BMS実績データに基づくNaS電池システムの性能評価 および電力負荷平準化効果

PERFORMANCE EVALUATION AND LOAD LEVELING EFFECT BY NARIUM-SALFER BATTERY SYSTEM BASED ON BMS DATA

富樫 英介^{*1}, 田辺 新一^{*2}, 横山 計三^{*3}, 吉井 存^{*4}

*Eisuke TOGASHI, Shin-ichi TANABE, Keizo YOKOYAMA
and Ari YOSHII*

Demand for electric power in private sector is increasing year by year in Japan. Especially during summer season, a high demand for electricity exists due to cooling load. Since an excess of capacity reduces the efficiency of electrical power plant, load leveling is needed. Natrium-Sulfur (NaS) energy storage system is a new technology that provides load leveling. In this paper, actual operation performance of NaS energy storage system was evaluated based on real operating data collected from building management system. Efficiency of NaS energy storage system was 73% including power conversion system (PCS). Power consumption of auxiliary machine (mostly electrical heater) was also measured and reported. Total efficiency of NaS storage system was evaluated in a correlation with average outdoor air temperature, and takes value between 50%~65%.

Keywords : *Natrium salfer battery, Load leveling, Energy storage system*

NaS電池, 負荷平準化, 電力貯蔵

1. はじめに

我が国の電力需要は民生部門を中心にオイルショック以降一貫して増加を続けている⁹⁾。特に電力需要が年間で最大となる夏季では民生用の冷房用電力需要が非常に大きいため、昼間に尖塔状の需要ピークを形成する。この結果、年間でわずか数十時間しか発生しない電力需要ピークのために大型発電所数基分に相当する発電能力が必要とされている⁸⁾。供給面のみからこのような需要に対処しようとすれば最大供給量を増加させることになり、設備利用率が低下する。従って需要面からの対処、即ち電力負荷平準化が求められている。

2. 研究目的

電力負荷平準化のため、化学エネルギーを利用した電力貯蔵方法としてナトリウム・硫黄電池（以下NaS電池システム）がある。NaS電池システムの開発は第二次オイルショックを受けたムーンライト計画の一環として着手され、2002年には一般向けの本格販売が開始している。これまで、変電所や実証試験用施設に設置されたNaS電池システムの運転結果についてはいくつかの報告が行われているが^{1)~7)}、一般の施設に導入されたNaS電池システムについて、長期計測したデータに基づいて性能報告をした例はほとんど無い。早稲田大学では2004年に竣工した早稲田リサーチパーク・コミュニケーションセンター（以下、WRPC）に100kW級NaS電池システム

を導入し、同年9月より運転を開始している。同施設はオープン化BMSを採用しており、各種設備機器の挙動を分単位で取得している。本研究では、BMSで取得したNaS電池システムに関連する実際の運転データを用いて既往研究における実証試験の結果などと性能値の比較を行うとともに、電力負荷平準化の効果の解析を行う。

3. 解析対象

3.1 NaS電池システムの仕様

NaS電池システムは、活物質として負極にナトリウム (Na)、正極に硫黄 (S) をそれぞれ用いている。電池内部の化学反応を式(1)および式(2)に示す。表1に本研究で解析を行ったNaS電池システムの仕様を示す。電池容量とは、定格サイクル数まで保証される放電容量である。また、定格の電池容量は保証されないものの、定格サイクル数である2500回を超えて4500回程度までは利用が可能となっている。大石らの網島変電所での実証実験²⁾および佐藤らの鬼怒川発電所での実証実験³⁾においては、電池容量低下率はそれぞれ1.97 [%/365サイクル]、2.0 [%/365サイクル]となっている。従って、本研究で扱うNaS電池システムの初期の放電可能量は、式(3)から約830 [kWh]と推測できる。ただし、現在は竣工後時間が十分に経過しておらず、電力需要が当初想定していたほどに増加してはいないため、最大能力で完全な充放電を行わずに余力を残した運転を続けている。

^{*1} 早稲田大学大学院理工学研究科 博士課程・修士(工学)

^{*2} 早稲田大学創造理工学部建築学科 教授・工博

^{*3} 日比谷総合設備(株)技術研究所 博士(工学)

^{*4} ㈱NTT ファシリティーズ

Graduate Student, Waseda University, M. Eng.

Prof., Department of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.

Technical Research Institute, Hibiya Engineering, Ltd., Dr. Eng.

Research and Development Headquarters, NTT FACILITIES, INC.

図1にNaS電池システムと交直変換装置（PCS：Power Conversion System）の外観を示す。NaS電池システムは、理論エネルギー密度が760 [Wh/kg] であり、鉛電池（約170 [Wh/kg]）やニッケル・カドミウム電池（約220 [Wh/kg]）と比較してエネルギー密度が高いため、設置スペースが小さいという特徴を持つ¹²⁾。図2にNaS電池システムの結線図を示す。WRPCの電力センサ設置箇所はPCSの手前の交流側であるため、以降の解析結果はPCSによる電力損失を含めた充放電量に基づく値である。NaS電池システムはナトリウムと硫黄との化学反応を利用して充放電を行うため、充放電時にはPCSを用いて交流・直流変換を行う必要があり、この際に電力損失が生じる。表2に佐藤らの実証試験によるPCSの交直変換効率を出力別に示す¹⁾。佐藤らは最大効率点が1500 [kW]～2000 [kW] 間にあると推定している。WRPCで採用したNaS電池システムの出力が100 [kW] であることを考慮すると、本施設のPCSでは充放電合わせて10 [%] 強の電力損失が生じると推測できる。

$$Cap_{Rate} = Cap_{Init} \times \left(1.0 - \frac{2500}{365} \times d / 100 \right) \quad (3)$$

Cap_{Rate} ：定格電池容量 [kWh]， Cap_{Init} ：初期電池容量 [kWh]
 d ：最大能力低下率 [%/365サイクル] *2500は定格サイクル数

表1 WRPCに導入したNaS電池システムの仕様

機器外形	W2650×D2300×H2260[mm]	電池容量	720 [kWh]
サイクル数	2500 [回]	出力	100 [kW]

表2 PCSの交直変換効率³⁾

PCS 出力 [kW]	500	1000	1500	2000	2400
放電時 [%]	95.1	95.9	96.2	96.4	-
充電時 [%]	95.0	96.3	96.6	96.5	96.3

図1 NaS電池（右）とPCS（左）外観

図2 NaS電池結線図

3.2 データ測定期間および測定間隔

本研究で測定を行った研究対象施設は2004年4月に竣工し、NaS電池システムは同年9月10日より運転を開始している。本研究では安定した運用が開始した2004年10月～2006年10月までの2年間データ（約500サイクル）について解析を行った。ただし2005年7月15日～17日および2006年8月7日～20日にデータ欠測があった。解析対象のデータは基本的に1時間間隔の差分データとした。ただし、6節で検討した受電電力ピークシフトに関連する計算においては10分間の差分のデータを6倍した値を出力とした。東京電力による最大需用電力の定義¹⁰⁾は「需要電力の最大値であって、30分最大需要

電力計により計量される値」となっており、1時間間隔のデータでは最大需用電力を捉えられない可能性があるためである。

4. 電池単体の充放電効率

4.1 日積算充放電量・効率

図3に日積算充放電量および充放電効率の推移を示す。ただし充放電効率は夜間充電量に対する昼間放電量の割合とした。図は2005年1月、4月、7月、10月の値であるが、他の月も同様の値となった。充電量、放電量はそれぞれ約800 [kWh]、600 [kWh] でほぼ一定の値をとっており、充放電効率も73 [%] 程度の値で安定して推移していることがわかる。4月21日前後、7月20日前後、10月4日前後でやや値がばらつくが、これは前日に完全に放電が完了せず、電力が翌日に持ち越されたためであると推測できる。

研究対象としたWRPCは大学施設であるため日曜日には放電が行われておらず、図3に示されるように、金曜日の夜間に充電された電力が一昼夜保持され、月曜日に放電が行われる。NaS電池システムはニッケル電池や鉛蓄電池などと異なり自己放電が極めて少ないために充電から放電までに時間があいたとしても問題がないとされている¹²⁾。図4に日積算の充放電効率を月曜日およびその他の曜日に分けて示す。ただし、充放電効率が60%を下回るデータおよび80%を上回るデータに関しては前日の充電電力が持ち越されたのみならず除外した。多少のばらつきはあるものの、一昼夜待機してから放電を行った月曜日とその他の曜日との間で充放電効率に差がないことが確認できる。期間の平均充放電効率を計算すると月曜日が

図3 日積算充放電量と充放電効率の推移

73.1 [%], その他の曜日が72.8 [%]となりほぼ同様の値となった。2006年8月頃から充放電効率が若干上昇しているのは、運転方法を変えて充放電量を増加させたため、最大能力に近い、より効率的な運転が可能となったためであると推測できる。同期間の充電量は日積算で約880 [kWh], 放電量は約660 [kWh]であった。また、夏季・冬季休業期間および黄金週間にはそれぞれ、より長期間の充電待機状態が続いたが、同期間の充放電効率も通常の期間の充放電効率を下回ることにはなかった。表3に夏季・冬季休業期間および黄金週間の充放電効率を示す。ただし、待機中はヒーターにより温度を維持せねばならないため、ヒーターによる消費電力が発生する。この点に関しては5節で詳細に検討を行う。

図4 曜日別日積算消費電力量の推移

表3 夏季・冬季休業期間および黄金週間の充放電効率

	2004	2005		2006
	冬季休業	夏季休業	冬季休業	GW
待機日数 [日]	8	9	18	9
充電量 [kWh]	720	824	755	793
放電量 [kWh]	598	607	598	604
充放電効率 [%]	83	74	79	76

4.2 月積算充放電量・効率

図5に月積算充放電量および充放電効率の推移を示す。日積算と同様、73 [%] 前後の充放電効率で推移していることがわかる。期間中の充電量合計は404.5 [MWh], 放電量合計は294.0 [MWh] となり、期間を通じての充放電効率は73 [%] となった。補機消費電力量を含めた総合充放電効率に関しては5節で検討する。

4.3 既往研究との比較

大石らの網島変電所での実証試験²⁾、牧らの大仁変電所での実証試験⁴⁾および佐藤らの鬼怒川発電所における実証試験¹⁾において、

充放電効率はそれぞれ78.7 [%], 74.6~77.7 [%] および73.3~74.8 [%] であったという報告がある。また、加瀬らは川崎変電所での実証試験において直流側充放電効率が91 [%] であったと報告しており⁷⁾、PCSの交直変換効率が95 [%] 程度と仮定すると、交流側ではおよそ80 [%] 程度であったと推測できる。これらの値と比較すると本研究で分析を行ったNaS電池システムの充放電効率72.7 [%] はやや低いといえる。本研究で対象としたNaS電池システムのPCS出力は100 [kW] であり、前述の各実証試験における出力よりかなり小さく（網島変電所:2000 [kW], 大仁変電所:500 [kW], 鬼怒川発電所:193 [kW], 川崎変電所:500 [kW]）、PCSの交直変換効率が低かったことが原因の1つであると推測できる。このようにPCS出力能力は変換効率に影響を与えるとともに、ピークシフト可能な上限値を規定する数値でもあるため、NaS電池の導入にあたっては6.2節で検討を行うように受電電力パターンを確認しながら慎重にその能力を決定する必要がある。

5. 補機消費電力量

NaS電池システムは、充電時には吸熱反応、放電時には発熱反応が生じるが、電池内部の β アルミナおよびナトリウムイオンの伝導抵抗を低くするために300~350℃程度に温度を保つ必要がある。従って、性能評価にあたっては電池固有の充放電効率およびPCS変換効率のほか、温度維持のためのヒーター消費電力量についても検討を行う必要がある。研究対象施設の電熱ヒーター能力は7.35 [kW] である。また、大学用途であるために長期休業期間があり、充放電を行わない待機時間が長くなる傾向があり、補機消費電力量が大きくなっている。

補機消費電力量を考慮したNaS電池システム性能評価指標として総合充放電効率を式(4)で定義する。補機消費電力量は充放電時に発熱吸熱反応が生ずるために充放電時間に多少の影響は受けるものの、主にはNaS電池システムの容量（最大充放電可能量）によって決まる。従って、余力を残した運転をしてしまうと、充放電量に対して補機消費電力量の割合が相対的に上昇するために効率の低下をまねく。本研究で扱ったNaS電池システムの総合充放電効率は50 [%] ~65 [%] で推移しており、図5からは月積算充放電量と総合充放電効率が連動している様子がみとれる。期間を通じての総合充放電効率は59.1 [%] となった。図6に2004年10月~2006年8月までの月積算放電量と総合充放電効率の関係を示す。放電量と総合充

図5 月積算充放電量と充放電効率の推移

図6 月積算放電量と総合充放電効率の関係

放電効率との間に正の相関が表れていることがわかる。3.1節で推定した初期の放電可能量830 [kWh] で週6日間の運転を想定すると、 $830 \times 6/7 \times 31 \div 22000$ となり、月積算で約22 [MWh] の放電が可能である。従って、本研究のNaS電池システムは相当に余力を残した運転をしており、充放電の絶対量を増加させることで総合充放電効率の上昇を見込むことができる。

$$\text{総合充放電効率} = \frac{\text{放電量}}{\text{充電量} + \text{補機消費電力量}} \times 100 \quad (4)$$

図7に2004年10月～2006年10月までの日積算補機消費電力量の推移を日曜および休業期間中と平日に分けて示す。ただし、充放電量を変更すると補機消費電力量が変化するため、2005年および2006年夏においてデータが不連続となっている。放電を行わないために発熱反応がない日曜および休業期間中の補機消費電力量が大きいことと、外気温が高い夏季に補機消費電力量が小さいことがわかる。

図8に外気温と補機消費電力量の関係を示す。上方のプロットが2004年10月から2005年8月までのデータ、下方が2005年8月から2006年8月までのデータである。運転方法が異なっているために絶対値としては多少の差が見られるが、日平均外気温が1度変化すると、日積算で約0.5 [kWh] 程度、補機消費電力量が変化することがわかる。

本研究が対象としているNaS電池システムは既往研究と比較して規模が非常に小さく、機器の体積に対する表面積の比率が大きいため、熱損失が一般的な機器よりも大きくなっていると考えられる。また、本研究の対象機器は屋外設置であるが、現状では一般的な屋内利用を前提とした機器と同等の断熱を行っており、断熱性能を増加させることでさらに補機消費電力量を低減させることが可能であると推測できる。図9に試験的に10mmと30mmの断熱マットを設置した際の積算補機消費電力量の推移を示す。「断熱無し」が通常値であり、2007/1/8～1/24に計測された値である。10mmおよび30mmの断熱マットを設置したデータはそれぞれ2007/2/12～2/18、2007/1/22～1/28に計測された値である。NaS電池内部の温度が360℃を超えると安全のために停止させる仕様となっているため、断熱には限度があるが、外気温等々の状態を踏まえながら適切に断熱を行うことで、現状の数分の一程度まで補機消費電力量を低減できる可能性がある。

6. 受電電力ピークシフト効果

6.1 充放電パターン

図10に夏季および冬季代表日における充放電量および補機消費電力量の推移を10分単位で示す。現在は充放電開始終了時に、徐々に充放電量を増加・減少させる台形パターンで運転が行われているこ

図7 日積算補機消費電力量の推移

図8 日平均外気温と日積算補機消費電力量

図9 断熱マット設置による補機消費電力量低減効果

とがわかる。充電は夜間料金時間帯の22:00から開始され、PCS変換機の定格出力100 [kW] でほぼ一定の値を維持した後、8:00前に完了している。一方、放電は2月の時点では出力100 [kW] で約7時間の運転を行っていたが、8月は出力60 [kW] で約12時間の運転を行っている。充放電が行われない待機時間中の温度維持および放電時の吸熱反応に対応するための熱は充電時に発生した熱でまかなわれるのが通常であるが、WRPCのNaS電池システムにおいては補機による消費電力が発生してしまっていることがわかる。5節に述べたように、この点に関しては、断熱仕様の変更により解決することが可能であると推測される。

いずれの日も指定出力で極めて安定した充放電が行われていることがグラフからわかり、電力と熱との変換や時間遅れを考慮しなければならない水蓄熱システムと比較して、NaS電池システムは制御を行いやすいシステムであるといえる。また、現在の台形パターン運転のほか、配電用変圧器の通過電力が設定値以上になったときに放電を開始する負荷追従運転も良好に機能することが既往研究で報告されており²⁾、施設の電力消費傾向を把握した後は、このような機能を利用することで、より効果的なピークシフト運転が可能に

なると推測できる。

6.2 受電電力パターン

図11に2004年10月～2006年10月までの研究対象施設周辺の平均外気温および日積算受電電力量の推移を示す。なお、研究対象施設は埼玉県本庄市に位置している。冷房需要により夏季にピークが発生し、日積算での受電電力量は2005年7月14日に最大値である約6.4 [MWh] を記録した。暖房需要による冬季の日積算受電電力量の最大値は2005年1月6日に5.1 [MWh] を記録した。図12に同期間の昼間最大受電電力の推移およびNaS電池システムによるピークシフト量を示す。

図13および図14に2006年の冬季受電電力ピーク上位10日間および夏季受電電力ピーク上位10日間における1日の受電電力の推移をNaS電池システムの有無に分けて示す。NaS電池システム無の受電電力量は、昼間の受電電力量に放電量を加え、夜間の受電電力量から充電量を差し引いた後、終日の受電電力量から補機消費電力量を引くことで求めた仮想的なグラフである。ただし、NaS電池運転停止期間のデータは除外した。研究対象施設には氷蓄熱槽が導入されており、夏季に関しては既にかなりの負荷平準化が達成されているため、NaS電池システム導入の効果は今のところ少ない。今後、電力消費量が増加するにつれ、相互の負荷平準化効果を考慮した運用が求められるようになって考えられる。氷蓄熱槽は冬季には温水蓄熱槽として利用されるが、水の状態変化を用いる氷蓄熱と比較して蓄熱量が小さいため、夏季ほどには負荷平準化が達成されておらず、NaS電池システム導入の効果が表れている。図13からは、立ち上がり時の消費電力量が比較的大きいことがわかり、受電電力のピークは456 [kW] から420 [kW] に低下している。冬季最大受電電力発生日の、詳細な電力消費の推移を図15に示す。夜間に充電した電力を利用して9:00～16:00に台形放電が行われていることがわかる。また、13:00～14:30にかけて夜間蓄熱温水の放熱運転により熱源の電力需要に谷が生じていることがわかる。NaS電池システムによ

図11 平均外気温および日積算受電電力量の推移

図12 昼間最大受電電力の推移とピークシフト量

りさらなる負荷平準化を図るためには、同時帯の放電を停止し、夕方再び温水需要が増加する時間帯に放電を行うことが望ましい。また、夜間温水蓄熱運転のために電力需要が生じており、NaS電池システム充電のための電力需要と合わせて小さな山を形成していることがわかる。NaS電池システムの出力最大値を増加させる等の方法により、温水蓄熱運転とNaS電池システムの充電が同時に生じないように工夫を行う必要がある。

図16に2006年冬季（1月1日～2006年3月31日）の受電電力を降順で示す。NaS電池システムが無い場合の仮想的な受電電力は前述の方法で求めた。受電電力150 [kW] 以上の山がNaS電池システムの放電により削られ、150 [kW] 以下のエリアへ移動していることが

図10 充放電および補機消費電力量の推移

図16 受電電力 (降順: 2006.01.01~2006.03.31)

わかる。

7. まとめ

本研究では大学施設に導入されたNaS電池システムについてBMS実績データをもとに充放電量や補機消費電力量等を把握し、性能の評価を行った。

- 1) 電池単体の充放電効率に関しては、日積算値・月積算値にもとづいてそれぞれ計算を行い、いずれも約73 [%] 前後の値となっていることを確認した。これは既往研究による値と比較してやや低いが、PCS出力が小さく交直変換効率が低いことが主たる原因であると推測できる。また、日曜日および祝祭日により放電までに1日間隔があく場合や、夏季・冬季休業期間および黄金週間等に長期の待機状態が続いた場合にも、一般の日と同様の充放電効率となることから、NaS電池システムの自己放電が極めて少ないことを確認した。
- 2) NaS電池システムを維持するために必要な補機消費電力量を計測し、これを考慮した総合充放電効率を計算した結果、約50 [%] ~65 [%] 程度の値となった。ヒーターの消費電力量は電池容量に影響をうけるため、充放電量の絶対値が小さい場合に総合充放電効率が低くなる傾向にあることを示した。また、外気温度の上昇に伴いヒーター消費電力量が低下することを示した。断熱マットの設置により、補機消費電力量が低下することを確認した。今後は、NaS電池内部の温度を上限値以下に抑えながらヒーター負荷を低下させるための適切な断熱量を検討する必要がある。
- 3) 10分単位で終日の充放電量および補機消費電力量を表し、充放電ともに指定出力で安定的に台形パターンでの運転が行われていることを確認した。
- 4) 受電電力ピーク上位10日間を抽出し、冬季においてはピーク負

図13 冬季受電電力ピーク上位10日間 (2006)

図14 夏季受電電力ピーク上位10日間 (2006)

荷が456 [kW] から430 [kW] に低減しており、立ち上がり時負荷が解消されていることを確認した。また、本研究の対象施設のように氷蓄熱槽を有する場合には、夜間時間帯に形成される電力需要の山がピーク負荷となる可能性も示された。複数の負荷平準化手法が併用されている場合には相互の影響を考慮して容量および出力を決定する必要があるといえる。

図15 2006年冬季最大受電電力発生日 (1月16日) の消費電力の推移

【謝辞】

本報の研究調査は、早稲田大学総合研究機構「建築系環境・情報マネジメントシステム研究所」の研究の一環として実施致しました。本研究の一部は早稲田大学特定課題研究助成費の補助を受けて実施致しました。また、本研究を進めるにあたり、早稲田大学草鹿研究室 笹部 崇様に多くの助言を頂きました。施設からのデータ収集に際しては(株)山下設計 市川卓也様、東洋熱工業(株) 島津様、早稲田大学総合企画部の皆様に多くのご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 佐藤 賢, 中畑浩一, 大辺 実, 鎌仲吉秀, 福田成彦:「大仁変電所NAS電池電力貯蔵システム用交直変換装置の開発(その1)」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会 (No.440), pp.341-342
- 2) 大石峰士, 兵藤 守, 大島 卓:「網島変電所NAS電池システムの運転特性」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会 (No.443), pp.349-350
- 3) 佐藤晃一, 平石忠一, 吉田利弘, 福田成彦, 玉越富夫:「需要家設置を目的としたNAS電池システムの開発」, 平成12年電気学会電力・エネルギー部門大会 (No.657), pp.676-677
- 4) 牧 光一, 奥野晃康, 中畑浩一, 玉越富夫, 平井直樹:「大仁変電所6MW/48MWhNAS電池の運転実績」, 平成12年電気学会電力・エネルギー部門大会 (No.659), pp.680-681
- 5) 大石峰士, 兵藤 守, 大辺 実, 鎌仲吉秀, 上野 潤:「網島変電所NAS電池電力貯蔵システム用交直変換装置の運転特性評価(その1)」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会 (No.441), pp.345-346
- 6) 大石峰士, 兵藤 守, 小林保則, 杉浦 豊, 西田猛和, 寺澤禎則:「網島変電所NAS電池電力貯蔵システム用交直変換装置の運転特性評価(その2)」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会 (No.442), pp.347-348
- 7) 加瀬恭治, 兵藤 守, 寺沢禎則, 川口敏幸, 阿部浩幸:「変電所設置用500kW級NAS電池電力貯蔵システムの実証試験」, 平成8年電気学会全国大会 (No.1743), pp.7-294-pp.7-295
- 8) 田中俊彦,「未利用エネルギーと蓄熱式空調システム」, 理工図書, 1994
- 9) 原子力図書館, <http://mext-atm.jst.go.jp>
- 10) 東京電力(株),「電気供給約款」, PP.25, 2004/10, <http://www.tepco.co.jp/>
- 11) 内山洋司,「電力貯蔵技術の現状と展望」, 電気評論, 2006.12, pp.7-12
- 12) 田中晃司, 奥野晃康, 佐々木優:「ナトリウム・硫黄(NAS)電池の実用化について」, 平成12年電気学会電力・エネルギー部門大会 (No.644), pp.650-651

(2007年6月10日原稿受理, 2007年9月25日採用決定)