

**UNIVERSITATEA “DUNĂREA DE JOS” GALAȚI  
FACULTATEA DE ȘTIINȚE**



**STOCAREA ENERGIEI ELECTRICE FOLOSIND  
NOI DISPOZITIVE CAPACITIVE**

**Rezumat**

Coordonator Științific,  
Prof.dr.ing.fiz. **MORARU LUMINIȚA**

Ing. **RĂDUCAN ELENA**

ROMÂNIA  
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI  
UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN GALAȚI

Strada Domnească nr. 47, cod poștal 800008  
Galați, România  
E-mail: rectorat@ugal.ro



Tel.: (+4) 0336-130.109; 0336-130.108; 336-130.104  
Fax: (+4) 0236 - 461.353  
www.ugal.ro

C ă t r e

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați vă face cunoscut că în data de 18-11-2011, ora 10<sup>30</sup>, în SALA SBI, CORP CLĂDIRII, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: "STOCAREA ENERGIEI ELECTRICE FOLOSIND NOI DISPOZITIVE CAPACITIVE", elaborată de domnul/doamna ing. RĂDUCAN ELENA, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - Inginerie industrială.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

**Președinte:** Prof.univ.dr.ing. Puiu-Lucian GEORGESCU  
*Decan – Facultatea de Științe și Mediu*  
*Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați*

**Conducător de doctorat:** Prof.univ.dr.fiz. Luminița MORARU  
*Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați*

**Referent 1:** Prof.univ.dr. Paul STERIAN  
*Universitatea POLITEHNICA București*

**Referent 2:** Prof.univ.dr. Dan FLORICĂU  
*Universitatea POLITEHNICA București*

**Referent 3:** Prof.univ.dr.ing. Mariana DUMITRESCU  
*Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați*

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.

**RECTOR**  
Prof.dr.ing. Viorel MÎNZU



**SECRETAR DOCTORAT,**  
Ing. Luiza AXINTE

## Mulțumiri

Această lucrare a fost realizată cu sprijinul financiar din cadrul programului de burse doctorale de la universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, prin programul POSDRU 6/1.5/S/15,6583, SIMBAD. Tot datorită acestui program de burse doctorale am avut ocazia să beneficiaz de susținerea financiară pentru un stagiul de cercetare în cadrul laboratorului GREAH, Universitatea din Le Havre, Franța. Această mobilitate internațională mi-a oferit ocazia de a cunoaște specialiști în domeniul stocării energiei electrice precum și specialiști în domeniul energiilor regenerabile, cărora vreau să le transmit toată recunoștința mea.

Vreau sa-i mulțumesc:

- ✦ **Doamnei Moraru Luminița**, profesor la Universitatea “Dunărea de Jos”, pentru că m-a acceptat ca doctorand sub îndrumarea dumneaei și mi-a oferit oportunitatea de a-mi aduce contribuțiile personale într-un sector de cercetare de o importanță foarte mare la acest moment. Am toată recunoștința pentru susținerea și sprijinul dănselor oferit pe toată perioada studiilor doctorale.
- ✦ **Domnului Gurguiatu Gelu**, șef lucrări la Universitatea “Dunărea de Jos”, pentru toate încurajările dumnealui și pentru tot sprijinul în munca mea de cercetare.
- ✦ **Domnului Nichita Cristian**, profesor la Universitatea din Le Havre Franța și membru a-l echipei de cercetare din cadrul laboratorului GREAH, pentru că mi-a oferit șansa de a lucra cu o echipă de specialiști în domeniu și pentru sprijinul dumnealui pe toată perioada stagiului de cercetare.
- ✦ **Domnului Dimitri Lefebvre**, director al laboratorului GREAH, pentru primirea călduroasă în echipa de cercetare a acestui laborator.
- ✦ **Doamnei Dumitrescu Mariana**, profesor la Universitatea “Dunărea de Jos”, pentru toată susținerea dumneaei.
- ✦ **Domnului Mamadou Bailo Camara**, profesor la Universitatea din Le Havre, pentru tot sprijinul dumnealui pe perioada celor 8 luni a stagiului de cercetare în cadrul laboratorului GREAH.
- ✦ **Domnului Chabour Ferhat**, Profesor la Universitatea din Le Havre, pentru ajutorul pe care mi l-a oferit pe perioada stagiului.
- ✦ **Domnului Ikni Djamel**, doctorand la Universitatea din Le Havre, coleg în echipa de cercetare din cadrul laboratorului GREAH și prieten, pentru care am toată recunoștința.
- ✦ **Doamnei Druga Mirela**, doctorand la Universitatea din Le Havre, pentru toată susținerea dumneaei atât profesională cât și personală.
- ✦ **Doamnei Chiselev Ana-Maria**, doctorand și colegă la Universitatea “Dunărea de Jos” pentru tot sprijinul și toate încurajările pe parcursul studiilor mele.
- ✦ **Doamnei Moldovanu Simona**, doctorand și colegă la Universitatea “Dunărea de Jos” pentru ajutorul și susținerea dumneaei.
- ✦ Pentru toți cei care, direct sau indirect, au contribuit la realizarea acestei lucrări și pentru care am toată recunoștința.

*Familiei mele și cu multă dragoste fiului meu  
Alexandru*

**MOTTO:**

*Utilizează energia eficient și într-un mod în care mediul nu suferă!*

## CUPRINS

INTRODUCERE.....	8
CAPITOLUL 1. LOCUL PE CARE ÎL OCUPĂ TEHNOLOGIILE DE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE ÎN TABLOUL MONDIAL VIZAVI DE NOILE TENDINȚE. MOTIVAȚIA STUDIULUI. ...	5
1.1. Politici Europene în sectorul energiei .....	5
1.2. Tabloul României pe piața energetică din Europa .....	5
1.3. Impactul sistemelor de stocare pe piața energiilor regenerabile .....	5
1.4. Concluzii .....	6
BIBLIOGRAFIE .....	7
CAPITOLUL 2. TEHNOLOGIILE DE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE. STADIUL ACTUAL.....	8
2.1. Diagrama Ragone .....	8
2.2. Clasificarea sistemelor de stocare a energiei electrice .....	8
2.3. Sistemele de stocare a energiei electrice pe termen lung.....	9
2.4. Sistemele de stocare pe termen scurt .....	9
2.5. Comparație între diferitele sisteme de stocare.....	9
2.7. Concluzii .....	10
BIBLIOGRAFIE .....	11
CAPITOLUL 3. TIPURI ȘI TEHNOLOGII DE REALIZARE A SUPERCONDENSATORILOR. STADIUL ACTUAL.....	12
3.1. Scurt istoric și terminologie.....	12
3.2. Clasificarea supercondensatorilor .....	12
3.3. Principiul fizic de funcționare.....	13
3.3.1. Aspecte teoretice de bază în funcționarea supercondensatorilor .....	13
3.3.2. Regimul staționar - dispozitiv electrochimic descărcat. Circuit deschis .....	14
3.3.3. Regimul tranzitoriu - încărcarea supercondensatorului. Circuit închis. ....	14
3.3.4. Regimul tranzitoriu - descărcarea supercondensatorilor. Circuit închis. ....	14
3.3.5. Timpul de încărcare/descărcare, autodescărcare a supercondensatorilor .....	14
3.4. Materiale utilizate la construcția supercondensatorilor .....	14
3.5. Tehnologii de fabricare a supercondensatorilor.....	14
3.6. Concluzii .....	15
BIBLIOGRAFIE .....	15
CAPITOLUL 4. MODELAREA FIZICĂ, COMPORTAMENTALĂ ȘI DE REACȚIE ÎNTR-UN CIRCUIT ELECTRIC AL SUPERCONDENSATORULUI.....	16
4.1. Principalele fenomene fizice care apar într-un supercondensator .....	16
4.1.1. Modelul supercondensatorului bazat pe caracteristica de frecvență.....	16
4.1.2. Modelul supercondensatorului bazat pe liniile de transmisie .....	16
4.1.3. Modelul comportamental în domeniul temporal al supercondensatorului .....	16
4.1.4. Modelul comportamental al supercondensatorului propus de Zubieta .....	16
4.1.5. Modelarea supercondensatorului ținând cont de fenomenul de redistribuție a sarcinilor în timpul autodescărcării.....	17
4.2. Modelarea reacției într-un sistem electric al supercondensatorului.....	17
4.3. Modelarea în Matlab/SimPowerSystems a modelului comportamental al supercondensatorului elaborat de Zubieta .....	19
4.5 Concluzii .....	21
BIBLIOGRAFIE .....	21
CAPITOLUL 5. UTILIZAREA SUPERCONDENSATORILOR LA REDUCEREA GOLURILOR DE TENSIUNE. CONTRIBUȚIE PERSONALĂ .....	22
5.1. Micro-rețelele electrice .....	22
5.2. Descrierea calității energiei electrice .....	22

5.2.1. Definirea calității energiei electrice .....	22
5.2.2. Principalele cauze ale înrăutățirii calității energiei electrice.....	23
5.2.3. Sistemul indicatorilor de calitate a energiei electrice .....	23
5.3. Teoria golurilor de tensiune.....	23
5.4. Managementul calității energiei electrice prin utilizarea sistemelor de stocare de scurtă durată. Contribuție personală .....	24
5.5. Soluție pentru reducerea golurilor de tensiune cu ajutorul supercondensatorilor. Contribuție personală .....	26
5.6. Caracteristicile supercondensatorilor utilizați în modelul implementat în Matlab / SimPowerSystem pentru reducerea golurilor de tensiune .....	26
5.7. Rezultatele obținute în Matlab/SimPowerSystems pentru aplicația supercondensatorilor în reducerea golurilor de tensiune .....	29
5.8. Concluzii.....	33
BIBLIOGRAFIE .....	34
CAPITOLUL 6. TEHNOLOGIE NOUĂ PROPUȘĂ PENTRU REALIZAREA SUPERCONDENSATORILOR. NOUA DIRECȚIE DE CERCETARE .....	35
6.1. Bazele teoretice.....	35
6.2. Principiul de funcționare a noului tip propus de supercondensator .....	38
6.3. Avantajele oferite de noul tip de supercondensator de tip spinning .....	39
6.4. Concluzii.....	40
BIBLIOGRAFIE .....	41
CONCLUZII GENERALE .....	42
LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE ȘI A CONFERINȚELOR .....	45

## Introducere

Aceasta teză de doctorat analizează sistemele de stocare pe termen scurt numite supercondensatori, utilizați cu succes în aplicațiile de putere.

Lucrarea este împărțită în șase capitole, iar contribuțiile personale aduse în această teză se regăsesc în ultimele trei capitole.

Primul capitol este consacrat motivației studiului sistemelor de stocare.

Al doilea capitol descrie pe larg toate sistemele de stocare a energiei electrice utilizate, mai mult sau mai puțin, la ora actuală.

Al treilea capitol este consacrat studiului tehnologiilor de realizare a supercondensatorilor și vine cu o clasificare în trei mari grupe a acestor dispozitive.

Capitolul patru al acestei teze prezintă modelarea fizică și comportamentală a supercondensatorilor așa cum se regăsește și în literatura de specialitate și vine cu o propunere a unui nou model care poate fi utilizat în cadrul simulărilor pentru aplicații specifice ale supercondensatorilor. Modelul propus poartă numele de modelul de reacție într-un circuit electric al supercondensatorului.

Capitolul cinci descrie aplicația supercondensatorilor la îmbunătățirea indicilor de calitate a energiei electrice. Această aplicație face referire la golurile de tensiune care apar în rețelele de distribuție locale și izolate. Prin utilizarea supercondensatorilor s-a obținut o reducere a golurilor de tensiune, variația tensiunii fiind mai mică de 10 %, valoare acceptată de normativul EN50160. Acest capitol este o contribuție personală în aplicațiile supercondensatorilor.

Capitolul șase deschide o nouă direcție de cercetare prin propunerea unei noi tehnologii de fabricare a supercondensatorilor. Noua tehnologie propusă este analizată și descrisă teoretic. În acest capitol sunt trecute și avantajele dispozitivului de stocare propus sub numele de supercondensator de tip spinning, față de dispozitivele existente la ora actuală.



## Capitolul 1.

# **LOCUL PE CARE ÎL OCUPĂ TEHNOLOGIILE DE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE ÎN TABLOUL MONDIAL VIZAVI DE NOILE TENDINȚE. MOTIVAȚIA STUDIULUI.**

Consumul de energie crește într-un ritm rapid în toată lumea. Deoarece combustibilii fosili sunt în scădere există o tendință de creștere a utilizării energiilor regenerabile.

Tranziția de la o economie a sectorului energetic bazată pe combustibilii fosili la o economie durabilă necesită noi descoperiri nu numai în sectorul producție de energie ci și în sectorul transportului, transformării și stocării energiei electrice [ELE 09].

### **1.1.Politici Europene în sectorul energiei**

În anul 2008 UE a adoptat noile politici în sectorul energetic, iar cele mai importante obiective pentru următoarea perioadă sunt următoarele [HIT 10]; [RAD 11]:

1. Să se reducă emisiile de gaze cu efect de seră cu 20 % față de anul 1990;
2. În viitorul apropiat, 20 % din totalul de energie produs să provină din surse regenerabile;
3. Să se reducă cu 20 % consumul de energie prin creșterea eficienței energetice.

### **1.2.Tabloul României pe piața energetică din Europa**

De câțiva ani, România a beneficiat de atenția mai multor investitori străini în domeniul energiei regenerabile, însă, în comparație cu alte state membre UE, putem spune ca suntem încă la început. Pentru a putea desena o imagine clară a schimbărilor din sectorul energiei din România, în acest subcapitol se prezintă ultimele noutăți pe piața energetică, a investițiilor care s-au făcut, care se vor face și investițiile care au eșuat prin dizolvarea unor mari proiecte, datorită situației financiare incertă existentă la ora actuală.

### **1.3.Impactul sistemelor de stocare pe piața energiilor regenerabile**

Dezvoltarea și implementarea a noi dispozitive de stocare a energiei electrice are un impact mare asupra economiei sectorului energiilor regenerabile și eficienței energetice. Principalele motive pentru care sistemele de stocare au un impact pozitiv asupra pieței energiilor curate sunt arătate în figura 1.1.

### ABILITĂȚILE SISTEMELOR DE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE

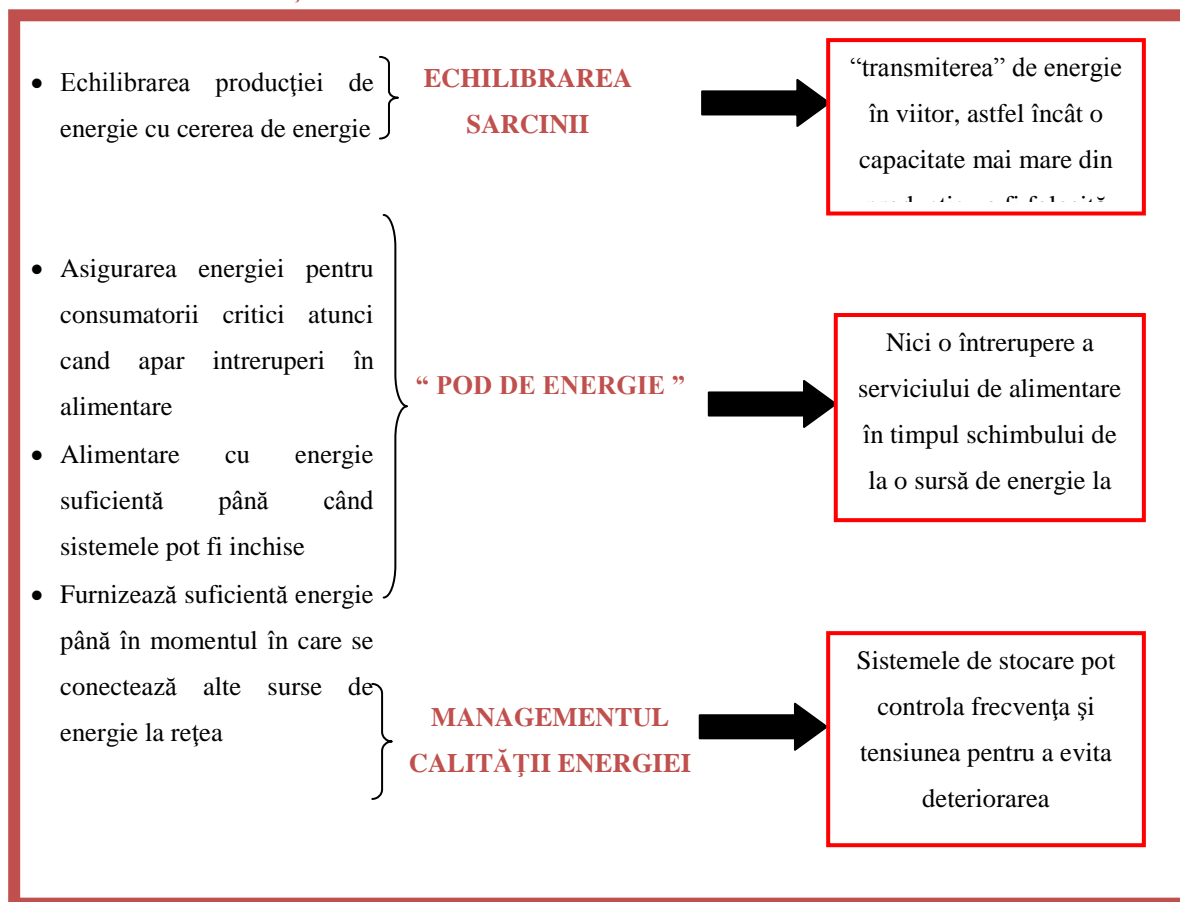


Figura 1.1 Impactul sistemelor de stocare a energiei în sectorul energetic

## 1.4. Concluzii

În urma studiului amplu realizat din informații recente privind piața energiilor regenerabile din Europa, se poate afirma că, datorită noilor politici adoptate la nivel European, în următoarea perioadă ne vom confrunta cu o avalanșă de investiții pe piața energiilor regenerabile.

Sprejînul sectorului energiilor curate a fost adus la un nivel ridicat în aproape toate statele UE, însă îmbunătățirea eficienței energetice în transport și industrie a fost lăsată în urmă. Investițiile din următorii 10 ani în sectorul energiei vor acoperi însă și creșterea eficienței energetice la nivel mondial și adaptarea sistemelor de transport și distribuție a energiei electrice la noile tehnologii (rețele inteligente).

Deși de-a lungul timpului tehnologiile de energii regenerabile au fost testate și implementate pe scară largă, ele reprezintă în continuare un domeniu de cercetare deschis iar unele dintre dezavantajele acestor tehnologii, precum cele care apar în rețelele locale și izolate, pot fi evitate prin utilizarea sistemelor de stocare a energiei.

Cele mai importante beneficii aduse de sistemele de stocare a energiei sunt reprezentate de îmbunătățirea flexibilității pentru operatorii de rețea, pot crește securitatea energetică națională și reduce impactul negativ asupra mediului.

## Bibliografie

- [ELE 09] - Elena Serrano, Guillermo Rus, Javier Garcia-Martinez, Nanotechnology for sustainable energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, pg. 2373-2384, 2009
- [HIT 10] - Hitchin Penny, Efficiency, Efficiency, Efficiency: Towards 20 per cent by 2020, Power Engineering International, PEi, Published: Dec 1, 2010, www.powergenworldwide.com
- [RAD 11] - Răducan Elena, Luminița Moraru, Gelu Gurguiatu, Cristian Nichita, "Impact of energy storage systems on clean industry", International Conference on Solar, Wind and Bioenergy, 14<sup>th</sup> of May, 2011, Cluj, România

## Capitolul 2.

**TEHNOLOGIILE DE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE. STADIUL ACTUAL**

Energia electrică este un produs invizibil, omniprezent disponibil și în cele mai multe cazuri, la un preț redus. În prezent, consumul de energie este estimat undeva la 12 % din toată energia prelucrată de umanitate, însă, în următorii ani, va avea loc o creștere semnificativă estimată la 34 %, în contextul în care combustibilii fosili se diminuează pe zi ce trece, lăsând loc producerii de energie regenerabilă.

Nanotehnologia oferă, pentru prima dată, instrumentele necesare pentru a dezvolta noi industrii bazate pe costuri eficiente și rentabile economic, astfel contribuind serios la o creștere economică durabilă.

**2.1. Diagrama Ragone**

Diagrama Ragone se utilizează pentru a reprezenta performanța în ceea ce privește raportul dintre energia specifică și putere specifică. Acest tip de comparație este deosebit de important pentru unitățile portabile, pentru care masa este un aspect critic. Pentru unitățile permanente speranța de viață și costurile totale (investiții, pierderile de energie și oboseală) sunt criteriile cele mai importante [IBR 08].

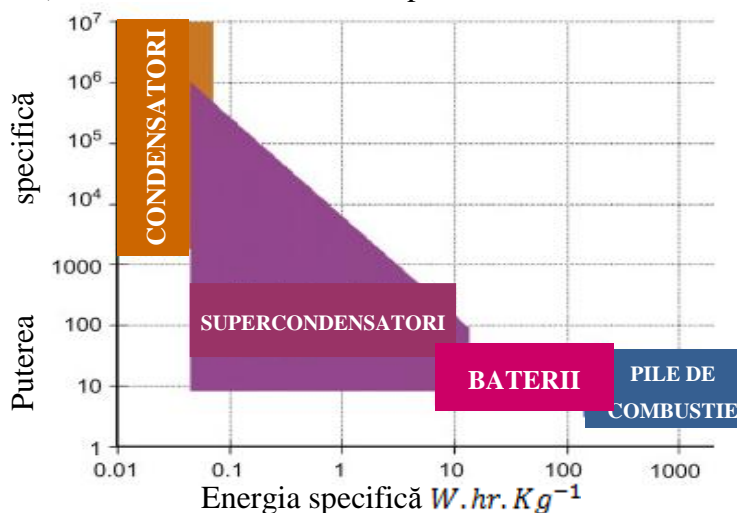


Figura 2.1 Diagrama Ragone [PET 08]; [NAM]

**2.2. Clasificarea sistemelor de stocare a energiei electrice**

Sistemele de stocare a energiei electrice se clasifică în două mari categorii:

- ⇨ Sistemele de stocare pe termen scurt a energiei electrice;
- ⇨ Sistemele de stocare pe termen lung a energiei electrice.

Clasificarea sistemelor de stocare este prezentată în diagrama din figura 2.2

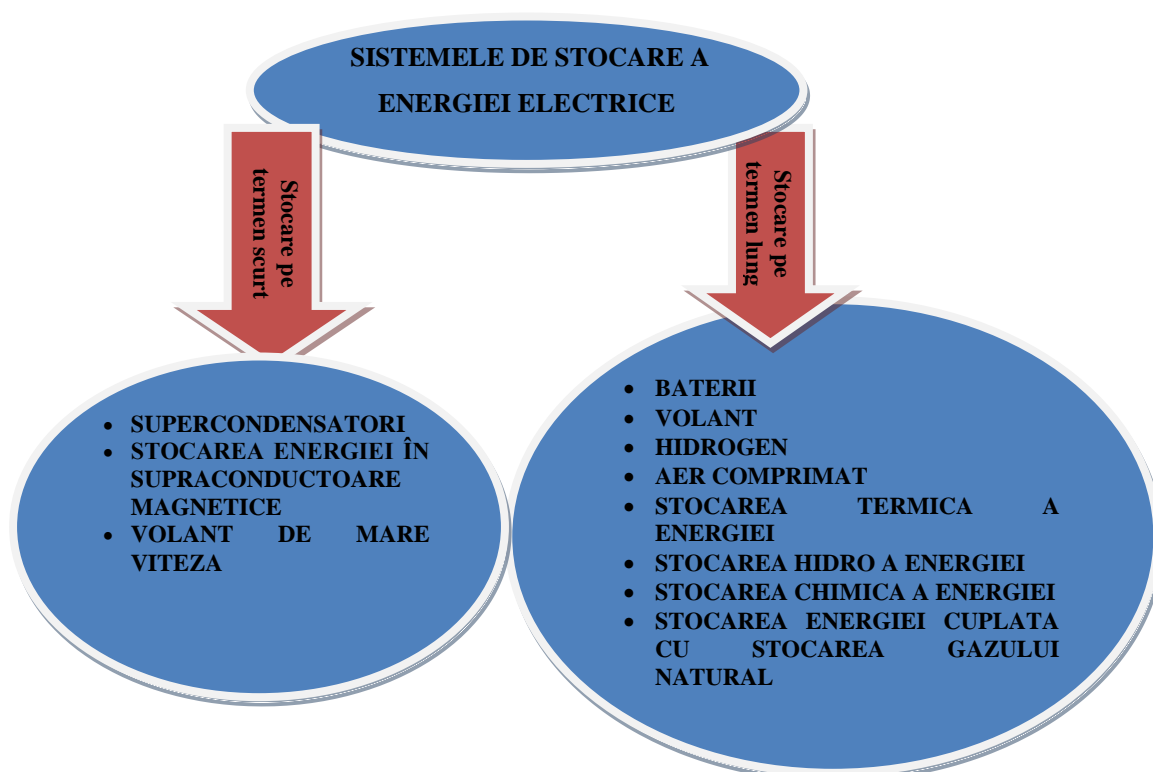


Figura 2.2 Clasificarea sistemelor de stocare a energiei electrice

### 2.3. Sistemele de stocare a energiei electrice pe termen lung

- Stocarea hidro a energiei electrice (Pumped hydro storage -PHS)
- Stocarea termică (Thermal energy storage -TES)
- Stocarea prin comprimarea aerului (Compressed air energy storage - CAES)
- Stocarea cu aer comprimat la scară mică (Small-scale compressed air energy storage -SSCAES)
- Stocarea energiei folosind bateriile (FBES)
- Stocarea energiei în celule de combustie cu hidrogen (Fuel cells – Hydrogen energy storage, FC-HES)
- Stocarea chimică (Chemical storage – CS)
- Sistem dinamic de stocare a energiei. Volantul

### 2.4. Sistemele de stocare pe termen scurt

- Supercondensatorii
- Stocarea energiei în supraconductoare magnetice (Superconducting magnetic energy storage, SMES)

### 2.5. Comparație între diferitele sisteme de stocare

Pentru a putea compara performanțele diferitelor tehnologii de stocare sunt alese câteva criterii precum: costul, densitatea de energie, puterea specifică, durabilitatea, eficiența energetică etc. Împreună, aceste criterii definesc un “index de performanță” pentru cele patru categorii de aplicații:

1. Aplicații de putere joasă în zone izolate, în principal pentru alimentarea transformatoarelor și terminalelor de urgență.
2. Aplicații de putere medie în zone izolate (sisteme electrice individuale, alimentarea unui oraș).
3. Aplicații de rețea.
4. Aplicații de control al puterii.

## 2.6. Domeniul de aplicabilitate al supercondensatorilor

În urma numeroaselor sale avantaje, supercondensatorul constituie practic o provocare pentru bateriile electrochimice. În aplicațiile care utilizează bateriile, un supercondensator în paralel cu o baterie conduce la îmbunătățirea performanțelor în funcționare. Pornirea motoarelor cu combustie internă la temperaturi scăzute este ușurată de utilizarea supercondensatorilor. La autovehiculele electrice hibride eficiența utilizării energiei crește prin utilizarea de supercondensatori care recuperează energia din timpul frânării. În sistemele electrice de putere bazate pe surse regenerabile cum ar fi energia fotovoltaică sau eoliană, utilizarea supercondensatorilor este benefică. Practic, supercondensatorii pot satisface vârfurile de putere, pe care bateriile nu le pot genera, atunci când e nevoie [TEH].

Cateva dintre aplicațiile supercondensatorilor sunt:

- Compensarea căderilor de tensiune pentru rețele de distribuție slabe
- Păstrarea energiei pentru ascensoare
- Alimentări neîntrerupte cu energie
- Automobilul electric

## 2.7. Concluzii

Posibilitatea existenței unui număr mare de cicluri de încărcare-descărcare, intervalul mare de temperatură, durata mare de viață, eficiența ciclică înaltă și auto-descărcarea scăzută în comparație cu alte dispozitive de stocare, recomandă supercondensatorii ca fiind potriviți pentru o serie largă de aplicații. Principalul avantaj al acestor componente noi este de a propune o densitate de energie ridicată împreună cu o densitate de putere la fel de crescută.

Supercondensatorii sunt folosiți cu succes în aplicații de putere precum soluții de back-up pentru rețelele electrice locale și izolate, ca surse portabile de energie datorită dimensiunilor reduse, în industria automobilelor electrice și hibride datorită funcționării într-un interval larg de temperatură etc.

## Bibliografie

- [BAR 1] - P.Barrade, A.Rufer, Power smoothing and high-power fast energy exchange between storage systems, Laboratoire d'Electronique Industrielle, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland
- [BAR 2] - P.Barrade, Energy storage and applications with supercapacitors, Laboratoire d'Electronique Industrielle, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland
- [IBR 08] - H.Ibrahim, A.Ilinca, J.Perron, Energy storage systems-Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vo.12, Issue 5, pg. 1221-1250, 2008
- [TEH] - Tehnologie pe baza de materiale nanostructurate pentru condensatori electrochimici cu strat dublu utilizabili la stocarea energiei electrice.(Supercondensatori), Proiect din cadrul Programului de Cercetare de Excelanta (CEEX), Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologie (IMT Bucuresti)
- [ZHU] - J.G.Zhu, Super Capacitors, Presentation, 48550 Electrical Energy Technology, Faculty of Engineering, University of Technology, Sydney, [www. services.eng.uts.edu.au](http://www.services.eng.uts.edu.au)

### Capitolul 3.

## TIPURI ȘI TEHNOLOGII DE REALIZARE A SUPERCONDENSATORILOR. STADIUL ACTUAL

Acest capitol este consacrat studiului tehnologiilor de realizare al supercondensatorilor. În funcție de principiul de funcționare al acestora precum și tehnologiile de realizare, se face, în acest capitol, și o clasificare a acestor dispozitive.

### 3.1. Scurt istoric și terminologie

Foarte des, în literatura de specialitate supercondensatorii se regăsesc sub denumirea de Electro-chemical capacitors (ECs), Ultracapacitors, Double-layer capacitor (DLC), Electro-chemical double layer capacitor (EDLC), Electrochemical supercapacitors sau Pseudocapacitances. [CAM 07]; [SHA 10]; [KOW 11]; [KAU 10]; [ZHA 09].

### 3.2. Clasificarea supercondensatorilor

Literatura de specialitate ne oferă o gamă variată de clasificări ale supercondensatorilor, însă alegerea corectă a uneia dintre acestea este foarte delicată și nu trebuie făcută arbitrar.

În figura 3.1 se face o clasificare care ține cont, simultan, de procesele care au loc în interiorul supercondensatorului, deci mecanismul de încărcare-descărcare cu sarcini electrice a supercondensatorilor, materialele utilizate în construcția electrozilor și simetria electrozilor. În general, în cazul supercondensatorilor, mecanismul de funcționare este unul similar condensatorilor clasici, sau bateriilor sau o combinație între aceste două tehnologii de stocare.

Acest „tip” de clasificare prin care încerc să țin cont de cât mai multe aspecte constructive și de funcționare a acestor dispozitive, este una destul de dificilă.



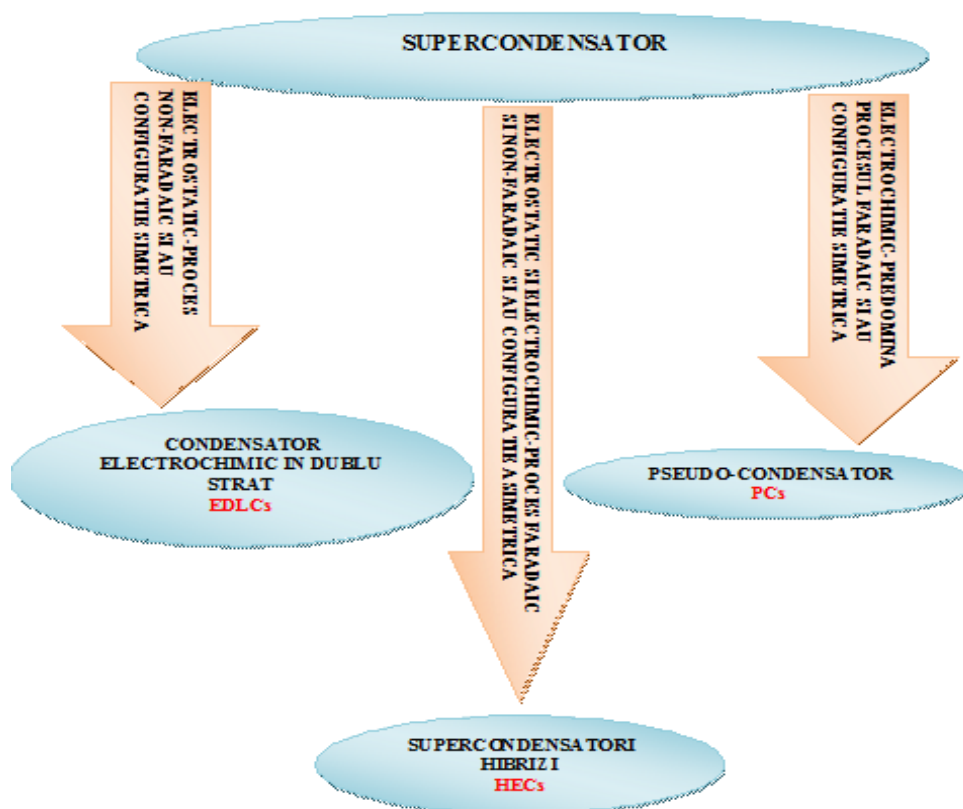


Figura 3.1 Clasificarea Supercondensatorilor.

Dificultatea nu apare datorită complexității supercondensatorilor și aspectelor teoretice care intervin în principiile de funcționare, ci datorită barierei foarte subțiri care există între aceste trei clase: EDLC-ul, PC-ul și HEC-ul, atunci când se încearcă să se facă o distincție verificată experimental. Această barieră va fi „trasată” în următoarele subcapitole, consacrate principiului fizic de funcționare și materialelor utilizate la realizarea acestor dispozitive, pentru fiecare clasă de supercondensatori în parte.

### 3.3. Principiul fizic de funcționare

Pentru o buna înțelegere a principiului fizic de funcționare a unui dispozitiv de stocare a energiei electrice, și nu numai, trebuiesc amintite câteva dintre procesele fizice și, sau, chimice care au loc în interiorul unui astfel de dispozitiv.

#### 3.3.1. Aspecte teoretice de bază în funcționarea supercondensatorilor

În această lucrare, voi face o distincție între cele trei mari clase ale supercondensatorilor, prin analiza comportamentală a lor în regimul staționar – dispozitiv descărcat, regimul tranzitoriu de încărcare cu sarcina electrică a dispozitivului, regimul tranzitoriu de descărcare și autodescărcare a dispozitivului.

Ipotezele regimului staționar și regimului tranzitoriu în această lucrare sunt:

*Regimul staționar* – definește „starea” în care se află sistemul (dispozitivul), care nu se schimbă în timp decât dacă se intervine din exterior asupra acestui sistem (dispozitiv).

*Regim tranzitoriu* – definește „trecerea, transformarea” unui sistem de la un regim staționar la „alt” regim staționar. Practic, regimul tranzitoriu descrie comportamentul sistemului în timp.

Alegerea de a analiza regimul de autodescărcare ca fiind un regim tranzitoriu, se justifică în capitolul patru a-l acestei lucrări, unde se propune un nou model al supercondensatorului, numit „Modelul de reacție”.

### 3.3.2. Regimul staționar - dispozitiv electrochimic descărcat. Circuit deschis

Teoretic, când avem regimul staționar-dispozitiv electrochimic descărcat, ionii pozitivi și negativi din soluția electrolitică prezintă o distribuție omogenă, astfel încât gradientul potențialului să fie nul. În acest caz nu avem o separare de sarcină la interfața care separă soluția electrolitică de cei doi electrozi iar electrozii nu sunt încărcăți cu sarcină electrică. Acest regim este identic pentru orice tip de dispozitiv electrochimic, implicit pentru orice tip de supercondensator.

### 3.3.3. Regimul tranzitoriu - încărcarea supercondensatorului. Circuit închis.

Din momentul în care se aplică o diferență de potențial pe cei doi electrozi, instalându-se astfel regimul tranzitoriu de încărcare cu sarcină electrică, se poate face diferențierea din punct de vedere comportamental și funcțional între cele trei clase de supercondensatori.

### 3.3.4. Regimul tranzitoriu - descărcarea supercondensatorilor. Circuit închis.

În momentul în care se face trecerea de la regimul staționar – dispozitiv încărcat cu sarcină electrică, la regimul tranzitoriu – descărcarea dispozitivului, au loc procese similare celor de mai sus, însă „în sens invers”. Analiza regimului – dispozitiv încărcat, ca fiind un regim staționar se va justifica în subcapitolul „Timpul de încărcare/descărcare, autodescărcare a supercondensatorilor”

### 3.3.5. Timpul de încărcare/descărcare, autodescărcare a supercondensatorilor

În analiza timpului de încărcare/descărcare și autodescărcare a supercondensatorilor trebuie să ținem seama în primul rând de structura porilor din interiorul electrozilor, de valoarea capacității maxime de stocare, de valoarea rezistenței internă și de temperatura ambiantă la care au loc procesele de încărcare/descărcare și autodescărcare.

## 3.4. Materiale utilizate la construcția supercondensatorilor

Cele mai utilizate materiale la realizarea electrozilor sunt compușii de carbon, împărțite în două mari clase, și anume: carbon activ și fibre din țesut activ. Aceste două tipuri de materiale prezintă o suprafață activă foarte importantă, lucru care permite creșterea valorii capacității electrice [IKN 10].

Un alt tip de material utilizat în realizarea electrozilor sunt soluțiile pe bază de oxid de ruthenium ( $RuO_2$ ) utilizat în special în construcția pseudo-condensatorilor, în aplicații militare.

## 3.5. Tehnologii de fabricare a supercondensatorilor

Practic supercondensatorul are patru elemente constructive, indiferent de clasa din care el face parte, și anume:

- ✓ Colectorii;

- ✓ Electrozii poroși;
- ✓ Separatorul;
- ✓ Electrolitul.

### 3.6. Concluzii

Din momentul în care au fost descoperiți, supercondensatorii au atras atenția prin numeroasele lor avantaje față de alte sisteme de stocare. Capacitatea mare de stocare și posibilitatea utilizării supercondensatorului în aplicații de putere se datorează principiului de funcționare al acestuia. Sarcina electrică este stocată în stratul dublu format la interfața dintre electrozi și electrolit și în volumul electrozilor prin deplasarea sarcinii în porii din straturile profunde a electrozilor. O creștere semnificativă a capacității totale de stocare a supercondensatorului se datorează și pseudo-capacității care apare în urma reacțiilor chimice de absorbție și oxido-reducere. Pseudo-capacitatea apare în cazul supercondensatorilor de tip PC și HEC.

În funcție de principiul fizic de funcționare, construcția lor și procesele fizice și/sau chimice care au loc în interiorul lor, supercondensatorii se pot grupa în trei clase, și anume:

- EDLC-uri;
- PC-uri;
- HEC-uri.

Ca și materiale utilizate în construcția electrozilor poroși, se folosesc, în general, materiale de tip nanostructurate care prezintă o porozitate mare în volum.

În acest capitol s-au analizat performanțele și principiile de funcționare a celor trei tipuri de supercondensatori, pentru a se putea face o comparație și a putea indica care tip de supercondensator este potrivit pentru o aplicație specifică.

### BIBLIOGRAFIE

- [CAM 07] - M.B.CAMARA, Supercondensateurs pour echange dynamique d'energie a bord du vehicule electrique hybride, These de doctorat en Science pour l'ingenieur, L'universite de Franche-Compte, Laboratoire FEMTOST, France, 2007
- [IKN 10] - D.IKNI, Gestion de l'energie ebarquee a bord d'un vehicule electrique hybride de nouvelle generation, Memoire presente en vue d'obtenir le diplome du Master 2 Recherche en Systemes Energetiques Electriques (SEE), Universite du Havre, France, 2010
- [SHA 10] - P.SHARMA, T.S. Bhatti, A review on electrochemical double-layer capacitors, Energy Conversion and Management 51, 2901-2912, 2010
- [KAU 10] - M.KAUS, J.Kowal, et al., Modelling the effects of charge redistribution during self-discharge of supercapacitors, Electrochimica Acta 55, 7516-7523, 2010
- [KOW 11] - J.KOWAL, E.Avaroglu, et al., Detailed analysis of the self-discharge of supercapacitors, Journal of Powe Sources 196, 537-579, 2011
- [ZHA 09] - Y.ZHANG, H.Feng, et al., Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review, International Journal of Hydrogen Energy 34, 4889-4899, 2009

## Capitolul 4.

# MODELAREA FIZICĂ, COMPORTAMENTALĂ ȘI DE REACȚIE ÎNTR-UN CIRCUIT ELECTRIC AL SUPERCONDENSATORULUI

### 4.1. Principalele fenomene fizice care apar într-un supercondensator

Pentru o descriere matematică a comportamentului supercondensatorului, trebuie stabilite fenomenele care au loc în procesele tranzitorii – încărcarea/descărcarea și autodescărcarea, cu sarcina electrică a dispozitivului.

#### 4.1.1. Modelul supercondensatorului bazat pe caracteristica de frecvență

Acest model comportamental al supercondensatorului are la bază răspunsul de frecvență al dispozitivului (caracteristica de frecvență). Pentru a caracteriza supercondensatorul prin intermediul acestui model, practic se utilizează un aparat de măsură a impedanței care variază în funcție de frecvența aplicată supercondensatorului, în planul complex Nyquist [BUL 02]; [RIZ 06].

#### 4.1.2. Modelul supercondensatorului bazat pe liniile de transmisie

Acest model bazat pe linia de transmisie a fost propus de către Belhachemi și vine cu îmbunătățiri la modelul prezentat mai sus, luând în considerare o mare parte dintre fenomenele fizice și / sau chimice, care apar în interiorul supercondensatorului.

#### 4.1.3. Modelul comportamental în domeniul temporal al supercondensatorului

Acest model este consacrat proceselor lente care au loc în interiorul supercondensatorului. Astfel, supercondensatorul este reprezentat din celule de tipul  $R_i - C_i$ .

#### 4.1.4. Modelul comportamental al supercondensatorului propus de Zubieta

La ora actuală, schema electrică echivalentă a comportamentului supercondensatorului, propusă de Zubieta, modelează toate procesele fizice și / sau chimice care au loc în interiorul dispozitivului. Totuși, acest model nu reprezintă dependența comportamentală a supercondensatorului de temperatura și timpul de încărcare, dependente care se reflectă printr-o modificare a parametrilor. Schema electrică a modelului propus de Zubieta este prezentată în figura 4.1.

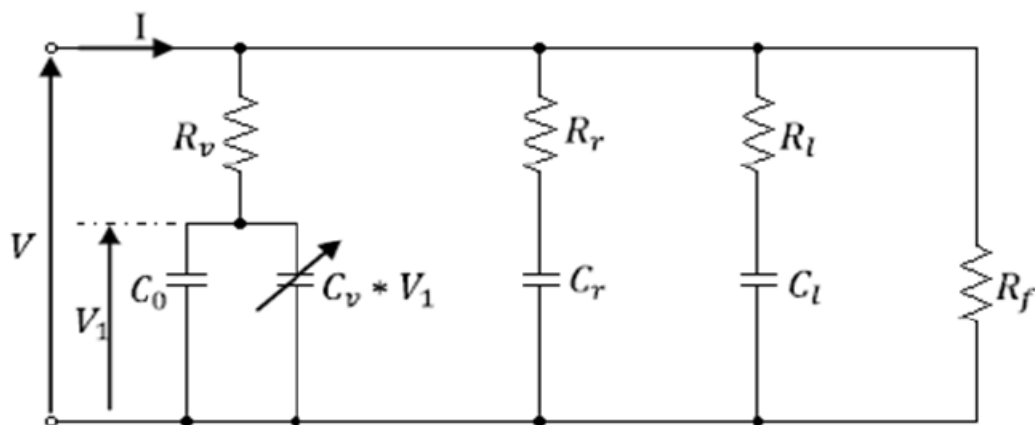


Figura 4.1 Modelul comportamental al supercondensatorului propus de Zubieta [IKN 10]

#### 4.1.5. Modelarea supercondensatorului ținând cont de fenomenul de redistribuție a sarcinilor în timpul autodescărării

Acest model recent (2010) a fost propus de către M. Kaus [KAU 10]. M. Kaus îmbunătățește modelul propus de Zubieta, luând în calcul și dependența de temperatură a proceselor care au loc în interiorul dispozitivului, timpul de încărcare și tensiunea inițială aplicată. Prin intermediul acestui nou model complex se poate prevedea comportamentul supercondensatorului în funcție de condițiile de funcționare specifice.

### 4.2. Modelarea reacției într-un sistem electric al supercondensatorului

Abordarea acestui subiect se face prin prisma aplicațiilor viitoare în care va fi folosit supercondensatorul. Modelarea reacției într-un sistem electric al supercondensatorului se limitează la modelarea reacției EDLC-ului într-un sistem electric după care, prin extrapolare, se va ajunge la o modelare generalizată a celor trei tipuri de supercondensatori comercializați la ora actuală.

Acest model vine pentru a ușura alegerea tipului de supercondensatori și caracteristicile sale, prin minimizarea anumitor fenomene fizice și / sau chimice care au loc în interiorul lui. Analiza cuprinde trei etape, iar în cadrul acestei analize se va face și o justificare a anularii anumitor componente electrice echivalente.

#### A. Modelarea structurii poroasă a electrozilor

Structura poroasă a electrozilor permite încărcarea supercondensatorilor cu o sarcină distribuită în volumul electrozilor, prin ocuparea macro-, mezo- și micro-porilor din straturile profunde ale acestora. Această structură poroasă a electrozilor, se modelează prin intermediul a  $n$  celule de tipul RC, conectate în paralel, rezultând astfel un braț de tipul  $R_{\text{totalelectrozi}} C_{\text{totalelectrozi}}$ .

Rezistența  $R_{\text{totalelectrozi}}$  modelează rezistența totală a materialului din care sunt alcătuiți electrozii, și anume „gradul” cu care ea se opune deplasării purtătorilor de sarcină în straturile profunde pentru a ocupa mezo- și micro-porii liberi, iar  $C_{\text{totalelectrozi}}$  reprezintă capacitatea electrică totală specifică electrozilor.

Abordarea acestui model de „reacție” într-un circuit electric, se face fără să se ia în considerare procesul de autodescărare a supercondensatorului. Acest model se va utiliza în aplicații în care răspunsul supercondensatorului trebuie să se realizeze în câteva zeci de secunde sau câteva minute. Din acest motiv autodescărarea supercondensatorului nu se va mai lua în calcul.

Folosind ipotezele și justificările de mai sus, am propus ca modelul comportamental propus de Zubieta (prezentat în figura 4.1) să fie redus la următorul model din figura 4.2.

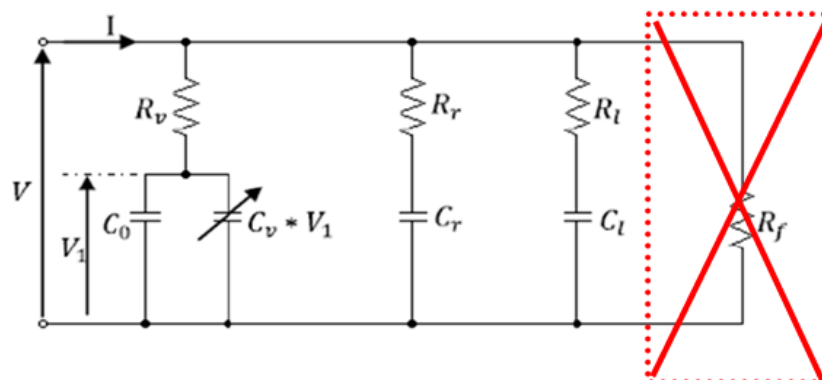


Figura 4.2 Modelul comportamental al supercondensatorului specific pentru aplicații în care dispozitivul nu prezintă și procesul de autodescărcare

Acest model propus este util în aplicațiile în care supercondensatorul va fi în permanență în interiorul circuitului electric închis iar la bornele acestuia va exista o tensiune aplicată în permanență, astfel încât procesul de autodescărcare nu-și justifică importanța. Datorită tensiunii existente în permanență la bornele supercondensatorului, acesta se va încărca un timp suficient de mare astfel încât purtătorii de sarcină să ajungă în straturile profunde. În acest caz nu mai are loc o variație a tensiunii asociată cu redistribuirea sarcinilor electrice în sensul explicat de Kaus și Kowal în lucrările lor [KAU 10]; [KOW 11].

### **B. Anularea brațului întârziat și a brațului lent din modelul lui Zubieta**

Pentru aplicațiile în care supercondensatorii funcționează un timp inferior câtorva zeci de secunde (exemplu golurile de tensiune, variațiile pe perioade scurte ale tensiunii etc.) brațul lent și brațul întârziat din modelul comportamental propus de Zubieta se vor anula prin „lipirea” lor la brațul principal.

În aplicațiile în care supercondensatorul rămâne conectat în circuitul electric, iar la bornele lui este aplicată o tensiune de o valoare permanent controlată tot timpul (în afara perioadei când el furnizează energie în circuit) se poate face trecerea de la modelul comportamental al supercondensatorului propus de Zubieta la modelul de „reacție” într-un circuit electric astfel:

- Rezistența care modelează autodescărcarea dispozitivului se anulează;
- Brațul lent se unește cu brațul întârziat rezultând o celulă a cărei capacitate se calculează după formula de calcul a capacității totale a doi condensatori în paralel;
- Brațul principal se va compune dintr-un condensator și o rezistență serie. Capacitatea condensatorului nu va mai fi una variabilă (capacitatea lui nu variază funcție de tensiunea aplicată printr-o funcție diferențială) deoarece tensiunea la bornele condensatorului va fi permanent controlată.

În urma acestor ipoteze, se poate transcrie modelul de „reacție” într-un circuit electric al supercondensatorului utilizat în aplicații precum golurile de tensiune și variațiile tensiunii, conform reprezentării din figura 4.3.

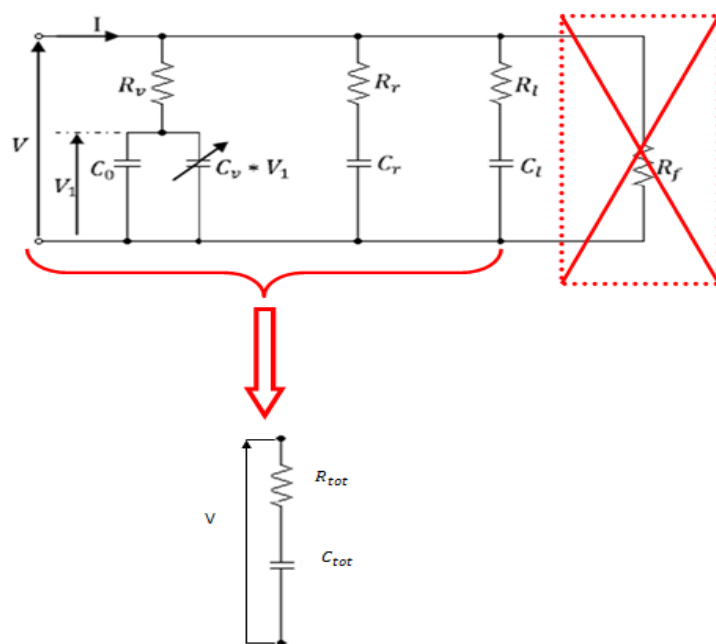


Figura 4.3 Modelarea reacției unui supercondensator într-un circuit electric în următoarele condiții:  $V = \text{const.}$  și controlat în cazul în care el nu furnizează energie sistemului, supercondensatorul este conectat la tensiunea  $V$  un timp foarte mare, aplicația presupune utilizarea reacției supercondensatorului (furnizarea de energie în sistem) un timp inferior câtorva zeci de secunde (exemplu: goluri de tensiune)

### 4.3. Modelarea în Matlab/SimPowerSystems a modelului comportamental al supercondensatorului elaborat de Zubieta

În figura 4.4 este prezentat modelul comportamental al supercondensatorului, așa cum apare și în figura 4.1, și notațiile utilizate în modelarea acestui model în Matlab/SimPowerSystem.

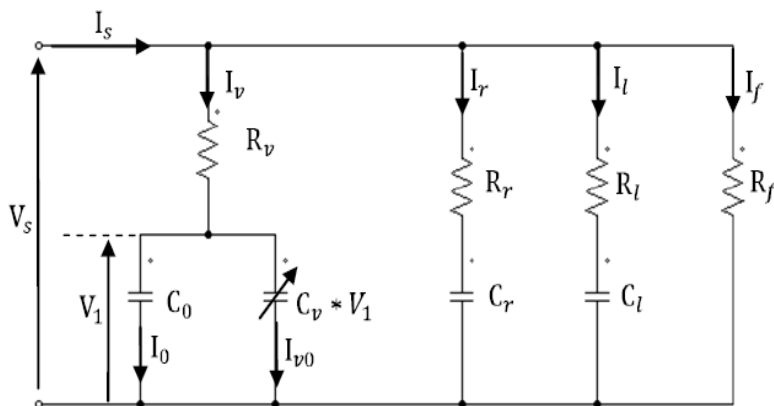


Figura 4.4 Notațiile utilizate pentru fiecare ramură din modelul comportamental al supercondensatorului realizat de Zubieta

Ecuțiile care stau la baza modelării fiecărei ramuri din circuitul prezentat în figura 4.4, sunt următoarele:

$$\begin{cases}
 I_v = 2C_v V_1 \frac{dV_1}{dt} + C_0 \frac{dV_1}{dt} \\
 I_r = C_r \frac{dV_1}{dt} + R_v C_r \frac{dI_v}{dt} - R_r C_r \frac{dI_r}{dt} \\
 I_l = C_l \frac{dV_1}{dt} + R_v C_l \frac{dI_v}{dt} - R_l C_l \frac{dI_l}{dt} \\
 I_f = \frac{1}{R_f} (V_1 + R_v I_v)
 \end{cases} \quad (4.1)$$

În figura 4.5 este reprezentată implementarea în matlab a supercondensatorului luând în considerare numai brațul principal (vezi figura 4.6).

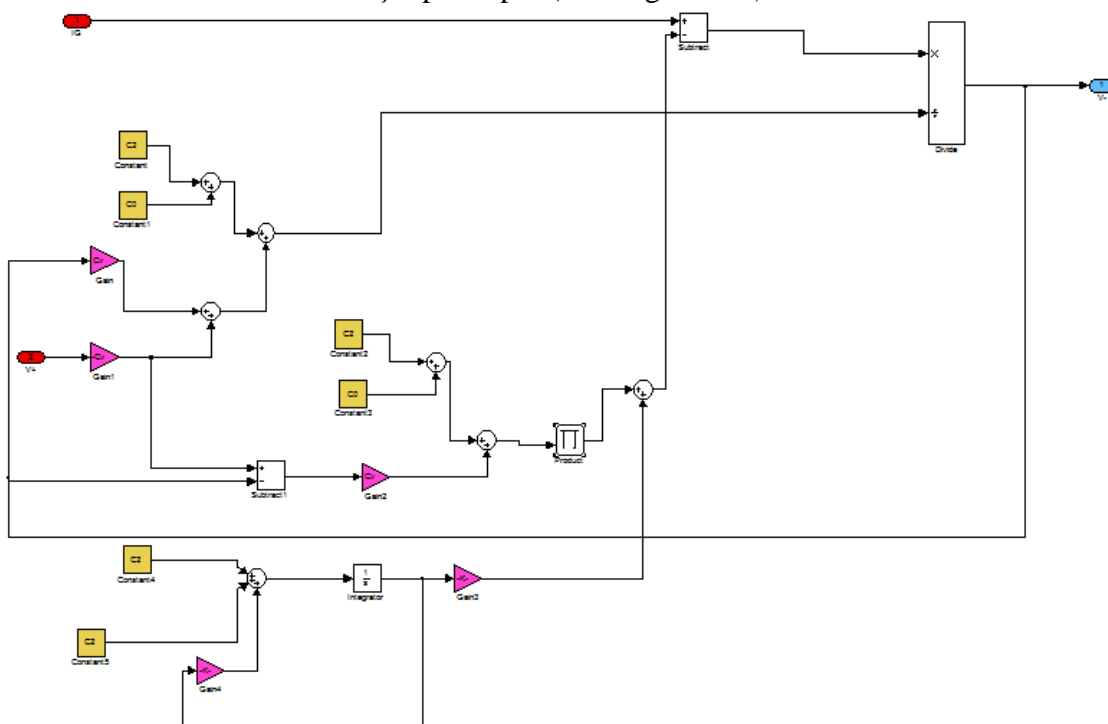


Figura 4.5 Implementarea în Matlab a brațului principal din modelul comportamental al supercondensatorului propus de Zubieta

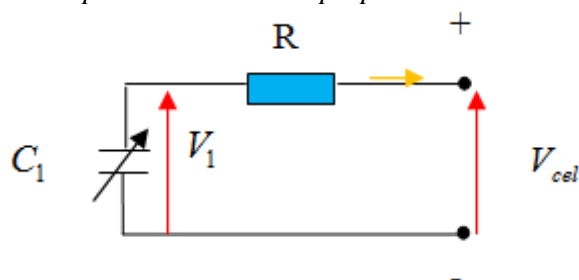


Figura 4.6 Reprezentarea brațului principal al supercondensatorului Capacitatea variabila  $C_1$  este funcție de tensiunea  $V_1$  conform ecuației 4.3.

$$C_1(V_1) = C_0 + K_v V_1 \quad (4.2)$$

unde  $C_0$  este constant iar  $K_1 V_1 = f(V_{cel})$ .



## 4.5 Concluzii

În acest capitol au fost analizate modelele comportamentale existente la ora actuală în literatura de specialitate pentru a se înțelege comportamentul ideal al supercondensatorului.

Contribuția personală din acest capitol este modelul de reacție al supercondensatorului într-un circuit electric, propus pentru simplificarea modelelor comportamentale ideale. Acest model se poate utiliza cu succes în aplicațiile rapide și în ipotezele descrise în acest capitol. Importanța simplificării modelului comportamental propus de Zubieta se justifică în cadrul aplicațiilor în care comportamentul ideal al supercondensatorului nu se manifestă.

Modelul de reacție într-un circuit electric al supercondensatorului este alcătuit din:

- Un condensator a cărui capacitate totală înglobează capacitățile specifice proceselor care au loc în interiorul lui (stocarea sarcinii electrice în dublu strat electric, în interiorul volumului electrozilor, pseudo-capacitatea și procesul de redistribuție a sarcinilor electrice după câteva minute de la prima excitație);
- O rezistență serie care depinde de caracteristicile materialelor utilizate în construcția lui.

Deși modelul de reacție al supercondensatorului propus în această teză nu este fidel comportamentului ideal al acestui dispozitiv, el se poate utiliza în simulările în care este necesară dimensionarea sistemului de stocare propus pentru a fi utilizat în anumite aplicații (vezi capitolul 5 – Aplicația reducerii golurilor de tensiune cu ajutorul supercondensatorilor).

Modelele complexe propuse în literatura de specialitate și prezentate în acest capitol, în care fiecare por în parte este analizat ca o celulă RC, ne oferă o explicație dintre cele mai bune a fenomenelor care au loc în interiorul supercondensatorilor (de exemplu: dependența capacității cu frecvența care este exclusă în modelul de reacție propus).

## BIBLIOGRAFIE

- [BUL 02] - S.Buller, E.Karden, D.Kok, R.W.De Doncker, Modelling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy, IEEE Transaction Industry Application, vol.38, no.6, 2002
- [RIZ 06] - N.RIZOUG, Modelisation electrique et energetique des supercondensateurs et methode de caracterisation. Application au cyclage d'une module de supercondensateur basse tension en grande puissance, l'Ecole Centrale de Lille et l'Universite des Sciences et Technologies de Lille, Franta, 2006
- [KAU 10] - M.KAUS, J.Kowal, et al., Modelling the effects of charge redistribution during self-discharge of supercapacitors, Electrochimica Acta 55, 7516-7523, 2010

## Capitolul 5.

### **UTILIZAREA SUPERCONDENSATORILOR LA REDUCEREA GOLURILOR DE TENSIUNE. CONTRIBUȚIE PERSONALĂ**

Multe aplicații din domeniul energiei necesită utilizarea condensatorilor. Una dintre problemele majore întâlnite o reprezintă valoarea capacității, care în multe cazuri nu este suficient de mare. Valori ale capacității electrice de sute și mii de Farazi se ating prin mărirea ariei dar fără creșterea exagerată de volum sau greutate prin utilizarea de armături sau electrozi "poroși". Electrozii din material conductor care conțin un număr foarte mare de pori cu dimensiuni de ordinul 10 nm fac posibilă obținerea unei arii de expunere la electrolit de sute și chiar mii de metri pătrați pe gramul de electrod. Pentru realizarea electrozilor poroși, nano-științele și nano-tehnologiile, aflate încă în dezvoltare, au o contribuție determinantă.

Calitatea energiei electrice este un topic important atât pentru consumatori cât și pentru furnizorii de energie electrică. Echipamentele electrice conectate la rețeaua electrică au devenit cu timpul din ce în ce mai vulnerabile la variațiile parametrilor de calitate a energiei [CHU 07]. Acest lucru se datorează faptului că multe din echipamentele electrice utilizate în zona industrială și casnică sunt computerizate.

În calitatea energiei electrice se pot distinge două mari clase, și anume [SAN 03]:

- Calitatea tensiunii, cu referire la:
  - Goluri de tensiune;
  - Întreruperi de tensiune;care au un impact negativ foarte mare mai ales în zona industriei.
- Calitatea curentului, cu referire la caracteristicile curentului care "traversează" sarcina.

Acest capitol este consacrat studiului micro-rețelelor electrice și aduce soluții pentru îmbunătățirea indicatorilor de calitate a tensiunii. Abordarea acestui subiect se face prin intermediul mediului de simulare Matlab / SimPowerSystems. Acest model a fost implementat prin utilizarea unui filtru activ cu o topologie nouă, prezentată în [GUR 2 11]; [VEC 1 10].

#### **5.1. Micro-rețelele electrice**

Unul dintre obiectivele majore pentru UE este ca până în anul 2020 să se reducă emisiile de gaze cu efect de seră cu 20 % raportat la anul 1990 [HIT 10]. O soluție pentru a atinge acest obiectiv în sectorul energetic o reprezintă implementarea tehnologiilor inteligente prin transformarea rețelelor electrice existente în rețele electrice inteligente. Prin înlocuirea combustibililor fosili cu sursele de energii regenerabile se pot reduce emisiile de carbon ceea ce conduce la atingerea obiectivului Uniunii Europene de reducere a acestora [BAS 10].

#### **5.2. Descrierea calității energiei electrice**

##### **5.2.1. Definirea calității energiei electrice**

Calitatea energiei electrice (CEE) reprezintă un concept complex de estimare a nivelului de calitate a produsului energie electrică, exprimat printr-un sistem de

indicatori, ale cărui valori determinate pentru un anumit punct al rețelei pe un anumit interval de timp, pot fi comparate cu valorile optime sau admisibile corespunzătoare.

CEE împreună cu siguranța în funcționare și compatibilitatea electromagnetică a instalațiilor cu mediul în care funcționează, definesc și determină calitatea serviciului de alimentare cu energie electrică.

Sistemul de indicatori al CEE se referă la următoarele aspecte concrete:

- abateri ale frecvenței;
- variații ale valorii eficace a tensiunii;
- abaterile tensiunii de la forma ideală;
- abateri ale sistemului de tensiuni și curenți de la simetria de fază.

### 5.2.2. Principalele cauze ale înrăutățirii calității energiei electrice

#### A. Cauze care înrăutățesc calitatea frecvenței

La nivelul ansamblului instalațiilor sistemului energetic, la un moment dat pot exista situații în care echilibrul între cererea și oferta de putere nu poate fi menținut, datorită unor cauze cum ar fi:

- inerția mare de răspuns a instalațiilor de producere;
- lipsa de agent primar;
- lipsa de capacitate în grupurile energetice etc.

#### B. Cauze ale variațiilor de tensiune

Prin variație de tensiune într-un punct al rețelei, la un moment dat, se înțelege diferența algebrică dintre tensiunea de serviciu din acel punct și tensiunea nominală a rețelei respective.

Variațiile de tensiune se clasifică în:

- **variații de tensiune de lungă durată**, funcționare staționară la o tensiune diferită de cea nominală, care apare ca urmare a unui reglaj defectuos sau a supraîncărcării rețelelor, funcționarea de durată cu variații având un caracter cvasiperiodic, ce sunt produse de existența unor sarcini pulsatorii;
- **variații ale tensiunii de scurtă durată**, variații de tensiune bruște, care sunt datorate unor defecte cu caracter rapid, trecător sau eliminate prin protecții, variații bruște produse de șocuri de putere cu caracter pasager, dispariții scurte ale tensiunii ca urmare a funcționării sistemelor automate (AAR, RAR).

### 5.2.3. Sistemul indicatorilor de calitate a energiei electrice

În majoritatea țărilor sistemul de indicatori ai calității energiei electrice este format dintr-o serie de caracteristici cantitative ale variațiilor lente (abateri) sau rapide (fluctuații) ale valorii efective a tensiunii, forma și simetria în sistemul trifazat, precum și caracteristicile de variație lentă/rapidă ale frecvenței.

## 5.3. Teoria golurilor de tensiune

Un gol de tensiune este o reducere a valorii efective a tensiunii sau dispariției complete a acesteia pentru un interval de timp scurt. El se caracterizează prin durată și tensiunea remanentă, exprimată ca procente din valoarea efectivă a tensiunii nominale, a tensiunii remanente în punctul cel mai jos atins în timpul golului. În timpul unui gol de tensiune sarcina nu primește întreaga energie necesară funcționării, ceea ce evident poate avea consecințe grave în funcție de tipul de sarcină implicate.

În apariția golurilor de tensiune există două cauze principale [CHA 01]:

- Conectarea unei sarcini foarte mari locale sau la un alt consumator racordat pe același circuit;
- Defecte pe alte ramuri ale rețelei.

#### 5.4. Managementul calității energiei electrice prin utilizarea sistemelor de stocare de scurtă durată. Contribuție personală

Se știe deja că sistemele de stocare a energiei au un impact major în managementul calității energiei electrice. Aplicația descrisă mai jos, pentru reducerea golurilor de tensiune, se regăsește în zona încercuită din figura 5.1.

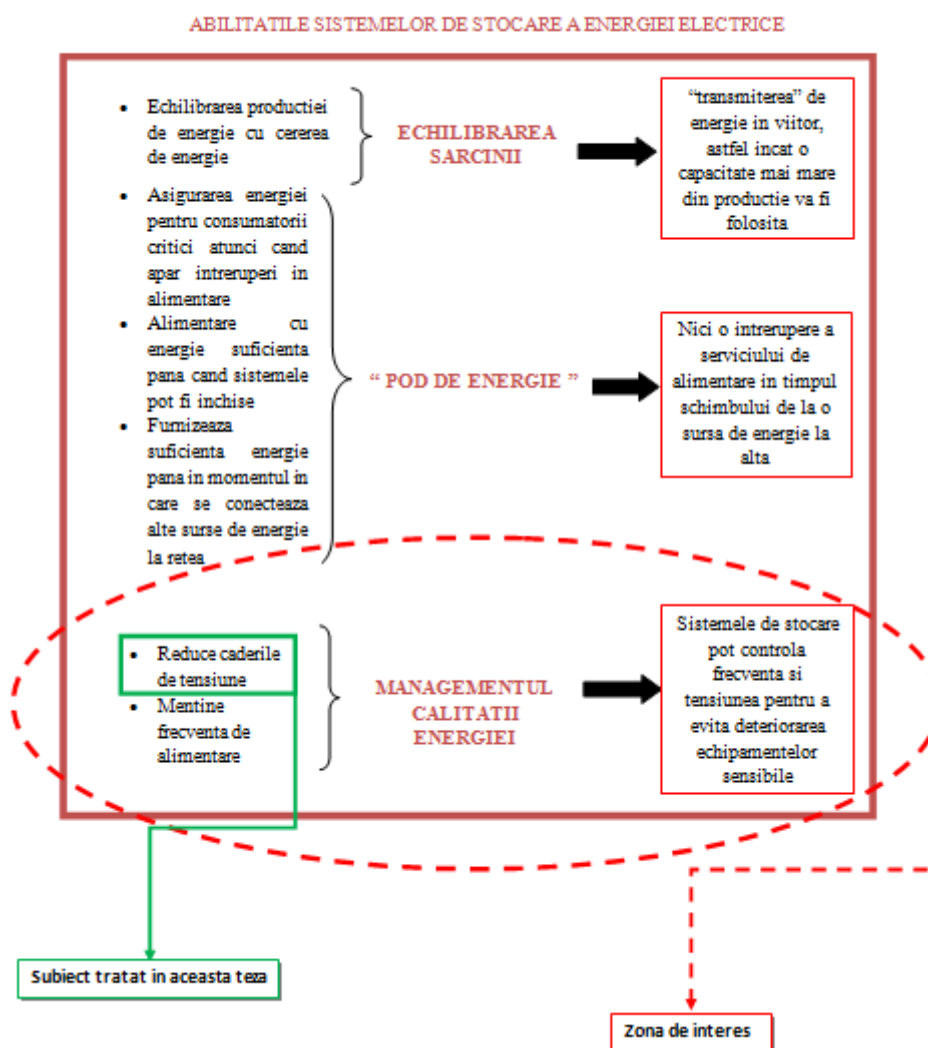


Figura 5.1 Încadrarea subiectului tratat în această teză, în câmpul domeniilor de aplicabilitate a sistemelor de stocare a energiei electrice

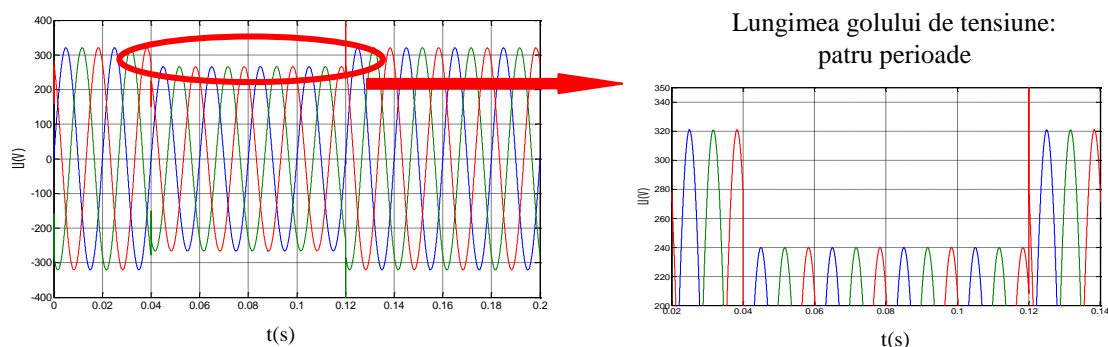


Figura 5.2 Reprezentarea unui gol de tensiune cu lungimea de patru perioade obținut prin simulare în Matlab / SimPowerSystems

Ca urmare a cuplării unei sarcinii foarte mari tensiunea scade până la valoarea de 240 V, ceea ce indică apariția unui gol de tensiune, și revine la valoarea inițială (325V) când se decuplează sarcina.

În mod obișnuit, durata unui gol de tensiune poate fi de la 10 ms la mai puțin de o secundă, în funcție de modul de alimentare a întreprinderii, din sistemul de transport, sau din sistemul de distribuție, care nu poate alimenta un curent electric de scurtcircuit mare.

Când se conectează o sarcină mare curentul de pornire este mare, de mai multe ori, față de curentul nominal. În figura 5.3 se găsește reprezentarea curentului care crește până la valoarea de  $I = 160 \text{ A}$  în momentul cuplării sarcinii foarte mari, și revine la valoarea inițială (10 A) după ce se decuplează sarcina.

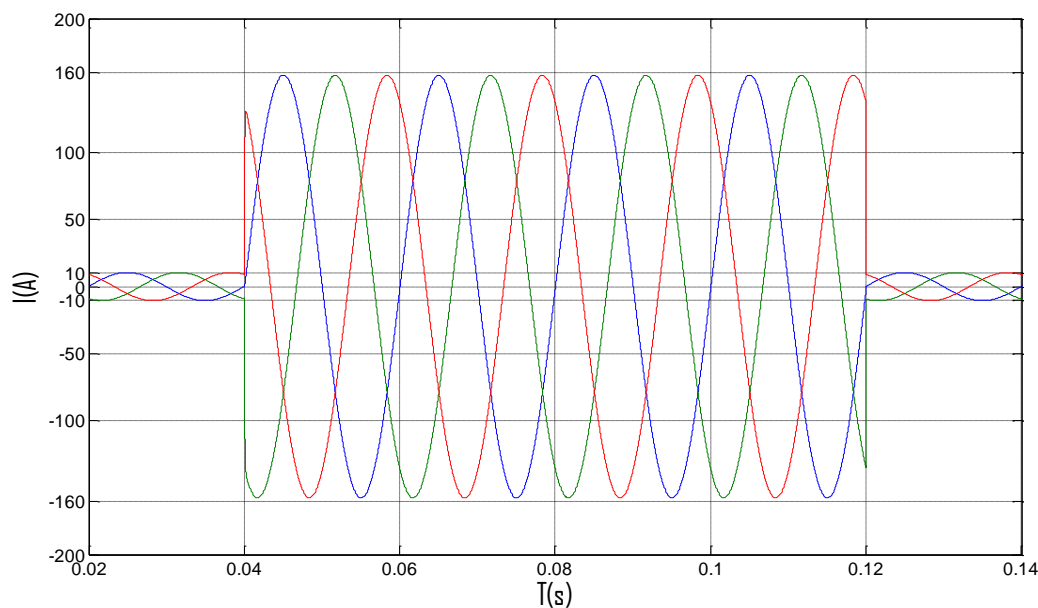


Figura 5.3 Variația curentului  $I = f(t)$  în momentul cuplării sarcinii. Generarea golului de tensiune

Deoarece alimentarea și conductoarele instalației sunt dimensionate pentru curentul normal de funcționare, curentul de pornire determină o cădere de tensiune atât în rețeaua de alimentare, cât și în instalație. Amplorarea efectului depinde de cât de puternică este rețeaua, adică cât este de mică impedanța în punctul comun de cuplare și de impedanța conductoarelor din instalație.

## 5.5. Soluție pentru reducerea golurilor de tensiune cu ajutorul supercondensatorilor. Contribuție personală

În continuare se propune evitarea apariției golurilor de tensiune prin utilizarea supercondensatorilor.

Se vor utiliza simulări cu ajutorul supercondensatorilor în scopul reducerii golurilor de tensiune. Conectarea acestora la rețea se va face prin intermediul unui filtru activ. Topologia și controlul acestui filtru sunt prezentate în [GUR 1 11]; [GUR 2 11]; [BAL 10]; [VEC 2 10].

În dezvoltarea acestei aplicații s-a folosit un model implementat în programul Matlab SimPowerSystems. Schema bloc a acestui sistem este arătată în figura 5.4.

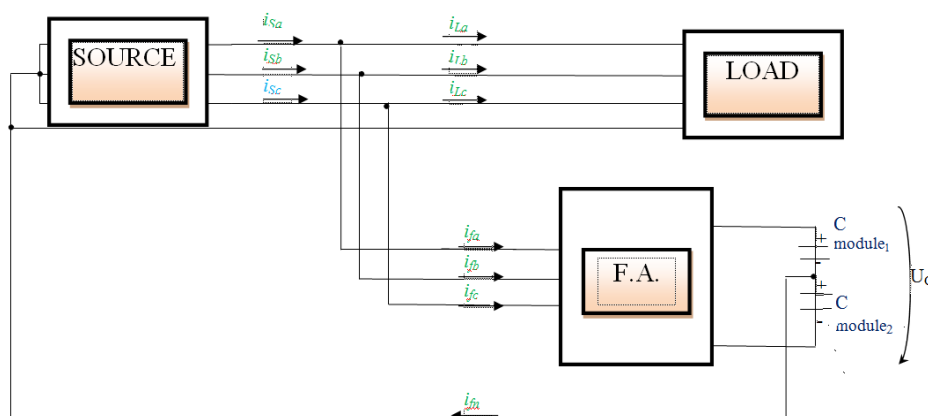


Figura 5.4 Schema bloc a modelului realizat pentru reducerea golurilor de tensiune prin utilizarea supercondensatorilor

Metoda de reducere a golurilor de tensiune constă în utilizarea a două, patru etc., module de supercondensatori care vor elibera energia necesară acoperirii golurilor de tensiune apărute în momentul cuplării sarcinii foarte mari la micro-rețeaua electrică, Energia electrică este stocată în module de EDLC-uri în conexiune serie cu nod neutru. Această topologie permite trecerea curentului electric în ambele sensuri prin întrerupătoare la supercondensatori și rețea. Micro-rețeaua electrică utilizată în simulare conține un transformator de 5KVA, 0,4/0,4 KV și diferite tipuri de sarcină. Sarcina este conectată în secundarul transformatorului. Se utilizează sarcini de tipul: inductivă, neliniară și dezechilibrată. Efectele acestor tipuri de sarcină în rețeaua electrică pot fi corectate prin utilizarea unui filtru activ cu supercondensatori în DC link. Numărul de module necesare depinde de lungimea golului de tensiune. Pentru o lungime mai mare a golului de tensiune se adaugă câte un modul în paralel cu modulul deja conectat.

## 5.6. Caracteristicile supercondensatorilor utilizați în modelul implementat în Matlab / SimPowerSystem pentru reducerea golurilor de tensiune

Pentru acest studiu am ales utilizarea sistemelor de stocare pe termen scurt (supercondensatori). Pentru simulări s-a preferat modelul dinamic al supercondensatorului numit în această teză "modelul de reacție într-un circuit electric al supercondensatorului". Acest model este o simplificare a modelului propus de Zubieta prin adaptarea lui la studiul de față. Modelul propus de Zubieta [IKN 10] (vezi figura 5.5), descrie comportamentul supercondensatorului de tip EDLC prin intermediul a patru brațe ce corespund proceselor fizice care au loc temporar în interiorul dispozitivului.

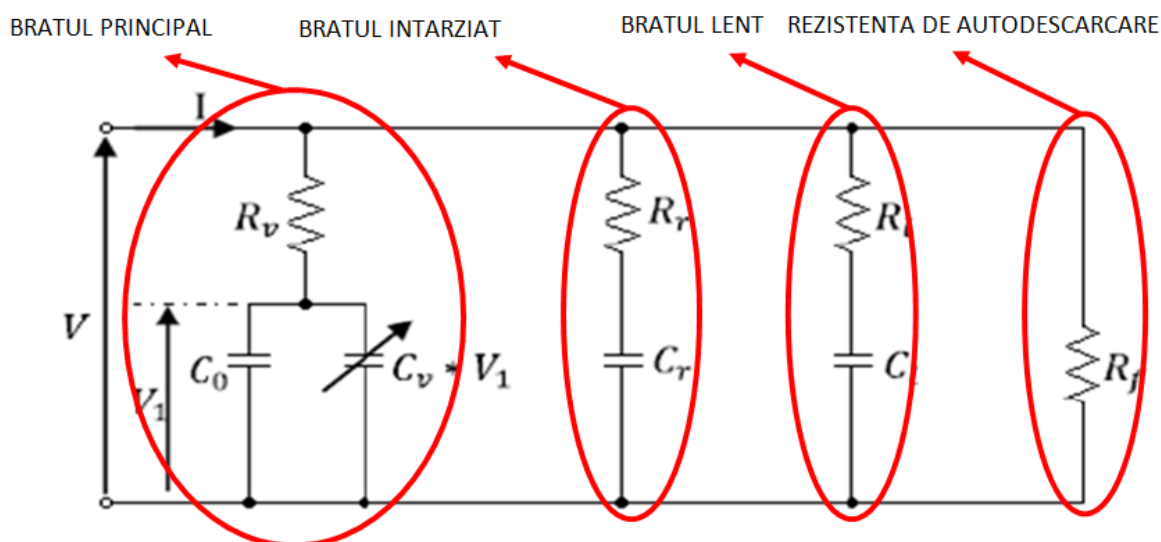


Figura 5.5 Modelul comportamental al EDLC-ului propus de Zubieta [IKN 10]

În care, avem:

- Brațul principal – modelează comportamentul imediat al EDLC-ului în urma unui impuls;
- Brațul întârziat – modelează răspunsul dispozitivului după câteva minute de la aplicarea primului impuls;
- Brațul lent – modelează comportamentul EDLC-ului într-un interval de timp mai mare decât câteva zeci de minute;
- Rezistența de autodescărcare – reprezintă rezistența de pierderi și modelează procesul de autodescărcare a supercondensatorului.

Tranziția de la modelul comportamental propus de Zubieta la modelul de reacție într-un circuit electric propus în această teză și utilizat în modelul implementat în Matlab / SimPowerSystems, se face prin următoarele ipoteze:

- Sistemul de stocare este conectat în permanență la micro-rețeaua electrică iar tensiunea aplicată la terminalele dispozitivului este în permanență controlată;
- Rezistența de autodescărcare are un efect "vizibil" numai la frecvențe foarte mici (de ordinul milihertzi-ilor) [PET 08];
- Capacitatea totală a unui modul de supercondensatori nu depinde de tensiunea aplicată printr-o funcție diferențială iar valoarea maximă se calculează conform relației din cazul condensatorilor clasici;
- Fenomenele tranzitorii precum redistribuțiile de sarcină în interiorul porilor din straturile profunde ale electrozilor (mezo- și micro-pori) și reacțiile chimice care pot lua naștere la interfața electro/electrolit nu sunt incluse în acest model.

Modelul de reacție al supercondensatorului utilizat în aplicația reducerea golurilor de tensiune, nu descrie comportamentul supercondensatorului și se rezumă la reacția dispozitivului de stocare într-un circuit electric prin eliberarea de energie atunci când este nevoie. Luând în considerare modelul propus de Zubieta, ipotezele făcute și faptul că frecvența de apariție a golurilor de tensiune în micro-rețeaua electrică, este foarte mare, modelul de reacție utilizat în dezvoltarea acestei aplicații se reduce la modelul din figura 5.6.

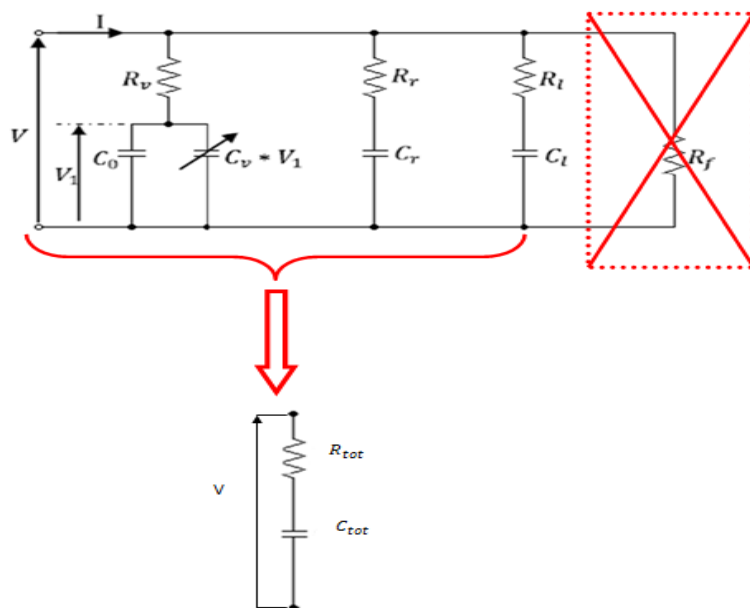


Figura 5.6 Modelul de reacție al supercondensatorului utilizat prin simulare în aplicația de reducere a golurilor de tensiune dintr-o micro-rețea electrică

Un modul de supercondensatori se poate modela prin  $n$  rezistențe serie și  $n$  condensatori. Se alege conexiunea de tip serie a supercondensatorilor într-un modul datorită tensiunii mici (2,7 V) de la terminalele dispozitivului. Modelul echivalent pentru un modul de  $n$  supercondensatori este reprezentat în figura 5.7 iar valorile parametrilor echivalente pentru un modul se calculează conform ecuațiilor din tabelul 5.2.

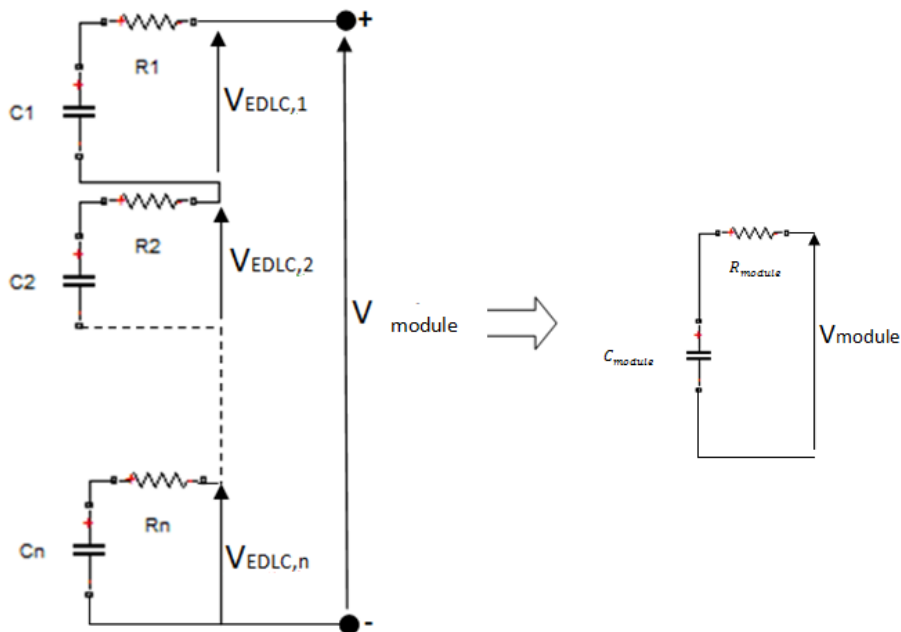


Figura 5.7 Circuitul echivalent pentru un modul de  $n$  EDLC-uri

În tabelul 5.1 se găsesc parametrii unui supercondensator iar în tabelul 5.2 sunt trecuți parametrii unui modul de supercondensatori.

Tabel 5.1 Parametrii supercondensatorului utilizat la realizarea unui modul de stocare a energiei electrice în simulare [CAS 02]

Tipul EDLC-ului	Rezistența serie echivalentă	Curentul maxim	Capacitatea totală	Tensiunea
Montena BCAP0010	0.8mΩ	100 A	2600F	2.5V



Tabel 5.2 Parametrii unui modul de 148 de supercondensatori în conexiune serie

Numărul de supercondensatori / modul		Tipul de conexiune	Capacitatea totala/modul		Rezistența serie echivalenta / modul		Tensiunea / modul
Ecuția de calcul [CAM07]	$n = \frac{V_{modul}}{V_{EDLC}}$	Serie	Ecuția [YAL 08]	$\frac{1}{C_{modul}} = \frac{1}{C_{EDLC,1}} + \dots + \frac{1}{C_{EDLC,148}}$	Ecuția [YAL 08]	$R_{modul} = R_{EDLC,1} + \dots + R_{EDLC,148}$	370V
valoare	148		valoarea	17.56F	valoarea	0.11Ω	

### 5.7. Rezultatele obținute în Matlab/SimPowerSystems pentru aplicația supercondensatorilor în reducerea golurilor de tensiune

În micro-rețeaua electrică implementată în Matlab / SimPowerSystem pentru aplicația de față, amplitudinea tensiunii este  $V = 325$  V. Variația tensiunii în micro-rețea nu trebuie să depășească 10 % din valoarea nominală a tensiunii (normativul EN50160). În cazul de față asta înseamnă că tensiunea nu trebuie să scadă la o valoare mai mică de 292,5 V.

Pentru golurile de tensiune cu lungimea de o perioadă (0.02 s - 0.04 s) am utilizat două module de EDLC-uri în conexiune serie cu caracteristicile prezentate în tabelul 5.2. În figura 5.8 se prezintă rezultatul obținut în urma simulărilor realizate în Matlab / Simulink. În acest caz capacitatea totală a sistemului de stocare utilizat la reducerea golului de tensiune cu lungimea de o perioadă este de 8,78 F și a fost calculată conform ecuațiilor 5.1 și 5.2 [YAL 08].

$$C_{tot,parallel} = n * C_{EDLC} \quad (5.1)$$

$$C_{tot,series} = \frac{C_{EDLC}}{n} \quad (5.2)$$

unde  $n$  reprezintă numărul de module utilizate iar  $C_{EDLC}$  reprezintă capacitatea unui modul de EDLC-uri.

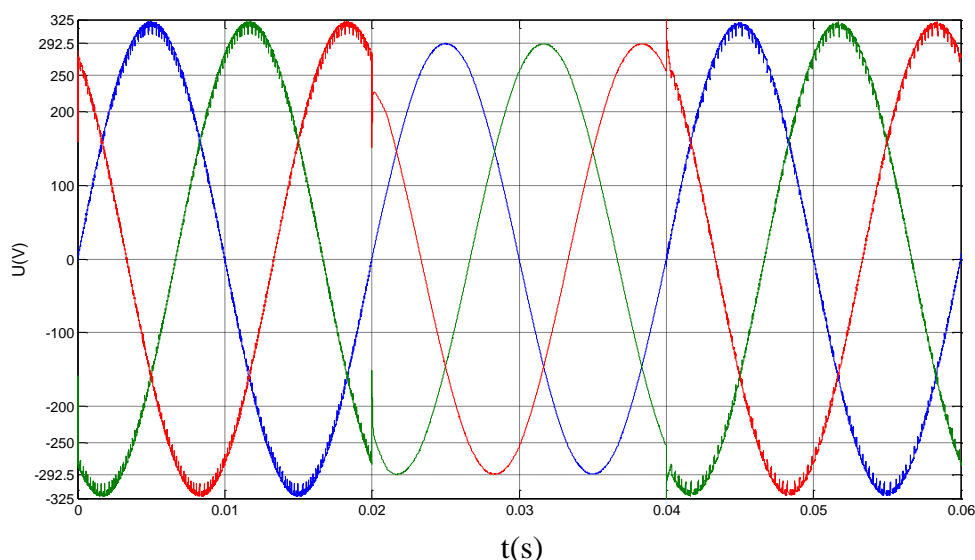


Figura 5.8 Variația tensiunii  $u=f(t)$ , cu  $C_{EDLC1}=C_{EDLC2}=17.56F$  ( $C_{tot}=8,78F$ )

Prin utilizarea a două module EDLC tensiunea scade până la valoarea de 292,5V, ceea ce înseamnă că golul de tensiune a fost redus la o valoare permisă de normativul EN50160. Conectarea modulelor de EDLC în sistemul implementat în Matlab / SimPowerSystem se regăsește în figura 5.9.

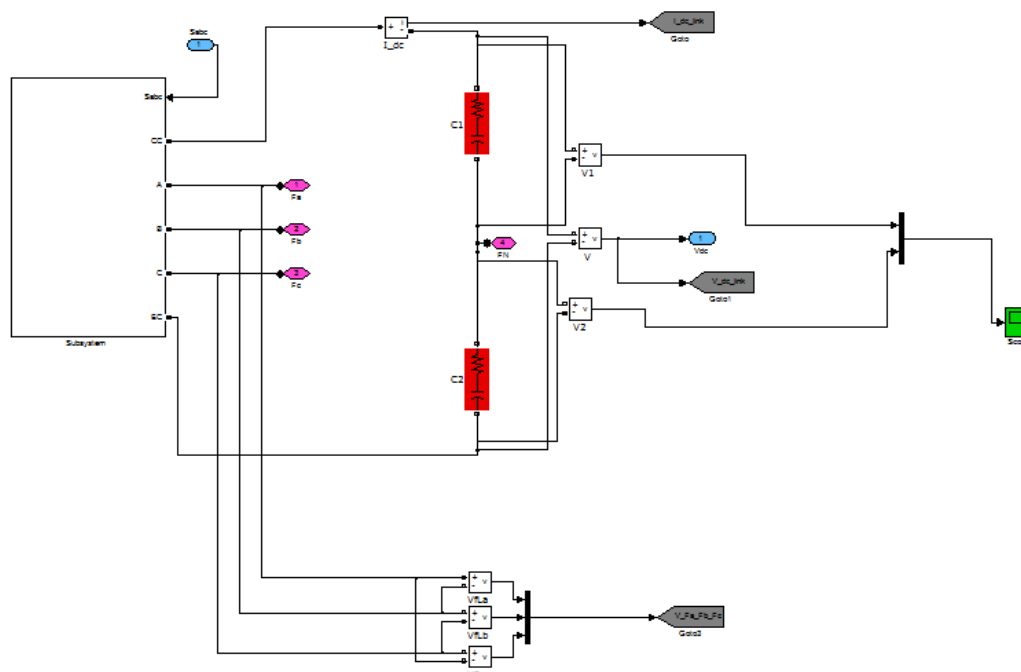


Figura 5.9 Conectarea celor doua module EDLC în modelul implementat în Matlab/SimPowerSystem pentru cazul reducerii golului de tensiune cu lungimea de o perioada

Următoarea simulare are ca obiectiv reducerea golurilor de tensiune cu lungimea de două perioade (0.02 s - 0.06 s). În acest caz capacitatea totală de 8,78 F a sistemului cu două module EDLC nu este suficientă pentru furnizarea energiei necesare în rețea. Astfel, au fost adăugate încă două module de EDLC cu aceleași caracteristici, capacitatea totală a sistemului de stocare rezultat fiind de 17,56 F. În urma simulărilor realizate s-a demonstrat că prin utilizarea a patru module de EDLC se pot reduce golurile de tensiune cu lungimea de două perioade. Așa cum este arătat și în figura 5.10, tensiunea scade până la valoarea de 300 V în ultima perioadă (0.04 s - 0.06 s).

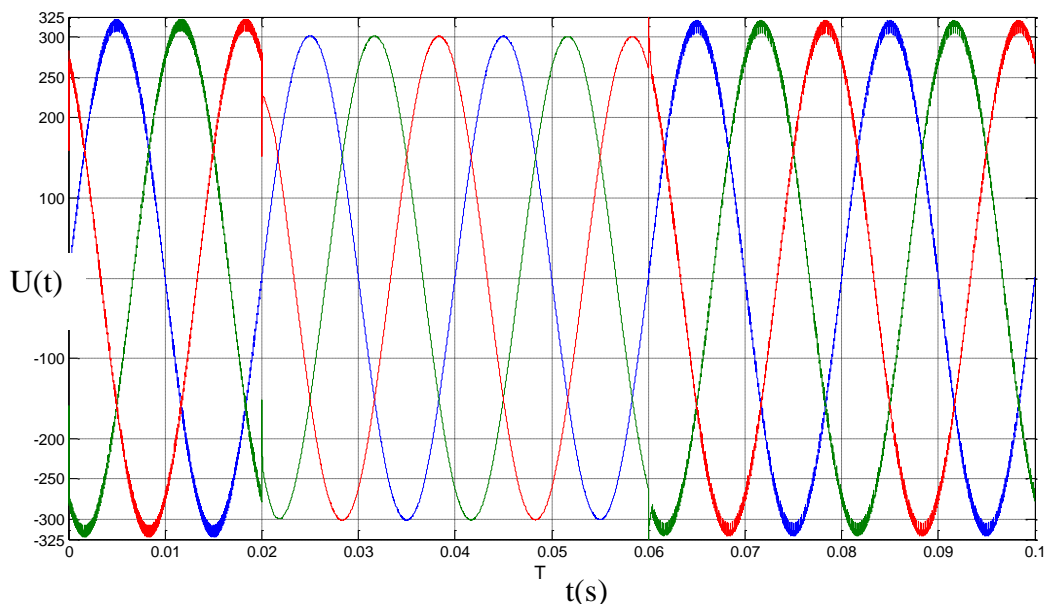


Figura 5.10 Variația tensiunii  $U=f(t)$  cu  $C_{EDLC1}=...=C_{EDLC4}=17.56F$  ( $C_{tot}=17.56F$ )

Conexiunea celor patru module EDLC în sistemul implementat în Matlab/SimPowerSystem este arătată în figura 5.11.

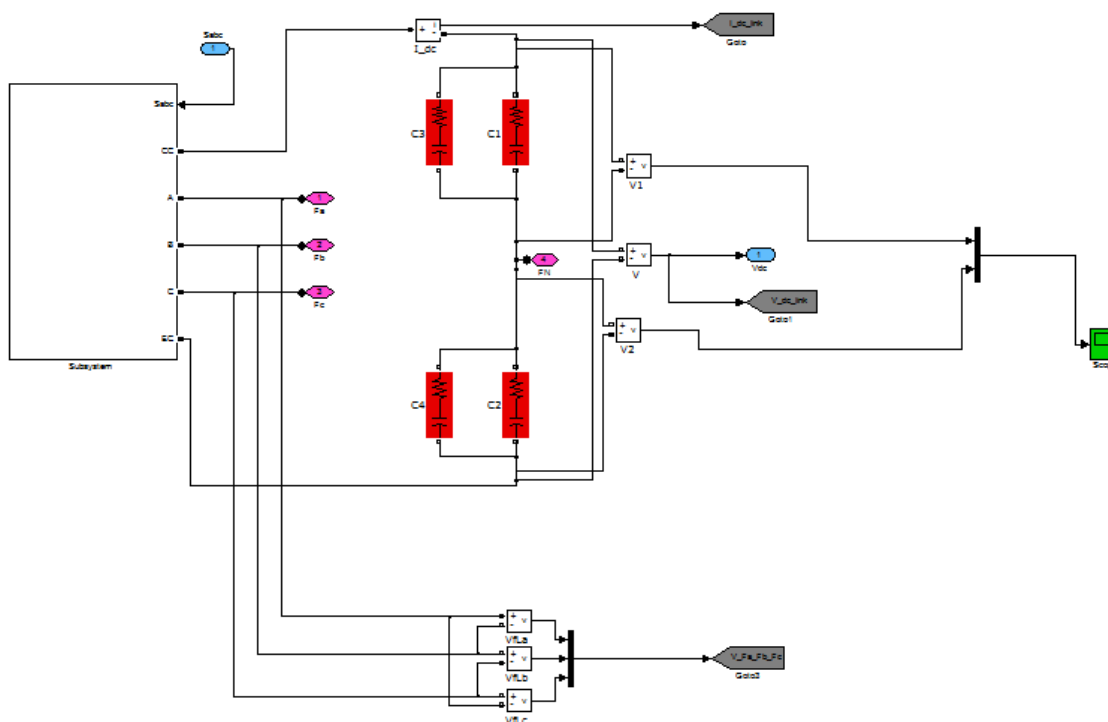


Figura 5.11 Conectarea celor patru module EDLC în modelul implementat pentru reducerea golurilor de tensiune

Rezultatele simulărilor intermediare între două perioade au 50 de perioade (1s), sunt trecute în tabelul 5.3.

Tabel 5.3 Rezultatele simulărilor din Matlab. Reducerea golurilor de tensiune cu lungimea cuprinsă între o perioadă și 50 de perioade

Timpul de cuplare a sarcinii la micro-rețeaua electrică (lungimea golurilor de tensiune atenuate)	Numărul de module EDLC utilizate	Capacitatea totală a sistemului de stocare [F]	Valoarea la care cade tensiunea [V]
1 perioada	2	8.78	292.5
2 perioade	4	17.56	300
3 perioade	4	17.56	300
5 perioade	4	17.56	299
10 perioade	4	17.56	296.5
15 perioade	4	17.56	294
18 perioade	4	17.56	293
20 perioade	6	26.34	297.5
30 perioade	6	26.34	293.2
35 perioade	8	35.12	295.5
50 perioade	10	43.9	294

Pentru golurile de tensiune cu durata de 50 de perioade (1s) am utilizat prin simulare 10 module EDLC cu aceleași caracteristici. Conectarea modulelor în sistemul implementat în Matlab este prezentată în figura 5.12 iar rezultatul obținut în urma simulărilor este prezentat în figura 5.13. Ca și în cazul golurilor de tensiune cu lungimi mai mici de 50 de perioade, și în acest caz simulările arată că acestea au fost reduse cu succes.

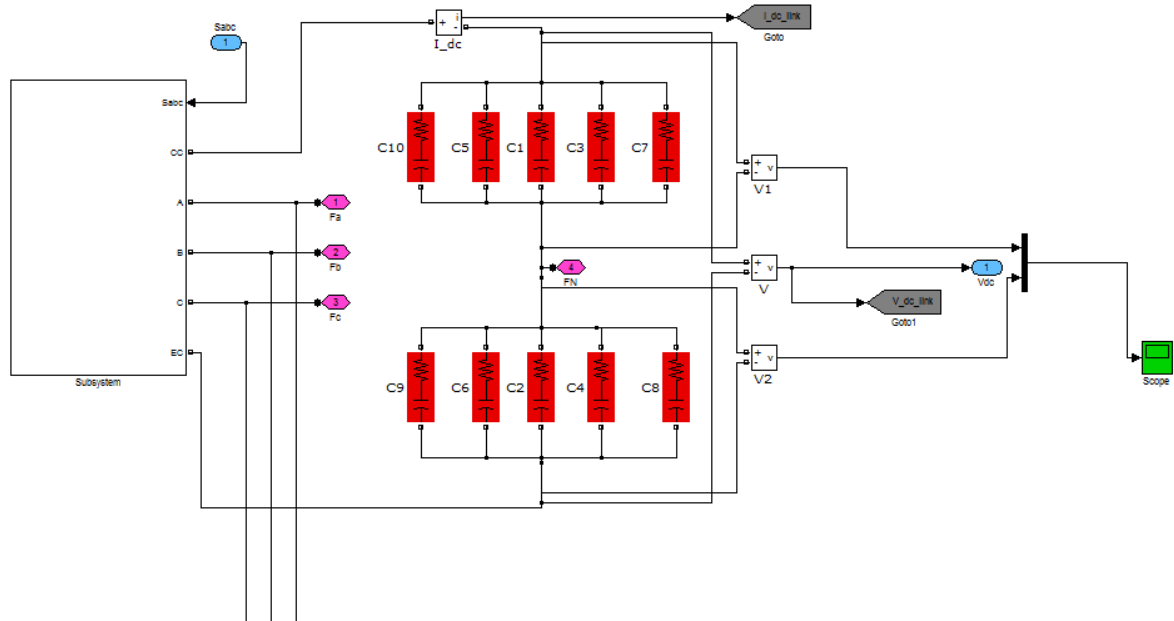


Figura 5.12 Conectarea celor 10 module EDLC în aplicația reducerii golurilor de tensiune cu o durată de 50 de perioade

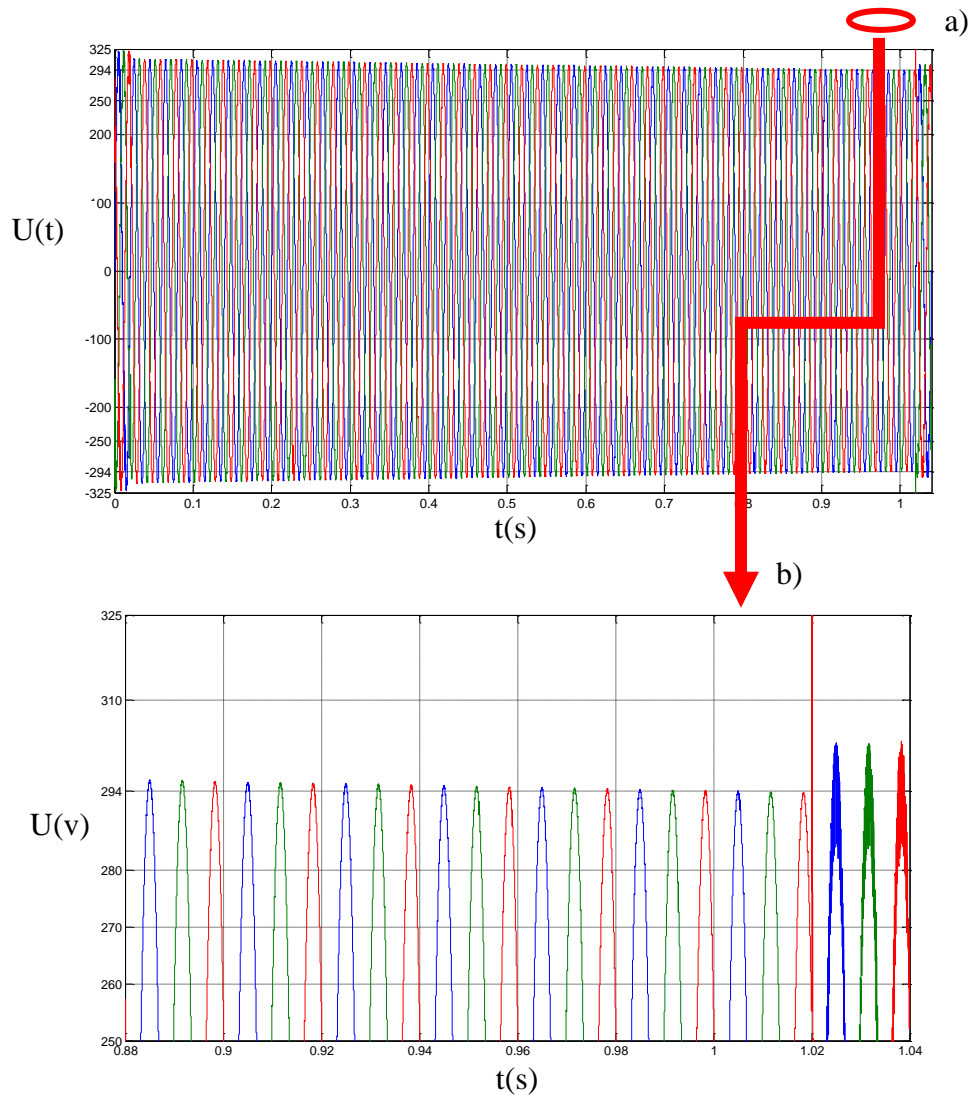


Figura 5.13 Variația tensiunii  $u = f(t)$  cu  $C_{EDLC1} = \dots = C_{EDLC10} = 17.56F$  ( $C_{tot} = 43,9 F$ )

Dacă în aceleași condiții de simulare (aceiași sarcină și același timp de conectare a sarcinii la rețea, o perioadă) utilizăm un sistem de stocare care conține un număr diferit de module de EDLC, se obțin rezultatele din tabelul 5.4.

Tabel 5.4 Reducerea golurilor de tensiune cu lungimea de o perioadă(20ms) prin utilizarea unui număr diferit de module EDLC

Timpul de cuplare a sarcinii la micro-rețeaua electrică (lungimea golurilor de tensiune atenuate)	Numărul de module EDLC	Capacitatea totală a sistemului de stocare [F]	Valoarea la care scade tensiune [V]
1 perioada	2	8.78	292.5
	4	17.56	301
	6	26.34	306
	8	35.12	308.5
	10	43.9	310.5
	12	52.68	312
	14	61.46	313
	16	70.24	314
	20	87.8	315
	26	114.14	316
	36	158.04	317

## 5.8.Concluzii

Indicatorii de calitate a energiei electrice pot fi îmbunătățiți prin utilizarea sistemelor de stocare a energiei. Acest lucru se afirmă în urma simulărilor în Matlab / SimPowerSystems prezentate în figurile 5.16, 5.18, 5.21 și anexele 2-19. În urma rezultatelor obținute și prezentate în tabelele 5.3 și 5.4 se poate afirma că sistemele de stocare pe termen scurt pot îmbunătăți stabilitatea micro-rețelelor electrice. Micro-rețeaua electrică este o rețea electrică cu o instabilitate ridicată, în special când sunt utilizate surse regenerabile de energie. Din acest motiv, utilizarea sistemelor de stocare a energiei electrice pentru o bună funcționare a micro-rețelelor electrice este inevitabilă.

În acest capitol s-a arătat că prin utilizarea unui filtru activ în construcția căruia există module de supercondensatori de tip EDLC este posibilă reducerea golurilor de tensiune apărute în urma conectării unei sarcinii foarte mari la rețea. Am făcut simulări cu diferite perioade de conectare a sarcinii, de la 20 ms până la 1s. Rezultatele simulărilor indică o reducere a golurilor de tensiune cu lungimea de o perioadă prin utilizare a două module EDLC, patru module EDLC pentru un timp de conectare a sarcinii de la două până la 18 perioade, șase module EDLC pentru reducerea golurilor de tensiune cu lungimi între 18 perioade - 30 perioade etc. Căderea cea mai mare de tensiune a fost obținută în simularea pentru golul de tensiune de o perioadă și utilizarea a două module EDLC. În acest caz tensiunea scade până la valoarea de 292,5 V, valoare maximă permisă conform normativului EN50160. Cea mai bună reducere a golurilor de tensiune a fost obținută prin utilizarea a patru module EDLC pentru o conectare de două perioade a sarcinii la rețea. În acest caz tensiunea scade până la valoarea de 300 V ceea ce înseamnă o varietate a tensiunii de numai 7,6 %.

## BIBLIOGRAFIE

- [BAL 10] - C.Balanuta, G.Gurguiatu, T.Munteanu, G.Fetecau, Control of 4-leg active power filter for reactive power and unbalance compensation, Electrical and Electronic Engineering (ISEEE), ISBN 978-1-4244-8406-5, p.183-186, 2010
- [BAS 10] - Bastian Fischer, "Releasing the potential of Smart Grids", Oracle Utilities, Spain,  
Publicat: Dec 1, 2010, [www.powergenworldwide.com](http://www.powergenworldwide.com)
- [CHA 01] - D.Chapman, Ghid de aplicare-Calitatea energiei electrice, ECI, 2001
- [GUR 1 11] - G.Gurguiatu, I.Vechiu, T.Munteanu, Power quality improvement using renewable energy, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ISBN 978-84-616-7527-8, Las-Palmas, 2011
- [GUR 2 11] - Gelu Gurguiatu, Contribuții privind controlul filtrelor active în vederea reducerii conținutului de armonici din rețelele electrice, Lucrare prezentată în vederea obținerii titlului de doctor în Inginerie Electrică, Universitatea „Dunărea de Jos” , Galați, România, 2011
- [HIT 10] - Penny Hitchin, Efficiency, Efficiency, Efficiency: Towards 20 per cent by 2020, Power Engineering International, Pei, Publicat: Dec 1,2010, [www.powergenworldwide.com](http://www.powergenworldwide.com)
- [IKN 10] - D.IKNI, Gestion de l'energie embarquee a bord d'un vehicule électrique hybride de nouvelle generation, Memoire presente en vue d'obtenir le diplome du Master 2 Recherche en Systemes Energetiques Electriques (SEE), Universite du Havre, France, 2010
- [PET 08] - D.Petreus, D.Moga, R.Galatus, R.A.Munteanu, Modeling and sizing of Supercapacitors, Advances în Electrical and Computer Engineering, Vol.8, No.2, 2008
- [VEC 1 10] - I.Vechiu, G.Gurguiatu, Advanced active power filter to improve power quality on microgrids, The International 9<sup>th</sup> Power and Energy Conference, Singapore, 2010
- [VEC 2 10] - I.Vechiu, G.Gurguiatu, E.Rosu, Advanced active power conditioner to improve power quality în microgrids”, IPEC, Conference Proceedings, p.728-733, 2010

## Capitolul 6.

## TEHNOLOGIE NOUĂ PROPUȘĂ PENTRU REALIZAREA SUPERCONDENSATORILOR. NOUA DIRECȚIE DE CERCETARE

În acest capitol se propune o nouă tehnologie de realizare a supercondensatorului, prin schimbarea tipurilor de materiale folosite în realizarea electrozilor supercondensatorilor. La baza acestei teorii se află fizica materialelor (teoria nano-materialelor) și teoria spinilor electronici. Această nouă tehnologie de realizare a dispozitivului propus este descrisă doar teoretic. Numele propus pentru acest dispozitiv este supercondensator de tip spinning. Tehnologia se încadrează în clasa sistemelor de stocare pe termen lung și prezintă numeroase avantaje față de sistemele de stocare existente la ora actuala.

### 6.1. Bazele teoretice

Considerăm cazul a două straturi subțiri (cu grosimi de ordinul nano-metrilor) din materiale cu proprietăți feromagnetice (FM) și un separator ne-magnetic (NM) (nu are proprietăți magnetice), în absența unui câmp magnetic extern. În această dispunere pe trei straturi FM/NM/FM se disting două situații descrise în figura 6.1. În figura 6.1 (a) rezultanta vectorului magnetizării celor două straturi FM arată o aliniere antiparalelă și indică o cuplare anti-feromagnetică (AF) a sistemului, în timp ce în figura 6.1 (b) vectorii rezultantei magnetizării celor două straturi FM indică o dispunere paralelă, indicând astfel o cuplare feromagnetică (CF) a celor două straturi, FM1 și FM2 [CHI 02].

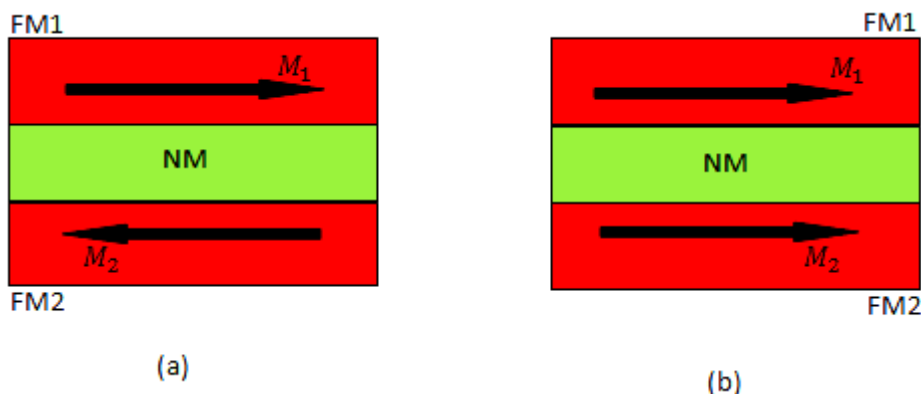


Figura 6.1 Reprezentarea schematică a fenomenului de (a) cuplare anti-feromagnetică (AF) și (b) cuplare feromagnetică (CF), între două straturi feromagnetice separate de un separator ne-magnetic

Matematic, energia pe unitatea de suprafață de "cuplare" a celor două straturi FM separate printr-un strat NM este [CHI 02] :

$$E_{1,2}(t_{NM}) = -J_1(t_{NM})\cos\alpha_{1,2} - J_2(t_{NM})\cos^2\alpha_{1,2} \quad (6.1)$$

unde:  $t_{NM}$  reprezintă grosimea stratului NM;

$\alpha_{1,2} = \cos^{-1} \frac{M_1 M_2}{|M_1||M_2|}$  se referă la orientarea relativă a magnetizării stratului FM1 și FM2;

$J_1, J_2$  reprezintă constantele de cuplare biliniară și bi-pătratică.

În cazul (a) din figura 6.1 constanta  $J_1$  este pozitivă (CF), iar în cazul (b) din figura 6.1 aceeași constantă este negativă (AF), iar pentru un unghi de  $90^\circ$  constanta de cuplare  $J_2$  este negativă și mai mare în modul decât constanta de cuplare  $J_1$ .

La scurt timp după descoperirea efectului de cuplare AF a două straturi feromagnetice, Baibich a scos în evidență o schimbare drastică a rezistenței prin aplicarea unui câmp magnetic la temperatura de 4.2 K, în straturi de Fe / Cr (raportul variației magneto-rezistenței (MR) observată la aplicarea unui câmp magnetic de intensitate  $H_s \sim 20 K Oe$  fiind de 80 %).

Magneto-rezistența reprezintă fenomenul de modificare a rezistenței electrice a unui material ca răspuns la un câmp magnetic exterior.

În interiorul unui material feromagnetic, inducția magnetică este dată de relația 6.2 [ALE 01]:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H}_a + \vec{H}_b + \vec{M}) \quad (6.2)$$

Magneto-rezistența normală (MRN) urmează regula lui Kohler iar relația 6.3 indică valoarea relativă a rezistivității electrice [ALE 01]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = F \left( \frac{B}{\rho_0} \right) \quad (6.3)$$

unde  $\rho_0$  indică rezistivitatea electrică la  $B=0$ , iar  $F$  reprezintă forța Lorentz.

În materialele feromagnetice  $\rho_0$  poate avea două componente  $\rho_{parallel}$  sau  $\rho_{perpendicular}$  în funcție de orientarea relativă dintre direcția curentului și direcția magnetizării  $M$  [ALE 01].

În figura 6.2 sunt reprezentate diferitele tipuri de cuplaje între straturi Fe/Cr/Fe de diferite dimensiuni [ALE 01].

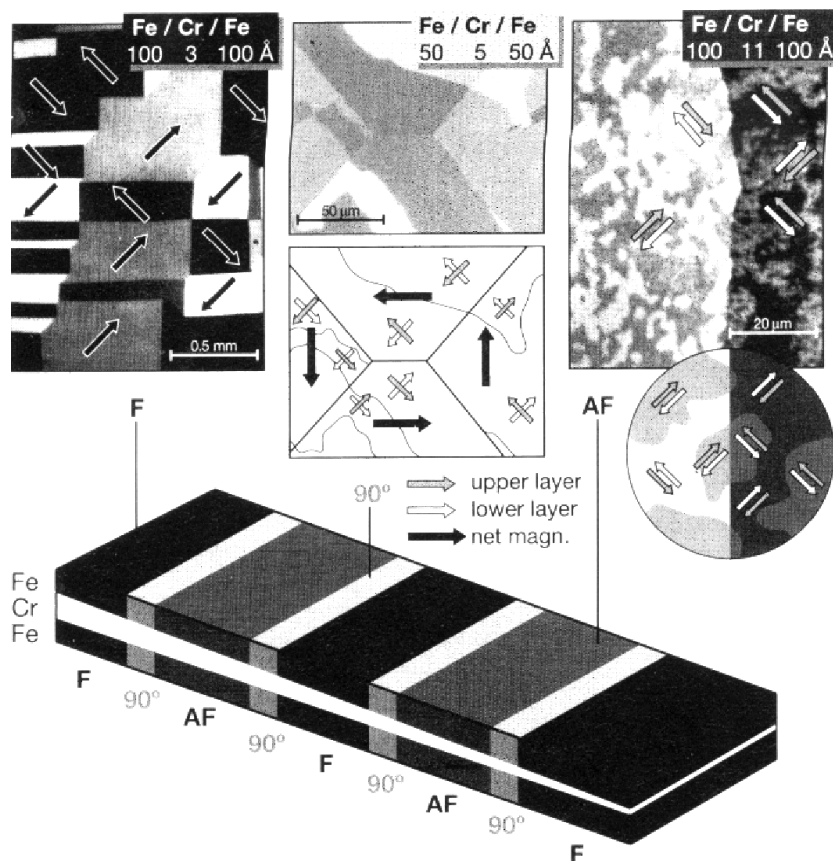


Figura 6.2 Diferite tipuri de cuplaje între straturi cu structuri magnetice de diferite dimensiuni [ALE 01]

În anul 1986 P. Grunberg a identificat și caracterizat structura superrețele în sisteme Fe/Cr. Transportul electronilor de-a lungul interfeței sistemului Fe/Cr rezultă printr-un cuplaj care acționează asupra magnetizației. Electronii majoritari și electronii



minoritari au coeficienți de reflexie diferiți la nivelul interfeței. Tipul de cuplaj depinde de raportul coeficienților de reflexie a electronilor la interfață [ALE 01].

Prima evidențiere a efectului Magnetorezistiv Gigant a fost făcută de către Baibich în anul 1988 descoperită în multistraturi Fe/Cr care prezentau un cuplaj de tipul anit-feromagnetic (CAF). În figura 6.3 și 6.4 sunt reprezentate curba rezistivității în funcție de câmpul magnetic aplicat asupra multistraturilor de Fe/Cr și curba variației relative a rezistenței funcție de câmpul magnetic exterior aplicat straturilor de Fe/Cr [ALE 01].

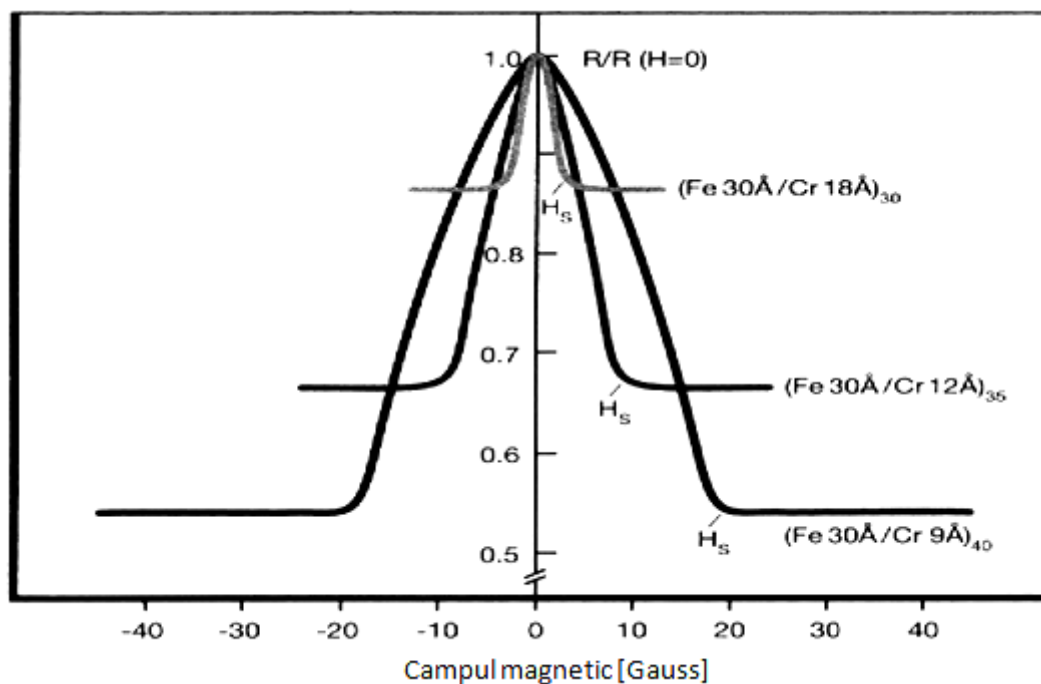


Figura 6.3 Rezistivitatea în funcție de câmpul magnetic aplicat multistraturilor de Fe/Cr [ALE 01]

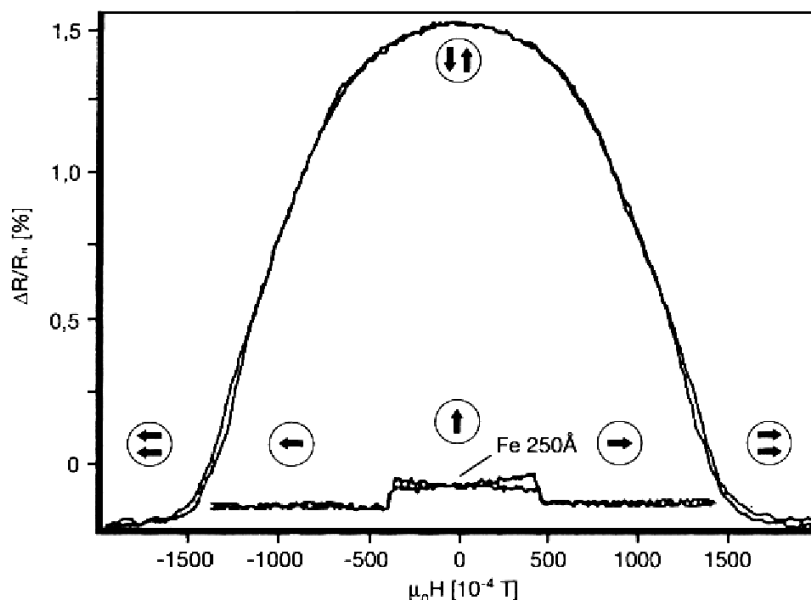


Figura 6.4 Modificarea relativă a rezistenței electrice în funcție de câmpul magnetic aplicat sistemului Fe/Cr [ALE 01]

Efectul Magnetorezistiv Gigant apare în sistemele multistrat alcătuite din două sau mai multe straturi din material feromagnetic (Ni, Fe sau Co) [CHI 02], separate de un strat

de aproximativ 1nm din material ne-magnetic (exemplu Cr). Experimental s-a demonstrat ca rezistența electrică a sistemului este mai mare în cazul anti-paralel [CHI 02].

Efectul Magnetorezistiv Gigant se datorează rezistivităților diferite în cazul canalului de electroni cu spinii orientați în sus față de canalul de electroni cu spinii orientați în jos.

## 6.2. Principiul de funcționare a noului tip propus de supercondensator

Noul dispozitiv de stocare a energiei electrice, propus sub numele de Spinning Supercapacitors, este alcătuit din două straturi din materiale cu proprietăți feromagnetice, un separator NM și doi colectori. Aceste straturi feromagnetice pot fi realizate prin tehnica numită "electrospinning" care permite obținerea unor dimensiuni reduse (de ordinul nano-metrilor) și este utilizată cu succes la obținerea straturilor piezoelectrice incluzând și straturile de tip feromagnetic [ZEX 11].

În figura 6.5 (a) este reprezentată schematic structura unui sistem de două straturi feromagnetice ai căror vectori magnetizație sunt orientați anti-paralel iar în figura 6.5 (b) este reprezentat un sistem ai căror vectori magnetizație sunt orientați paralel.

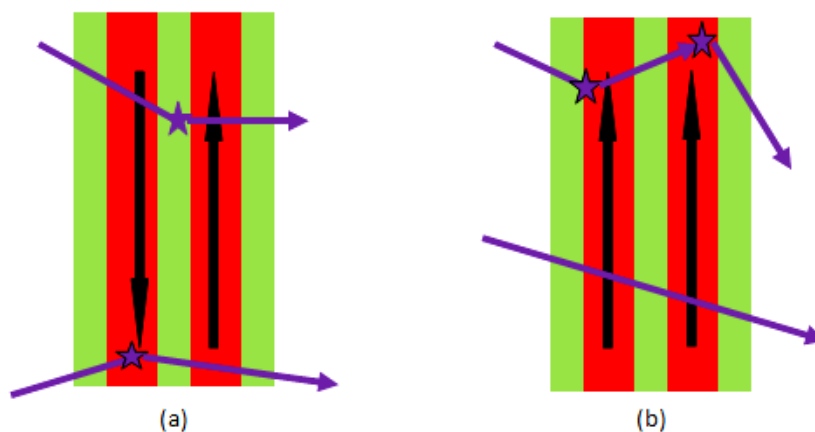


Figura 6.55 Sistem multistrat din material feromagnetic cu magnetizațiile orientate (a) anti-paralel și (b) paralel

În cazul (a) din figura 6.5 nu există "un canal de spin particular" care să aibă o rezistivitate redusă. În acest caz cele două canale de spini orientați în sus și spini orientați în jos au aceeași rezistivitate datorită orientării momentelor magnetice rezultante din FM1 și FM2 [CHI 02].

Canalul de electroni care au spinii orientați în jos va prezenta o rezistență mai mare la trecerea prin FM1 și o rezistență mai mică la trecerea prin FM2. Canalul de electroni care au spinii orientați în sus va avea o rezistență mai mică la trecerea prin stratul feromagnetic FM1 și o rezistență mai mare la trecerea prin stratul FM2. Global, în sistemul prezentat în figura 6.5 (a) nu există transfer de electroni (penetrare cu electroni) între cele două capete ale sistemului. Astfel sarcina electrică alcătuită din electronii cu spinii orientați în jos care încearcă să "penetreze" sistemul prin stratul FM1 se va acumula pe suprafață (la interfață) primului strat feromagnetic. Electronii care au spinii orientați în jos ajung în interiorul sistemului prin penetrarea stratului FM2 și se acumulează la interfața stratului FM1. În cazul canalului de electronii cu spinii orientați în sus vor reuși să între în sistem prin stratul feromagnetic FM1 însă se vor acumula la interfața stratului FM2. În acest caz toți electronii indiferent de orientarea spinilor, ajung să rămână "blocați" fie la interfața primului strat feromagnetic FM1 fie la interfața stratului FM2.

Procesul de stocare a sarcinii electrice în cazul prezentat în figura 6.5 (a) este un proces pur electrostatic. Capacitatea  $C$  de stocare a energiei electrice în dispozitivul de stocare propus este direct proporțională cu aria straturilor FM1 și FM2.

În figura 6.5 (b) este prezentat cazul în care rezultanta momentelor magnetice din FM1 și FM2 are o aliniere paralelă. În acest caz canalul de electroni cu spinii orientați în jos este favorizat la trecerea prin sistem și numai canalul de electroni cu spinii orientați în sus (orientare paralelă față de vectorii magnetizare din FM1 și FM2) vor întâmpina o rezistență la trecerea prin cele două straturi. Această dispoziție a magnetizării din FM1 și FM2 favorizează trecerea curentului electric, rezistența totală în sistem fiind mult mai mică față de cazul din figura 6.5 (a).

În figura 6.6 sunt reprezentate cele două situații împreună cu rezistențele corespunzătoare fiecărui canal de electroni care traversează sistemul.

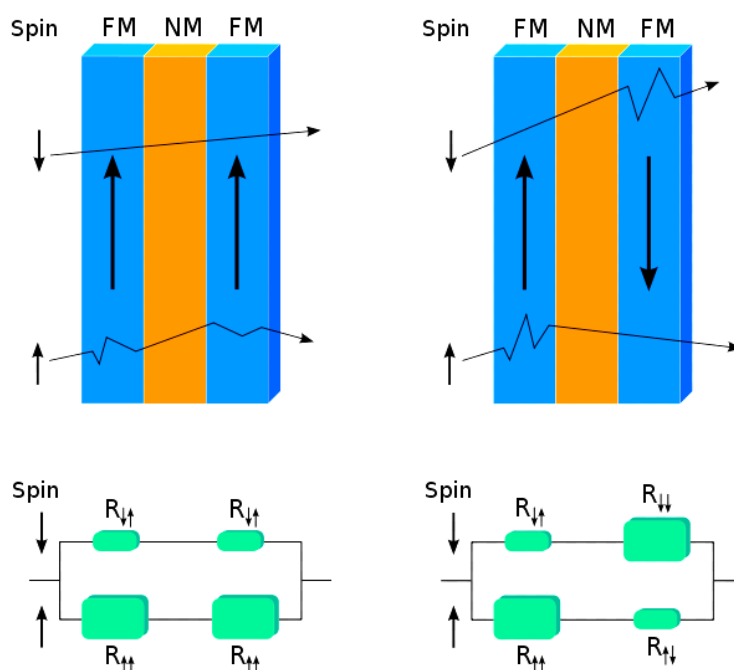


Figura 6.6 Rezistențele corespunzătoare fiecărui canal de electroni (electronii cu spinii orientați paralel și antiparalel față de rezultanta momentelor magnetice din cele două straturi FM)

Pentru un bun control al dispozitivului între faza de încărcare cu sarcină electrică și faza de descărcare a sarcinii, se pot folosi sisteme cu FM1 dintr-un material feromagnetic iar FM2 din alt material feromagnetic (sau aliaj feromagnetic). Astfel rezultanta momentelor magnetice a statului FM1 să rămână fixă la aplicarea unui câmp magnetic exterior pe când vectorul rezultantei momentelor magnetice din FM2 să-și modifice orientarea la aplicarea câmpului magnetic exterior de aceeași valoare. Astfel se poate obține un dispozitiv de stocare a energiei electrice în care regimurile de încărcare, respectiv descărcare, cu sarcină electrică să fie controlate prin aplicarea unui câmp magnetic exterior.

### 6.3. Avantajele oferite de noul tip de supercondensator de tip spinning

Unul dintre marile avantaje ale dispozitivului de stocare de tip spinning îl reprezintă posibilitatea controlului prin aplicarea unui câmp magnetic exterior între faza de încărcare și descărcare cu sarcină electrică a dispozitivului. Se știe ca unul dintre marile dezavantaje ale dispozitivelor de stocare a energiei electrice este autodescărcarea în timp. Prin noua tehnologie propusă timpul de autodescărcare se va mări foarte mult iar printr-un control bun a materialelor utilizate în construcția lui procesul de autodescărcare

se poate minimiza până la dispariție. Datorită acestui lucru, noul dispozitiv de stocare propus se încadrează în clasa dispozitivelor de stocare a energiei electrice pe termen lung.

Un alt dezavantaj al tehnologiilor de stocare pe termen lung îl reprezintă densitatea de putere mică într-un timp scurt. Acest lucru se datorează însuși proceselor prin care are loc descărcarea dispozitivului (de exemplu în cazul bateriilor se datorează proceselor chimice care au loc în interiorul lui și care necesită un timp mai mare). Noul dispozitiv de stocare propus în această teză oferă posibilitatea utilizării lui cu succes în aplicațiile de putere. Principiul de funcționare a supercondensatorului de tip spinning permite obținerea unui vârf de putere în momentul descărcării.

Datorită noilor tehnologii existente (de exemplu tehnologia de tip spinning de realizare a nano-straturilor [ZEX 11] sau prin tehnologia de electro-depozitare [LUP 10]) se pot obține electrozi poroși din materiale feromagnetice rezultând o arie de sute și chiar mii de metri pătrați pe electrod. Tehnologia de încărcare cu sarcină electrică a acestui dispozitiv fiind una de tip electrostatic, capacitatea de stocare este direct proporțională cu aria electrozilor (straturile FM), rezultând astfel o capacitate de stocare elevată. Totodată, dimensiunile supercondensatorului de tip spinning rămân foarte mici în comparație cu alte dispozitive de stocare pe termen lung.

## 6.4. Concluzii

La baza funcționării supercondensatorului de tip spinning se află fizica materialelor și teoria spinilor electronilor. Efectul Magnetorezistiv Gigant evidențiat în 1988 de către Baibich în sisteme multistrat Fe/Cr se afla la baza principiului de funcționare a noului dispozitiv propus.

Supercondensatorul de tip spinning se situează în clasa sistemelor de stocare pe termen lung iar procesul de încărcare cu sarcină electrică a dispozitivului este unul pur electrostatic.

Noul dispozitiv aduce numeroase avantaje în comparație cu sistemele de stocare pe termen lung existente la ora actuală. Aceste avantaje constau în:

- Posibilitatea unui bun control al funcționării dispozitivului din exterior, prin aplicarea unui câmp magnetic;
- Sarcina electrică stocată, rămâne în interiorul dispozitivului un timp infinit, teoretic, până în momentul în care se acționează din exterior cu un câmp magnetic asupra sistemului. Procesul de autodescărcare minimizat;
- Noua tehnologie propusă permite obținerea vârfurilor de putere în momentul descărcării dispozitivului. Densitatea de putere ridicată în comparație cu alte tehnologii de stocare a sarcinii electrice pe termen lung existente la ora actuală;
- Capacitatea de stocare este direct proporțională cu aria electrozilor (straturilor FM). Prin utilizarea noilor tehnologii de realizare a nano-straturilor se pot obține electrozi poroși cu o arie a suprafeței foarte mare, rezultând o capacitate de stocare elevată.

Tehnologia propusă deschide noi direcții de cercetare în sectorul stocării energiei electrice pe termen lung. Pentru obținerea unei capacități de stocare de sute și mii de Farazi se evaluează posibilitatea realizării unui dispozitiv cu următoarea construcție:

- Doi colectori;
- Doi electrozi poroși (nano-straturi feromagnetice);
- Separator NM cu o structură poroasă (burete);
- Soluție electrolitică.

În tipul de construcție propus mai sus a supercondensatorului de tip spinning se poate obține o capacitate în strat dublu asemănătoare EDLC-urilor. Astfel valoarea capacității globale pe sistem se mărește.

## **BIBLIOGRAFIE**

- [ALE 01] - Alexey Dick, Giant Magnetoresistance, Fritz-Haber Institut der MPG Berlin, 2001
  
- [CHI 02] - Chi Wah Leung, Metallic magnetic heterostructures, A dissertation submitted for the Doctor of Philosophy degree în the University of Cambridge, December 2002
  
- [LUP 10] - Lupu Nicoleta, Electrodeposited nanowires and their applications, Intech ISBN 978-953-7619-88-6, 2010
  
- [ZEX 11] - Zexuan Dong, Scott J.Kennedy, Yiquan Wu, Electrospinning materials for energy-related applications and devices”, Journal of Power Sources 196, pg.4886-4904, 2011

## Concluzii generale

În urma studiului amplu realizat din informații recente privind piața mondială a energiei, se poate afirma că datorită noilor politici adoptate în sectorul energiei, până în anul 2020 va exista o avalanșă de investiții în energii regenerabile. Aceste investiții vor avea ca țintă și îmbunătățirea eficienței energetice în transport și industrie, sector care nu a prezentat un mare interes până acum cațiva ani.

Deși de-a lungul timpului tehnologiile energiilor curate au fost testate și implementate pe scară largă, ele reprezintă în continuare un domeniu de cercetare deschis. Câteva din marile dezavantaje a tehnologiilor curate, precum calitatea redusă a energiei electrice, imposibilitatea funcționării pe toată perioada anului (de exemplu panourile fotovoltaice și eolienele), pot fi evitate prin utilizarea sistemelor de stocare a energiei.

Unele dintre marile avantaje ale sistemelor de stocare a energiei sunt: îmbunătățirea flexibilității pentru operatorii de rețea, pot crește securitatea energetică națională și reduce impactul negativ asupra mediului.

Supercondensatorii sunt folosiți cu succes în aplicații de putere deoarece au o densitate de energie ridicată și o densitate de putere la fel de crescută. Câteva dintre aplicațiile supercondensatorilor sunt: oferă soluții de back-up pentru rețelele electrice locale și izolate, pot fi utilizate ca surse portabile de energie datorită dimensiunilor reduse, utilizate în industria automobilelor electrice și hibride datorită funcționării într-un interval larg de temperatură etc.

Principalele avantaje ale supercondensatorilor față de alte sisteme de stocare comercializate la ora actuală sunt:

- densitate de energie mare;
- densitate de putere mare;
- timp de încărcare/descărcare scurt;
- dimensiuni reduse;
- funcționează în intervale mari de temperatură;
- mentenanță redusă;
- ciclul de viață foarte lung (comparativ cu bateriile).

Dezavantajele supercondensatorilor sunt:

- tensiune mică (aproximativ 2,7 V /supercondensator);
- costuri ridicate pentru fabricarea dispozitivelor.

Cu timpul ce tehnologiile materialelor nano-structurate au evoluat costul de producție al supercondensatorilor a scăzut. În cazul aplicațiilor în care este necesară o valoare ridicată a tensiunii se pot folosi module de supercondensatori prin inserierea acestora. Pentru aplicațiile în care capacitatea de stocare este un factor principal se pot folosi module de supercondensatori în conexiune paralelă.

În funcție de principiul fizic de funcționare, construcția lor și procesele fizice și/sau chimice care au loc în interiorul lor, supercondensatorii se pot grupa în trei clase, și anume:

- EDLC-uri;
- PC-uri;
- HEC-uri.

Ca și materiale utilizate în construcția electrozilor poroși se folosesc materiale de tip nanostructurate. Electroliul poate fi o soluție lichidă sau polimer (plastic sau gel) și ca separator se utilizează o membrană poroasă izolatoare din punct de vedere electric (plastic, polipropilena, celgard sau hârtie din celuloză cu fibre polimerice).

În capitolul patru al acestei teze este propus modelul de reacție al supercondensatorului într-un circuit electric. Acest model vine pentru a simplifica modelele comportamentale ideale existente în literatura de specialitate. Modelul de reacție se poate

utiliza cu succes în aplicațiile rapide și în ipotezele descrise în teză. Importanța simplificării modelului comportamental propus de Zubieta se justifică în cadrul aplicațiilor în care comportamentul ideal al supercondensatorului nu se manifestă.

Modelul de reacție într-un circuit electric al supercondensatorului este alcătuit din:

- Un condensator a cărui capacitate totală înglobează capacitățile specifice proceselor care au loc în interiorul lui (stocarea sarcinii electrice în dublu strat electric, în interiorul volumului electrozilor, pseudo-capacitatea și procesul de redistribuție a sarcinilor electrice după câteva minute de la prima excitație);
- O rezistență serie care depinde de caracteristicile materialelor utilizate în construcția lui.

Deși modelul de reacție al supercondensatorului nu este fidel comportamentului ideal al acestui dispozitiv, el se poate utiliza în simulările în care este necesară dimensionarea sistemului de stocare propus pentru a fi utilizat în anumite aplicații (vezi capitolul 5, aplicația reducerii golurilor de tensiune cu ajutorul supercondensatorilor).

Indicatorii de calitate a energiei electrice pot fi îmbunătățiți prin utilizarea sistemelor de stocare a energiei și acest lucru este susținut de simulările realizate în Matlab/SimPowerSystems și prezentate în capitolul cinci din această teză. În urma studiului realizat se poate afirma că sistemele de stocare pe termen scurt pot îmbunătăți stabilitatea micro-rețelelor electrice (rețea electrică cu o instabilitate ridicată, în special când sunt utilizate surse regenerabile de energie).

În capitolul cinci s-a arătat că prin utilizarea unui filtru activ în construcția căruia există module de supercondensatori de tip EDLC este posibilă reducerea golurilor de tensiune apărute în urma conectării unei sarcinii foarte mari la rețea. Am făcut simulări cu diferite perioade de conectare a sarcinii, de la 20 ms până la 1 s. Rezultatele simulărilor indică o reducere a golurilor de tensiune cu lungimea de o perioadă prin utilizarea a doua module EDLC, patru module EDLC pentru un timp de conectare a sarcinii de la două până la 18 perioade, șase module EDLC pentru reducerea golurilor de tensiune cu lungimi între 18 perioade și 30 perioade etc. Cea mai bună rezultat a fost obținut prin utilizarea a patru module EDLC pentru o conectare de două perioade a sarcinii la rețea. În acest caz tensiunea scade până la valoarea de 300V ceea ce înseamnă o variație a tensiune de numai 7,6%.

Rezultatele simulărilor pentru aplicația reducerii golurilor de tensiune cu ajutorul supercondensatorilor sunt prezentate în anexe (Anexa 2-Anexa 19).

La finalul acestei teze se deschide o nouă direcție de cercetare în domeniul tehnologiilor de fabricare a supercondensatorilor.

La baza funcționării noului dispozitiv, propus în această teză sub numele de supercondensatorului de tip spinning, se află fizica materialelor și teoria spinilor electronilor. Efectul Magneto-rezistiv Gigant evidențiat în 1988 de către Baibich în sistemele multistrat Fe/Cr se află la baza principiului de funcționare a noului dispozitiv propus.

Supercondensatorul de tip spinning se situează în clasa sistemelor de stocare pe termen lung iar procesul de încărcare cu sarcini electrice a dispozitivului este unul pur electrostatic.

Noul dispozitiv aduce numeroase avantaje în comparație cu sistemele de stocare pe termen lung existente la ora actuală. Aceste avantaje constau în:

- Posibilitatea unui bun control al funcționării dispozitivului din exterior, prin aplicarea unui câmp magnetic;
- Sarcina electrică stocată, rămâne în interiorul dispozitivului un timp infinit, teoretic, până în momentul în care se acționează din exterior cu un câmp magnetic asupra sistemului. Procesul de autodescărcare minimizat;
- Noua tehnologie propusă permite obținerea vârfurilor de putere în momentul descărcării dispozitivului. Densitatea de putere ridicată în comparație cu alte tehnologii de stocare a sarcinii electrice pe termen lung existente la ora actuală;

- Capacitatea de stocare este direct proporțională cu aria electrozilor (straturilor FM). Prin utilizarea noilor tehnologii de realizare a nano-straturilor se pot obține electrozi poroși cu o arie a suprafeței foarte mare, rezultând o capacitate de stocare elevată.

Tehnologia propusă deschide noi direcții de cercetare în sectorul stocării energiei electrice pe termen lung. Pentru obținerea unei capacități de stocare de sute și mii de Farazi se evaluează posibilitatea realizării unui dispozitiv cu următoarea construcție:

- ✓ Doi colectori;
- ✓ Doi electrozi poroși (nano-straturi feromagnetice);
- ✓ Separator NM cu o structură poroasă (burete);
- ✓ Electrolit.

Sau:

- ✓ Doi colectori;
- ✓ Doi electrozi poroși (nano-straturi feromagnetice);
- ✓ Separator NM.



## Lista lucrărilor publicate și a conferințelor

Gelu GURGUIATU, Ciprian BALANUTA, Emil ROSU, Toader MUNTEANU, Mariana DUMITRESCU, **Elena RADUCAN**, "Advanced active power filter to improve power quality" International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics & Electromotion Joint Conference 08-10 September 2011 İstanbul, Turkey, IEEE Proceedings – lucrare acceptată.

**Raducan Elena**, Moraru Luminita, Gurguiatu Gelu, „The transiente stage-Charging of the supercapacitors”, Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Mathematics, Physics, Theoretical, Mechanics, Fascicle II, Year III (XXXIV), pp.81-87, 2011

**Elena Raducan**, Luminita Moraru, „Energy storage systems”, Journal of Science and Arts, Year 11, No.1, pp.103-108, 2011

**Raducan Elena**, Moraru Luminita, Gurguiatu Gelu, „Fabrication of supercapacitors”, Annals of „Dunarea de Jos”, University of Galati, Mathematics, Physics, Theoretical mechanics, Fascicle II, Year II (XXXIII), pp.141-144, 2010

**Raducan Elena**, Moraru Luminita, „The role of supercapacitors in power electronic systems”, Annals of „Dunarea de Jos”, University of Galati, Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics, Fascicle II, Year I (XXXII) 2009

Moraru Luminita, **Raducan Elena**, “ New energy storage device. Supercapacitors”, Annals of „Dunarea de Jos”, University of Galati, Mathematics, Physics, Chemistry, Informatics, Fascicle II, Year I (XXXII), 2009

**Elena Raducan**, Luminita Moraru, Gelu Gurguiatu, Cristian Nichita, ”Impact of energy storage systems on clean industry”, Collegium Geographicum 8, Special Edition, Abel Publishing House, ISSN 2065-3859, pg. 131-135, 2011.

**Raducan Elena**, Moraru Luminita, Gurguiatu Gelu, „Importance of storage systems in developing micro-grids and smart technologies”, The 9<sup>th</sup> International Conferences OPROTEH, 24-26 May, 2011, Bacau, Romania

**Raducan Elena**, Moraru Luminita, Gurguiatu Gelu, Nichita Cristian, “Importance of micro-grid development for renewable energy market”, BENA, Environmental Capacity Building, 11-13 November, Romania, ECB-2011 – lucrare acceptata

Moraru Luminita, **Raducan Elena**, Gurguiatu Gelu, Nichita Cristian, “Impact of renewable energy on European energy market”, BENA, Environmental Capacity Building, 11-13 November, Romania, ECB-2011 – lucrare acceptata

Gurguiatu Gelu, Balanuta Ciprian, **Raducan Elena**, Rosu Emil, Munteanu Toader, “Renewable energy capitalization using active power filters”, BENA, Environmental Capacity Building, 11-13 November, Romania, ECB-2011- lucrare acceptata

**E.Raducan** , M. Chiselev, L.Moraru-"Supercapacitors beyond common capacitors", Euromat, 7-10 septembrie, 2009, Glasgow, Scotia

**Raducan Elena**, Moraru Luminita, “ The role of pseudocapacitance on energy storage mechanism met on supercapacitors” International Balkan Workshop on Applied Physics, 7 iulie 2009, Constanta

**E.Raducan**, L.Moraru, G.Gurguiatu, “Reducing the voltage sags using supercapacitors” , Physics Conference TIM-10, 25-27 Noiembrie, 2010 Timisoara, Romania

**Elena Raducan**, Luminita Moraru, “Materials used on supercapacitors”, Conferinta Nationala de Fizica, CNF 2010, Iasi, 23-25 Septembrie, 2010, Romania

Gurguiatu Gelu, Rosu Emil Mina, Munteanu Toader, Balanuta Ciprian, **Raducan Elena**, „Active power filters utilisation to increase electrical consumption efficiency” FOREN 2010, 13-17 Iunie Neptun-Olimp, Romania, <http://www.cnr-cme.ro/foren2010/neptun.html>

**Elena Raducan**, Gelu Gurguiatu, Luminita Moraru ”Energy storage devices. Supercapacitors” FOREN 2010, 13-17 Iunie Neptun-Olimp, Romania, <http://www.cnr-cme.ro/foren2010/neptun.html>