

# 大容量電気二重層キャパシタを採用した 瞬時電圧低下補償装置開発技術

ハイブリッドトラックなどで話題の電気二重層キャパシタはUPSなどでの蓄電用途でも活用が進んでいる

指月電機製作所 六藤 孝雄

マイクロプロセッサおよび半導体メモリを利用した小型電子機器やインバータ制御機器が普及するにつれて商用電源の安定化が求められている。一般商用電源の停電対策として計算機や主要制御機器はUPSを備えている。従来より電話を代表とする通信システムは電源をDC48V直流電源にして信頼性を高めている。また鉄道車両では安全に関する機器である列車無線、ATC(列車保安システム)、ドアの開閉や制動装置は蓄電池を制御電源にして直接DC電源を利用している。

現在、電気二重層キャパシタは電気を一時的に貯めて負荷に供給する機能が優れているのでメモリバックアップ電源として広く利用されている。さらに、二次蓄電池に比べエネルギー密度は低いが出力密度に優れた蓄電装置としてkWのオーダーでの利用が電力、鉄道や自動車の分野で目下研究開発されている。

このような状況下で電気二重層キャパシタの特徴を活用し、機器電源や電力品質改善装置の蓄電部などの用途に適した性能を有するセル、モジュール、蓄電バンクや瞬時電圧低下補償装置の開発と製作を行っているので、これらについて紹介する。

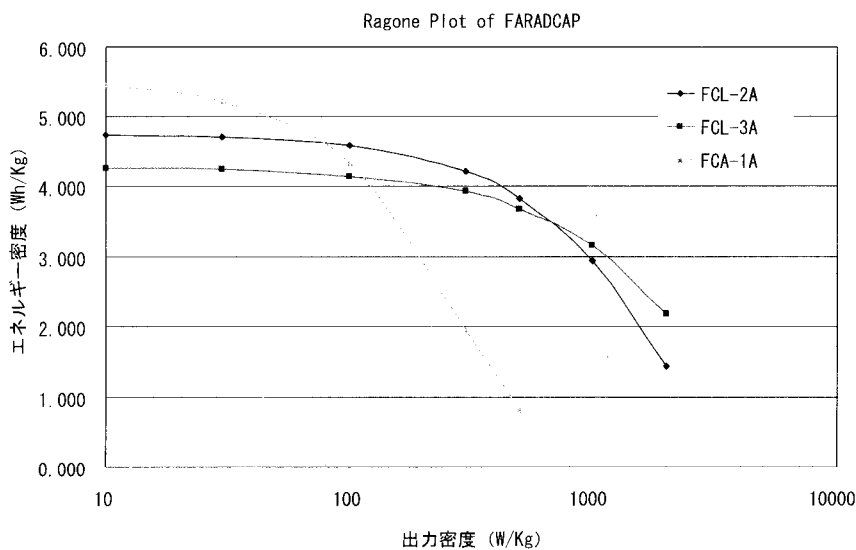
## 大容量電気二重層キャパシタ

### (1) 特性と性能

用途を装置電源、電力貯蔵や電力品質補償装置などパワーエレクトロニクス分野とするので、電気二重層キャパ

シタの特性はエネルギー密度と出力密度の優れたセルで、電源として通常直列接続し電圧を数百ボルトで10年間以上の耐用が求められる。特性で、エネルギー密度と出力密度は背反事象的な性格があり、蓄電能力を高めると短時間での出力が減少する傾向がある。用

●図1 電気二重層キャパシタセルの出力特性



●表1 セルの特性比較表

FARADCAP セル特性	FCA-1A	FCL-2A	FCL-3A
1. 静電容量 [F]	3000	1500	1400
2. 定格電圧 [V]	2.7	2.7	2.7
3. 内部抵抗 [mΩ]	9	2.2	1.4
4. セル質量 [Gr]	410	240	255

途に合わせて適するセルの選択が望まれる。

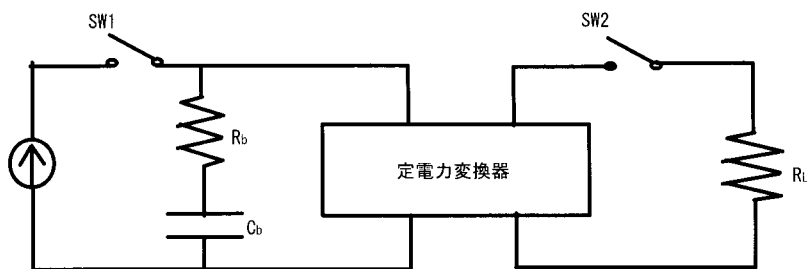
電気二重層キャパシタは内部抵抗 ESR により外部に取り出す電流値で出力できる総エネルギーは異なる。そこで出力に応じて出せるエネルギー量の関係〔出力密度 (W/kg) 対エネルギー密度 (Wh/kg)〕を計測してプロットしたグラフを図 1 に示す。

この表示法はラゴンプロットと言われ、実際に取り出せる重量当たりのエネルギー密度が明確にわかる。図は代表的な異なる 3 種類の特性の FCA-1A、FCL-2A および FCL-3A のセルについて示している。この場合、キャパシタは外部に電力を取り出すと電圧が降下して実際貯蔵している全エネルギーを利用することは回路上困難となるので、通常はセルから取り出せる電圧の範囲を初期値の 50% までとしてほぼ蓄電したエネルギーの 75% の値を利用することを目安としている。この特性図にて応用装置の蓄電装置に適したセル特性を選択することができる。出力密度が 100W/kg 以下での利用では比較的静電容量とエネルギー密度が大きい FCA-1A セルが適しており、2000 W/kg を超える場合は FLC-3A セルが適している。

このラゴンプロットはセルの基本特性がわかれば正確に計算で求めることができる。表 1 はこの 3 種類のセルの基本特性で静電容量、定格電圧、内部抵抗とセルの質量を示しており、これらを単位質量 (kg) 換算して図 2 を想定し、定格電圧の 50% までのエネルギー密度を出力密度対応にて計算すればよい。

実はこの結果を図 1 に示しており正確な計測結果とはよく一致する。ただしこの計算では数秒以内でのエネルギー

●図 2 定電力出力回路



●図 3 FML-2A モジュールの外観



●表 2 モジュール比較表

モジュール形名	FMA-1A	FML-2A	FML-3A
(セル形名)	(FCA-1A)	(FCL-2A)	(FCL-3A)
定格電圧[V]	24	54	54
定格容量[F]	333	75	70
内部抵抗[mΩ]	81	45	28
蓄電エネルギー[Wh]	27	30	28
最大出力[W]	900	8100	13000
重量[g]	5200	7000	7000

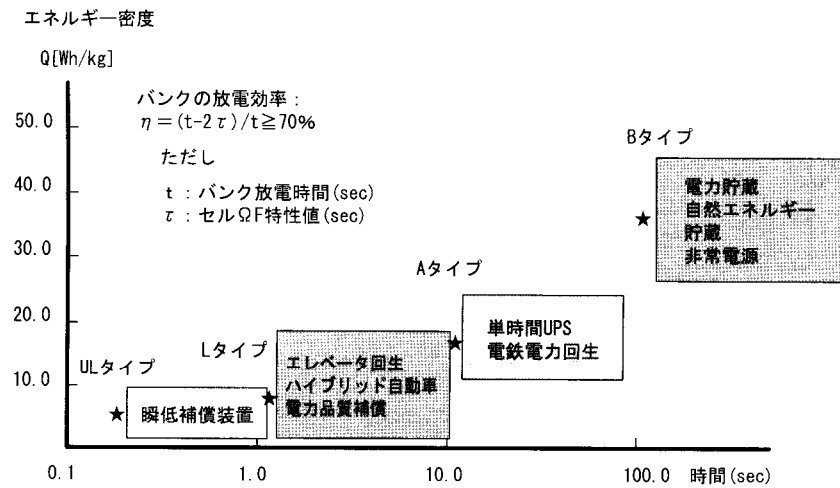
ー出力を求める場合は、セルの等価回路を C+R 集中定数モデルではなく分布定数のラダーモデルにする必要があ

る。

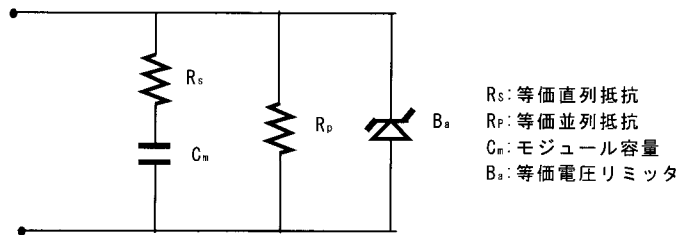
## (2) モジュールの構成と仕様

電気二重層キャパシタセルは単位質

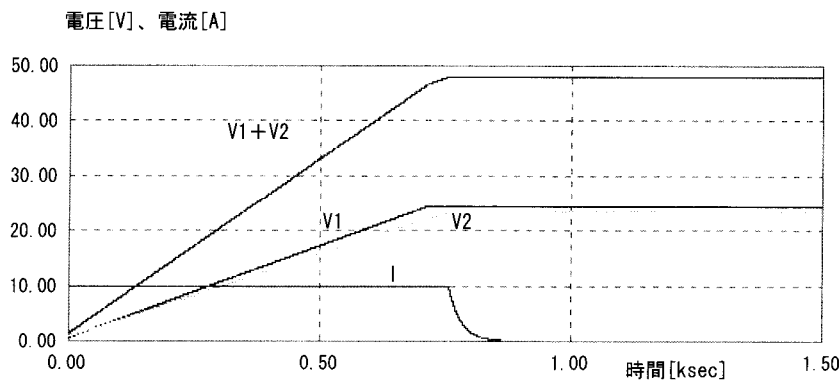
●図4 用途に適したモジュール特性



●図5 モジュール等価回路



●図6 モジュールの充電特性



量当たりの容量を大きくすることと内部抵抗を小さくするために角型パッケージ構造としている。用途をパワーエレクトロニクスと想定して電気二重層

キャパシタは大容量セルを複数個直列にして定格電圧を DC24V、または DC54V のモジュールにして製作している。この場合、円筒型の巻回形セルに

比べ角型セルはケース収納が効率的となる。FML-2A モジュールの外観を図3にまた基本仕様を表2に示す。

このモジュールは20セルが直列接続されて定格電圧 DC54V である。このモジュールには定格電圧まで充電されると各セルの電圧が DC2.7V に均等化する並列モニタ回路が組み込まれている。特に顧客での試験研究に用いるモジュールには均等化充電がされている状態を LED ダイオードで表示しているのを、これを確認することができる。

さらに蓄電バンクとしてこのモジュールを直列に接続することで、バンクの定格電圧を上げることができる。容量をさらに増やす場合は並列接続することで装置が必要とする電力量を蓄電することができる。

### (3) 用途

電気二重層キャパシタバンクの利用効率は用途での制御時間である充電時間と放電時間から決まる。制御時間が10分から1時間と比較的長い電力貯蔵用には出力密度よりもエネルギー密度を重視した計画にするが、後で紹介する瞬時電圧低下補償装置は出力を最長1秒間程度にするので、限りなく短時間でエネルギーが出力できる出力密度重視の計画となる。

図4は代表的な用途を想定して理想モジュールと用途を対比させている。

★印は理想モジュールの放電時の応答特性を ΩF 値 [SEC] とエネルギー密度 [Wh/kg] の関係を示している。エレベータの回生制御や自動車の加減速時間は15秒間とし、短時間 UPS は非常電源との切替え時間を、電鉄キ電電圧補償装置は列車の加減速度時間から30秒から60秒程度に想定している。

実際のモジュールは A タイプが30

ΩF[sec]で、Lタイプが2ΩF[sec]であるので現在製作されているモジュールでこの用途には放電効率のよいバンクが提供できるが、瞬時電圧低下補償装置にはULタイプのような1ΩF以下の特性改善がさらに望まれる。バンクの利用効率、特に放電時の効率は図中の簡略式でモジュール特性と用途の関係を70%以上に利用するための目安を示している。

(4) 利用技術

用途に適した特性のモジュールを選択して、これを直並列に接続することにより蓄電バンクとしての必要容量を得ることができる。二次蓄電池と異なり充放電すると電圧が変化することで一般にパワーエレクトロニクスでは電圧一定の回路で長年馴染んでいるので、インバータ応用機器ではDC-DCコンバータを介して定電圧源にして利用される。

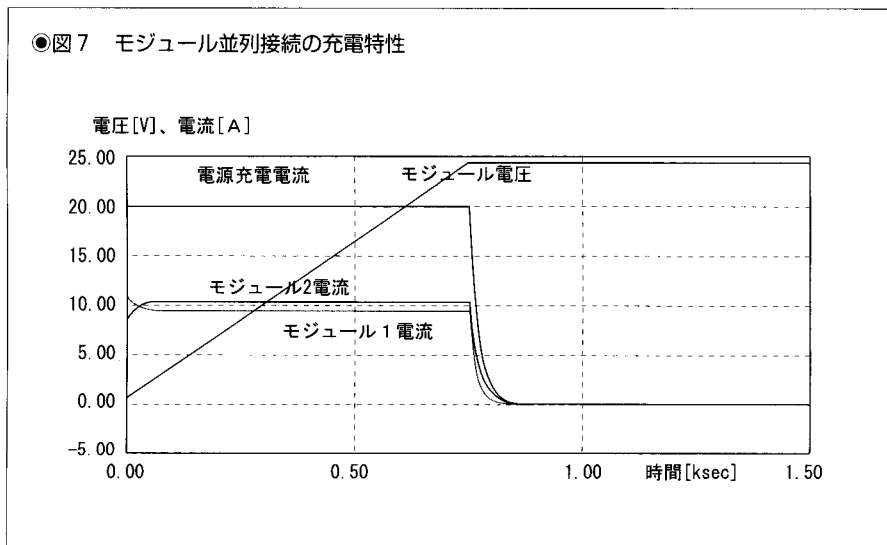
①モジュールの直並列接続

9セルを直列接続して構成したFMA-1Aを例にしてモジュールの直並列接続について説明する。図5に示すように一つのセルの等価回路と同じ構成で示すことができる。このモジュールを2台直列に接続して定電流10Aで充電したときのモジュールの特性を図6に示す。

この特性から明らかなように等価電圧リミッタと緩和充電の効果で多少モジュール間で特性の異なる要因である等価直列抵抗とモジュール容量の違いがあってもモジュールとしての充電電圧は均一化される。

モジュールを並列に接続し定格電流20Aで充電したときのモジュールの特性を図7に示す。並列に接続されたモジュールを定電流で充電すると、はじめ各モジュールの等価直列抵抗比に基

●図7 モジュール並列接続の充電特性



づき充電電流は分流するが、その後両モジュールの印加電圧は等しく上昇する。したがって、モジュールの容量が異なる場合は容量の大きいモジュールに電流を多く流し電圧を均一にする作用が生じる。

図7で充電開始時間後、25秒付近でモジュール1と2の充電電流は等しくなり、その後モジュール1が9.5Aで、モジュール2が10.5Aの状態で両モジュールの電圧は一致して24Vまで充電される。

このように、複数のモジュールの並列接続における定電流での充電は各モジュールの充電電圧を均一にするように充電電流が分流して行われる。

②利用効率

蓄電バンクの充電は元電源や充電器とバンクの電流耐量を考慮して充電器の電流リミッタを作用させて規定電圧値まで充電される。バンクからの放電は負荷により異なり、電動機負荷は規定速度まではトルク制御がされるので定電流放電となる。電灯負荷を代表とする抵抗負荷や一般の負荷では図2に示した定電力放電になる。バンクを内部直列抵抗Rと静電容量Cとして定

電流Iでt秒間充放電するときの効率 $\eta$ は、次のようになる。

バンクに貯えられる電力量Uは  

$$U=0.5 \cdot (It)^2 / C \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

内部直列抵抗Rで失われる電力量Lは

$$L=I^2 \cdot R \cdot t \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

より定電流充電したときの効率 $P_{in}$ は

$$P_{in}=U/(U+L) = t/(t+2RC) \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

定電流放電したときの効率 $P_{out}$ は

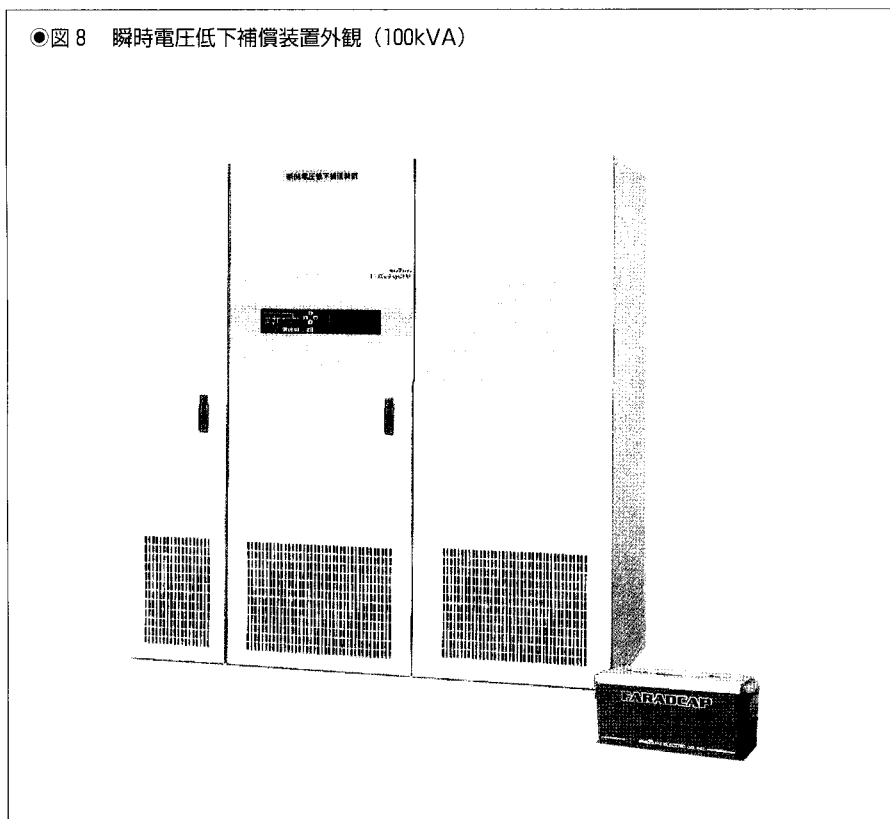
$$P_{out}=(U-L)/U=(t-2RC)/t \dots\dots\dots \text{式(4)}$$

となり、FMA-1Aモジュールを10分間定電流放電で利用したときの放電効率は式(4)より90%となる。図4は各種用途の放電時間をグループ分けして利用効率が70%以上にする場合に適した電気二重層キャパシタのタイプを示している。

③一般使用環境

モジュールをパワエレ分野の蓄電装置として使用することを想定しているため、使用環境や寿命設定もこれに合わせて計画している。使用周辺温度は-10℃から40℃を想定しており、40℃

●図8 瞬時電圧低下補償装置外観（100kVA）



にて10年間で容量劣化を20%減少した様態をモジュール寿命と規定している。セルとしての保持電圧は25℃にて72時間経過後の初期充電電圧値の5%低下としている。特性の経年劣化は容量の減少と内部等価抵抗の増大があるが、短絡になる故障は見られない。装置の蓄電部としてシステム機能が果たせなくなった状態が実質上の寿命と言える。

## 瞬時電圧低下補償装置

この度、電気二重層キャパシタを蓄電部に使用した瞬時電圧低下補償装置を開発し発売したので、これについて紹介する。

### （1）開発経過

半導体製造、精密金型高精細加工やインバータ駆動の工場空調設備などの

分野では電源の瞬時電圧低下に対して有効な対策が求められている。瞬時電圧低下は商用電源の送電線に落雷する雷害が主な原因で発生する自然現象で、年に1、2度しか発生しない一般にいう停電とは区別して対策することが求められている。年間数回から10回程度の比較的頻度の多い瞬時電圧低下は季節により、またその頻度は地域により異なっている。

現在、これら現象に対して受電側に無停電電源装置（UPS）や瞬時電圧低下補償装置が用いられている。本来UPSは停電対策として数分から30分程度電力を負荷に供給することができる装置で瞬時電圧低下に対しても有効であるが、これを瞬時電圧低下対策として用いるのは経済的には多少過剰気味である。そこで現在、専用の瞬時補償装置が開発され実用化されている。

これまでの瞬時電圧低下補償装置は蓄電部に電解コンデンサを使用しているので、蓄電容量に限りがあり、実用的には瞬時補償時間が0.35秒程度に限られている。生産現場にてさらに補償時間の延長が求められ、電気を有効に蓄電できる電気二重層キャパシタを用い、この特徴を活かして補償時間を1秒程度に延ばすことが容易にできる。開発し発売した瞬時電圧低下補償装置の外観を図8に示す。

### （2）装置構成と動作

装置は瞬時電圧低下を検知すると半導体スイッチで構成した開閉器で電源遮断して電気二重層キャパシタに貯えた電力を瞬時に負荷に供給する回路構成をしている。電源が正常電圧に回復すると元電源にインバータの位相を同期させて開閉器を再投入してINVは電気二重層キャパシタの充電モードに移行する。この回路構成を図9に示す。また補償動作波形を図10に示す。

### （3）システム諸元

商用電源に瞬時電圧低下が発生したときの補償能力をV-Backup200システムでは50kVA、100kVA、200kVAにシリーズ化している。いずれも瞬時電圧低下時、商用電源に代わり100%電力を1秒間供給する能力をもっている。この中で100kVA装置を開発例として紹介する。ここでモジュール特性をFML-2AとFML-3Aについてバンクを計画し補償時間を検証している。

### （4）補償能力の計画と実測

瞬時電圧低下時の補償能力についての計画を表3に示す。補償装置の出力はAC200Vで100kVAの電力を1秒間以上出力するために電気二重層キャパシタバンクに貯えた直流を交流に変換する効率を93%に、負荷の力率を80%としてキャパシタの特性に応じてバン

ク構成を計画している。

図11は FML-2A モジュールを 8S-2P に接続してバンクを構成したときのバンク等価回路を示している。図中 (A) はこのバンクを  $C_b$  と  $R_b$  にて集中定数として表した等価回路で、(B) はこれをセルの放電特性から算出した分布定数による等価回路で表している。これら両者の定数を使用して変換器が動作する利用電圧範囲を DC400V から DC265V までにして定電力100kVA を力率80%の負荷に出力した計算結果を図12に示す。(A) がバンクを集中定数にて計算した例を、(B) は同じく分布定数として計算した例を示している。(B) の図中星印は実機で計測した補償時間3.78秒を示している。電気二重層キャパシタバンクを短時間で放電して使用する場合、集中定数特性での計算では4.36秒と実測値より大きくなるが、分布定数特性での計算は3.66秒で実測値とよく一致する。

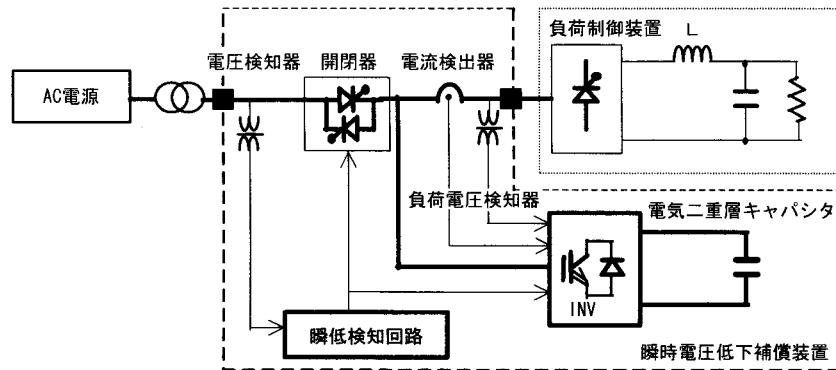
図示していないが、FML-3A モジュール特性では実測値は1.42秒の補償能力が確認されているが、分布定数特性にて計算すると1.49秒とほぼ一致している。

これらからわかるように電気二重層キャパシタは蓄電量と充放電特性を明確にすることができるので、蓄電装置として使用する場合に計画上必要とする容量が計算で正確に決めることができる。用途に対して最適な蓄電システムは電気二重層キャパシタ特性の選択、変換器の変換効率と負荷容量を合理的に設計すれば無駄のない経済的なシステムが構築できる。

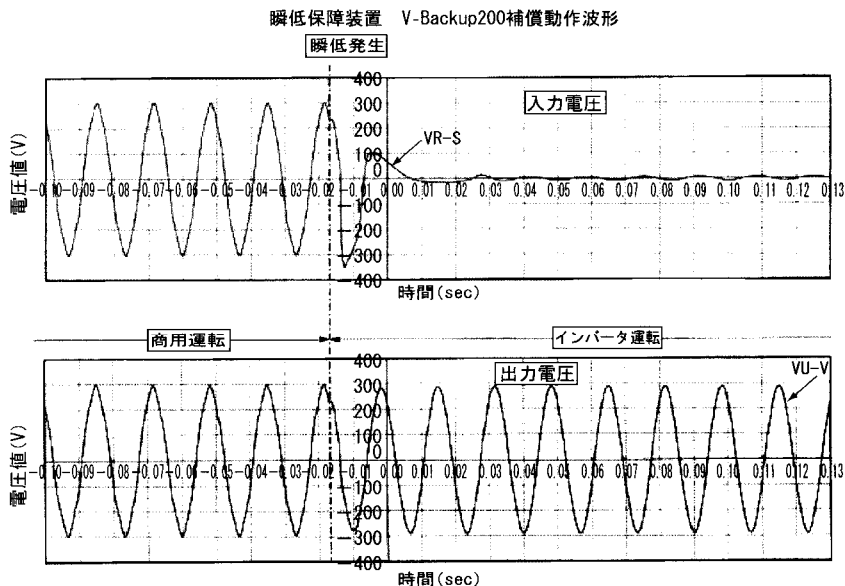
## 課題と今後の動向

蓄電器として電気二重層キャパシタ

●図9 瞬時電圧低下補償装置の構成



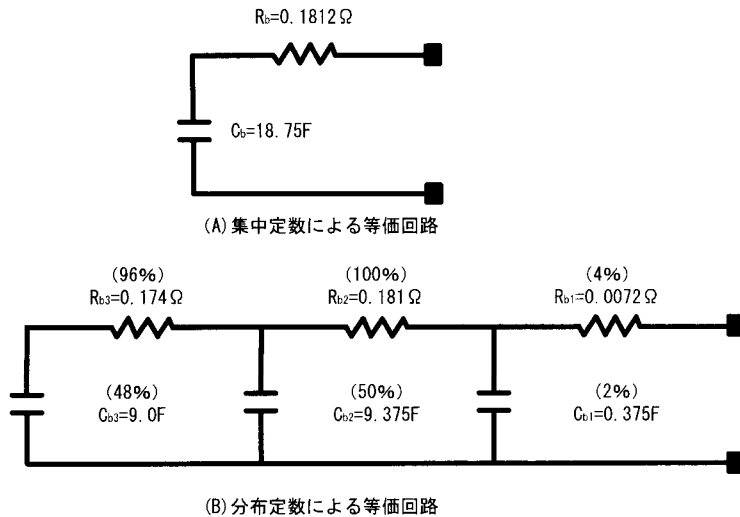
●図10 瞬時電圧低下補償装置の補償動作波形



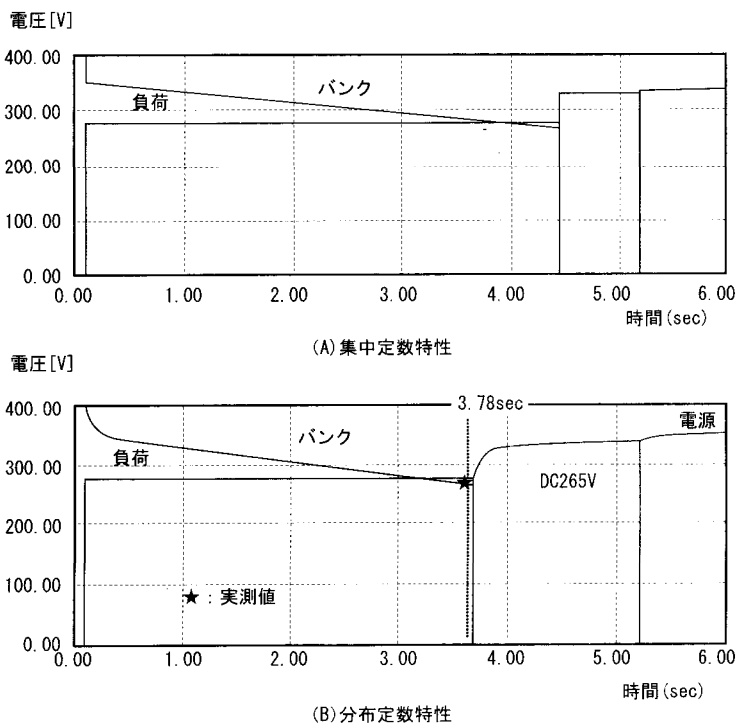
●表3 瞬時電圧低下補償装置のシステム諸元

- (1) 補償装置出力：三相 AC200V、100kVA、1秒間
- (2) 変換効率：93%
- (3) 負荷力率：80%
- (4) 変換器動作電圧範囲：DC400V～DC265V
- (5) キャパシタバンク電圧：DC400V (最大値)
- (6) モジュール特性：FML-2A DC50V、75F、45.3m $\Omega$  (3.4 $\Omega$ F)  
FML-3A DC50V、70F、28.0m $\Omega$  (2.0 $\Omega$ F)
- (7) バンク構成：FML-2A 8S-2P (18.75F、181.2m $\Omega$ )  
FML-3A 8S-1P (10.0F、200m $\Omega$ )
- (8) 瞬低補償動作 (切替え時間)：2 msec 以内
- (9) 連続蓄補償能力：10回以上 (1秒瞬低が20秒ごとに発生)

●図11 FML-2A モジュール 8S-2P バンクの等価回路



●図12 瞬時電圧低下補償時間能力特性



の能力は電解コンデンサと鉛蓄電池の間に位置すると一般に言われている。こので紹介したセルの特性は確かにこの範疇に属し、出力時間が1秒間から300秒間のシステムの蓄電部を構築す

るのに適している。特にこの中でもkW単位の電力を短時間に高い効率で充放電できる性能はほかの蓄電装置に比べ特に優れている。したがって実用化は短時間に充放電を繰り返す用途か

ら経済性が成り立ち、もっぱらパワーエレが求める低い内部抵抗での電気二重層キャパシタの製作が軸になっている。

1秒間の瞬時電圧低下補償装置での利用も電気二重層キャパシタの特性であるΩF値を0.1~1.0[sec]にしたULタイプがシステムとして合理的である。太陽光発電や風力発電の用途では分単位での発電電力のエネルギー均等化と負荷に対しての時間単位の電力貯蔵が求められる。この分野ではエネルギー密度をさらに高めたBタイプのセルの利用が計画されている。

いずれも電気二重層キャパシタの利用にはパワーエレ技術による電力変換が必要である。この場合、経済上、半導体素子は高耐圧にすることは容易であるが、大電流を扱うことは変換ロスが増えて冷却装置の負担が大となる。

電気二重層キャパシタは並列に接続して大電流を扱うことは容易であるが、現在DC2.7Vのセルを基準にして直列接続しバンク電圧を数百ボルトから千ボルトぐらいにするのが実用的である。したがってこの両者のバランスを考慮して、同じ電力量を変換して出力するシステムの設計は電圧と電流の配分計画が特に大切である。

【引用文献】

- 1) 岡村勉夫著：「電気二重層キャパシタと蓄電システム第2版」、日刊工業新聞社

●むとう たかお  
(株) 指月電機製作所 取締役  
FARADCAP 事業部 副事業部長