

# UTILIZARI ALE SUPERCAPACITORILOR IN TRACTIUNEA ELECTRICA URBANA

Catalin GOIA

*Cercetator stiintific SC ICPE-SAERP SA BUCURESTI,  
Doctorand Facultatea de Electrotehnica, Universitatea Politehnica Bucuresti  
Tel /Fax : 021 346.72.63 e-mail : c\_goia@hotmail.com*

*Electrochemical double-layer capacitors, also known as supercapacitors or ultracapacitors, are electrical storage devices, which have a relatively high energy storage density simultaneously with a high power density. Recent developments in basic technology, materials and manufacturability have made supercapacitors an imperative tool for shortterm energy storage in power electronics. With much higher energy density than today's capacitors and none of the problems associated with conventional battery technology, supercapacitors give an access to new power electronic and industrial storage applications.*

## 1. CONSIDERATII DE PRINCIPIU

Energia de alimentare cu joasa tensiune a vehiculelor electrice precum troleibuzele, tramvaiele si ramele de metrou din transportul urban, este preluata din statii de redresare conectate la reseaua de medie tensiune.

Datorita tensiunii de nivel scazut de 500 pana la 700Vcc acest tip de sisteme electrice pot avea caderi de tensiune inacceptabile.

Aceste caderi de tensiune sunt deranjante pentru sistemele actuale de actionare care necesita pe partea de curent continuu a circuitului de actionare prezenta unei tensiuni cu un anumit nivel de toleranta, de variatie.

O solutie este franarea recuperativa a vehiculelor din tractiunea urbana , solutie care este prezenta astazi la majoritatea tipurilor noi de actionari dar care nu este compatibila cu substitutiile de alimentare care nu au capacitatea de stocare a acestei energii. Astfel o parte din aceasta energie recuperata se pierde prin disipare rezistiva.

Recuperarea acestei energii se poate realiza prin tehnologii de stocare , cu un impact semnificativ asupra costurilor de operare. Pentru compensarea variatiilor de tensiune la capat de linie sau in diversele puncte ale retelei, tehnica stocarii energiei apare astazi ca o solutie realizabila.

Supercapacitorii reprezinta o solutie in domeniul stocarii energiei electrice si isi gasesc locul in aplicatii unde este dorita stocarea energiei sau pot ajuta la socurile scurte de putere cerute din retelele de distributie. Bateria de supercapacitori trebuie doar sa limiteze variatiile de tensiune.

Prima aplicatie a fost realizata si instalata la metroul din Londra si apoi in New York City, folosind stocarea inertiala prin volanti. Tehnologia stocarii energiei in supercapacitori a fost implementata pentru inceput in orasul Köln din Germania.

In comparatie cu condensatorii clasici aceste noi componente permit o mai mare densitate de energie impreuna cu o densitate mare de putere. Chiar daca densitatea de energie nu este comparabila cu a acumulatorilor electrochimici, posibilitatea stocarii unei cantitati de energie de-a lungul unei perioade de timp este compatibila cu multe cerinte industriale.

Un important parametru al acestor supercapacitori este tensiunea lor de lucru care este de 2,5V. Acest lucru necesita o conectare serie si paralel a unui numar mare de elemente pentru a putea atinge puterea electrica ceruta.

## 2. EXEMPLU DE UTILIZARE A SUPERCAPACITORI LA UN CAPAT DE LINIE PENTRU O RETEA DE TROLEIBUZ.

In figura 1 este aratata structura clasica a unei retele de troleibuz in apropierea capatului de linie sau foarte departe de statia de alimentare cu tensiune a retelei de contact si se evidentieaza o interfata cu o baterie de supercapacitori care compenseaza caderile de tensiune.

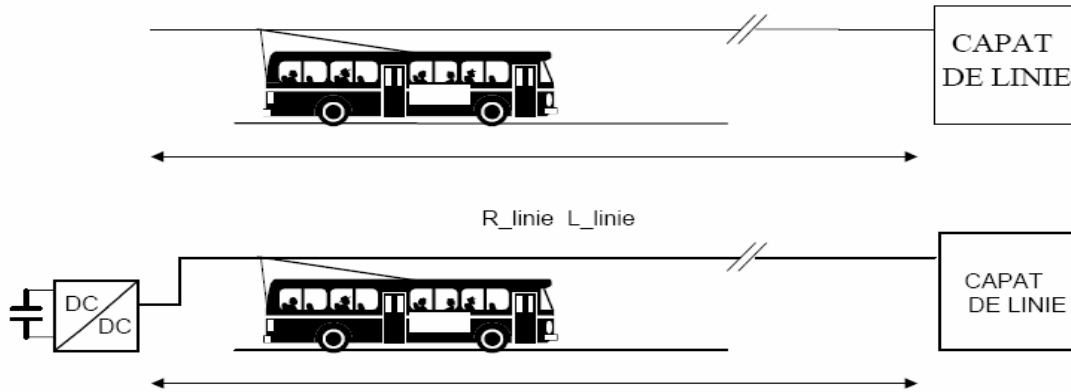


Figura 1

Caderile de tensiune tipice sunt in jur de 350V instantaneu pentru o tensiune nominala de 700V(figura 2). Acest lucru se poate intampla datorita prezentei a doua sau mai multe troleibuze la cap de linie, fapt datorat unui blocaj aparut in trafic sau cresterii parcului auto.

Pentru o buna functionare este necesara stabilizarea tensiunii in circuitul de curent continuu al actionarii troleibuzului.

Caderile de tensiune ale retelei sunt practic neglijabile cand autobuzul pleaca din ultima statie(ultimul punct de alimentare) si devin importante cand vehiculul ajunge la capatul liniei.

In sistemul avand in componenta substatie de stocare a energiei cu supercapacitori nivelul de tensiune este tinut practic constant. Bateria de condensatori este mult solicitata cand sarcina ce trebuie alimentata atinge nivelul puterii substatiei de supercapacitori. Curentul ce solicita bateria este bidirectional corespunzand cu acceleratia sau franarea autovehiculului (figura 3).

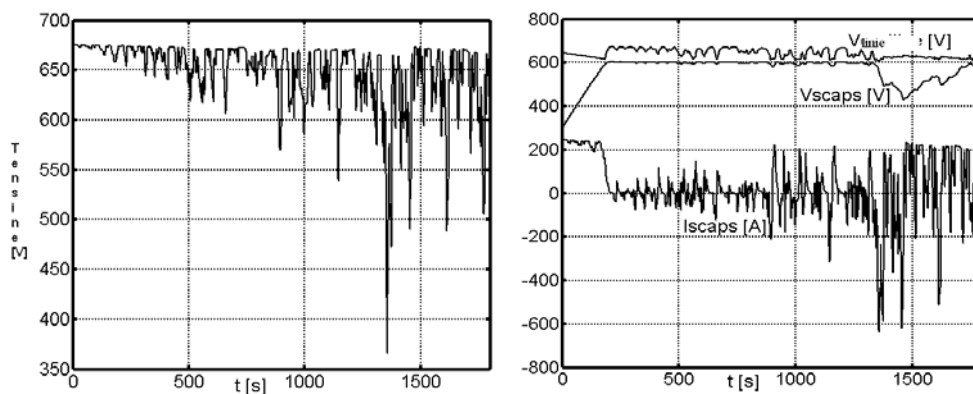


Fig.2. Tensiunea rețelei fara SCAP      Fig.3. Tensiunea rețelei cu substatie de SCAP

### 3. DIMENSIONARE UNEI BATERII DE SUPERCAPACITORI

Energia stocata într-un supercapacitor este  $W = \frac{1}{2}CU_c^2$  (1), unde  $W$  este energia,  $C$  capacitatea și  $U_c$  tensiunea la bornele supercapacitorului. Tipic tensiunea este 2,5V. A fost demonstrat faptul că tensiunea la bornele supercapacitorului influențează capacitatea acestuia, deci capacitatea nu este constantă, depinde de tensiune.

Acest lucru duce la o creștere deloc neglijabilă a capacității când tensiunea la borne este maximă. În continuare vom considera capacitatea constantă indiferent de tensiunea  $U_c$ .

Pentru a folosi întreaga energie stocată, tensiunea la borne va fi scăzută la valoarea minimă permisă. Acest lucru nu este posibil deoarece curentul furnizat de supercapacitor ar fi infinit pentru un nivel de putere furnizat. Din acest motiv nivelul minim al tensiunii de descărcare trebuie limitat. Ca o consecință energia stocată în dispozitiv nu va fi folosită toată. Definim următorii parametri:  $U_m$ ,  $U_M$ ,  $d$ .

$U_m$  tensiunea minimă permisă la descărcare;  $U_M$  tensiunea maximă care definește încărcarea maximă a componentei;  $d = \frac{U_m}{U_M} \times 100[\%]$  (2)

Cu aceste considerații, energia pe care un supercapacitor o poate livra este

$$W_u = W_M \left[ 1 - \left( \frac{d}{100} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Cunoscând nivelul energiei folosite,  $W_u$ , numărul supercapacitorilor necesari se calculează astfel:

$$N_s = \frac{2W_u}{CU_M^2 \left[ 1 - \left( \frac{d}{100} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

#### 3.1 PUTEREA ȘI ENERGIA CERUTE

Pentru a putea proiecta o baterie de supercapacitori este necesar să cunoaștem trei parametri: capacitatea, nivelul minim al tensiunii de descărcare și valoarea energiei necesare.

În multe aplicații energia nu este definită și este dat doar profilul de putere, urmând ca apoi să se identifice energia necesară.

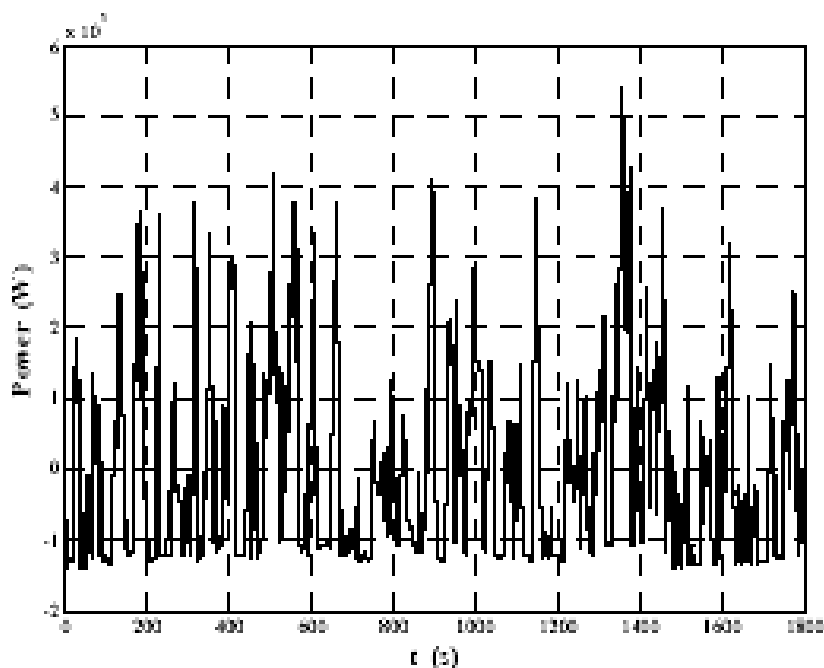


Figura 4 Diagrama puterii

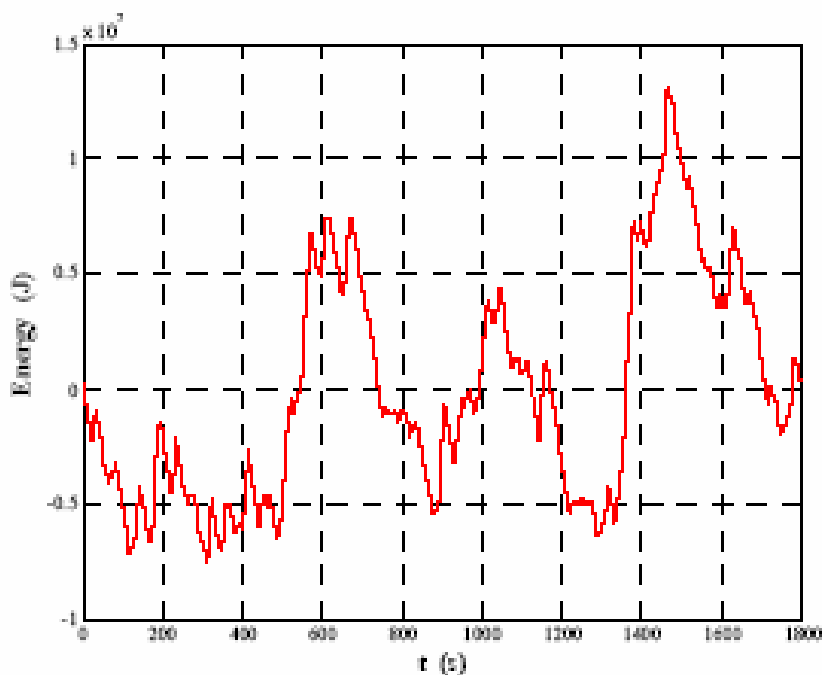


Figura 5 Diagrama energiei

Graficele prezentate sunt specifice unei anumite aplicatii. Dupa cum apare in grafic, puterea medie este 0W. Tinta acestei aplicatii este de a minimiza constrangerile in putere ale sursei de alimentare care ar trebui sa furnizeze doar o putere constanta. Toate fluctuatiile de putere trebuiesc asumate de catre bateria de supercapacitori. Profilul de putere afisat in diagrama este o consecinta a puterii cerute de o sarcina specifica, putere pe care trebuie sa o furnizeze supercapacitorii.

Din diagrama puterii prin integrare se obtine profilul energetic al aplicatiei. Se observa ca bateria de supercapacitori trebuie sa absoarba sau sa deabteze energie in functie de cererea de putere.

#### ATEE - 2004

Din diagrama energetica se observa ca intre inceputul si sfarsitul profilului de putere, bateria de supercapacitori trebuie sa stocazeze 195Wh si sa furnizeze 3,64kWh. Suma acestor doua energii defineste energia folositoare(utilizabila) care trebuie sa fie stocata de catre bateria de supercapacitori.

$$W_u = 0,195\text{kWh} + 3,64\text{kWh} = 3,835\text{kWh} = 13,8\text{MJ}.$$

Cunoscand necesarul de energie pe care trebuie sa-l livreze bateria de supercapacitori , cu ajutorul formulei ( 4) se calculeaza numarul supercapacitorilor.

Ns	d (%)	Volum ( m <sup>3</sup> )	Greutate (kg)	W (J)
3272	50	0,98	1308	17,47
3834	60	1,15	1533	20,47
4811	70	1,44	1924	25,69

Aceste rezultate sunt obtinute pentru  $C = 1800\text{F}$  ,  $W_u = 13,8\text{MJ}$  ,  $U_M = 2,5\text{V}$  .

Alegerea ratei de descarcare de 50% ,  $d = 50\%$  , conduce la un numar minim de condensatori fata de celelalte cazuri ale ratei de descarcare si asigura un procent de folosire al energiei utile de 75% din totalul energiei stocate. La polul opus avem pentru o rata de descarcare de 70% , un numar crescut de condensatori , cu 47% mai multi , si o folosire a energiei stocate doar de 51%.

Acest ultim caz conduce si la un pret ridicat al bateriei de supercapacitori si la o masa foarte mare.

Chiar daca bateria este supradimensionata ,  $d = 70\%$  , exista posibilitatea ca in cazul unui soc de sarcina care cere o energie mare, acest parametru  $d$  sa scada sub valoarea de 70%.

Chiar daca metoda prezentata pentru dimensionarea bateriei de supercapacitori conduce la necesitatea limitarii variatiei tensiunii la bornele supercapacitorilor trebuie luata in calcul eficienta energetica a acestor componente deoarece toata energia folosita(uzuala) nu poate fi transferata sarcinii, datorita rezistorului intern serie al supercapacitorului.

Acest lucru trebuie luat in considerare ca pierderi interne ce se produc in timpul descarcarii, cu scopul de a mari numarul supercapacitorilor pentru a asigura energia ceruta de sarcina.

Deasemenea are importanta si randamentul energetic si in timpul procesului de incarcare al bateriei de supercapacitori.

Cu alte cuvinte bateria de supercapacitori trebuie sa fie supradimensionata pentru a asigura necesarul de energie uzuala , luand in calcul si pierderile interne.

Se vor lua in calcul doua cazuri :

- Descarcare exponentiala deoarece o mare parte a producatorilor de supercapacitori folosesc aceasta metoda pentru a caracteriza componentele lor.
- Descarcare la curent constant deoarece curentul de descarcare al supercapacitorilor este intotdeauna controlat de convertorul de putere care este interfata intre bateria de supercapacitori si sarcina, si corespunde unui larg numar de aplicatii.

### 3.2. DESCARCARE EXPONENTIALA

În cele mai multe cazuri producătorii de supercapacitori folosesc acest tip de descarcare pentru a caracteriza randamentul componentelor chiar dacă această descarcare nu corespunde cu cazul real, unde curentul de descarcare este în general controlat de un convertor de putere.

Principiul descărcării exponențiale este prezentat în figura 6 și este constituit dintr-un condensator ideal  $C$  și un rezistor intern serie  $R_s$ .

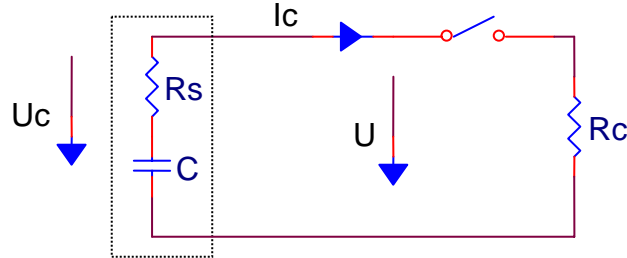


Figura.6 Descarcare exponențială

Este necesar prima dată să identificăm valoarea capacității  $C$  și a rezistorului  $R_s$ . Energia stocată în supercapacitor este dată de formula (1) iar descărcarea lui se face prin  $R_c$ . Raportul dintre energia disipată prin  $R_c$  și energia provenită de la capacatorul  $C$  reprezintă randamentul energetic al supercapacitorului în cazul descărcării exponențiale.

Trebuie să definim câteva ecuații ce sunt utile.

$$u_c = U_M e^{-\frac{t}{(R_s + R_c)C}} \quad (5)$$

Condensatorul va fi considerat descărcat atunci când tensiunea la bornele lui atinge minimul tensiunii stabilite prin rata de descărcare :

$$U_M \frac{d}{100} = U_M e^{-\frac{T_{ch}}{(R_s + R_c)C}} \quad (6)$$

Această relație definește durata de descărcare a supercapacitorului de la tensiunea  $U_M$  la minimul tensiunii  $U_M \frac{d}{100}$ ,

$$T_{ch} = -(R_s + R_c)C \ln \frac{d}{100} \quad (7)$$

Pentru a defini randamentul energetic, trebuie identificată energia disipată în rezistorul  $R_c$ .

$$P_{R_c} = R_c I_c^2 = \frac{R_c}{(R_s + R_c)^2} U_M^2 e^{-\frac{2t}{(R_s + R_c)C}} \quad (8)$$

Energia disipată în  $R_c$  se obține prin integrarea puterii în domeniul timp :

$$W_{R_c} = \int_0^{T_{ch}} P_{R_c} dt = W_M \frac{R_c}{R_s + R_c} \left[ 1 - \left( \frac{d}{100} \right)^2 \right] \quad (9)$$

In concluzie randamentul energetic al supercapacitorului in cazul descarcarii exponentiale de la valoarea tensiunii maxime  $U_M$  la valoarea minima  $U_M \frac{d}{100}$  este definit de raportul dintre energia disipata in rezistorul  $R_c$  si energia uzuala furnizata de capacitatea  $C$ , definita de ecuatia (3) :

$$\eta_r = \frac{W_{R_s}}{W_u} = \frac{R_c}{R_s + R_c} \quad (10)$$

Randamentul energetic variaza de la 100% ( $R_c \gg R_s$ ) la 0% ( $R_s \gg R_c$ )

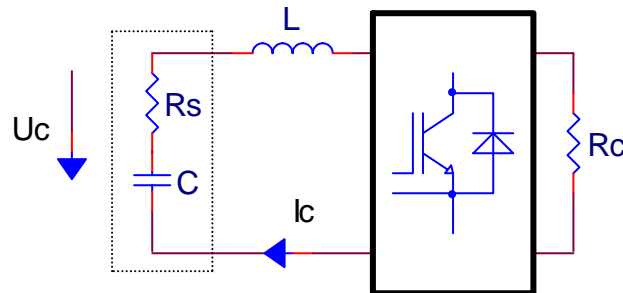
### 3.3 DESCARCARE LA CURENT CONTROLAT

Descarcarea la curent controlat a unui supercapacitor este mai aproape de realitate deoarece in cele mai multe cazuri un convertor de putere este asociat cu bateria de supercapacitori. Scopul este de a compensa variatia tensiunii de la bornele supercapacitorului in timpul descarcarii prin aplicarea unei tensiuni constante la bornele sarcinii. Ca rezultat , curentul de descarcare al supercapacitorului  $I_c$  este controlat. Se pot imagina profile variate de curenti pentru a se obtine profile diferite de descarcare ale puterii in functie de aplicatie. Dar cel mai general profil este cel al curentului constant caz in care profilul puterii este linear descrescator. Tensiunea la bornele  $R_c$  nu este constanta , ea este descrescatoare.

Ecuatiile de functionare in regimul de descarcare la curent constant sunt asemanatoare cu cele de la regimul de descarcare exponential.

Tensiunea la bonele condensatorului este :

$$U_c = U_M - \frac{1}{C} I_c t \quad (11)$$



**Figura 7** Descarcarea la curent controlat

Condensatorul va fi considerat descarcat cand tensiunea la bornele lui atinge valoarea minima definita ca nivel de descarcare :

$$U_M \frac{d}{100} = U_M - \frac{1}{C} i_c T_{ch} \quad (12)$$

Aceasta relatie ajuta la definirea timpului de descarcare al condensatorului de la tensiunea maxima  $U_M$  la valoarea minima  $U_M \frac{d}{100}$ ,

$$T_{ch} = C \frac{U_M}{i_c} \left( 1 - \frac{d}{100} \right) \quad (13)$$

Puterea disipata pe rezistenta interna a bateriei si energia corespunzatoare sunt :

$$P_{R_s} = R_s i_c^2 \quad (14)$$

$$W_{R_s} = \int_0^{T_{ch}} P_{R_s} dt = R_s C i_c U_M \left( 1 - \frac{d}{100} \right) \quad (15)$$

Ca rezultat , randamentul energetic al unui supercapacitor descarcat la curent constant este dat de egalitatile urmatoare, avand ca parametru fie curentul de descarcare fie durata descarcarii

$$\eta_i = \frac{W_u - W_{R_s}}{W_u} = 1 - 2R_s \frac{i_c}{U_M} \frac{100}{100 + d} = 1 - 2R_s C \frac{1}{T_{ch}} \frac{100 - d}{100 + d} \quad (16)$$

Randamentul variaza de la 100% pentru valori foarte reduse ale curentului de descarcare si durata mare de timp , pana la 0% pentru curenti mari si timpi foarte scazuti.

#### 4. CONCLUZII

Supercapacitorii sunt componente pentru stocarea energiei si ei presupun capacitati ridicate de la cativa farazi la mii de farazi. Exista doua aplicatii de baza a supercapacitorilor .

1.Folosirea lor ca sursa de energie de baza in fiecare aplicatie unde energia si puterea cerute sunt compatibile cu volumul si greutatea sistemului de stocare.

2.Folosirea lor ca buffer de energie, tampon de energie. Supercapacitorii in acest caz sunt considerati elemente de stocare cu o mare densitate de putere asociati cu o sursa de energie de baza(principala).

Supercapacitorii sunt o solutie viabila si fiabila pentru eliminarea caderilor de tensiune pe liniile de alimentare a transportului electric. Desi sunt necesari in numar mare in bateria de supercapacitori(mii de bucati) este important de comparat costurile unei astfel de instalatii in raport cu cele ale intretinerii unei retele neprotejate si cu cele ale costurilor energiei pierdute in rezistorii de franare.

#### 5. BIBLIOGRAFIE

- [1] M. B. Richardson, Flywheel energy storage system for traction applications, Internat. Conf. On Power Electronics, Machines and Drives, 2002, Conf Public No 487, pp. 275-279, ISSN 0537-9989
- [2] Pulsed power provision by high speed composite flywheel, Kelsall D.R., Pulsed Power 2000 (Digest No. 2000/053), IEE Symposium , 3-4.05.2000, London, UK, Page(s): 16/1 -16/5, INSPEC Acc. Nr. 6623246
- [3] SITRAS SES, Energy storage system for 750V DC Railway, Siemens Transportation Systems, Public. Nr A19100-V300-B276 and B275.
- [4] Hein Gerd, Successful Reduction of Energy Consumption thanks to a Capacitive Energy Storage Device in the Railway Network of the city of Köln, Institutskollokium, WS 2001/02, Elektrotechnisches Institut, Universität Karlsruhe 76 131 Karlsruhe, D.
- [5] A. Rufer, P. Barrade, Key Developments for Supercapacitive Energy Storage: Power Electronic Converters, Systems and Control, PCIM2001, International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality, June 19-21, Nuernberg, Germany, Conference proceedings pp. 17- 25, ISBN 3-928643-27-4
- [6] A. Rufer, P.Barrade, A Supercapacitor-Based Energy-Storage System for Elevators With Soft Commutated Interface, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 38, Nr. 5, Sept/October 2002, pp. 1151-1159.
- [7] P. Barrade, S. Pittet, A. Rufer, Energy storage system using a series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages, IPEC 2000 : International Power Electronics Conference, 3-7 april, Tokyo, Japan.