大容量電気二重層コンデンサを用いた電力貯蔵装置の試作

正員 杉本重幸 (中部電力)
 非会員 小田新一 (愛知電機)
 非会員 板橋俊則 (愛知電機)
 正員 村井由宏 (岐阜大学)

正員 香田 勲 (中部電力)
 非会員 安井芳則 (愛知電機)
 正員 岡村 廸夫 (岡村研究所)

Trial Production of Energy Storage System utilizing Large Capacity Electric Double-Layer Capacitors

Shigeyuki Sugimoto, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.), Isao Kouda, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.),
 Shinichi Oda, Non-Member (Aichi Electric Co., Ltd.), Yoshinori Yasui, Non-Member (Aichi Electric Co., Ltd.)
 Toshinori Itahashi, Non-Member (Aichi Electric Co., Ltd.), Michio Okamura, Member (Okamura Laboratory Inc.)
 Yoshihiro Murai, Member (Gifu University)

Recently, due to a rapid increase of demand for air-conditioning in summer, peak power demand is becoming acute increasingly. Therefore, load factor has a tendency to drop every year. The drop of load factor is leading to a drop in utilization factor of the power facilities and an increase in cost of installation.

In this paper, we proposed an energy storage system for peak-cut of power demand, to which is applied large capacity electric double-layer capacitors. Then, we studied the circuit arrangement and the control method of the proposed energy storage system, produced an 1kW mini model system, and tested the fundamental operation characteristics of this system. Finally, the application effects of this system to distribution system were evaluated by the tests with an artificial power system.

キーワード：ピークカット，電気二重層コンデンサ，電力貯蔵装置，電力変換器，パワーエレクトロニクス

1. まえがき

近年、電力需要は、特に夏季の冷房需要の急増により益々ピーク需要の先鋭化が進み、負荷率（最大電力に対する平均電力の比率）は年々低下する傾向にある。この負荷率の低下はピーク需要時以外の電力設備の稼働率低下や設備投資の増加を招いている。

ピーク需要を他の時間帯へシフトするための方策として、種々の電力貯蔵装置が提案されている。これらは、需要の少ない夜間に電力を貯蔵し、昼間のピーク需要に対応して貯蔵電力を放出するものである。しかし、超電導技術を用いたSMESは、冷却装置が必要などの理由から建設コストが高く、また、現在最も実用化に近い二次電池電力貯蔵装置も、電池のメンテナンスが必要で、繰り返し充放電による寿命が短いなどの問題がある。

これに対して、従来からパソコン等のメモリバックアップ用に使われてきた電気二重層コンデンサが、近年、電極構造や電解液の改良により、エネルギー密度の大きな大容量コンデンサとして開発された例が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。これらは、いずれも電気自動車の加速時のパワー・アシスト等を目的とした例であり、電気二重層コンデンサの大電流短時間放電能力を利用したものである。

電気二重層コンデンサは、エネルギー蓄積要素として見

た場合、①繰り返し充放電に強く、寿命が長い、②メンテナンスの必要がない、③環境にやさしい、④充放電効率が低い、などの優れた特徴を持っている。したがって、これらの特徴を生かして、電気二重層コンデンサを電力貯蔵装置のエネルギー蓄積要素として利用できる可能性がある。

そこで、著者らは、この大容量電気二重層コンデンサをピークカット用電力貯蔵装置のエネルギー蓄積要素として用いることを考え、その電力貯蔵装置の具体的な回路構成や充電・放電の制御方法について検討した。さらに、検討結果を基に、1kW級の電力貯蔵装置縮小モデルを試作し、その基本動作を確認するとともに、模擬送電線装置に接続して、系統への適用効果の検証を行ったので報告する。

2. 大容量コンデンサ適用電力貯蔵装置

＜2・1＞ 電気二重層コンデンサの特徴 最初に、今回、電力貯蔵装置に適用することを検討した電気二重層コンデンサの特徴について述べる。表1において、電気二重層コンデンサと新型二次電池の代表例としてのNaS電池、及び従来型コンデンサのうち比較的大容量のコンデンサとして認知されている電解コンデンサの各諸特性を比較する。この表には、各コンデンサ、電池をエネルギー蓄積要素として用いた場合の電力貯蔵装置の予想される性能についても示した。また、電気二重層コンデンサは、今回の試作に

表1 電気二重層コンデンサと他のエネルギー蓄積要素の特性比較

Table 1 Comparison between electric double-layer capacitors and other energy storage components.

特 性	電気二重層C (今回)	電気二重層C (将来)	NaS電池	電解コンデンサ
エネルギー密度 (Wh/l)	9.2	30~50	140	0.1
出力密度 (W/kg)	300	150	50	10,000 以上
充放電効率 (単体/貯蔵装置)	94%/60.8%	95%/82%	83%/75%	≒100%/ー
サイクル寿命	10,000 以上	10,000 以上	2,000	10,000 以上
放電時間	30min	3 hr	8 hr	数十 ms
充電時間	80min	8 hr	8 hr	数十 ms

用いたものと、将来の目標レベルのものを示した。表1からわかるように、電気二重層コンデンサはエネルギー密度の点で、従来のコンデンサに比べれば格段に大容量であるが、現状では、新型二次電池 (NaS電池) に対して、今回試作に使用したもので1/15、最大容量のものでも1/8程度⁽³⁾である。しかし、出力密度の点からは、二次電池に比べれば急速な充放電が可能である。また、サイクル寿命が長く、メンテナンスが不要であるという電気二重層コンデンサの特徴も、配電変電所内に設置する場合には有利な点である。通常の負荷平準化用電力貯蔵装置では、充放電パターンとして、夜間8時間充電、昼間8時間放電を行うのが一般的であるが、大容量電気二重層コンデンサを電力貯蔵装置に適用する際には、これらの特徴を考慮して、仕様を決定することが必要である。

〈2・2〉 電力貯蔵装置の仕様 次に、大容量電気二重層コンデンサを適用したピークカット用電力貯蔵装置の実用器の目標仕様について述べる。図1に、中部電力における平成9年度の最大需要日 (平成9年8月22日) の日間負荷曲線を示す。この図から、1日の負荷のうち、需要が最も大きくなるのはほぼ13時~16時の間の約3時間であることがわかる。そこで、このような日間負荷曲線の傾向や、前述の大容量電気二重層コンデンサの特徴を生かすという意味から、今回検討した電力貯蔵装置の充放電パターンは、夜間8時間充電、昼間3時間放電とし、夏季の本来に必要な短時間のピークの部分だけをカットすることを想

定した。尚、このピークの3時間を超える分の負荷平準化については、従来の揚水発電や二次電池電力貯蔵装置等により行うのが適していると考えられる。

また、このピークカット用電力貯蔵装置の設置場所としては、電力需要地に最も近い配電変電所敷地内の空き地に設置することを想定し、装置1台の定格容量は100kW程度とし、敷地面積に応じて複数台を並列接続する方式とした。したがって、中部電力の約800ヶ所の配電変電所に平均6台程度を設置すると、上位50万kWのピークカットを行うことができる。このピークカット用電力貯蔵装置1台の概略仕様を表2に示す。

表2 ピークカット用電力貯蔵装置の概略仕様

Table 2 Specification of the energy storage system for peak-cut of power demand.

項 目	定格・仕様
設置目的	夏季ピーク負荷対応用
出力容量	100kW, 3hr
接続系統電圧	配電変電所母線 6,600V, 3φ
充放電パターン	充電: 夜間8時間 放電: 昼間ピーク負荷時3時間
年間稼働日数	10~20回/年
エネルギー蓄積要素	大容量電気二重層コンデンサ

3. 電力貯蔵装置縮小モデルの試作

第2章で述べた大容量電気二重層コンデンサを適用したピークカット用電力貯蔵装置を実現するためには、いくつかの要素回路技術の検討とその動作特性の確認が必要である。また、エネルギー蓄積要素としての電気二重層コンデンサも、各方面で一層の大容量化に向けての研究・開発が行われているが、現時点では数百kW×3hr級の電力貯蔵装置の製作に使用するにはまだまだ容量が小さい。

そこで、今回は、要素回路技術の動作特性検証のために、電気二重層コンデンサ適用電力貯蔵装置の1kW級縮小モデルを製作した。以下において、その仕様や回路構成、制御方法などについて述べる。

〈3・1〉 縮小モデルの仕様 表3に試作した縮小モデルの概略仕様を示す。前述のように、現在検討中のピークカット用電力貯蔵装置は、配電変電所母線 (6.6kV) に接続

図1 中部電力の日間負荷曲線

Fig.1 Daily load curve of Chubu Electric Power Co., Inc.

することを想定しているが、今回試作した縮小モデルでは、模擬送電線装置に接続することを前提に考え、入出力電圧（系統連系電圧）を 275V、3φ、出力容量を 1kW、30分間とした。また、エネルギー蓄積要素としての電気二重層コンデンサは、2700F、2.5Vのものを 280本使用した。

試作した縮小モデルの装置外観を図 2（a）に示す。上部に電力変換装置、下部にコンデンサバンクを収納する構成であり、装置の動作条件の設定や運転状態の表示は上部の液晶パネルにより行うことができる。図 2（b）にエネルギー貯蔵部に用いた電気二重層コンデンサの外観（10 直列分）を示す。図のコンデンサに取付けられた基板は、後で説明する直列接続された各単位コンデンサの充電電圧を均等化するための「並列モニタ」^{(4) (5)}と呼ぶ回路である。

表 3 電力貯蔵装置縮小モデルの仕様
Table 3 Specification of energy storage mini model.

項 目		定格・仕様
貯蔵装置	出力容量	1 kW, 30min
	入出力電圧	三相 275 V 60 Hz
	充放電制御	充電: 定電流, 放電: 定電力
	外形寸法 (mm)	600(W)×600(D)×1700(H)
コンデンサ	静電容量・定格電圧	2700 F, 2.5 V
	外形寸法	130mm(H)×50mm(φ)
	重量	330 g
	コンデンサバンク	140s×2p (直列構成時) 70s×4p (並列構成時)

(a) 縮小モデル外観 (b) コンデンサ外観

図 2 電力貯蔵装置縮小モデルの外観
Fig.2 Appearance of energy storage mini model.

〈3・2〉 縮小モデルの回路構成 図 3 に、試作した縮小モデルの主回路構成の概略を示す。主回路は、エネルギーを貯蔵するコンデンサバンク、充放電時のコンデンサバンクの端子電圧に応じてコンデンサの直列並列数を切替える

直並列切替回路、平滑用コンデンサ、DC/AC変換を行う双方向交直変換器、ACフィルタ、連系変圧器などから構成される。

回路の動作としては、充電時は、双方向交直変換器により系統の交流電圧を直流電圧に変換し、コンデンサバンクを定電流充電することで、コンデンサバンク電圧を徐々に上昇させるとともに、直並列切替回路によりコンデンサバンク電圧が 175Vまで上昇した時点でコンデンサの直列数を 1/2、並列数を 2 倍に切替える。放電時は、コンデンサバンク電圧が 87.5Vまで降下した時点で、直並列切替回路によりコンデンサの直列数を 2 倍、並列数を 1/2 に切替えるとともに、双方向交直変換器により PWM制御を行うことで、放電に伴い下降するコンデンサバンク電圧の影響を補正しながら、系統に一定の交流電力を供給する。

図 3 電力貯蔵装置縮小モデルの回路構成
Fig.3 Circuit arrangement of energy storage mini model.

4. 電力貯蔵装置の要素回路技術

本章では、電気二重層コンデンサ適用電力貯蔵装置の縮小モデルに採用した要素回路技術について説明する。

〈4・1〉 コンデンサの均等充電方式 電気二重層コンデンサは、正・負極に用いた活性炭電極と電解液の界面に形成される電気二重層におけるイオンの吸着・脱着反応を利用したものである。この原理から電気二重層コンデンサ単セルの耐電圧は 2.5V程度と低いので、その貯蔵エネルギーを変換装置により交流電力として取り出すためには、単セルを直列接続してある程度の端子電圧を確保することが必要となる。そこで、試作した縮小モデルでは、2700F、2.5Vの電気二重層コンデンサを 70 直列、4 並列で構成することで、定格電圧 175V、定格容量 1kW、30min のコンデンサバンクとした。ただし、実際には後述のように、コンデンサバンクを 70 直列、2 並列の 2つのブロックに分け、コンデンサバンクの端子電圧に応じて直列接続と並列接続の切替を行うようにしている。

このように、コンデンサを直列接続する場合には、コンデンサの静電容量や等価直列抵抗等の特性のバラツキにより、充放電時の各単位コンデンサの端子電圧が不均一になり、コンデンサの貯蔵エネルギーを十分利用できないという問題がある。この対策のために、図 4 に示すような「並

列モニタ」と呼ぶ回路を各コンデンサに並列に接続し、充電時に定格電圧に到達したコンデンサをバイパスして、残った他のコンデンサの充電を行う方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾を採用する。

この「並列モニタ」の効果を確認するため、「並列モニタ」を使用しない場合と使用した場合について、多数個直列接続されたコンデンサの充電時の端子電圧の変化をシミュレーションにより解析した。解析モデルとしては、製作した縮小モデルのコンデンサバンク1並列分（単位コンデンサ70直列）を、7個のコンデンサ（270F、25V）の直列接続構成により模擬し、これを定電流充電した場合を想定した。ここでは、解析を簡単にし、適用効果をわかりやすくするため、充電回路は定電流源で模擬し、コンデンサバンクの直並列切替回路も省略した。コンデンサバンクについては、各コンデンサの静電容量のバラツキが±15%あると仮定し、 C_1 ：-15%， C_2 ：-10%， C_3 ：-5%， C_4 ：0%， C_5 ：+5%， C_6 ：+10%， C_7 ：+15%の7個のコンデンサを、正極側から負極側へ順に直列接続した解析モデルとした。

図4 「並列モニタ」の回路構成
Fig.4 Circuit arrangement of "Parallel monitor".

図5は、このモデルを用いて、無対策で充電した場合の各コンデンサの端子電圧の変化を示したものである。この場合は、静電容量が最も小さいコンデンサ C_1 （定格静電容量×0.85）が最初に定格電圧に到達した時点で、これ以上充電を続けると、 C_1 の定格電圧を超えることになるため、ここで充電を停止させる必要がある。解析の結果、最も静電容量の大きいコンデンサ C_7 （定格静電容量×1.15）は、充電停止時に定格電圧の74.0%にしか到達しておらず、各コンデンサの静電容量の構成が前記のような場合には、全コンデンサを定格電圧まで充電した場合の73.0%までしかエネルギーを貯蔵できない。そのため、コンデンサのエネルギー利用率が低下してしまう。

図6は、同様のバラツキで、前述の図4の「並列モニタ」を各コンデンサに接続して充電した場合の各コンデンサ端子電圧の変化を示したものである。この場合は、静電容量が最も小さいコンデンサ C_1 が定格電圧まで充電完了した後も、充電完了したコンデンサを「並列モニタ」によりバ

図5 充電時のコンデンサ端子電圧（「並列モニタなし」）
Fig.5 Terminal voltage of capacitors without "Parallel monitor".

図6 充電時のコンデンサ端子電圧（「並列モニタあり」）
Fig.6 Terminal voltage of capacitors with "Parallel monitor".

イパスすることで、他のコンデンサに充電を継続することができ、図に示すように全てのコンデンサを定格電圧まで充電することが可能である。

＜4・2＞コンデンサブロック直並列切替回路 大容量電気二重層コンデンサをエネルギー蓄積要素として使用するには、静電容量 C [F]，端子電圧 V [V]のコンデンサに蓄積されるエネルギー E [W]は、 $E = CV^2/2$ で与えられるため、コンデンサの充電/放電に伴い、その端子電圧も上昇/下降する。特に、放電時は、コンデンサに蓄積されたエネルギーを放電するに従い、その端子電圧が低下するため、交直変換器のPWM制御により交流側の電圧を一定に保つように制御を行っても、コンデンサの端子電圧が零となるまで蓄積エネルギーを利用することはできない。例えば、コンデンサバンクの定格電圧（満充電電圧）の1/2までしか利用できないとすると、コンデンサに蓄積されるエネルギーは端子電圧の2乗に比例することから、コンデンサバンク貯蔵エネルギーの75.0%までしか取り出せない。したがって、大容量電気二重層コンデンサを電力貯蔵装置に適用する場合には、交流系統に連系する双方向交直変換器と大容量電気二重層コンデンサバンクの

間に直流電圧の変動をある程度の範囲に抑える直流電圧変換回路が必要となる。

このような直流電圧変換回路としては、DC/DCコンバータ（直流チョッパ）が考えられるが、双方向交直変換器との協調制御が複雑になることや、装置全体としての効率が低下することが予想される。そこで、今回のピークカット用電力貯蔵装置では、より制御の簡単な回路として、コンデンサバンクを2つのブロックに分け、図3に示すSW₁～SW₃、D₁～D₃で構成される直並列切替回路を使用することとした。回路の動作シーケンスは、表4に示すような組合せでスイッチSW₁～SW₃をオン又はオフすることにより、充電時はコンデンサバンク端子電圧が175Vまで上昇した時点で2つのコンデンサブロックを直列→並列接続に切替え、また、放電時はコンデンサバンク端子電圧が87.5Vまで降下した時点で並列→直列接続に切替える。

この直並列切替回路により、コンデンサバンクを構成する各単位コンデンサの電圧が1:4（0.625V↔2.5V）に変化しても、双方向交直変換器の直流電圧は1:2（87.5V↔175V）に抑えることができるため、双方向交直変換器の安定動作と効率向上に寄与するとともに、コンデンサの蓄積エネルギーの93.8%まで利用することが可能になる。

直並列切替回路の切替動作時における変換装置各部の電圧・電流の実測波形は、次章の図8（a）（充電時）と図8（b）（放電時）に示す通りであり、特に双方向交直変換器等の動作に問題は生じていないことがわかる。

尚、今回の縮小モデルでは、スイッチSW₁～SW₃として1200V、50AのIGBTモジュールを使用した。

表4 直並列切替回路のスイッチの動作
Table 4 Switch's operation of series-parallel transfer circuit.

動作モード	コンデンサブロック接続状態	直並列切替回路のスイッチの状態
充電時	直列接続	SW ₁ : オフ, SW ₂ : オフ, SW ₃ : オフ
	並列接続	SW ₁ : オン, SW ₂ : オン, SW ₃ : オフ
放電時	並列接続	SW ₁ : オフ, SW ₂ : オフ, SW ₃ : オフ
	直列接続	SW ₁ : オフ, SW ₂ : オフ, SW ₃ : オン

<4・3> 双方向交直変換器 交流系統と連系する交直変換器は、図3に示すように一般的な3相ブリッジ構成とし、順変換・逆変換を1台の変換器で行う双方向機能を持たせた。すなわち、充電時はPWMコンバータ（順変換器）として動作し、系統の交流電圧を直流電圧に変換するとともに、コンデンサバンクの充電電流を一定に保つ直流定電流制御を行う。また、放電時はPWMインバータ（逆変換器）として動作し、コンデンサバンクの直流電圧を交流電圧に変換するとともに、交流系統側へ一定の電力を供給する交流定電力制御を行う。さらに、順変換（充電時）・逆変換（放電時）のいずれの場合も、系統交流電圧を基準に力率がほぼ1になるように入力・出力電流瞬時値を制御する（力率1制御）。

尚、今回の縮小モデルでは、双方向交直変換器のブリッジを構成するスイッチング素子として1200V、30AのIGBTモジュール（IPM）を使用し、PWMスイッチング周波数（キャリア周波数）を約20kHzに設定した。また、直流電圧（コンデンサバンク端子電圧）が87.5V～175Vの範囲で変化するため、交流側の定格電圧を40Vとし、これを連系変圧器（変圧比40V:275V）により、模擬送電線装置の定格電圧275Vまで昇圧する。

これまで、大容量電気二重層コンデンサを用いたピークカット用電力貯蔵装置の縮小モデルの回路構成や制御方法について述べてきたが、以降では、この縮小モデルを用いて実施した基本動作特性試験と系統適用効果確認試験の結果について報告する。

5. 縮小モデルによる基本動作特性試験

今回試作した電力貯蔵装置縮小モデルを商用電源に接続し、以下の充電/放電時の基本動作特性試験を実施した。

<5・1> 充電/放電特性試験 図7に本縮小モデルをフル充電・フル放電させた時のコンデンサバンクおよびコンデンサブロック端子電圧と双方向交直変換器の入出力交流電力の変化を実測した結果を示す。コンデンサバンク端子電圧の変化から、充電時にコンデンサブロックの直列→並列切替が、放電時に並列→直列切替がうまく行われていることがわかる。また、双方向交直変換器の入出力交流電力

図7 電力貯蔵装置縮小モデルの充放電パターン
Fig.7 Charge/discharge pattern of energy storage mini model.

は、充電時はコンデンサバンクの定電流充電が行われるため、コンデンサバンク端子電圧が上昇するに従って入力交流電力も上昇し、放電時は定電力制御が行われるため、1 kWの一定電力が出力されている。

図8に本縮小モデルの充放電時の装置各部の電圧・電流の実測波形を示す。(a)図は充電時、(b)図は放電時の直並列切替回路によりコンデンサバンクの直並列切替動作を行った時点での波形を示している。充電時、放電時とも、双方向交直変換器の入出力電圧のピーク値はコンデンサバンク直並列切替動作により直流電圧が変わるので変化するが、PWM制御(キャリア周波数 20kHz)により電圧の実効値は変化しない。そのため、直流定電流制御を行う充電時には双方向交直変換器の入力電流が制御系の時定数に従って約1/2に変化し、交流定電力出力制御を行う放電時には双方向交直変換器の出力電流は一定に保たれる。しかし、いずれの場合も、電圧・電流波形に不安定な振動等は見られず、交流側の力率もほぼ100%に制御されている。

(a) 充電時の各部波形

(b) 放電時の各部波形

図8 電力貯蔵装置縮小モデルの充放電特性

Fig.8 Charge/discharge characteristics of energy storage mini model.

<5・2> 効率測定試験 本縮小モデルをフル充電・フル放電させた時の装置各部の効率を測定した結果を図9に示す。連系変圧器を含めた双方向交直変換器の効率が充電時77.0%、放電時84.0%、コンデンサバンクの充放電効率が94.0%となり、全体の総合効率は60.8%となった。

双方向交直変換器の効率が低いのは、試作した縮小モデルの出力容量が1 kW級と小さく、直流電圧最大値も175 Vと低めに設計したため、相対的にIGBT素子の電流が大きくなり、損失が増加したことによると考えられる。また、キャリア周波数を20kHzと高めに設定したことも原因の1つである。100kW級の実器レベルの変換器では、93%程度の効率が期待できるので、総合効率も80%以上になると予想される。

ただし、放電時に比べて、充電時の双方向交直変換器の効率が低くなった理由として、充電時はコンデンサバンク電圧(直流電圧)が上昇するに従って、交流側の低い電圧から直流側の高い電圧に電流を押し込む形となり、損失を増加させていることが考えられる。そのため、現在、効率改善の対策として、直流部へのDC/DCコンバータの採用(充電時のみ、あるいは充電・放電時両方)などについても比較検討中である。

注) 双方向コンバータの効率には、連系変圧器、ACフィルタの効率も含む。

図9 電力貯蔵装置縮小モデルの充放電効率
Fig.9 Charge/discharge efficiency
of energy storage mini model.

6. 縮小モデルによる系統適用効果確認試験

電気二重層コンデンサ適用電力貯蔵装置の系統への適用効果の確認試験として、今回試作した電力貯蔵装置縮小モデルを模擬送電線装置に接続し、ピークカット効果確認試験を実施した。

<6・1> 系統モデルと試験方法 電気二重層コンデンサ適用電力貯蔵装置を配電系統に設置することを想定して、模擬送電線装置により、配電変電所を中心とした図10のようなモデル系統を構築した。図中の中間母線が配電変電所母線に、中間母線の無限大母線側の系統が配電用変圧器も含めた77kV送電線に、中間母線の模擬負荷装置側の系統が6.6kV配電線に相当する。各線路定数は、都市郊外の一般的な配電系統を基にモデル化したものであり、配電線側は6フィーダ分を一括して設定している。

配電系統の負荷曲線は、場所(住宅地区、商業地区、工業地区等)によって変化パターンが異なると考えられるが、今回の試験では平均的な負荷パターンとして、図1の日間負荷曲線を用いることとした。そこで、図10の模擬負荷

装置の負荷曲線としては、図 1 の曲線を時間軸：24hr→2hr、電力：26,190MW→5kW の比率で模擬した図 1 1 の負荷パターンを使用した（ただし、配電線負荷の最大値が、配電用変圧器容量 20MVA 一杯と仮定すると、電力は 20MW→5kW の模擬比率となる）。模擬負荷装置の負荷としては、可変抵抗を用い、5 分（実時間の 1 時間相当）ごとに負荷量を変化させた。

縮小モデル（電力貯蔵装置）の充電・放電のタイミングは、図 1 1 の負荷パターンに対して、15 分～55 分の間（実時間の 23:00～7:00 に相当）に充電動作を行い、85 分～100 分の間（実時間の 13:00～16:00 に相当）に放電動作を行うように設定した。また、縮小モデル（電力貯蔵装置）の設置位置は、図 1 0 に示すように、配電変電所母線（中間母線）に接続した場合と負荷（模擬負荷装置）側に接続した場合の 2 種類を想定した。

図 1 0 試験用モデル配電系統

Fig.10 Model distribution system for the tests.

図 1 1 模擬負荷装置の負荷パターン

Fig.11 Load pattern of artificial load equipment.

＜6・2＞ ピークカット効果確認試験結果 図 1 2 (a) に縮小モデルを配電変電所母線（中間母線）に接続した場合のピークカット効果確認試験の結果を示す。縮小モデルの充電動作は放電電力を賄える分の電力を貯蔵するように充電電流値を設定して 40 分間行い、放電動作は 0.5kW (2MW 相当) 一定で 15 分間行った。図から、需要の低

い夜間（8 時間相当）に電力を貯蔵し、需要がピークに達する昼間（3 時間相当）に貯蔵電力を放電することで、電源のピーク負荷が軽減され、ピークカット動作がうまく行われていることがわかる。

同様に、図 1 2 (b) に縮小モデルを負荷（模擬負荷装置）側に接続した場合の試験結果を示す。この場合も、ピークカット動作はうまく行われている。

縮小モデル（電力貯蔵装置）の設置位置による差としては、充電時は、配電変電所母線に接続した場合の方が配電線を介さずに充電できるため、負荷側に接続した場合より損失は若干なくなるが、逆に、放電時は、負荷の配電線による損失分も補償する必要があるため、損失は若干大きくなる。したがって、同じ貯蔵エネルギー量で、電源のピーク負荷を軽減する場合には、負荷側に接続の方が若干効果が大きくなるが、それほど大きな差はない。

(a) 縮小モデルを中間母線に接続した場合

(b) 縮小モデルを負荷側に接続した場合

図 1 2 ピークカット効果確認試験結果

Fig.12 Results of evaluation test for peak-cut effect.

7. むすび

大容量電気二重層コンデンサを用いたピークカット用電力貯蔵装置について、種々の検討と検証試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 大容量電気二重層コンデンサをエネルギー貯蔵部に適用したピークカット用電力貯蔵装置を提案し、その概略の仕様について検討した。
- (2) 大容量電気二重層コンデンサ適用ピークカット用電力貯蔵装置を実現する上で必要となるコンデンサ均等充電方法や変換装置の具体的回路構成、充電・放電の制御方法などについて提案した。

(3) 回路構成等の検討結果を基に、1 kW級の電力貯蔵装置縮小モデルを試作し、その基本動作特性試験を行うことで、電力貯蔵装置として十分な特性を持つことを確認した。

(4) 配電システムをモデル化した模擬送電線装置に縮小モデルを接続して、系統への適用効果（ピークカット効果）の検証を行い、電力貯蔵装置の設置位置による効果の差についても考察を行った。

以上の検討により、大容量電気二重層コンデンサを用いた電力貯蔵装置を実現できる見通しが得られたため、今後はより実用化を目指した要素技術の開発を行い、種々の条件における性能検証を行っていく予定である。

終わりに、本研究を実施するに当たり、縮小モデルに使用したコンデンサバンクを製作していただきました山岸政章氏（（株）パワースystem代表取締役）に感謝致します。

尚、共著者である岐阜大学の村井由宏教授は、突然ご健康を損なわれ、平成11年2月4日ご逝去なさいました。本論文は教授のご指導なくしては完成し得なかったものであり、深く感謝の意を表しますとともに、ご冥福をお祈り致します。

（平成10年11月10日受付，同11年2月12日再受付）

文 献

- (1) 岡本正史：「パワー用電気二重層コンデンサの開発」，平成9年電気学会全国大会，No.S.14-4-3，S.14-21～S.14-24（1997-3）
- (2) 劉興江・逢坂哲彌：「特集最新二次電池探検隊 新型高容量パワーキャパシタの技術革新」，エレクトロニクス，1998年4月号，54～56
- (3) 山岸政章・清水雅彦・篠塚政彦・清水正明・三井克司・岡村迪夫：「ECSによる電力エネルギー貯蔵用18 kFキャパシタ」，信学技報，EE98-33（1998-9）
- (4) 岡村迪夫・山岸政章・清水雅彦：「新らしい物理電池ECSの研究（II）～コンデンサ直列接続と並列モニタ～」，信学技報，PE94-62（1995-1）
- (5) 岡村迪夫：「電力用蓄電装置の基礎的研究」，電気学会論文誌B，Vol.115-B，No.5，504～510（1995）

杉本 重幸

（正員）1958年12月26日生まれ。1983年岐阜大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年4月三菱電機（株）名古屋製作所入社。1991年より中部電力（株）勤務。現在、同社電力技術研究所に所属。1997年4月岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程電子情報システム工学専攻に入学。主として電力機器・電力系統へのパワーエレクトロニクス技術の適用に関する研究に従事。平成10年電気学会論文賞受賞。

香田 勲

（正員）1945年4月22日生まれ。1964年3月佐賀工業高等学校卒業。同年4月中部電力（株）入社。1991年7月より同社本店系統運用部にて、制御保護装置の開発に従事。1995年7月に同社電力技術研究所に転属。主として系統制御技術に関する研究に従事。現在、電力システムグループ・リーダー。電気設備学会会員。

小田 新一

（非会員）1949年5月15日生まれ。1973年3月金沢大学工学部電気工学科卒業。同年4月愛知電機（株）入社。主として電力機器の基礎技術の研究・開発に従事。現在、機器開発事業部電力機器開発部担当部長。

安井 芳則

（非会員）1965年12月9日生まれ。1988年3月愛知工業大学電子工学科卒業。同年4月愛知電機（株）入社。主として電力機器の基礎技術の研究・開発に従事。現在、機器開発事業部電力機器開発部情報通信グループに所属。

板橋 俊則

（非会員）1973年8月20日生まれ。1996年3月名古屋工業大学電気情報工学科卒業。同年4月愛知電機（株）入社。主として電力機器の基礎技術の研究・開発に従事。現在、機器開発事業部電力機器開発部情報通信グループに所属。

岡村 勉夫

(正員) 1935 年 2 月 1 日生まれ。1959 年早稲田大学第一理工学部電気工学科卒業。同年 4 月日本原子力事業(株)入社。1964 年米国アルゴンヌ原子力研究所留学。1987 年(株)岡村研究所設立。主として放射線計測, 電子回路, コンピュータ応用, ソフトウェア研究開発に従事。現在、同社代表取締役。日本原子力学会会員。

村井 由宏

(正員) 1942 年 1 月 13 日生。1969 年岐阜大学大学院修士課程電気工学専攻修了。同年 4 月同大学助手、1984 年 4 月同助教授、1989 年 8 月同教授。1999 年 2 月 4 日逝去。工学博士(1981.11, 東京工業大学)。主として、インバータ・誘導機系の特性改善, ブラシレス DC モータ, レラクタンスモータ, 電力システムのシミュレーション, 共振形インバータなどの研究に従事。電気学会, 計測自動制御学会, IEEE などの会員。IEEE IAS'88 paper award 受賞。