

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE DE CONSTANTINE

THESE DE DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES PHYSIQUES

Spécialité :

GENIE ELECTRIQUE

(ELECTROTECHNIQUE)

présentée

BEN

2790

par Mr. Hocine BENALLA

pour obtenir le titre de DOCTEUR ES SCIENCES

Sujet de la thèse :

Etude et réalisation d'une assistance électronique à la commutation dans les machines à courant continu

Soutenue le 27 JUIN 1995

devant le jury composé de :

K. BELARBI

Président

S. LEULMI

Rapporteur

R. ABDESSAMED

Examineur

M. BELKACEMI

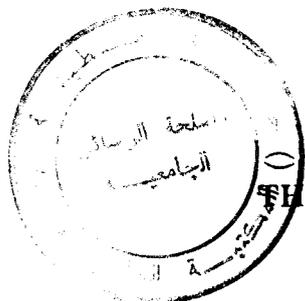
Examineur

A. HANNACHE

Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE DE CONSTANTINE



THÈSE DE DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES PHYSIQUES

Spécialité :

GENIE ELECTRIQUE

(ELECTROTECHNIQUE)

présentée

par Mr. Hocine BENALLA

pour obtenir le titre de DOCTEUR ES SCIENCES

Sujet de la thèse :

Etude et réalisation d'une assistance électronique à la commutation dans les machines à courant continu

Soutenue le 27 JUIN 1995

devant le jury composé de :

K. BELARBI

Président

S. LEULMI

Rapporteur

R. ABDESSAMED

Examineur

M. BELKACEMI

Examineur

A. HANNACHE

Examineur

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire d'Electrotechnique des universités de Paris VI et XI. Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de mener à terme le présent travail.

Je remercie tout d'abord le professeur C. RIOUX, à l'origine de la commutation assistée développée ici, de m'avoir accueilli dans le Laboratoire qu'il dirigeait, et de m'avoir proposé ce travail. Je remercie aussi monsieur A. DELMAS, son successeur, pour son soutien amical au cours de mon séjour au Laboratoire.

Je remercie messieurs Goyet, Leulmi, Poloujadoff qui m'ont soutenu dans la réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier aussi particulièrement Messieurs

- K. BELARBI (Université de Constantine)*
 - R. ABDESSAMED (Université de Batna),*
 - M. BELKACEMI (Université de Batna),*
 - A. HANNACHE (Centre Universitaire de Skikda)*
- de m'avoir fait l'honneur de participer au jury.*

Que soient aussi remerciés messieurs DUMONT, POSTEL, MENIN qui ont contribué à la réalisation des montages expérimentaux.

Enfin, je tiens tout particulièrement à remercier ma femme pour sa compréhension et sa patience qui ont été siennes tout au long de ce travail.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CH.1 : LA COMMUTATION DANS LA MACHINE A COURANT CONTINU	4
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 GENERALITES SUR LA COMMUTATION	5
I.2.1 Critères de la commutation	5
I.2.2 Causes d'étincelles	6
I.2.3 La commutation simple	7
I.3 RESISTANCE AU CONTACT ET PROPRIETE COMMUTANTE	10
I.4 F.E.M. INDUITES DANS LA SECTION EN COMMUTATION	11
I.4.1 La f.é.m. de réactance	11
I.4.2 La f.é.m. de rotation	12
I.5 MOYENS CLASSIQUES D'AIDE A LA COMMUTATION	19
I.5.1 Action sur les paramètres de la f.é.m. de réactance	19
I.5.2 Accroissement de la résistance du circuit en commutation	20
I.5.3 Création de f.é.m. opposée à la tension de réactance	20
I.5.4 Enroulement de compensation	21
I.6 CONCLUSION	23
CH.2 : MODELISATION ET ETUDE EXPERIMENTALE DES PHENOMENES DE LA COMMUTION	24
II.1 MODELISATION DE LA COMMUTATION SIMPLE	25
II.1.1 Equations de la section en commutation	25
II.1.2 Résultats de la simulation	27
II.2 CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE DE LA COMMUTATION	34
II.2.1 Présentation de la machine étudiée	34
II.2.2 Montage expérimental	36
II.2.3 Résultats expérimentaux	36
II.3 CONCLUSION	39

CH.3 ASSISTANCE ELECTRONIQUE A LA COMMUTATION : ETUDE DES SYSTEMES	4 0
III.1 INTRODUCTION	41
III.2 INVENTAIRES DES METHODES DE COMMUTATION	41
III.2.1 Travaux réalisés antérieurement	41
III.2.2 Classification générale des systèmes d'aide à la commutation	43
III.3 LE SYSTEME BALANCIER	44
III.3.1 Principe et conditions de fonctionnement	44
III.3.2 commutation de sections d'un bobinage imbriqué	45
III.3.3 commutation de sections d'un bobinage ondulé-série	46
III.4 LE SYSTEME SYMETRIQUE A COLLECTEUR SIMPLE	47
III.4.1 Principe	47
III.4.2 Séquences de fonctionnement	48
III.5 LE SYSTEME SYMETRIQUE A DEUX COLLECTEURS	49
III.5.1 Structure	49
III.5.2 Principe de fonctionnement	50
III.6 CONCLUSION	60
 CH.4 ETUDE EXPERIMENTALE : RESULTATS ET DISCUSSION	 61
IV.1 INTRODUCTION	62
IV.2 PRESENTATION DES MACHINES ETUDIEES	62
IV.2.1 Machine 1	62
IV.2.2 Machine 2	64
IV.2.3 Machine 3	66
IV.3 EXPERIMENTATION DU SYSTEME BALANCIER	67
IV.3.1 Dispositif d'aide à la commutation	67
IV.3.2 Assistance à la machine 1	71
IV.3.3 Assistance à la machine 2	75
IV.3.4 Assistance à la machine 3	79

IV.4 EXPERIMENTATION DU SYSTEME SYMETRIQUE	80
IV.4.1 Dispositif d'aide à la commutation	80
IV.4.2 Assistance à la machine 2	85
IV.4.3 Assistance à la machine 3	90
IV.5 COMPARAISON DES DEUX SYSTEMES	93
IV.6 CONCLUSION	93
V CONCLUSION GENERALE	94
V.1 HISTORIQUE DES TRAVAUX	95
V.2 CONCLUSION	96
BIBLIOGRAPHIE	97
ANNEXES	100
ANNEXE I	101
ANNEXE II	102
ANNEXE III	104
ANNEXE IV	105
ANNEXE V	108
ANNEXE VI	111

INTRODUCTION

La machine à courant continu a été la première machine électrique industrielle, et reste le moyen le plus économique dans les applications à vitesse variable et à fort couple de démarrage. Cependant les phénomènes de commutation au niveau du collecteur, malgré la présence de pôles auxiliaires, altèrent considérablement les performances de celle-ci. Ils engendrent des limitations physiques des grandeurs entrant dans son dimensionnement telle que la charge admissible par balai, tension d'isolement entre lames du collecteur...etc. Les pôles auxiliaires ont pour fonction habituelle d'assurer la commutation des sections à leur passage sur la ligne neutre. Il s'agit, rappelons le, d'inverser le courant dans la section lorsqu'elle passe devant les balais.

L'évolution de l'électronique de puissance a donnée naissance à la **commutation assistée par électronique**, dont le principe consiste à injecter par un procédé externe à la machine une tension convenable dans la section en commutation.

Les premiers travaux publiés sur l'assistance électronique à la commutation remontent aux années soixante et proviennent essentiellement d'une équipe anglaise travaillant au "Royal Military College of Science" sous la direction de M. J. Bates. Ce groupe a travaillé sur des machines à courant continu dotées de pôles de commutation.

Les travaux entrepris depuis une dizaine d'année au Laboratoire d'Électrotechnique d'Orsay sous la direction du professeur C.Rioux, à la différence de ceux du groupe anglais, sont axés sur l'assistance électronique totale à la commutation des machines dépourvues de leurs pôles de commutation. En effet la place libérée par une éventuelle suppression de ces pôles permettrait d'accroître la valeur du flux utile et améliorer ainsi la puissance massique de la machine.

Cette thèse fait partie de ces travaux dont l'objectif initial était la validation de l'assistance électronique à la commutation sur des machines industrielles. Elle comprend quatre chapitres.

- Dans le chapitre I nous présentons les problèmes, liés aux phénomènes de commutation :

* Les principaux facteurs influant sur la commutation qui sont les f.é.m. de réactance et de rotation, la réaction d'induit et le contact balai-collecteur.

* Les moyens d'aide à la commutation classiques qui sont les pôles auxiliaires et l'enroulement de compensation.

- Le chapitre II est relatif à l'étude théorique (simulation) et expérimentale de la commutation. Cette étape intermédiaire permet la caractérisation du phénomène et la mise au point de modèles simplifiés afin de déterminer la forme la plus adéquate de la tension d'aide à la commutation.

- Le principe d'assistance externe à la commutation est présenté dans le chapitre III. En début du chapitre, une revue bibliographique donne un résumé sur les travaux existants sur ce thème. Ensuite une étude générale, de l'assistance électronique à la commutation, est développée en fonction des différents types de bobinages que l'on rencontre dans les machines à courant continu.

- Le chapitre IV est consacré aux résultats expérimentaux obtenus sur trois machines assistées par deux systèmes différents. Il comprend la présentation des machines étudiées, le principe de fonctionnement des dispositifs électroniques d'assistance et enfin les résultats obtenus sur chaque machine.

CHAPITRE I

***LA COMMUTATION DANS LA MACHINE
A COURANT CONTINU***

[6] à [13]

I.1 INTRODUCTION

Les machines à courant continu sont des machines tournantes qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique (moteurs) ou inversement (génératrices) et dans lesquelles l'énergie électrique apparaît sous forme de courant et de tension à polarité constante.

Une machine à courant continu comprend :

- Un inducteur fixe (stator), à pôles saillants dont le champ magnétique est fixe et se dirige d'un pôle à l'autre.

- Un induit mobile (rotor) dont la fonction est de créer des forces électromagnétiques en moteur et des f.é.m. induites en génératrice. L'induit est bobiné d'une façon bien précise, deux types principaux de bobinages existent : le bobinage imbriqué et le bobinage ondulé.

- Un collecteur constitué par des lames conductrices reliées à des points équidistants du bobinage de l'induit, et isolées entre elles par des plaques de mica. Le collecteur est solidaire à l'arbre de la machine et tournant en même temps que l'induit entre des balais fixes.

A chaque balai aboutissent deux voies d'enroulement, la commutation se produit quand une section de l'induit (une fraction du bobinage entre deux lames consécutives) passe d'une voie d'enroulement à une autre.

I.2 GENERALITES SUR LA COMMUTATION

I.2.1 Critères de la commutation

La commutation est considérée comme bonne ou parfaite lorsque le renversement du courant dans la section n'est pas accompagné d'étincelles. Au contraire, elle est considérée comme mauvaise s'il se produit des étincelles de rupture entre le balai et les lames du collecteur.

La présence continue d'étincelles est toujours nocive,

- pour le balai dont elle augmente l'usure,
- pour le collecteur qu'elle détériore par fusion du métal.

Au fur et à mesure que la surface du collecteur n'est plus parfaite les étincelles deviennent de plus en plus agressives jusqu'à la formation d'un arc entre deux lames

successives. Enfin une mauvaise commutation systématique peut être à l'origine d'un flash autour du collecteur.

Selon la norme Westinghouse les étincelles au collecteur doivent être évaluées par l'indice de formation d'étincelles (classe de commutation) indiqué en annexe I.

A cause de tous ces problèmes la bonne commutation reste la principale difficulté, en dehors des questions d'échauffement, intervenant dans la construction des machines à courant continu.

I.2.2 Causes d'étincelles

Les étincelles sont provoquées par des causes d'origine mécaniques et électriques (électromagnétiques).

Les causes d'origine mécaniques se résument à l'exécution imparfaite de l'ensemble collecteur-balais. En effet le collecteur doit tourner rond, parmi les défauts on peut citer son excentricité sur l'arbre, la non uniformité de sa surface, le mauvais équilibrage des parties tournantes.

Dans ce qui suit nous supposons que toutes les conditions mécaniques sont satisfaites et nous nous intéressons qu'aux phénomènes d'origine électromagnétiques.

Les causes d'origine électromagnétiques sont liées principalement à l'induction, dans la section en commutation, de forces électromotrices (f.é.m.) :

a - **La f.é.m. de réactance** : f.é.m. qui apparaît pendant la variation d'un courant dans un circuit inductif, c'est le cas de la section en commutation, elle dépend de l'inductance de la section, de la valeur du courant inversé et du temps que dure l'inversion.

b - **La f.é.m de rotation**: c'est la force électromotrice qui se développe, au cours de la commutation, sous l'action des champs extérieurs.

L'apparition d'étincelles aux balais est attribuée au courant coupé en fin de commutation, par suite d'un renversement insuffisant.

I.2.3 La commutation simple

La commutation est l'ensemble des phénomènes accompagnant le changement de sens du courant dans une section de l'induit lorsqu'elle franchit l'axe magnétique défini par la position des balais (fig. I.1).

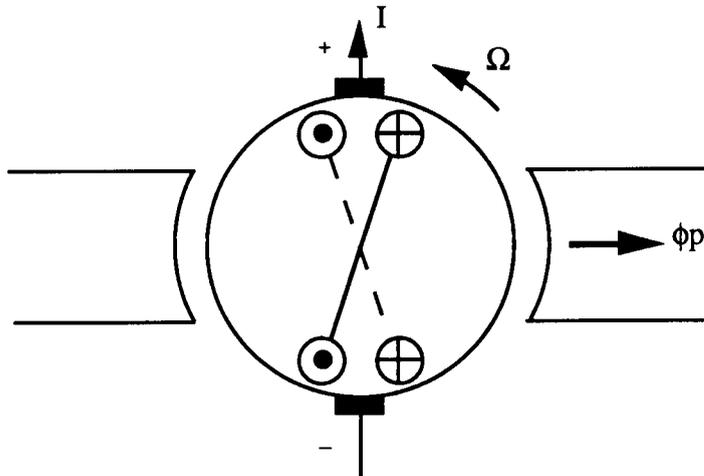


Fig. I.1 : Commutation dans une machine à courant continu (cas d'une génératrice)

Le renversement du courant ne peut s'effectuer que pendant le temps où la section est mise en court-circuit. On distingue deux types de commutation, la commutation simple celle dans laquelle le balai couvrant au maximum une lame (fig. I.2.a), et la commutation multiple où plusieurs sections sont court-circuitées à la fois (fig. I.2.b).

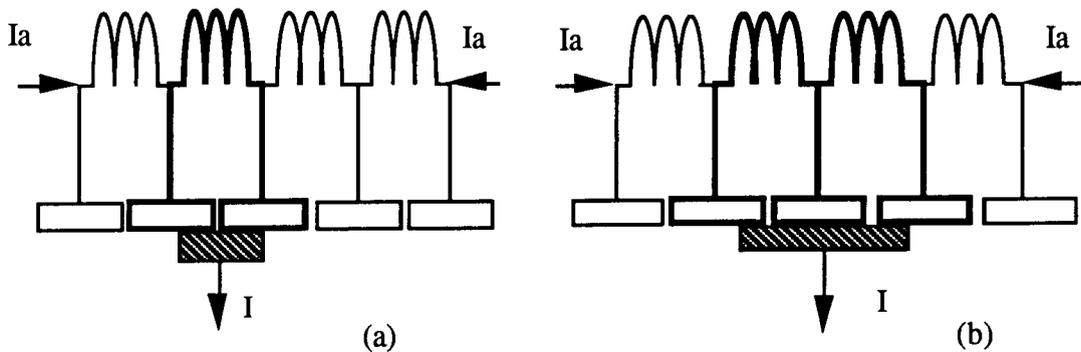


Fig. I.2 : Différents types de commutation

(a) - Commutation simple

(b) - Commutation multiple

Nous supposons, que le balai ne recouvre qu'une seule lame du collecteur, et examinons les trois étapes de la commutation de la section S2 du bobinage représenté sur la figure I.3.

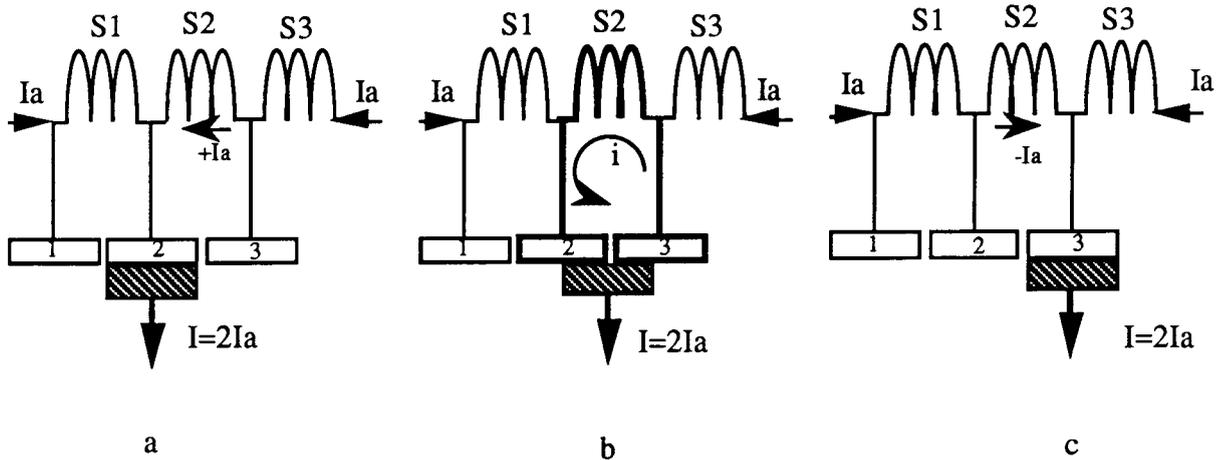


Fig. I.3 : Etapes de la commutation simple

- La première étape est représentée sur la figure I.3.a : la section S2 est parcourue par un courant I_a .

- La deuxième étape est représentée sur la figure I.3.b : la section S2 est en commutation et elle est parcourue de façon transitoire par un courant i .

- La figure I.3.c montre l'aspect à la fin de la commutation : la section S2 est désormais parcourue par un courant I_a de sens opposé au sens du courant initial. La prochaine commutation concernera la section S3.

Le mode de passage de $+I_a$ à $-I_a$ de i est une fonction qui dépend d'un grand nombre de variables :

- La chute de tension ohmique dans la section en commutation.
- La f.é.m. de réactance.
- La f.é.m. de rotation .
- La chute de tension du contact balais-collecteur.

Suivant la prépondérance de l'un de ces facteurs on définit les modes de commutation suivants : la sous-commutation, la sur-commutation, et enfin la commutation linéaire.

La figure I.4 représente la forme des courbes de variation du courant dans une section de l'induit en fonction du temps dans le cas de chaque mode :

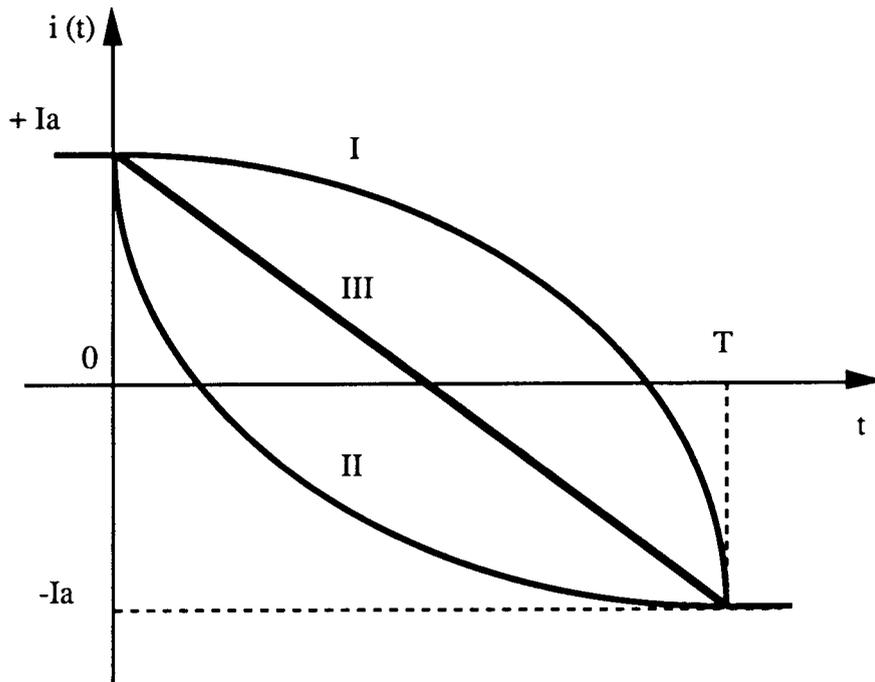


Fig. I.4 : Modes de commutation :

- I. Sous-commutation
- II. Sur-commutation
- III. Commutation linéaire

- Premier cas : la courbe I décrit les conditions de sous-commutation. L'inversion du courant est retardée par une f.é.m. globale défavorable à la commutation.

- Deuxième cas : La courbe II représente les conditions de sur-commutation. Le renversement du courant a été accéléré par une f.é.m. globale favorable à la commutation.

-Troisième cas : La courbe III est une courbe idéale qui n'est jamais réalisée en pratique et dans laquelle le courant i varie d'une façon linéaire pendant toute la durée de la commutation.

La commutation **assistée** n'est praticable de façon efficace que dans le cadre de la commutation **simple**. L'étude sera alors celle des schémas de la figure I.3, elle sera beaucoup plus facile que celle d'une commutation de machine classique dans laquelle le balai recouvre plusieurs lames (commutation multiple). Le chapitre II étudie les paramètres de la commutation simple. Les chapitres III et IV se rapportent à la commutation assistée. Ici au chapitre I nous rappelons les points de vue classique sur la commutation.

I.3 RESISTANCE AU CONTACT ET PROPRIETE COMMUTANTE

Le contact balais-collecteur a un double rôle à la fois mécanique et électrique. Mécaniquement les balais doivent toucher en permanence toutes les lames sur l'intégrité de leur surface et avec une pression uniforme. Électriquement le contact balais-collecteur présente une chute de tension, qui dépend de la nature et des caractéristiques des balais utilisés, bénéfique à la commutation.

En effet le balai doit présenter des qualités souvent contradictoires. Il faut d'une part une forte résistance électrique au contact du collecteur, celle-ci limite le courant passant entre les lames lorsqu'elles sont court-circuitées par le balai. Il faut également d'autre part une faible résistance interne pour limiter l'échauffement liée au passage du courant principal.

Les études montrent que la résistance de contact du balai et la chute de tension de contact dépendent de plusieurs facteurs dont les principaux sont :

- le matériau du balai et le matériau du collecteur,
- la densité de courant,
- le sens du courant, du balai vers le collecteur ou du collecteur vers le balai,
- la température et l'état chimique de la surface de contact,
- la pression spécifique sur le balai.

Les types de balais utilisés en France et leurs principales caractéristiques sont indiquées en annexe II.

La plus grande résistivité est celle des balais durs en bakélite-graphite; la résistivité minimale est celle des balais métallo-graphitiques.

I.4 F.E.M. INDUITES DANS LA SECTION EN COMMUTATION

Le circuit de commutation est le siège de plusieurs f.é.m. trouvant leur origine dans l'existence des différents flux traversant la section, on distingue :

a) Le flux propre lié au bobinage lui-même résulte de la self-induction propre de la section et de son inductance mutuelle avec les autres sections en commutation. Ce flux donne naissance à la f.é.m. dite de réactance.

b) Le flux externe trouvant son origine dans la machine indépendamment des phénomènes de commutation qui donne des f.é.m. parce que la section le coupe en tournant. Ce flux est à l'origine de la f.é.m. de rotation.

D'autre part il existe

- une f.é.m. de transformation due à l'ondulation des courants inducteurs, exemple cas des machines à courant continu alimentées par simple redresseur sans filtrage.

- et une f.é.m. due aux pulsations du champ, dans la zone de commutation, provoquée par les dents de l'induit. Généralement ces deux dernières f.é.m. sont négligées devant les f.é.m. de réactance et de rotation.

I.4.1 La f.é.m. de réactance

Une section est en général formée de plusieurs spires. Pendant la commutation, une f.é.m. se développe par auto-induction. Si ℓ_S est le coefficient de self-induction total de l'enroulement de la section, on peut écrire $e_S = -\ell_S di/dt$.

L'inductance ℓ_S correspond aux champs de fuites des sections en commutation. Ces fuites sont formées d'une part par le flux ϕ_D qui se ferment autour des encoches et d'autre part par le flux ϕ_T qui se ferme autour des têtes de bobines (fig. I.5).

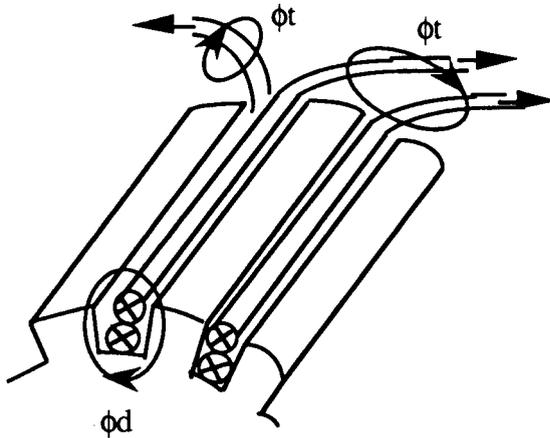


Fig.I.5 : Fuites d'encoches et des têtes de bobines

ϕ_d et ϕ_t peuvent être déterminés par le tracé du champ magnétique construit par une méthode classique (Lehman) ou par une méthode numérique (Maxwell), mais le calcul de cette tension reste toujours laborieux. Plusieurs formules empiriques de e_s sont données dans les classiques de l'électrotechnique [8]. Nous avons choisi celle donnée par Guilbert :

$$e_r = 6.7 \frac{n_c^2 N \ell I_a}{n_s} 10^{-8} \text{ V} \quad \text{formule dans laquelle}$$

n_s : le nombre de sections ou de lames au collecteur

n_c : le nombre total de conducteur de l'enroulement

ℓ : longueur active des conducteurs en cm

I_a : le courant dans une voie d'enroulement

N : la vitesse de rotation de la machine en tours par seconde

Notons que cette valeur est une valeur moyenne purement indicative et que cette tension a une forme très irrégulière.

I.4.2 La f.é.m. de rotation

Cette f.é.m. est due au fait que les côtés actifs des spires de la section coupent un champ extérieur présent dans la zone de commutation. Nous considérons dans ce qui suit que tout se passe comme si le champ créé par l'induit était fixe dans l'entrefer et s'ajoute donc au champ inducteur pour créer des f.é.m. de rotation.

Le signe et la valeur de ces f.é.m. dépendent de la position des balais. Elle peut changer de signe en fonction du sens du champ et du sens de rotation de la machine, donc favorable ou défavorable à la commutation. Pour cela un bilan du champ dans la zone de commutation est nécessaire.

I.4.2.1 Balais calés sur la ligne neutre

A vide le seul flux qui existe dans la machine est le flux principal créé par l'inducteur, en charge lorsque l'enroulement d'induit est parcouru par le courant de la machine, un flux apparaît : c'est la réaction d'induit. La combinaison de ces deux flux donne le flux résultant qui traverse la machine. La situation est représentée schématiquement sur la figure I.6, qui montre l'allure des lignes d'induction dans le cas d'une machine bipolaire fonctionnant en génératrice dont les balais sont placés sur l'axe interpolaire.

a - Champ principal

A vide, seul le bobinage de l'inducteur est alimenté par un courant, la courbe 1 montre que l'induction, constante sous chaque pôle, diminue rapidement à partir des cornes polaires et s'annule au passage sous la ligne neutre L0. La répartition du champ d'induction est symétrique par rapport à cette ligne et indépendante de la position des balais.

b - Champ de réaction d'induit

En supposant que l'induit seul soit traversé par un courant. Les courants qui y circulent sont de sens contraire de part et d'autre de la ligne neutre de ce fait l'induit apparaît comme une bobine dont l'axe serait la ligne neutre. Cette pseudo-bobine tend à créer un flux dont les lignes de forces traversent les pôles perpendiculairement à leurs axes d'où le nom de réaction d'induit transversale. L'allure du champ d'induction est donnée par la courbe 2 de la figure I.6. Elle est nulle en A, croît jusqu'à C1 puis décroît jusqu'à B (ligne neutre), par suite du plus grand trajet dans l'air des lignes de forces (augmentation de la réluctance dans l'espace).

c - Champ résultant

En charge normale les enroulements d'induits et d'inducteur sont traversés par des courants : le flux en charge s'obtient par superposition des flux propres à chaque partie en supposant que la machine est non saturée.

La courbe 3 donne la répartition de l'induction globale. L'examen de cette courbe montre que la réaction d'induit fait subir au champ résultant une distorsion et provoque le déplacement de la ligne neutre magnétique.

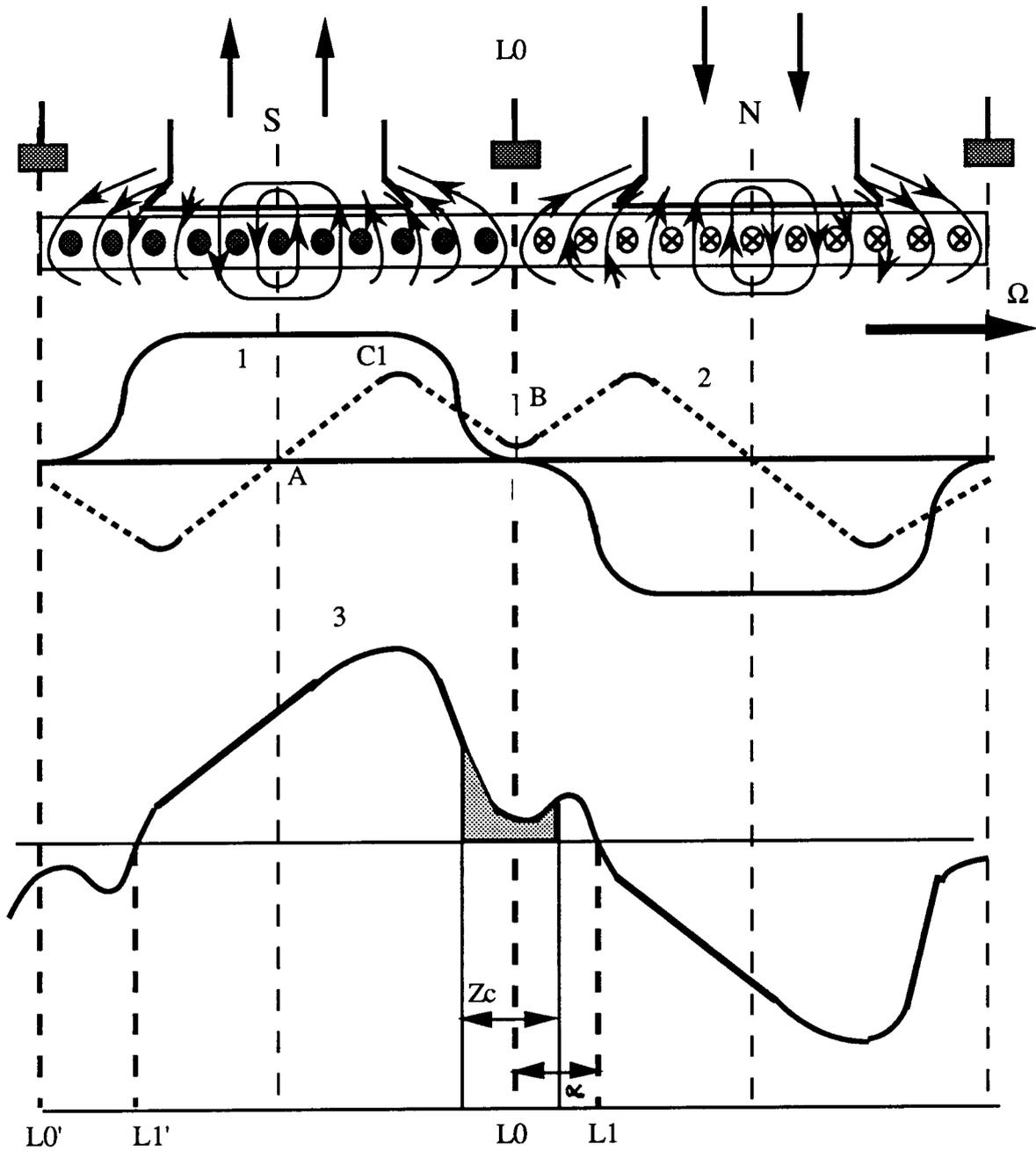


Fig. I.6 : Courbes des inductions pour des balais calés sur la ligne neutre théorique $L0$.

- 1 - champ principal
- 2 - réaction d'induit
- 3 - champ résultant .

En conclusion, en charge et en fonctionnement génératrice la réaction d'induit se traduit par un déplacement de la ligne neutre d'un angle α dans le sens de la vitesse de rotation et par une diminution du champ sous les cornes polaires d'entrée et une augmentation sous les cornes polaires de sortie.

d - Effets de la réaction d'induit

α – Diminution du champ utile :

Dans le cas d'une machine **non saturée** l'augmentation de l'induction résultante sous les cornes polaires de sortie compense exactement la diminution sous les cornes polaires d'entrée. Dans ce cas le flux d'induction le long de l'entrefer reste le même qu'à vide, il en est de même du flux utile et de la f.é.m.. Par contre si la machine est **saturée** notamment sous les cornes polaires de sortie, l'augmentation de l'induction se trouve réduite, tandis que sa diminution sous les cornes d'entrée reste importante; on en déduit que le flux utile est diminué donc la f.é.m. en charge serait plus faible qu'à vide

Si on laisse les balais dans l'axe interpolaire la tension aux bornes de la machine sera diminuée. Entre deux balais on ne collecte plus toutes les f.é.m. induites dans les conducteurs présentant le même signe, celles induites par exemple entre L0 et L1 ne sont plus collectées. Au contraire on met en série avec les conducteurs sièges de f.é.m. positives des conducteurs sièges de f.é.m. négatives (celles comprises entre L0' et L1').

β - Déplacement de la ligne neutre :

En fonctionnement génératrice la réaction d'induit se traduirait par :

- Un déplacement de la ligne neutre dans le sens de la vitesse de rotation de l'induit.

- Une augmentation du champ sous les cornes polaires de sortie et une diminution sous les cornes polaires d'entrée.

γ - Effet défavorable à la commutation :

Dans cette position des balais, le signe de l'induction (voir surface hachurée) n'est pas favorable à la commutation. En la valeur moyenne de la f.é.m. de rotation induite s'ajoute à la f.é.m. de réactance e_s pour s'opposer à l'inversion du courant de commutation.

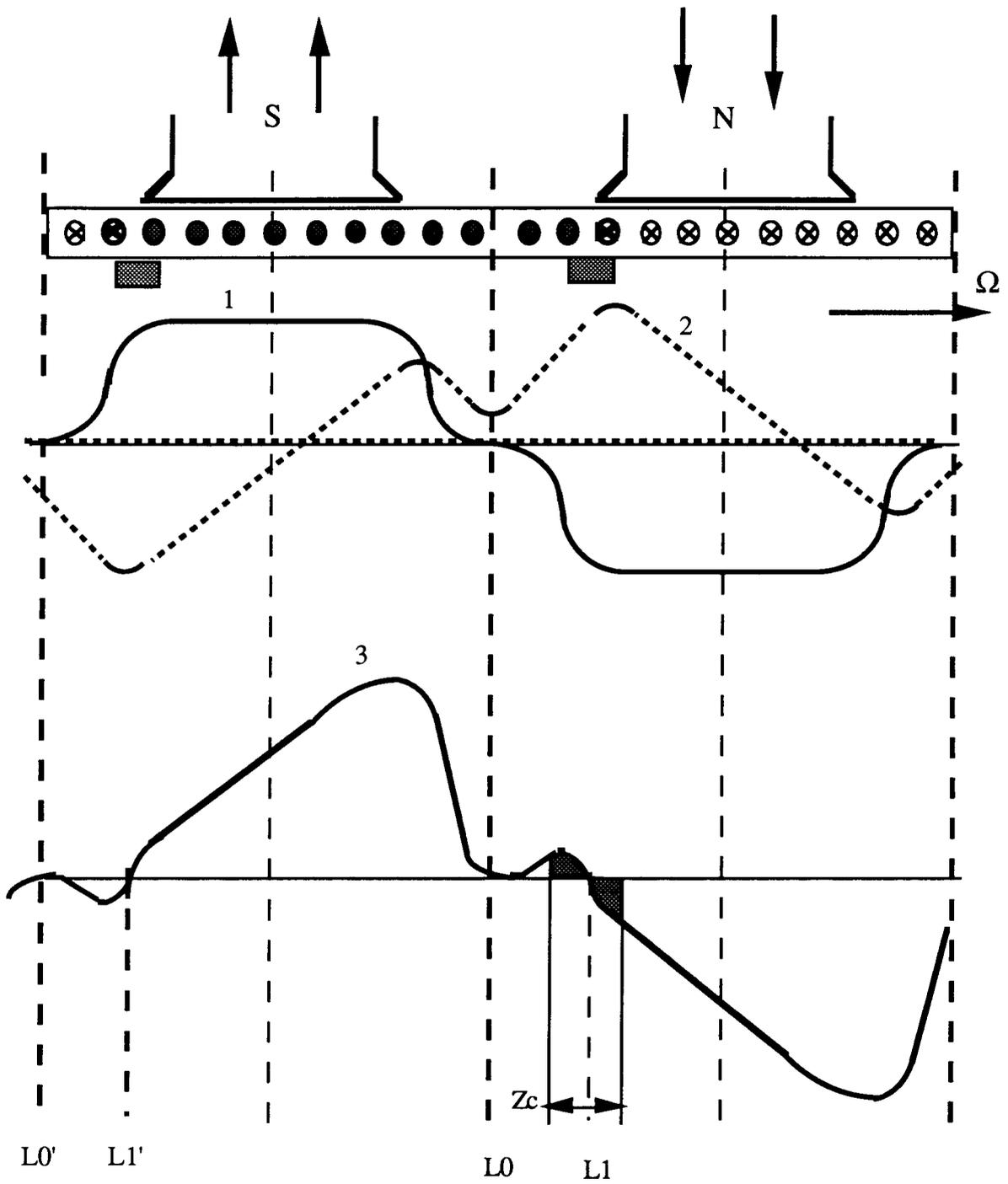


Fig. I.7 : Réaction d'induit démagnétisante

1 - champ d'inducteur

2 - réaction d'induit

3 - champ résultant

I.4.2.2 Balais décalés de la ligne neutre

Suivant le type de fonctionnement (moteur ou génératrice) et suivant le sens de rotation de l'induit, le décalage des balais dans un sens ou dans l'autre fait apparaître une réaction d'induit longitudinale magnétisante ou démagnétisante.

a -Réaction d'induit démagnétisante :

les courbes de la figure I.7 montrent la réaction d'induit démagnétisante qui correspond à un décalage des balais dans le même sens que celui de la rotation de l'induit pour un fonctionnement en génératrice. En fonctionnement moteur les balais seraient décalés en sens inverse de celui de la rotation de l'induit.

L'examen de ces courbes montre que le flux se trouvant dans la zone de commutation Z_c est nul : c'est la ligne neutre magnétique. Avec un décalage supérieur à celui de la figure I.7, il peut être même favorable à la commutation, la f.é.m. de rotation a un signe opposé à celui de la f.é.m. de réactance. Seulement ce genre d'artifice, s'il améliore la commutation, n'est valable que pour un seul sens de rotation et pour un point de fonctionnement donné.

b-Réaction d'induit magnétisante :

Les courbes de la figure I.8 montrent l'effet de la réaction d'induit magnétisante qui correspond à un décalage des balais en sens inverse de celui de la rotation de l'induit pour un fonctionnement en génératrice. En fonctionnement moteur, les balais seraient décalés dans le même sens que celui de la rotation de l'induit.

On remarque rapidement que ce genre de fonctionnement dans une machine classique n'est pas autorisé pour des raisons évidentes de commutation et de tension entre lames voisines. Dans la zone de commutation Z_c , le champ est maximum, les sections court-circuitées dans cette zone sont le siège d'une f.é.m. de rotation importante fortement défavorable à la commutation.

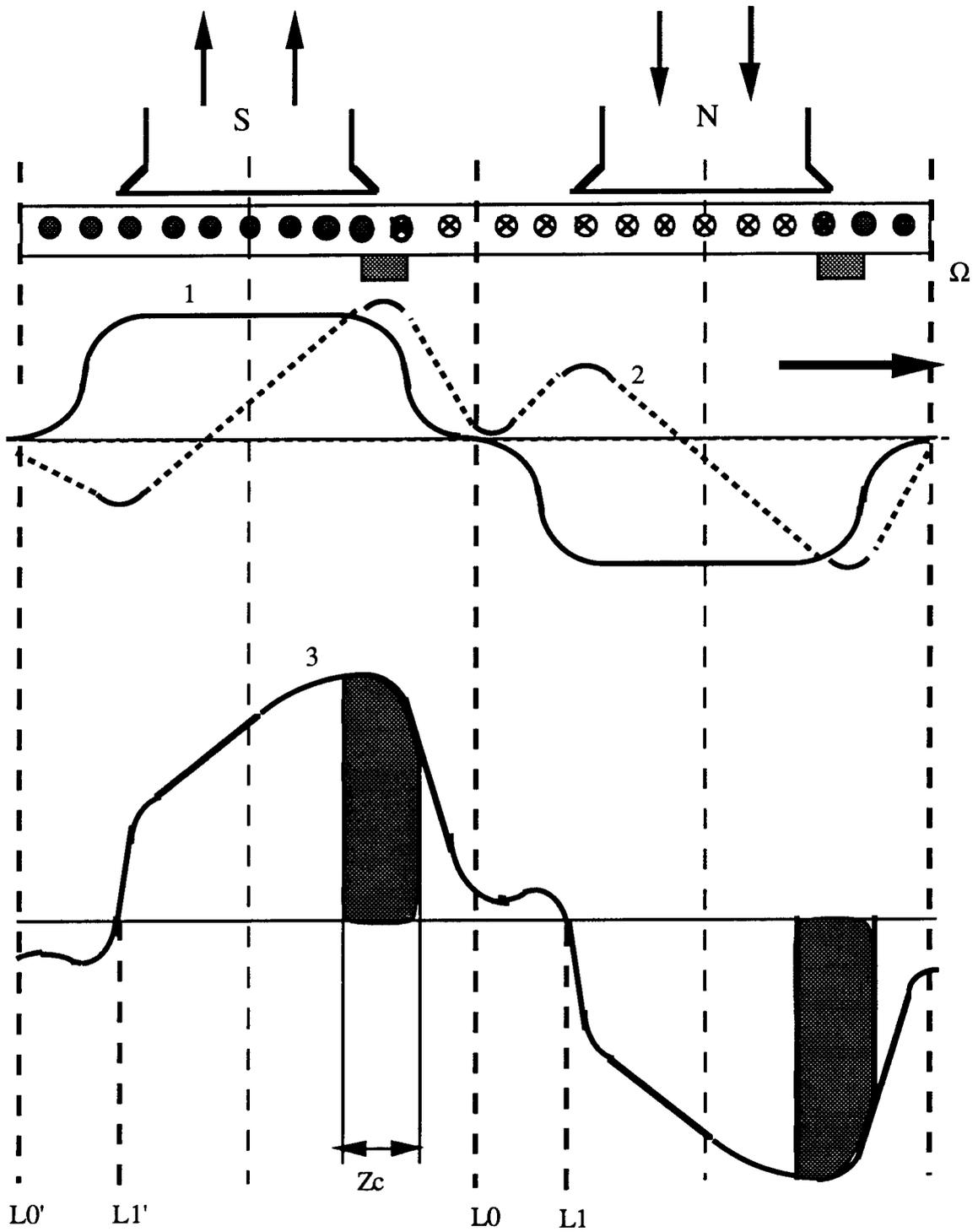


Fig. I.8 : Réaction d'induit magnétisante

1 - champ d'inducteur

2 - champ d'induit

3 - champ résultant

I.5. MOYENS CLASSIQUES D'AIDE A LA COMMUTATION

I.5.1 Action sur les paramètres de la f.é.m de réactance

La variation du courant dans la section en commutation de $I/2$ à $-I/2$ pendant la commutation T donne une tension de réactance de valeur moyenne égale à $e_s = \ell_s I/T$ ou ℓ_s représente l'inductance de la section et T la durée de commutation. Pour minimiser e_s pour un courant I donné il faut agir sur ℓ_s et T .

I.5.1.1 Action sur le coefficient de self induction ℓ_s

ℓ_s est proportionnel au carré du nombre de spires par section et dépend de la forme d'encoche. Pour ces raisons on cherche généralement à faire des bobinages avec des sections comprenant le moins de spires possibles; l'utilisation d'encoches à hauteur réduite et à grande largeur donne des perméances plus faibles.

I.5.1.2 Action sur la durée de commutation T

En augmentant la durée de commutation T , on diminue la tension de réactance. Pour cela, il faut augmenter la largeur des balais et des lames et faciliter l'inversion du courant. On ne peut cependant aller loin dans la voie de l'augmentation du diamètre du collecteur, car on risquerait de déformer celui-ci par effet de la force centrifuge. Notons que l'augmentation de T par diminution de la vitesse n'est pas rationnelle car elle accroît les dimensions et le coût de la machine.

I.5.2 Accroissement de la résistance du circuit en commutation

Le circuit en commutation comporte la résistance de la section, la résistance des balais et les résistances de contact balai-lames. Si la résistance interne de la section est généralement négligeable, les résistances dépendantes de la caractéristique du balai jouent un rôle important dans la qualité de la commutation. En effet la diminution de la constante de temps ℓ_s/R facilite l'inversion du courant de commutation.

On est évidemment limité dans la voie de l'augmentation de la résistance des balais par deux conséquences nuisibles : d'une part un balai résistant augmente la puissance dissipée et s'échauffe davantage; d'autre part il devient dur et les risques de vibrations sont plus importants.

I.5.3 Création de f.é.m. opposée à la f.é.m. de réactance

Le principe consiste à créer une f.é.m. de rotation par coupure par les conducteurs de la section, d'un champ d'induction placé dans la zone de commutation. Il existe deux possibilités : utiliser une partie du champ principal ou créer un champ par des pôles auxiliaires.

I.5.3.1 Création de f.é.m. par décalage des balais de la ligne neutre

La f.é.m. est créée en amenant les sections commutées dans une région de l'entrefer où l'induction du champ de l'inducteur n'est pas négligeable. Le décalage des balais est en avant de la ligne neutre dans le sens de rotation pour une génératrice et en arrière pour un moteur, mais ce décalage des balais a deux inconvénients :

a - La f.é.m induite est fonction du décalage, alors la tension de réactance est proportionnelle à l'intensité à commuter : cette méthode n'est donc correcte que pour un point de fonctionnement; de plus il n'est valable que pour un seul sens de rotation.

b - Comme nous l'avons déjà dit (§ I.3.2) ce décalage fait apparaître une réaction longitudinale responsable de la diminution de la tension totale aux bornes de la machine.

I.5.3.2 Création de f.é.m. par pôles de commutation :

La meilleure méthode pour améliorer la commutation consiste à créer dans la zone neutre un flux proportionnel à l'intensité du courant à commuter, de manière à faire induire dans la section une f.é.m. égale et opposée à la tension de réactance. Pour ce faire, on place entre les pôles principaux, des pôles auxiliaires suivant les axes interpolaires (fig. I.9). Les enroulements sont placés en série avec l'induit, on obtient ainsi une f.é.m. proportionnelle à l'intensité à commuter. Les balais sont calés également sur les lignes neutres et restent dans cette position quelle que soit la charge.

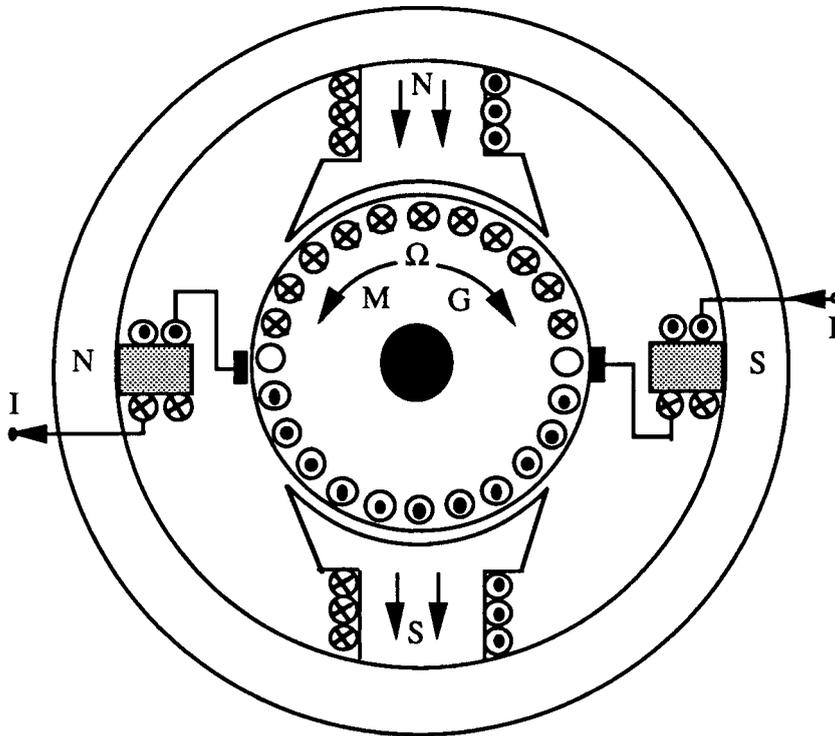


Fig. I.9 : Machine à courant continu avec pôles auxiliaires fonctionnant en génératrice G ou en moteur M.

Le principe d'action des pôles auxiliaires est détaillé sur la figure I.10. On remarque que dans la zone de commutation les inductions créées par les pôles auxiliaires et de l'induit sont de sens opposé.

On remarque que les pôles de commutation ont pour rôle non seulement de s'opposer au flux de fuite des dents, responsables de la tension de réactance, mais également de compenser l'effet de la réaction d'induit dans la zone de commutation.

I.5.4 Enroulements de compensation

L'enroulement de compensation est un des moyens les plus efficaces contribuant à améliorer la commutation des machines fonctionnant à charge très variable. Leur rôle consiste à éliminer autant que possible la distorsion du champ magnétique principal provoqué par la réaction d'induit. La réaction d'induit est en général un phénomène nuisible pour une machine à courant continu puisqu'il en résulte aussi une diminution de la f.é.m. (fonctionnement en génératrice) ou de la vitesse (fonctionnement en moteur).

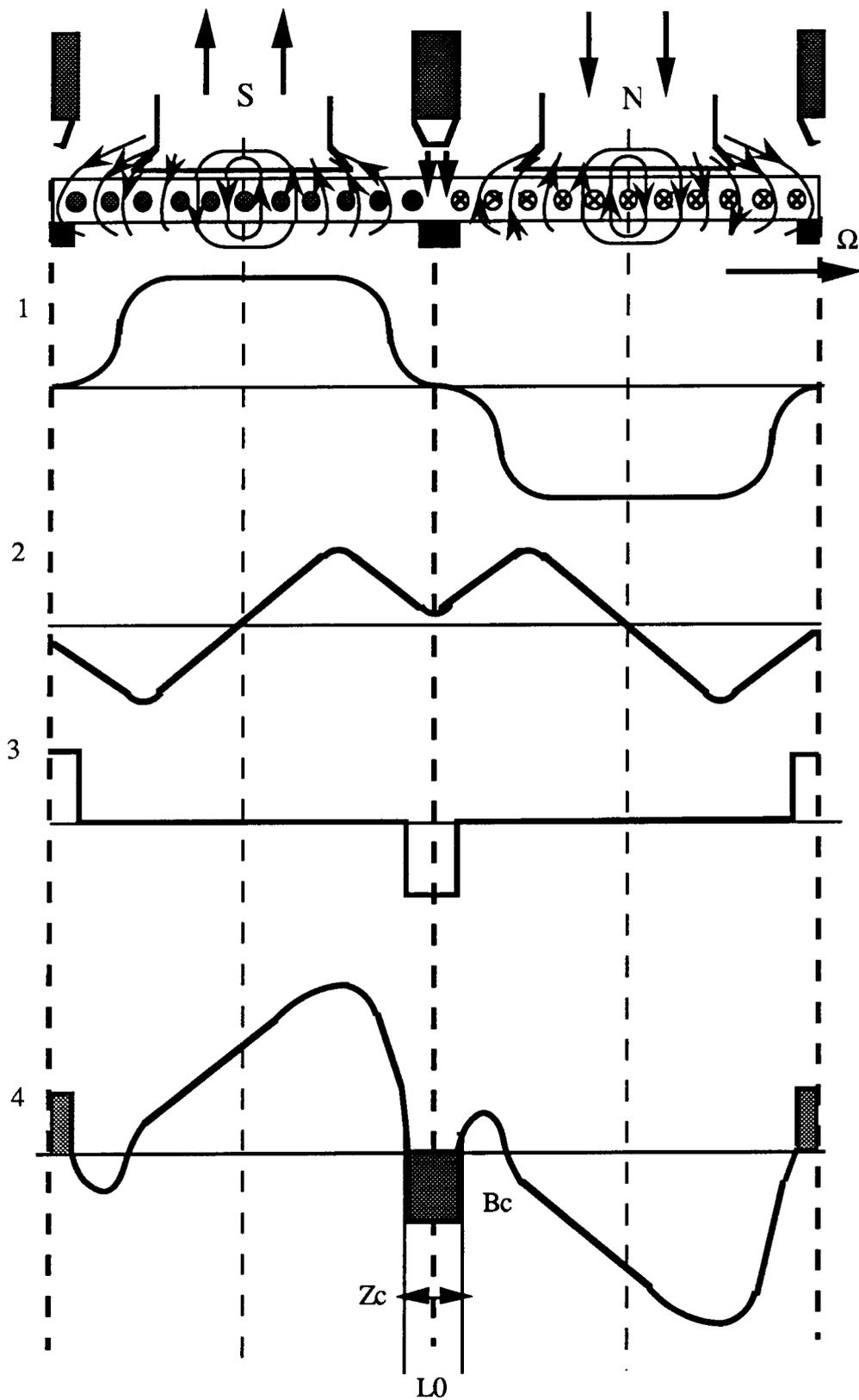


Fig. I.10 : Machine avec pôles auxiliaires

1-champ d'inducteur 2-champ d'induit 3-champ des pôles auxiliaires 4-champ résultant

L'enroulement est constitué de conducteurs, disposés dans les encoches à la périphérie des pièces polaires (figure I.11), et parcouru par le courant I débité par la machine. Le nombre de conducteurs et le sens du courant sont tels que les Ampères tours (A.t.) de compensation s'oppose exactement aux A.t. de l'induit. Cet enroulement agit selon l'axe interpolaire et compense la réaction d'induit.

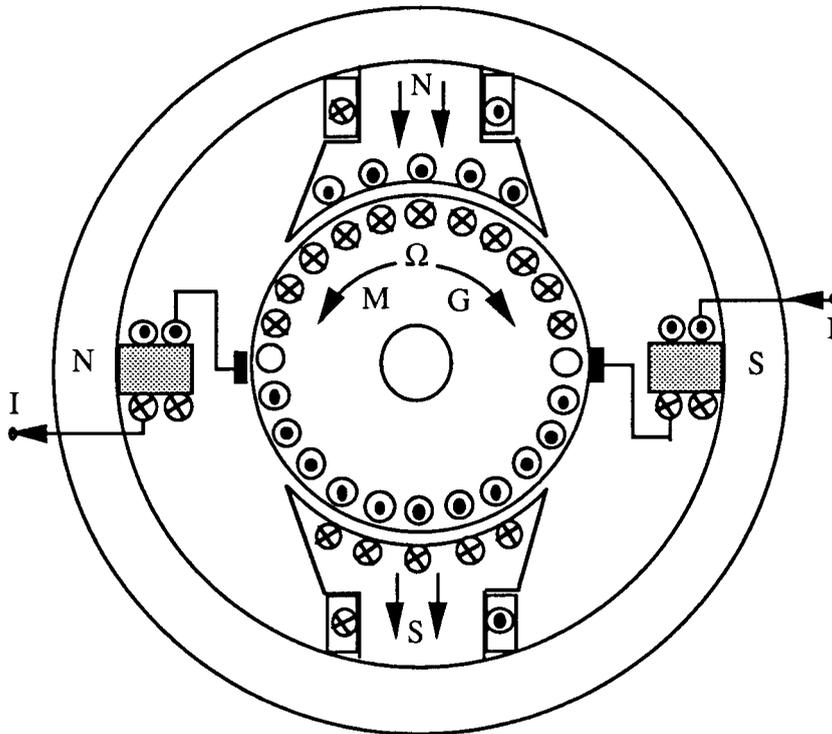


Fig.I.11 : Enroulement de compensation.

I.6 CONCLUSION

Nous venons de voir que la commutation représente un phénomène très complexe qui dépend d'un grand nombre de paramètres mécaniques et électriques. Les conditions mécaniques se résument à un contact parfait balai-collecteur quelle que soit la vitesse de rotation. Les principales causes d'origine électrique sont les f.é.m. de réactance et la réaction d'induit. Parmi les moyens d'aide à la commutation, que nous avons présenté, les pôles de commutation restent de loin la meilleure solution, toutefois ils sont en général encombrants et augmentent sensiblement le poids de la machine. C'est pour cette raison que l'étude de l'assistance électronique de la commutation est envisagée. Pour aborder cette nouvelle étude, dans le chapitre II, nous allons essayer d'approfondir l'étude de la commutation par la simulation et l'expérimentation du phénomène en faisant varier les paramètres présentés dans ce premier chapitre.

CHAPITRE II

***MODELISATION ET ETUDE EXPERIMENTALE
DES PHENOMENES DE LA COMMUTATION***

II.1 MODELISATION DE LA COMMUTATION SIMPLE

La modélisation consiste à déterminer la variation du courant de commutation à partir des équations différentielles du schéma électrique équivalent de la section en commutation.

Pour cela nous avons utilisé un logiciel de simulation de systèmes dynamiques fonctionnant sur PC, il s'agit de Simulink de Scientific Software.

II.1.1 Equations de la section en commutation

On peut représenter une section en commutation simple, par le schéma équivalent donné par la figure II.1 avec les hypothèses suivantes :

- Les courants dans les deux voies d'enroulement, connectées à la section en commutation, sont supposés égaux.
- On suppose que les contacts balais-collecteur sont purement résistifs, leur caractéristique courant-tension linéaire, et la valeur de la résistance équivalente inversement proportionnelle à la surface de contact.

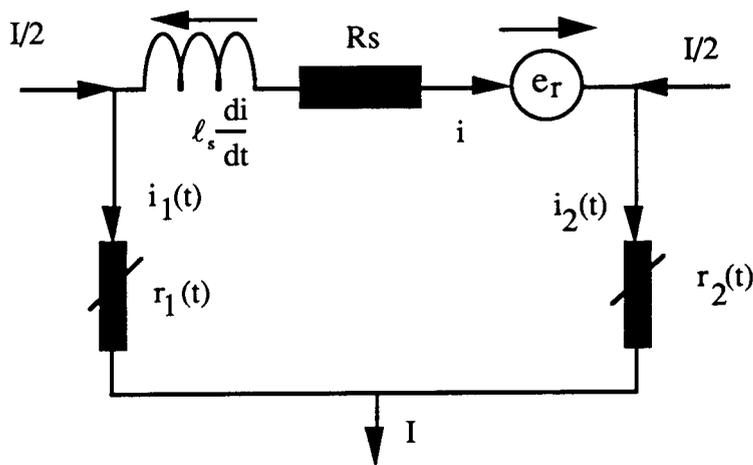


Fig. II.1 : Schéma électrique équivalent d'une section en commutation simple.

Dans le schéma de la figure II.1, la section est caractérisée par :

- R_s sa résistance interne
- ℓ_s son inductance
- e_s f.é.m. de réactance
- e_r f.é.m. de rotation

Soit R_b la résistance totale du contact balai-lame et T la durée de commutation, les résistances $r_1(t)$ et $r_2(t)$ peuvent s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned} r_1(t) &= R_b \frac{T}{t} \\ r_2(t) &= R_b \frac{T}{T-t} \end{aligned} \quad (\text{II.1})$$

d'autre part

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \frac{I}{2} - i \\ i_2(t) &= \frac{I}{2} + i \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

L'équation correspond au schéma électrique équivalent de la figure II.1 est la suivante:

$$e_s = -\ell_s \frac{di}{dt} = R_s i + \frac{R_b T^2}{t(T-t)} i + \frac{R_b (2tT - T^2)}{t(T-t)} \frac{I}{2} - e_r \quad (\text{II.3})$$

Nous proposons d'étudier l'influence des différents facteurs sur les conditions de commutation. Comme nous l'avons déjà signalé nous nous intéressons uniquement au cas de la commutation simple. Les facteurs à prendre en considération sont :

- R_b et R_s respectivement résistance de contact et résistance interne de la section en commutation.

- e_s : la tension de réactance instantanée, c'est une f.é.m. de self-induction due à la vitesse de variation du courant.

- e_r : la f.é.m. de rotation dans la section due à un mouvement dans le champ de commutation.

Ces paramètres sont tous indépendants et un calcul du courant de la section en commutation passe par la résolution de l'équation différentielle du schéma équivalent du circuit.

Le schéma-bloc de l'équation précédente est présenté suivant le modèle donné en annexe III.

II.1.2 Résultats de la simulation

Les résultats obtenus repose sur les hypothèses suivantes:

- Courant dans une voie d'enroulement $I_a = I/2 = 50$ A, ce qui correspond à un courant collecté sur chaque ligne de balai de $2I_a = I = 100$ A.
- Temps de commutation $T = 1.6$ ms correspond à un collecteur de 15 lames (induit à 15 sections) tournant à 2500 tr/min.

II.1.2.1 Commutation par résistance

Dans ce type la commutation on suppose que la somme des tensions de réactance et de rotation est nulle et l'évolution du courant dans la section, dépend uniquement des valeurs relatives des résistances présentes dans le circuit. Le schéma de la figure II.1 se simplifie comme suit:

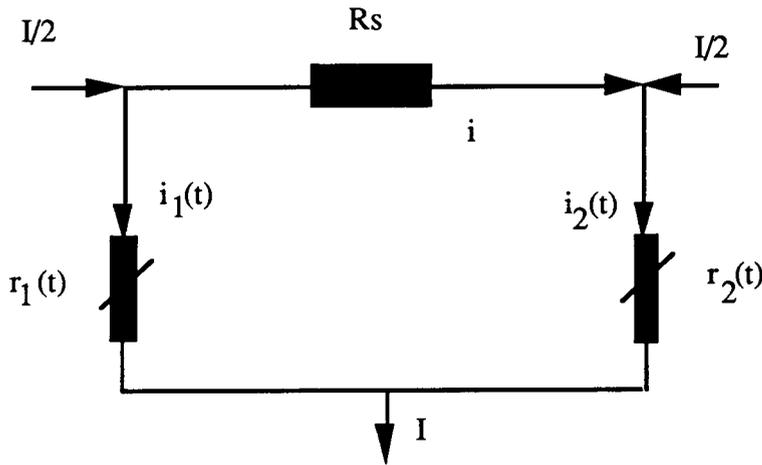


Fig. II.2 : Commutation par résistance.

L'équation du courant dans ce cas est la suivante :

$$i(t) = \frac{(1 - 2 \frac{t}{T})}{1 + \xi \frac{t}{T^2} (T - t)} \frac{I}{2} \quad (\text{II.4}) \quad \text{avec} \quad \xi = \frac{R_s}{R_b}$$

Sur la figure II.3 sont représentées les courbes de variation du courant obtenues à partir de cette équation pour $\xi = 0, 1, 4, 10$.

Si les résistances de connexions et la résistance interne de la section sont négligeables devant la résistance de contact balai-collecteur ($\xi = 0$), la commutation est linéaire définie par : $i_t = i(t)_{\xi=0} = (1 - 2 \frac{t}{T}) \frac{I}{2}$. (II.5)

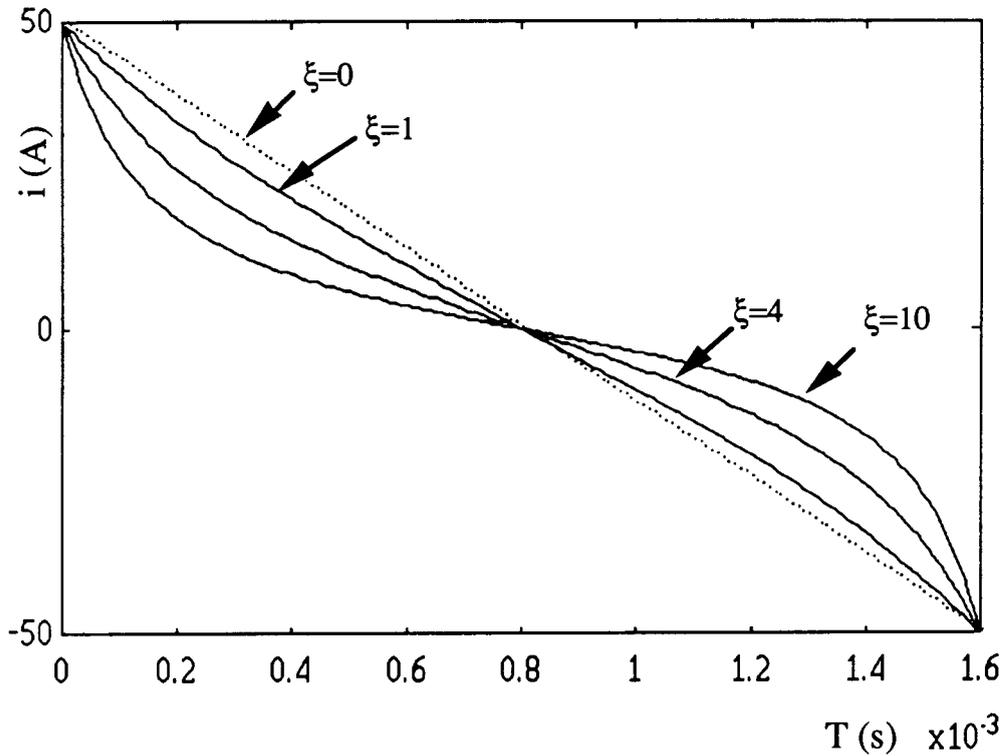


Fig. II.3 : Commutation par résistance.

La figure II.4 représente la variation des densités de courants, sous les bords d'entrée (fig. II.5a) et de sortie (fig. II.5b) des balais lors de la commutation par résistance, obtenus pour une surface du balai S_b (en fait ligne de balais) égale à 2 cm^2 . Dans ce cas les surfaces de contact sont :

$$S_1(t) = S_b \frac{t}{T} \quad \text{et} \quad S_2(t) = S_b \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (\text{II.6})$$

d'où les densités de courants:

$$j_1(t) = \frac{i_1}{S_1(t)} = \frac{I_a - i}{S_b \frac{t}{T}} \quad \text{et} \quad j_2(t) = \frac{i_2}{S_2(t)} = \frac{I_a + i}{S_b \left(1 - \frac{t}{T}\right)} \quad (\text{II.7})$$

On remarque que la caractéristique de la commutation linéaire (cas de $\xi = 0$) correspond à une densité de courant constante sous les balais, c'est un mode de fonctionnement idéal rarement réalisé mais dont on recherche généralement à se rapprocher le plus possible; dans ce mode le courant dans une lame est proportionnel à la surface de contact, s'annule dans la lame avant ou au moment où elle va la quitter.

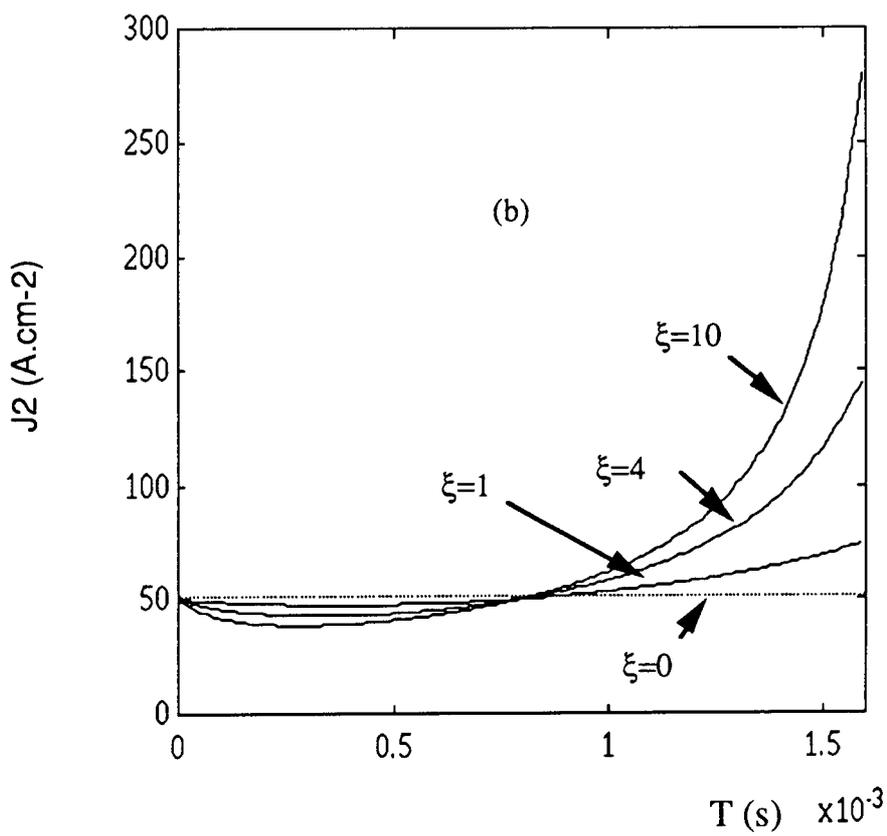
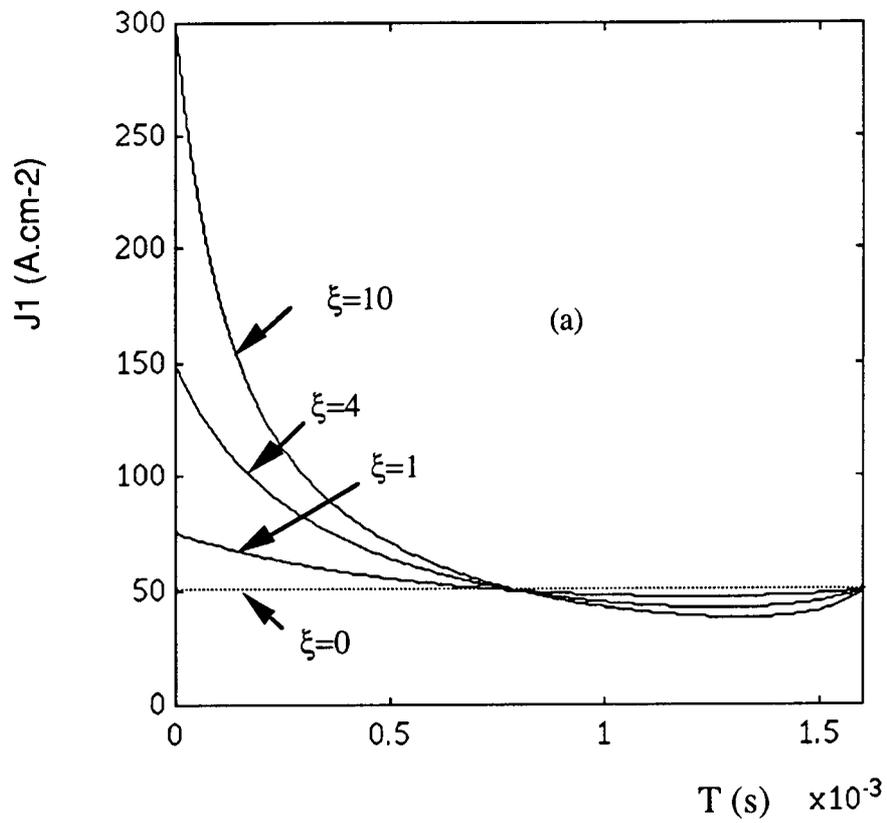


Fig. II.4 : courbes de densités de courants pour différentes valeurs de ξ .

II.1.2.2 Influence de l'inductance de la section

Pour regarder l'effet de la f.é.m. de réactance nous supposons que la f.é.m. de rotation est nulle l'équation (II.3) de la section en commutation devient alors:

$$-\ell_s \frac{di}{dt} = R_s i + \frac{R_b T^2}{t(T-t)} i + \frac{R_b (2tT - T^2) I}{t(T-t) 2} \quad (\text{II.8})$$

Pour les paramètres R_b et R_s fixés respectivement à 0.05 et 0.002 Ω , l'influence de l'inductance totale de la section est mise en évidence par les courbes tracées pour les différentes valeurs de ℓ_s (fig. II.5). Evidemment le retard des courants de commutation augmente avec la valeur de l'inductance.

On remarque que le courant i s'annule toujours au point M et que la commutation serait donc parfaite, toutefois il faut remarquer encore que la tangente en ce point peut être finie ($R_b T > \ell_s$) ou infinie ($R_b T < \ell_s$). Une mauvaise commutation est attribuée dans ce cas à un excès de la densité de courant représentée par la tangente en M de la courbe.

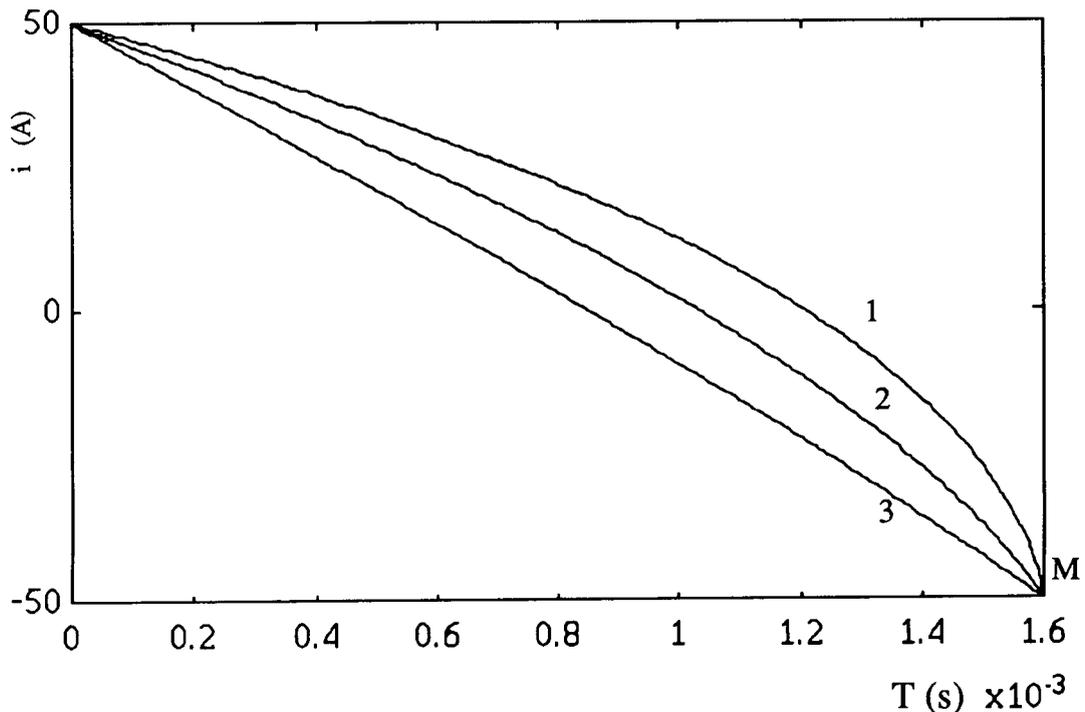


Fig. II.5 : Influence de l'inductance sur la forme du courant de commutation.

- 1 - $\ell_s = 100 \mu\text{H}$
- 2 - $\ell_s = 50 \mu\text{H}$
- 3 - $\ell_s = 10 \mu\text{H}$.

II.1.2.3 Introduction d'une f.é.m. de commutation

Nous avons gardé les mêmes hypothèses que précédemment pour pouvoir évaluer la tension à créer permettant l'annulation de la tension de réactance due à l'effet de l'inductance d'une valeur de $100 \mu\text{H}$. Pour cela nous avons essayé trois tensions de formes différentes.

a - Tension sinusoïdale : $e_r = V_m \sin 2\pi ft$, f fréquence de commutation.

La figure II.6a montre la compensation apportée par une tension sinusoïdale (figure II.b) pour trois valeurs différentes de l'amplitude V_m . On remarque qu'en fin de commutation, donc au moment de l'annulation du courant, cette forme de tension s'avère inefficace et qu'un retard pour son application est nécessaire.

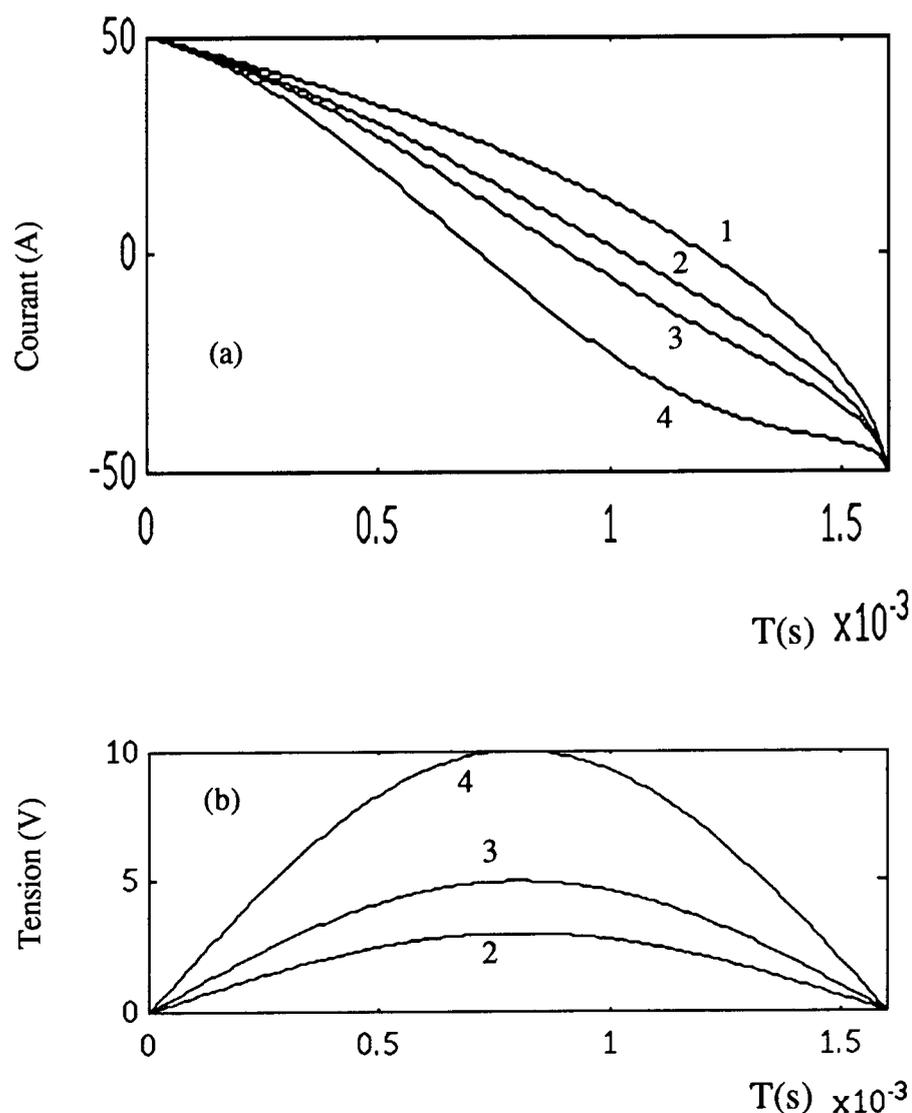


Fig. II.6: Application de tension, d'aide à la commutation, de forme sinusoïdale (b).

1 - $V_m = 0 \text{ V}$ 2 - $V_m = 3 \text{ V}$ 3 - $V_m = 5 \text{ V}$ 4 - $V_m = 10 \text{ V}$.

b - Tension constante

La figure II.7 montre les courants de commutation obtenus après application d'une tension de compensation de valeur constante (échelon de tension) sur la période de commutation. On remarque que pour cette forme, contrairement à la forme sinusoïdale, une tension de 3V suffit pour commuter convenablement (commutation linéaire courbe 2) pendant 1.6 ms un courant de 100 A (de + 50 A à -50 A) dans une section d'inductance égale à 100 μ H. Au delà de cette valeur on obtient des sur-commutation (courbes 3 et 4).

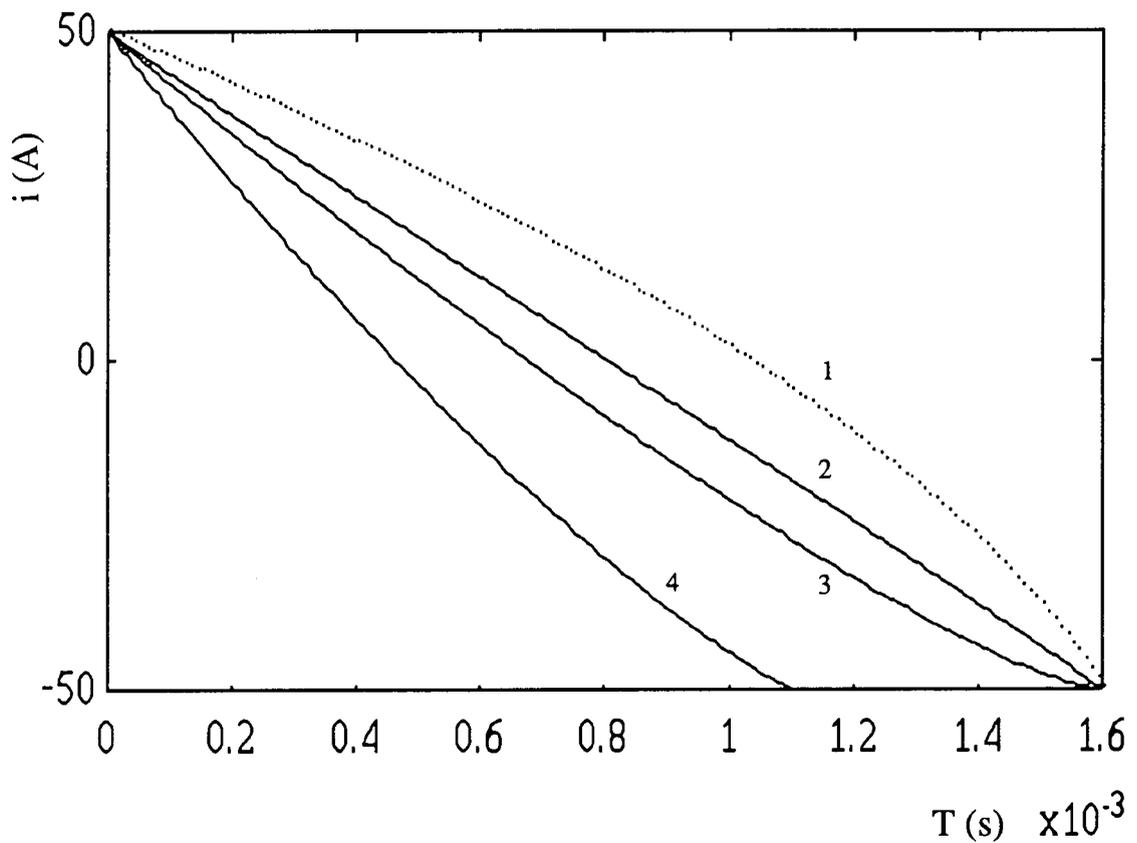


Fig. II.7 : Courants de commutation obtenus
avec une tension de compensation constante.

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 1- Courant obtenu avec $V=0$ V | 2- Courant obtenu avec $V=3$ V |
| 3- Courant obtenu avec $V=5$ V | 4- Courant obtenu avec $V=10$ V. |

c - Tension en rampe

Nous avons essayé une troisième forme de tension, nulle au départ et maximale en fin de commutation. La figure II.8a donne les courants obtenus avec une rampe (figure II.8b). La figure montre seule la courbe 4 (valeur finale 10 V) donne une commutation convenable.

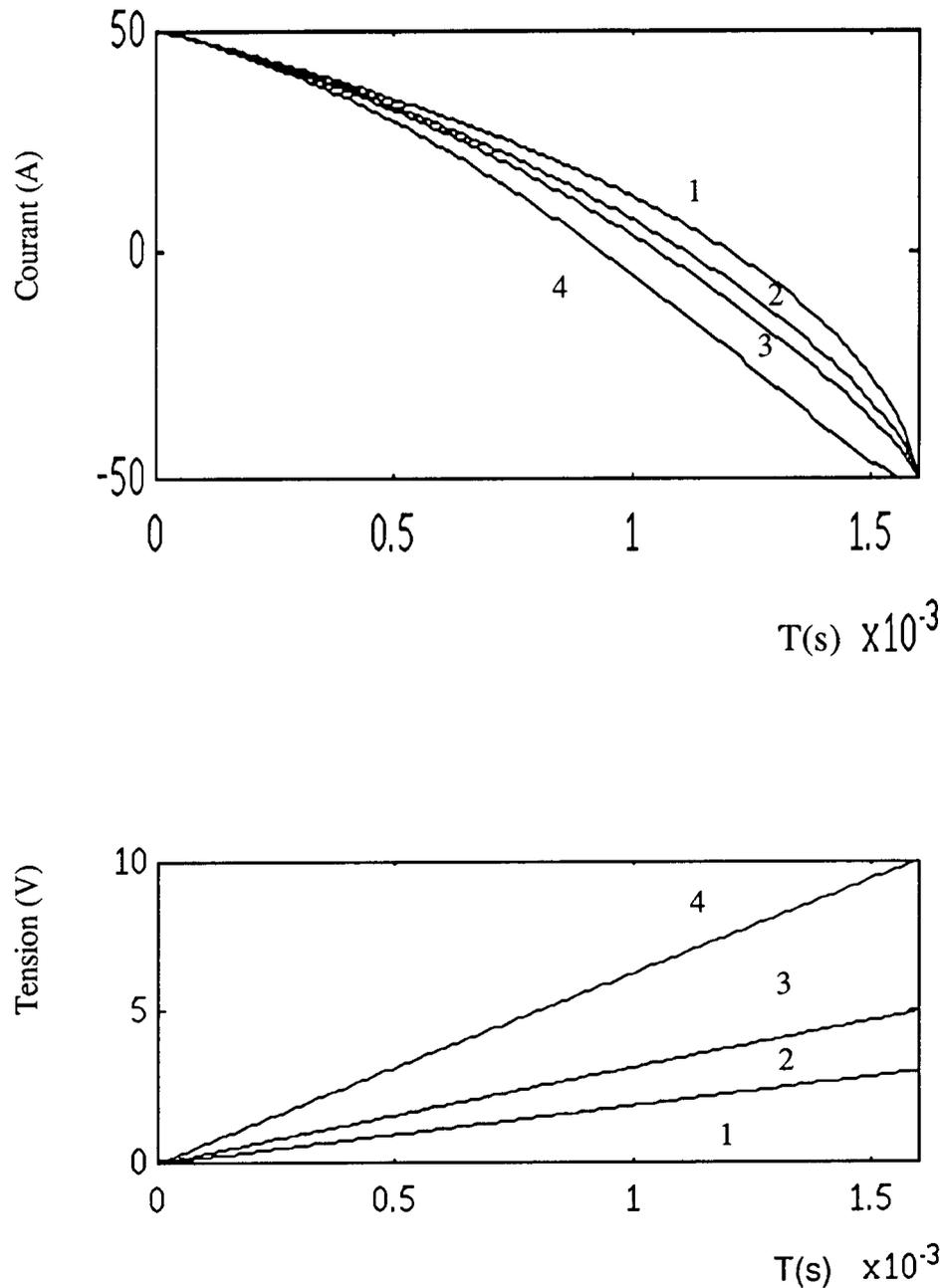


Fig. II.8 : Courants de commutation obtenus avec une rampe comme tension de compensation.

- 1 - Valeur finale 0 V 2 - Valeur finale 3 V
3 - Valeur finale 5 V 4 - Valeur finale 10 V

En conclusion, une tension appliquée constamment pendant toute la durée de la commutation donne le meilleur résultat pour compenser l'effet de l'inductance sur l'inversion du courant dans une section en commutation.

II.2 CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE DE LA COMMUTATION

Nous donnons ici quelques résultats d'essai montrant l'influence des f.é.m. internes à la section sur la commutation. L'étude est faite sur une machine spéciale présentée en II.2.1.

II.2.1 Présentation de la machine étudiée

C'est un prototype étudié en collaboration avec la société Radio-Energie, il est fabriqué spécialement pour étudier les phénomènes de la commutation et son assistance électronique.

Cette machine sans pôles auxiliaires est tétrapolaire et a les caractéristiques suivantes :

- puissance nominale 8 kW
- vitesse 3000 tr/min
- inducteur 135 V, 1.6 A
- induit 135 V, 60A

- le rotor est constitué de 31 encoches et 31 sections, le bobinage est du type ondulé-série simple, chaque section comporte 3 spires.

-le collecteur de conception classique comporte 124 lames, mais uniquement une lame sur quatre est reliée au bobinage (fig. II.10). Pour améliorer la densité de courant la lame connectée au bobinage est mise en parallèle avec une deuxième lame, les deux lames restantes isolées du bobinage forment le nouveau interlame.

- les 4 paires de balais sont montées sur 2 couronnes concentriques pouvant tourner l'une par rapport à l'autre. Chaque balai a une largeur (5.5 mm) légèrement inférieure à la largeur de l'interlame (7.5 mm). Le fonctionnement classique de la machine est obtenu par réglage de ces couronnes.

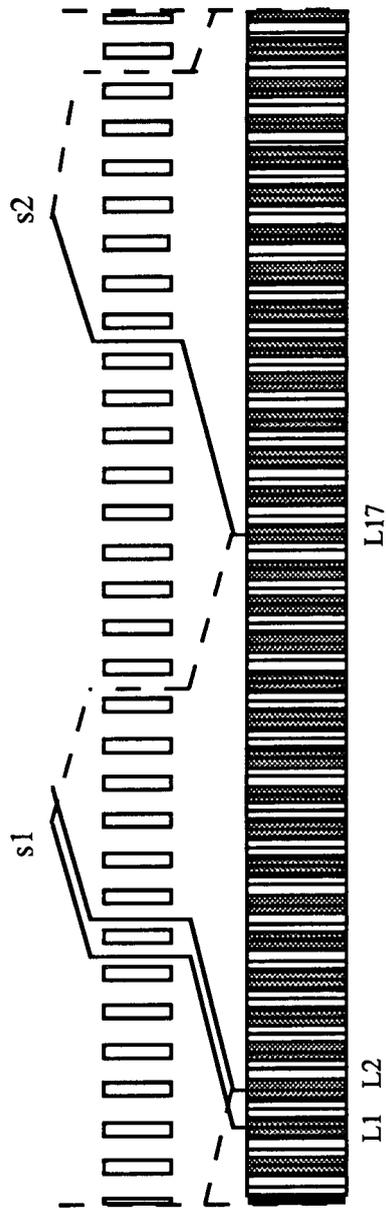


Fig. II.9 : Collecteur et bobinage de la machine étudiée

II.2.2 Montage expérimental

Le montage utilisé est représenté sur la figure II.10, la machine est en fonctionnement moteur alimenté en courant par la mise en série d'une grande inductance avec l'alimentation. Les relevés des courants sont effectués à l'aide de sondes de courants à effet Hall.

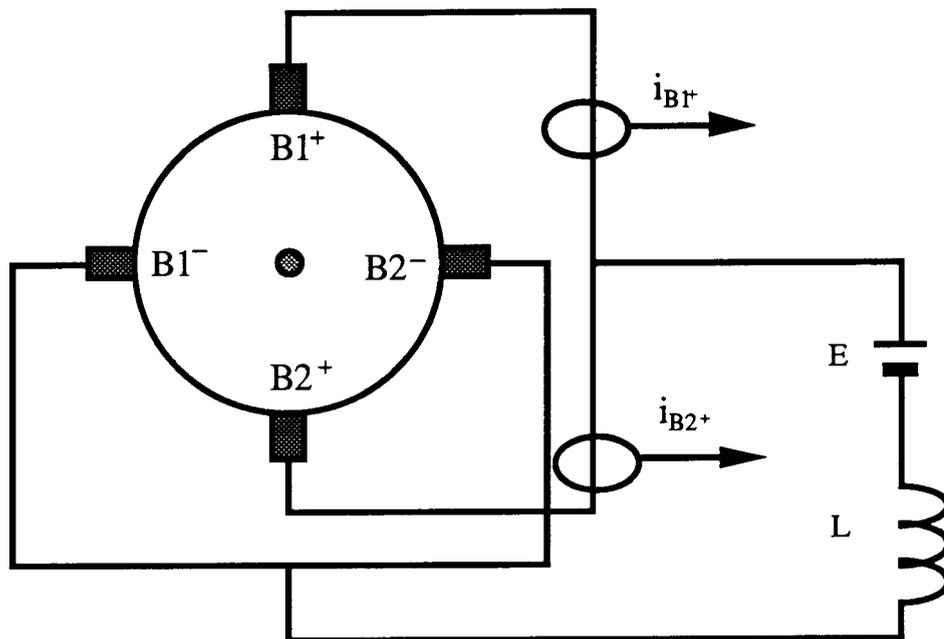


Fig. II.10 : Montage permettant le relevé du courant de commutation dans une section d'un bobinage ondulé-série.

II.2.3 Résultats expérimentaux

Les relevés des courants ont été effectués pour plusieurs positions des balais et à différentes vitesses.

II.2.3.1 Exemple de relevé de commutation résistive

La Figure II.11 se rapporte au cas des balais calés sur la ligne neutre théorique et une rotation infiniment lente de l'induit. Dans ce cas la variation du courant dans la section en commutation dépend seulement des résistances de contact balai-collecteur ainsi que de la résistances interne de la section. La forme du courant rappelle celle de la figure II.4 obtenue par simulation, donc il s'agit bien d'un exemple d'une commutation par résistance.

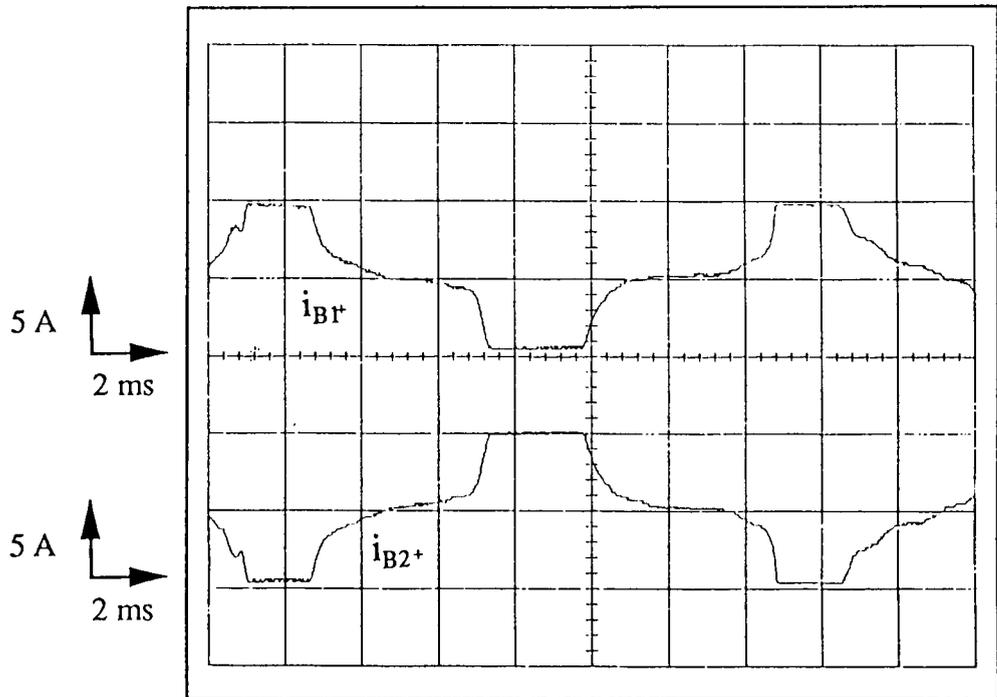


Fig. II.11 : Exemple de commutation linéaire
obtenue à faible vitesse ($V=140$ tr/min).

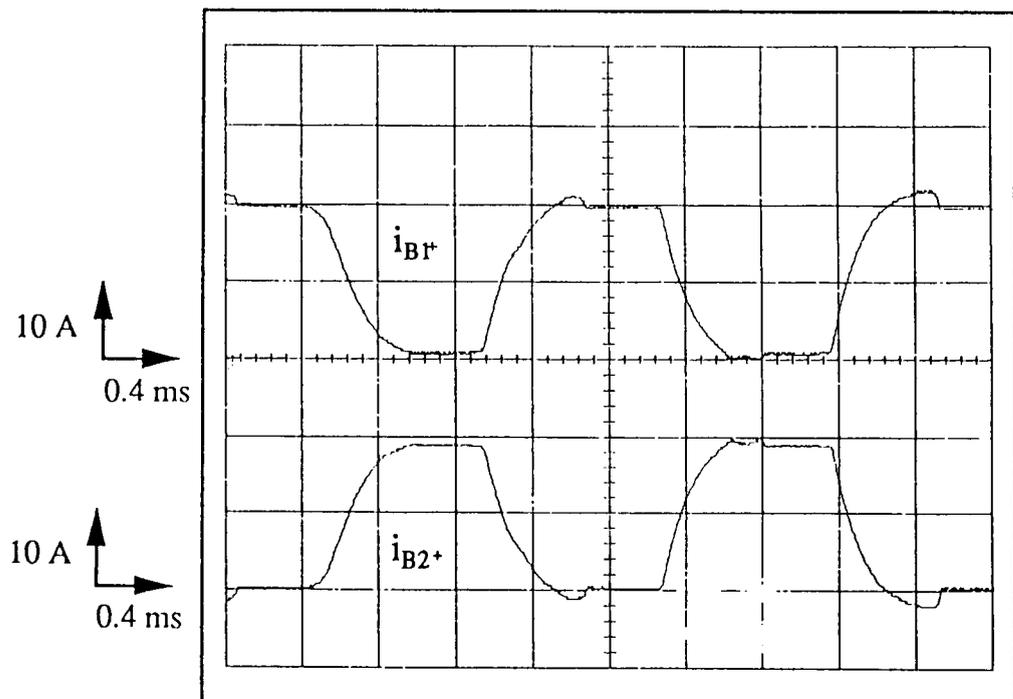


Fig. II.12 : Exemple de commutation avancée obtenue
par réaction d'induit en décalant favorablement les balais

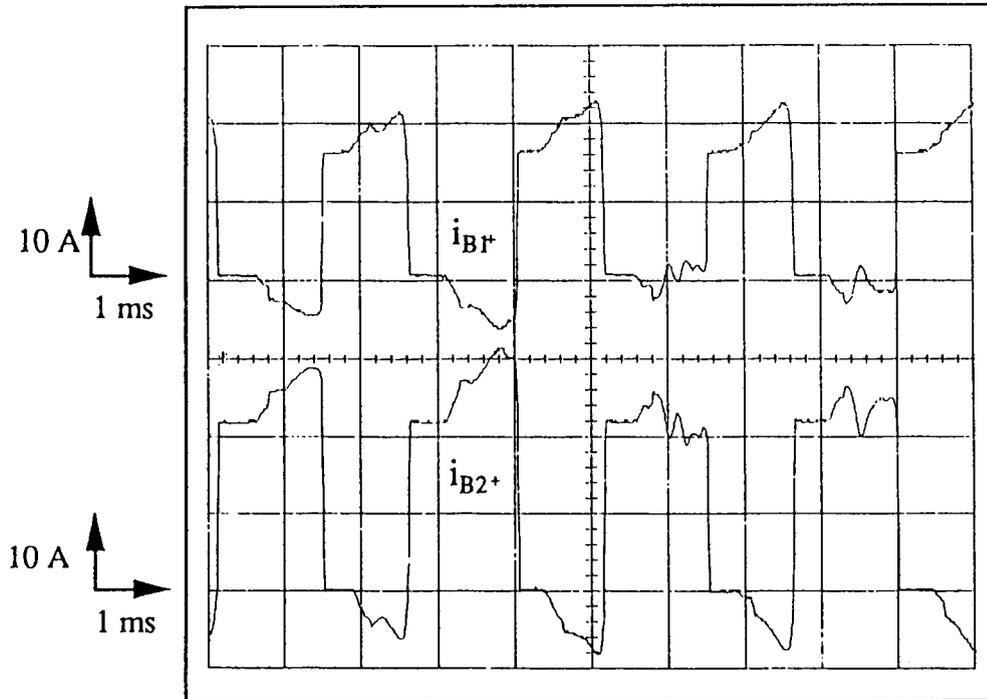


Fig. II.13 : Exemple de commutation retardée
obtenue par décalage défavorable des balais.

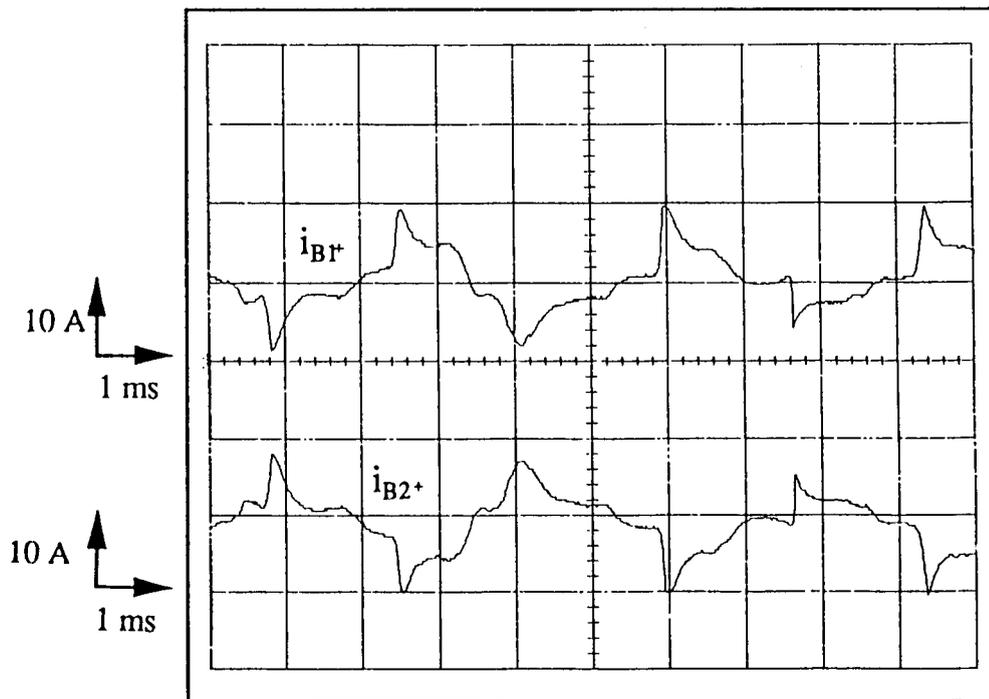


Fig. II.14 : Exemple de commutation classique
dans un bobinage ondulé-série

II.2.3.2 Exemple de relevé de commutation avancée

Ce mode de commutation est obtenu par création d'une f.é.m. de rotation en décalant les balais en sens inverse de celui de la rotation de l'induit. La figure II.12 donne le relevé correspondant à un décalage de 8.8 degrés mécaniques.

II.2.3.3 Exemple de relevé de commutation retardée

La figure II.13 représente le relevé des courants dans le cas d'une commutation retardée. L'introduction d'une f.é.m. de rotation défavorable est obtenue en décalant la ligne des balais dans le même sens que celui de la rotation de la machine, le décalage est de 4.4 degré mécanique.

II.2.3.4 Exemple de relevé de commutation classique

Ce résultat est obtenu en ramenant la machine à un fonctionnement classique où les balais peuvent court-circuiter une ou plusieurs sections de l'induit, cela est possible par le recouvrement de deux balais adjacents. La figure II.14 donne le relevé de la commutation du courant d'un balai à un autre, ce résultat ressemble à ceux obtenus par d'autres méthodes de mesure publiés dans la littérature [26].

II.3 CONCLUSION

De l'exposé que nous avons fait dans ce deuxième chapitre sur la simulation et l'expérimentation des phénomènes de commutation, nous pouvons déduire les conclusions suivantes :

- La tension de réactance, due uniquement à l'effet de l'inductance, est très faible de l'ordre du volt (1 à 2 V).

- La forme de tension la plus appropriée pour compenser l'effet de la tension de réactance est certainement l'échelon de tension. Ce résultat est très important surtout pour les systèmes d'aides à la commutation ou plusieurs formes de signaux électroniques peuvent être appliquées.

- Grâce à la machine fabriquée nous avons pu relever les chronogrammes des courants de commutation et mettre en évidence les différents types de commutation.

CHAPITRE 3

***ASSISTANCE ELECTRONIQUE A LA COMMUTATION:
ETUDE DES SYSTEMES***
de [1] à[5] et de [14] à [25]

III.1 INTRODUCTION

Le principe de l'assistance électronique consiste à injecter par un procédé externe à la machine une tension, de polarité et de valeur convenables, dans la section en commutation. Il est donc indispensable d'avoir accès aux deux bornes de la section par un système à double balai. Le bon fonctionnement de l'assistance dépend de plusieurs paramètres tels que le type du bobinage, les dimensions des balais et des lames du collecteur, la forme de la tension appliquée, et surtout le principe d'accès aux bornes de la section en commutation.

III.2 INVENTAIRE DES METHODES DE COMMUTATION

III.2.1 Travaux réalisés antérieurement

les premiers travaux publiés sur l'assistance électronique de la commutation remontent aux années soixante.

J.BATES et Al avaient proposé deux types d'assistance : l'assistance à diodes et l'assistance à thyristors [18] à [25]. Les systèmes sont utilisés en présence des pôles auxiliaires, car ces derniers n'arrivent plus à assurer une commutation acceptable en régime de saturation des machines.

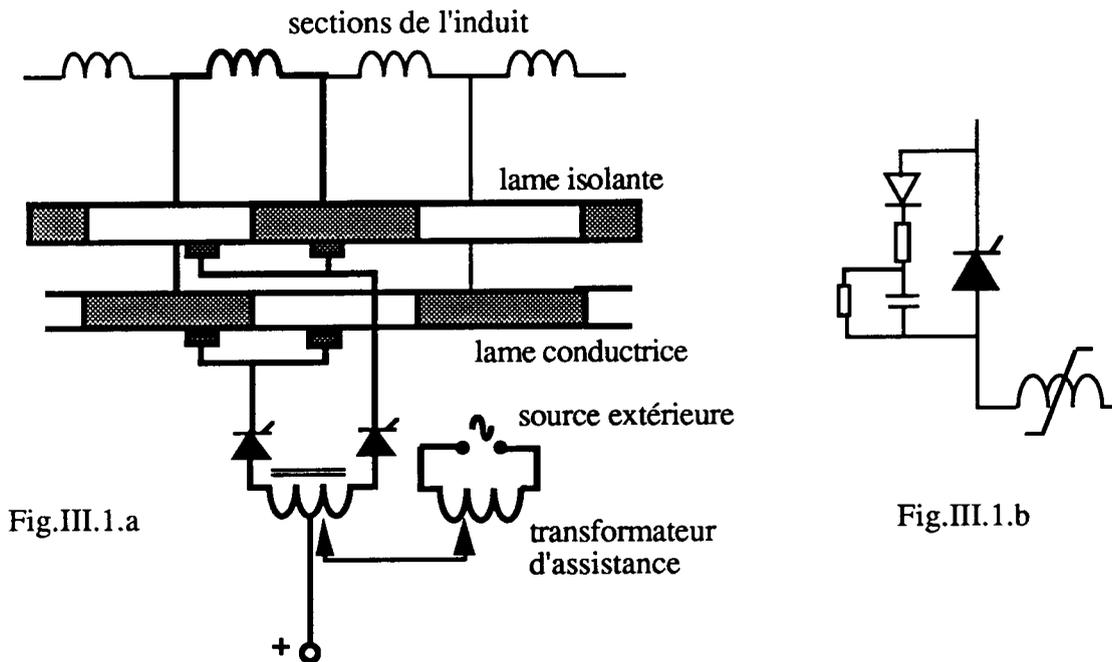


Fig. III.1: Système proposé par J.Bates.

Le système proposé comporte un collecteur à deux parties isolées entre elles. Sur chaque partie, constituée par des lames conductrices et des lames isolantes de dimensions identiques, frotte un balai. Les sections du bobinage sont reliées au collecteur comme indiqué sur la figure III.1a. La représentation de l'assistance à diodes est obtenue en remplaçant les thyristors par des diodes.

L'utilisation des thyristors permet de contrôler le début de la conduction, leur blocage est obtenu soit à l'aide d'un transformateur de commutation (pour les basses vitesses) soit directement par les pôles de commutation (pour les vitesses élevées).

En présence des pôles de commutation, ce procédé à été expérimenté sur plusieurs machines (de 2 kW à 300 kW). Si de bons résultats étaient obtenus sur les machines de faibles puissances en revanche des effets secondaires sont apparus avec les prototypes de puissance plus importantes. Ces effets sont attribués principalement à des surtensions engendrées par l'amorçage des thyristors. Ce problème à été résolu par la mise en série avec les thyristors des inductances saturables (fig. III.1b).

De sa part Andrews à proposé un système adaptable aux machines à courant continu sans modification du collecteur (Fig. III.2a), toutefois les balais sont fractionnés en plusieurs couches alternativement conductrices et isolantes et sont reliés à un circuit de commutation (Fig. III.2b) [17].

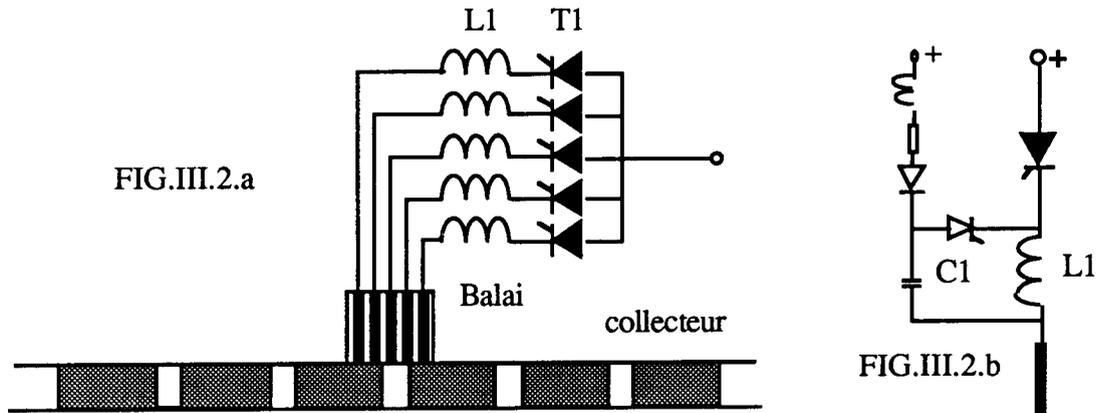


Fig. III.2 : Système de commutation proposé par Andrews.

Les travaux effectués au Laboratoire d'Electrotechnique d'Orsay ont abouti à deux applications différentes :

a - Réalisation d'une alimentation à collecteur assisté et son expérimentation sur deux machines à courant alternatif [15].

La première machine est un moteur asynchrone à rotor à cage, et la seconde est un moteur synchrone à rotor bobiné à pôles saillants, les stators des deux machines sont reliés par des bagues à un collecteur tournant.

Les résultats obtenus ont montré la possibilité de concevoir des onduleurs électromécaniques capables de commuter les machines à courant alternatif synchrones et asynchrones.

b - Assistance électronique des machines à courant continu sans pôles auxiliaires .

Les travaux entrepris au Laboratoire d'Orsay , à la différence de ceux de Bates, sont axés sur l'assistance électronique de la commutation des machines dépourvues de leur pôles de commutation. En effet la suppression de ces derniers permet de libérer la place des pôles principaux afin d'accroître la valeur du flux utile, dont le but est d'améliorer la puissance massique .

Ce mémoire fait partie de ces travaux, il est à signaler que, sur le même thème, deux thèses ont été soutenues [15],[16].

III.2.2 Classification générale des systèmes d'aide à la commutation

Nous avons regroupé en fin de chapitre huit configurations de commutation dans le cas d'une machine tétrapolaire possédant donc quatre lignes de balais, deux positives et deux négatives. Nous essayons chaque fois, et suivant le type de bobinage réalisé, d'analyser la commutation des sections .

- Pour accéder à une section nous avons vu qu'il fallait parfois dédoubler ces balais, nous avons donc quatre paires de balais. Dans ce cas la tension d'aide à la commutation V_g est appliquée entre chaque balai d'une même paire, le système est dit **balancier** en référence à son fonctionnement alterné (cf § III.3).

- Dans d'autre cas la section à commuter est accessible entre deux des quatre balais primitifs. La tension V_g est appliquée entre ces deux balais et elle présente une allure plus symétrique que dans le cas précédent, nous le verrons au chapitre III. Le système est alors appelé système **symétrique à simple collecteur** (cf § III.4).

- Enfin, lorsque les deux bornes de la section appartiennent à deux collecteurs différents le système est appelé **symétrique à double collecteur** (cf. § III.4).

L'étude des différentes commutations se fera en analysant chaque fois :

- L'alternance de la polarité de V_g en passant d'une commutation à la suivante
- La valeur moyenne de la tension appliquée (nulle ou non).
- Déphasage entre V_g appliquée sur la ligne de balai positive et V_g' appliquée sur la ligne de balai négative.

III.3 LE SYSTEME BALANCIER

III.3.1 Principe et conditions de fonctionnement

La figure III.3 montre le schéma de principe d'une telle assistance, un générateur V_g appliqué, par l'intermédiaire de deux balais B1 et B2, à une section en commutation disponible entre deux lames consécutives.

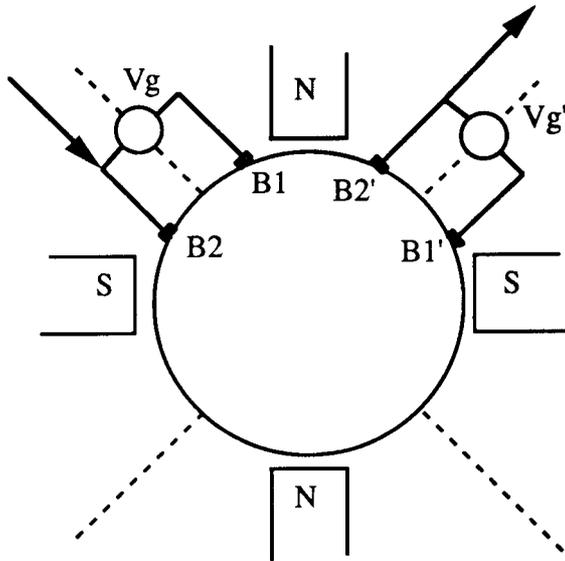
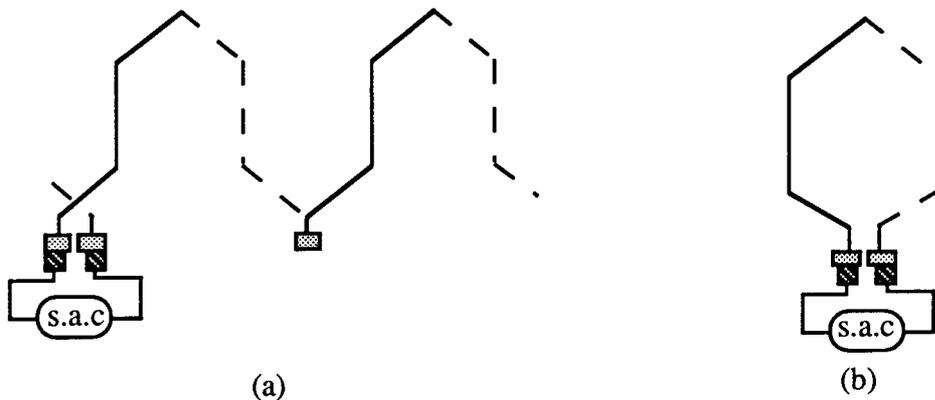


Fig.III.3: Principe du système balancier

Cette section est simple dans le cas d'un enroulement du type imbriqué (fig. III.4 a), et elle est double dans le cas d'un enroulement du type ondulé (fig. III.4. b).



a - bobinage ondulé

b - bobinage imbriqué

Fig. III.4 : Types d'enroulement.

s.a.c : système d'aide à la commutation

Les conditions de fonctionnement du système balancier sont les suivantes:

- La largeur d'un balai doit être inférieure à celle d'un interlame (une section ne peut être court-circuitée par un seul balai).

- La distance interbalai doit être inférieure à la largeur d'une lame (le court-circuit des semi-conducteurs mis en série avec les balais assure une commutation électronique d'un interrupteur à l'autre).

L'avantage de ce système c'est qu'il ne nécessite pas une modification spéciale du collecteur et peut être utilisé aussi bien avec un bobinage imbriqué qu'avec un bobinage ondulé.

III.3.2 Commutation de sections d'un bobinage imbriqué simple

Pour évaluer les performances du système balancier nous avons étudié l'influence des paramètres suivants : type d'enroulement et largeurs des balais.

Dans ce paragraphe nous présentons le principe de la commutation de bobinages imbriqués croisé et non croisé dans deux cas de largeur de balais :

- balai court, lorsque largeur du balai / largeur de la lame égal à 0.5
- balai large, lorsque largeur du balai / largeur de la lame égal à 1.

Dans les quatre exemples étudiés la période de fonctionnement T est partagée en 8 séquences correspondant chacune à un déplacement élémentaire des balais d'un quart de lame. Le courant entre et sort par les balais hachurés.

Exemple 1: Etude de commutation d'un bobinage imbriqué non croisé

Il s'agit d'un bobinage imbriqué simple non croisé avec les données suivantes:

- Nombre de pôles $2p = 4$
- Nombre de sections de l'enroulement $S = 16$
- Nombre de lames au collecteur $K = 16$
- Nombre d'encoches $Z = 16$

La machine présente une symétrie parfaite, une commande commune aux lignes de balais de même polarité est possible, pour cela les balais sont connectés au même générateur d'aide à la commutation.

Le principe de la commutation est étudié pour deux cas de balais, balais courts (fig. III.6) et balais larges (fig. III.7). La phase de commutation d'une section correspond au cas où les générateurs sont hachurés en gris. Lorsqu'ils sont hachurés en noir il s'agit d'une commutation entre balais, dans ce cas les sections de la machine ne sont pas concernées.

Dans l'exemple étudié les deux figures montrent que la commutation est simultanée sur les quatre lignes de balais (2 positives et 2 négatives). Le couplage magnétique, entre les sections concernées (S1-2, S5-6, S9-10, S13-14), est maximum. Les générateurs d'aide à la commutation V_g et V_g' sont aussi en phase et peuvent avoir la même commande. En cas d'utilisation de transformateur on peut même envisager d'utiliser une seule source de tension d'aide à la commutation.

Exemple 2 : Etude de la commutation d'un bobinage imbriqué croisé

Les figures III.8 et III.9 montrent le principe de la commutation d'un bobinage imbriqué simple croisé avec les données suivantes :

Nombre de pôles $2p = 4$

Nombre de sections de l'enroulement $S = 14$

Nombre de lames au collecteur $K = 14$

Nombre d'encoches $Z = 16$

L'étude de cette exemple montre que malgré la symétrie de la machine la simultanéité de la commutation sur toutes les lignes de balais, rencontrée précédemment, n'est pas reproduite. En effet le nombre de sections (14) n'est plus divisible par le nombre de pôles (4). Ce changement de paramètre a introduit un déphasage entre les tensions d'aide à la commutation V_g et V_g' notamment avec les balais courts où elles travaillent en opposition de phase.

Dans les deux exemples étudiés on remarque que la durée de commutation maximale est de $1/8$ de T pour les balais courts et de $5/8$ de T pour les balais larges. Donc il est évident pour des raisons de densité de courant et de commutation les balais larges sont meilleurs.

III.3.3 Commutation de sections d'un bobinage ondulé simple [3]

Les figures III.10 et III.11 montre le principe de la commutation d'un bobinage ondulé simple non croisé avec les données suivantes:

Nombre de pôles $2p = 4$

Nombre de sections de l'enroulement $S = 15$

Nombre de lames au collecteur $K = 15$

Nombre d'encoches $Z = 15$

Pour des raisons de symétrie deux lignes sur quatre seulement sont utilisées. L'examen des figures montrent que la commutation se déroule de la même façon comme dans le cas des bobinages imbriqués. La seule différence est que la section comporte deux fois plus de spires.

L'étude du système balancier avec les exemples présentés montre clairement que l'assistance externe à la commutation fait intervenir plusieurs paramètres à la fois, les plus importants sont le type de bobinage, la durée des contacts (rapport largeur du balai/largeur de la lame). Parmi les exemples étudiés, certainement le bobinage non croisé avec balais larges (largeur d'un balai égale à la largeur de la lame) est celui qui convient au système balancier.

III.4 LE SYSTEME SYMETRIQUE A COLLECTEUR SIMPLE

III.4.1 Principe [2],[3],[5]

N'ayant que deux voies d'enroulement la machine à enroulement ondulé série, est susceptible de n'avoir que deux lignes de balais quelque soit P le nombre de paires de pôles. Dans ce cas de figure, la commutation se fait entre deux lames voisines, entre lesquelles on a P sections en série.

Cependant on montre que plusieurs points du collecteur sont au même potentiel et on peut mettre $2P$ lignes de balais

Moyennant une légère modification du système collecteur-balais, l'idée d'utiliser cette deuxième ligne de balais pour injecter une tension externe et assister la commutation est astucieuse [5].

La figure III.5 donne le schéma de principe d'une telle assistance. La tension d'aide à la commutation est appliquée à une section disponible entre deux lames diamétralement opposées lorsque la machine est tétrapolaire ($p = 2$).

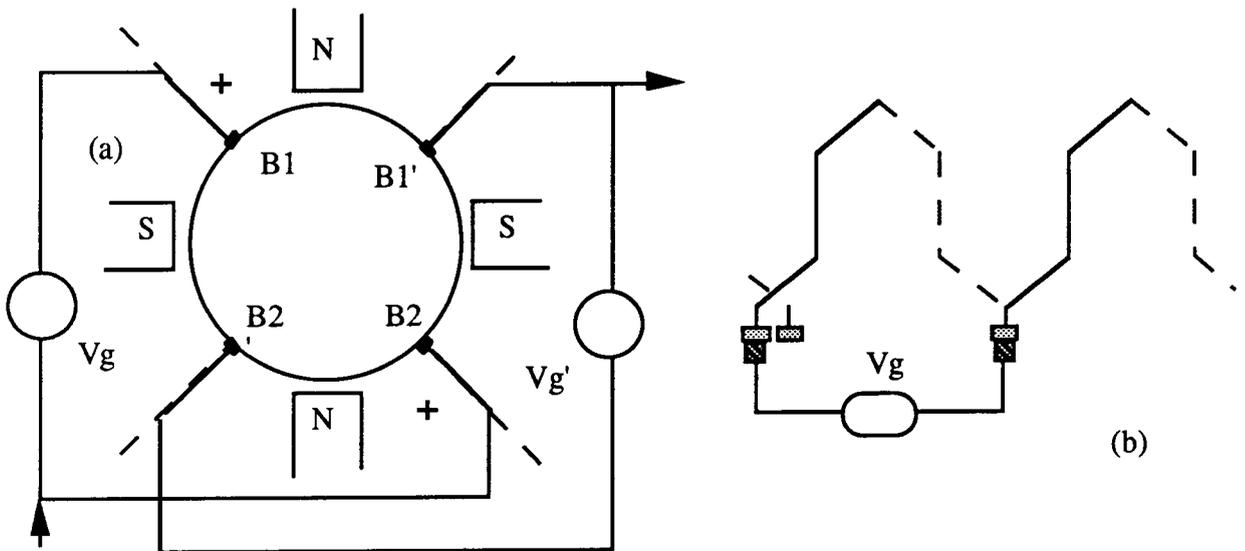


Fig. III.5 : Principe du système symétrique à un seul collecteur.

Les figures III.12 et III.13 montrent un exemple de réalisation possible qui permet de comprendre le principe de l'assistance électronique d'une machine à enroulement ondulé-série simple. Le rotor étudié a 15 encoches et 15 lames au collecteur, cette commutation est fortement dépendante des dimensions des balais et des lames. Nous présentons le principe lorsque les lames conductrices et isolantes ont la même largeur pour deux types de balais (des balais larges et des balais courts).

III.4.2 Séquences de fonctionnement

La figure III.12 donne le fonctionnement lorsque le balai est deux fois moins large qu'une lame. La période de fonctionnement est partagée en 8 séquences correspondant chacune à un déplacement élémentaire des balais d'une moitié de leur largeur. En prenant comme notation E pour le côté entrée du courant et S pour le côté sortie voici les 8 séquences détaillées:

Séquence 1:

(E) - Le balai B1 est au contact de lame 1 (conductrice), et B2 au contact de l'interlame 8-9 (isolant) , alors le courant principal I entre par le balai b1 et la lame 1.

(S) - Le passage du courant de sortie sera assuré par le balai B'2 et la lame 5 jusqu'à la quatrième séquence pendant laquelle aura lieu la première commutation côté sortie du courant.

Séquence 2:

(E) - La première commutation concerne la section S1-9 entre les lames 1 et 9. le balai B2 arrive au contact de la lame 9, le balai B1 est toujours au contact de la lame 1, pour commuter le courant d'entrée de B1 vers B2, il faut appliquer V_g comme indiqué sur la figure avec une valeur telle que le courant s'annule juste à l'ouverture du contact.

Séquence 3 :

(E)- la commutation de la section S1-9 est terminée , le courant d'entrée passe par le balai B2 et la lame 9. La prochaine commutation coté entrée du courant aura lieu pendant la cinquième séquence.

Séquence 4 :

(S) - La commutation concerne la section S5-13 entre les lames 5 et 13. Le balai B'2 arrive au contact de la lame 13, le balai B'1 est toujours au contact de la lame 5, pour commuter le courant de sortie du balai B'1 vers le balai B'2 il faut appliquer une tension V'_g comme indiquée sur la figure.

Séquence 5 :

(S) - La commutation de la section S5-13 est terminée, le courant de sortie est acheminé par le balai B'2 à travers la lame 13. La prochaine commutation côté sortie du courant aura lieu pendant la 8^{ème} séquence.

Séquence 6 :

(E) - La commutation concerne la section S9-2 entre les lames 9 et 2, le balai B1 arrive au contact de la lame 2, le balai B2 est toujours au contact de la lame 9, pour commuter le courant d'entrée du balai B2 vers le balai B1 on applique une tension V_g de sens inverse par rapport à celle appliquée pendant la commutation de S1-9.

Séquence 7 :

(E) - La commutation de S2-9 est terminée, le courant d'entrée passe par B1 et la lame 2. Cette situation reste valable pendant les trois séquences suivantes.

Séquence 8 :

(S) - La commutation concerne la section S13-6 entre les lames 13 et 6, le balai B'1 arrive au contact de la lame 6, le balai B'2 est toujours au contact de la lame 13, pour commuter le courant de sortie du balai B'2 vers le balai B'1, il faut appliquer une tension de sens opposé à celle appliquée pendant la commutation de la section S5-13. La séquence suivante sera identique à la première séquence.

Cette dernière séquence est identique à la première séquence.

La figure III.13 donne le fonctionnement lorsque le balai a une largeur égale à celle d'une lame. Le principe de base de fonctionnement reste le même avec une différence dans la durée de commutation pour une section. Dans le cas des balais courts elle est au maximum égale au 1/8 de période, alors que dans le cas des balais larges elle est au 3/8 de période.

III.5 LE SYSTEME SYMETRIQUE A DEUX COLLECTEURS

III.5.1 Structure

La structure du collecteur utilisée est identique à celle proposée par J.BATES. Les extrémités des sections de l'induit aboutissent alternativement sur deux collecteurs identiques isolés électriquement et assemblés avec un décalage angulaire correspondant à une lame. Sur la même ligne est disposé un balai par collecteur. La tension d'aide à la commutation V_g est appliquée entre les deux balais, le plus souvent, à travers un transformateur d'isolement à point milieu. La tension V_g doit être d'amplitude alternative, et symétrique, et de fréquence synchrone avec le défilement des balais. La première alternance commute une section et la deuxième alternance commute la section suivante.

Le dispositif de BATES utilise le réseau électrique comme source de tension externe (V_g est sinusoïdale de fréquence 50 Hz). Dans notre laboratoire les dispositifs les plus simples utilisent des condensateurs comme source de tension externe et les plus compliqués utilisent des générateurs de tensions électroniques à créneaux ou à M.L.I. à plusieurs niveaux.

III.5.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est détaillé sur la figure III.14 selon les séquences suivantes :

Séquence I : B1 est au contact de la lame 3 de C1, il conduit seul le courant principal.

Séquence II : B2 arrive au contact de la lame 6 de C2, V_g présente la bonne polarité pour imposer un courant à travers le transformateur et favoriser l'inversion du courant i dans la section S3-6.

séquence III : la commutation de S3-6 est terminée, le balai B2 conduit seul le courant principal à travers la lame 6.

Séquence IV : De nouveau le balai B1 arrive au contact d'une lame conductrice toujours sur le collecteur C1 (lame 5), avec la deuxième alternance de V_g , un courant est imposé à travers le secondaire du transformateur pour favoriser l'inversion de i dans la section suivante S6-5.

Séquence V: cette séquence est identique à la première, la prochaine commutation sera celle de la section S5-8.

Plusieurs dispositifs ont été testés sur des machines à courant alternatifs et à courant continu avec différentes formes de V_g .

a - Des machines à courant alternatif synchrone et asynchrone ont été alimentées, à tension et courant nominaux, à l'aide d'un onduleur mécanique. Selon le cas considéré la valeur de la tension V_g est plus ou moins élevée, elle atteint 1 à 1.5 fois la tension de crête d'une phase dans le cas de la machine asynchrone, et elle est moitié de la tension de phase dans le cas d'une machine synchrone [15].

b- Une machine à courant continu avec collecteur symétrique a été expérimentée. Les résultats obtenus (20% de la puissance nominale) sont insuffisants à cause de divers problèmes mécaniques et choix technologiques qui sont intervenus dans la construction du collecteur [14].

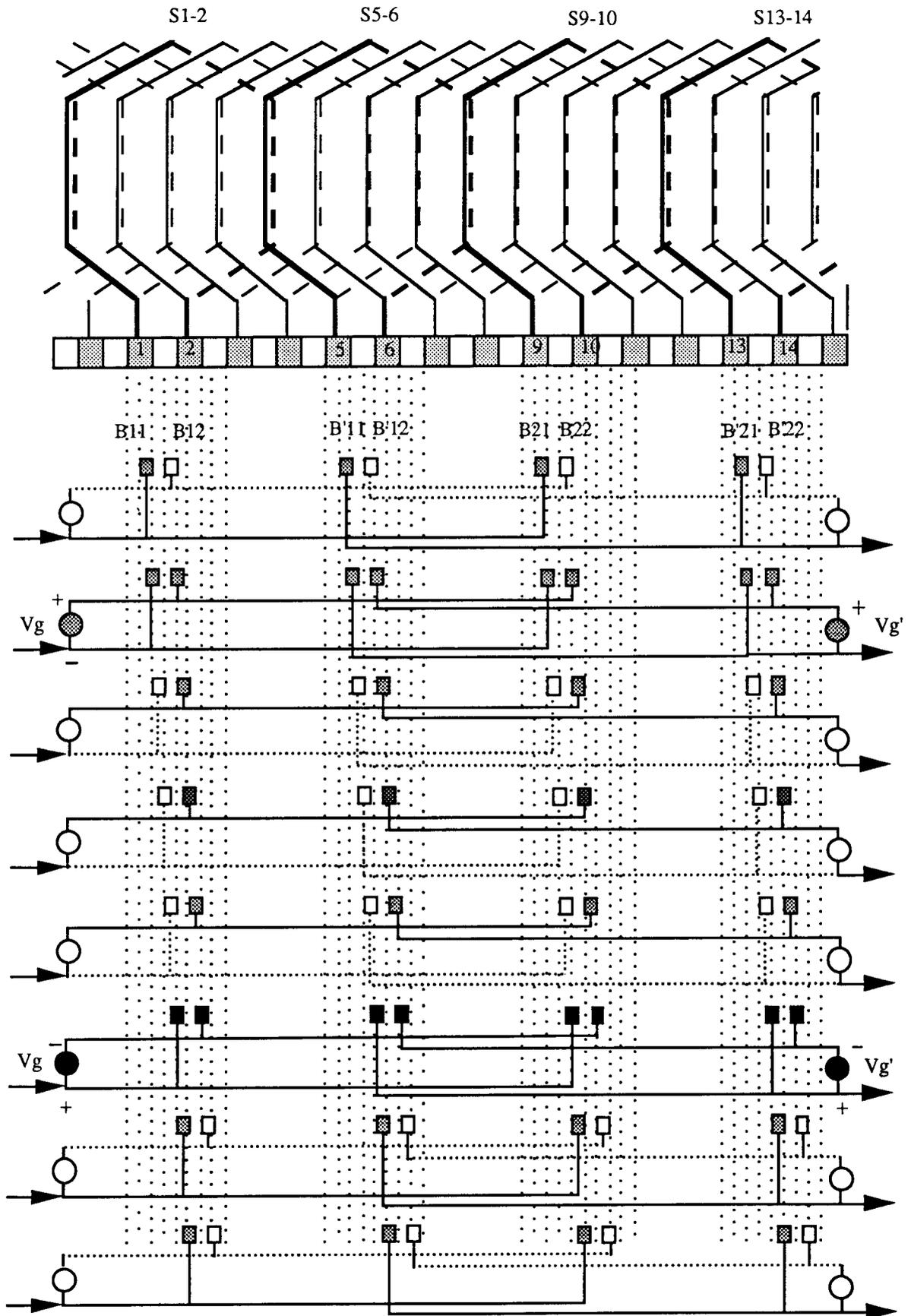


Fig. III.6 : Système balancier, commutation d'un enroulement imbriqué non croisé, cas de balais courts

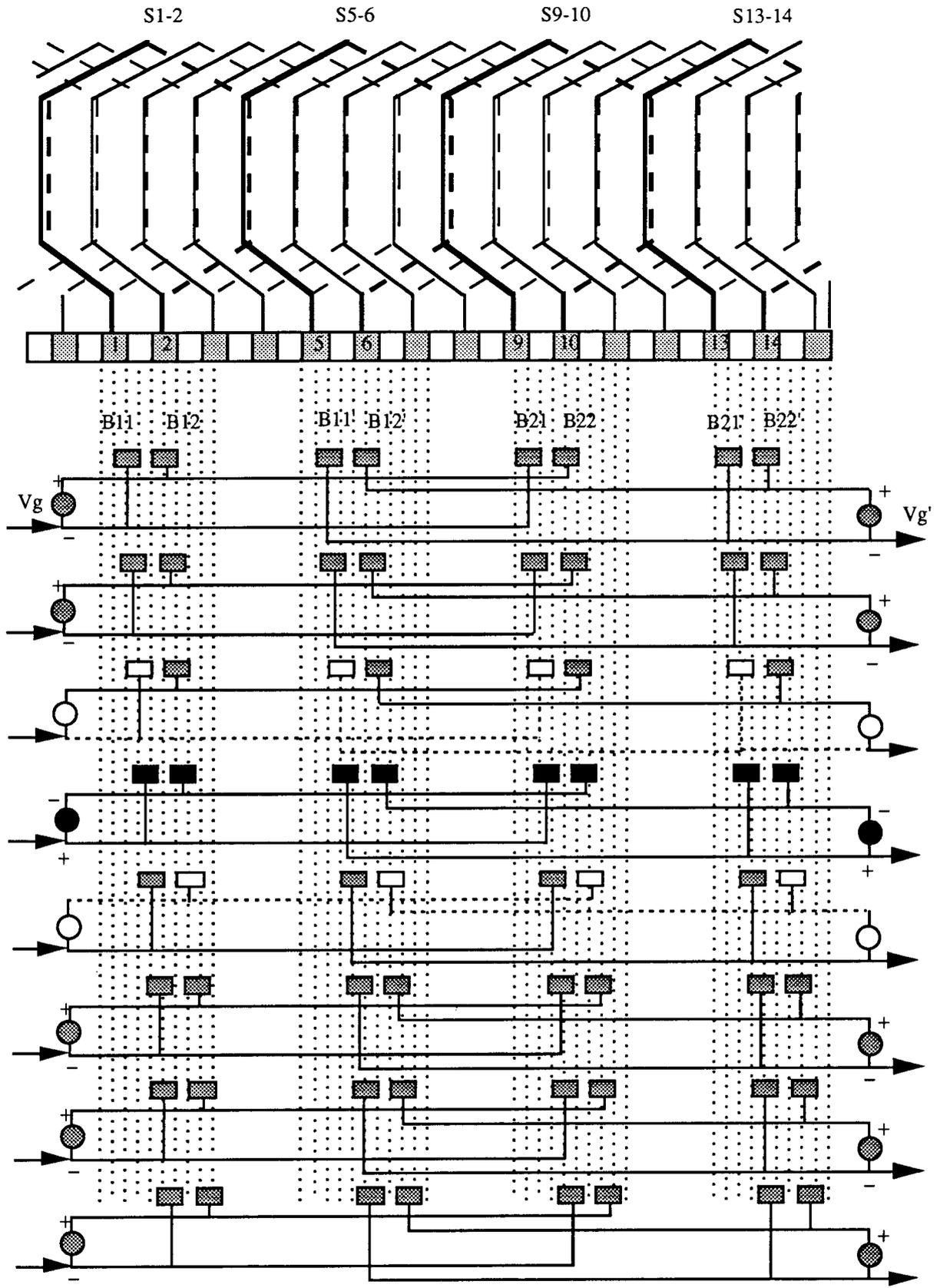


Fig. III.7 : Système balancier, commutation d'un enroulement imbriqué non croisé, cas de balais larges

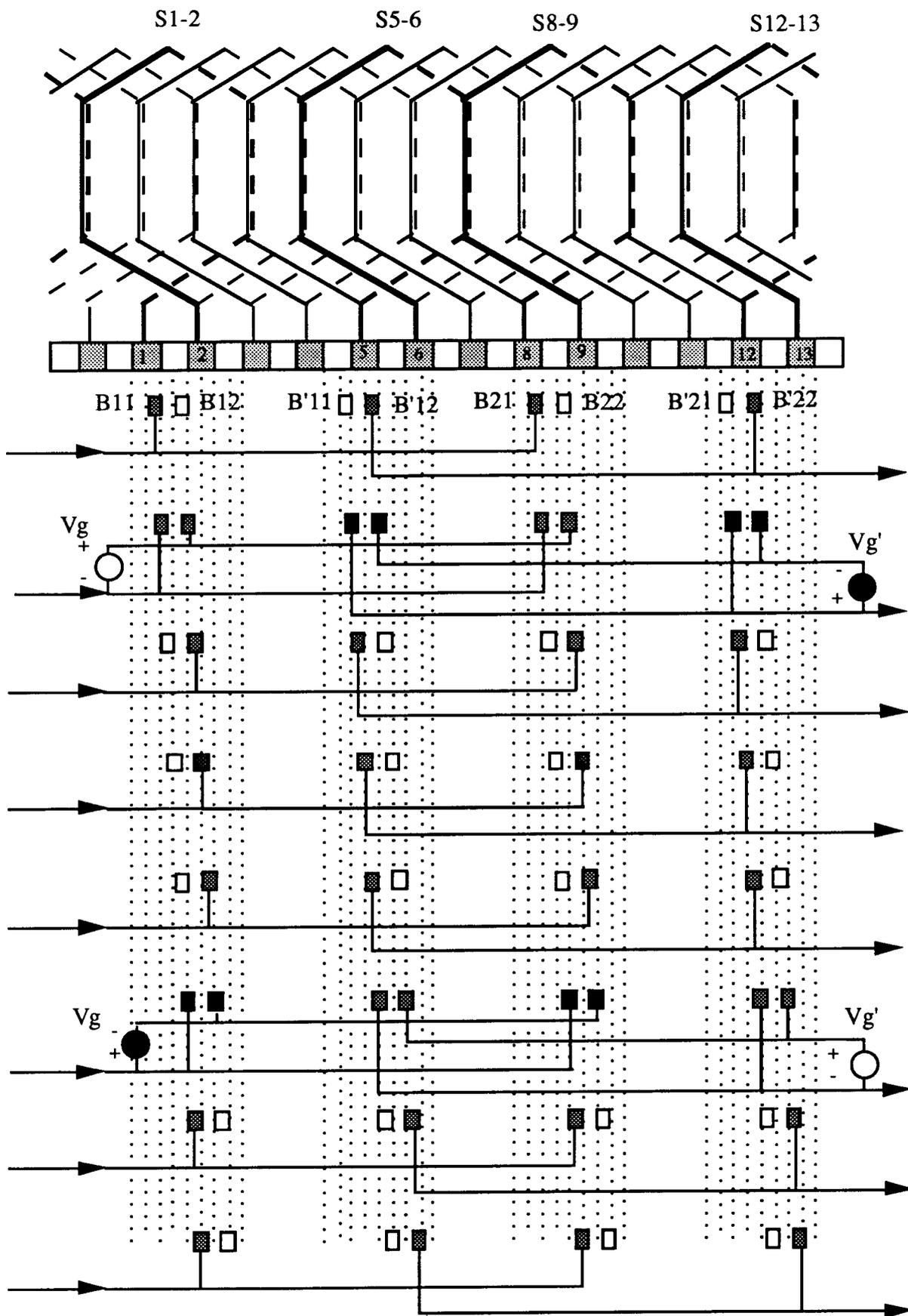


FIG. III.8 : Système balancier, commutation d'un bobinage imbriqué croisé, cas de balais courts

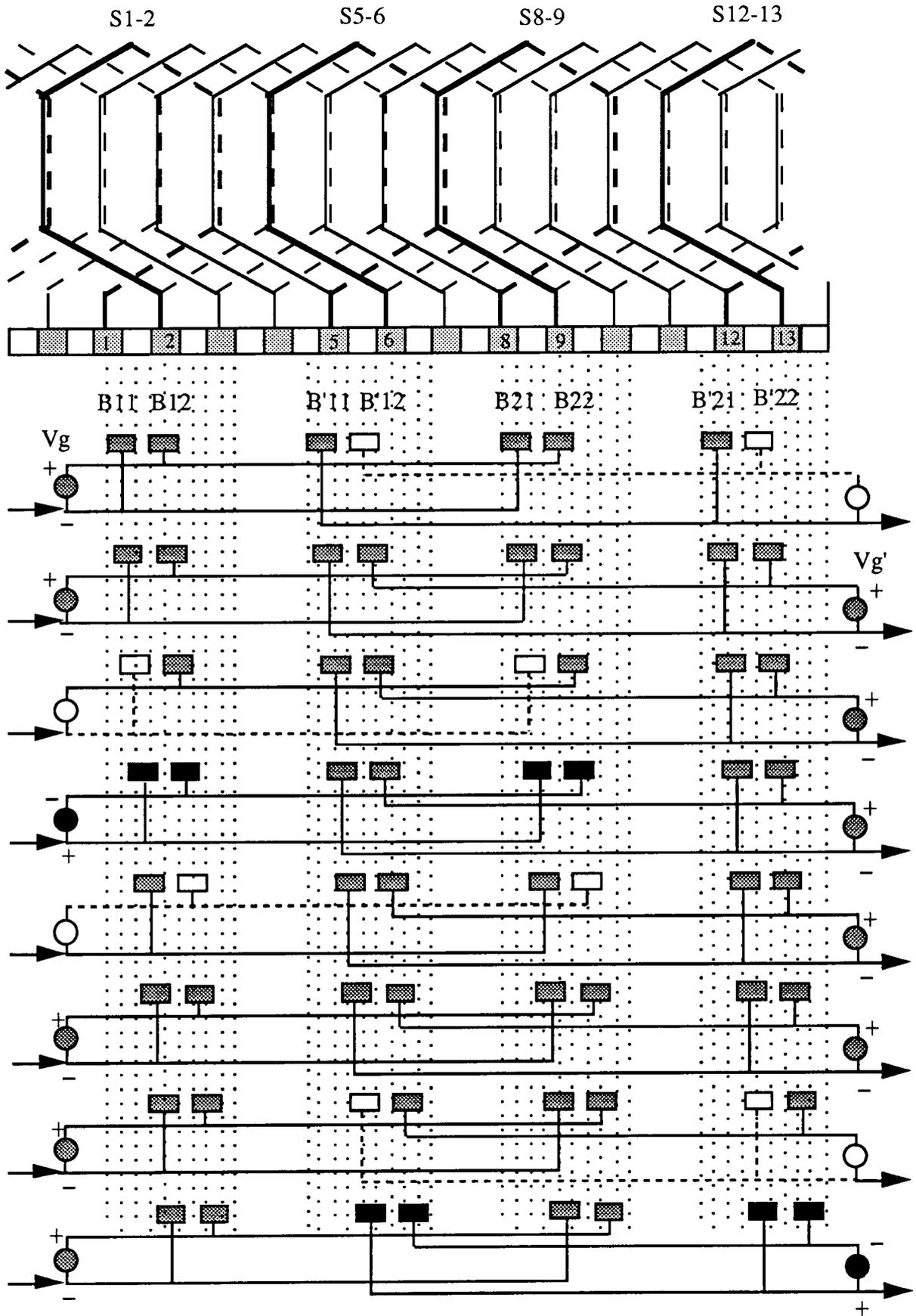


Fig. III.9 : Système balancier, commutation d'un enroulement imbriqué croisé cas de balais larges

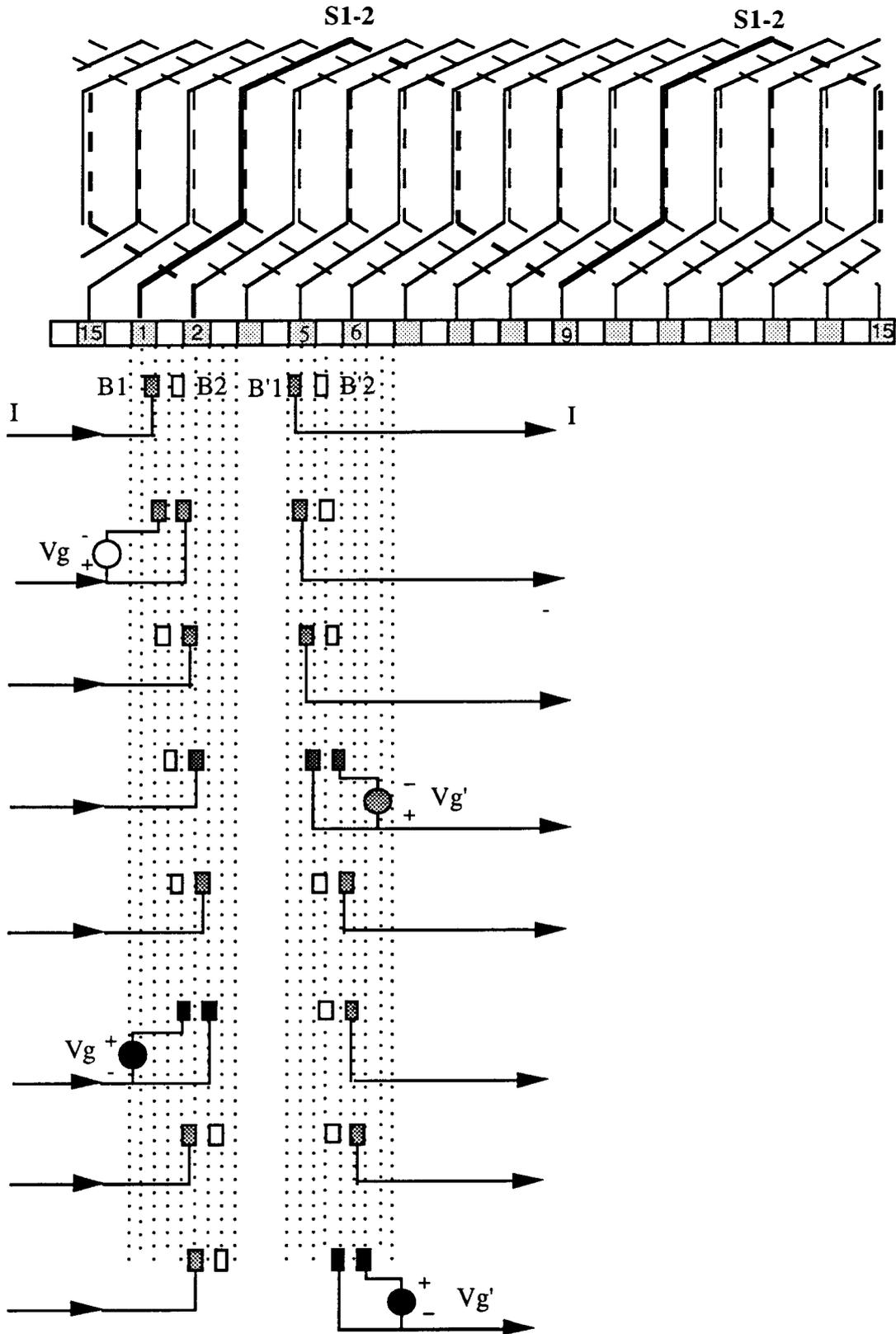


Fig. III.10 : Système balancier, commutation d'un bobinage ondulé-série avec des balais courts.

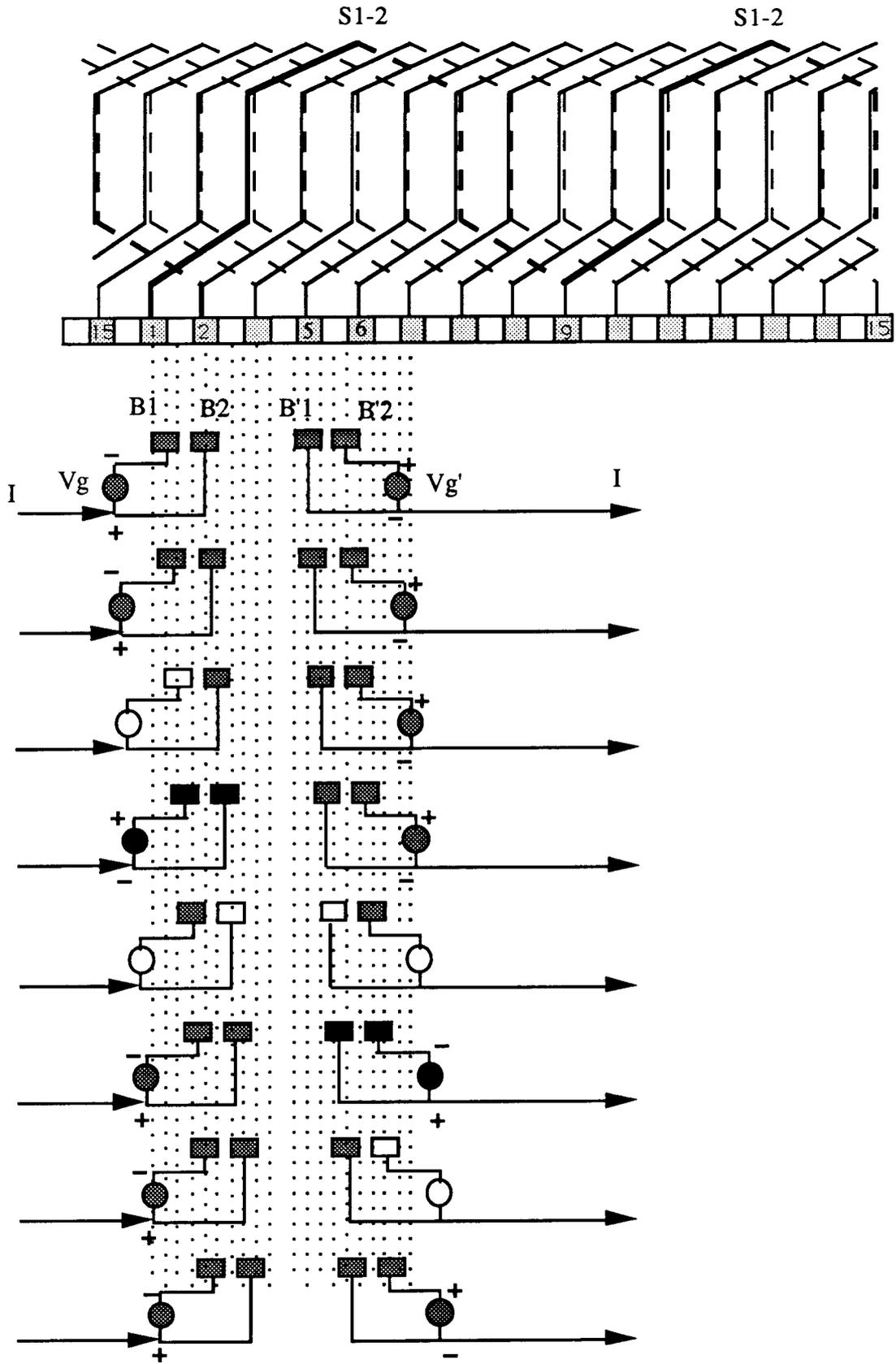


Fig. III.11 : Système balancier, commutation d'un bobinage ondulé série avec des balais larges.

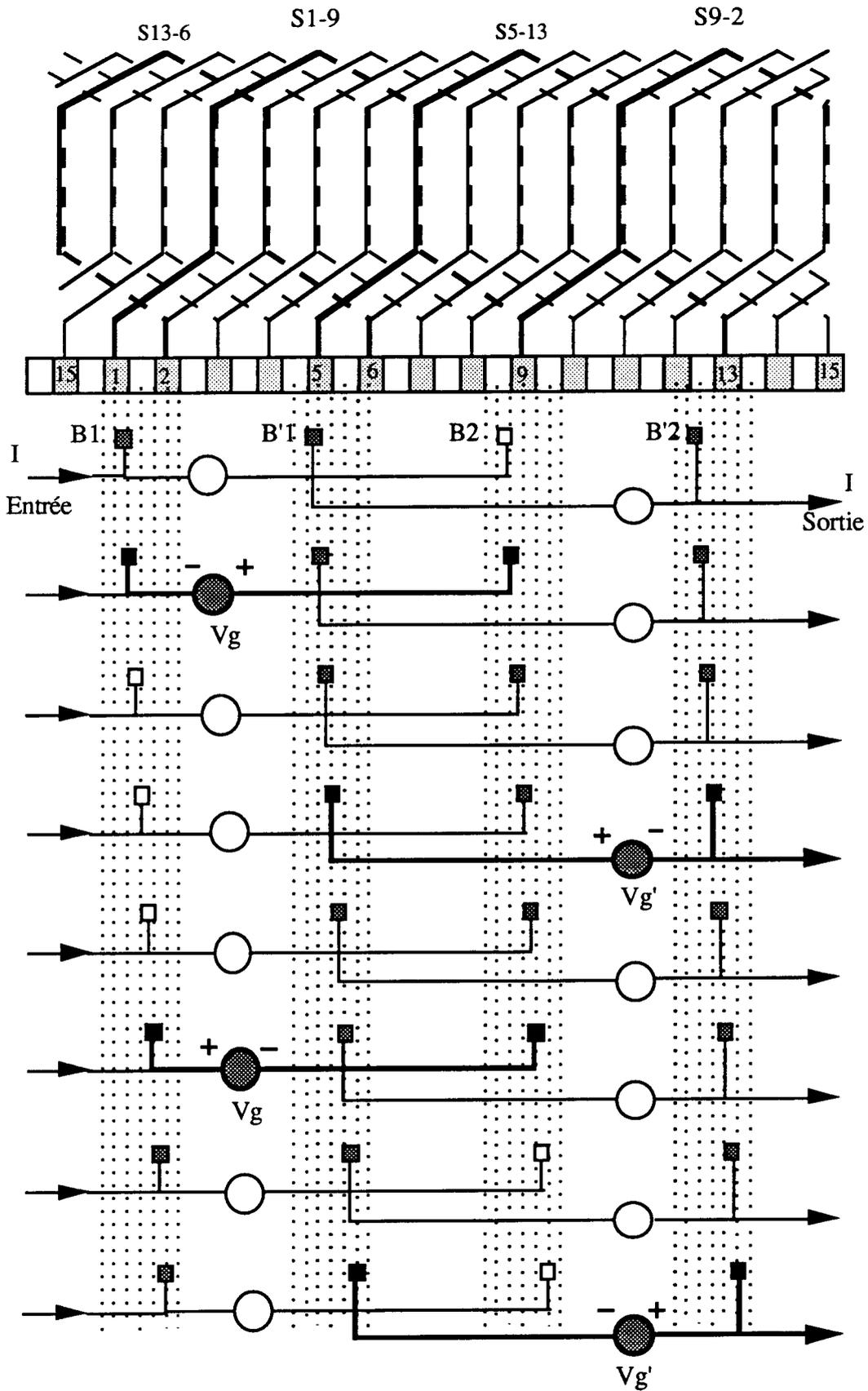


Fig.III.12: Nouveau système symétrique à un seul collecteur, cas de balais courts

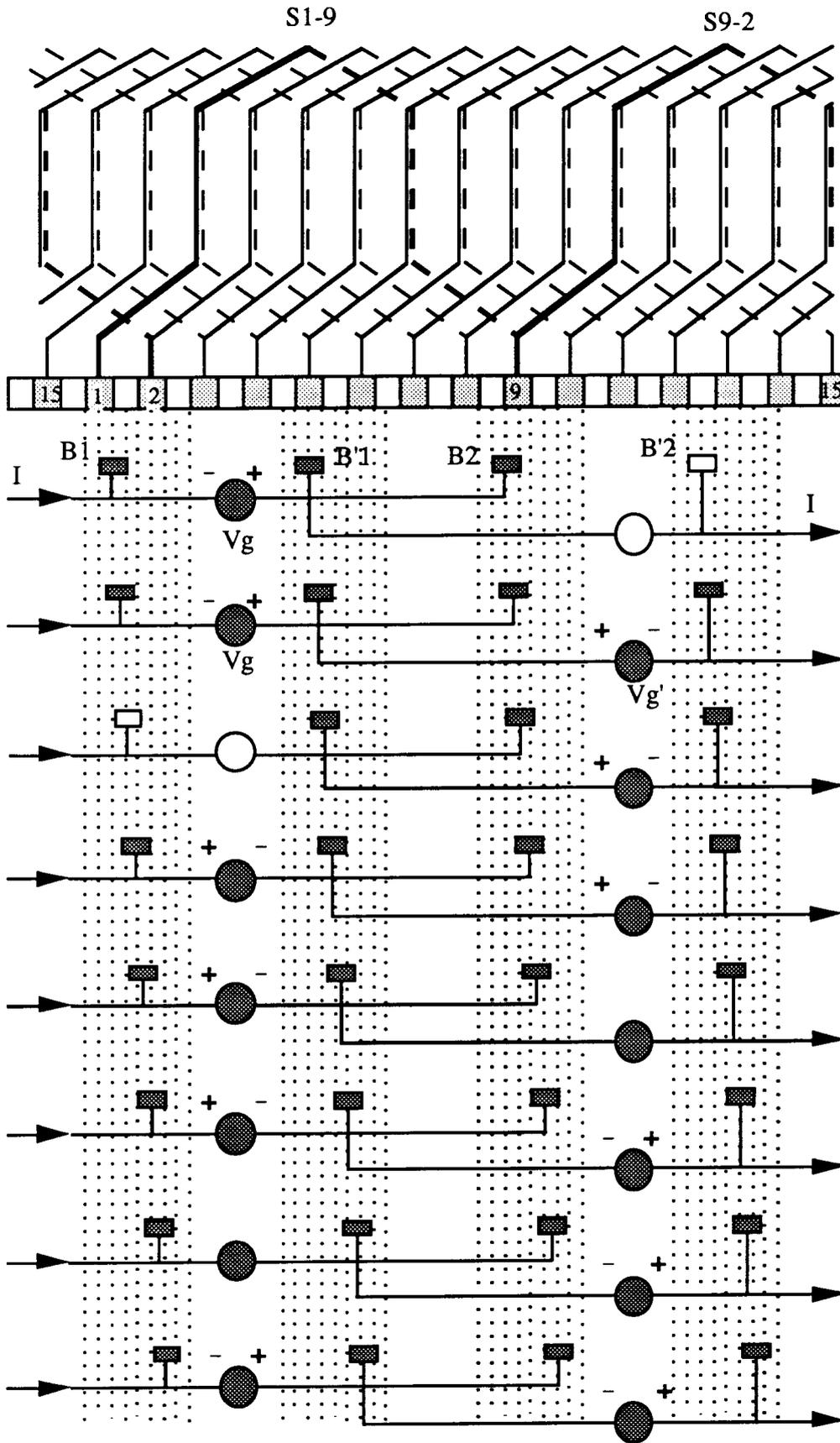


Fig.III.13: Nouveau Système symétrique à un seul collecteur, cas des balais larges

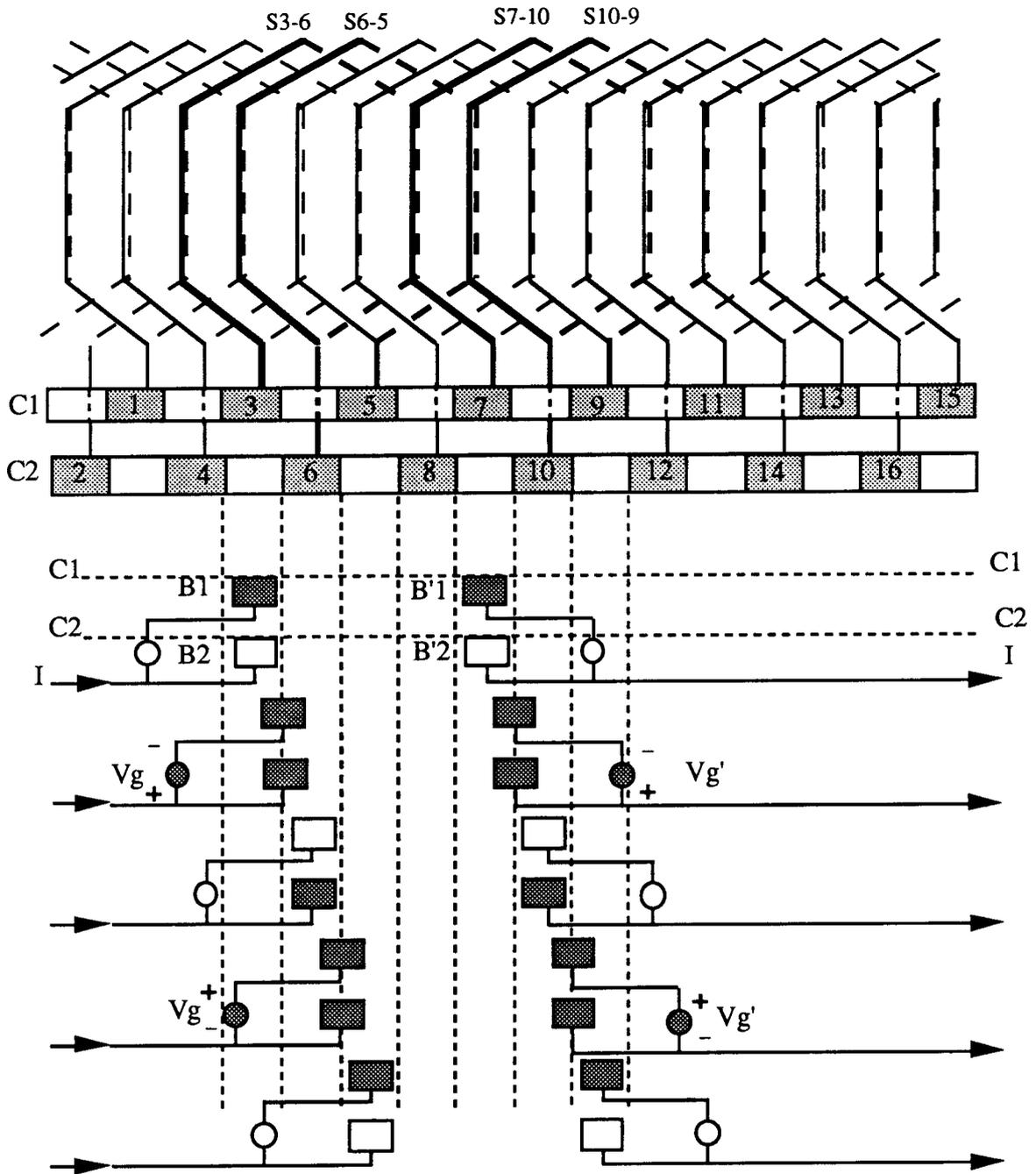


Fig. III.14 : système symétrique à double collecteur,
commutation d'un bobinage imbriqué non croisé

III.6 CONCLUSION

L'étude de la commutation des sections est faite dans le cas de bobinages les plus répandus. Elle nous a montré que les caractéristiques et la commande de la tension d'aide à la commutation sont fortement dépendantes des deux paramètres suivants :

- type de bobinage réalisé,
- dimensions des balais et des lames du collecteur.

Le tableau suivant résume les différentes possibilités de commutation avec les systèmes étudiés en relation avec le type de bobinage:

Systèmes		Système balancier	Système symétrique à collecteur simple	Système symétrique à collecteur double
Type de bobinage				
Bobinage imbriqué simple	croisé	convient (**)	ne convient pas	convient (*)
	non croisé	convient (***)	ne convient pas	convient (*)
Bobinage ondulé-série		convient (*)	convient (***)	ne convient pas

(*) : Degré d'aptitude.

CHAPITRE IV

***ETUDE EXPERIMENTALE :
RESULTATS ET DISCUSSION***

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord présenter les caractéristiques des machines étudiées, les deux premières machines sont de fabrication classique, seule une adaptation du collecteur à l'assistance est réalisée. Quant à la troisième machine, il s'agit d'un prototype spécialement fabriqué pour l'étude de l'assistance électronique à la commutation. La première machine est expérimentée uniquement avec le système balancier alors que les deux dernières machines sont expérimentées avec les deux types d'assistance : balancier et symétrique. Nous rappelons que le système balancier a été déjà expérimenté, précédemment au laboratoire, sur des machines de faible puissance à forte tension et faible courant (2.5 kW, 440 V, 5A) [14], et que l'assistance du type symétrique à collecteur unique est le nouveau système proposée dans le cadre de cette étude. Enfin de chapitre nous proposons une étude comparative entre les deux types d'assistances et une réflexion sur l'assistance électronique à la commutation des machines à courant continu.

IV.2 PRESENTATION DES MACHINES ETUDIEES

IV.2.1 Machine 1

IV.2.1.1 Caractéristiques

Il s'agit d'une machine à courant continu tétrapolaire à excitation séparée dont la plaque signalétique est la suivante :

- puissance nominale = 8.5 kW
- vitesse = 2500 tr/min
- inducteur 66V, 4.4 A
- induit 90 V, 115 A

Le rotor est constitué de 25 encoches et 75 sections bobinées en ondulé-série. Le collecteur sous sa forme initiale comporte 75 lames.

IV.2.1.2 Adaptation de la machine à l'assistance électronique

Pour rendre la machine compatible avec les dispositifs de commutation le nombre de lames au collecteur a été réduit à 12 de la façon suivante:

- Un grand nombre de connexions sections-lames a été coupé (63 sur 75); seules subsistent 12 liaisons .

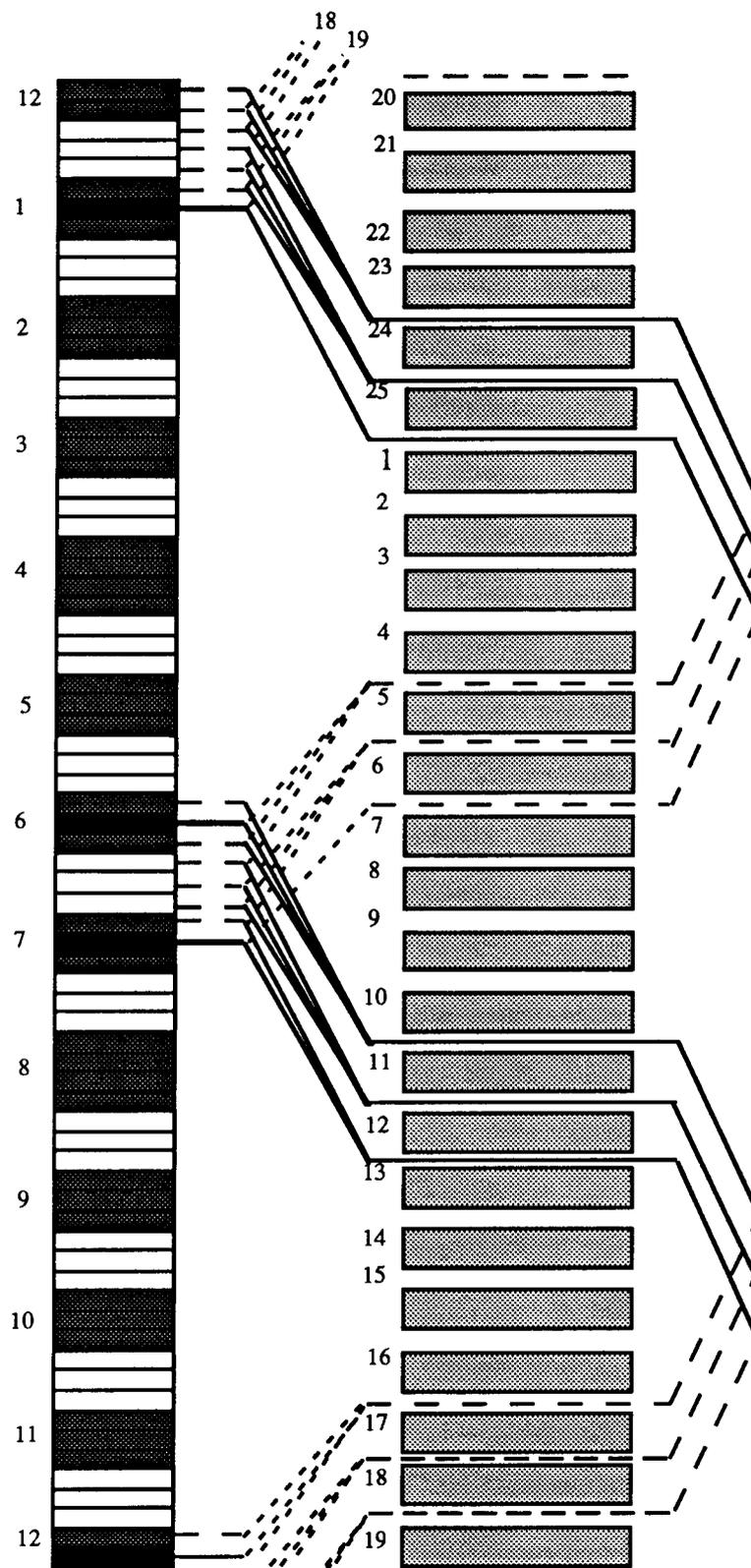


Fig. IV.1 : Bobinage et collecteur de la machine 1.

- A l'avant du collecteur, pour former chacune des nouvelles lames conductrices, trois ou quatre des lames initiales ont été mises en parallèle avec des cavaliers.

- Les douze lames isolantes sont toutes formées de 3 anciennes lames sans liaison avec des cavaliers.

La figure IV.1 montre comment est constitué le nouveau collecteur de cette première machine.

Une conséquence de cette modification, sur les caractéristiques initiales de la machine, est la chute de la tension nominale aux bornes de la machine de l'ordre de 10 %. Pour gagner quelques volts nous avons remplacé les balais électrographitiques par des balais métallographitiques qui présentent des chutes de tensions plus faibles et supportent des densités de courant plus fortes.

Une autre caractéristique importante de cette modification est la grande dispersion des conducteurs d'une même section. Entre deux lames consécutives il ya en effet des conducteurs se trouvant répartis dans la moitié des encoches (12 sur 25 encoches) de la machine (fig. IV.1). Ceci oblige à commuter des conducteurs alors qu'ils ne se trouvent pas tous sur la ligne neutre. Une grande partie des difficultés expérimentales rencontrées avec cette machine est liée à ce phénomène. La caractéristique à vide de la machine est donnée en annexe V.

IV.2.2 Machine 2

IV.2.2.1 Caractéristiques

Cette machine est identique à la machine 1 mais avec un collecteur régulier où toute les sections sont identiques. Pour supprimer la dissymétrie, rencontrée précédemment, nous avons donc adapté un nouveau rotor au stator de la machine 1. Le nombre de lames au collecteur à été réduit cette fois ci à 15. Les quinze nouvelles sections sont toutes formées de 5 anciennes sections.

La figure IV.2 représente le schéma développé du bobinage du rotor et le collecteur modifié correspondant. Nous voyons sur cette figure que la dispersion des conducteurs d'une section est réduite par rapport à la machine 1 (8 encoches au lieu de 12), ceci facilite la mise en oeuvre de la commutation. La caractéristique à vide de la machine est donnée à l'annexe V.

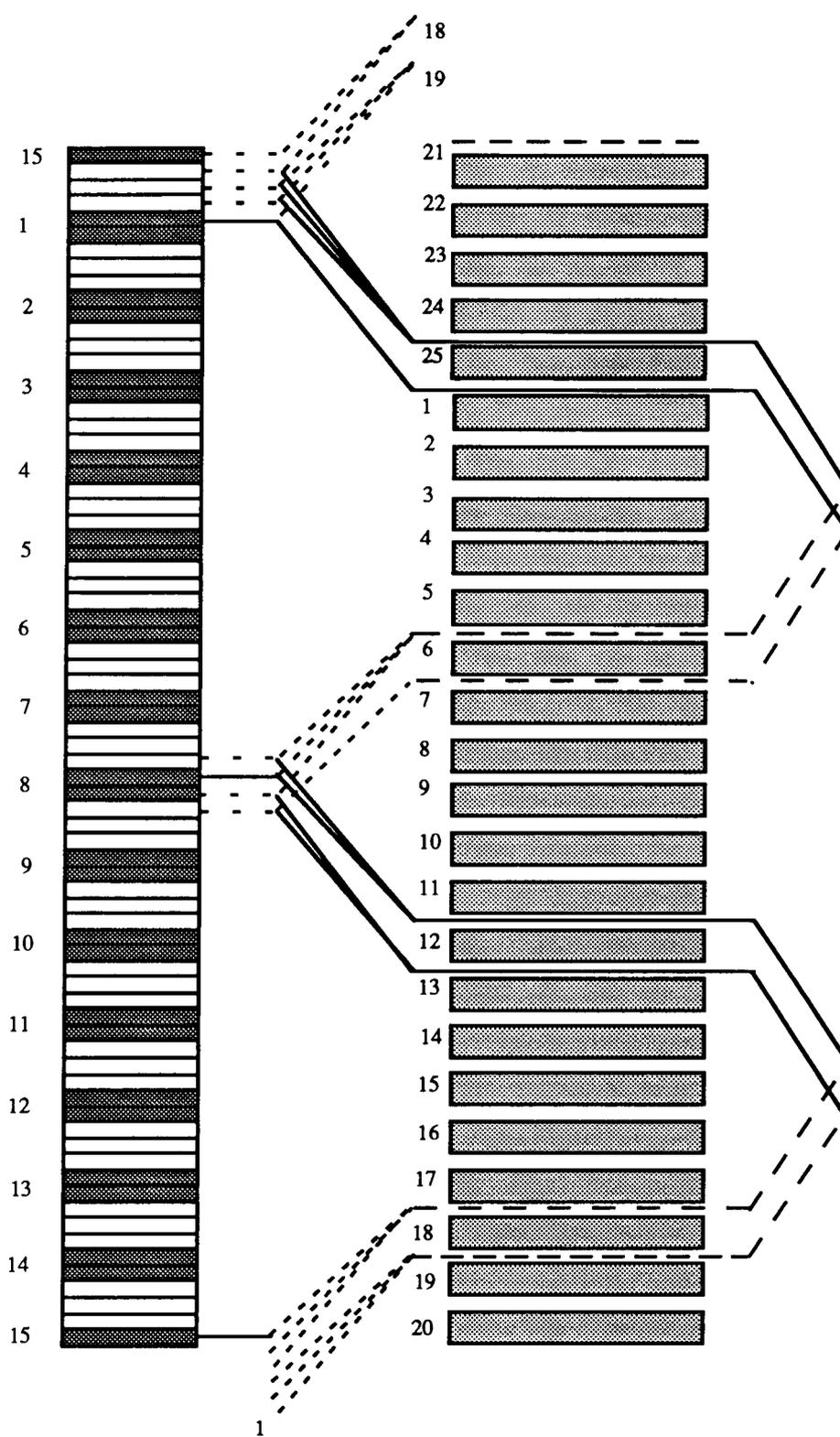


Fig. IV.2 : Bobinage et collecteur de la machine 2.

IV.2.2.2 Mesure du champ de la réaction d'induit

Cette mesure est effectuée , dans la zone de la ligne neutre, à l'aide d'un gauss-mètre en introduisant une sonde à travers les trous de fixation des pôles de auxiliaires.

L'induit est alimenté seul, la variation du champ de la réaction d'induit en fonction du courant est donnée par la figure IV.3. Pour un point de fonctionnement donné et en appliquant la formule $e = BLV$, on peut estimer l'ordre de grandeur de la de la f.é.m. induite dans la section en commutation.

D'autre part nous avons effectuée une autre mesure lorsque l'inducteur est alimenté seul, le champ mesuré est très faible et il est de l'ordre de quelques mT. Il s'agit certainement des fuites entre pièces polaires voisines.

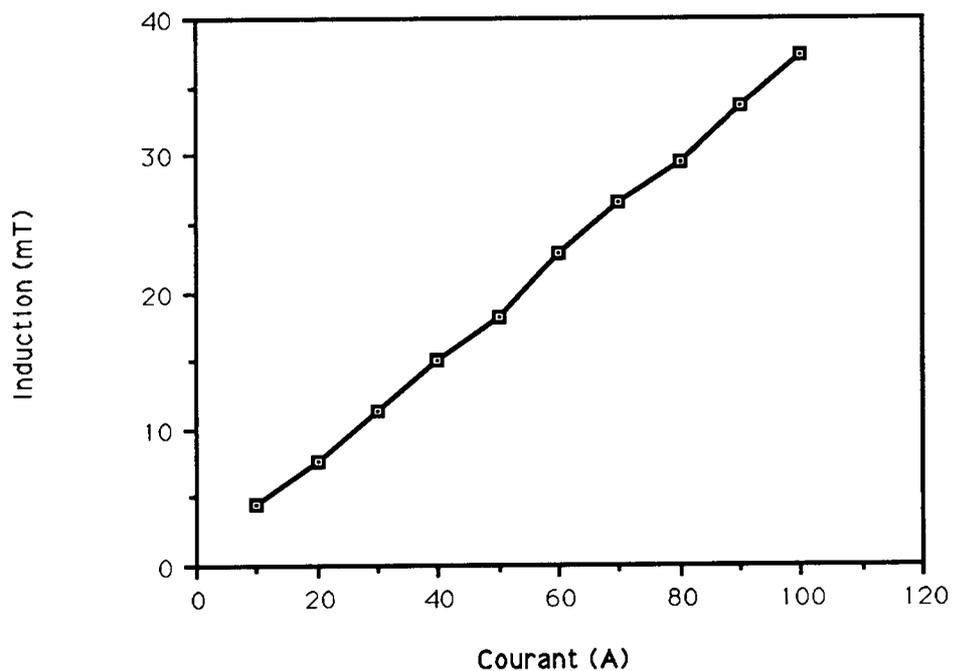


Fig. IV.3 : Variation du champ de la réaction d'induit en fonction du courant de la machine.

IV.2.3 Machine 3

C'est un prototype étudié en collaboration avec la société Radio-Energie, il est fabriqué spécialement pour étudier le phénomène de la commutation avec assistance électronique externe. Les caractéristiques de cette machine sont déjà données au §.II.2. Les dimensions et les plans des différentes parties de la machine sont présentées en annexe IV.

Les machines 2 et 3 ont le même type d'enroulement (ondulé-série) mais présentent des sections différentes. Les conducteurs d'une section du bobinage de la machine 2 sont répartis sur plusieurs encoches (cf. fig. IV.2), alors que ceux d'une section de la machine 3 sont logés dans la même encoche (cf. fig. II.9). La caractéristique à vide de la machine 3 est donnée en annexe V.

IV.3 EXPERIMENTATION DU SYSTEME BALANCIER

IV.3.1 Dispositif d'aide à la commutation

Le premier système d'aide à la commutation, dit de type balancier, utilise comme dispositif électronique le montage de la figure IV.4 et comporte :

- deux thyristors principaux T1 et T2 reliés chacun à deux balais voisins,
- un condensateur C qui fournit la tension d'aide à la commutation,
- un thyristor auxiliaire, associé à une inductance, permettant l'inversion de la tension aux bornes du condensateur.

Le principe de fonctionnement du système comporte plusieurs séquences dont la plus importante, celle de commutation, est représentée sur la figure IV.4a.

Séquence I : séquence de commutation

Initialement le courant I est acheminé par balai B1 et T1, lorsque le balai B2 arrive au contact de la lame m2, on amorce T2, I commute du balai B1 vers le balai B2. Le sens du courant dans la section s1 s'inverse.

En supposant que la chute de tension dans les deux balais est identique, la variation de la tension aux bornes du condensateur pendant la commutation est donnée par l'équation suivante :

$$u_c(t) = U_{c0} \cos \frac{t}{\sqrt{\ell_s C}} \quad (1)$$

avec

U_{c0} tension du condensateur avant la commutation

C capacité du condensateur d'aide à la commutation

ℓ_s l'inductance équivalente de la section en commutation

Cette inductance est délicate à définir du point de vue théorique. Les expériences menées montrent, cependant, que tout se passe comme si la section en commutation se comporte une simple inductance.

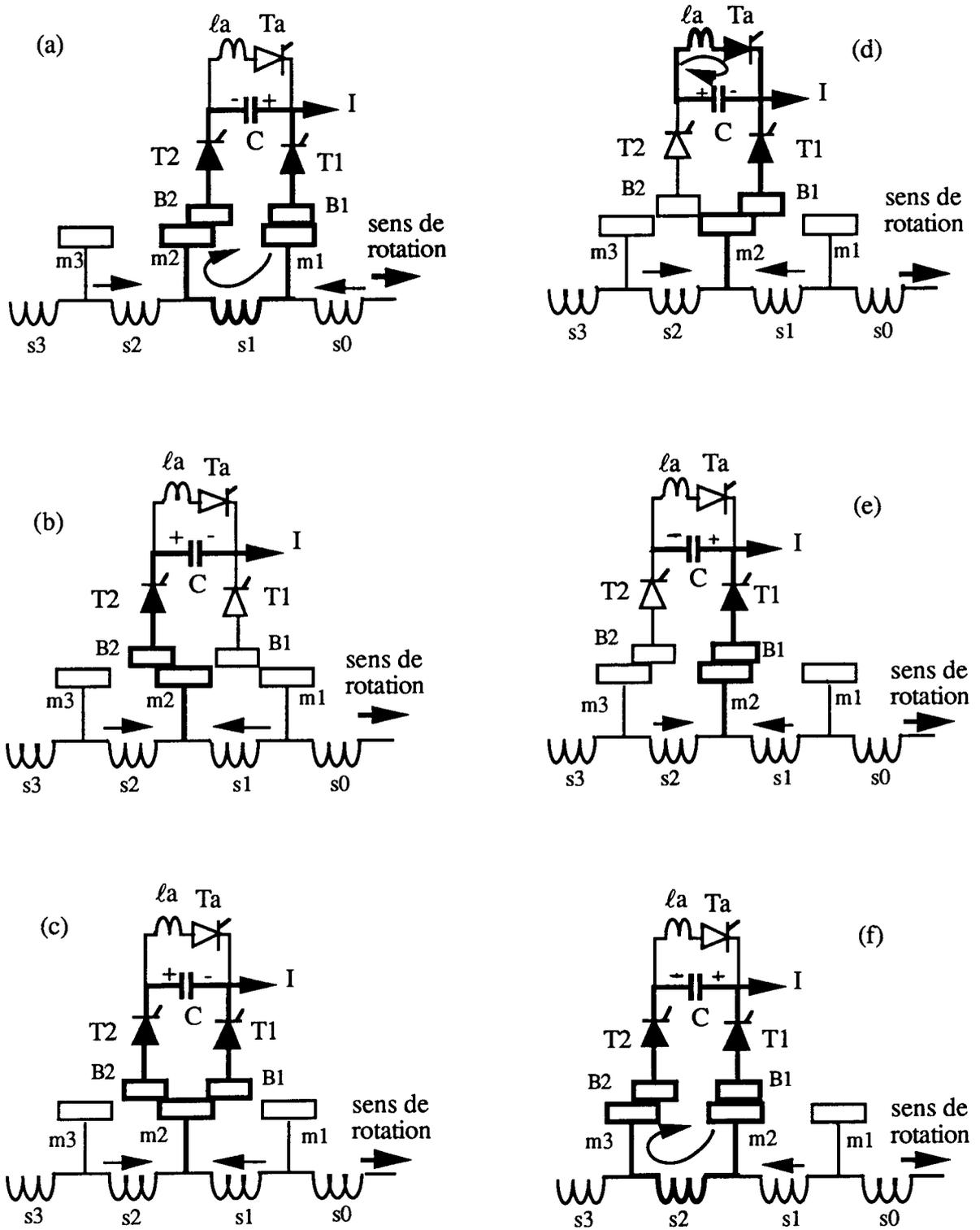


Fig. IV.4 : Séquences de fonctionnement du système balancier.

Le courant i_c fourni par le condensateur s'oppose dans T1 au courant principal dans le balai B1. Nous avons

$$i_c(t) = -\sqrt{\frac{C}{\ell_s}} U_{c0} \sin \frac{t}{\sqrt{\ell_s C}} \quad (2)$$

La commutation est terminée à $t = t_{com}$ lorsque le courant i_{T1} dans T1 est nul : $i_{T1}(t_{com}) = I + i_c(t_{com})$. La durée de commutation est alors :

$$t_{com} = \sqrt{\ell_s C} \arcsin\left(\frac{I}{U_{c0}} \sqrt{\frac{\ell_s}{C}}\right) \quad (3)$$

Celle-ci est maximum lorsque la décharge du condensateur est totale; dans ce cas la durée de commutation est $T_{com} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\ell_s C}$.

Séquence II: phase de charge du condensateur (fig. IV.4 b)

Fin de la commutation, le thyristor T2 conduit seul et le condensateur se charge à courant constant I. La tension aux bornes du condensateur est

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^{T_{ch}} I \cdot dt = \frac{1}{C} \cdot I \cdot T_{ch}$$

où T_{ch} représente la durée de charge du condensateur. Sa valeur minimale dépend des dimensions des balais et des lames et sa valeur maximale est contrôlable par le thyristor T1.

Séquence III: commutation électronique (T2 -->T1) (fig. IV.4 c)

Le balai B1 arrive en contact de la lame m2 les deux balais sont en contact simultanément avec cette lame, on amorce le thyristor T1 le thyristor T2 se bloque instantanément et le courant commute de T2 vers T1 c'est une commutation électronique qui ne concerne pas les sections de la machine.

Séquence IV: phase d'inversion du condensateur (fig. IV.4 d)

Pendant cette phase le thyristor T1 conduit seul. Pour préparer la prochaine commutation, on amorce le thyristor auxiliaire T_a. L'inversion de la tension U_c se fait via l'inductance ℓ_a pendant la durée :

$$T_{inv} = \pi\sqrt{\ell_a C}.$$

Séquence V (fig. IV.4 e)

L'inversion de la charge du condensateur est terminée, T1 continue à conduire seul jusqu'à la prochaine commutation .

Séquence VI (fig. IV.4 f)

Le balai B2 arrive au contact de la lame m3, cette séquence est identique à la première , la commutation concerne maintenant la section s2.

IV.3.2 Assistance de la machine 1 [1]

Le but de ces essais est donc la validation de l'assistance du type balancier sur une machine industrielle (moteur de traction électrique monté sur les voitures électriques de Peugeot) utilisant un collecteur classique.

IV.2.2.1 Montage expérimental

L'objectif initial, du passage de 75 à 12 sections, était de pouvoir mettre en parallèle les balais de même polarité avant de les connecter à un seul circuit électronique d'aide à la commutation. Ce montage n'a pas pu être expérimenté au delà de quelques dizaines de watts du fait de la circulation de courants de court-circuit.

Le nombre de sections étant impair, la nouvelle structure du collecteur fait apparaître une différence de potentiel entre lignes de balais de même polarité. Leur mise en parallèle n'est donc pas possible. On rappelle que, sur une machine tétrapolaire, il ya quatre lignes de balais, deux positives et deux négatives distantes, chacune de 90°. Habituellement ces lignes de balais sont reliées 2 à 2 pour donner finalement un seul balai + et un seul balai -. Ici cette mise en parallèle n'est pas réalisée et seulement 2 lignes de balais à 90° l'une de l'autre sont utilisées (figure IV.5).

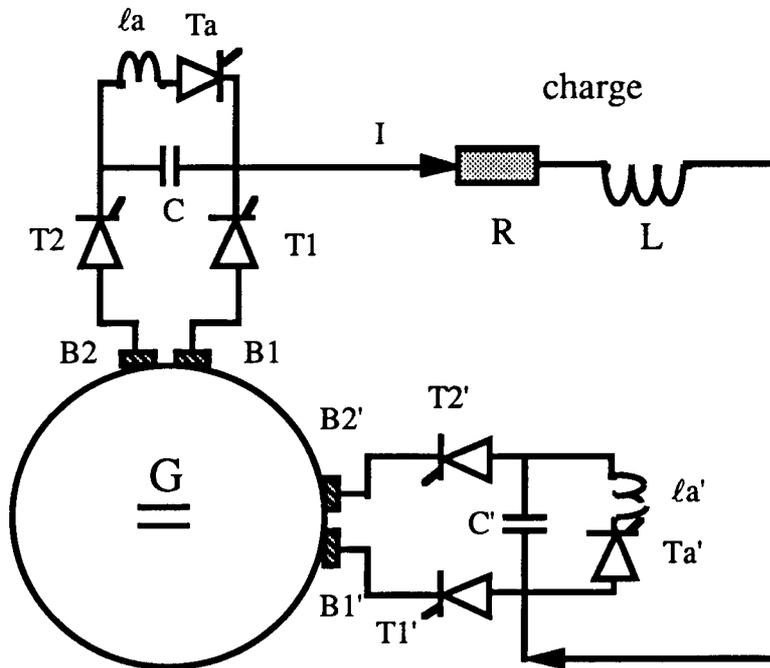


Fig. IV.5 : Montage expérimental du système balancier.

Les dimensions des balais et leur écartement sont choisies telles que les conditions de fonctionnement soient respectées. La synchronisation du déclenchement des thyristors avec les contacts des balais est obtenue en utilisant un disque troué simulant la dissymétrie du collecteur.

Le schéma synoptique de la commande des thyristors est représenté sur la figure IV.6. Les impulsions des gâchettes des thyristors $T1$ et $T2$ sont fournies par des capteurs à infrarouge et mise en formes par une logique simple. L'impulsion de la gâchette du thyristor auxiliaire est obtenue par un déphasage de l'impulsion de $T2$ à l'aide de circuits monostables.

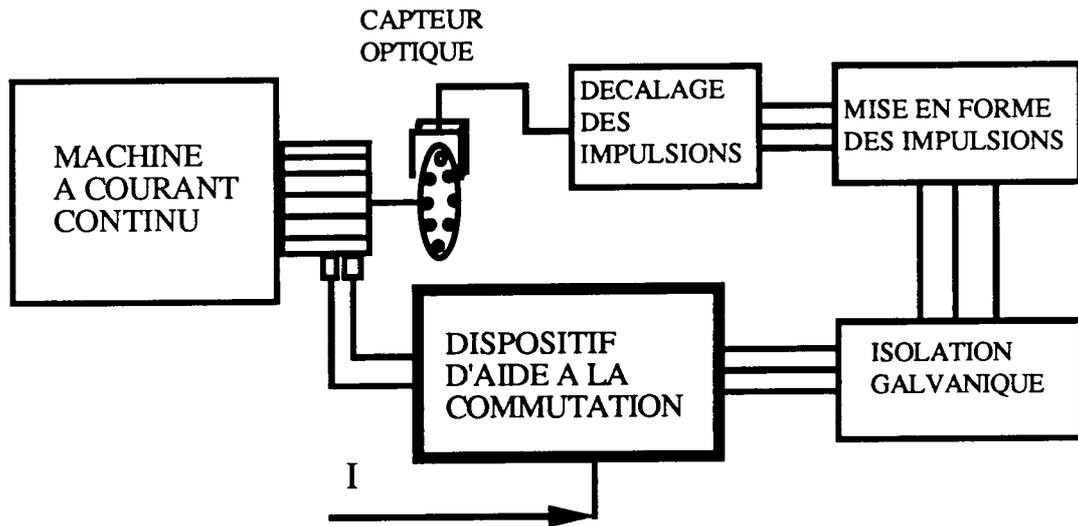


Fig. IV.6 - Assistance de la machine 1 :
Schéma synoptique de la commande du balancier

IV.2.2 Résultats expérimentaux

Les expériences sont menées en fonctionnement génératrice avec une charge (R, L). Plusieurs points de fonctionnement de l'assistance ont été expérimentés à faible puissance pour tester le bon fonctionnement du système.

Le relevé de la figure IV.7 montre l'évolution des courants dans les balais, le courant du condensateur et la tension aux bornes de ce dernier.

Ces courbes sont obtenues avec le point de fonctionnement suivant :

courant de charge $I = 72 \text{ A}$

vitesse de rotation $N = 700 \text{ tr/min}$

balais calés au voisinage de la ligne neutre

tension aux bornes de la machine $V = 29 \text{ V}$.

l'essai est réalisé avec un condensateur de $4500 \mu\text{F}$.

Sur la même figure on distingue les différentes séquences de fonctionnement du système. On remarque que la tension d'aide à la commutation aux bornes du condensateur est élevée, et sa diminution est difficile à obtenir. En effet d'une part, au moment de ces expérimentations nous ne disposons pas suffisamment de condensateurs supportant de fort courant, d'autre part le réglage des impulsions se faisait à l'aide de monostables avec lesquels la diminution du temps de charge est délicat.

La figure IV.8 met en évidence le problème de dissymétrie où toutes les séquences ne sont pas identiques.

IV.2.2.3 Discussion

Avec ce banc d'essai l'augmentation de la puissance est difficile à obtenir et la limitation des performances du système peut s'expliquer par les raisons suivantes:

a - La machine

La machine transformée en 12 sections doit commuter à chaque 1/12 de tour les conducteurs se trouvent répartis dans 12 sur 25 encoches, soit 3 encoches par ligne de balai. Au moment de la commutation les conducteurs se trouvant dans la troisième encoche sont exposés à l'action du champ principal, une forte f.é.m. est alors induite dans la nouvelle section en commutation qui devient très gênante à forte vitesse. A cette f.é.m., il faut ajouter la f.é.m. de réactance qui devient elle aussi importante à cause du nombre de sections en commutation (6 ou 7 anciennes sections).

La dissymétrie du collecteur nous a contraint à utiliser deux lignes de balais sur les quatre existants, ce qui fait augmenter la densité de courant au niveau des balais.

b - La commande du dispositif

Le réglage des impulsions des thyristors s'est effectué par des monostables, ceci est délicat car la synchronisation à l'aide de potentiomètres, de la commande avec les contacts est difficile à obtenir pour chaque vitesse.

c - Les balais

Un paramètre que nous maîtrisons mal est celui de l'influence des balais. Les balais originaux du type électrographitique (tendres) ont été remplacés par des balais métallo-graphitiques (durs) portés par des supports fabriqués au laboratoire dont le réglage de la pression n'est pas prévu.

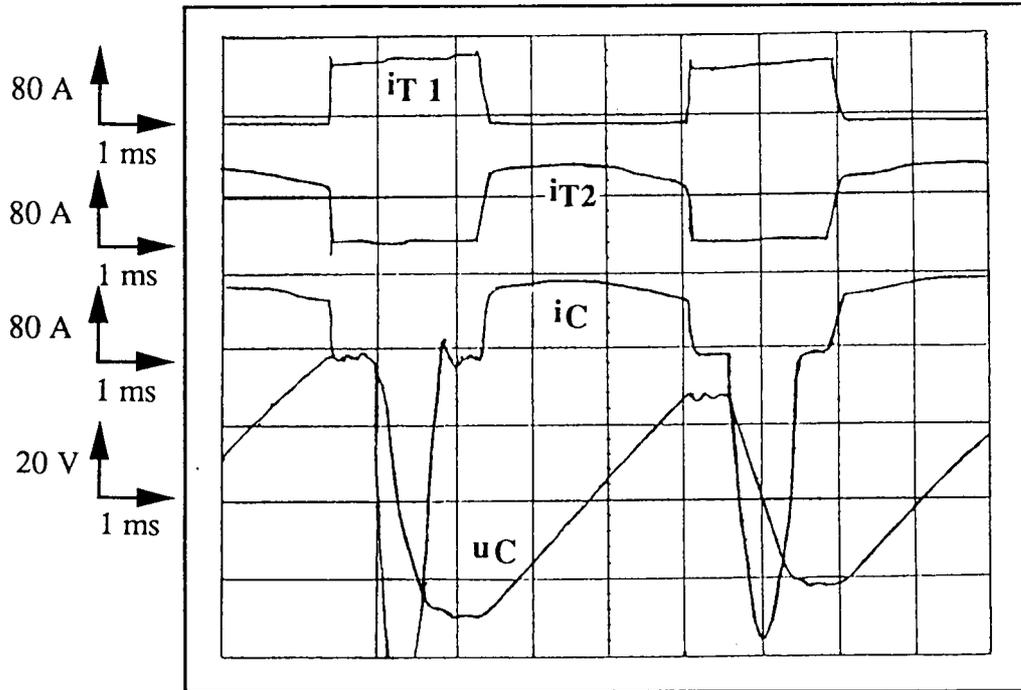


Fig. IV.7 : Machine 1 assistée par le système balancier.

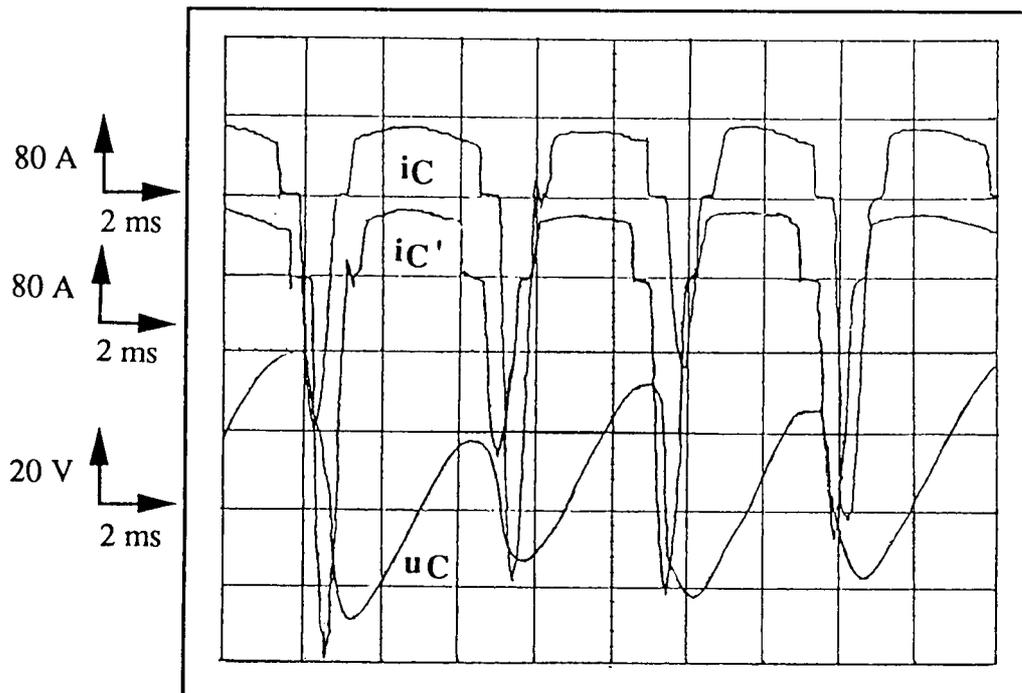


Fig. IV.8: Mise en évidence de la dissymétrie de la Machine 1.

IV.3.3 Assistance de la machine 2 [3]

IV.3.3.1 Montage expérimental

Le montage expérimental est toujours celui de la figure IV.6.

Les impulsions des thyristors sont gérées maintenant par ordinateur grâce à une carte contenant des compteurs programmables. Le schéma synoptique de la commande est donné par la figure IV.9.

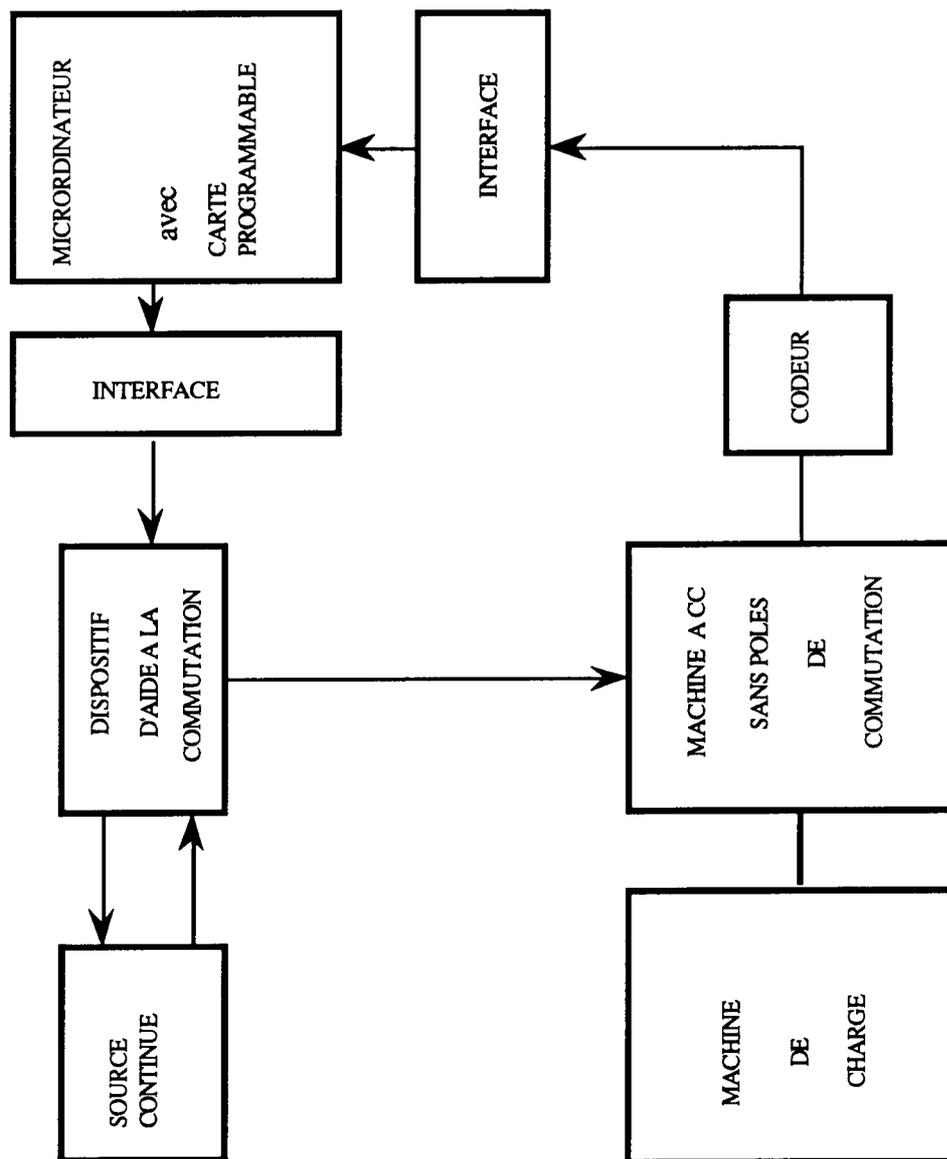


Fig. IV.9 : Schéma synoptique de la commande de l'assistance de la machine 2.

Les chronogrammes des signaux de commande des thyristors sont donnés par la figure IV.10. La synchronisation est assurée par un codeur fournissant deux signaux, le premier S0 sert de référence et génère une impulsion par tour en phase avec un début de contact, le second SH sert d'horloge et génère 600 impulsions par tour multiple du nombre de lame du collecteur. L'ordinateur est chargé de la simulation du collecteur (SC), et de la production des signaux de commande des thyristors (ST1, ST2, STa). La méthode de réglage des contacts est donnée en annexe A.VI.

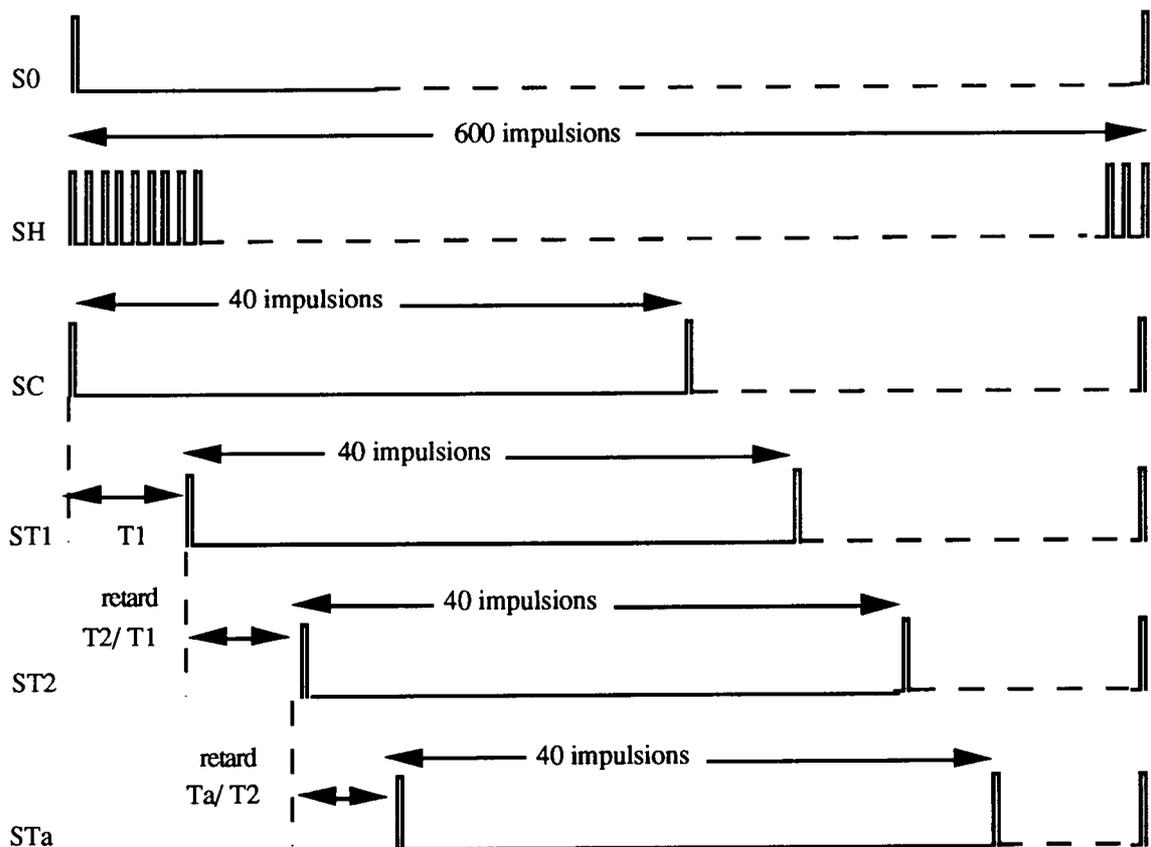


Fig. IV.10 : Chronogrammes des signaux de commande des thyristors.

IV.2.3.2 Résultats expérimentaux

La figure IV.11, relevée avec deux oscilloscopes synchronisés, donne les impulsions de commande ST1 et ST2, le courant i_C et la tension u_C du condensateur C, et les courants dans les balais B1 et B2. Ces résultats sont obtenus pour le point de fonctionnement suivant :

- balais placés approximativement sur la ligne neutre.
- courant de charge $I = 100\text{A}$.
- vitesse de rotation 2900 tr/min .
- capacité du condensateur $C = 1600\ \mu\text{F}$
- tension mesurée entre B1 et B1' égale à 72 V .

Sur cette figure on distingue les différentes séquences étudiées précédemment. La mesure, du temps de commutation et de la tension initiale d'aide à la commutation, associée à l'équation (3) permet l'évaluation de l'inductance ℓ_S de la section vue entre B1 et B2. Pour $t_{com} = 160\ \mu\text{s}$, et une tension de charge initiale égale à 12 V , on trouve ℓ_S égale à $17\ \mu\text{H}$.

L'examen de la tension du condensateur montre que sa valeur moyenne n'est pas nulle ce qui laisse penser qu'il existe une tension induite dans la section en commutation de signe défavorable à la commutation. Avec la formule $e = nBLv$ et les données suivantes :

- $B = 40\text{ mT}$ pour un courant d'induit de 100 A (cf. fig. IV.3),
- $v = 14\text{ m/s}$, vitesse périphérique du collecteur de rayon 4.5 cm et tournant à 2900 tr/min .
- $L = 13\text{ cm}$. (longueur utile du rotor)
- $n = 20$ nombre de conducteurs, répartis sur 8 encoches, de la section en commutation (cf. Fig. IV.2), nous trouvons une tension induite de l'ordre de 1.5 V .

Notons qu'avec le même condensateur et la même position des balais et à charge constante la variation de vitesse est expérimentée avec succès.

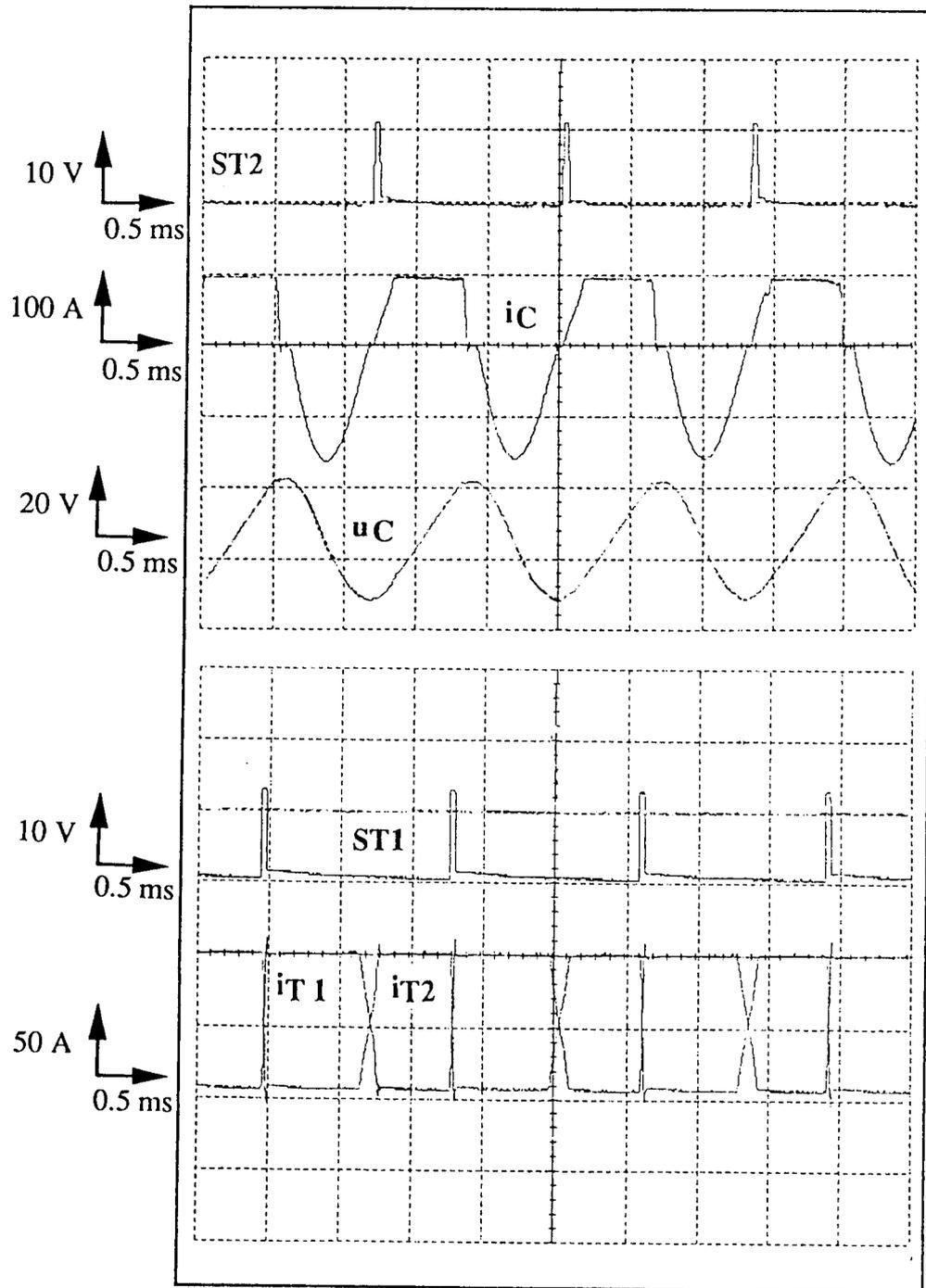


Fig. IV.11 : Assistance de la machine 2 avec le système balancier.

IV.3.4 Assistance de la machine 3 [4]

Les conditions d'expérimentation de la machine 3 sont identiques à celles de la machine 2. La seule différence la machine 3 est dotée d'un codeur fournissant 744 impulsions (multiple du nombre de ses sections).

Dans l'expérimentation suivante la tension et le courant aux bornes de la génératrice sont 120 V et 50 A avec des balais centrés sur la ligne neutre.

La figure IV.12 donne les relevés des courants dans le thyristor T2 (a) et le condensateur C (b), et la variation de la tension aux bornes du condensateur C (c), lorsque la machine est assistée par le système balancier. La valeur de la capacité du condensateur utilisé est égale à 1500 μF .

La mesure, du temps de commutation et de la tension initiale d'aide à la commutation, associée à l'équation (3) permet l'évaluation de l'inductance ℓ_S de la section entre B1 et B2. Avec $t_{\text{com}} = 50 \mu\text{s}$, et une tension de charge initiale égale à 15 V, on trouve ℓ_S entre 15 et 20 μH .

Les relevés du courant dans le balai B2 et la tension de commutation entre B1 et B2 sont donnés par la figure IV.13 . Sur cette figure on distingue les phases suivantes:

- la commutation T2 --> T1 au point A,
- entre A et B, seul le balai B1 est conducteur,
- au point B, le balai B2 arrive au contact d'une lame,
- entre B et C, nous mesurons une partie de la tension d'inversion.
- la tension d'aide à la commutation se trouve entre E et F et elle est de l'ordre de 7 à 8 V.

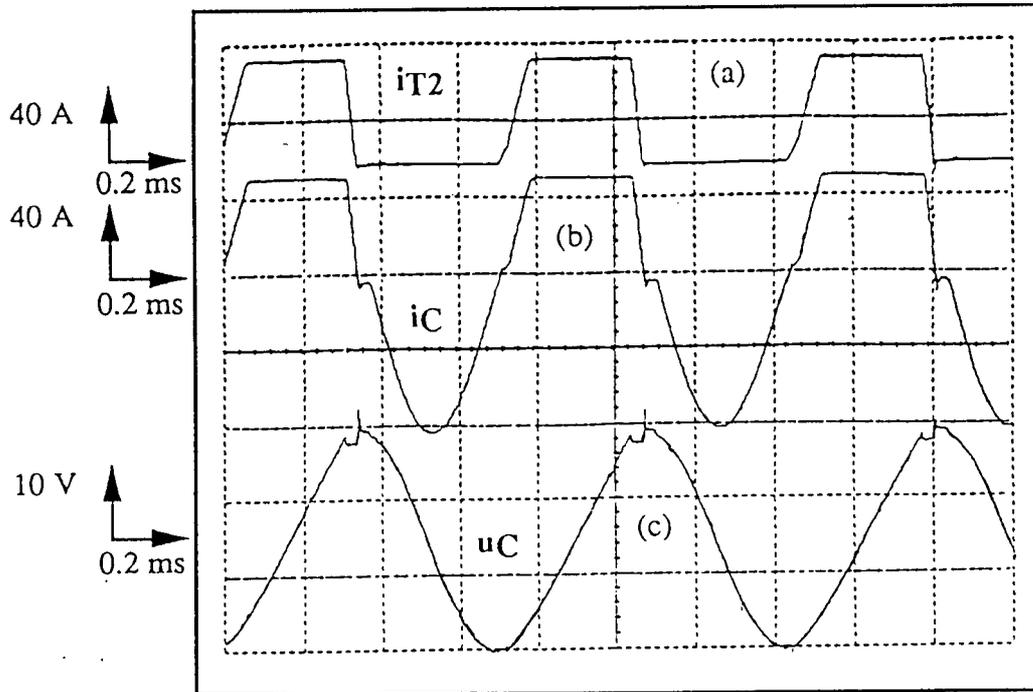


Fig. IV.12 : Machine 3 assistée par le système balancier

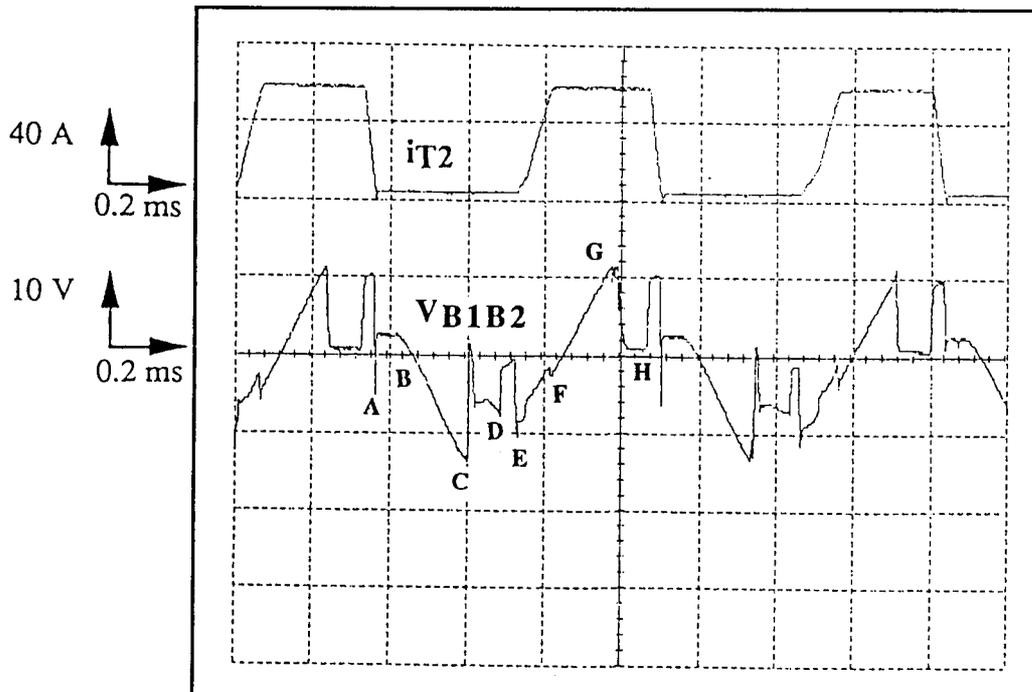


Fig. IV.13 : Mesure de la tension d'aide à la commutation (machine 3).

IV.4 EXPERIMENTATION DU SYSTEME SYMETRIQUE (A COLLECTEUR UNIQUE)

IV.4.1 Dispositif d'aide à la commutation

Le dispositif d'aide à la commutation, composé d'un condensateur entre deux diodes et deux thyristors montés en H, est donné par la figure IV.14. Les deux diodes sont placées du côté de la machine en série avec les balais; elles permettent un début de commutation à chaque fermeture de contact. Les deux thyristors contrôlent la charge du condensateur dans les deux sens; ils travaillent de façon similaire.

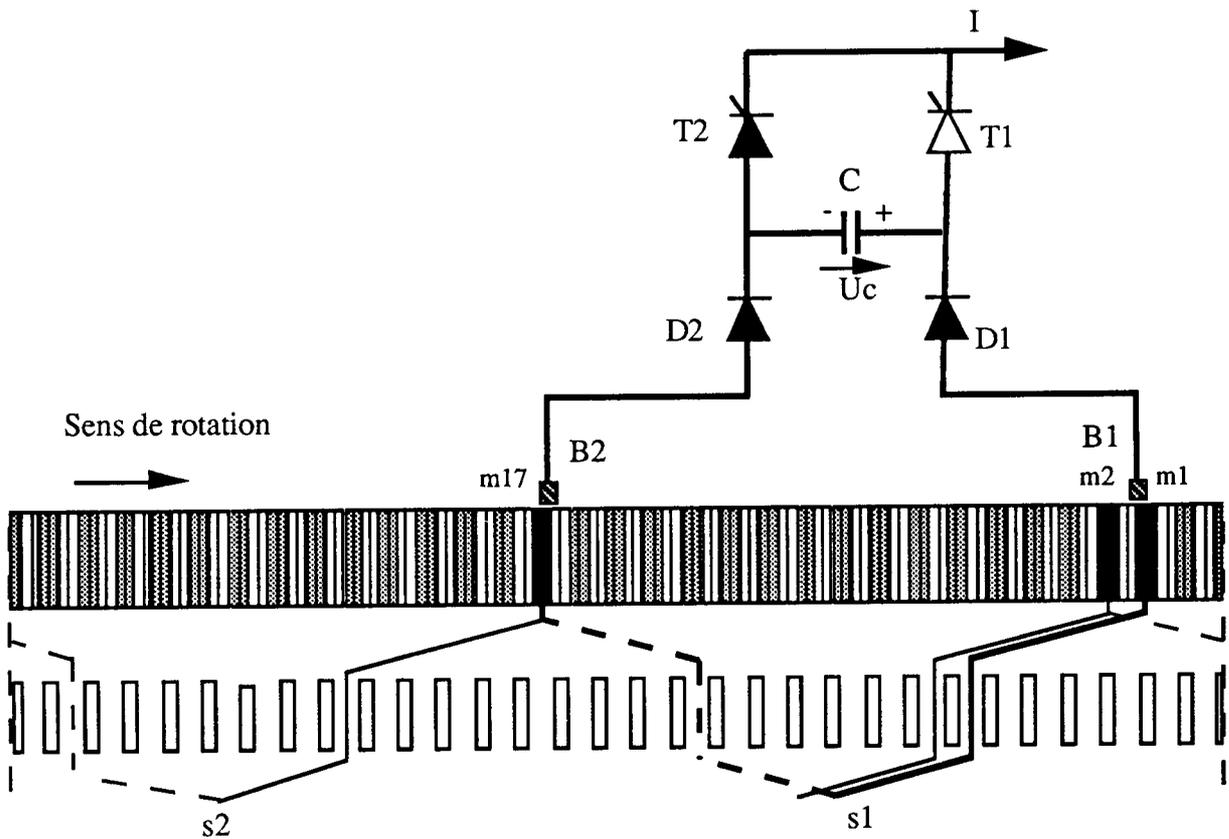


FIG. IV.14 : Principe de fonctionnement du système symétrique.

Le fonctionnement du système comprend six séquences :

- Séquence I (fig . IV.15a). Le balai B1 est au contact de la lame m1, on amorce le thyristor T2, le condensateur C commence à se charger .

- Séquence II (fig. IV.15b). Lorsque le balai B2 arrive au contact de la lame m17, Le courant commute de D1 vers D2 grâce à une tension $U_c > 0$. Le courant dans la section s1 s'inverse et le balai B1 quitte la lame m1 à courant nul.

La variation de la tension aux bornes du condensateur pendant cette séquence est donnée par l'équation suivante:

$$u_c(t) = U_{c0} \cos \frac{1}{\sqrt{\ell_s C}} t + \sqrt{\frac{\ell_s}{C}} I \sin \frac{1}{\sqrt{\ell_s C}} t \quad (4)$$

avec

U_{c0} tension du condensateur avant la commutation

ℓ_s inductance de la section en commutation

C capacité du condensateur.

I courant fourni par la machine.

Le courant dans le condensateur et le balai B2 est :

$$i_c(t) = I \cos \frac{1}{\sqrt{\ell_s C}} t - \sqrt{\frac{C}{\ell_s}} U_{c0} \sin \frac{1}{\sqrt{\ell_s C}} t \quad (5)$$

La fin de la commutation aura lieu lorsque le courant $i_c(t)$ s'annule, sa durée est alors donnée par :

$$t_{com} = \sqrt{\ell_s C} \arctan g\left(\frac{I}{U_{c0}} \sqrt{\frac{\ell_s}{C}}\right). \quad (6)$$

Séquence III (fig. IV.15c). La commutation de S1 est achevée, le courant principal est alors acheminé par la diode D2 et le thyristor T2.

Séquence IV (fig. IV.15 d). La tension U_c toujours positive permet d'amorcer T1, T2 se bloque et la tension aux bornes du condensateur peut changer de signe.

Séquence V (fig. IV.15 e). Le balai B1 atteint la lame m2, alors que B2 est toujours au contact de m17. Le courant commute de D2 vers D1; le courant dans s2 s'est inversé.

Séquence VI (fig. IV.15 f). Le courant principal est acheminé maintenant par D1 et T1. Cette séquence termine le cycle de fonctionnement et la prochaine séquence sera identique à la première.

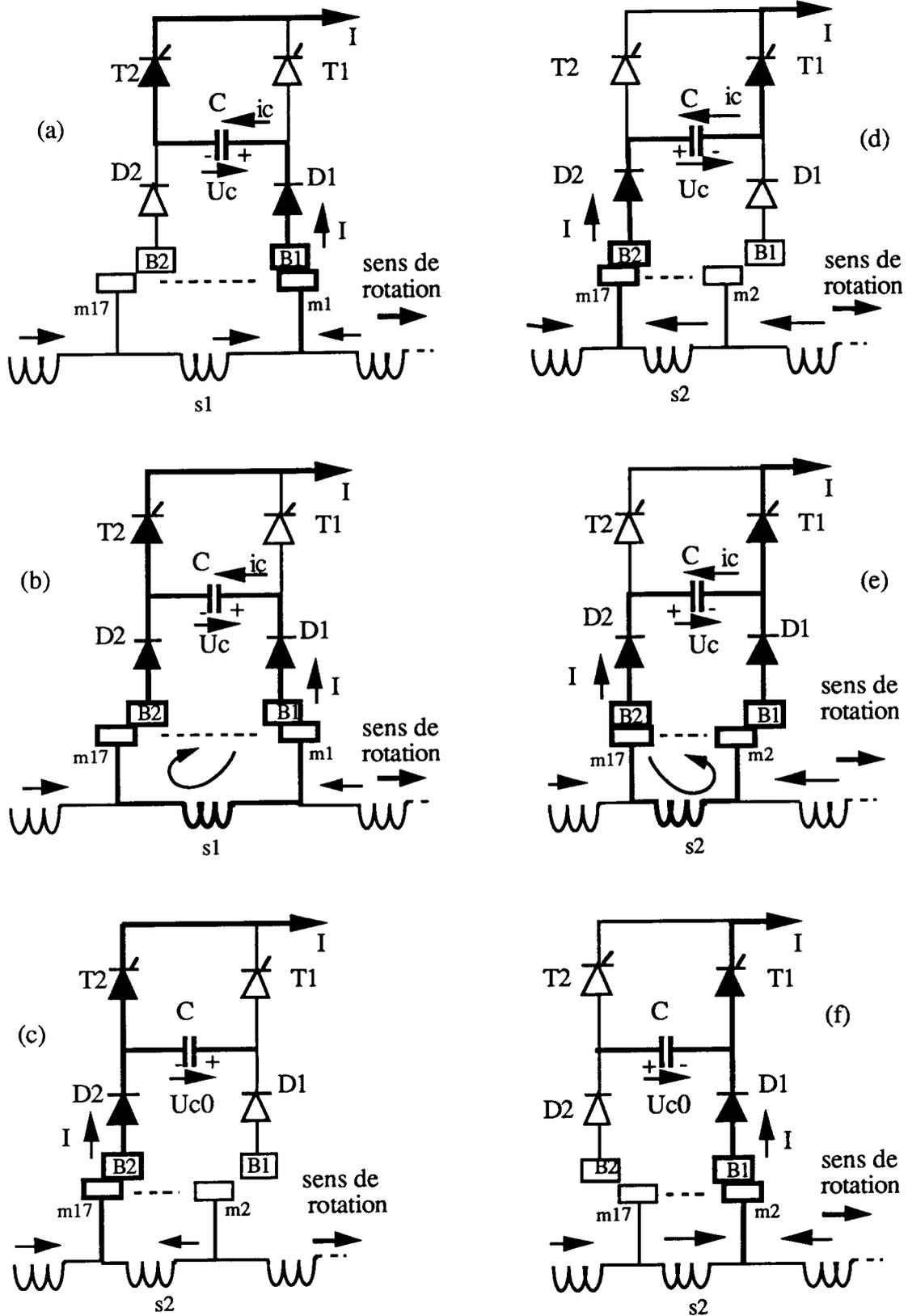


Fig. IV.15 : Séquences de fonctionnement du système symétrique.

Les commutations des deux sections s1 et s2 se sont effectuées de façon parfaitement analogue : le système est "symétrique".

Le résumé de ces séquences est donné par la figure IV.16.

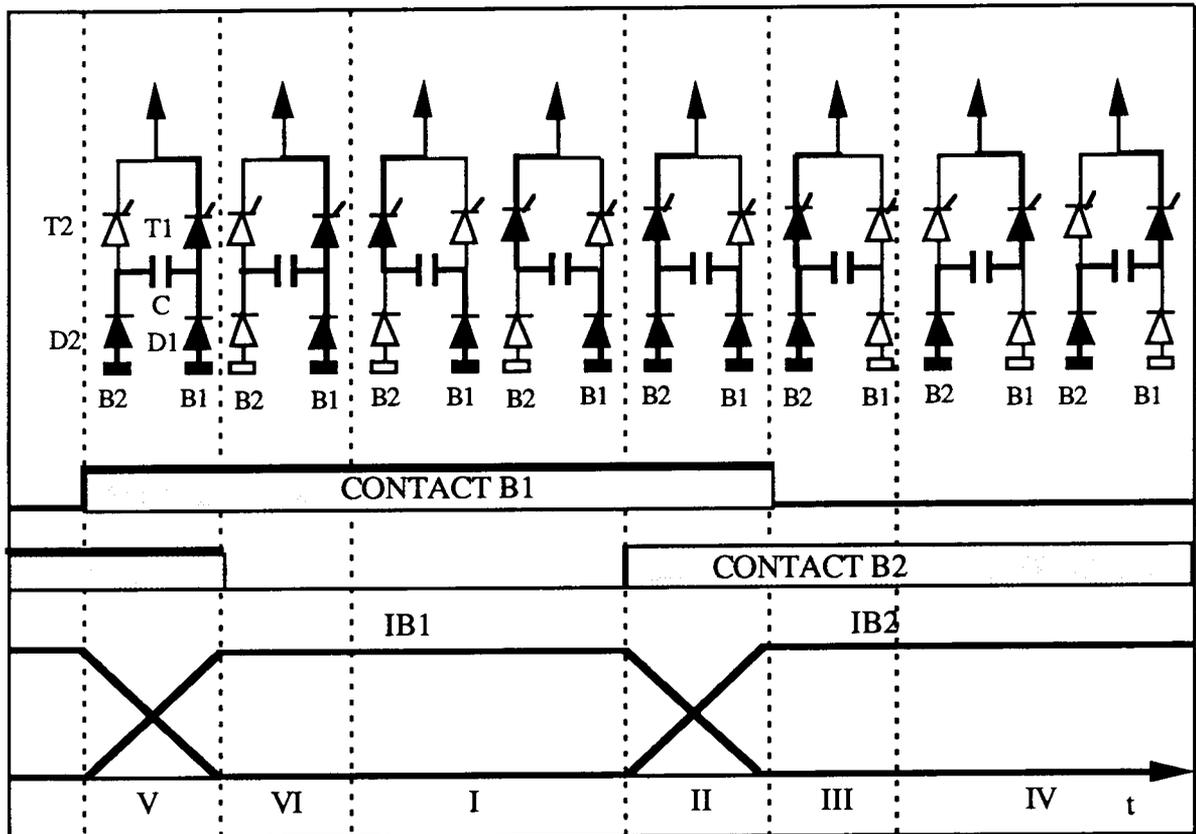


Fig. IV.16 : Résumé des séquences de fonctionnement.

IV.4.2 Assistance de la machine 2 [3]

IV.4.2.1 Montage expérimental

Le montage expérimental de l'assistance de la machine 2 avec le système symétrique à collecteur unique est représenté sur la figure IV.17. La tension aux bornes du condensateur a un double rôle, elle est utilisée pour commuter les sections mais aussi pour bloquer les semi-conducteurs. La tension nécessaire au blocage des thyristors est plus grande que la tension d'aide à la commutation, il fallait ajouter une inductance ℓ en série avec l'un des balais pour créer un diviseur de tension inductif. Le principe de la commande des thyristors est le même que celui du balancier.(cf. fig. IV.9).

En fonctionnement moteur et au démarrage les deux thyristors sont amorcés par une source indépendante. Après quelques tours, à l'aide d'un démultiplexeur on applique les impulsions provenant de l'ordinateur.

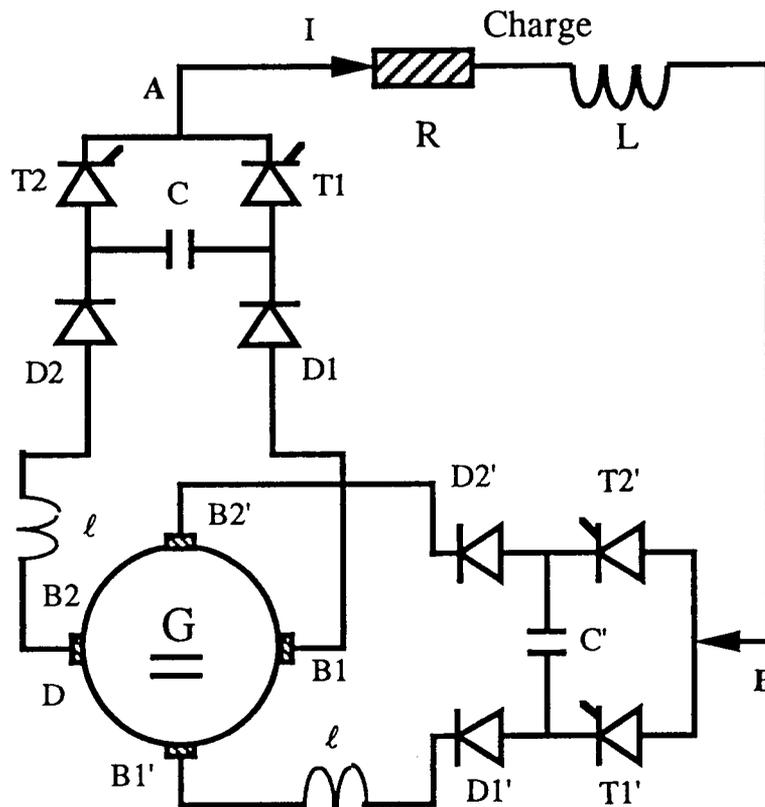


Fig. IV.17 : Montage expérimental du système symétrique.

IV.4.2.2 Résultats expérimentaux

La figure IV.18 donne les résultats obtenus lorsque la machine 2 est assistée par le système symétrique. Les relevés représentent le courant i_{B1} dans le balai B1, le courant i_C et la tension u_C aux bornes de C, et enfin le courant i_{T1} et la tension u_{T1} de T1 pour le point de fonctionnement suivant :

- balais placés approximativement sur la ligne neutre.
- courant de charge $I = 100A$.
- vitesse de rotation 2900 tr/min .
- capacité du condensateur $C = 1100 \mu F$.
- tension entre B1 et B1' $U = 60 V$.

La mesure du temps de commutation et de la tension initiale de charge du condensateur combinée avec l'équation 6 permettent l'évaluation de l'inductance totale ($\ell_s + \ell$). Avec $t_{com} = 0.7 \text{ ms}$ et $U_{c0} = 5V$ on trouve $\ell_s = 70 \mu H$.

Pour un point de fonctionnement sensiblement identique (6 kW) la mesure de la tension entre B1 et B2 (figure IV.19) montre que la tension nécessaire à la commutation est très faible (1V) par rapport à celle mesurée dans le cas du balancier (6 à 10 V). La figure explicite les différents niveaux observés provenant du dispositif d'aide à la commutation ou de l'intérieur de la section suivant que les deux ou un seul des balais (B1, B2) conduit.

Sur cette figure on distingue les phases suivantes :

- la commutation $T1 \rightarrow T2$ au point A,
- entre A et B, le balai B1 est seul au contact du collecteur,
- au point B, le balai B2 arrive au contact d'une lame,
- entre B et B', nous pensons qu'il s'agit d'un rebond du balai B2,
- entre B et C, c'est la phase de commutation, la valeur de la tension d'aide à la commutation mesurée est de l'ordre du volt.
- enfin entre C et D, seul le balai B2 est conducteur.

La figure IV.20 donne les relevés des courants dans les quatre balais, l'agrandissement de ces relevés (fig. IV.21) montre que les deux commutations des deux lignes (positive et négative) ne sont jamais simultanées ce qui évite les couplages entre sections en commutation.

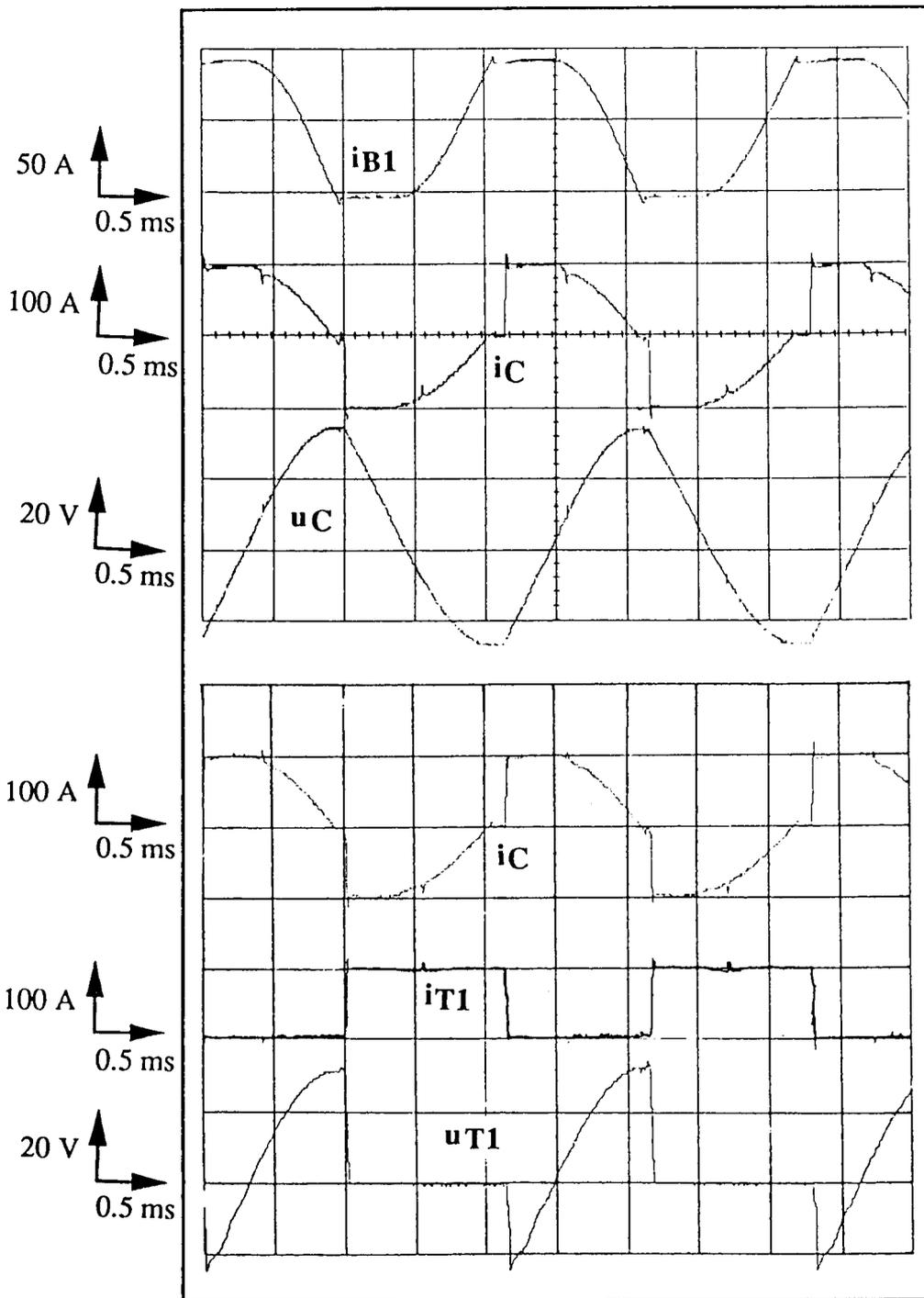


Fig. IV.18 : Machine 2 assistée par le système symétrique.

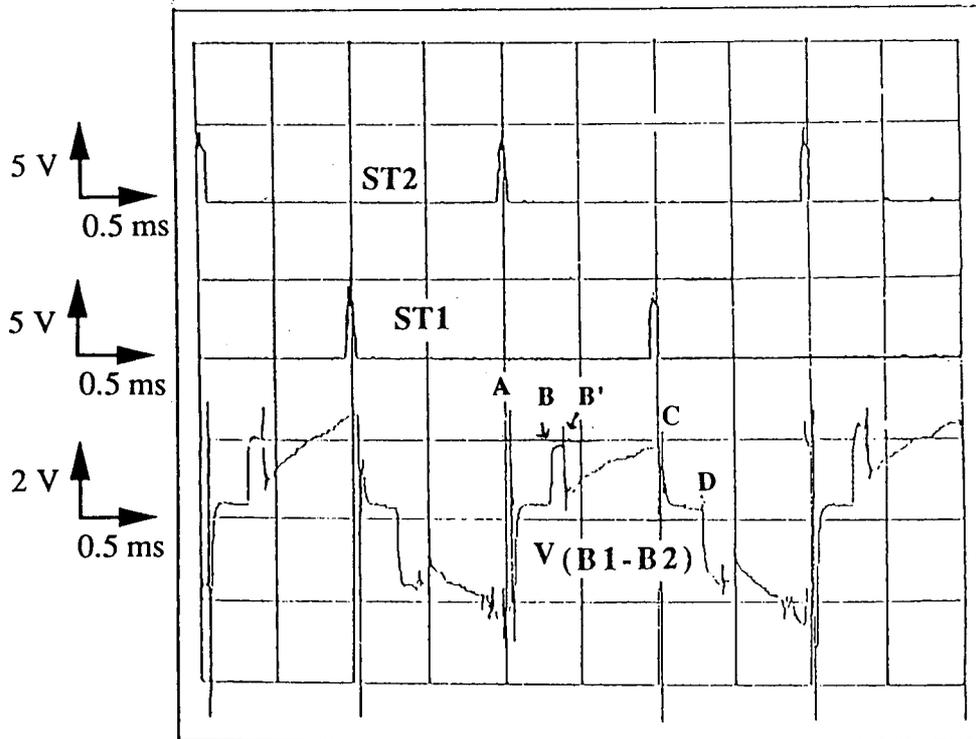


Fig. IV.19 : Mesure de la tension d'aide à la commutation lorsque la machine 2 est assistée par le système symétrique.

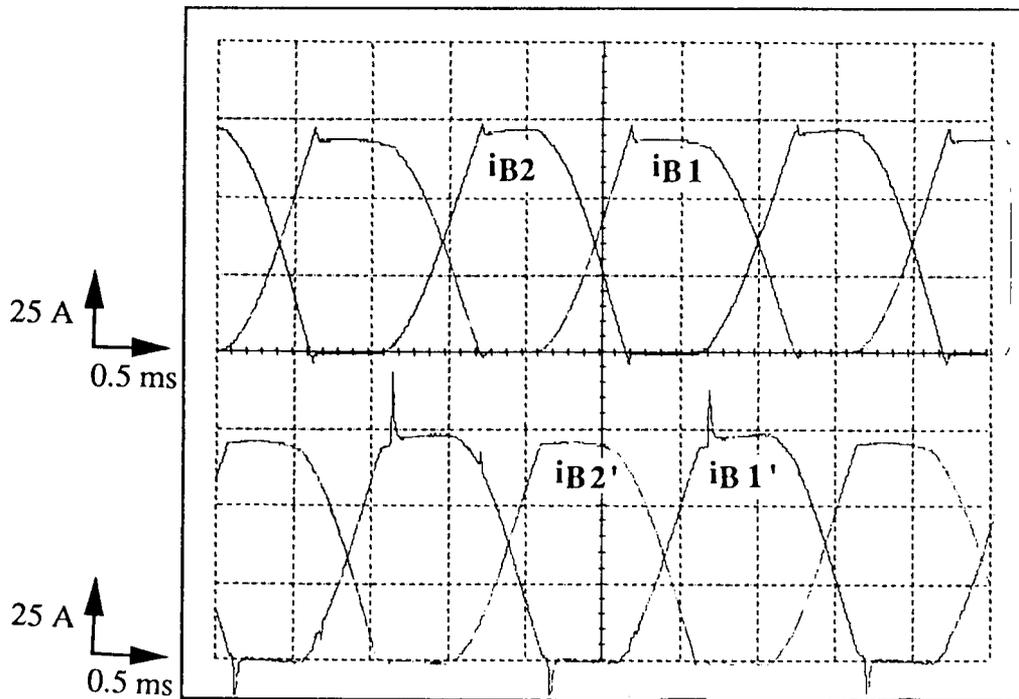


Fig. IV.20 : Courants dans les quatres balais de la machine

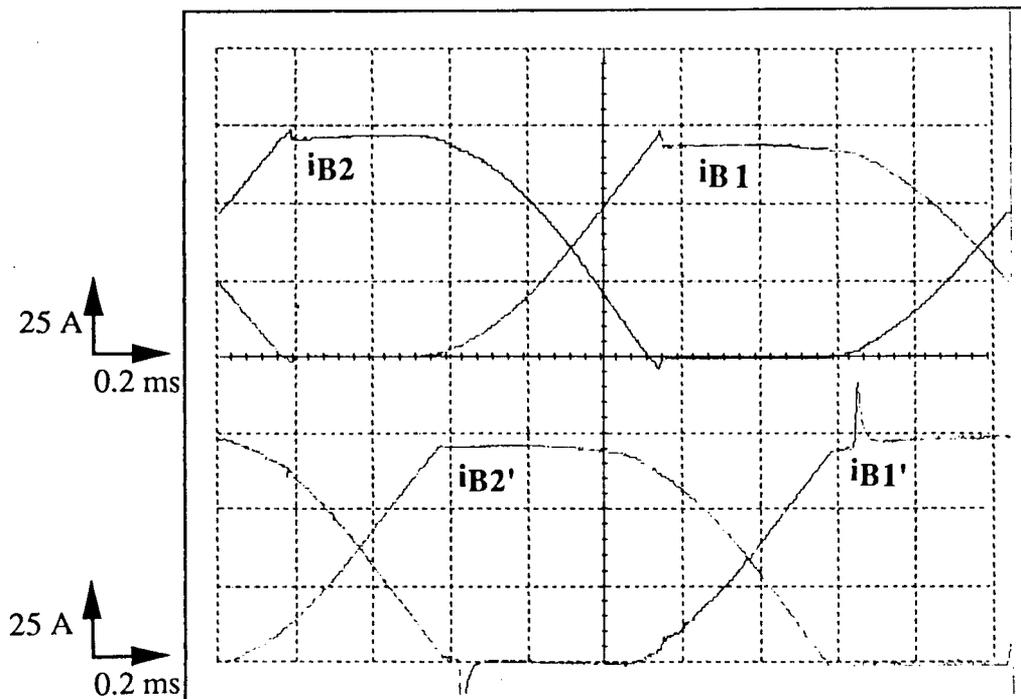


Fig. IV.21 : Visualisation de la commutation sur les deux lignes de balais

IV.4.3 Assistance de la machine 3 [4]

Le montage expérimental est toujours celui de la figure IV.17 mais sans la présence de l'inductance ℓ car la tension d'aide à la commutation est du même ordre de grandeur que la tension de blocage des éléments sem-conducteurs .

La machine 3 a été la première machine testée avec le système symétrique. Les relevés des figures de IV.22 à IV.24 sont obtenus pour des puissances entre 4 et 5 kW. La figure IV.22 donne les relevés des courants dans les balais B1 et B2, du courant i_c et de la tension u_c aux bornes du condensateur. Cette figure met en évidence les différentes séquences de fonctionnement du système décrites au paragraphe 4.

Dans la figure IV.23 nous avons relevé la forme de tension aux bornes de la charge R L, les courants dans les balais (B1 et B2) et le courant traversant le thyristor T1. On remarque que cette tension n'est pas affectée par la présence des dispositifs d'aide à la commutation.

Le relevé des courants dans les balais en fonction de leur contacts est donné par la figure IV.24. Cette figure montre que le début de la commutation est naturelle, les diodes D1 et D2 s'amorcent respectivement à chaque début de contact de B1 et B2. Nous rappelons que sa durée est fixée par les paramètres C , ℓ_s , et la tension initiale de charge du condensateur U_{c0} (cf § IV.1.1).

Les relevés de la figure IV.25 représentent le courant dans un balai (a), le courant dans le condensateur (b), et la tension aux bornes du condensateur (c) pour un point de fonctionnement plus important (6 kW). La valeur de la capacité du condensateur utilisée est égale à $400 \mu\text{F}$. La mesure de $t_{com} = 120 \mu\text{s}$ et de la tension initiale de charge du condensateur au début de la commutation $U_{c0} = 10\text{V}$ et l'utilisation de l'équation (6) donne une inductance ℓ_s de l'ordre de $40 \mu\text{H}$. Cette valeur est de même ordre de grandeur que d'autres valeurs obtenues par des méthodes différentes[27].

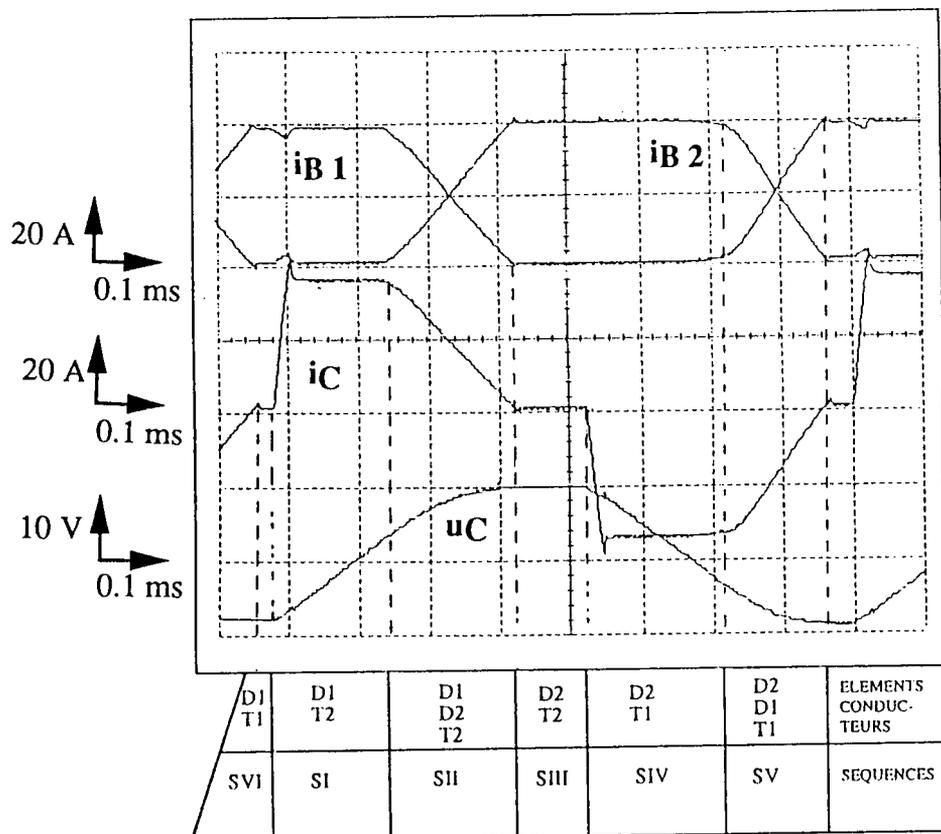


Fig. IV.22 - Machine 3 assistée par le système symétrique :
séquences de fonctionnement

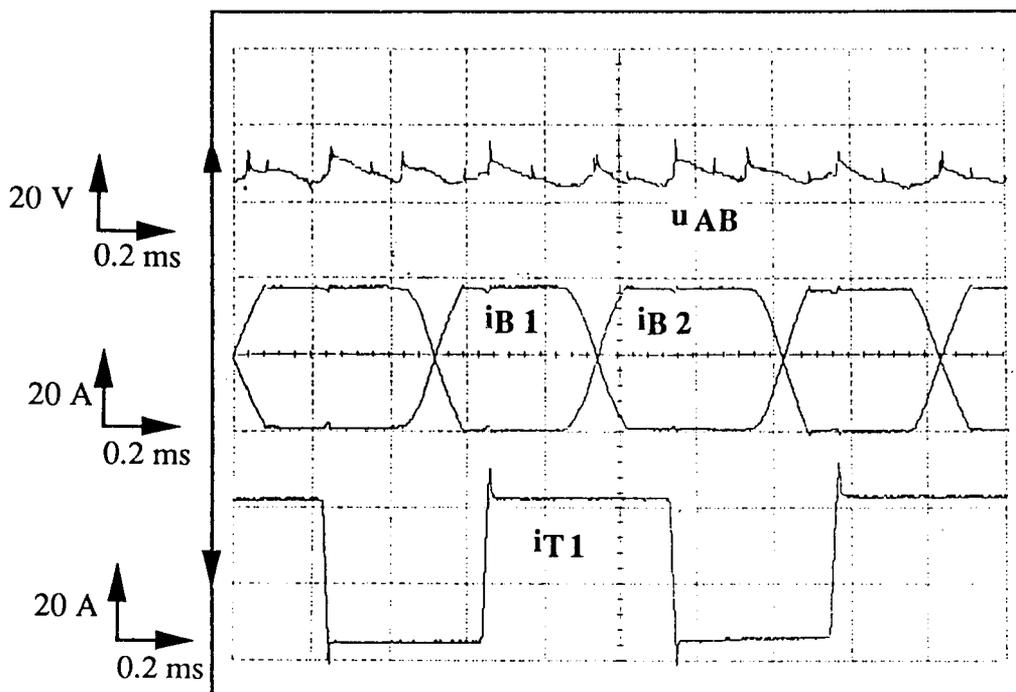


Fig. IV.23 - Machine 3 assistée par le système symétrique :
allure de la tension aux bornes de la charge.

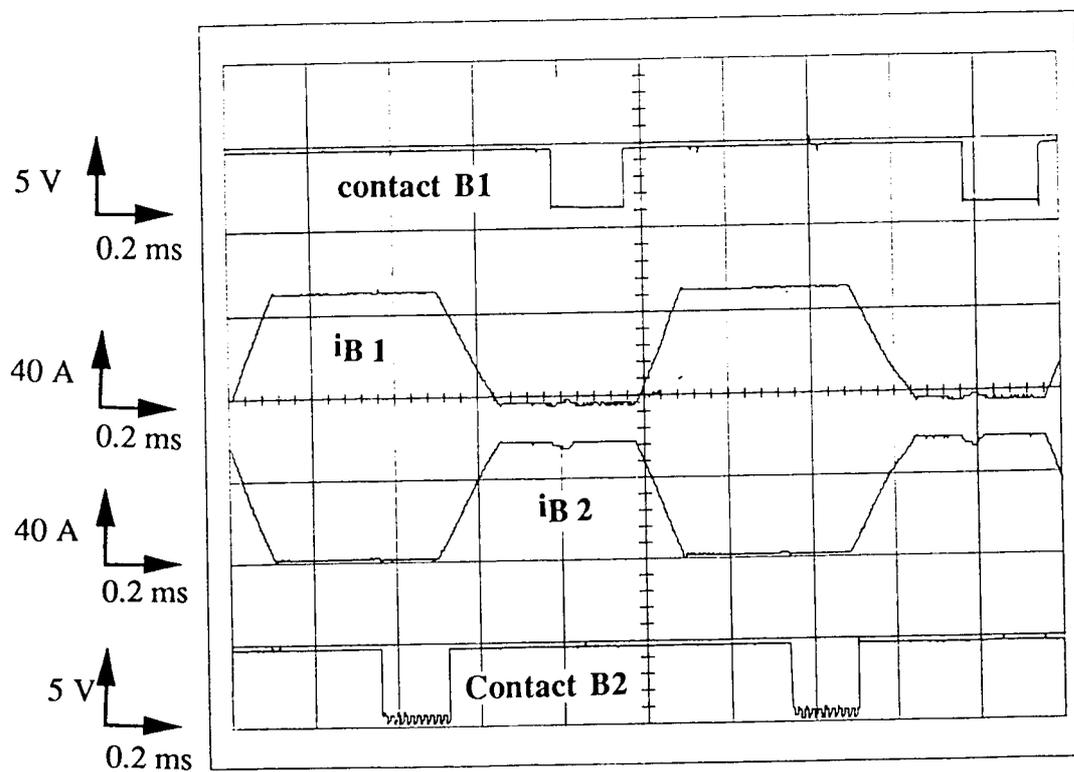


Fig. IV.24 - Machine 3 assistée par le système symétrique : contacts et courants des balais B1 et B2.

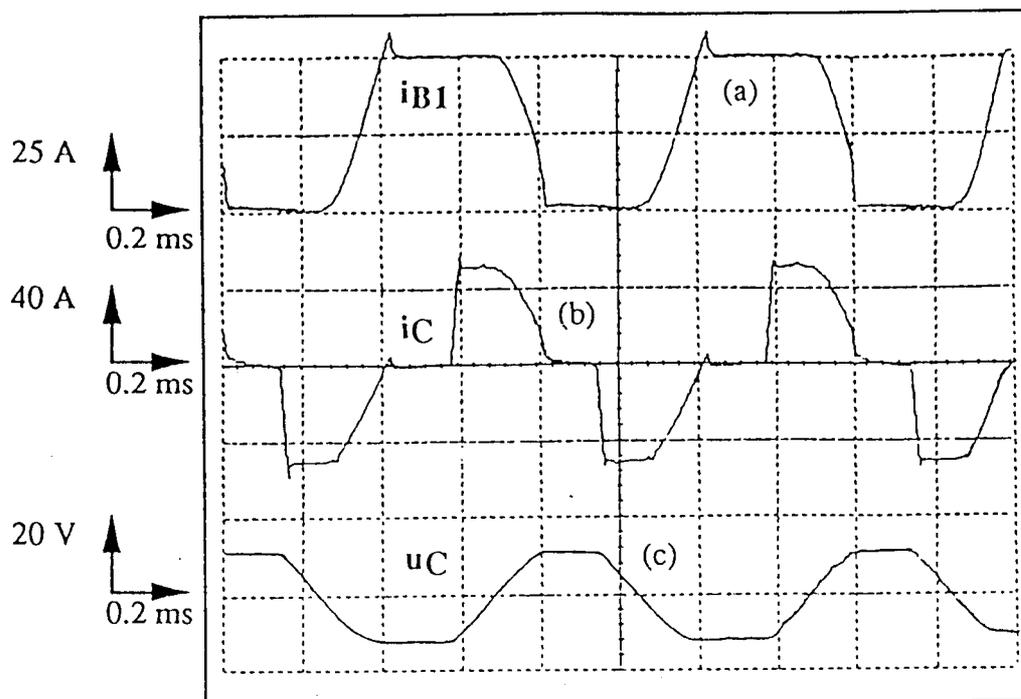


Fig. IV.25 - Machine 3 assistée par le système symétrique : Assistance à 6 kW.

IV.5 COMPARAISON DES DEUX DISPOSITIFS

La structure des deux dispositifs d'assistance est différente mais elle conduit dans les deux cas à mettre en parallèle un condensateur C et la section ℓ_S en commutation à travers deux interrupteurs semi-conducteurs. Il en résulte une oscillation (ℓ_S , C). Dans le cas du système balancier cette oscillation s'effectue "en marge" du courant principal I qui ne traverse pas C. Dans le cas du symétrique, I traverse C au début de la commutation, ceci explique les différences de forme des courbes $u_C(t)$.

Pour la valeur de ℓ_S on peut noter une particularité difficile à expliquer a priori. La valeur de ℓ_S dans le cas du balancier est plus faible que dans le symétrique alors que le nombre de conducteurs en commutation est deux fois plus grand. Ceci montre la complexité du phénomène de commutation qui ne peut être appréhendée qu'à l'aide de calculs de champs locaux.

Les différences qui suivent sont relatives à la mise en oeuvre des deux systèmes. Dans le cas du balancier la tension d'aide à la commutation aux bornes du condensateur nécessite une phase de charge et une phase d'inversion et elle est appliquée à une section vue entre deux lames successives.

Dans le cas du système symétrique la séquence d'inversion n'existe pas. La tension de commutation est appliquée entre deux lames diamétralement opposées et elle est utilisée dans les deux sens. Ce système n'est valable que pour un enroulement du type ondulé-série.

IV.6 CONCLUSION

L'expérimentation réussie de deux machines avec deux dispositifs électroniques différents nous a montré que la commutation assistée est toujours possible même avec des machines à forte intensité de courants et faible tension (100 A, 72 V). L'introduction d'outils informatique dans la commande des impulsions, qui n'était pas évidente au départ à cause de parasites électromagnétiques dues au phénomène de commutation, est chose faite. Les puissances commutées sont surtout limitées par des problèmes extérieurs à l'assistance :

- banc d'essai n'est pas prévu pour ces puissances.
- réglage des pressions des balais (la pression des balais n'est pas réglable en fonction des nuances des balais, cas de la machine 2),
- les densités de courant supportées par les balais sont supérieures aux valeurs prévues par le constructeur (cas de la machine 3).

V.CONCLUSION GENERALE

V.1 Historique des travaux

L'objectif initial de notre travail était la validation de l'assistance du type balancier sur une machine de fabrication classique destinée à la traction électrique (fort courant et faible tension) sans la présence des pôles de commutation. Rappelons que ce dispositif avait été validé sur une machine à enroulement imbriqué de puissance de 2.5kW (450 V et 5A) avec un collecteur ramené et des frotteurs en balais [14]. Pour éviter cette dernière solution le collecteur de la machine à été transformé comme c'est indiqué dans le paragraphe IV.1.1. Le passage de 75 lames au collecteur à 12 en vue d'utiliser les lignes de balais en parallèle à été un échec à cause des courants de court-circuit apparaissant entre balais de même polarité. Nous avons donc expérimenté la machine 1 seulement avec deux lignes de balais sur les quatres existantes, cette première expérimentation a donné les premiers résultats (2.7 kW), au delà de cette puissance les essais étaient impossibles pour les raisons suivantes :

- dissymétrie dans le bobinage et dans le collecteur (spires et lames non identiques, dispersion des conducteurs, d'une même section, sur plusieurs encoches).
- réglage des impulsions de commande des thyristors, avec des monostables, manque de précision.

Tout cela nous a amené d'une part à mettre en oeuvre une commande plus élaborée (commande par ordinateur) et d'autre part à étudier plus à fond le bobinage et à modifier la première machine (machine 2) et à construire une autre (machine 3).

L'examen du balancier montre qu'il s'agit d'un dispositif mieux adapté à l'enroulement imbriqué c'est pour cela que nous avons souhaité au départ remplacer la machine 1 par une machine à enroulement de ce type. Mais l'étude de l'enroulement ondulé-série d'une machine tétrapolaire, a la spécificité d'avoir deux voies d'enroulements et quatres lignes de balais, montre qu'il peut commuter par demi-spires et utiliser un système symétrique.

Pour la poursuite des travaux , nous avons donc d'une part construit un prototype adapté aux deux types d'assistance (Machine 3) et d'autre part transformé le rotor de la machine 1 pour avoir une machine plus régulière (Machine 2).

Les expériences menées sur ces deux machines ont bien montré les possibilités de l'assistance électronique à la commutation notamment avec le dispositif

que nous avons proposé dans le cadre de cette étude, rappelons les chiffres obtenus dans le tableau suivant.

Systèmes	Balancier			Symétrique		
	U(V)	I(A)	P(kW)	U(V)	I(A)	P(kW)
Machine 2	72	100	7	60	100	6
Machine 3	120	50	6	120	50	6

V.2 Conclusion

Les résultats précédents montrent la faisabilité d'une assistance électronique à la commutation des machines à courant continu. L'étude est effectuée à l'aide de deux systèmes différents sur deux machines électriques de conception pratiquement classique, seules les connexions du bobinage au collecteur sont légèrement modifiées.

Essayons de dégager quelques perspectives d'avenir. L'expérimentation proposée montre deux systèmes, il existe d'autres solutions plus ou moins élégantes. L'heure n'est pas encore à l'optimisation du système. Il s'agit pour l'instant de montrer que la structure classique de la machine à courant continu peut être fortement modifiée par la suppression des pôles auxiliaires. L'électronique de commutation qui les remplace est présentée ici de façon indépendante. Une réflexion ultérieure pourrait consister à l'intégrer à l'électronique de commande en puissance de la machine. Cette réunion des deux systèmes de commutation et de commande est envisageable car les semi-conducteurs de l'assistance sont traversés par le courant principal. L'étude est enfin une approche originale du phénomène de commutation susceptible de modifier les points de vue classiques développés sur le sujet depuis une centaine d'années.

BIBLIOGRAPHIE

Publications de l'auteur sur le sujet

[1] Goyet R., Benalla H., Rioux C. et Poloujadoff M., A new concept : the electronically assisted commutation collector, I.C.E.M 90, Boston (M.I.T., August 1990).

[2] Quichaud G., Ihaddadene A., Poloujadoff M., Benalla H., Goyet R., J.Phys. III France 3 (1993) 2065-2070.

[3] Goyet R., Benalla H., et Poloujadoff M., Commutation of DC Machines Without commutation poles by means of external electronic devices à paraître dans ELECTRIC MACHINES and POWER SYSTEMS VOL 23 number 5.

[4] H.Benalla , R.Goyet, Commutation assistée des machines à courant continu soumis à publication au J.Phys. III France 3 (1994) .

BIBLIOGRAPHIE

[5] Quichaud G. et Goyet R., Machine à courant continu équipée d'un collecteur et dotée de moyens de commutation assistée, Brevet N° 9306195 déposé le 25 Mai 1993.

[6] A.Mauduit , Machines électriques Dunod.

[7] J.Chatelain , Machines électriques -Tome 2 Dunod 1983.

[8] A. Guilbert , Fonctionnement et calcul des machines électriques Dunod 1951.

[9] M. Kostenko, Machines électriques Tome 1, Editions Mir 1976.

[10] A.Fouille, Electrtechnique à l'usage des ingénieurs Dunod 1969.

[11] G.Seguiet, F.Notelet, Electrotechnique industrielle Tech. et Documentation 1980.

[12] S. Loutsky, Calcul pratique des machines électriques à courant continu Eyrolles.

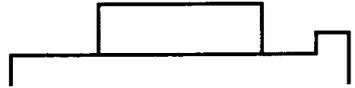
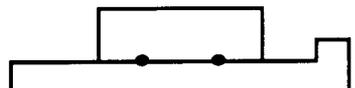
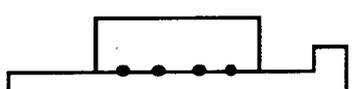
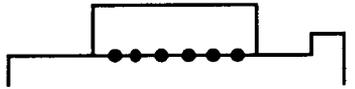
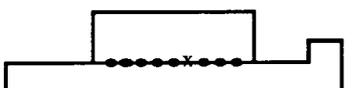
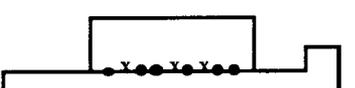
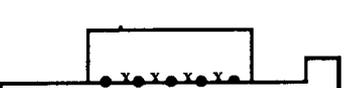
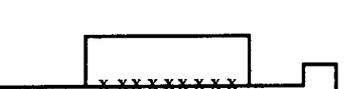
[13] A.Barral, C.Tisserand, Machines hétéropolaires à courant continu Technique de l'Ingénieur, D 531.

- [14] R.Gouiaa , Etude théorique et expérimentale de deux types de collecteurs assistés électroniquement, Thèse de Doctorat de l'université PARIS VI, 1986.
- [15] H.Namirian , Alimentation à fréquence variable par collecteur mécanique assistée par électronique, Thèse de Doctorat de l'université PARIS VI, 1989.
- [16] C.Pham-Cong-Suu, Etude des machines sans pôles auxiliaires et à collecteur assisté par électronique, Thèse de Doctorat de l'université PARIS VI, 1993.
- [17] H.I.Andrews, Development of an electronically commutated motor with laminated brushes, Proc. IEE vol 116, n°5, 1969.
- [18] J.J. Bates and T.V Sridhar, Thyristor -assisted sliding-contact commutatio, Proc. IEE Vol 113, n°2, p 339 à 341, 1966.
- [19] J.J Bates , Thyristor-assisted commutation in electrical machines, Proc. IEE Vol. 115, n°6, 1968, pp 791-801.
- [20] J.J Bates, J. Stanway and R.F. Sansum, Contact problems in machines using thyristor-assisted commutation, Proc. IEE Vol. 117, n° 2, 1970, pp 387-397.
- [21] J.J Bates, Diodes assisted commutation, Proc. IEE Vol. 117, n° 5, 1970, pp 1017.
- [22] J.J Bates , Using thyristors and diodes to improve commutation, IEE Spectrum, January 1971, pp 38-47.
- [23] J.J. Bates and J. Stanway, 'Development of a 300 kW DC machines using thyristor-assisted commutation', Proc. IEE Vol. 123, n° 1, 1976, pp 76-80
- [24] J.J.Bates , Thyristor-assisted commutation in electrical machines, Proc. IEE Vol. 123 n° 1, January 1976.
- [25] J.J Bates, J. Stanway, 'Commutating time calculations for machines using thyristor-assisted commutation', Proc. IEE. Vol. 123, n°1, 1976, pp 81-84.
- [26] E.Krisch, F.Smikal, 'Investigation of DC machine with wave winding'.
- [27] A. Ihaddadene, Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, en préparation.

ANNEXES

ANNEXE I

Cotation de la commutation : Graduation des étincelles d'après **Westinghouse**

Représentation	Indice	Désignation
	1	Noir
	1 1/4	Perles intermittentes
	1 1/2	Quelques perles
	1 3/4	Nombreuses perles
	2	Projections intermittentes
	2 1/4	Quelques projections
	2 1/2	Nombreuses projections
	3	Projections importantes et continues

- Perles sans projection
- x Perles avec projections(fusants)

Les limites acceptables, habituellement admises sont :

1 - Régime normal 1 1/2; 2 - Régime de pointe (surcharge): 1 3/4

ANNEXE II

Caractéristiques principales des balais (*)

GROUPES DE NUANCES	NUANCES	Densité apparente	Résistivité ($\mu\Omega \times cm$)	Dureté shore	Charge de rupture à la flexion (MPa)	Chute au contact ΔU (V)	Frottement	Charge admissible (A/cm ²)	Vitesse (m/s)	Taux de Métal (%)
Carbo-graphitiques	A 141	1,55	16 000	45	25	M	E	6-8	15	
Graphitiques tendres	LFC 501	1,48	2 200		7	M	M	6-10	75	
	LFC 557	1,50	1 500		13	M	M	6-10	75	
	LFC 4	1,70	2 600		7	M	M/E	10	35	
Electro-graphitiques	EG 34 D	1,57	1 200	35	28	M	M	12	50	
	EG 389 P	1,53	1 500	30	18	M	M	12	45	
	EG 40 P	1,60	2 800	54	28	M	M	12	50	
	EG 367	1,54	4 300	48	20	M	M	12	50	
	EG 332	1,53	4 650	46	18	M	M	12	50	
	EG 309	1,50	4 200	44	22	M	M	12	50	
	EG 98	1,59	3 600	58	29	M	M	12	50	
	EG 300	1,55	4 200	54	25	M	B/M	12	50	
	EG 98 B	1,66	3 650	63	30	M	M	12	50	
	EG 98 P	1,57	3 600	56	29	M	M	12	50	
	EG 319 P	1,48	6 600	48	26	E	M	12	50	
Electro-graphitiques imprégnées	EG 7099	1,66	1 150	35	33	M	M	12	45	
	EG 9599	1,60	1 500	33	22	M	M	12	45	
	EG 9117	1,67	2 750	62	37	M	M	12	50	
	EG 8067	1,65	4 000	57	34	M	M	12	45	
	EG 9049	1,64	4 300	57	31	M	M	12	50	
	EG 8630	1,65	3 600	65	35	M	M	12	45	
	EG 7097	1,64	3 900	65	37	M	M	12	50	
	EG 341*	1,55	6 600	60	31	E	M	12	50	
	EG 9041**	1,56	6 300	65	36	E	M	12	50	
	EG 6184	1,75	3 500	82	44	M	M	12	45	
	EG 6754	1,73	3 850	80	40	M	M	12	45	

NOTA

*EG 341 : Nuance pour applications industrielles
 **EG 9041 Nuance pour applications traction

Chute au contact et frottement

Chute au contact et frottement sont évalués au moyen des symboles ci-contre.	Symbole	Signification	Chute au contact en volts Somme des 2 polarités	Frottement
	E	élevé	$E > 3$	$E > 0,20$
M	moyen	$2,3 < M < 3$	$0,12 < M < 0,20$	
B	bas	$1,4 < B < 2,3$	$B < 0,12$	
TB	très bas	$TB < 1,4$		

ANNEXE II

Caractéristiques principales des balais

GROUPES DE NUANCES	NUANCES	Densité apparente	Résistivité $\mu\Omega \times \text{cm}$	Dureté shore	Charge de rupture à la flexion (MPa)	Chute au contact ΔU (V)	Frottement	Charge admissible (A/cm ²)	Vitesse (m/s)	Taux de Métal (%)
Bakélite graphite	BG 28	1,81	12 000		36	M/E	M	7-12	35	
	BG 412	1,81	11 000		36	E	M	8-12	35	
	BG 469	1,81	10 000		36	E	M	12	35	
	BG 530	1,78	25 000		27	E	M	8	40	
Métallo-graphitiques *	LFC 3*	2,10	750	18	17	B	B	12	45	20
	CG 33	2,30	500	25	32	TB/B	B	10-12	40	30
1 - Agglomérées	CG 651	2,90	140	26	43	TB	B	12-14	35	49
	CG 65 35	3,90	40	17	50	TB	B	15	25	67
	CG 665	4,05	30	17	50	TB	B	15	25	67
	CG 75	4,65	10	12	48	TB	B/M	16	25	77
	OMC	5,90	6	8	85	TB	B	25-30	20	90
	MC 79 P	5,20	7	20	95	TB	B/M	25-30	20	83
	MC 12	6,00	35	15	175	TB	B/M	25-30	20	91
	MC 689	5,95	25	13	145	TB	B/M	25-30	20	89
2 - Imprégnées métal	M 609	2,50	450	35	38	TB/B	B	12-15	35	42
	M 685	2,78	360	34	40	TB/B	B	12-15	35	45
	M 642	2,60	600	60	39	TB/B	B	12-15	35	28
	M 673	1,68	1 100	33	26	B	M	10-12	40	5,5

* Pour les nuances graphite argent, voir la notice « Balais carbo-argent » - Réf : AE 205

* Autre désignation de LFC 3 = KK1

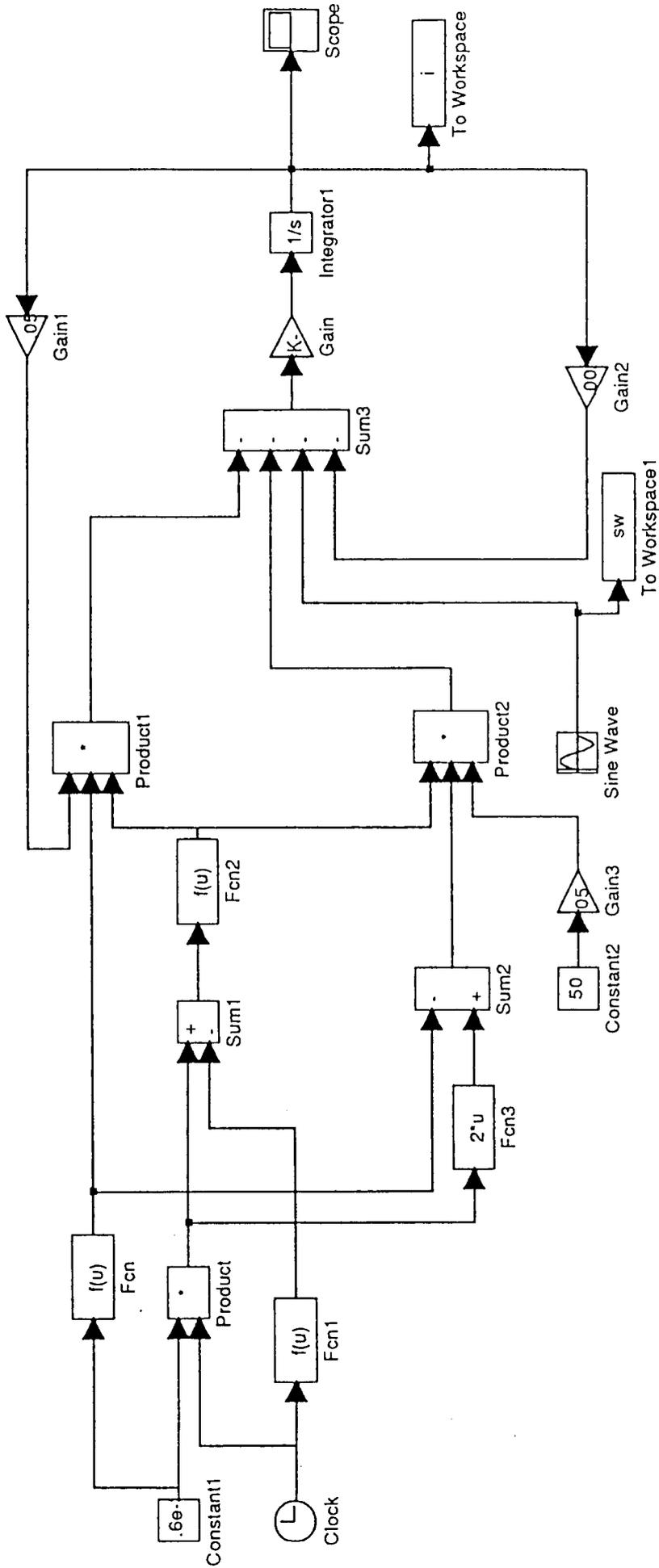
NOTA = les nuances principales sont encadrées d'un filet blanc.

Chute au contact et frottement

Chute au contact et frottement ont été mesurés en laboratoire sur bague rainurée en cuivre, dans les conditions suivantes.

Éléments	Chute au contact	Frottement
Courant		continu
Charge	10 A/cm ²	10 A/cm ²
Vitesse	12,5 m/s	25 m/s
Pression	180cN/cm ²	
Température bagues	65-70°C	
Balais	type radial	

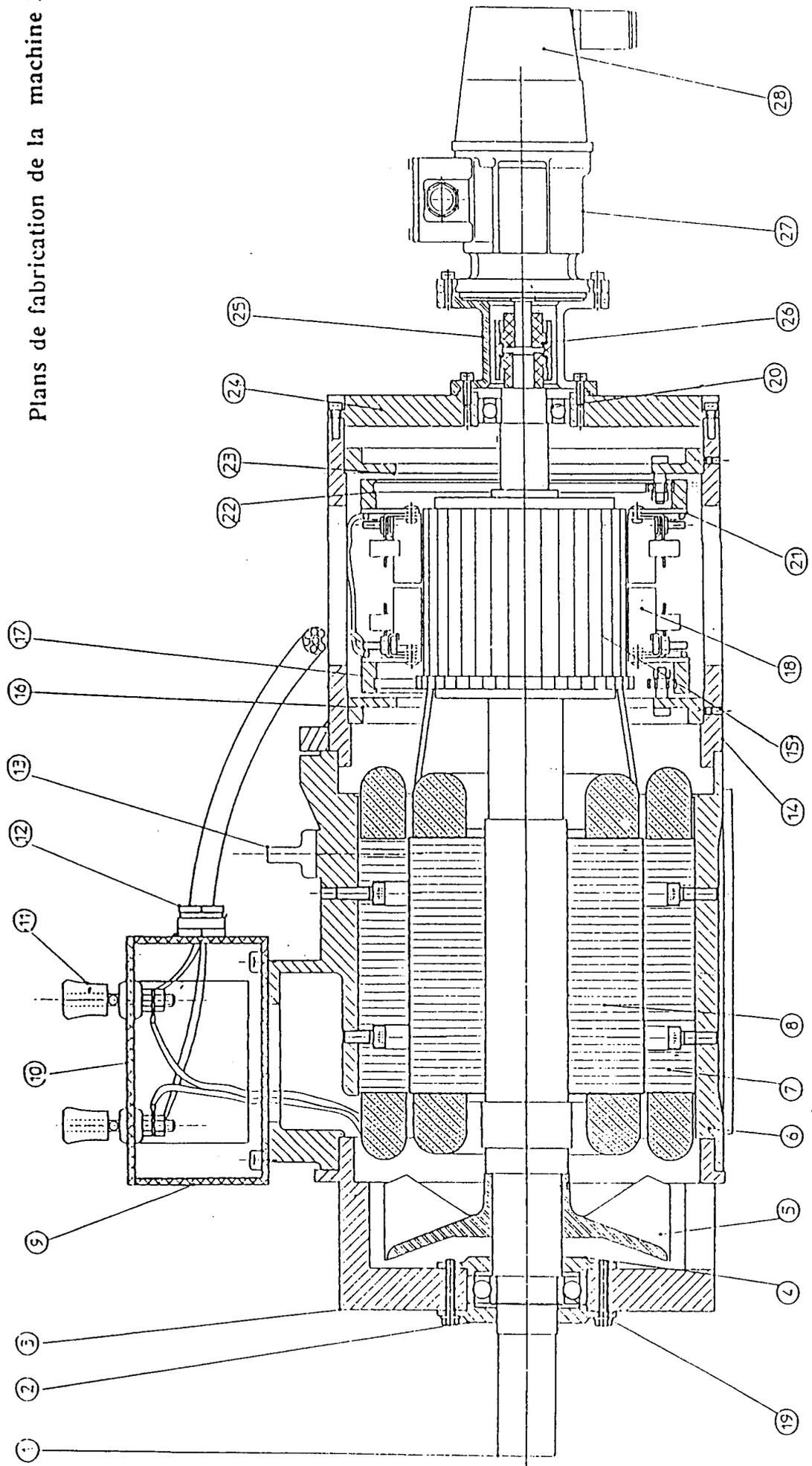
Les limites d'emploi en densité de courant et vitesse périphérique résultent d'observations sur machines réelles en bon état et travaillant dans des conditions normales d'exploitation.



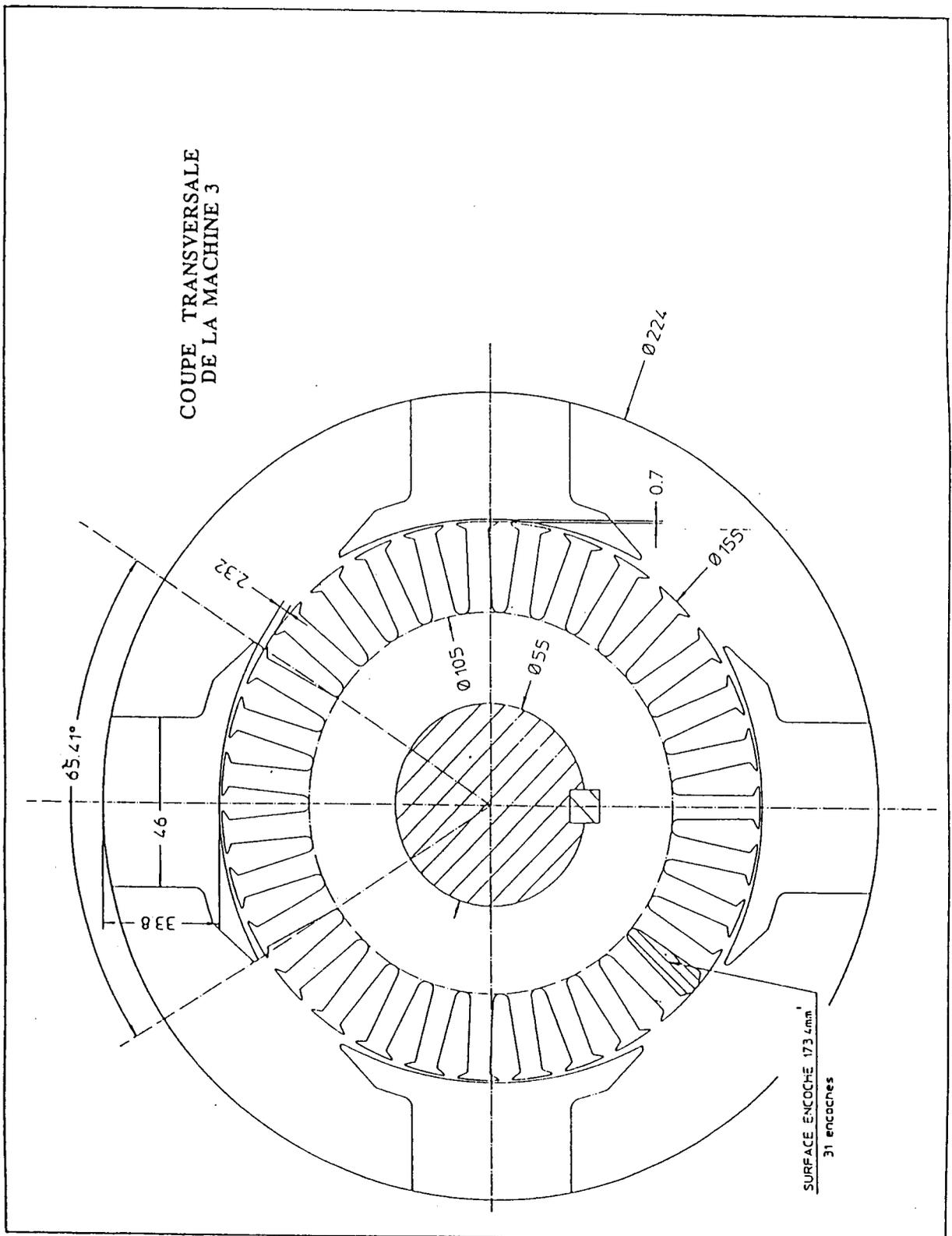
Simulation : schéma Bloc

ANNEXE IV

Plans de fabrication de la machine 3



Repère	Désignation des pièces	Matière
1	Arbre	ACIER
2	couvre roulement extérieur	ALU
3	Flasque bout d'arbre	ACIER
4	Couvre roulement intérieur	ALU
5	Ventilateur	ALU
6	Carcasse	FONTE
7	Masse polaire (4)	T.MAGN.
8	Tôles rotor (320)	T.MAGN.
9	Boitier de raccordement	ALU
10	Bornier	PLEXI
11	Borne à prise arrière	
12	Presse etoupe	
13	Anneau de levage	ACIER
14	Extension carcasse	ACIER
15	Collecteur	
16	Support fixe avant	ACIER
17	Support mobile avant	ACIER
18	Porte balai (8)	
19	Roulement avant	
20	Roulement arrière	
21	Couronne porte balai (2)	FIBRE
22	Support mobile arrière	ACIER
23	Support fixe arrière	ACIER
24	Flasque coté collecteur	ACIER
25	Bride support RE0444	ALU
26	Accouplement	NYLON
27	RE0444	
28	Codeur	



ANNEXE V

Caractéristiques à vide des machines étudiées

A.V.1 Caractéristique de la machine 1

La figure A.V.1 donne les tensions à vide en fonction du courant d'excitation à vitesse constante $N = 1250 \text{ t/min}$ entre les balais $B1^+$ et $B1^-$ placés sur la ligne neutre puis entre les balais $B2^+$ et $B2^-$ respectivement décalés de $B1^+$ et $B1^-$ d'un interlame. On remarque que la tension mesurée entre $B2^+$ et $B2^-$ est diminuée de 20% par rapport à celle mesurée entre $B1^+$ et $B1^-$ pour ce léger décalage.

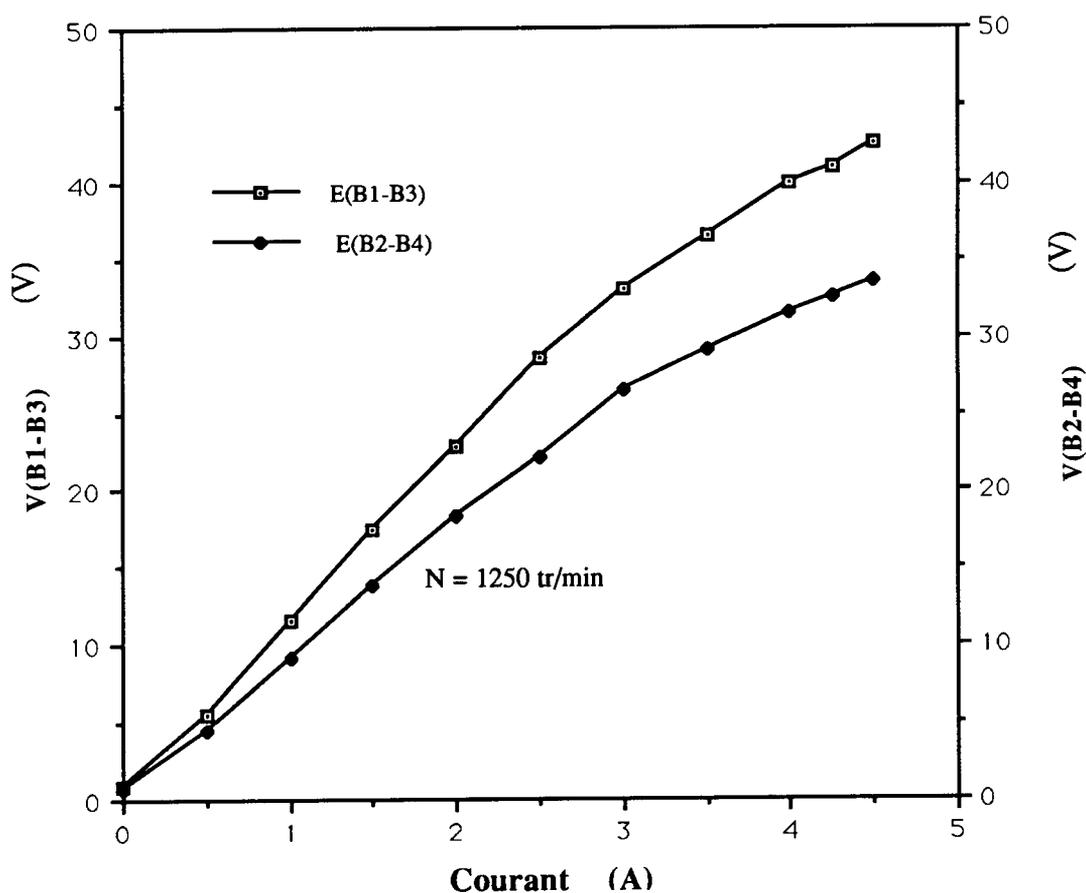


Fig. A.V.1 : Caractéristique à vide de la machine 1

A.V.2 Caractéristique à vide de la machine 2

La caractéristique à vide de la machine 2 est représentée sur la figure A.V.2. Elle est obtenue à vitesse nominale de la machine $N = 2500$ tr/min pour des balais calés au voisinage de la ligne neutre. On remarque une chute de tension de l'ordre de 10% par rapport à la valeur de la tension nominale de la machine originale. Celle-ci est expliquée par les modifications réalisées sur la machine au niveau du collecteur.

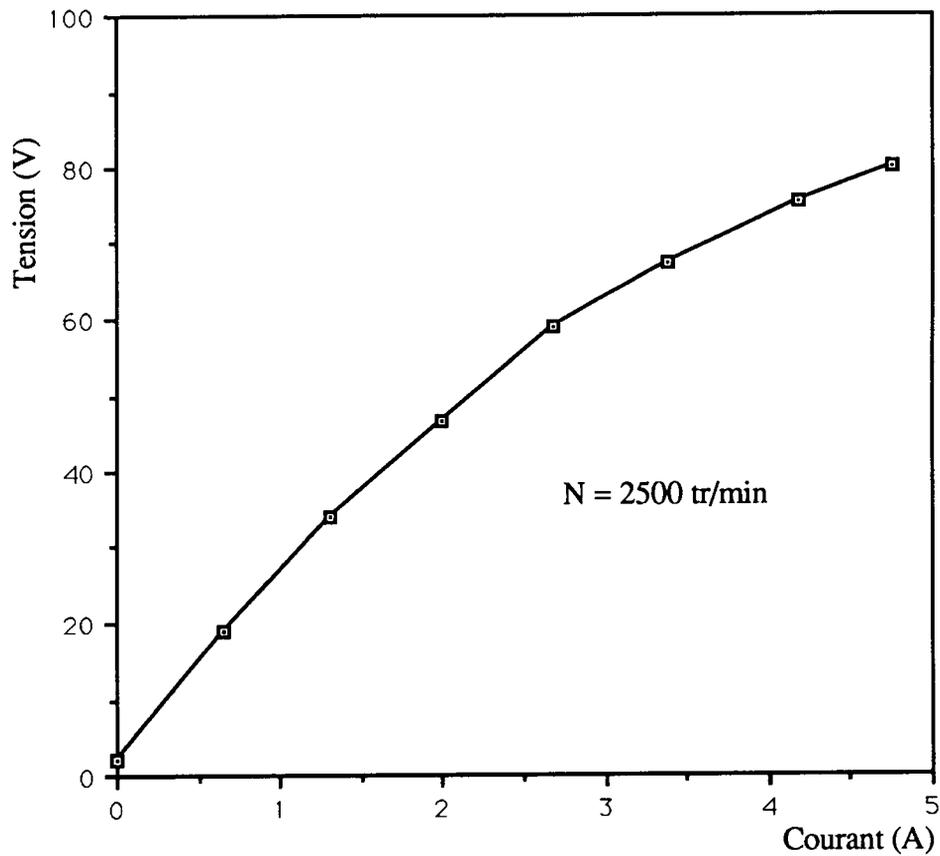


Fig. A.V.2 : Caractéristique à vide de la machine 2.

A.V.3 Caractéristique à vide de la machine 3

La figure A.V.3 représente la variation de la tension, aux bornes de la machine 3 à vide, en fonction du courant d'excitation à vitesse nominale. Cette caractéristique est relevée pour un fonctionnement classique de la machine c'est à dire la largeur d'un balai est supérieure à celle d'un interlame, deux balais sont mis en parallèle sur la même ligne l'un à côté de l'autre pour former un balai plus large.

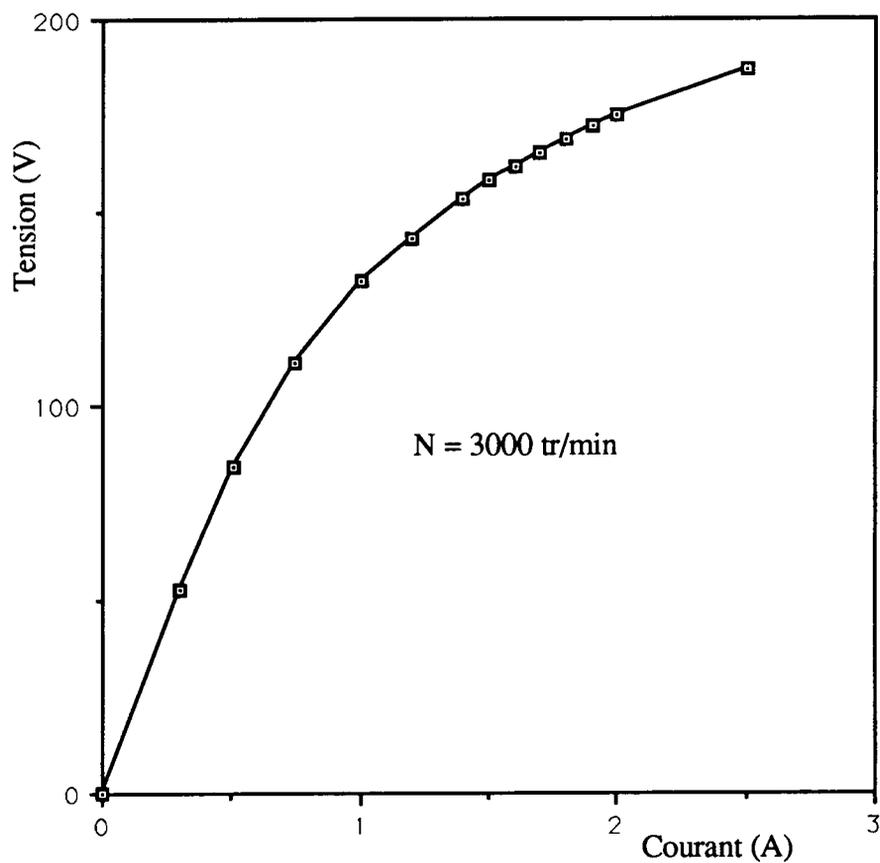


Fig. A.V.3 : Caractéristique à vide de la machine 3.

ANNEXE VI

**CALAGE DES BALAIS ET REGLAGE
DES SIGNAUX DE COMMANDE**

A.VI.1 Calage des balais sur la ligne neutre

La ligne neutre d'une machine à courant continu est la ligne où la tension entre lames du collecteur est théoriquement nulle et sur laquelle les balais doivent être "calés". De part et d'autre de cette ligne on définit la zone de commutation où les sections passent d'une voie d'enroulement à une autre.

Il existe diverses méthodes classiques pour matérialiser cette ligne. Dans notre cas nous avons profité de la structure de nos machines pour mettre en oeuvre une méthode basée sur le relevé oscillographique de la tension aux bornes de la section en commutation. En effet la mesure de cette tension est possible grâce à la disponibilité des deux bornes de la section et la présence d'un système à double balai sur la même ligne.

Les montages expérimentaux de la figure A.VI.1 donnent le réglage des balais pour les deux types de systèmes : la figure (a) donne le cas d'une section vue entre deux lames successives (cas du système balancier) et la figure (b) donne celui d'une section vue entre deux lames diamétralement opposées (cas du système symétrique).

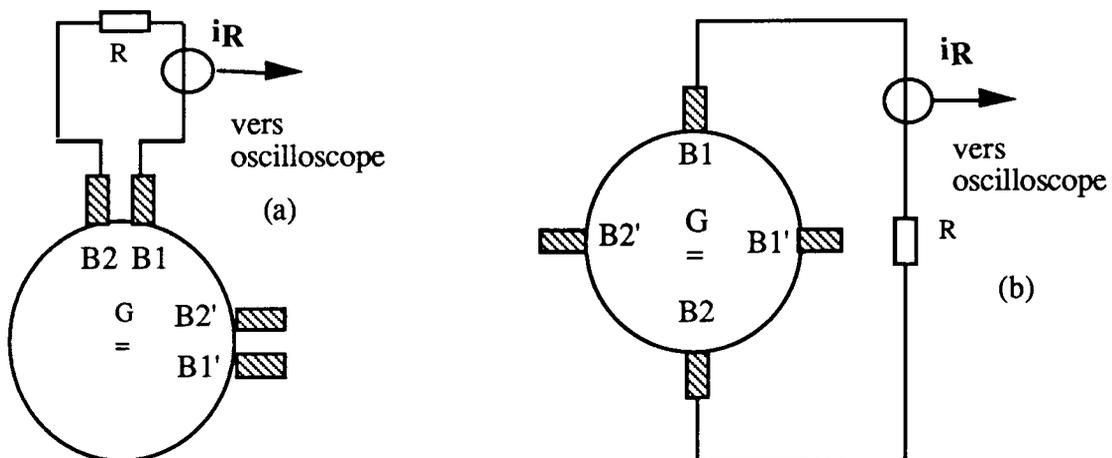


Fig. A.VI.1 : Montages permettant le calage des balais sur la ligne neutre.

Les figures A.VI.2 et A.VI.3 donnent les relevés des résultats obtenus avec ces montages. La position de la ligne neutre est déterminé par le passage des tensions par zéro.

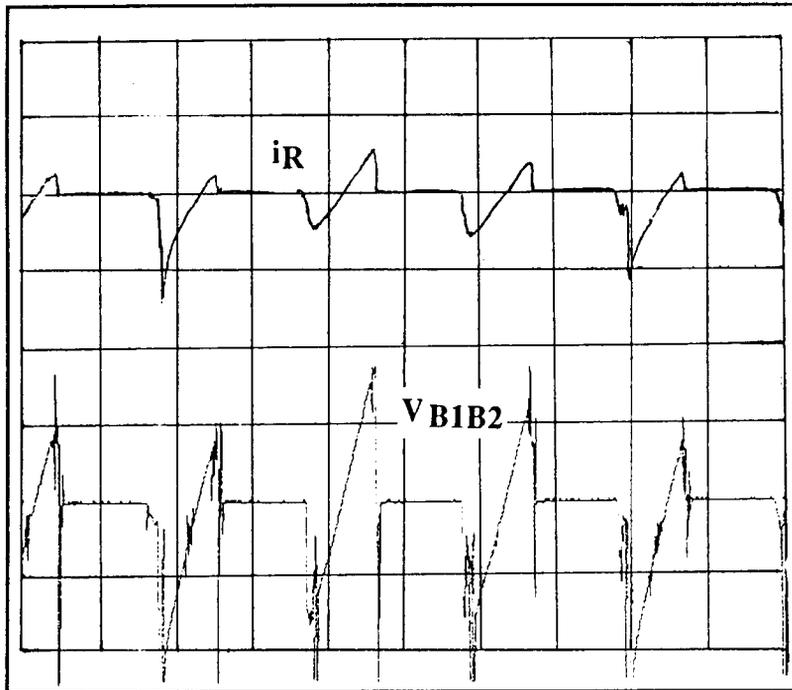


FIG. A.VI.2 : Relevé de la tension entre deux balais de même polarité, cas du système balancier

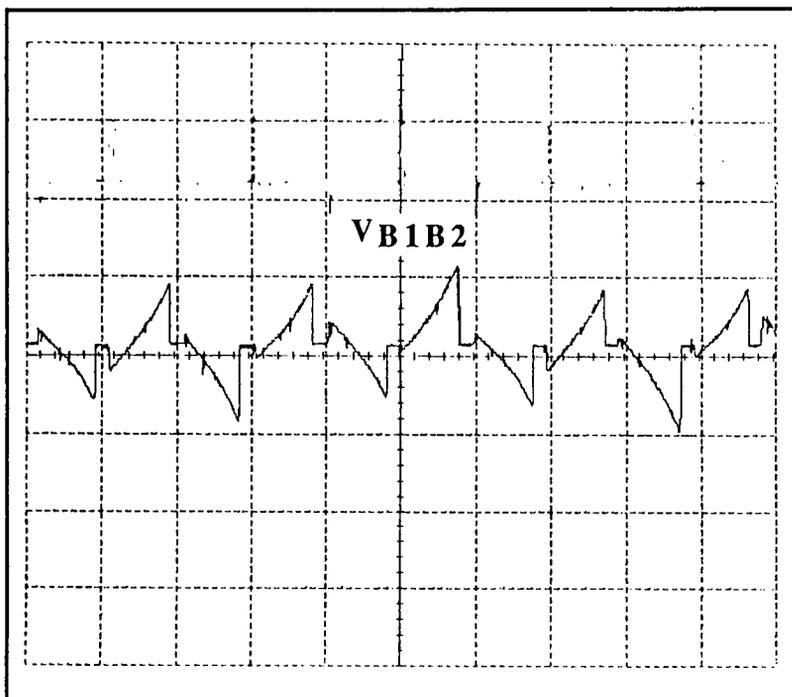


FIG. A.VI.3 : Relevé de la tension entre deux balais de même polarité, cas du système symétrique

A.VI.2 Réglage des signaux de commande

Une fois les balais sont calés correctement, Le réglage des signaux par rapport au début du contact s'impose. Pour cela nous avons utilisé une méthode simple toujours basée sur la mesure, pour chaque système on détermine expérimentalement le début de contact d'un balai et en déduit ceux des autres électroniquement par ordinateur. La figure A.VI.4 donne les montages expérimentaux permettant la détermination d'un début de contact (exemple celui du balai B1) pour chaque type de système (figure a pour le balancier, et figure b pour le symétrique).

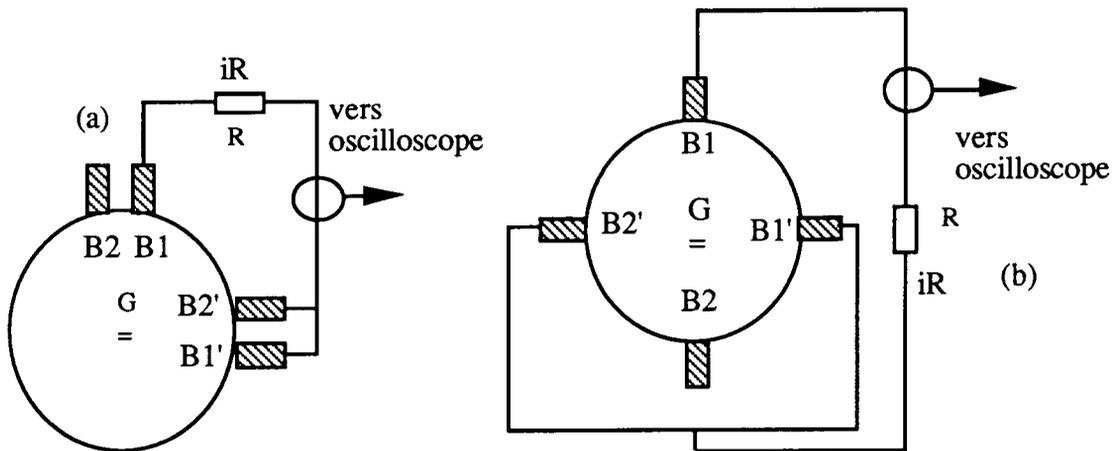


Fig. A.VI.4 : Détermination expérimentale des contacts des balais.

