance de réglage variable insérée en série avec le circuit du transformateur permet de régler et d'augmenter la tension à des valeurs très grandes (jusqu'à 600 kV).

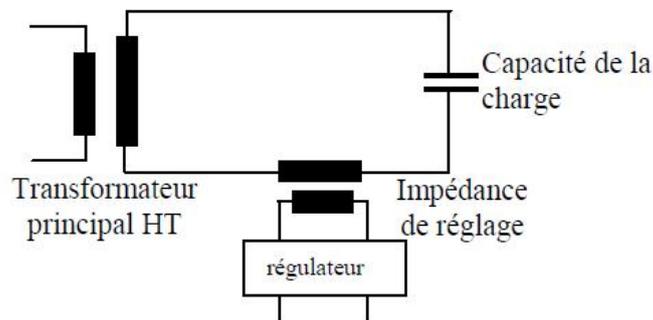


Fig I.1 circuit résonnant

Le régulateur, alimenté par une source BT alternative, règle la tension en ajustant la valeur totale de l'impédance réactive.

Les circuits oscillants sont utilisés surtout dans les essais d'équipement à grande capacité, comme les câbles HT par exemple.

Remarque :

Si l'on a besoin d'une tension plus grande, on utilise plusieurs circuits résonnants en série. Ce type de générateur est spécialement avantageux lorsque la capacité de l'objet en essai est élevée, tel que les câbles HT par exemple. L'avantage spécifique est que la tension délivrée est pratiquement sinusoïdale et qu'une compensation de l'énergie réactive s'en suit (résonance série).

I.2.2 Générateurs de tension continue

La haute tension continue est utilisée dans de nombreuses applications, telles que :

- Réseaux HVDC (High Voltage Direct Current)
- Recherche fondamentale : il est plus facile de travailler et d'analyser les phénomènes avec une tension constante qu'avec une tension constamment variable.
- De nombreuses applications nécessitent une tension continue (rayons X de la radiologie, séparation électrostatique, filtre électrostatique...).
- Dans les applications ou les essais de test d'équipement à charge capacitive sont très nombreux ; pour des raisons économiques on évite la tension alternative [5].

I.2.2.1 Redresseur de tension alternative

❖ Redresseur à simple alternance :

Avec :

C : capacité de lissage du redresseur + capacité de l'objet en essai + capacités parasites.

R : résistance de l'objet testé + résistance de fuite du condensateur de lissage.

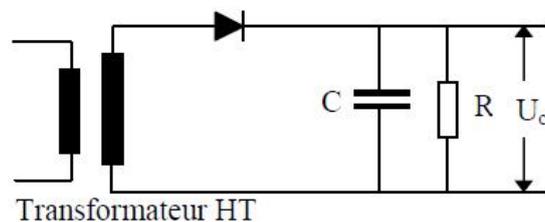


Fig I .2: redresseur à simple alternance en charge



U_c avec Capacité de lissage

U_c sans Capacité de lissage

Fig I .3 : courbes des tensions redressées délivrées à simple alternance en charge

- **Diode haute tension :**

Elle est équivalente à la mise en série de n diodes conventionnelles. Le nombre de diodes n est déterminé suivant la tension inverse à supporter par l'ensemble. Par exemple, pour redresser une tension de 100 kV, on met en série 100 diodes de 1000 V chacune pour avoir une diode haute tension de 100 kV.

- ❖ **Redresseur double alternance :**

Contrairement au redresseur à simple alternance, l'alternance négative est également redressée. Il n'y a pas de très grande différence entre les montages redresseurs à simple et à double alternance (Fig I.4), en présence d'une capacité de lissage (Fig I.5).

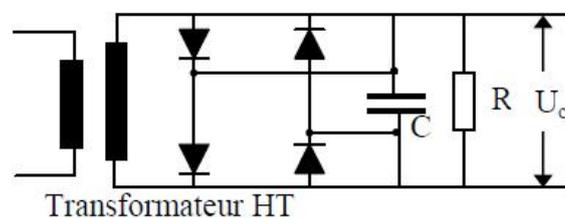


Fig I.4: Redresseur à double alternance en charge (pont de Graetz)

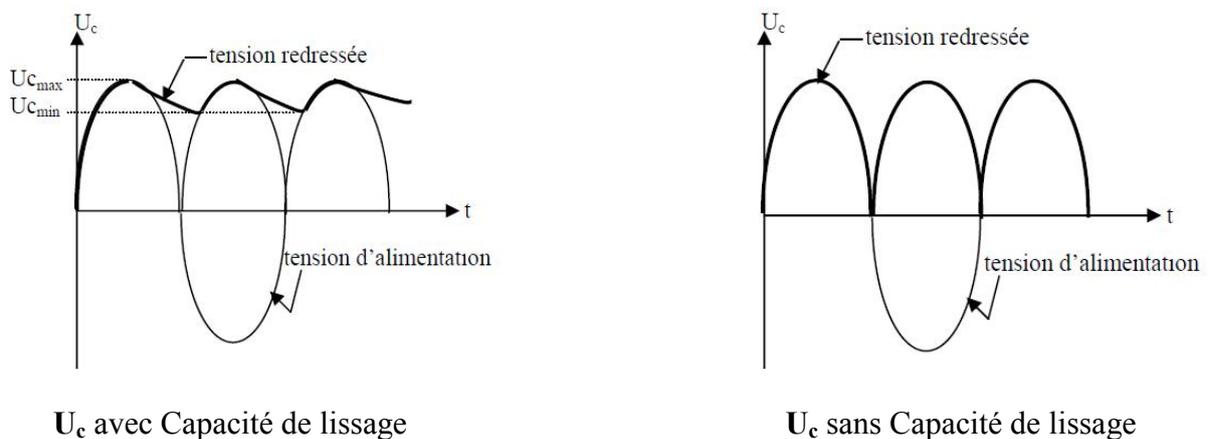


Fig I.5 : courbes des tensions redressées délivrées par un pont de Graetz.

- ❖ **Doubleur de tension :**

Il y a plusieurs types de doubleurs de tension, mais le principe est le même; le plus répandu est le doubleur de Schenkel.

- **Doubleur de Schenkel :**

Pendant l'alternance négative le condensateur **C1** se charge à la tension **V_{max}**, a l'alternance suivante cette tension qui s'ajoute à la tension du transformateur donne une tension aux bornes de **C** égale a **2 V_{max}**. La tension a vide obtenue a la sortie est donc **U_c = 2V_{max}** (Fig I.6 et Fig I.7)[7].

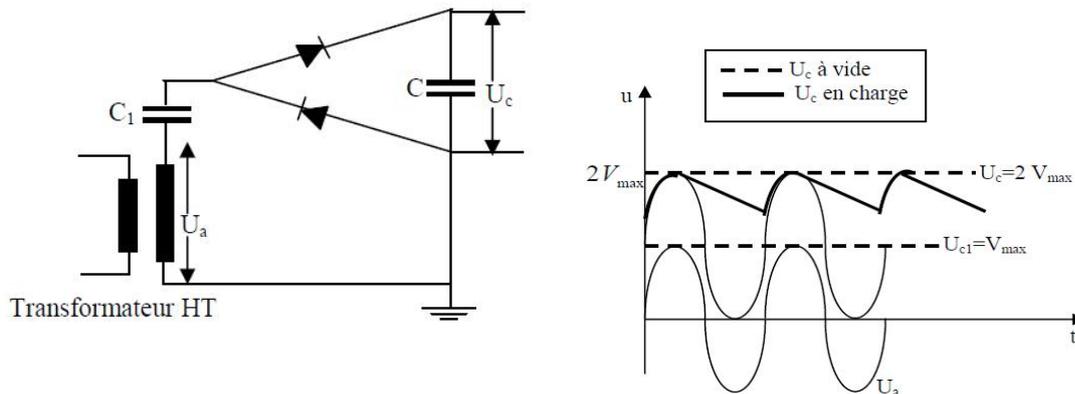


Fig I.6 : Doubleur de Schenkel

Fig I.7: Courbes des tensions redressées délivrées
Par le doubleur de Schenkel

Remarque : l'avantage du doubleur de Schenkel est qu'il constitue l'élément de base du redresseur en cascade.

- ❖ **Redresseur en cascade :**

La cascade, appelée cascade de Greinacher ou de Cockcroft-Walton, est constituée par une piles de doubleurs de type Schenkel.

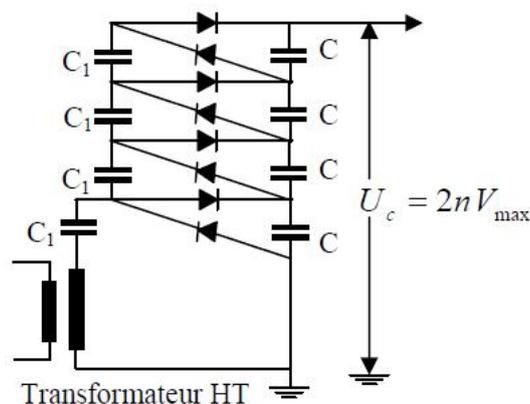


Fig I.8 : Cascade de Greinacher ou de Cockcroft-walton à vide

Comme chaque étage délivre une tension a vide égale a $2V_{\max}$, la tension obtenue (a vide) est $U_c = 2nV_{\max}$ avec n : nombre d'étages.

En charge : $U_c = 2nV_{\max} - \Delta U$

Avec $\Delta U = \frac{I_R}{f c} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{n}{6} \right)$ ou $I_R = \frac{U_c}{R}$

Chaque diode doit supporter une tension inverse égale à $2 V_{\max}$.

Remarque :

Le nombre optimal d'étages ne dépasse pas généralement 10, car au delà la chute de tension devient trop importante. Ce type de générateur délivre une tension qui peut atteindre 5 MV ; mais l'ordre de grandeur du courant délivré qui est de 10 mA reste faible.

I.2.3 Multiplicateur de tension

La première phase consiste à fermer les interrupteurs S_1 pour charger en parallèle les condensateurs C_i . Après, on ouvre les interrupteurs S_1 et on ferme S_2 : les tensions des condensateurs C_i qui sont maintenant en série, s'ajoutent pour donner aux bornes de C une tension de sortie $U_c = n U_0$

avec n : nombre de condensateurs C_i .

Remarque : ce générateur qui ne peut être utilisé qu'une fois les condensateurs chargés, a une durée d'application bien déterminée (qui dépend de l'énergie emmagasinée dans le condensateur et de la constante de décharge) car quand les condensateurs se déchargent, la tension tombe à zéro.

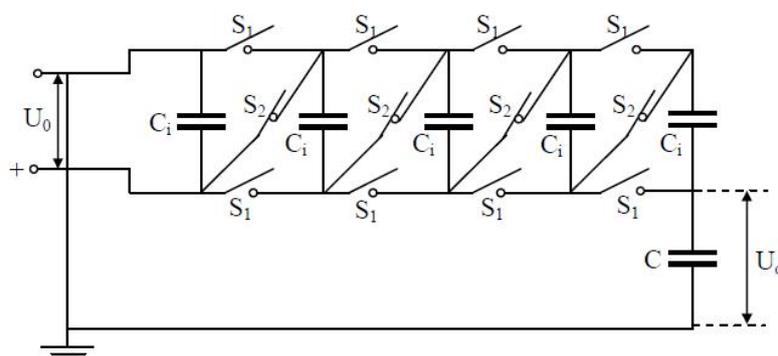


Fig I.9 : Multiplicateur de tension

I.3 Décharge couronne

I.3.1 Définition :

L'effet de couronne se produit sur tous les conducteurs et lignes soumis à une haute tension. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air, $\approx 30 \text{ kV/cm}$), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse (Fig I.10).

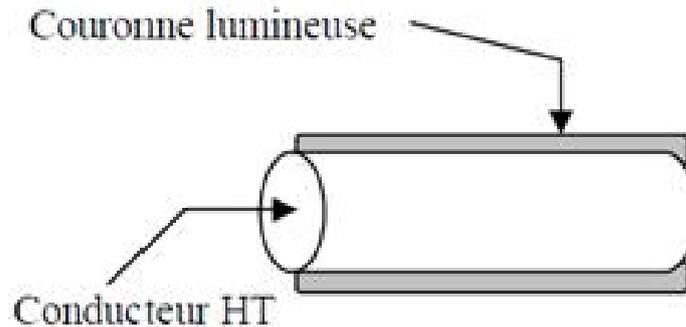


Fig I.10 Zone de décharge de couronne lumineuse

La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($U \geq 400\text{kV}$), lorsqu'il fait sombre.

L'effet couronne devient très gênant pour les réseaux à partir de 345 kV. Le bruit et le champ électrique superficiel représentent actuellement les paramètres d'environnement les plus importants à prendre en considération lors de la construction de nouvelles lignes $U \geq 750 \text{ kV}$. L'effet couronne se produit principalement sur les conducteurs de ligne, mais aussi sur les parties métalliques aiguës reliées à la haute tension, telles que sur l'isolateur, surtout par temps humide.

Effet de couronne en tension alternative : l'effet de couronne en tension alternative est la synthèse des deux polarités. Néanmoins, c'est l'apparence lumineuse de l'alternance positive (streamers) qui prédomine

Résumé : L'application d'une tension de valeur suffisante pour créer un seuil de décharge couronne, entraîne une répartition de l'espace inter-électrodes en deux régions (fig I. 11).

La première région voisine de l'électrode à faible rayon de courbure où le champ électrique est intense, elle est le siège d'ionisation du gaz, c'est la zone active. Les électrons libres sont accélérés par le champ électrique provoquant ainsi des collisions avec des atomes neutres ou des molécules; il y a alors multiplication électronique par avalanche.

Le reste de l'espace inter-électrodes constitue la deuxième région où le champ électrique est faible, c'est la zone de dérive. Dans cette zone, les électrons ne peuvent pas se multiplier, les ions créés par collisions dérivent vers l'électrode plane (ou à grand rayon de courbure) sous l'effet du faible champ en constituant ainsi une charge spatiale mono polaire.

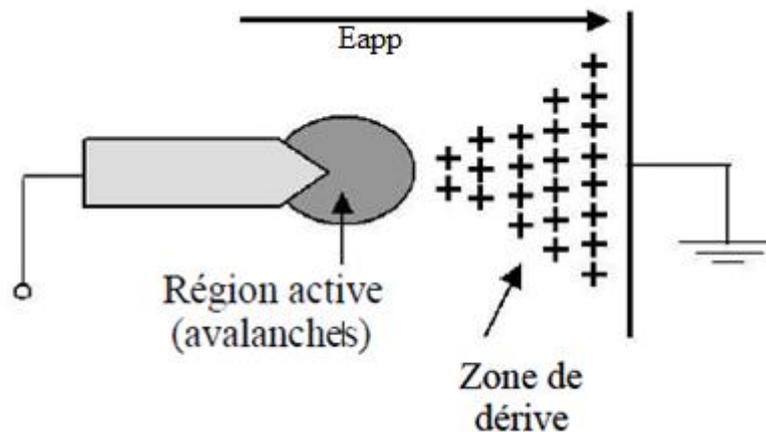


Fig I. 11 zones de décharge

I.4 Quelques types d'alimentation 2kV

- Alimentation haute tension : AL/AC-3K-2000

Principales caractéristiques :

- Vac : 2kV crête-crête
- Fréq. : 50 Hz 3 kHz
- Puissance : 10 W [8]



Fig I .12. Alimentation haute tension : AL/AC-3K-2000

➤ Description :

L'alimentation haute tension SHQ (GND Common grounds) dans sa version unique haute précision est proposée en 2 kV, 4 kV et 6 kV pour des courants de 6 mA, 3 mA et 1 mA.

Le modèle d'alimentation haute tension SHQ dans sa version haute précision apporte deux pieds de mesure en courant qui sont sélectionnés par un Switch (High range / Low range) en face avant [9].



Fig I .13. Alimentation haute tension SHQ

➤ **Alimentation/amplificateur haute tension +/-2kV**

Numéro de référence fabricant : 677B

Fabricant : Trek Inc [10].



Fig I .14. Alimentation haute tension 677B

➤ **Alimentation électrique AC/DC / chargeur de condensateur / de table / haute tension max. 2 kV, max. 4 000 mA | CC1000 séries.**



Fig I .15. Alimentation électrique AC/DC (CC1000)

➤ **Trek HV Power Amplifier**

Input: 104 to 127v AC ; 48/63 Hz

Output: Up to ± 2 kv DC Voltage [11]



Fig I .16. Alimentation Trek HV

➤ **(PS) PS/ER01R300Y35A**

Glassman high voltage power supply. Voltage & current meters. Voltage & current front adjustment. 1 phase. Includes AC cable. SHV HV cable required for operation. Order a 3 foot (CNE) SHV5425-03 or à 5 foot (CNE) SHV5425-05

- Input: 220v, 1 phase, 48-63 Hz
- Output: ± 1 kv ; 300 ma
- Dimensions: 3-1/2"H x 19" x 19"



Fig I .17. Alimentation PS/ER01R300Y35A

- High Voltage Power Supply
0 to 2kv DC ; 0 to 15 ma
(PS) HV-1565



Fig I .18. Alimentation (PS) HV-1565

- **Bertan 214 HV Power Supply**

(PS) 214

Bertan Associates Inc. 214 high voltage power supply. Current limits at 17 ma. Turns counter on 20 turn pot displays actual voltage within 1 to 2 volts of output. Positive or negative ground on front panel. "MHV" connector on rear panel, negative ground only.

- Input: 115v AC or 230v AC
- Output: 0 to 1kv DC ; 15 ma



Fig I .19. Alimentation Bertan 214

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé quelques définitions sur haute tension, domaine de la haute tension, domaines d'application de la haute tension puis nous avons mis le point sur la méthodologie de la haute tension et à la fin, nous avons exposé les générateurs utilisés dans le domaine de la haute tension et la production des décharges couronne et enfin Quelques types d'alimentation dans le marcher.

Chapitre II

Principe de fonctionnement d'un transformateur

II.1.1 Introduction

Un transformateur est une machine électrique qui convertit une tension électrique alternative en une tension d'une autre valeur en conservant la fréquence. Le transformateur ne possède pas de pièces en mouvement, il est qualifié de machine statique.

Les transformateurs permettent de transmettre une puissance électrique. La tension et le courant alternatif fournis au primaire sont transformés en une ou plusieurs tensions et courants secondaires. Cette transformation se fait à travers un circuit magnétique ; les primaires et les secondaires sont parfaitement isolés.

II.1.2 Rôle

Les transformateurs statiques sont des appareils qui ont pour rôle de transiter une énergie électrique d'un réseau à un autre en modifiant ses caractéristiques : intensité et tension. Les transformateurs permettent d'élever la tension à la sortie des centrales électriques pour le transport sur de longues distances afin de diminuer les pertes en ligne et de l'abaisser à l'arrivée pour l'adapter aux besoins des consommateurs [12].

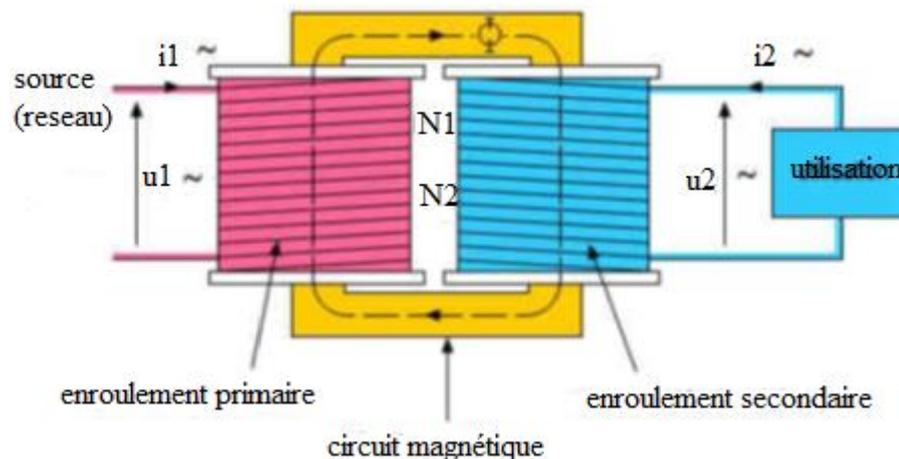


Fig II.1 – Rôle du transformateur

II.2.1 Principe du transformateur

II.2.1.1 Constitution

Un transformateur est constitué d'un noyau de fer, circuit magnétique fermé, autour duquel on a placé deux enroulements électriques indépendants (primaire et secondaire) (Fig.II.2). La figure II.3. Présente le symbole normalisé du transformateur.

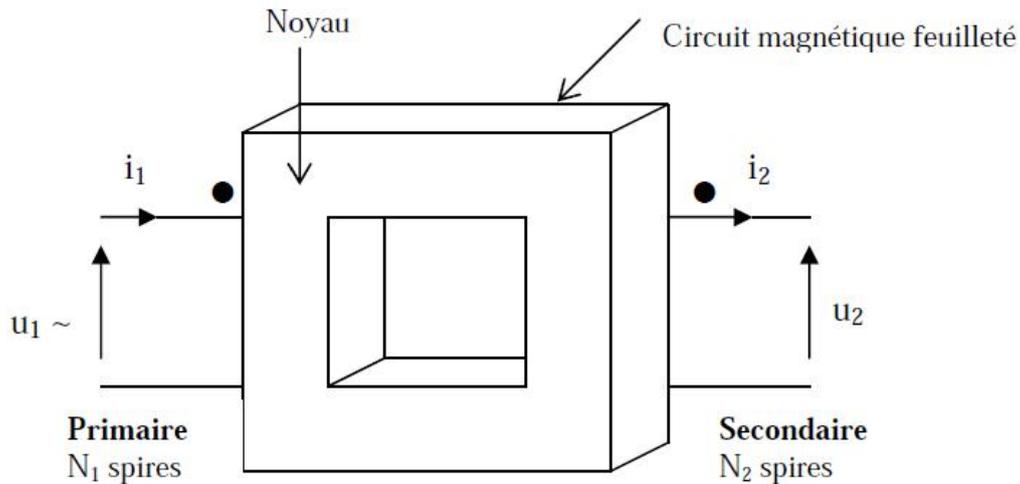


Fig. II.2. Schéma de principe d'un transformateur

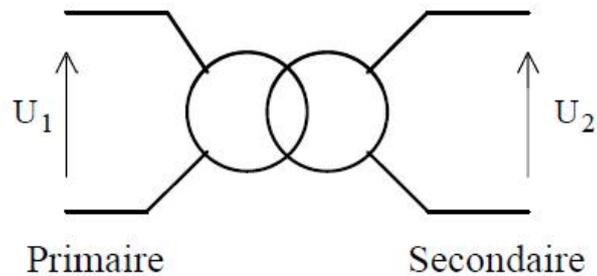


Fig. II.3. Symbole normalisé du transformateur

En théorie le transformateur est parfaitement réversible, mais dans la pratique les enroulements sont imbriqués de façon à obtenir un rendement optimum pour une utilisation dans un seul sens (voir plaque signalétique) [13].

II .2.1.2 Principe sommaire

En principe, le transformateur est constitué par :

- Le circuit primaire alimenté sous la tension alternative U_1 engendre un flux magnétique variable dans le circuit magnétique.
- Le circuit magnétique fermé "canalise" les lignes de champ : le flux ϕ est le même à chaque instant à travers toute section du noyau : flux conservatif.
- Le circuit secondaire est donc soumis à un flux variable, il est le siège d'une fem induite. On observe donc une tension alternative U_2 aux bornes du secondaire.

II .2.1.3 Principe de fonctionnement

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable Φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($d\Phi/dt$) et au nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure (II .4) [14]

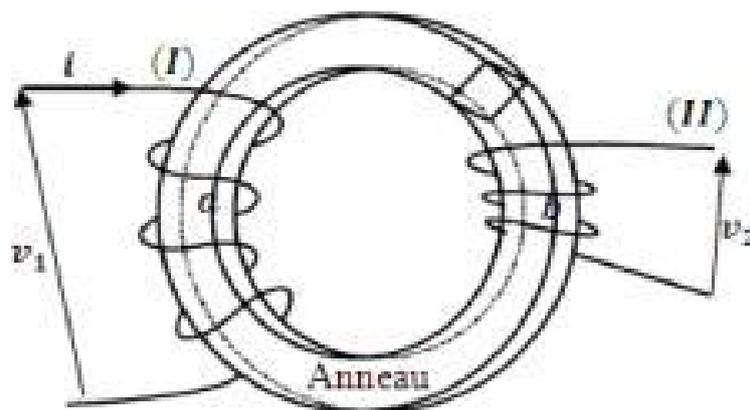


Fig II .4 Circuits magnétiques et électriques liés

II .3 Différent type des transformateurs

Il existe différents types de transformateurs, mais nous nous intéresserons à l'étude des transformateurs de faible puissance 0.5 kVA car ils présentent le plus grand intérêt dans plusieurs applications industrielles et de technologie. De point de vue construction, deux principales technologies sont distinguées, à savoir les transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés.

II .3.1 Transformateur à colonne

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique (fig II .5).

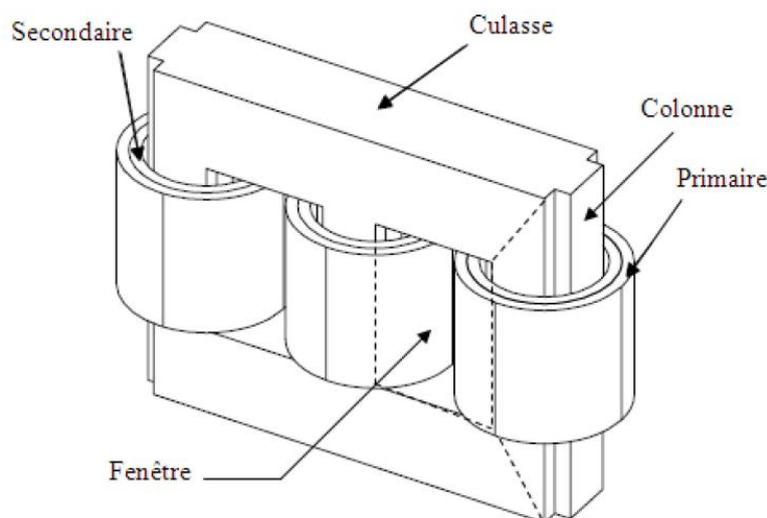


Figure II .5 Transformateur à colonnes [Le-1999]

II .3.1.1 Les enroulements

Les enroulements sont constitués de spires dont le nombre est différent pour les enroulements de haute et de basse tension respectivement primaire/secondaire. Les spires sont elles mêmes subdivisées en plusieurs brins mis en parallèle. Les conducteurs formant les enroulements sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autres pour leurs bonnes conductivités thermiques. Selon la gamme de puissance des transformateurs, les conducteurs peuvent être sous forme de fils massifs, de section circulaire ou carrée, de type méplat, ou encore laminés en fines feuilles [Lef-2006].

II .3.1.2 Le Circuit magnétique

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, isolées électriquement entre elles afin de réduire les pertes par courants de Foucault. Les tôles de circuit magnétique de type (Fe-Si), à grain orienté laminé à froid, ont une épaisseur qui varie de 0.15mm à 0.3mm [Gue-1994], Des joints enchevêtrés et orthogonaux effectuent la liaison entre les colonnes et les culasses sur les transformateurs de petite puissance. Ces joints qui constituent une succession de stratifications jouent un rôle important dans la performance du noyau afin d'obtenir une stabilité mécanique plus élevée, et diminuent également le bruit des vibrations pendant le fonctionnement du transformateur. [Nak-1982] [Oli-2003], L'espace délimité par deux colonnes successives et les culasses est dénommé "fenêtre magnétique" et accueille donc les bobinages [Lef-2006],

II .3.1.3 Limitations des transformateurs à colonnes

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquent, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. Par ailleurs ce type de construction qui a fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30 KVA), présente quelque difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 KVA) et des tensions plus élevées. Pour des tensions supérieures à 220 KV, certains constructeurs ont abandonné la construction du transformateur à colonne au profit de la structure cuirassée.

II .3.2 Transformateur cuirassé

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et des enroulements.

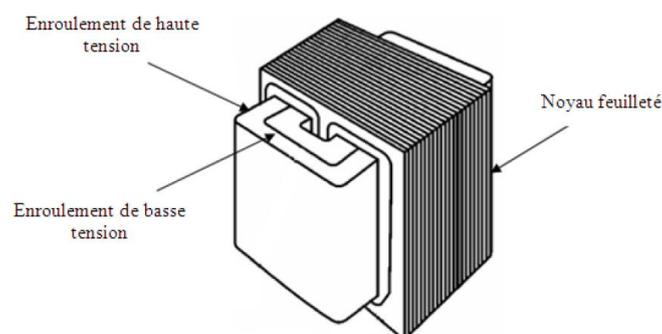


Fig II .6 Transformateur type cuirassé

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

II .3.2.1 Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé

Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relatif plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans le transformateur à colonnes.

Mais il présente aussi certains inconvénients : ses enroulements sont moins accessibles à l'agent refroidissant, l'examen et la réparation sont plus difficiles et demande d'avantage de matériaux isolants pour la haute tension.

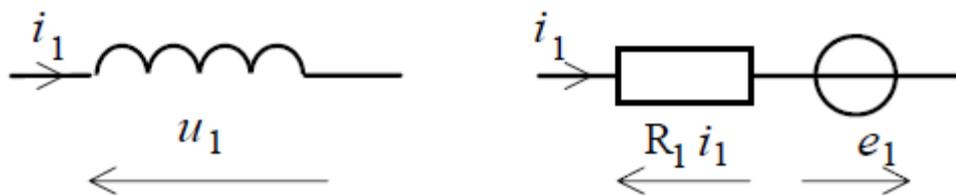
II .3.3 Transformateur Parfait

Un transformateur est supposé parfait si l'on néglige la résistance des enroulements primaire et secondaire et les pertes magnétiques (hystérésis et Foucault) et que l'on considère que le circuit magnétique est parfait (fuites nulles ou flux conservatif).

II .3.3.1 Etude à vide :

Le courant secondaire est nul : $I_2 = 0$

➤ Au primaire

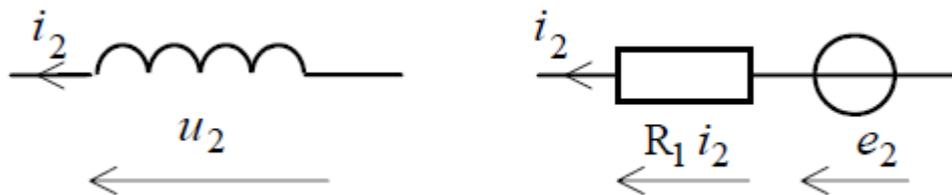


$$U_1 = R_1 i_1 - e_1 = -e_1 = +\frac{d\Phi_1}{dt}$$

Soit Φ le flux à travers le noyau de fer, et N_1 le nombre de spires de l'enroulement primaire, le flux à travers le primaire est donc $\Phi_1 = N_1 \Phi$

$$U_1 = + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

➤ Au secondaire



$$U_2 = +e_2 = - \frac{d\Phi_2}{dt}$$

Le flux Φ à travers le noyau de fer est conservatif et l'enroulement secondaire comporte N_2 spires. Le flux à travers le secondaire est donc $\Phi_2 = N_2 \Phi$

$$U_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\text{Donc } \frac{U_2}{U_1} = - \frac{N_2}{N_1}$$

Les tensions u_1 et u_2 sont donc en opposition de phase et leurs valeurs efficaces sont proportionnelles aux nombres de spires.

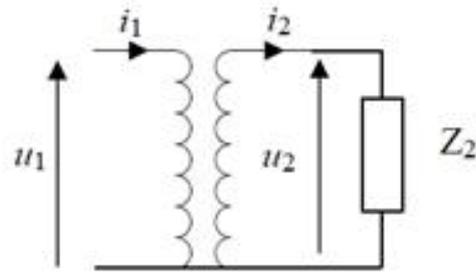
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = m_v \text{ rapport de transformation à vide}$$

Remarque :

- Le courant secondaire I_2 est nul mais le courant primaire I_{10} n'est pas nul.
- Le primaire est assimilable à une *inductance pure*, i_{10} est en quadrature arrière sur la tension primaire u_1 ($\varphi_{10} = +\pi/2$).
- La puissance P_{10} consommée au primaire est donc nulle : $P_{10} = U_1 I_{10} \cos \varphi_{10} = 0$.

II .3.3.2 Modèle Equivalent Du Transformateur Parfait**II .3.3.2.1« Vu » du primaire**

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_2 = -m \cdot \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 = -m \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 \end{array} \right. \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{-m \cdot \underline{U}_1}{-\frac{\underline{I}_1}{m}} = m^2 \cdot \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = m^2 \cdot \underline{Z}_1$$



Pour la source de tension U_1 . Le transformateur et sa charge équivalent à l'impédance

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_1}{m^2}$$

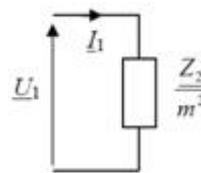


Fig II.7 Schéma équivalent «Vu» du primaire de transformateur parfait

II .3.3.2 « Vu » du secondaire

Le transformateur parfait vu du secondaire se comporte comme une source de tension idéale de f.e.m. u_2 égale à $-m.u_1$

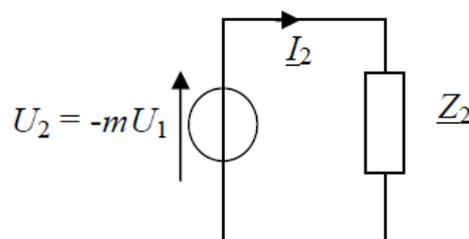


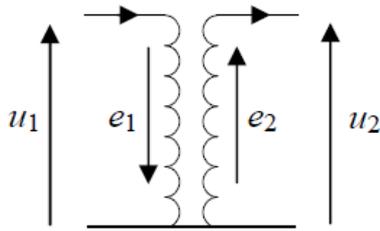
Fig II.8 Schéma équivalent «Vu» du secondaire de transformateur parfait

II .3.3.3 Relations du transformateur parfait.

II .3.3.3.1 Relations entre les tensions.

L'enroulement du primaire, formé de N_1 spires est le siège d'une f.e.m:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ et } e_1 = -u_1 \quad u_1 \text{ est sinusoïdal.}$$



Le flux Φ traverse toute spire du secondaire puisque nous avons supposé qu'il n'y avait pas de fuites magnétiques.

$$e_2 = + N_2 \frac{d\Phi}{dt} = u_2$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{e_1}{N_1} = -\frac{e_2}{N_2} \quad \text{alors} \quad \frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{e_2}{e_1} = -\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{le signe - indique une opposition de phase}$$

$$\text{En valeur efficace} \quad \frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Le rapport $\frac{N_2}{N_1}$ est noté m et nous l'appelons rapport de transformation du transformateur.

$$u_2 = -m.u_1 \quad \text{d'où} \quad U_2 = m.U_1$$

II .3.3.3.2 Relations entre les intensités des courants primaire et secondaire.

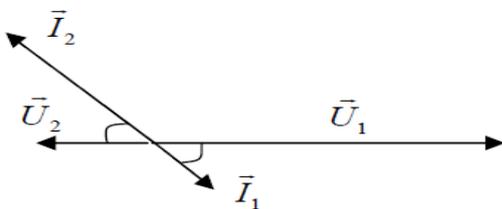
Les flux étant additifs et le circuit magnétique idéal, le théorème d'Ampère s'écrit :

$$N_1.i_{1v} \text{ (à vide)} = N_1.i_1 + N_2.i_2 \approx 0 \rightarrow N_1.i_1 = - N_2.i_2$$

$$\text{On en déduit:} \quad \frac{i_2}{i_1} = -\frac{N_1}{N_2} = -\frac{1}{m} \rightarrow i_1 = -m.i_2 \rightarrow I_1 = m.I_2$$

Remarque: selon la loi de Lenz, les Ampères-tours du secondaire s'opposent au primaire.

II .3.3.3.3 Diagramme de Fresnel



$$u_2 = -m.u_1 \Leftrightarrow \vec{U}_2 = -m \vec{U}_1$$

$$i_1 = -m.i_2 \Leftrightarrow \vec{I}_1 = -m \vec{I}_2 \quad \text{on constate que} \quad \varphi_1 = \varphi_2$$

II .3.3.3.4 Relations entre les puissances

$$\text{Les relations établies précédemment: } \begin{cases} u_2 = - m. u_1 \\ U_2 = m. U_1 \\ i_1 = - m. i_2 \\ I_1 = m. I_2 \\ \varphi_1 = \varphi_2 \end{cases}$$

Entraînent les relations suivantes entre les puissances:

- ✓ puissances instantanées : $p_1 = u_1 \cdot i_1 = - \left(\frac{u_2}{m} \right) (- m. i_2) = u_2 \cdot i_2 = p_2$
- ✓ puissances actives : $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \frac{u_2}{m} \cdot m I_2 \cdot \cos \varphi_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = P_2$
- ✓ puissances réactives : $Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = \frac{u_2}{m} \cdot m I_2 \cdot \sin \varphi_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 = Q_2$
- ✓ puissances apparentes : $S_1 = U_1 \cdot I_1 = \frac{U_2}{m} \cdot m I_2 = U_2 \cdot I_2 = S_2$
- ✓ rendement du transformateur : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_2}{P_1} = 1$

II .3.4 Transformateur réel

Le transformateur réel ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

- ✓ Noyau magnétique. Le noyau possède une caractéristique B(H) non-linéaire, avec hystérésis, et une perméabilité non-infinie ($\mu_r \neq \infty$)

- ✓ 2. Bobinages. Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ($\rho \neq 0$)

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire six sources de pertes dans le transformateur :

1. Puisque la perméabilité du noyau est non-infinie, la reluctance du noyau ne sera pas nulle.

Il y a par conséquent des fuites de flux :

(a) au primaire

(b) au secondaire

2. On a déjà vu qu'il existait des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.

3. La résistivité des files de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

- Le rendement du transformateur est inférieur à 100%.

- Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours. La tension au secondaire variera aussi en fonction de la charge.

II .3.4.1 Circuit équivalent du transformateur réel

Avec tous les phénomènes parasites vus dans la section précédente, on peut représenter ces pertes par des éléments de circuit équivalent de la Fig II .9. On regardera ensuite la raison pour chacun de ces éléments.

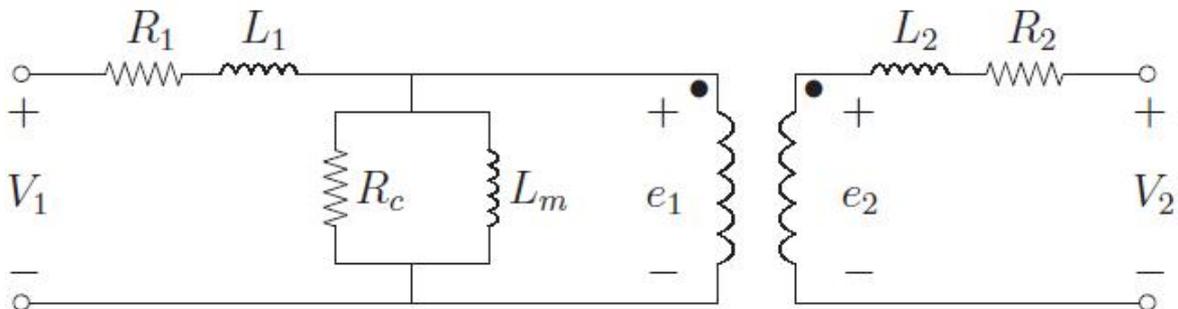


Fig II .9 Circuit équivalent du transformateur réel

II .3.4.2 Essai à vide

Un essai à vide consiste à alimenter le transformateur sous sa tension primaire nominale U_{1n} .

Des appareils de mesure permettent de mesurer :

- * la tension primaire à vide $U_{1v} = U_{1n}$;
- * l'intensité efficace du courant primaire : I_{1v} ;
- * la puissance active absorbée par le primaire : P_{1v}
- * la tension secondaire U_{2v} .

L'essai à vide permet de déterminer le rapport de transformation m :

$$m = \frac{U_2}{U_1}$$

La puissance P_{1v} absorbée par le primaire se répartie :

- dans le circuit magnétique (pertes fer F) ;
- dans l'enroulement primaire sous forme de pertes par effet Joule ($R_1 (I_{1v})^2$)

Comme le courant I_{1v} est faible, les pertes joule sont négligeables devant les pertes fer.

L'essai à vide permet donc de déterminer les pertes fer : $F = P_{1v}$

Dans le cas où l'essai à vide n'est pas effectué à tension nominale, les pertes fer calculées ne sont pas les pertes fer calculées pour le régime nominal. Pour les calculer avec $U_1 = U_{1n}$,

Il suffit de savoir que les pertes fer sont proportionnelles au carré de la valeur efficace de la tension U_1 .

$$F = k U_1^2$$

II .3.4.3 Essai en court circuit :**Détermination de Z_p et Z_s .**

La tension appliquée à l'entrée est une tension U_{1cc} , tension primaire de court circuit, très réduite devant U_{1n} . Le secondaire est court circuit.

Le wattmètre mesure P_{1cc} , l'ampèremètre mesure I_{1cc} . On alimente de façon à ce que le courant I_{1cc} soit très proche du courant nominal I_{1n} .

La puissance active mesurée est principalement une puissance dissipée par effet Joule dans le primaire et le secondaire. En effet, en court circuit, le courant secondaire I_{2cc} est égal à $m I_{1cc}$ et n'est donc pas nul.

$$P_{1cc} = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2 = C$$

$$\text{Puisque } I_{1cc}^2 = m^2 I_{2cc}^2, \quad C = R_1 m^2 I_{2cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2$$

$$\text{Soit : } C = P_{1cc} = R_s I_{2cc}^2$$

L'essai en court circuit permet également de quantifier l'impédance vue du primaire :

$$Z_p = \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} \quad \text{or } Z_s \text{ est donné par : } Z_s = m^2 Z_p \quad \text{d'où : } Z_s = m^2 \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}}$$

Il est possible alors de déterminer X_s par la relation :

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

II .3.4.3.1 Chute de tension secondaire : formule approchée

La chute de tension secondaire peut être donnée par la relation suivante :

$$\Delta U_2 = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$$

II .4 Notion de charge d'un transformateur

La charge d'un transformateur est définie en fonction du courant au secondaire I_2 .

La différence entre la charge d'un transformateur et l'impédance de charge d'un transformateur est donnée dans le tableau suivant :

Tap II .1 La différence entre la charge d'un transformateur et l'impédance de charge d'un transformateur

Charge	Courant de secondaire $ I_2 $	Impédance de charge $ Z_2 $
Pleine charge	I_2 (nominale)	Z_2 (nominale)
$\frac{3}{4}$ charge	$0.75I_2$ (nominale)	$1.33Z_2$ (nominale)
$\frac{1}{2}$ charge	$0.50I_2$ (nominale)	$2Z_2$ (nominale)
$\frac{1}{4}$ charge	$0.25I_2$ (nominale)	$4Z_2$ (nominale)
Sans charge (à vide)	0	∞

II .4.1 Tension au secondaire en fonction de la charge

Dans un transformateur, la tension au secondaire varie selon la nature de la charge.

- _ Charge résistive : la tension \hat{V}_2 et le courant \hat{I}_2 sont en phase.
- _ Charge inductive : le courant \hat{I}_2 est en retard par rapport à la tension \hat{V}_2
- _ Charge capacitive : le courant \hat{I}_2 est en avance par rapport à la tension \hat{V}_2

II .4.2 Rendement d'un transformateur

Le rendement (η) d'un transformateur est défini comme le rapport de la puissance active au secondaire sur la puissance active au primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Ceci donne

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_1 I_1 \sin \varphi_1} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \text{pertes(fer)} + \text{pertes(cuivre)}} \\ &= \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \frac{V_1^2}{R_c} + R_{eq} I_2^2} \\ &= \frac{\hat{V}_2 \hat{I}_2 \cos \varphi_2}{\hat{V}_2 \hat{I}_2 \cos \varphi_2 + \frac{V_1^2}{R_c} + R_{eq} \hat{I}_2^2} \end{aligned}$$

Pour trouver le rendement maximum, on dérive η par rapport au courant \hat{I}_2 , on trouve que :

$$\frac{d\eta}{d\hat{I}_2} = 0 \text{ lorsque } \frac{(V_1)^2}{R_c} = R_{eq} (\hat{I}_2)^2$$

Ceci veut dire que le rendement d'un transformateur est maximum lorsque les pertes **Fer** sont égales aux pertes **Cuivre**.

II .4.3 Facteur de régulation d'un transformateur

Le facteur de régulation d'un transformateur indique la variation relative de la tension au secondaire en fonction de la charge.

$$r_{eg} = \frac{V_2(\text{à vide}) - V_2(\text{charge nominale})}{V_2(\text{charge nominale})}$$

Dans certains cas, on fixe la tension au secondaire à sa valeur nominale, et alors la tension au primaire est plus élevée que la valeur nominale. Dans ce cas, le facteur de régulation est :

$$r_{eg} = \frac{V_1(\text{charge}) - V_1(\text{à vide})}{V_1(\text{à vide})}$$

II .5 Détermination des paramètres du transformateur

On peut déterminer les paramètres physiques d'un transformateur à l'aide de trois tests Expérimentaux.

II .5.1 Essai à vide

On applique la tension nominale au primaire du transformateur, On mesure :

- u_{1u} , la tension au primaire (avec un voltmètre AC)
- i_{1u} , le courant à vide (avec un ampèremètre AC)
- p_{1u} , la puissance dissipée à vide (avec un wattmètre AC)

A l'aide de ces mesures, on peut déterminer :

- La polarité du transformateur.

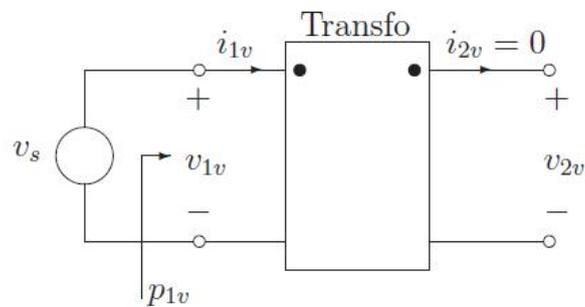


Fig II.10 Essai à vide d'un transformateur

_ Si u_{1u} et u_{2u} sont en phase, la polarité est bonne.

_ Sinon, inverser

- rapport de transformation (a).

$$a = \frac{e_1}{e_2} = \frac{e_1}{u_2} = \frac{u_{1u}}{u_{2u}}$$

- valeurs de X_m et R_c

On suppose que $X_m \gg X_l$ et $R_c \gg R_l$, donc : $P_{1v} = \frac{(u_{1v})^2}{R_c} \Leftrightarrow R_c = \frac{(u_{1v})^2}{P_{1v}}$

_ $S_{1v} = u_{1v} \cdot i_{1v}$

$$Q_{1v} = \sqrt{(S_{1v})^2 - (P_{1v})^2} = \sqrt{u_{1v} \cdot (i_{1v})^* - (P_{1v})^2}$$

$$Q_{1v} = \frac{(u_{1v})^2}{X_m} \Leftrightarrow X_m = \frac{(u_{1v})^2}{\sqrt{(u_{1v} \cdot i_{1v}) - (P_{1v})^2}}$$

II .5.2 Essai en court-circuit

On ajuste la tension v_s pour obtenir un courant i_{1cc} qui est le courant nominal au primaire.

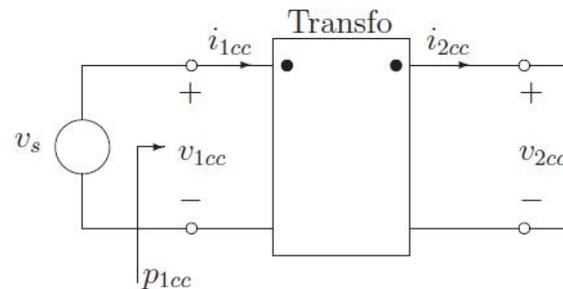


Fig II.11 Essai en court-circuit d'un transformateur

On mesure :

- u_{1cc} , la tension au primaire (avec un voltmètre AC)
- i_{1cc} , le courant à vide (avec un ampèremètre AC)
- p_{1cc} , la puissance dissipée à vide (avec un wattmètre AC)

Pour obtenir les paramètres, on suppose que \mathbf{R}_c et \mathbf{X}_m ont des effets négligeables. On obtient alors :

_ Les résistances $R_{eq} = R_1 + a^2 R_2$

$$P_{1cc} = i_{1cc}^2 R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1cc}}{i_{1cc}^2}$$

_ Les réactances équivalentes $X_{eq} = X_1 + a^2 X_2$

$$Q_{1cc} = \sqrt{(S_{1cc})^2 - (P_{1cc})^2} = \sqrt{u_{1cc} \cdot (i_{1cc})^2 - (P_{1cc})^2}$$

$$Q_{1cc} = i_{1cc}^2 X_{eq} \Rightarrow X_{eq} = \frac{\sqrt{(u_{1cc} \cdot i_{1cc})^2 - (P_{1cc})^2}}{i_{1cc}^2}$$

On suppose habituellement que $X_1 = \hat{X}$

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter les principaux types de transformateurs, leurs régimes de fonctionnement. Différentes méthodes ont été développées entre autres le schéma électrique équivalent. Ce modèle permet de reproduire certains comportements électromagnétiques du transformateur. Mais masque en réalité des phénomènes plus complexes et comme tout modèle souffre d'hypothèses simplificatrices.

Chapitre III

L'alimentation Haute Tension

III. 1. Introduction

Il y a de nombreuses années, les alimentations à haute tension à base de transformateurs qui sont destinés pour des applications spécifiques coûtaient assez cher, de sorte que, lorsque l'on réalisait un montage, il était nécessaire de rebobiner soi-même le transformateur. Ce chapitre est destiné à décrire la réalisation d'une simple alimentation haute tension 2 kV contenant un transformateur récupéré de la casse (Le développement durable passe aussi par la réparation des équipements utile). Simplement, parce qu'il y a des cas où le transformateur standard du commerce ne convient pas techniquement de part les tensions et courants délivrés mais pourrait aussi pour des raisons d'isolement spécifique. Naturellement le sur mesure existe, mais n'est pas abordable en générale.

Ce chapitre est donc juste fait pour cela, et pour permettre aussi de rappeler quelques éléments importants de cette transformation du courant alternatif sinusoïdal.

III. 2. Comment réaliser une alimentation haute tension ?

Si on devait réaliser un transformateur haute tension qui est généralement très délicat par exemple pour la fixation électrostatique du papier sur une table traçante. Encore, il est souvent préférable de partir d'une tension moins élevée et de procéder ensuite avec des multiplicateurs de tension. Il est souvent très rares de trouver des condensateurs haute tension utilisés pour la multiplication de tension. On va parler ici que des alimentations 220/2000 V en 50 Hz sinusoïdal. Les extrapolations seront pourtant possibles.

III. 3. C'est quoi un transformateur ?

D'abord, un transformateur assure la transformation d'un courant alternatif sinusoïdal en un autre courant alternatif de même fréquence mais de caractéristiques de tensions et courants différents de l'origine.

Cette transformation a lieu par le biais d'un flux magnétique alternatif créé par un enroulement dit "Primaire" et reçu par un ou plusieurs enroulements dits "secondaires". Plus la puissance ainsi transformée ne sera importante, plus le volume et le poids de l'ensemble seront importants.

On remarquera enfin que la réalisation d'un transformateur est une opération de patience, mais dont le résultat est souvent un succès, et remarquable par la fiabilité. Un transformateur tombe rarement en panne sauf mauvaise utilisation.

Pour réaliser notre transformateur, il va d'abord falloir rechercher un vieux transformateur dont la section du noyau va permettre d'échanger la puissance nécessaire. En effet hormis des fabricants et les bobiniers, le matériel spécifique à une réalisation est introuvable dans le commerce même spécialisé.

Tout commence donc par ce choix, car on va utiliser un vieux transformateur récupéré de la casse qui répondra le mieux à la puissance nécessaire.



Fig. III. 1. Transformateurs récupérés de la casse

Il est déconseillé d'utiliser un transformateur imprégné, car il serait très difficile de décoller les tôles sans les déformer d'extraire le mandrin en carton ou en plastique du support de bobinage.

Le premier critère se réalise donc par le choix de la section du fer. Cette section autour de laquelle sont enroulés les bobinages et donc la puissance effective du transformateur. Pour se faire, on peut noter les formules qui gouvernent la relation entre la surface du noyau et la puissance. Nous n'en aurons pas besoin, car les abaques permettent de les simplifier.

La démarche suppose qu'on a pu récupérer un peu de matériel avec au moins du fil émaillé de quelques diameters environ jusqu'à 30 % de récupération. Le mieux est naturellement d'utiliser du nouveau fil qui n'a pas subi de contraintes diélectriques ni d'épreuves dues à la chaleur.

On notera qu'il est recommandable d'utiliser un transformateur existant, et de débobiner seulement le primaire et le secondaire, pour en remettre d'autres.

Il faudra aussi un minimum d'isolant inter-couches, car l'utilisation de papier ordinaire reste peu fiable à cause de l'isolation (entre couches mais aussi entre primaire et secondaire) et des risques de feu.

III. 4. Description du transformateur

Comme prévu, il va falloir regarder sans rien démonter si un transfo peut faire notre affaire en termes de puissance. La surface apparente est de 62 mm (épaisseur de l'empilage de tôles) par 40 mm. Un transfo est une self, donc il faut raisonner en puissances apparentes car tension et courant ne sont pas en phase.

Le primaire est toujours un bobinage long à réaliser car il a un nombre de spires assez important. Comme on recherche la haute tension il faudra cependant rebobiner entièrement le secondaire qui sera plus long à réaliser et la place occupée par les enroulements permet de placer un secondaire.

III. 5. Réalisation de l'alimentation haute tension

Pour des raisons de rendement et de facilité d'utilisation, il est conseillé de se procurer une carcasse magnétique d'un ancien transformateur de puissance. Néanmoins, il est difficile de dimensionner un circuit magnétique suivant ses besoins. On a choisit un transfo parmi les transfos récupérés qui répond le plus à nos exigences. Ce transfo a été démontelé par morceau en tôles séparés et les bobinages endomagés sont jetés. La réalisation de l'alimentation haute tension passe par des différentes étapes. La première étape est la préparation du circuit magnétique ouvert en U qui va permettre l'emplacement des bobines primaire et secondaire et choix des tôles utilisées pour la réalisation de ce circuit, la deuxième étape est la préparation du bobinage et la troisième étape est la fermeture du circuit magnétique.

III. 5. 1. Préparation du circuit magnétique ouvert en U

Un circuit magnétique est un ensemble de matériaux magnétiques constituant le noyau, éventuellement séparés par des portions d'air (appelé entrefer) qui canalise le flux φ de l'induction \vec{B} produit par une ou des bobines parcourues par des courants et entourant ce circuit. La figure III.2. montre la préparation du circuit magnétique en forme de U qui sera une base pour l'emplacement des bobinages primaire et secondaire.



Fig. III. 2. Préparation du circuit magnétique en forme de U

III. 5. 2. Choix des tôles et des formes

Plus le circuit magnétique est "concentré", moins il y aura de pertes de flux. Ceci explique que les fenêtres réservées aux bobinages sont toujours très "justes". Ceci explique aussi que le bobinage est toujours placé au centre pour que les flux parasites puissent se reboucler dans le fer. Les tôles seront empilées une fois les bobinages réalisés.

Les tôles les plus utilisées sont les plus faciles à mettre en œuvre. Ces tôles sont également importantes par la place laissée aux bobinages. Il n'est pas exclu de se trouver devant des impossibilités d'assurer tous les bobinages dans l'espace prévu entre les différentes sections magnétiques. Habituellement, il y a des trous prévus pour le passage des tiges filetées de

serrage des tôles. Ce serrage est important car dans le cas contraire, il génère des vibrations des tôles à 50 Hz ou à 100 Hz ?



Fig. III.3. Tôle utilisée pour la construction du circuit magnétique

III. 5. 3. Bobinage

Cette partie est réellement le cœur de ce travail, car la réalisation de ces bobinages représente 98% du travail effectif. Le bobinage sera réalisé avec des fils de cuivre émaillé, et les anciens fils ne sont plus utilisés.

Nous allons examiner le bobinage. En général il n'y a plus à ce jour de prises intermédiaires au primaire pour permettre d'ajuster la tension du secteur à la bonne valeur. Tout simplement parce que Sonelgaz maîtrise mieux ses pertes en lignes et que les tolérances sont parfaitement acceptables dans la quasi-totalité des cas.

On distingue par un nom générique le bobinage primaire, comme étant celui qui est raccordé au secteur, ou plus particulièrement le bobinage qui reçoit la source de puissance à communiquer à l'utilisation qui prend le nom de bobinage secondaire. Avant de bobiner, il faut commencer par réaliser tous les calculs de place occupée par les différents bobinages en fonction du diamètre du fil, du foisonnement lors du bobinage, de l'épaisseur des feuilles d'isolant, des retraits aux extrémités proches des tôles... etc.

III. 5. 3. 1. Bobinage primaire

Le bobinage primaire va transmettre toute la puissance au secondaire moins quelques pertes que l'on précisera dans les paragraphes qui suivent.

Suivant la qualité des tôles on pourra admettre des inductions plus ou moins élevées, mais dans ce travail tout sera basé sur une induction de saturation de 13 000 Gauss soit 1.3 Tesla. Les abaques sont basés sur une induction saturation de 13 000 Gauss soit 1.3 Tesla. Pour d'autres valeurs, alors il faudra reprendre la formule de Boucherot :

$$N = \frac{V \cdot 10^8}{4.44 \cdot f \cdot B \cdot S}$$

Avec pour N le nombre de spires. (Si V=1 volt, ce sera le nombre de spires par volt)

V la tension en Volts

f la fréquence en Hertz

B l'induction en Gauss

S la section en centimètres carrés

Pour notre par on a $S = 6.2 \times 4 = 24.8 \text{ cm}^2$, $B=12000 \text{ Gauss}$, $f=50 \text{ Hz}$, on trouve le nombre de spire pour 1 volt égale à 1.4 spires/volt. Donc pour une tension de 220V, on trouve à peu près 308 spires. Pour question de sécurité parfois la tension de Sonelgaz est plus grande que 220 V, on a pris un peu plus de spires 315 spires.

Le calcul du courant sera tel que l'on reportera la puissance avec la formule $P=UI$ sachant que c'est partiellement faux, car tension et courant sont décalés d'un angle qui va varier avec la puissance. Il faut prendre un peu de sécurité. On parlera de puissance apparente qui s'exprime en VA (Volt Ampères).

III. 5. 3. 2. Choix du fil du bobinage primaire

Le nombre de spires ainsi déterminé, nous allons passer au choix du diamètre du fil. L'abaques suivante va nous permettre de déterminer la nature du fil utilisé (Fig. III. 4). Pour une tension nominale de 220 V, le courant exigé de 1.5 A, alors la puissance apparente demandée est de 330 VA. d'après le tableau à droite ci-dessous, la densité de courant pour une puissance entre 200 et 500 VA pour un service continu ou intermittent est 2.5 ou 3.5 A/mm².

D'après la courbe à gauche pour une densité de 2.5 ou 3.5 on a pour un courant de 1.5 A, le diamètre du fil choisi est de l'ordre de 0.8 mm. C'est le fil choisit pour le bobinage primaire.

Diamètre des fils en fonction du courant

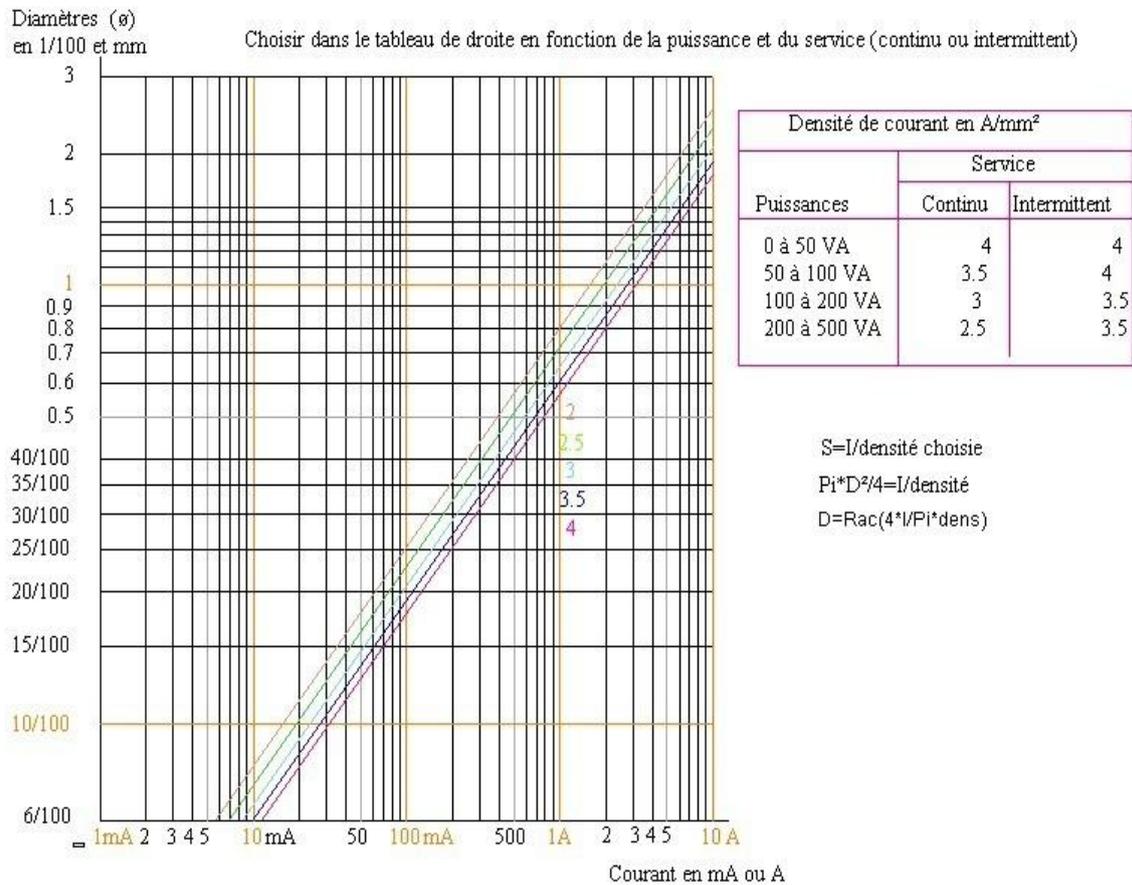


Fig. III.4. Abaque diamètre du fil en fonction du courant

Les fils sont pratiquement tous émaillés. L'émaillage est réalisé en de multiples couches, ce qui tend à augmenter non seulement l'épaisseur et donc la rigidité diélectrique, mais aussi la solidité mécanique relativement aux incontournables rayons de courbures imposés par le bobinage. Ceci limitera donc les cassures de l'émail, et l'amorçage entre spires. Dans les cas les plus habituels, la rigidité diélectrique d'un fil de cuivre émaillé standard est donnée pour une centaine de volts par μ d'épaisseur de vernis d'émaillage. On peut supposer que certains fils émaillés ont des couches multiples et qu'en conséquence la tension secteur totale si elle était présente entre deux spires (par accident de bobinage) serait acceptée et acceptable.

III. 5.3.3. Comment bobiner physiquement le bobinage primaire

C'est parti pour la première couche à spires jointives. Débutez la première couche à environ 10 mm du haut du circuit magnétique. A ce stade il faut annoncer tous les soucis de cette première couche. L'enroulement du fil est donc très délicat à réaliser en continu et à spires parfaitement jointives. Il est toujours nécessaire de guider le fil à la main, d'autant qu'il est fin et que l'angle d'attaque assez vif entre chaque face au départ ne facilite pas un enroulement facile. Il faut aussi souligner que ce guidage est aussi une manière de pousser les unes contre les autres les spires, (avec l'ongle seulement) pour avoir une surface bien homogène sans espaces entre spires (Fig. III. 5).



Fig. III.5. Bobinage primaire 315 spire avec un fil en Cuivre de 0.8 mm

III. 5. 4. Bobinage secondaire

Bobiner ensuite le secondaire suivant les mêmes règles. On a choisit le même fil. On pouvait prendre un diameter plus fin. Mais dans ce cas comment faire pour connaître le nombre de spires par Volt ? L'affaire est très simple. Ne pas oublier les relations $U_1/n_1 = U_2/n_2$ avec pour "n" le nombre de spires. Dit autrement, on peut aussi dire $U_2/U_1 = n_2/n_1$. Cela définit également le rapport de transformation. Il est également possible de mesurer la tension puis de démonter tout le secondaire en comptant les spires. Il est aussi possible de

bobiner (n'importe quel diamètre de fil) un petit enroulement qui nous donnera le nombre de spires par volt (Compter alors ce nombre comme étant celui du primaire).

La tension secondaire exigée est de 2000 V soit 2 kV, le calcul du rapport de transformation $U_2/U_1 = 2000/220$, nous donne un rapport de transformation égale à 9.09. Ce rapport multiplier par le nombre de spires primaire nous donne un nombre de spires secondaire 2863spires. On doit majorer de 10 à 15% car il y a beaucoup de foisonnement entre le calcul et la pratique. Cette majoration de 10 % ou plus nous arrivons à un nombre de spires choisit égale 3024 spires dans le secondaire. On va voire par la suite que ce choix est judicieux qui nous a donné pour $U_1 = 220 \text{ V}$ une tension secondaire $U_2 = 2000 \text{ V}$. Suite à ce calcul, nous avons eu la chance de pouvoir tout loger dans la fenêtre (Fig III. 6.)



Fig III. 6. Bobinage secondaire en Cuivre

Il y a lieu de toujours prendre en compte des marges de sécurité tres importantes, y compris sur les cotes précises de la bobine d'enroulement. On n'oublie pas non plus les surépaisseurs dues à la forme arrondie globale de l'ensemble des enroulements. Ainsi, si une fois réalisé, le bobinage passe bien sauf au milieu où il bute contre les tôles, il ne faut surtout pas serrer le milieu de la bobine, car cela écraserait les fils et serait voué à des problèmes de courts-circuits entre spires.

Le bobinage est certainement l'opération qui réclame le plus d'attention, car les "tours de mains" sont nombreux et vont qualifier le savoir faire d'un professionnel et la longévité de ce transfo, mais aussi celle du montage alimenté.

III. 5. 5. Les isolants plats

Ils sont nombreux, mais peu, peuvent avoir les caractéristiques pour une longue utilisation. On indique qu'il y a des matériaux spécifiques tels que des autocollants en PTFE (Téflon), le Kapton et divers produits de très faible épaisseur (Fig. III. 7). Les isolants vont donc servir à l'isolation entre les différentes couches de fils. En effet le bobinage devra se réaliser spire par spire et couche par couche, "dans l'ordre et la discipline"



Fig. III. 7. Quelques isolants utilisés entre les couches de spires

Pour l'isolation inter-couche, du papier isolant imprégné ou non peut être utilisé, mais de plus en plus les films plastiques sont essentiellement utilisés, tels que le Kapton dont la rigidité diélectrique est de l'ordre de 200 Volts/ μm . Ce produit résiste également à l'échauffement environ 200°C, sans réduire ses performances isolantes. On notera que les enroulements sont portés à des tensions très élevées les uns des autres et qu'il y a lieu d'y veiller également en plaçant les bonnes épaisseurs d'isolants et en prévoyant le chemin le plus long pour éviter la formation d'arcs.



Fig. III. 8. Isolant à film plastique utilisé entre le bobinage et circuit magnétique

III. 5 .6. Remontage des tôles

Le bobinage est maintenant terminé, on aura aussi remarqué la grande longueur des fils de sorties. Le mieux est de les garder ainsi car à ce stade n'est pas encore conçue. C'est maintenant l'heure de la vérité et on procède maintenant au montage des tôles. Chaque tôle "I" sera croisée avec la précédente.

Ainsi que déjà dit à propos des fuites, les tôles seront croisées et les dernier à rentrer seront insérées au milieu de l'empilement, car on aura pris soin de ne pas croiser deux ou trois "I" au centre de l'empilage des tôles. Une fois toutes les tôles placées, mettre les deux derniers "I" extérieurs immédiatement suivis des renforts qui peuvent être de simples plats en fer ou des équerres de fixation voire des capots complets.

On s'arranger pour que les circuits magnétiques se bouclent parfaitement, sans qu'il y ait de fuites de flux (ne pas oublier que c'est le flux magnétique qui "transporte" la puissance). Or ces fuites se produisent principalement au raccordement des tôles lorsqu'il y a rupture de la continuité du fer. Il sera nécessaire de parfaitement mettre en regard les "I" pour que la distance soit toujours minimale et que les entrefers soient réduits au strict minimum.



Fig. III. 9. Alimentation 2 kV réalisée

III. 5 .7. Puissance

On note que les puissances sont exprimées en Watts et non en VA, car les charges sont des résistances pures dans ce cas. (Cela serait la même chose en VA) N'ayant pas de possibilités de mesurer le cosinus phi sur le primaire, il n'est donc pas possible d'en déduire un rendement.

On va parler de puissance de point de vue pertes; pertes "Fer" et "Joule". Le véritable calcul d'un transformateur est une opération complexe qui ne peut être obtenue que par approches successives, aussi je ne le traiterai pas ici, car ce n'est pas l'objet. Les rendements des petits transformateurs vont de 85% à 90% environ. Celui des grands transformateurs atteint 98% !

III. 5 .8. Les pertes

En premier lieu, il y a des pertes dans le fer, car après tout le circuit magnétique s'il est en fer reste tout de même un conducteur. On les regroupe sous le terme pertes "Fer" constituées des pertes par "courants de Foucault" et par "hystérésis". Ces pertes augmentent également avec l'induction et elles sont évaluées à quelques Watts par kilogramme de tôle, et suivant les types de tôles (1.2 à 4 W/Kg environ).

On remarquera que les pertes "Fer" sont fixes, que le transformateur soit à vide ou en charge. Ce sont les pertes dues à la résistance des fils de cuivre. Certes le cuivre est un excellent conducteur, mais il reste le seul métal utilisé pour les fils des petits transformateurs. Ces pertes Joules vont donc s'ajouter aux pertes "Fer" du transformateur.

III. 5 .9. Mesures

On signale qu'un transformateur est fait pour travailler pour une puissance nominale de service, et qu'en dehors de cela, les valeurs ne sont qu'approchées. Les testes faits sur notre alimentation HT (Tab. III.1) ont montré que le rapport de transformation est de 9.24 pris pour une tension primaire mesurée de 100 V et une tension secondaire mesurée de 924.6 V (Fig.III.10). On n'a pas pu faire plus de mesures qui dépasse 100 V pour le primaire parceque on a pas un voltmeter qui mesure des tensions secondaire plus que 1000 V. Mais d'après le rapport de transformation, on peut prévoir la tension secondaire pour une tension primaire de 220 V égale à $220 \times 9.24 = 2032$ V. La figure III.11. montre le courant primaire en fonction de la tension primaire. La mesure du courant primaire pour une tension primaire de 220 V nous a donné un courant primaire de 1.5 A qui est bien normalisé avec les calcul déjà obtenus pour la conception du bobinage.

Tab. III. 1. Caractéristiques Tensions primaire, secondaire et courant primaire

V ₁ (V)	V ₂ (V)	I ₁ (A)
10	82.8	0.157
20	174.1	0.24
30	264.7	0.293
40	359.7	0.334
50	454.5	0.368
60	551.4	0.4
70	640.5	0.428
80	736.2	0.456
90	833.8	0.486
100	924.6	0.515

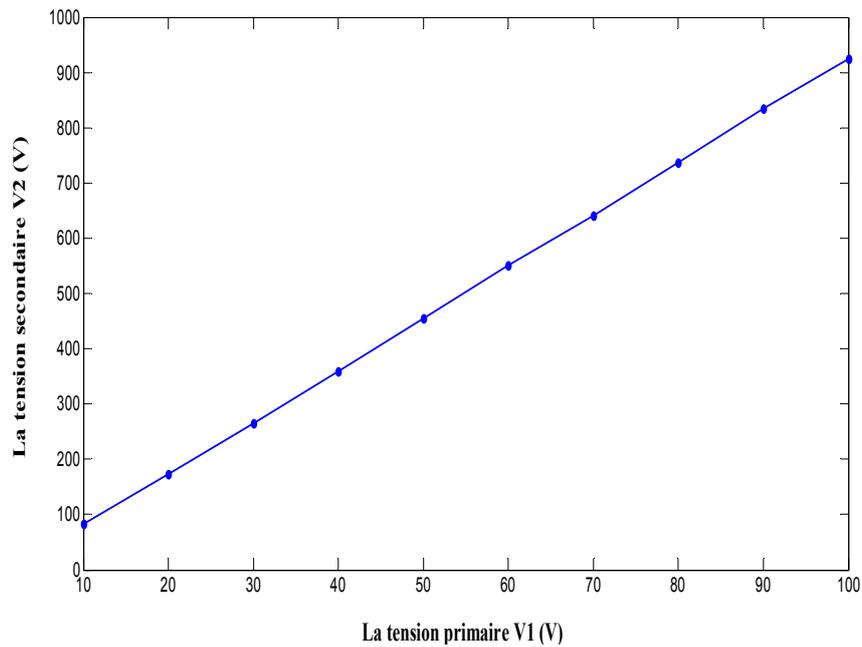


Fig.III.10 La tension secondaire V2 en fonction de la tension primaire V1

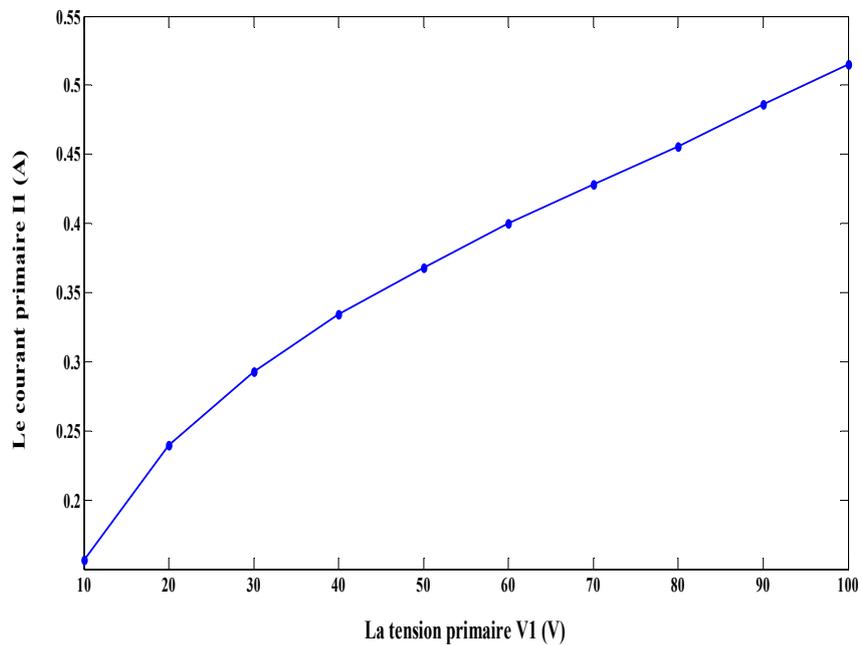


Fig.III.11 Le courant primaire I1 en fonction de la tension primaire V1

Notre alimentation a été testé pour une décharge couronne entre deux pointes de deux fils de connection. La décharge couronne est très apparente. Cette décharge est effectuée pour une tension primaire de 178.5 V (Fig III. 12).



Fig.III.12 Décharge couronne entre deux pointes

III. 6. Sécurité

On vous invite à la prudence, car le 220 V du primaire peut tuer et nous parlons pas du secondaire 2kV, car il y a de la puissance en réserve, on veille à faire les essais avec un disjoncteur différentiel. Les conseil à suivre et on rappel que ces opérations sont toujours dangereuses:

- Raccordez la terre à la carcasse métallique et branchez.
- Ne laissez pas de fils en l'air car ils pourraient se toucher et faire des "flashes"
- Prenez des dominos.

On conseille de garder en surveillance et en charge sous tension, une dizaine d'heures ce modèle. Évaluez la température et cela devrait aller avec sécurité.

Conclusions

Le résultat obtenu nous semble très satisfaisant. La réalisation d'une alimentation 220/2000 V est pour nous une très bonne réussite comparée aux alimentations existantes sur le marché. On espère que ce travail va aider de point de vue pédagogique les générations futures et surtout la spécialité réseaux électriques à utiliser cette alimentation HT pour des tests de décharges. Cette alimentation peut être exploitée à d'autres fins est surtout pour tests de rigidité des composants électroniques isolants.

Conclusion General

Il y a de nombreuses années, les alimentations à haute tension à base de transformateurs qui sont destinés pour des applications spécifiques coûtaient assez cher, de sorte que, lorsque l'on réalisait un montage, il était nécessaire de rebobiner soi-même le transformateur.

Ce travail est destiné à décrire la réalisation d'une simple alimentation haute tension 2 kV contenant un transformateur récupéré de la casse. Simplement, parce qu'il y a des cas où le transformateur standard du commerce ne convient pas techniquement de part les tensions et courants délivrés mais pourrait aussi pour des raisons d'isolement spécifique.

Ce travail permet la conception et la réalisation de cette alimentation et de rappeler quelques éléments importants de cette transformation du courant alternatif sinusoïdale.

Cette transformation permet de transmettre une puissance électrique. La tension et le courant alternatif fournis au primaire sont transformés en une ou plusieurs tensions et courants secondaires. Cette transformation se fait à travers un circuit magnétique; les primaires et les secondaires sont parfaitement isolés.

Le résultat obtenu nous semble très satisfaisant. La réalisation d'une alimentation 220/2000 V est pour nous une très bonne réussite comparée aux alimentations existantes sur le marché. On espère que ce travail va aider de point de vue pédagogique les générations futures et surtout la spécialité réseaux électriques à utiliser cette alimentation HT pour des tests de décharges. Cette alimentation peut être exploitée à d'autres fins est surtout pour tests de rigidité des composants électroniques isolants.

Nous avons maintenant la maîtrise de cette technologie et on espère réaliser une alimentation plus grande en tension 50 kV pourvue qu'il y aurait plus des moyens.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Haute tension - Michel Aguet, Michel Ianoz - Google Livres
- [2] Haute tension - Michel Aguet, Michel Ianoz - Google Livres
- [3] Haute tension - Michel Aguet, Michel Ianoz - Google Livres
- [4] http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_8.pdf
- [5] http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_8.pdf
- [6] Livre de haute tension par MAet ML1982
- [7] http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_8.pdf
- [10] 677B | Trek Inc | Alimentation/amplificateur haute tension +/-2kV | Acal BFi FR
- [11] Power Supplies: 150v to 2 kv
- [12] www.ebanque-pdf.com/fr_cours-sur-les-transformateurs-monophas.html
- [13] educyclopedia.karadimov.info/library/chaptransfo.pdf
- [14] Mr Madjid Meziani (Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateur de puissance) Mémoire de magister université Mouloud Mammri De Tizi-Ouzou, Année 2011
- [15] www.ebanque-pdf.com/fr_cours-sur-les-transformateurs-monophas.html
- [16] educyclopedia.karadimov.info/library/chaptransfo.pdf
- [Le-1999] Yvonnick Le Menach « Contribution à la modélisation numérique tridimensionnelle des systèmes électrotechniques » Thèse de Doctorat de l'Université de Lille, Année 1999.
- [Lef-2006] Anthony Lefevre « Contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs application à l'étude de réchauffement sur charges non linéaires » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes Année 2006.