電気二重層キャパシタを用いた蓄電装置の課題と展望

解説

キーワード

電気二重層, キャパシタ, 蓄電, 電子回路, 二次電池

岡村 勉 夫

(株)岡村研究所

電気二重層キャパシタによる蓄電装置について ECS^(1,2)を例にして、その先の展開を専門的な角度から述べる。基礎的なことや位置づけ、情勢については本誌「学生のページ」⁽¹⁾に記したので参照して頂きたい。

1. 発想の出発点

人は ECS の技術を“常識の反対”と思えば分かりやすいという。これが本稿のキーワードかも知れない。

まず、キャパシタで二次電池に代る蓄電装置ができるはずだと考えた。その鍵はエネルギー密度で、それが一定の水準を超えないと他にどんな長所があっても実用価値が出ない。それを越えれば最良の二次電池を凌がなくても、他の長所で特徴を発揮できると見込んだ。

実現の方法も変わっていた。単なるキャパシタの改善では無理だと考え、図 1 のようにキャパシタに電子回路を組み合わせ、電子回路で解決できる問題は回路に任せて、キャパシタはエネルギー密度を増すことに集中した。

その結果、ECS はキャパシタ単独では性能が出ないが、電子回路と組み合わせて目的を達する方式となった。

2. キャパシタ充放電効率とその改善

世間には電気二重層キャパシタの内部抵抗の低減に没頭した研究は多く⁽³⁾、電気二重層キャパシタは内部抵抗が低いから充電制御が不要になる…」とした例もある。キャパシタの直列抵抗分は損失の原因なので、最優先でその低減を目指すのが常識であった。

2.1 高い内部抵抗と電流源による充放電

こゝでも ECS は逆方向へ進んだ。キャパシタの内部抵抗を低く作ろうとするとエネルギー密度も低下する。抵抗の大きなキャパシタは損失が大きそうだが、それは同じ電流を流した場合であり、使用条件が許す限りの最小電流で充放電すれば内部抵抗の高いキャパシタでも十分に高効率(文献⁽¹⁾図 5)となる。

その関係は静電容量 C 、内部抵抗 R とすると、時間 t で全容量を定電流充電した際の効率 p は式(1)、放電は式(2)で得られ、効率 70%以上で二式はほとんど重なる。

$$p = t / (2CR + t) \dots\dots(1) \quad p = (t - 2CR) / t \dots\dots(2)$$

上の関係は電気工学の計算⁽²⁾で導け特別なものではないが、その意味するところは電気二重層キャパシタ研究者にとって、コペルニクスの転回であったはずだ。それまで低抵抗化が最優先であった内部抵抗が高くてよいなら、エネルギー密度は何倍もの向上が可能となる。

なおキャパシタと定電圧源間での充放電は、内部抵抗が低くても効率は片道 50%となる⁽²⁾。これを改善する手段の一つは、充放電をスイッチングコンバータ「電流ポンプ」を通して出入する電力を電流源^(2,4)とすればよい。そこに(1,2)式を用い実用上許される最長時間、最小電流になるよう充放電電流を制御すると高効率が得られる。

電流ポンプはキャパシタに電流を出し入れするゴムホースのように使う。効率が 95%でも往復では 90%となり、特に広い電圧範囲、負荷変動範囲に渡り高効率にすることが不可欠だから、近年のパワーエレクトロニクスの進歩に格好の課題でもある。

2.2 バンク切換え

バンク切換え(文献⁽¹⁾図 4)と呼ぶ手法⁽²⁾も実用化された。キャパシタの充放電効率低下の原因はその端子電圧が大きく変わることにある。満充電では 2 個のキャパシタを並列にしてスタートし電圧が半分になったところで直列にすれば 1/4 電圧まで使っても合成電圧の変動幅は 1/2 ですむ。多段切換えにすると図 2 のように変動幅は小さく抑えられるから、充電器側あるいは負荷側につながる機器、たとえばモータードライバや交直変換装置の高効率化や軽量化がもたらされる。

2.2 バンク切換え

図 1 の構成をバンク切換え方式の 1 ブロックに適用する場合、二つの電流ポンプ(充電器および出力コンバータ)

図 1 の構成をバンク切換え方式の 1 ブロックに適用する場合、二つの電流ポンプ(充電器および出力コンバータ)

図1 新しい蓄電装置「ECS」の基本構成

図2 バンク切換え時の電圧変化 (0, 1, 4 段)

タ) がバンク切換えのスイッチで置き換わるので、数十 kW 以上の中～大型機ではコンバータの重量や体積、そして効率の改善効果も大きい。

3. キャパシタの直列接続問題の解決

直列にしたキャパシタの電圧配分の問題は、しばしば正確に評価されていない。

3.1 電圧配分の算定

静電容量 $C_1 \sim C_n$ 漏れ抵抗 $R_1 \sim R_n$ のキャパシタを直列接続して電圧 V に充電した図3のキャパシタ X の任意の時間の負担電圧 V_x は、定数 k ($0 \leq k \leq 1$) と置くと^(2,5),

$$V_x = \left(\frac{k \cdot R_x}{R_1 + \dots + R_n} + \frac{(1-k) \cdot \frac{1}{C_x}}{\frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_n}} \right) \cdot V \quad \dots\dots\dots (3)$$

この結果は電圧配分が、静電容量の逆数と、漏れ抵抗のバラツキの和になることを示す。キャパシタのバラツキとして静電容量 $\pm 5\%$ 、その温度と経時変化 $\pm 5\%$ 、漏れ抵抗 $\pm 10\%$ と見積もれば、使用電圧を約 70% にする必要があり、蓄電できる容量は 49% となる。

キャパシタを安全に直列にする方法では昔から均圧抵抗が知られており、電池では単電池を選別して容量を合わせている。だが漏れ電流の 10 倍を流す均圧抵抗をつないでも、静電容量の偏差は不変で 10 倍の漏れ電流と元の 10% のバラツキが残る。新品で静電容量を選別しても劣化が進むと容量が減ったセルほど高電圧を負うので「直列にしたキャパシタは劣化が早い」という現象を生じる。

3.2 初期化の考え方

ECS ではこの解決に「並列モニタ」と呼ぶ電子回路をキャパシタに並列に(図1)取り付ける。これも常識的には

図3 直列にしたキャパシタの電圧配分の計算

図4 並列モニタの一例 (2 コンパレータ式)

不均一なキャパシタの漏れ電流を均一にし、静電容量のバラツキを補い、全部のキャパシタをゼロ電圧レベルを基準にして働かせるべきであろう。だが ECS ではキャパシタの電圧をゼロレベルでなく「上に揃える」ことにした。以下の説明は文献⁽¹⁾図3 A,B,C を参照頂きたい。

並列モニタの動作はキャパシタの電圧初期化だと考えると分かりやすい。総ての単セルのスタート電圧を満充電電圧に揃え、そこを基準つまり初期化電圧として、以後の放電・充電サイクルを行う。

この方法の顕著な効果は、すべての単セルが漏れ電流や静電容量と無関係に満充電電圧まで充電されるのでエネルギーの利用率高い。キャパシタは一度初期化されるとその効果は特性が変わらない限り何サイクルもズレない。直列にした静電容量の小さなセル電圧は当然ながら深く、大きいセルは浅く放電するが、初期化電圧まで再充電されると全セルが等しい電圧に戻る。どのセルも最大電圧は等しく、これ以上の電圧は加わらない。

3.3 並列モニタの損失と発熱

キャパシタの初期化をいつ行うかは対象とする用途の動作により、図5の①電圧ゼロ、②満充電、③ハイブリッド電気自動車など中間電位に制御後の充放電に備える、④充電中、⑤放電中、の各種が選べる。②以外は電圧が低いところで行うほど電力損失は少ないが、満充電電圧でセル電圧が等しくなるよう狙って初期化するので、セルの静電容量が大きくばらついていると電圧の低い方式ほど遠くから狙うための誤差が大きくなる。

キャパシタの初期化は二次電池のセル容量を等化するのとは異なりサイクル毎に行う必要はない。また、使いながら少しずつ初期化、つまりキャパシタの電圧配分を修正していくことも可能である。

回生ブレーキから 100kW の電力で充電されると巨大な並列モニタが要ると心配する人がいた。それは大電流の充放電中は初期化は止めて、閑な時間を待てばよい。

初期化のバラツキも並列モニタから検出する。図4で全キャパシタから満充電信号 F を例えばワイヤード OR で取り出しておくと、総充電電圧が満充電電圧の直列セル数倍になったとき F が出れば初期化は完全である。

バラツキがあると、総充電電圧がこれより低いところ

図 5 並列モニタと初期化の場所

で F が出るので初期化の必要性を判定できる。これらの動作は充電器あるいは CMS (Capacitor Management System) が受け持つ。

4. キャパシタの現実と可能性

電子回路によって利用率や効率は改善されたが、回路にエネルギーを蓄えることはできないから、その先のエネルギー密度の向上はキャパシタにかかっている。

4.1 内部抵抗とエネルギー密度

図 6 に ECS 用電気二重層キャパシタの標準型⁽²⁾をエネルギー密度と、 ΩF で表した内部抵抗 ESR(effective series resistance)の関係で表した。下の放電時間とは定電流で放電したとき 95%の効率になる時間である。たとえば PS-L 形は内部抵抗が $2\Omega F$ で 1 分間(二次電池の 60C)で全放電する放電率で 95%の効率となる。キャパシタの容量当たりの内部抵抗は二次電池より一桁以上小さく化学反応の時間を必要としないため、図の左へ行くほど二次電池に対して有利となる。

右上がりな 2 本の target 線から分かるように、内部抵抗を犠牲にするとエネルギー密度が大きくなる。ただし、内部抵抗を増せば自然にエネルギー密度が増えるわけではなく、配線や電極のスペースを切りつめ活性炭も最適なものを選び、それぞれの条件でギリギリの設計をすると図の程度の差が出るという意味である。

図に二次電池(Li-ion, Pb acid)のおよその特性を書き込んだ。キャパシタのエネルギー密度が電池と同じグラフ上に描けるとはECS以前には考えられなかった。二次電池の特性はエネルギー密度 40Wh/kg 等は 100%放電の値で、寿命は 60%の放電深度で 300 回など測定条件が一定しないので、それぞれの放電率での公称エネルギー密度に寿命試験の放電深度を掛けた概略値である。

4.2 エネルギー密度はどこまで出るか

電気二重層キャパシタのエネルギー密度は耐電圧と静電容量の 2 方向に発展できる。だが活性炭電極に有機電解液という現在の組合せは幾つかの課題を背負っている。

先ず耐電圧だが、高活性な触媒である活性炭を電極にして有機電解液を沁み込ませ、電圧を加えてできるだけ高電圧まで電気分解を起こさせず、長期間使おうという

図6 E C S用キャパシタのエネルギー密度と内部抵抗

構造上の矛盾がある。多種類の電解液の分解電圧が測定されているが、いずれも不純物のない電極による低い電流感度でのデータなので、活性炭電極での実用電圧はそれらより遥かに低い3V内外に留まっている。

もう一つの静電容量と電極表面の関係も、微細黒鉛構造のエッジと基底部のように均一な導電性電極面としては扱えない要素があり、静電容量の現れかたに未知の点が多い。この辺は電気工学と違って未開拓というか、自然現象や物性に直接向き合っているためか、掘り進むべき鉅脈に素手で触れているような状況にある。

キャパシタでいうと、低内部抵抗を要求されるハイブリッド自動車や無停電電源用の PS-L 級で現状で 9Wh/lit、近い将来に 15Wh/lit 程度が実現するであろう。この級のエネルギー密度は低いが、出力密度では 2.5kW/kg (3.5kW/lit) を越えており⁽⁶⁾ 実用電池より 2~3 倍は大きく、特性を正確に理解して使いさえすれば十分な競争力がある。

内部抵抗の大きな PS-B 級では活性炭で 30Wh/lit, 活性炭ではない非多孔性(第二世代)の炭素材料で 50Wh/lit 程度^(2,7)が期待できる。PS-L 級に比べて大幅にエネルギー密度が向上する理由は、電極構造の高密度化などによる静電容量密度の向上とともに、導電率のやや低い、耐電圧の高い電解液が使用できるからでもある。

5. 応用の経験と展望

キャパシタによる蓄電装置に ECS のグループだけでも 19 企業の参入を得て、国や県の補助も受け血税まで使い開発するにはそれなりの根拠と可能性が必要である。

5.1 二次電池との得失

全容量の放電時間が約 5 分間以下で、頻繁に充放電を繰り返す用途では、ECS は現在知られているどの蓄電装置（二次電池、フライホイール、SMES も含めて）より有利である可能性が大きい。充放電時間が 10 分を越え、さらに 1 時間以上となるとエネルギー密度の点でナトリウム硫黄電池や Li イオン電池が断然優勢となる。

図7 高エネルギー密度キャパシタモジュール PS-B, 1 lit セル*10

これらに対しキャパシタは何が利点かという点、充放電効率とサイクル寿命そして安全性である。電池や擬似容量のサイクル試験では浅い放電深度や小電流領域で試験した例が多い。キャパシタは無制限な放電深度と実用最大の電流で恐らく電池の10倍を越える寿命があり、二次電池が改善されつつある今日でも明瞭な長所である。

充放電効率はLiイオン電池以外の二次電池は競争相手ではない。Liイオン電池もハイブリッド自動車用など高出力タイプでは内部抵抗による発熱で大きく差がつく。しかし一晩中充電するような電力貯蔵用では、自己放電率がよいLiイオン電池だけは、他の二次電池を抜いて、キャパシタと甲乙つけがたい充放電効率が得られる。

安全性と信頼性そして環境負荷に関しては、爆発せず燃え難く、本質的に劣化しにくいキャパシタが群を抜いている。しかしこれは個々の製品の品質管理で左右される要素が大きく、競合製品は爆発するぞといったのでは誹謗に当るのでセールスポイントにはしにくい。

5.2 いくつかの実例

ECSの動作を実証する充放電キット、電動自転車、太陽光発電と組み合わせた高効率充放電、蓄電エアコン、キャパシタバンクの切換えによる系統連系蓄電装置などを試作⁽²⁾した。太陽光とECSへの貯蔵と次世代住宅への応用関連の研究では2年半にわたってキャパシタ蓄電システムが高効率と少ない劣化状態を維持しつつメンテナンスフリーで運転を継続した成果が報告⁽⁸⁾されている。

さらに長時間 PS-B タイプの応用は国家プロジェクト「負荷平準化新手法実証調査」⁽⁹⁾としても実施された。そこでは二つのグループによってエネルギー密度 27Wh/lit の単セルなど各種キャパシタセルが試作され、18kF, 1 lit 単セルを10個直列にした180Whモジュール(図7)と並列モニタにバンク切換えを含むシステムとしての応用の可能性も試された。補助金は役に立たぬという風説があるが、このプロジェクトの進展には千天の慈雨のように大きく貢献した。

また、短時間型 PS-L と ECS を用いたシリーズハイブリッド大型バスが日産ディーゼル工業(株)で試作され「クリーンエネルギー自動車」国家プロジェクト成果発表会⁽¹⁰⁾での公表値で燃費低減率が従来の1.8~2.3倍、ハイブリッド部だけによる改善効果が1.8倍に達した。乗用車より使用条件の厳しい大型バスでキャパシタによる本格的なハイブリッド車の可能性を実証したと言えよう。

5.3 今後の課題と見通し

研究を論文までで完成とするなら国家プロジェクトでの実証が終った時点で ECS は完成である。だが ECS の商業化には未だ大きな課題が残っている。

それはコストである。研究の成果は既存品と同じ条件を仮定し、たとえば鉛電池と同じ規模で生産した場合、キャパシタの寿命は、エネルギー密度は、値段は……と評価する。研究者から見ると当然で、量産中の電池と手作りのキャパシタを比べたのでは不公平だからである。

既存の物と大差ない生産工程で作れる品なら、そこを手掛かりにして比較的容易に立ち上れる。ECS の場合も電子回路部には、いくら新技術を注ぎ込んでも問題ない。

ところが、大型電気二重層キャパシタを量産するとなると、組立工場はもちろん活性炭工場や電解液工場まで考える必要が起こった。工場から作るのはよいが果してそれらは繁盛するか、償却できるか。大量に作れば安くなるが、量産工場が完成した頃になって新しいことを発明されては困るから、今のうちに全部まとめて一遍に思いつくようにと要求されている。

(平成12年6月19日受付)

著者写真と略歴：本誌学生のページ⁽¹⁾参照

文 献

- (1) 岡村迪夫：電気二重層キャパシタを用いた蓄電装置，電学誌，本号。
- (2) 岡村迪夫：電気二重層キャパシタと蓄電システム，日刊工業新聞社，初版，Mar., 1999。
- (3) 例えば R. A. Sutula, "Electric and Hybrid Vehicle Energy Storage R&D Programs of the U.S. Department of Energy", EVS-15, 1998。
- (4) M. Okamura, et al: Method and Apparatus for Charging Electric Double Layer Capacitor. USP 5,498,951. 1996。
- (5) 近藤潤次，私信，2000.6。
- (6) 電気学会技術報告書：電気自動車の新しいエネルギー・制御システム技術，電気学会，2000。
- (7) 竹内誠，丸山孝道，小池克己，最上明矩：非多孔性炭素を用いた高容量電気二重層キャパシタ，電気化学学会大会，2000.3。
- (8) 新山信一郎，Om Romney，中村宏一，山城 迪，三井克司，山岸政章，岡村迪夫：新型電力貯蔵装置 ECS を用いた PV-ECS システムの開発，電学論 B, Vol. 120-B, No. 2, 2000。
- (9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：負荷平準化新手法実証調査 最終報告書，2000.3。
- (10) 佐々木正和：LNG エンジン搭載ハイブリッドバスの開発，高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発成果発表会前刷り集，NEDO/自動車研究所，2000.3.22。