

République Algérienne Démocratique et
Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA Bejaïa

Faculté de technologie



Département de Génie Électrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en

Électrotechnique option Énergies Renouvelables

Thème

Étude et conception d'un chargeur pour super condensateur

Présenté par :

M^{lle}: DJIRE Kadidiatou

Devant le jury :

Mr:

Mr :

Encadré par :

Mr : REKIOUA.T

Co-encadré par :

Mr : MEBARKI.N

Année universitaire

2020/2021

Remerciements

Nous remercions DIEU le tout-puissant l'omnipotent, l'omniscient qui nous a procuré courage et volonté pour mener à bien ce modeste travail.

En premier lieu, nous tenons à remercier incommensurablement notre enseignant (encadreur et Co-encadreur) Mr REKIOUA et Mr MEBARKI qui n'ont ménagé aucun n'effort d'abord, de nous inculquer leur savoir-faire en Master 2 ensuite d'avoir accepté de diriger ce travail de recherche en nous consacrant le maximum de temps et en nous donnant de conseil afin de réaliser ce mémoire.

Nous voudrions aussi remercier Mme D.REKIOUA, pour sa gentillesse et sa disponibilité

Nous souhaitons ensuite, exprimer notre gratitude à l'ensemble des membres du jury qui ont fait honneur dévaluer ce travail.

Que ces quelques lignes soient l'expression de notre profonde reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans notre travail.

Dédicace

A ma famille et à tous ceux qui m'ont appuyé :

*Particulièrement, à mon père DJIRE Ousmane et à ma mère
TRAORE Aminata, qui ont su m'accompagner de toute leur force,*

Je dédie ce mémoire.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les super condensateurs

Introduction	2
I.2. Principe de fonctionnement	3
I.3 Caractérisations des super condensateurs	5
I.3.1. Divers types de super condensateurs.....	5
I.4 Application des super condensateurs	5
I.4.1 Domain informatique	6
I.4.2 Domain du transport.....	6
I.4.3 Couplage aux réseaux des super condensateurs	7
I.4.4. Domain militaire	7
I.5 Comparaison super condensateurs-batteries	8
I.6. Avantages et inconvénients.....	9
I.6.1. Avantages	9
I.6.2. inconvénients.....	9
Conclusion.....	10

Chapitre II : Modélisation et identification d'un super condensateur

Introduction	11
II.1 Les modèles de super condensateur :	11
II.1.1. Modèle de base RC	11
II.1.2. Modèle a deux branches.....	13
II.1.2.1 Détermination des paramètres du modèle	16
II.1.2.2. Limites du modèle à deux branches	18
II.1.3.Modèle énergétique distribué.....	18
II.1.4. Modèle fréquentiel	19
II.1.5. Modèles tenant compte du comportement en fréquence en fonction de la nature des pores des électrodes	21
II.1.6. Identification des paramètres du super condensateur	21
II.1.6.1. Méthodes de caractérisation des super condensateurs	22

II.1.6.2. Description du banc d'essai.....	22
II.1.6.3. Caractéristique du super condensateur	23
Conclusion.....	26

Chapitre III : Étude d'un hacheur réversible en courant et application des super condensateurs

Introduction	27
III.1. Présentation globale du système	27
III.2. Étude du chargeur.....	28
III.2.1. Principe de fonctionnement	28
III.2.1.1. Mode 1:	28
III.2.1.2. Mode2 :	29
III.3. Caractéristique des différents éléments du système étudié	31
III.3.1. Caractéristique de la batterie et du bus continu	31
III.3.2. Caractéristique du super condensateur	32
III.3.3. Caractéristique de la machine	32
III.4. Résultats de la simulation.....	32
Conclusion.....	37
Conclusion générale	38
Reference bibliographique	

Liste des figures :

Figure I.1 : Diagramme de Ragone	2
Figure I. 2 : Schéma de principe des super condensateurs.	4
Figure I. 3 : Application des super condensateurs dans le domaine du transport.....	7
Figure I. 4 : Couplage aux réseaux.....	7
Figure I. 5 : Application de super condensateurs dans le domaine militaire, Radars de surveillance aérienne (satellites, missiles balistiques,...).....	8
Figure II.1 : Modèle de base de super condensateur. Profil de décharge à courant constant	12
Figure II.2 : Signal de courant.....	12
Figure II.3 : Tension aux bornes du super condensateur.....	12
Figure II.4 : l'état de charge du super condensateur.....	13
Figure II.5 : Modèle énergétique à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta.....	14
Figure II.6 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A.....	15
Figure II.7 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge.....	17
Figure II. 8 : Circuit de base du modèle fréquentiel.....	20
Figure II.9 : Représentation de l'impédance d'un super condensateur basée sur la réponse fréquentielle .	20
Figure II. 10 : Représentation poreuse d'électrode comme ligne de transmission de cinq éléments (KÖTZ, et al, 1999).....	21
Figure II.11 : Banc expérimental d'identification du super condensateur.....	23
Figure II. 12 : Caractéristiques du super condensateur	24
Figure II. 13 : Essai en charge du super condensateur	24
Figure II. 14 : Essai en décharge du super condensateur.....	25
Figure III.1 : description du système étudié.	27
Figure III.2 : Circuit équivalent d'un hacheur réversible en courant	28
Figure III.3 : Circuit équivalent du hacheur série.....	29
Figure III. 4 : Circuit équivalent du hacheur parallèle	30
Figure III. 5 : Passage d'un mode de fonctionnement à l'autre.....	30
Figure III.6 : Schéma global du système étudié sous le logiciel PSIM	31
Figure III.7 : Profile du couple de référence	33
Figure III.8 : Allure du couple de la machine	33
Figure III.9 : Allure de vitesse de la machine	34
Figure III. 10 : Allure des courants statoriques triphasés	34
Figure III.11 : Allure de tension de banc DC	35
Figure III.12 : Profil de puissance de la machine asynchrone.....	35
Figure III.13 : La tension aux bornes du super condensateur.....	36
Figure III.14 : Allure du couple de la machine asynchrone et la tension aux borne du super condensateur	36

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : comparaison des différents éléments de stockage	8
Tableau II.1 : valeurs des paramètres du super condensateur identifié	26
Tableau III.1 : Paramètres du super condensateur utilisé	32
Tableau III.2 : Paramètres de la machine synchrone utilisée	32

NOMENCLATURE

Rs : Resistance série en ohm

C : capacité de stockage

C1 : Capacité différentielle

Q_{tot} : la quantité de charge totale aux bornes du super condensateur

Ls : Inductance du stator

Rs : Resistance du stator

Rr : Resistance du rotor

Lm : L'inductance magnétique

P : Nombre de paire pole

J : l'inertie du rotor

Ic : Courant de la charge

Is : Courant de la source

Uc : tension de la charge

MSAP : Machine synchrone a aimant permanent

Rch : Resistance de la charge

D : Diode

Vf : la chute de tension brusque en fin de charge du super condensateur

Introduction générale

Introduction générale

Les super condensateurs ou super capacités constituent une nouvelle génération des composants électrochimiques destinés au stockage d'énergie. Ces composants relativement nouveaux occupent une position véritablement intermédiaire entre les condensateurs électrolytiques et les accumulateurs électrochimiques en termes d'énergie et de puissance spécifiques. Leur intérêt réside dans l'énergie importante, contrairement aux condensateurs, qu'ils sont capables de stocker directement sous sa forme électrique, conservant ainsi la disponibilité immédiate de l'énergie.

Les super condensateurs possèdent une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries.

L'objectif principal de ce travail de recherche étant la réalisation d'un chargeur pour super condensateurs, nous avons commencé ce rapport de mémoire en effectuant une étude sur ces composants.

Les points abordés au premier chapitre concernent ainsi une généralité sur ces composants et des applications potentielles.

Dans le second chapitre, nous avons présenté les modèles et les méthodes d'identifications des super condensateurs afin de présenter le modèle appliqué dans notre système étudié. Les diverses particularités du comportement électrique des super condensateurs sont étudiées et analysées. Pour conclure ce chapitre, le modèle équivalent élaboré à partir de cette étude ainsi que le modèle précédemment disponible des Canadiens R. Bonert et L. Zubieta, dont nous soulignons le principe, les avantages et les limites et par la suite on a identifié les paramètres d'un super condensateur pratiquement.

Dans le troisième chapitre qui est le dernier, présente la grande partie des travaux de simulation de notre système avec une présentation des éléments constituant notre système, afin de caractériser la chaîne de conversion, à savoir la source (batteries et super condensateurs), les convertisseurs de l'électronique de puissance et la machine. Nous présentons les résultats de notre application des super condensateurs dans une source hybride obtenue par le logiciel PSIM.

Chapitre I : Généralités sur les super condensateurs

Introduction

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux généralités des super condensateurs. Ils sont une alternative aux batteries et existent depuis 20 ans. Ils s'apparentent à des condensateurs de très grande capacité. Ils fonctionnent selon le même principe que la batterie [1].

Les super condensateurs possèdent une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (plusieurs centaines de milliers de cycles). Le diagramme de Ragone (Figure I.1) représente les différents systèmes de stockage d'énergie électrique dans le plan puissance spécifique/énergie spécifique.

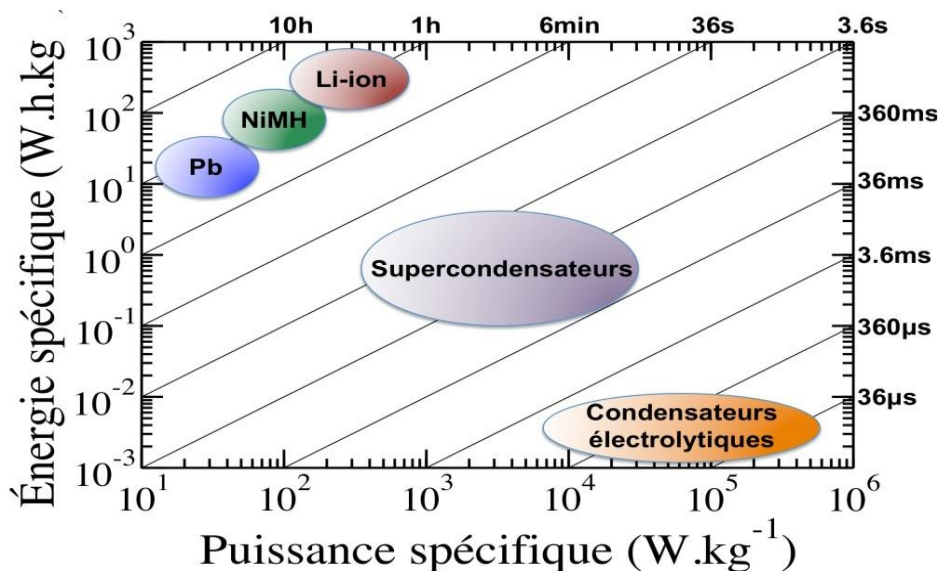


Figure I.1 : Diagramme de Ragone

Ce diagramme montre que les condensateurs électrolytiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la minute.

Initialement, les super condensateurs ont été utilisés pour la sauvegarde de mémoire pour les ordinateurs. Son succès actuel repose sur sa capacité de

charge/décharge rapide avec des courants très élevés. Il permet de filtrer les appels de puissance en régime transitoire permettant ainsi aux sources primaires une longévité et un dimensionnement adapté pour répondre seulement à la demande énergétique en régime permanent. C'est le cas lorsqu'il est associé à des batteries d'énergie ou à une pile à combustible par exemple.

Ce composant peut aussi être utilisé pour absorber les pics de puissance et permettre le stockage optimal de l'énergie dans les dispositifs d'énergies renouvelables tels que les éoliennes et les panneaux photovoltaïques. Dans les applications de traction routière ou ferroviaire, il constitue une solution de stockage d'énergie intéressante pour satisfaire des applications concernant les différents modes de fonctionnement d'un véhicule, que sont le démarrage, l'accélération et le freinage. Ainsi lors du freinage, une partie de l'énergie, habituellement dissipée en chaleur, peut être récupérée et stockée dans des super condensateurs pour être restituée plus tard. On peut citer l'exemple de leur association avec des alternodémarrateurs où le super condensateur fournit l'énergie nécessaire au démarrage pour le concept du « Stop and Start » et où il peut récupérer l'énergie de freinage du véhicule.[2]

I.2. Principe de fonctionnement

Les super condensateurs sont des dispositifs électroniques qui utilisent la séparation de charge ou des champs électriques pour stocker l'énergie électrique. Une cellule super condensateur se compose de deux électrodes (généralement du charbon actif de grande surface) reliées ioniquement par un électrolyte composé d'ions positifs et négatifs solubilisés dans un solvant comme l'eau. Lorsqu'une tension est appliquée à la cellule, une double couche est générée à chaque interface électrode-électrolyte, où une couche se trouve à la surface de l'électrode et l'autre couche est formée par les ions électrolyte solubilisés ayant une polarité opposée. Les deux couches sont séparées par les molécules de solvant adsorbées à la surface de l'électrode. En raison de la grande surface de l'électrode et de la distance extrêmement mince entre les deux couches, il est possible d'obtenir une grande capacité (des milliers de Farads par cellule), permettant aux super condensateurs de stocker des milliers de fois plus d'énergie que les condensateurs électrolytiques classiques.

Lorsqu'une tension est appliquée à travers les plaques du super condensateur, ou les bornes, les plaques se chargent en sens inverse. La plaque connectée à la borne négative de la source de tension accepte les électrons et se charge négativement tandis que la plaque connectée à la borne positive de la source de tension perd des électrons, se charge donc positivement. Le principe de base du condensateur à double couche électrique est illustré dans la Figure I.2. Les électrons circulent de cette manière jusqu'à ce que la tension à travers le super condensateur soit égale à la tension de la source. A ce point, les forces de répulsion au niveau des électrodes sont égales à la force due au potentiel appliqué. L'isolant diélectrique empêche le transfert d'électrons entre les deux électrodes, ce qui entraîne une séparation de charge et un champ électrique. En présence de ce champ électrique, le diélectrique devient polarisé, c'est-à-dire que ses ions s'alignent avec le champ créé par les deux plaques. En effet, les sources de tension peuvent être retirées et le condensateur reste chargé jusqu'à ce qu'un circuit externe utilise l'énergie stockée [3].

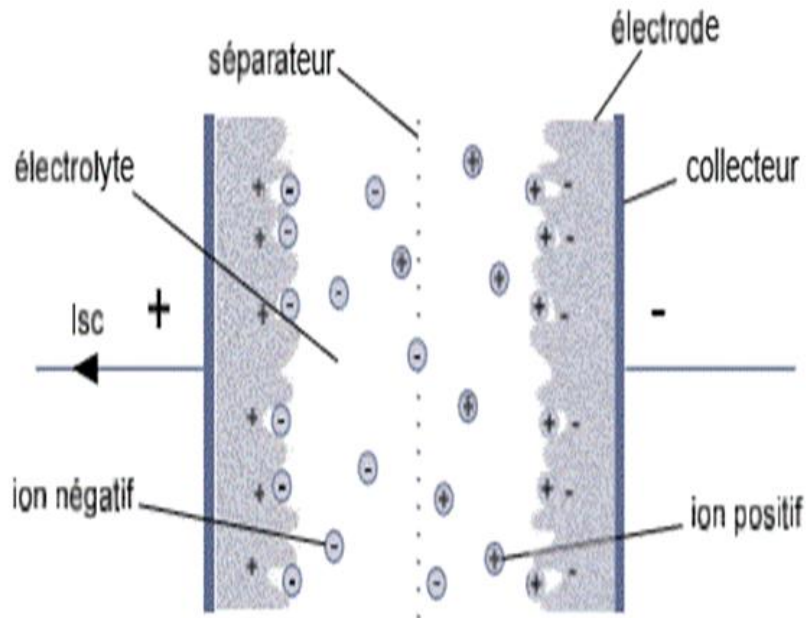


Figure I. 2 : Schéma de principe des super condensateurs.

I.3 Caractérisations des super condensateurs

Par rapport à un accumulateur, la durée de vie en terme de cycle est supérieure (1 million contre 1000 cycles). Le stockage de l'énergie se fait sous une forme électrostatique et non pas sous une forme électrochimique. Sa densité de puissance est considérable (10 fois supérieure à un accumulateur classique). Par contre son contenu énergétique est 10 fois plus petit. Les temps de charge sont très courts et les rendements sont de l'ordre de 90%. Les super condensateurs actuels qui vont jusqu'à quelques kilo Farads, sont capables de travailler sur un domaine des températures allant de -40 à 70°C. Les tensions de cellule sont très faibles de l'ordre de 2.7 V, mais la mise en série de plusieurs cellules permet d'atteindre des tensions élevées [4].

I.3.1. Divers types de super condensateurs

Nous distinguerons d'abord deux familles principales :

- ✓ Les super condensateurs de **type électrostatique**, dans lesquels le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques.
- ✓ Les super condensateurs de **type électrochimique**, dans lesquels interviennent, en plus, des processus faradiques réversibles.

Notons que les super condensateurs électrochimiques ne doivent pas être confondus avec les condensateurs électrolytiques ou électrochimiques décrits par ailleurs.

Enfin, même s'ils ne sont cités que pour mémoire, nous évoquerons quelques **dispositifs hybrides** particuliers, inclassables dans les deux rubriques précédentes par le fait qu'une des électrodes fonctionne comme celle d'un accumulateur ou d'un condensateur électrolytique, alors que l'autre fonctionne comme celle d'un super condensateur. [5]

I.4 Application des super condensateurs

Dans les applications qui se précisent actuellement, les super condensateurs sont utilisés en remplacement et surtout en complément des piles et accumulateurs électrochimiques afin d'assurer la fonction puissance qui leur fait défaut. On trouvera ces composants dans les systèmes nécessitant une importante énergie délivrée en un temps bref. Les principaux secteurs concernés par les super condensateurs sont [6]:

I.4.1 Domain informatique

A l'heure actuelle le super condensateur est utilisé dans le domaine de l'électronique grand public pour les alimentations des circuits mémoires des télévisions vidéo, des systèmes audio, des récepteurs satellite, des horloges, des téléphones portables, des calculatrices..., [7].

I.4.2 Domain du transport

Un des principaux domaines d'utilisation des super condensateurs est le transport. Le couplage des super condensateurs avec les batteries est une solution pour obtenir un système plus puissant et plus fiable pour le démarrage des moteurs et pour fournir plus de courant pour un préchauffage des catalyseurs et des bougies, pour les systèmes d'assistance électrique, pour faciliter le démarrage des moteurs diesels, etc. Les véhicules qui en tirent le plus de bénéfices sont ceux qui font de fréquents arrêts tels que les bus, les navettes d'aéroport, les véhicules de transports, les taxis, etc. car les super condensateurs sont rechargés lors des arrêts ou/et stockent l'énergie récupérée lors du freinage pour l'utiliser lors des phases d'accélération. [8]

Les super condensateurs sont déjà très utilisés aujourd'hui à l'échelle industrielle : nous donnons ici quelques exemples. En particulier, ils se prêtent très bien à une application pour les systèmes de transport, qui s'arrêtent et redémarrent souvent, tels que le train, le tramway, l'autobus : l'énergie produite lors du freinage est récupérée par le super condensateur (étape de charge) et restituée au démarrage (étape de décharge).

Ainsi, un peu plus d'une centaine d'années après l'ouverture de la première ligne de tramway électrique à Saint-Petersbourg en 1880, le premier essai français d'utilisation de super condensateurs pour le tramway a vu le jour, en même temps que d'autres initiatives en Europe : le projet Steem (Système de Tramway à Ecacité Energétique Maximisée) chapeauté par les sociétés RATP et ALSTOM visait à équiper la ligne parisienne T3 des super condensateurs. Sur 20 secondes, les super condensateurs sont chargés avec suffisamment d'énergie pour permettre à la rame de parcourir plusieurs centaines de mètres. L'économie d'énergie réalisée a été de 16% par rapport à un tramway classique, d'après un communiqué de presse RATP du 17 mai 2011. Toujours à Paris, la société ALSTOM a tout récemment (janvier 2015) remporté un contrat de plusieurs milliards d'euros pour la livraison pour le Grand Paris de plus d'une centaine de trains équipés de super condensateurs, imitant la plus récente ligne automatisée du métro parisien. L'économie d'énergie espérée est de 20% [9].



Figure I. 3 : Application des super condensateurs dans le domaine du transport.

I.4.3 Couplage aux réseaux des super condensateurs

Les super condensateurs peuvent jouer le rôle de compensateur de puissance instantanée en permettant de lisser la puissance. Nous pouvons citer l'utilisation de super condensateurs pour l'alimentation des ascenseurs. Dans cette application, les super condensateurs jouent un double rôle : la récupération d'énergie et le lissage de la puissance prise ou fournie par le réseau [10].

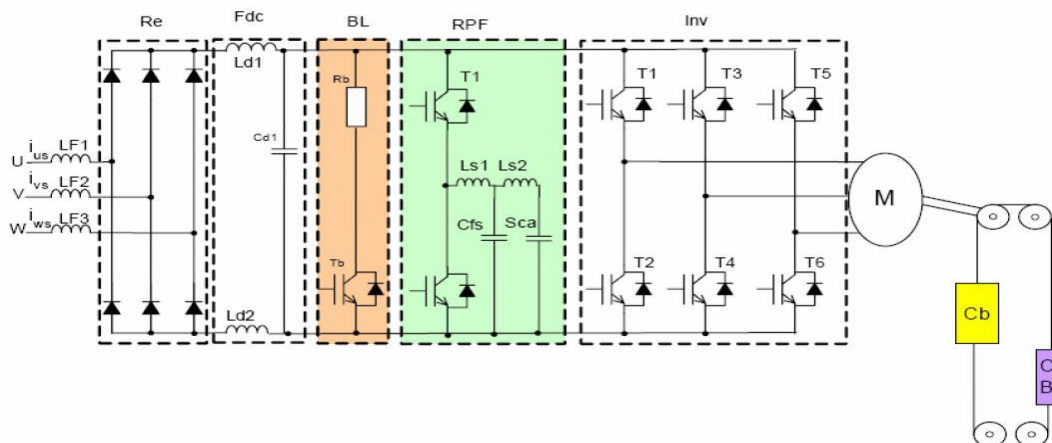


Figure I. 4 : Couplage aux réseaux

I.4.4. Domain militaire

Ils équipent déjà de nombreux dispositifs militaires comme les émetteurs radios, les alimentations électriques de secours et de capteurs autonomes, les détonateurs, les systèmes d'orientation des radars de suivi des missiles balistique. [11]



Figure I. 5 : Application de super condensateurs dans le domaine militaire, Radars de surveillance aérienne (satellites, missiles balistiques,...)

I.5 Comparaison super condensateurs-batteries

D'après les données présentées dans ce tableau, les super condensateurs se positionnent entre les batteries et les condensateurs classiques . Leur plus grand avantage est leur énergie spécifique bien plus élevée que celle des condensateurs classiques. Mais l'énergie stockée est 10 fois plus faible que l'énergie stockée dans une batterie. Le problème des batteries classiques réside dans leur faible puissance spécifique qui représente 2% de la puissance spécifique d'un super condensateur ; dans ce domaine les condensateurs restent indétrônables avec une puissance spécifique qui peut atteindre les 100kW.kg-1 ; ce qui représente dix fois la puissance spécifique d'un super condensateur [11].

	Condensateurs classiques	Supercondensateurs	Batteries
Energie Spécifique (Wh.kg ⁻¹)	<0,1	1 à 10	10 à 150
Puissance spécifique (W.kg ⁻¹)	<100,000	<10,000	<1,000
Durée de Vie (Cycles)	>500,000	>500,000	1000
Durée de la charge nominale	10 ⁻⁶ à 10 ⁻³ secondes	1 à 30 secondes	1 à 5 heures
Durée de la décharge nominale	10 ⁻⁶ à 10 ⁻³ secondes	1 à 30 secondes	0,3 à 3 heures
Rendement charge/décharge(%)	>95%	85% à 98%	70% à 85%

Tableau I.1 : comparaison des différents éléments de stockage

I.6. Avantages et inconvénients

I.6.1. Avantages

- Courants de charge et décharge élevés (jusqu'à quelques 100 A pour les gros éléments).
- Faible durée de charge et décharge (de l'ordre de 1s à quelques 10s).
- Durée de vie ou nombre de cycles élevée (quelques 100 000 cycles) par rapport aux accumulateurs
- Densité puissance élevée.
- Etat de charge facile à gérer (linéaire en fonction de la tension).

I.6.2. inconvénients

- Faible densité d'énergie
- Tension maximale très faible par cellule (2,7V) pour la technologie charbon actif
- Electrolyte dangereux (acétonitryle) charge/décharge
- Composants pouvant contenir de l'acétonitryle (inflammable) [12].

Conclusion

Le principal objectif de ce premier chapitre est de présenter des généralités sur les super condensateurs (principe de fonctionnement, composition diverse, types caractérisation et le domaine d'application, ainsi les avantages et les inconvénients).

Dans le chapitre suivant nous avons l'identification et modélisation de quelque modèle de super condensateur afin de voir le plus compatible pour notre application.

Chapitre II
Modélisation et identification d'un
super condensateur

Introduction

Dans cette partie on présente la modélisation des super condensateurs et l'identification de ses paramètres afin de décrire leur comportement.

La modélisation permet de déterminer leur comportement en vue d'une utilisation dans une application et le principe de l'identification est basé sur l'analyse des réponses en tension du super condensateur testé à différentes excitation en courant.

II.1 Les modèles de super condensateur :

II.1.1. Modèle de base RC

Ce modèle reproduit le comportement du super condensateur en phase de charge et de décharge.

Afin de modéliser les super condensateurs, les constructeurs utilisent la similitude entre le comportement de ces derniers et celui des condensateurs électrolytiques. Pour cela un super condensateur peut être caractérisé par une résistance série R_s et une capacité de stockage C , avec un simple essai de décharge à courant constant, il est possible de calculer ces deux paramètres. La différence du niveau de tension entre la fin de la phase de décharge et cinq secondes après cette phase de décharge (V_r) donne l'image de la résistance série. L'image de la capacité de stockage de l'élément est donnée par la chute de tension entre l'état initial (état de repos avant la décharge) et l'état final (cinq seconde après la décharge) [13].

La figure II.1 montre l'essai utilisé par le constructeur MAXWELL .

La résistance série est déterminée à partir de la variation de la tension au début de la charge ou de décharge suite à une application d'un courant de charge/décharge constant:

$$R_s = \frac{V_r}{I} \dots \dots \dots (II.1)$$

La capacité C est déterminée directement à partir de la caractéristique de la réponse suite à une décharge à courant constant de la cellule Elle vaut :

$$C = \frac{I}{\frac{\Delta V_C}{\Delta T d}} \dots \dots \dots (II.2)$$

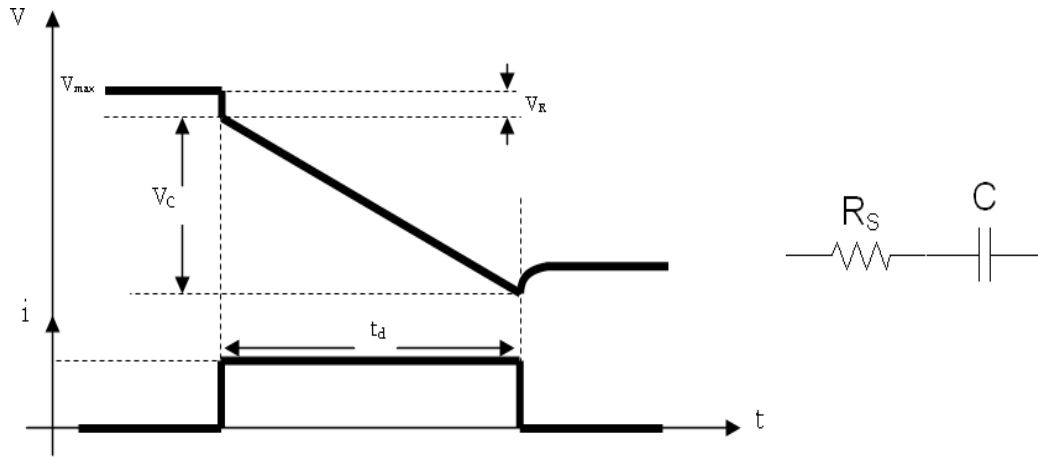


Figure II.1 : Modèle de base de super condensateur. Profil de décharge à courant constant

Le modèle constructeur est le modèle de base le plus simple, ses paramètres sont facilement déterminés mais ne tient compte ni de la variation de la capacité en fonction de la tension ni des autres paramètres comme la fréquence et la température.

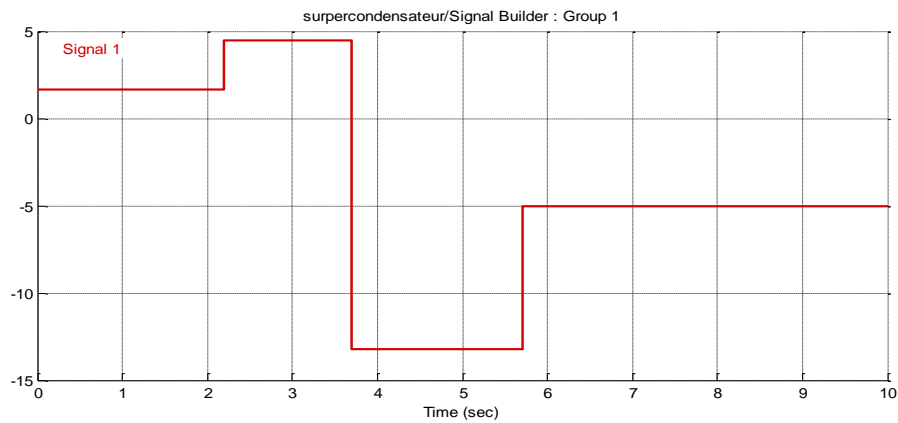


Figure II.2 : Signal de courant



Figure II.3 : Tension aux bornes du super condensateur

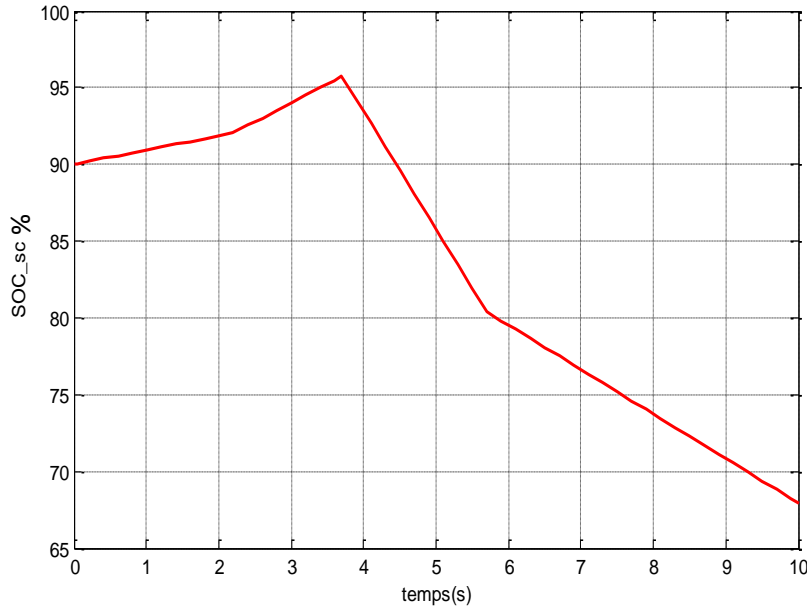


Figure II.4 : l'état de charge du super condensateur

II.1.2. Modèle a deux branches

Certains auteurs se basent sur des considérations énergétiques pour établir leur modèle comportemental. C'est le cas de R. Bonert et L. Zubieta qui exposèrent le premier véritable modèle de super condensateur de puissance. Ce modèle, dit à deux branches, repose sur la partition de l'énergie électrostatique des super condensateurs en deux :

- une énergie rapidement stockée ou disponible,
- une énergie lentement stockée ou disponible,

Et comporte par conséquent deux cellules RC (figure II.5). La première, dite principale, rend compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge ou de décharge. La deuxième, dite lente, vient en complément de la première pour décrire la redistribution interne de l'énergie après lesdits événements. [14]

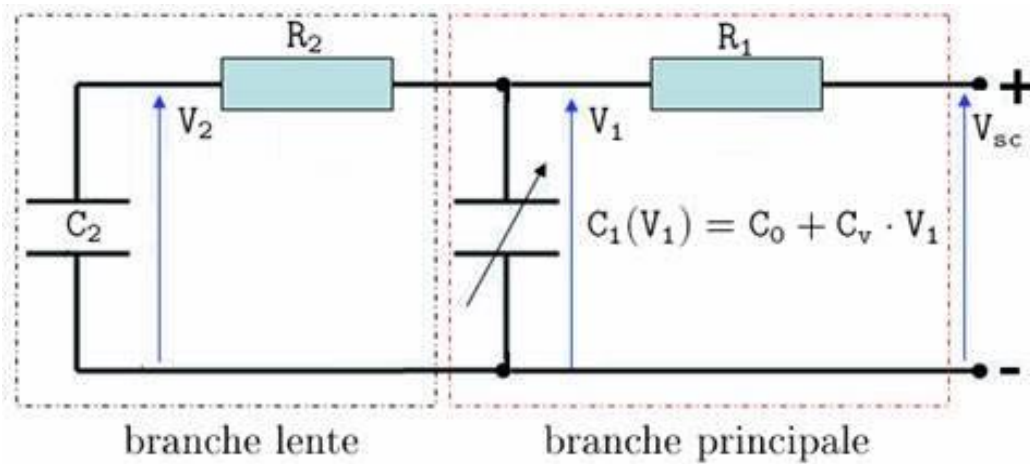


Figure II.5 : Modèle énergétique à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta

Cependant, la loi de non-linéarité de la capacité principale, loi linéairement croissante, n'est physiquement pas conforme à ce que peut donner la théorie de la couche double, qui prévoit une variation de la capacité beaucoup plus forte aux faibles potentiels qu'aux potentiels plus élevés. En outre, les études de F. Belhachemi et al. [15] ont montré que le modèle à deux branches menait à une sur-évaluation de la capacité principale, en particulier dans les temps courts, pour lesquels le comportement capacitif des super condensateurs est nettement de nature distribuée. Le problème réside dans ce que la procédure d'identification de la capacité principale ne dissocie pas la non-linéarité physique liée à la couche double électrique de celle, purement temporelle, liée à l'effet de ligne.

Il est à noter que la capacité principale qui correspond à la première cellule RC est variable en fonction de la tension de polarisation du fait de la non linéarité de la courbe de l'évolution de la tension de charge aux bornes de la cellule suite à l'application d'un courant de charge constant (Figure II.6).

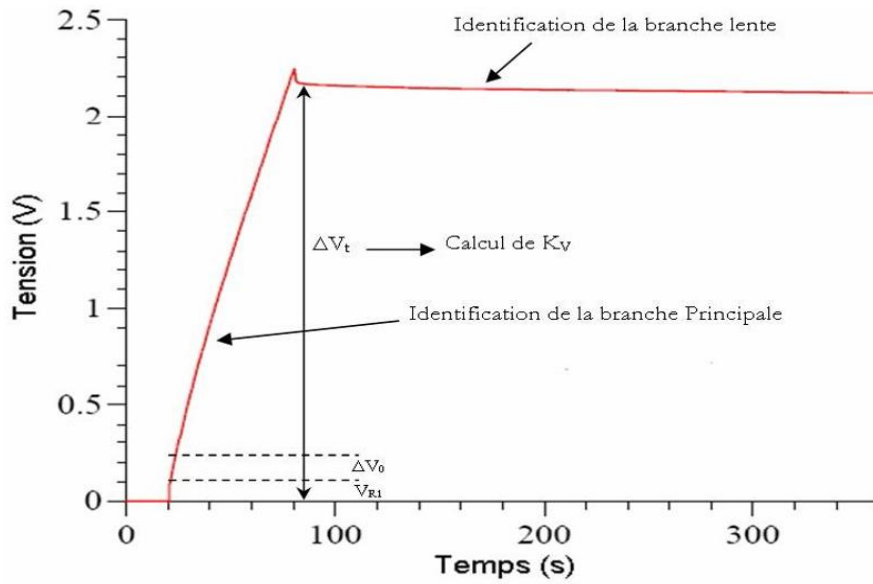


Figure II.6 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge 100A

La capacité principale (capacité différentielle) dépend de la tension V_1 et est égal à :

$$C_1 = C_0 + C_v \times V_1 \dots\dots\dots (II.3)$$

Le courant de charge circulant dans la capacité différentielle du super condensateur en fonction de la dérivée temporelle de la tension est donnée par :

$$I = C_1(V_1) \times \frac{dV_1}{dt} \dots\dots\dots (II.4)$$

La relation entre la quantité de charge totale au borne du super condensateur et le courant est donnée par:

$$Q_{tot} = \int (C_1 \times V_1) dV_1 \dots\dots\dots (II.5)$$

En combinant l'Équation 3 et l'Équation 5, on obtient :

$$Q_{tot} = \int (C_0 + C_v) \cdot dV_1 = \left(C_0 + \frac{C_v}{2} \cdot V_1 \right) \times V_1 \dots\dots\dots (II.6)$$

La capacité totale de charge de la cellule calculée pour une référence de tension nulle vaut donc :

$$C_{tot} = C_0 + \frac{C_v}{2} V_1 \dots\dots\dots (II.7)$$

II.1.2.1 Détermination des paramètres du modèle

II.1.2.1.1. Paramètres de la branche principale

A partir de la courbe obtenue nous avons identifié les différents éléments formant le modèle.

La résistance R_1 est la cause de la chute de tension de charge à l'instant initial :

$$V_{R1} = R_1 I \dots\dots\dots (II.8)$$

$$R_1 = \frac{V_{R1}}{I} \dots\dots\dots (II.9)$$

C_0 : est déterminée directement à partir de la caractéristique en charge à courant constant de la cellule, elle traduit la pente initiale de la courbe :

$$C_0 = \frac{I}{\frac{\Delta v}{\Delta t}(0)} \dots\dots\dots (II.10)$$

On calcule alors la valeur de C_0 à partir de la courbe de charge à courant constant d'un super condensateur. En pratique, on fait l'approximation que la pente initiale de V_1 par une pente $\frac{\Delta V_0}{\Delta t_0}$, choisie au voisinage immédiat de l'instant initial (Figure II.6).

La charge totale d'un super condensateur vaut :

$$\Delta Q_{tot} = C_0 \cdot \Delta V_1 + \frac{C_v}{2} \cdot (\Delta V_1)^2 \dots\dots\dots (II.11)$$

$$C_0 \cdot \Delta V_1 + \frac{C_v}{2} \cdot (\Delta V_1)^2 = I \cdot \Delta t \dots\dots\dots (II.12)$$

Donc

$$C_v = 2 \cdot \frac{(I \cdot \Delta t - C_0 \cdot \Delta V_1)}{(\Delta V_1)^2} \dots\dots\dots (II.13)$$

II.1.2.1.2. Paramètres de la branche lente

À la fin de la charge de la cellule, le phénomène de redistribution de charges internes débute. Ce phénomène apparaît sous forme d'une chute de tension exponentielle à constante de temps assez grande. Ceci peut être assimilé à une charge lente par le super condensateur d'une autre capacité C_2 à travers la résistance R_2 .

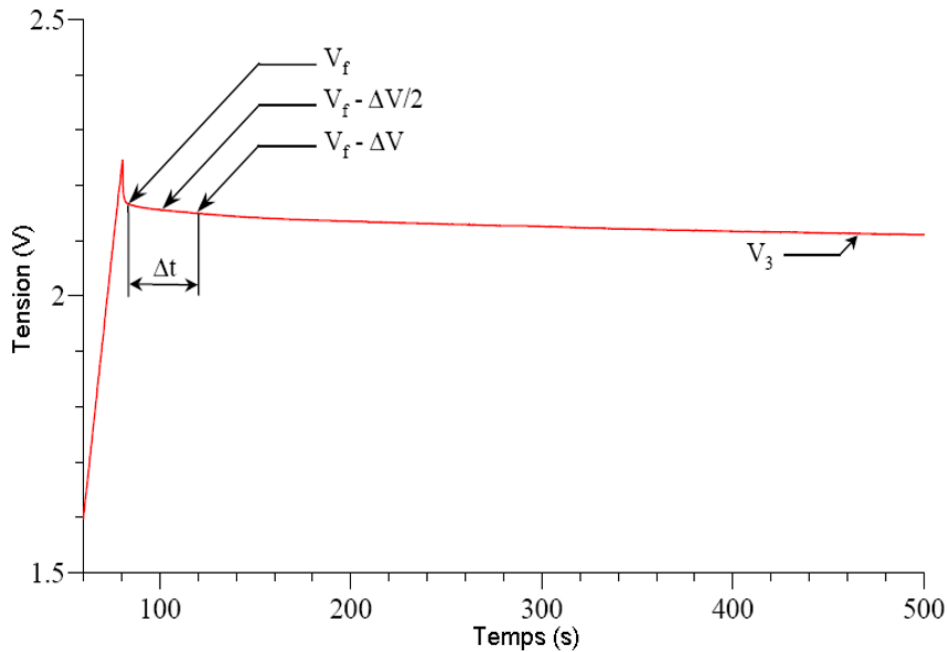


Figure II.7 : Evolution de la tension de la cellule BCAP0010-2600F "Courant de charge

II.1.2.1.2.1. Identification de R2

L'identification de la branche lente débute à une nouvelle origine située après la chute de tension brusque en fin de charge du super condensateur noté V_f :

$$i(0) = \frac{V_f}{R_2} \dots \dots \dots (II.14)$$

$$i(0) = -C_1 \frac{dV_1}{dt}(0) \dots \dots \dots (II.15)$$

Pour le calcul de R_2 , on réalise l'approximation que la pente initiale observée sur $V_1(t)$ est égale à $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, et on évalue le termes $i(0)$ et C_1 pour le niveau médian de tension, à savoir (Figure 5) $V_f - \frac{\Delta V}{2}$ de sorte que R_2 s'exprime par :

$$R_2 = \frac{V_f - \frac{\Delta V}{2}}{C_1(V_f - \frac{\Delta V}{2})} \times \frac{\Delta t}{\Delta V} \dots \dots \dots (II.16)$$

II.1.2.1.2.2. Identification de C2

La capacité C_2 peut être calculée en fin de redistribution, ou plus exactement après une durée généralement de plusieurs minutes, au-delà de laquelle la tension aux bornes du composant n'évolue que plus lentement. Les tensions V_1 et V_2 aux bornes des capacités C_1 et

C_2 sont alors supposées à une même valeur V_3 et l'équation de conservation de la charge stockée permet d'établir l'expression de C_2 en fonction de Q_{tot} et V_3 . Ainsi on détermine C_2 pour un composant complètement déchargé par la relation suivante (Figure II.7):

$$C_2 = \frac{Q_{tot}}{V_3} - (C_0 + \frac{1}{2} \times C_v \times V_3) \dots\dots\dots (II.17)$$

II.1.2.2. Limites du modèle à deux branches

Le modèle à deux branches, comme il a été réalisé sur la base d'un courant de charge constant ne peut représenter d'une façon fidèle le comportement du super condensateur dès que les conditions de test s'écartent de celles utilisées pour l'identification des paramètres du modèle.

Les auteurs de la référence [16] ont montré les limites du modèle à deux branches sur des intervalles de charges et de décharges très courts et aussi pour des courants différents de celui de la modélisation. Il est montré que la capacité du super condensateur est fortement dépendante d'autres paramètres et notamment des phases transitoires comme le phénomène de redistribution des charges internes.

II.1.3. Modèle énergétique distribué

F. Belhachemi améliora la précision du modèle à deux branches, d'une part en remplaçant la cellule RC de la branche principale par une ligne de transmission non-linéaire (discrétisée en un nombre fini de cellules identiques, de façon à permettre l'implantation du modèle dans les logiciels usuels de simulation électriques), pour une meilleure description du comportement électrique et énergétique des super condensateurs dans les temps courts, d'autre part en ajoutant quelques cellules RC non-linéaires pour appréhender plus finement les temps longs. De plus, les lois décrivant la variation des différentes capacités du modèle en fonction de la tension sont choisies linéaires par morceaux, pour une meilleure approche de la physique associée aux propriétés capacitives de la couche double électrique. Des tests de validation expérimentale ont montré que le modèle énergétique distribué de F. Belhachemi reproduisait de façon fidèle les pentes de variation de la tension aux bornes des super condensateurs, point qui faisait défaut au modèle à deux branches de R. Bonert et L. Zubieta, dès lors que l'on s'écartait notablement des conditions expérimentales utilisées pour l'identification.[17]

La résistance R et la capacité C de la ligne de transmission du modèle ont été identifiés par des essais de charges partielles à courant constant. Ces essais ont été effectués à différentes tensions initiales. La méthode est détaillée dans la référence (BELHACHEMI, 2001). En ce

qui concerne la méthode de détermination des paramètres de la branche représentant la redistribution des charges, elle est similaire à celle utilisée dans le modèle à deux branches.

Pour n branches de la ligne de transmission, la capacité de chaque branche vaut

$$C_i = \frac{C}{n} \dots \dots \dots (II.18)$$

Et la résistance de chaque branche s'écrit :

$$R_i = \frac{R}{n} \dots \dots \dots (II.19)$$

Avec R : Résistance totale de la ligne de transmission

C : capacité totale de la ligne de transmission

L'augmentation du nombre de branches de la ligne de transmission n, provoque une diminution de l'erreur entre l'impédance du modèle et celle réelle du super condensateur.

La représentation du modèle sous forme de filtres RC représente bien le comportement fréquentiel du super condensateur même pour des fréquences élevées. Plus le nombre de branches RC augmente, plus précis est le modèle.

II.1.4. Modèle fréquentiel

Ce modèle est basé sur l'utilisation de la réponse fréquentielle du dispositif. Pour caractériser les super condensateurs, une impédance mètre est normalement utilisé afin de mesurer la variation de l'impédance en fonction de la fréquence dans le plan de Nyquist (plan complexe). Il est de plus nécessaire d'effectuer un balayage en fréquence pour différents niveaux de tension pour connaître la variation de la capacité en fonction de la tension à ses bornes.[18]

Cette méthode utilise le fait que la réponse fréquentielle d'un super condensateur est proche de celle donnée par une ligne de transmission Zharm avec une résistance série Rs qui représente la limite de la partie réelle quand $\infty \rightarrow \omega$:

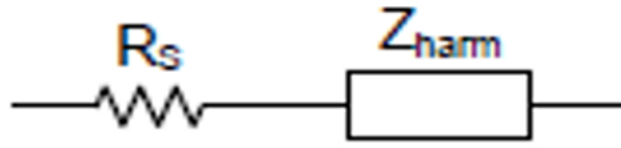


Figure II. 8 : Circuit de base du modèle fréquentiel

Z_{harm} : est donnée par la fonction de Laplace suivante :

$$Z_{harm}(j\omega) = \tau \times \frac{\coth \sqrt{j\omega\tau}}{C\sqrt{j\omega\tau}} \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

Avec : $\tau = RW.C$ (II.21)

La transformé de Laplace de cette impédance s'écrit :

$$Z_{harm} = R_w \frac{\coth \sqrt{pR_wC}}{\sqrt{pR_wC}} \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

Cette transformation permet ainsi de représenter sous la forme d'un modèle circuit (figure II.9) le modèle fréquentiel de la ligne de transmission.

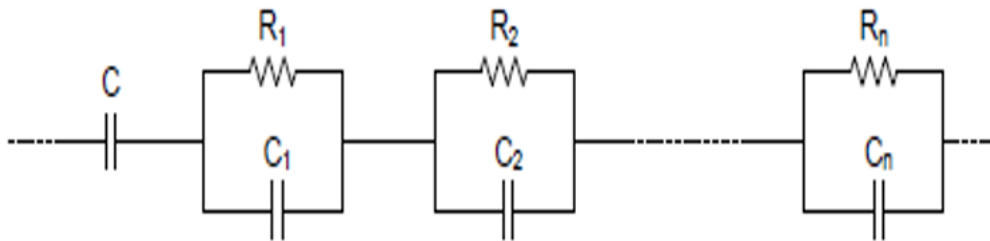


Figure II.9 : Représentation de l'impédance d'un super condensateur basée sur la réponse fréquentielle

Avec $R_n = \frac{2.R_w}{n^2\pi^2}$ (II.23)

Et $C_n = \frac{C}{2}$ (II.24)

II.1.5. Modèles tenant compte du comportement en fréquence en fonction de la nature des pores des électrodes

De Levie fut le premier à étudier la nature poreuse des électrodes du super condensateur [19]. Il a modélisé théoriquement la capacité de l'électrode poreuse par une distribution de résistances et de capacités dont le comportement électrique correspond à celui d'une ligne de transmission.

Le modèle de la ligne de transmission permet de discrétiser la capacité totale du super condensateur en le représentant par plusieurs circuits RC en séries.

Cette représentation s'avère très logique comme représenté sur la Figure II.10. En effet, elle présente l'accès des ions à la capacité en profondeur des pores dépendant ainsi de la fréquence de fonctionnement. La résistance distribuée représente celle de l'électrolyte. Pour estimer l'effet capacitif de double couche, De Levie a supposé que les pores sont droits et cylindriques de diamètre uniforme et l'électrode est un conducteur parfait.[20]

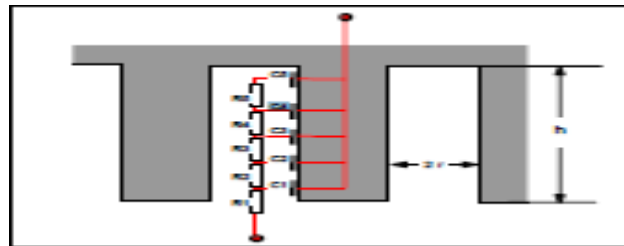


Figure II. 10 : Représentation poreuse d'électrode comme ligne de transmission de cinq éléments (KÖTZ, et al, 1999).

Le modèle équivalent utilisé pour rendre compte de cette dépendance est la ligne de transmission présentée dans la Figure II.10. Chaque port de profondeur h et de rayon r est uniformément distribué le long d'une ligne de transmission de résistance linéique R et de capacité linéique C.

L'impédance de la ligne de transmission est donnée par la relation suivante :

$$Z(\omega) = R_W \frac{\coth \sqrt{jC\omega R_W}}{\sqrt{jC\omega R_W}} \dots\dots\dots (II.26)$$

II.1.6. Identification des paramètres du super condensateur

Dans cette partie nous allons identifier les paramètres de notre super condensateur. La procédure d'identification est basée sur l'analyse des variations de tension aux bornes du super

condensateur, durant ledit essai. Le super condensateur utilisé est celui de la marque Maxwell Durablue a deux branches.

II.1.6.1. Méthodes de caractérisation des super condensateurs

La connaissance des performances de super condensateurs pour des applications de forte puissance est importante. Il existe trois méthodes principales pour analyser les super condensateurs : le cycle de charge/décharge, la spectroscopie d'impédance et la voltampérométrie cyclique. Elles conduisent à l'acquisition de paramètres qui sont considérés suffisants pour décrire les propriétés générales du super condensateur dans une large gamme de fréquence ainsi que dans le domaine temporel [21].

Trois techniques de caractérisation complémentaires sont réalisées :

- ✓ une caractérisation par cycle de charge/décharge à courant constant, à tension constante, ou à puissance constante.
- ✓ une caractérisation par spectroscopie d'impédance permettant le tracé du diagramme de Nyquist de l'impédance
- ✓ une caractérisation par voltampérométrie cyclique, la capacité étant montrée comme une dynamique en fonction de la tension appliquée.

Ces caractérisations permettent de déterminer les variations de l'impédance des super condensateurs en fonction de la tension, du courant, de la fréquence et de la température.

II.1.6.2. Description du banc d'essai

La méthode d'identification utilisée est la méthode du cycle de charge / décharge, pour cela on aura besoin des matériels suivants :

- 1-Super condensateur
- 2-Source de tension /courant
- 3-Ampèremètre
- 4-Voltmètre
- 5-Oscilloscope
- 6-Capteur de courant (capteur a effet hall)
- 7-Capteur de tension
- 8-Source de tension

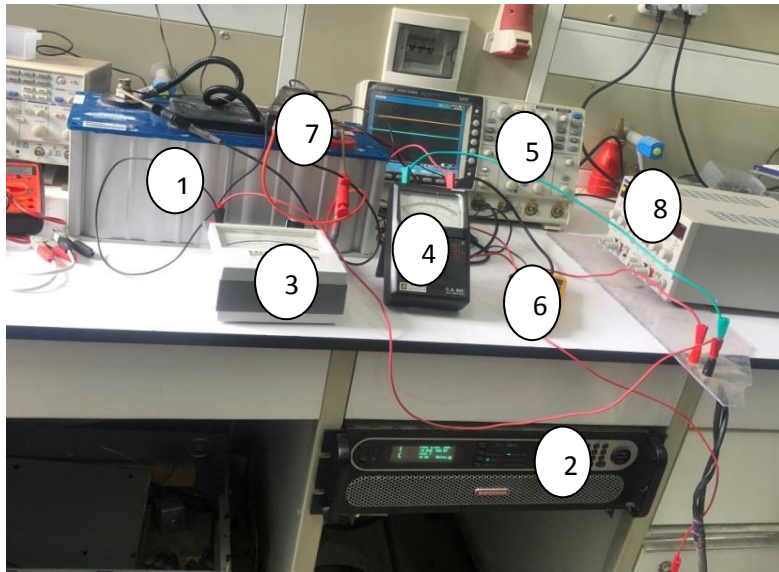


Figure II.11 : Banc expérimental d'identification du super condensateur

II.1.6.3. Caractéristique du super condensateur

- Maxwell Durablue super condensateur 48V 165F
- Longue durée de vie : jusqu'à 8 millions à 120 millions de cycles
- Densité de puissance élevée : jusqu'à 6700W/kg
- Faible ESR : peut être utilisé comme une batterie rechargeable et idéale pour les fins de sauvegarde
- Charge rapide : charge de 10 secondes à 10 minutes pour atteindre sa capacité nominale de plus de 95%.[22]



Figure II. 12 : Caractéristiques du super condensateur

II.1.6.3.1. Essai de charge

Dans cet essai on alimente le super condensateur avec un courant de 10A et une tension de 10V.

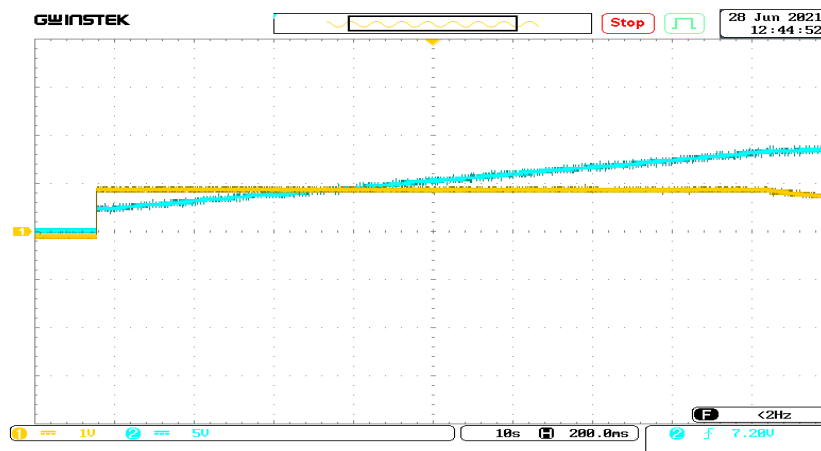


Figure II. 13 : Essai en charge du super condensateur

II.1.6.3.2. Identification de R1 et C1

A partir de la courbe obtenue nous allons identifier les différents éléments formant le modèle.

La résistance R1 est la cause de la chute de la tension de charge à l'instant initial :

$$V = R1 \cdot I$$

$$R1 = \frac{\Delta V}{I} = \frac{8,5 - 3}{10} = 0,55 \Omega$$

$$R1 = 0,55 \Omega$$

C1 est déterminée directement à partir de la caractéristique en charge à courant constant de la cellule :

$$C1 = \frac{I}{\frac{\Delta V}{\Delta t}} = \frac{10}{\frac{8,5 - 3}{90 - 7,5}} = 150 \text{F}$$

$$C1 = 150 \text{F}$$

II.1.6.3.3. Essai de décharge

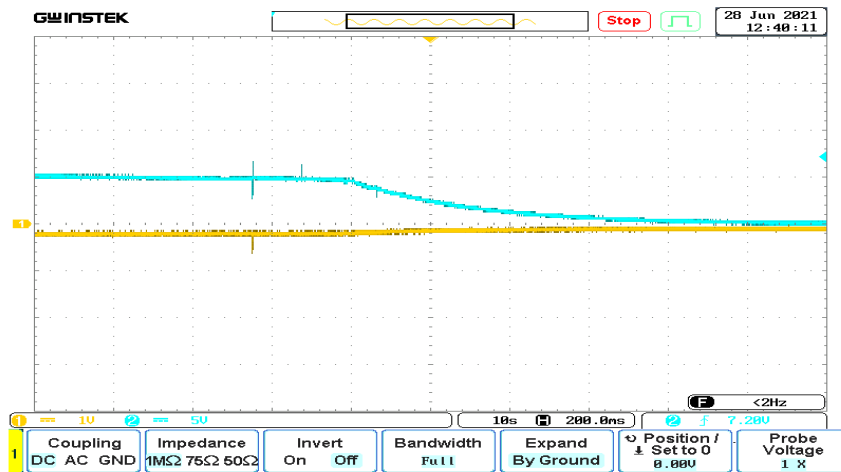


Figure II. 14 : Essai en décharge du super condensateur

II.1.6.3.4. Identification de R2 et C2

L'identification de R2 débute à une nouvelle origine située après la chute de tension brusque en fin de charge du super condensateur.

$$R2 = \frac{\Delta V}{I} = \frac{5}{10} = 0,5 \Omega$$

$$R2 = 0,5 \Omega$$

$$C2 = \frac{I}{\frac{\Delta V}{\Delta t}} = \frac{10}{\frac{5 - 0,1}{90 - 40}} = 102 \text{F}$$

$$C2 = 102 \text{F}$$

Le tableau suivant résume les valeurs des paramètres du super condensateur identifié.

Paramètres	Valeurs
R1	0,55 Ω
R2	0,5 Ω
C1	150F
C2	102F

Tableau II.1 : valeurs des paramètres du super condensateur identifié

Conclusion

Dans ce chapitre on a identifié les super condensateurs dans le Modèle de base RC modèle énergétique distribué, le Modèle fréquentiel et le modèle a deux branches. Le prochain chapitre on va faire l'étude d'un chargeur des super condensateurs (hacheur réversible en courant), et une application des super condensateurs.

Chapitre III

Étude d'un hacheur réversible en courant et application des super condensateurs

Introduction

Dans ce chapitre nous allons introduire le principe de fonctionnement d'un chargeur pour super condensateurs, qui est basé sur le principe d'un hacheur réversible en courant, ainsi nous allons présenter le système étudié qui est une source hybride (batterie et super condensateur) appliqué à une machine électrique ceux qui nous permettra la charge et la décharge de notre super condensateur.

III.1. Présentation globale du système

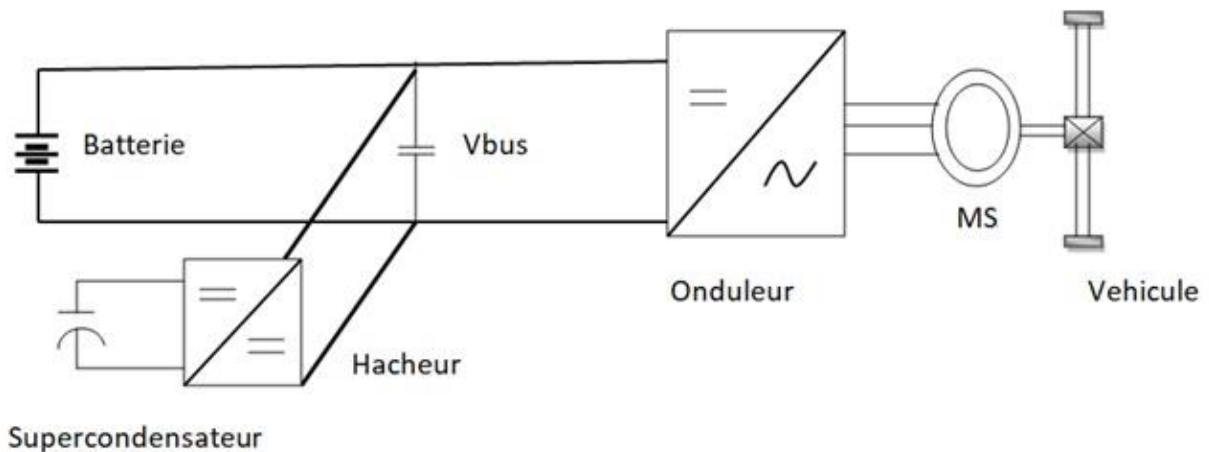


Figure III.1 : description du système étudié.

L'idée principale qui conduit au concept de source hybride consiste à introduire, en plus de la source d'énergie primaire (Batterie), une source de puissance (super condensateur). Cette solution d'hybridation présente des meilleures performances notamment en terme de coût, de dimensionnement et de durée de vie des batteries qu'un système composé uniquement de batteries, comme c'est le cas de la plupart de véhicules électriques et des véhicules électriques hybrides sur le marché automobile actuel. Notre travail est spécialement basé sur la charge du super condensateur. Le système global est composé de convertisseurs DC/DC du super condensateur de la batterie d'un onduleur et de la machine.

III.2. Étude du chargeur

III.2.1. Principe de fonctionnement

Une source de tension V alimente une charge modélisée par une f.é.m. E en série avec une inductance L et une résistance r . La structure du hacheur est formée de deux interrupteurs réversibles en courant K_1 (T_1 et D_2) et K_2 (T_2 et D_1), commandés à l'ouverture et à la fermeture. D_1 et D_2 sont des diodes rapides, T_1 et T_2 sont des interrupteurs unidirectionnels commandés à l'ouverture et à la fermeture.

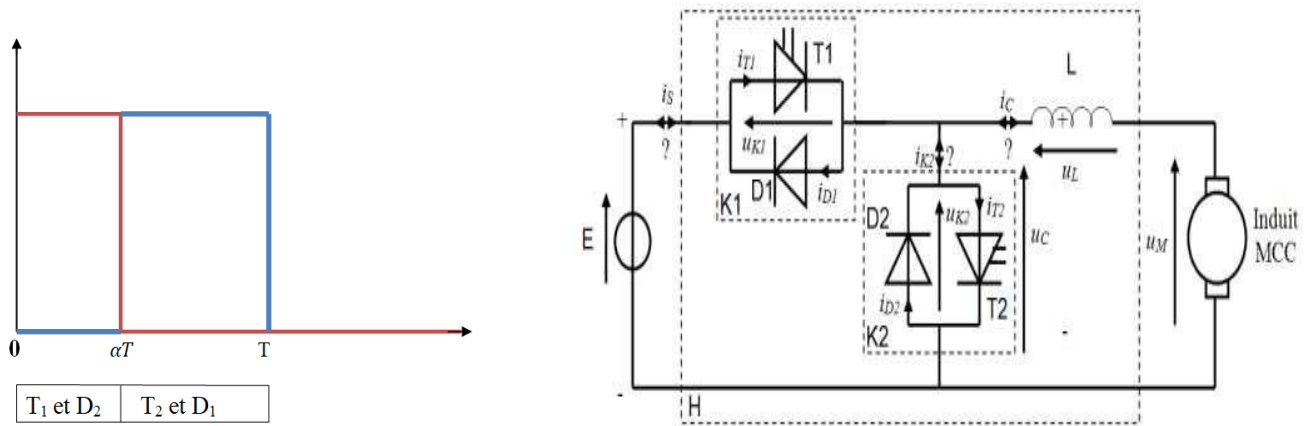


Figure III.2 : Circuit équivalent d'un hacheur réversible en courant

Ce convertisseur peut fonctionner suivant deux modes qui sont :

III.2.1.1. Mode 1:

$t \in [0 \text{ à } \alpha.T]$: T_1 est fermé et T_2 ouvert; nous avons $u = V$ donc D_1 est bloquée et $i_{k2} = 0$; Le courant $i_c = i_s$ imposé par la charge passe dans T_1 s'il est positif et dans D_2 s'il est négatif. Donc la conduction du courant est assurée par les interrupteurs T_1 et D_2 , le transfert de l'énergie s'effectue de la source vers la charge (**Fonctionnement moteur**).

Le circuit équivalent pour le hacheur est celui de la Figure, ce montage équivalent a un hacheur série (devolteur).

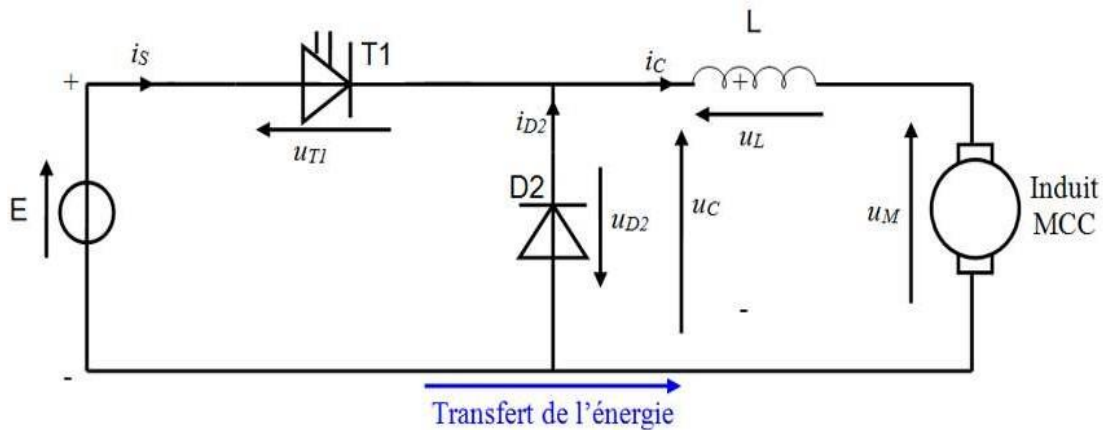


Figure III.3 : Circuit équivalent du hacheur série

L'équation résultante est :

$$\begin{cases} U_c = V \\ i_c = Ae^{-t/\tau} + \frac{V - E}{r} \end{cases}$$

Avec $\tau = \frac{L}{r}$

III.2.1.2. Mode2 :

$t \in [\alpha.T \text{ à } T]$: T_1 est ouvert et T_2 fermé; nous avons $U = 0$ donc D_2 est bloquée et $i_s = 0$. Le courant $i_{k2} = -i$ passe dans D_1 s'il est positif et dans T_2 s'il est négatif. Donc la conduction du courant est assurée par les interrupteurs D_1 et T_2 . Le transfert de l'énergie s'effectue de la charge vers la source (**Fonctionnement génératrice**).

Le circuit équivalent pour le hacheur est celui de la Figure, ce montage équivaut à un hacheur parallèle (survolteur).

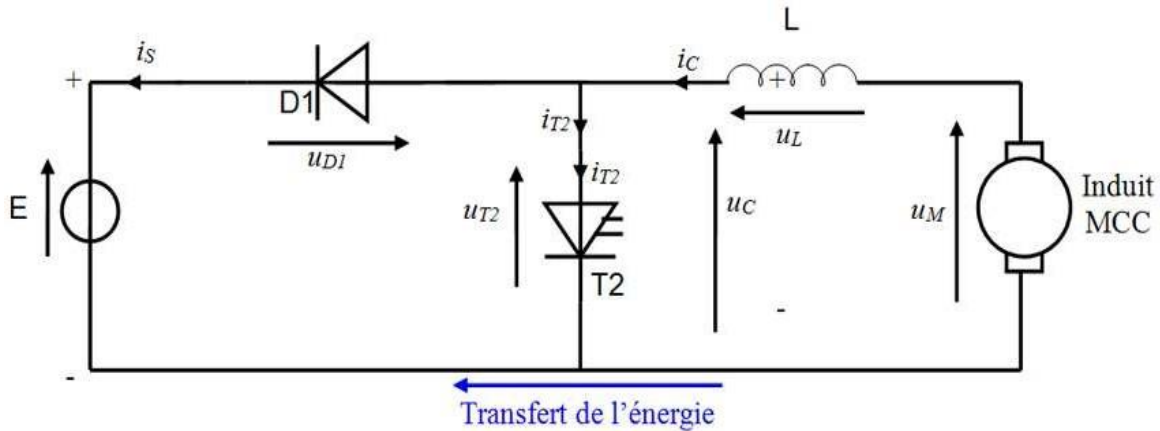


Figure III. 4 : Circuit équivalent du hacheur parallèle

L'équation résultante est :

$$\begin{cases} U_c = 0 \\ i_c = B e^{-t'/\tau} - \frac{E}{r} \end{cases}$$

Avec $t' = t - \alpha T$

Passage d'un mode de fonctionnement à l'autre.

Il existe deux modes de commandes : commande symétrique et commande alternée : En commande alternée, tant que le courant i_c est positif, T_1 et D_2 assurent le fonctionnement du hacheur en conduisant à tour de rôle comme nous l'avons expliqué précédemment. Si i_c vient à s'annuler puis changer de signe, alors, dès que l'on détecte le passage par 0, on lance la commande de T_2 . C'est alors T_2 et D_1 qui assurent à tour de rôle la conduction.

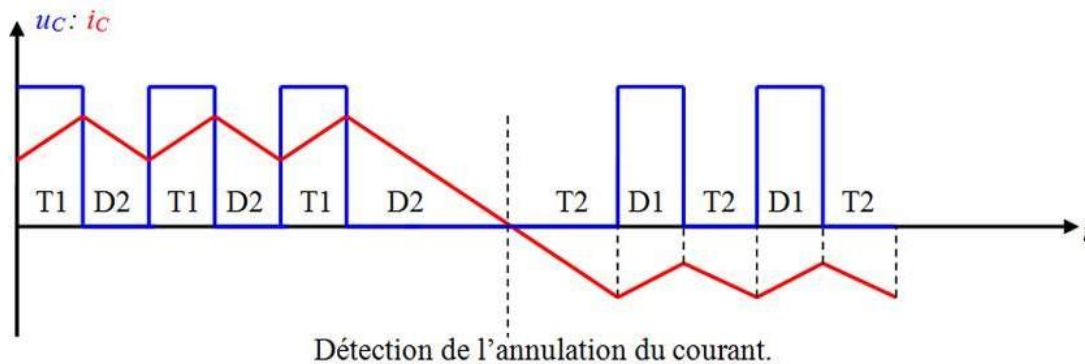


Figure III. 5 : Passage d'un mode de fonctionnement à l'autre

Chapitre III : Étude d'un hacheur réversible en courant et application des super condensateurs

La structure fonctionne donc avec i positif ou négatif; la tension U_c est égale à V ou à 0 ; elle est donc positive en valeur moyenne; le hacheur est réversible en courant. La réversibilité en courant permet la conduction permanente de i pour tout régime de fonctionnement contrairement aux hacheurs non réversibles.

III.3. Caractéristique des différents éléments du système étudié

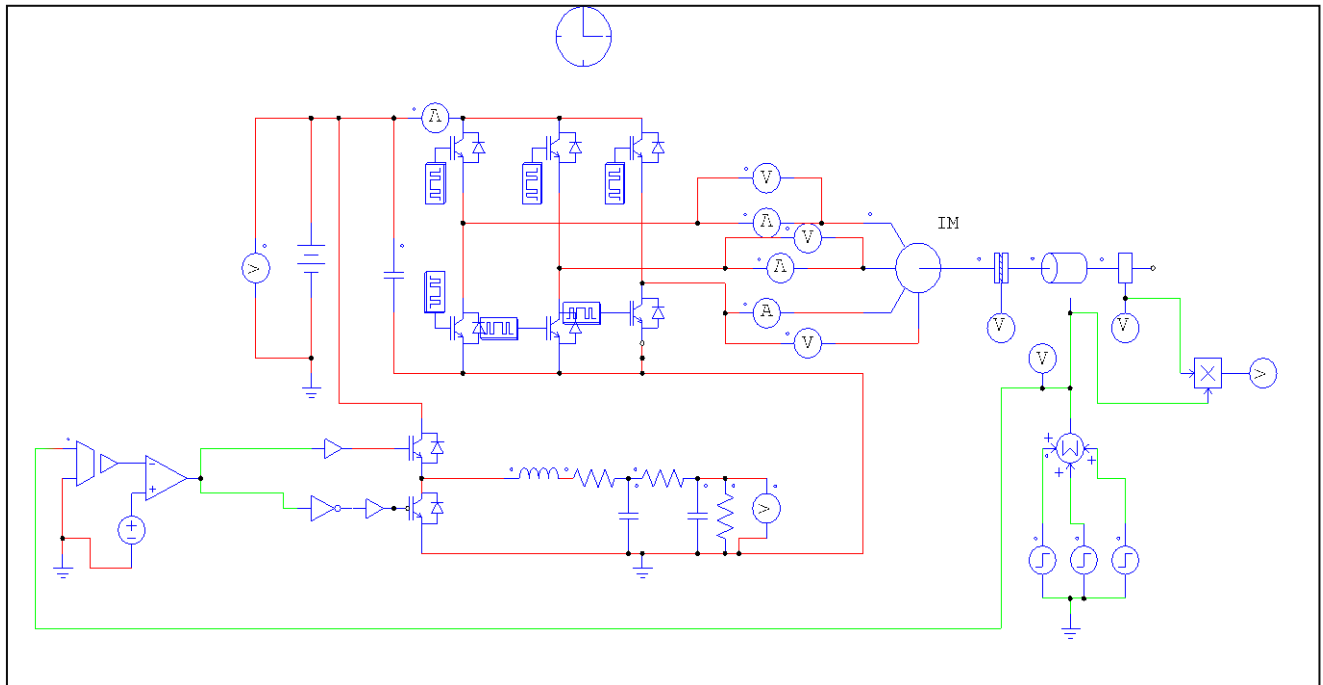


Figure III.6 : Schéma global du système étudié sous le logiciel PSIM

III.3.1. Caractéristique de la batterie et du bus continu

La batterie fut modélisée par une source de tension et le bus continu par une capacité :

$$C_{\text{bus}} = 44.10^{-4}\text{F} \text{ initialement chargé à } 400\text{V}$$

$$V_{\text{batt}} = 400\text{V}$$

III.3.2. Caractéristique du super condensateur

Le super condensateur utilisé est un modèle à deux branches constitué des éléments suivants :

Eléments	Valeurs
R1	$12.10^{-3}(\Omega)$
R2	$12.10^{-3}(\Omega)$
C1	$45.10^{-3}F$
C2	45F
L	$5.10^{-4}(H)$
Rch	12(Ω)

Tableau III.1 : Paramètres du super condensateur utilisé

III.3.3. Caractéristique de la machine

Eléments	Valeurs
Rs	0.294(Ω)
Ls	1.39mH
Rr	0.156(Ω)
Lr	0.74mH
Lm	41mH
P	6
J	0.4
Torque flag	0
Master	1

Tableau III.2 : Paramètres de la machine synchrone utilisée

III.4. Résultats de la simulation

Le modèle est simulé sur un cycle de 1seconde pendant le fonctionnement à des couples différents selon un profile.

La stratégie proposée est d'imposé un couple de référence à la machine et ce couple servira de commande pour la charge et décharge de notre super condensateur. L'application de cette référence au système global nous a permis d'obtenir les différentes allures suivantes pour l'analyse

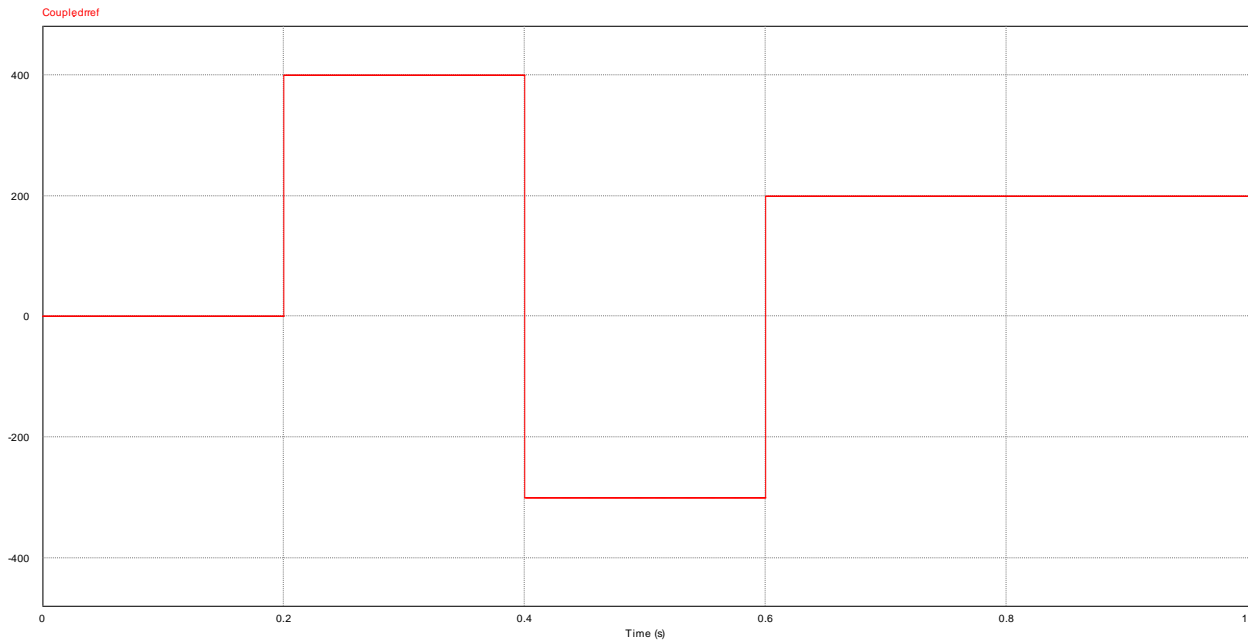


Figure III.7 : Profile du couple de référence

La (Figure III.7) montre l'allure du couple de référence en Nm, on a choisi cette référence pour avoir les différents modes de fonctionnement à savoir la traction, le freinage, et l'arrêt. Cette référence va imposer l'allure du couple et de la vitesse la machine

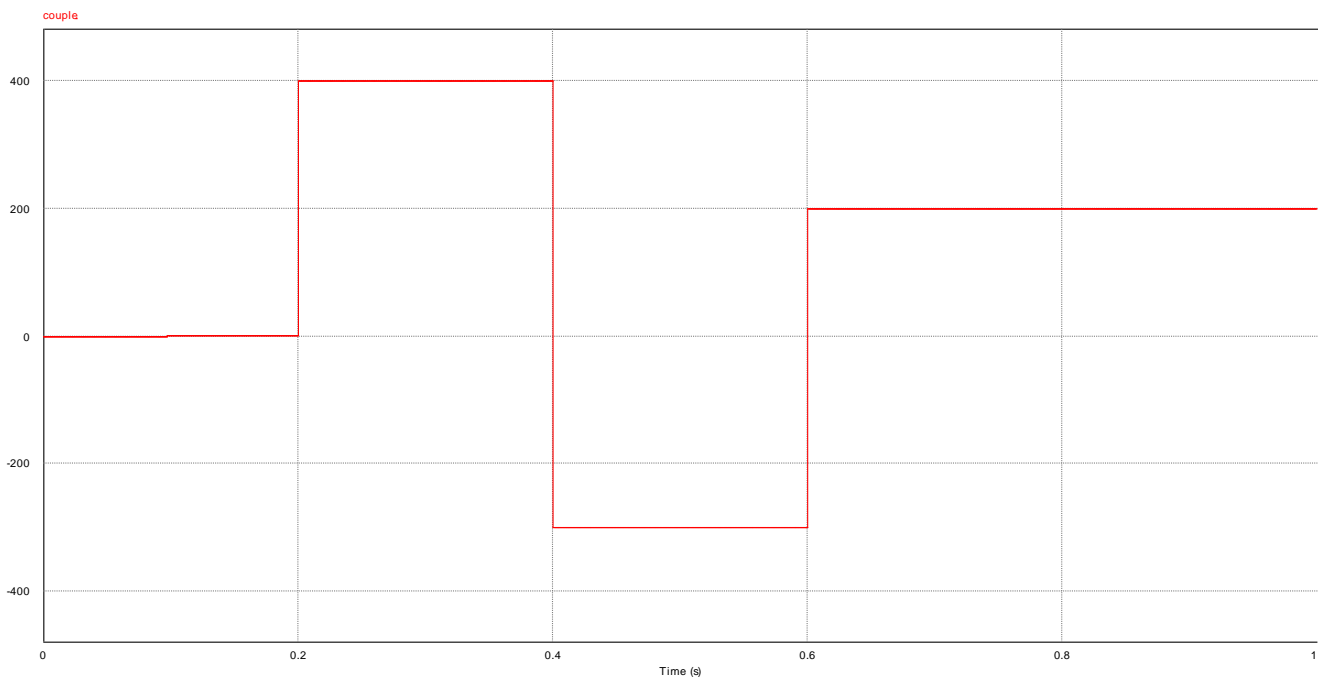


Figure III.8 : Allure du couple de la machine

Chapitre III : Étude d'un hacheur réversible en courant et application des super condensateurs

En comparant les deux allures on remarque que le couple de la machine suit parfaitement le couple de référence qu'on a imposé.

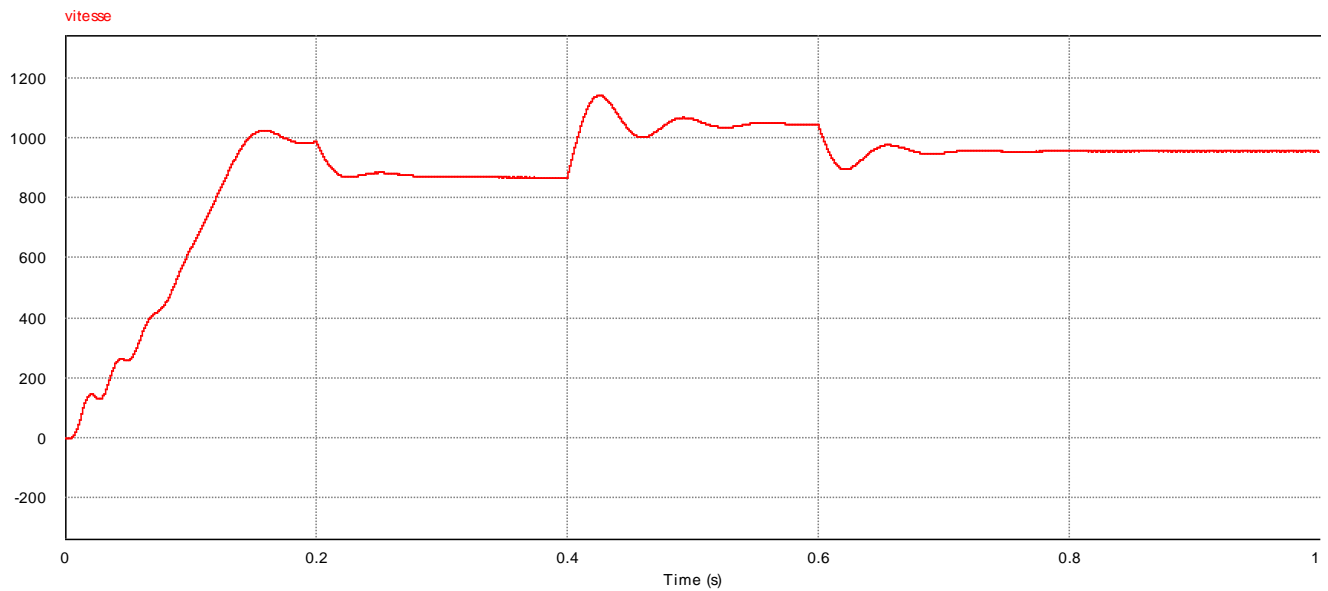


Figure III.9 : Allure de vitesse de la machine

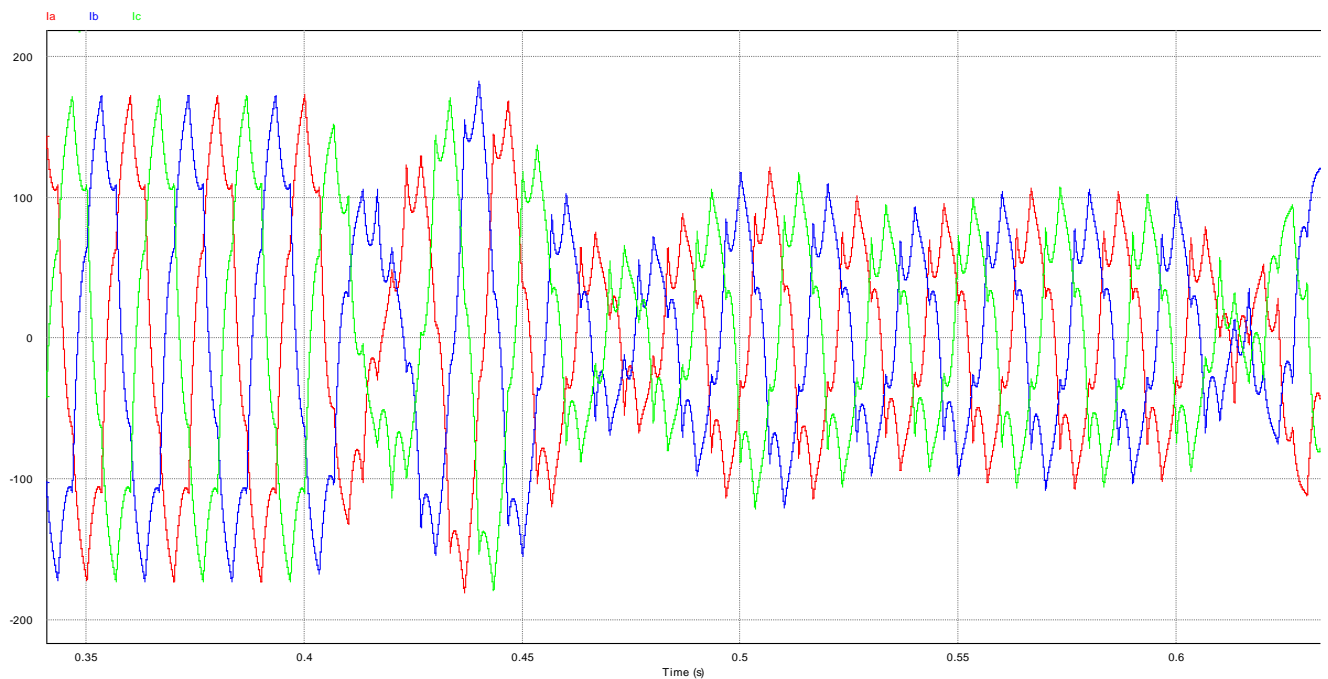


Figure III. 10 : Allure des courants statoriques triphasées

La (Figure III.10) montre l'allure du courant des trois phases.

Chapitre III : Étude d'un hacheur réversible en courant et application des super condensateurs

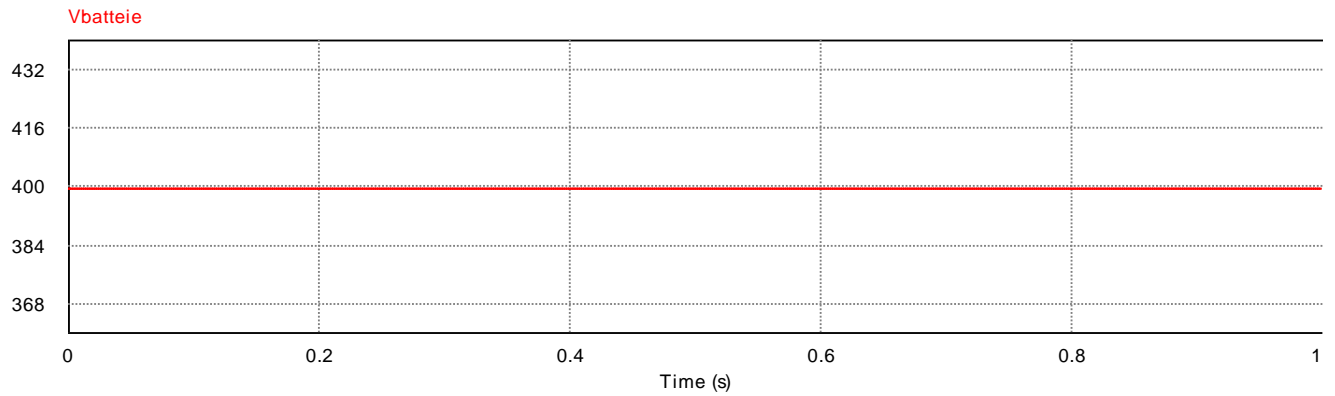


Figure III.11 : Allure de tension de banc DC

La (Figure III.11) montre le comportement de la tension au niveau de la batterie on remarque que la tension est stable, elle atteint sa valeur maximale qui est de 400V durant toutes les phases de fonctionnement.

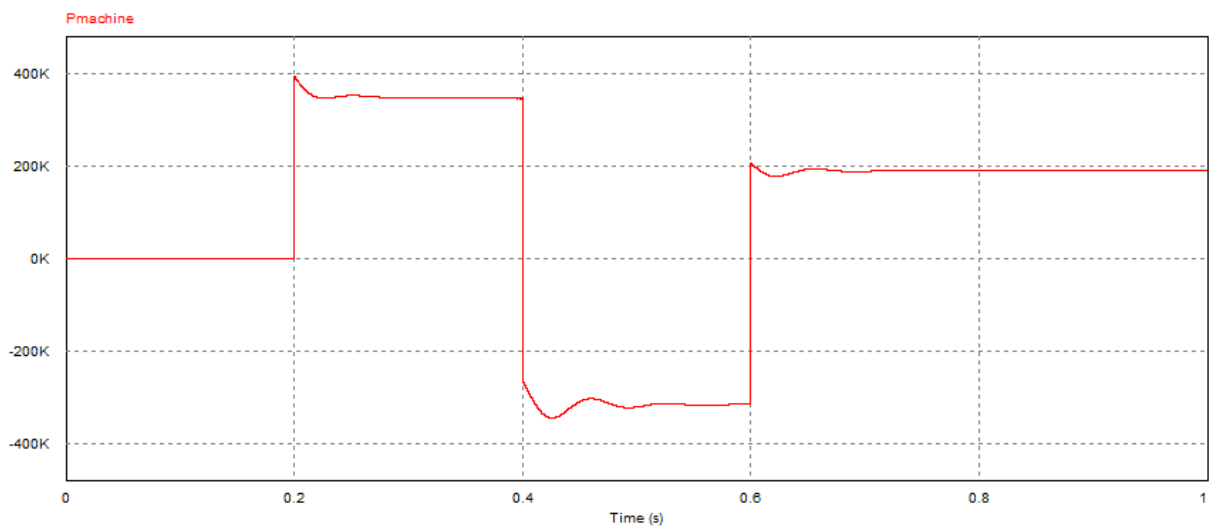


Figure III.12 : Profil de puissance de la machine asynchrone

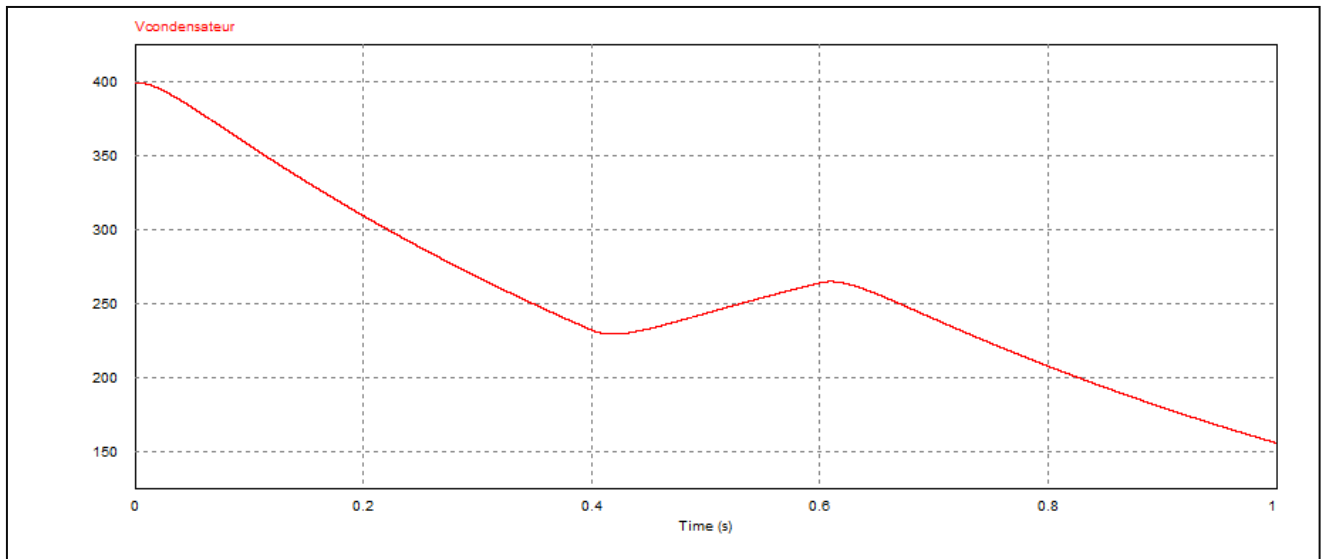


Figure III.13 : La tension aux bornes du super condensateur

La (Figure 30) montre l'état de charge (la tension) du super condensateur

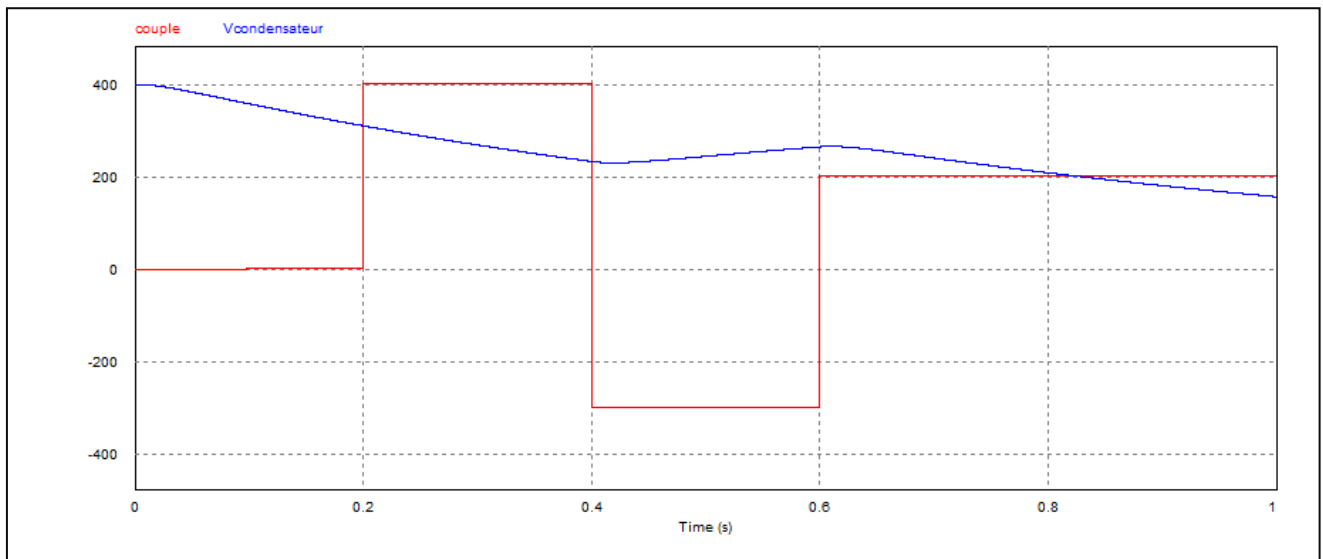


Figure III.14 : Allure du couple de la machine asynchrone et la tension aux borne du super condensateur

La (Figure III.31) montre le comportement du super condensateur (charge et décharge). On remarque deux régimes:

- Régime normal (le super condensateur fournit de l'énergie a la machine).
- Régime de récupération (charge du super condensateur par la machine).

Conclusion

Ce chapitre a été consacré au dimensionnement des différentes parties de notre système étudié à savoir (la batterie le bus continu le super condensateur les différents convertisseurs d'électronique de puissance, ainsi que la machine et à la présentation des résultats de simulation du système globale étudié.

L'intérêt de ce chapitre est d'imposer un couple à la machine qui permet la charge du super condensateur à travers un circuit de commande, et d'assurer le fonctionnement de système sans interruption.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le principal objectif de notre travail intitulé « Modélisation et identification des super condensateurs ».

Dans un premier lieu, nous nous sommes opté à la présentation d'une généralité sur les super condensateurs, leurs structures, principe de fonctionnement et domaines d'application.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et les méthodes d'identifications des paramètres des super condensateurs pour une utilisation meilleure de ces performances.

Le troisième chapitre présente une description générale de notre système étudié, et la caractérisation de chaque élément, à savoir les sources d'énergies (batteries et super condensateurs) , les convertisseurs statiques (hacheurs et onduleur), la machine, les résultats de notre système étudié sous le logiciel PSIM sont présentés et discutés à la fin.

Perspective

En perspectives, nous envisageons d'élargir ces travaux, dans le but d'améliorer le fonctionnement du véhicule électrique, nous proposons de :

- ❖ Réaliser un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour valider le travail et pourquoi pas le concrétiser.
- ❖ Appliquer d'autres stratégies de commande pour la charge du super condensateur, comme la régulation par hystérésis.
- ❖ Utiliser un circuit intégré pour la charge du super condensateur

Reference bibliographique

Reference bibliographique

1. N'Guessan Stephane Attemene. Optimisation temps réel des flux énergétiques au sein d'un système multi-sources multi-charges basé sur les énergies d'origine renouvelable. Energie électrique. Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. Français.
2. Guven ALCICEK 2014. Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des super condensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique
3. Amel Benmouna Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées « Belfort », le « 09/12/2019 » these de doctorat
4. Mamadou Baïlo CAMARA SUPER CONDENSATEURS POUR ÉCHANGE DYNAMIQUE D'ÉNERGIE A BORD DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE HYBRIDE (Modélisation, étude des convertisseurs et commande) 2007
5. Jean-Claude LASSÈGUES 2001. Super condensateur d3334 S1
6. Farid Belhachemi Modélisation et caractérisation des super condensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2001.
7. M. DIAB Yasser (ÉTUDE ET MODELISATION DES SUPER CONDENSATEURS : APPLICATIONS AUX SYSTEMES DE PUISSANCE) 13 Mars 2009.
8. A. Schneuwly et al., "BOOSTCAP Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications", Proceedings of the Energy Storage Association, Spring Meeting, 2001.
9. Clarisse Péan. Modélisation des processus dynamiques dans les super condensateurs. Chimie analytique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015. Français. NNT: 2015PA066243. tel01233566
10. Nassim Rizoug, Modélisation électrique et énergétique des super condensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de super condensateurs basse tension en grande puissance p.11
11. Utilisation des super condensateurs et des batteries pour le stockage de l'énergie embarquée pour véhicule électrique Moez HADJ KACEM#1 , Souhir TOUNSI*2 , Rfik NEJI# (International Conference on Green Energy and Environmental Engineering (GEEE-2014) ISSN: 2356-5608 Sousse, Tunisia – 2014
12. Caractérisation, modélisation, modélisation et intégration des

super condensateurs dans des applications embarquées Hamid Gualous Gualous Université de Caen de Caen - IUT de Cherbourg IUT de Cherbourg Laboratoire LUSAC 2002

13. Maxwell technology, representative test procedure for customer evaluations(application note) pour effectuer la caractérisation d'un élément super condensateur
14. Phatiphat THOUNTHONG CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPER CONDENSATEURS 2005
15. F. Belhachemi, S. Rael et B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors," in Proc. IEEE-IAS 2000 Conf., Rome (Italie), 8-12 octobre 2000.
16. BELHACHEMI, Farid. 2001. Modélisation et caractérisation des super condensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance. INPL. Nancy : s.n., 2001. Thèse de doctorat.
17. F. Belhachemi, S. Rael et B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors," in Proc. IEEE-IAS 2000 Conf., Rome (Italie), 8-12 octobre 2000.
18. L. ZUBIETA, R. BONERT, "Characterization of double-layer capacitors (DLCs) for power electronics applications", IEEE-IAS'98, pp. 1149-1154, 1998
19. DE LEVIE, R. 1963. On porous electrodes in electrolyte solutions. s.l. : Electrochimica, 1963. pp. 751-780. Vol. 8.
20. KÖTZ, R. et CARLEN, M. 1999. Principles and applications of electrochemical capacitors. s.l. : Electrochimica, 1999. pp. 2483-2498. Vol. 45
21. Pierre Claud BLAUD , Développement d'un modèle de simulation de super condensateur et validation expérimentale; MONTREAL,2012.
22. www.amazon.fr