2503

コミュニティにおけるマイクログリッドの仕様設計に関する研究

島本 卓也^{*1}, 柴田 一樹^{*2}, 田中 謙司^{*3}, 青山 和浩^{*4}

Specification Design Method for Micro-grid in a Community

Takuya SHIMAMOTO^{*1}, Kazuki SHIBATA, Kenji TANAKA, Kazuhiro AOYAMA^{*1} The Univ. of Tokyo Dept. of Systems Innovation
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-9656 Japan

In recent years, renewable energy has attracted attention especially in Japan where the argument on the nuclear power plant is active. For effective use of renewable energy, storage system is required because the amount of electricity generated by renewable energy generation has volatility. This study suggested the specification design method that can decide the appropriate amount of renewable energy and storage batteries. With CSSD (Computational Social System Dynamics), electricity transaction was simulated dynamically using the meteorological data and electricity demand data of objective community. That simulation was repeated with changing the amount of introducing renewables then the appropriate specification for achieving the aim was decided considering the fade of battery performance. This method was applied to the practical case and its utility was validated.

Key Words : Energy management system, Lithium-ion Battery

1. 緒 言

1・1 背景

近年、太陽光や風力などの再生可能エネルギー利用拡大や東日本大震災に端を発した節電への要請を受け、複雑に変化する電力需給に対応するためのキーデバイスとして大型蓄電池の重要性が高まっている⁽¹⁾。エネルギーマネジメントとしての蓄電池の用途は大きく二つに分けられる。温室効果ガス排出削減を目的とした電気自動車 (EV: Electric Vehicle) 等を指す“車載用”, スマートグリッド等の電力融通システムを効率的に使用するための“定置用”の二つがそれである。特に定置利用に関しては、震災以降のエコシステムへの関心の高まりに追従して各家庭レベルでの再生可能エネルギーの導入が進んでいることもあり、需給の調整を可能とするスマートグリッド、その導入の初期段階として地域に閉じた独立系統としてのマイクログリッド等の概念は、非常に重要なものである。

再生可能エネルギーを含んだエネルギーマネジメントシステムにおいては、出力変動安定化を目的とした電力貯蔵設備として蓄電技術が不可欠である⁽²⁾。この目的に対して最も有力視されているリチウムイオン電池は、旧来の鉛蓄電池、ニッケル水素電池等と比べてエネルギー密度や充放電エネルギー効率が高い。しかしながら、リチウムイオン電池はこれまで携帯電子機器用として小容量品を中心に利用されていたため、エネルギーマネジメントシステムのような 10 年以上のスパンでの運用に関しては実績が浅い。従って、大容量リチウムイオン電池に対する保守費用見積もりや転売価格算定は困難であり、市場拡大を阻害する一因となっている⁽³⁾。

これら二つの観点から、マイクログリッドにおける再生可能エネルギーとリチウムイオン電池の導入量を決定すること (本研究ではこれを“仕様”および“仕様設計”と呼ぶ)、さらに、その際のリチウムイオン電池の性能

^{*1} 学生員, 東京大学工学系研究科 (〒113-9656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 学生員, 東京大学工学系研究科

^{*3} 正員, 東京大学工学系研究科

^{*4} 正員, 東京大学工学系研究科

E-mail: shimamoto@m.sys.t.u-tokyo.ac.jp

劣化を算出し投資判断を支援することは意義が大きい。

1・2 既存研究

本研究では、上記の背景に基づき、二つの論文における研究成果を使用する。“CSSD (Computational Social System Dynamics) ⁽⁴⁾” および “リチウムイオン電池劣化予測モデル^{(5), (6)}” である。これら二つは東京大学の宮田・田中研究室にて開発されたものであり、前者は対象コミュニティにおける仕様設計支援、後者はリチウムイオン電池における劣化予測を行うものである。

1・3 研究目的

本研究は、上記の二つのモデルを使用し、対象地域における再生可能エネルギーとリチウムイオン電池の導入量の決定からその劣化までを一括でシミュレーションし、エネルギーマネジメントシステム導入の意思決定支援を目的とする。

2. CSSD

2・1 概要

本モデルは、柴田一樹によって2011年度に作成されたものである。対象コミュニティの電力需要データや気象データ等を用いて、仕様を変更しながら時間発展的なシミュレーションを繰り返し、評価関数に基づいた最適な仕様を提案する。本モデルの全体像を図1に示す。

Fig. 1 Flowchart of CSSD

引用元：(4)

CSSD におけるリチウムイオン電池の使用方法については、充放電アルゴリズムというのがあり、エネルギーマネジメントシステムを導入する目的に応じてこれを変更することができる。その目的としては、以下の5つが挙げられる。

1. 平滑化（変動抑制）

電力供給量を平滑化、すなわち、電力供給量の変動を可能な限り抑える。変動が大きければ電力会社側の負担が増加する。逆に、変動を抑えることができれば、変動対応のための設備を削減できる等の効果が得られる。

2. ピークカット

電力供給量の最大値に着目し、ピークを可能な限り下げる。一般に、夏場の昼間の時間帯にピークを迎えると言われており、電力会社は需要のピークに対応するために多くの発電設備を所有している。すなわち、最大値を下げることで過剰な設備を抑制することができる。

3. 電気料金最小化

電力会社によっては時間帯別に料金を設定していることもあり、アメリカなど数時間単位で料金変動する地域も存在する。こうした料金設定に着目し、料金の安いときに電力会社から多く電気を買い取って蓄電池に充電し、料金の高いときは蓄電池にある電力によって需要をまかなうことで、電気料金を安く抑えることが可能になる。

4. 余剰電力最大利用

電力は、発電した瞬間に消費する必要があるという性質をもつ。しかし、再生可能エネルギーは出力をコントロールできないため、場合によっては発電した電気を熱として放出しなければならない。このようなエネルギーの損失を防ぐため、再生可能エネルギーで発電した電気が電力需要を超えた場合の余剰電力を蓄電池を用いて可能な限り活用することを目的とする。

5. 地産地消

周辺に発電所や電力網が存在しないために電力を使えない地域は、世界に視野を広げると未だ多く存在する。こうした地域において再生可能エネルギー及びリチウムイオン電池を導入することで、発電所や電力網が存在せずとも電力を利用できる電力の地産地消化を目指す。

2・2 仕様設計シミュレーションの適用例

需要のモニタリングを行った6軒の家庭に仕様設計法を適用した一例を示す。対象期間は7/21-11/16の119日間、期間における日次平均需要は25.9kWhであった。本シミュレーションでは、導入する再生可能エネルギーは太陽光発電のみとしており、太陽光発電の発電データは気象データより算出した。以下に、ある家庭での11/3-11/9の電力量時間推移を、リチウムイオン電池導入量別で二例示す。いずれも、ピークカットを目的として蓄電池を運用するシミュレーションである。電力会社からの電力購入量（系統購入量）が平滑化され、需要の変動が二次電池に吸収されていることが分かる。

Fig. 2 Applications of CSSD

引用元：(4)

Fig. 3 Applications of CSSD

引用元 : (4)

また以下に、系統購入量削減率 50%以上を条件とした際の、投資回収年数が最短となる仕様を示す。このように、仕様を少しずつ変更しながら総当たりにシミュレーションすることで、目的に合致する最適な仕様を提案することができる。しかしながら、投資回収年数計算の際にはリチウムイオン電池の性能劣化は加味されておらず、完全に信用できる数値とは言えない。

Table 1 Appropriate specification based on payout time

引用元 : (3)

		House1	House2	House3	House4	House5	House6
Location	-	Tokyo	Tokyo	Tokyo	Hyogo	Tokyo	Saitama
Photovoltaic	kWp	2.52	4.9	1.8	2.94	3.78	1.75
Lithium-ion Battery	kWh	14.0	10.4	8.4	12.6	16.8	9.0
Payout time	year	32.6	25.2	27.3	27.0	25.6	32.5
Reduction rate	%	51.7	50.5	50.6	51.0	50.2	50.3
Total demand	kWh	1632.1	3099.4	1353.9	2144.5	2813.0	1126.2
PV generation	kWh	1132.7	2200.6	808.4	1492.4	1697.6	785.9
Total supply	kWh	790.2	1538.2	670.6	1053.1	1404.5	561.0
Maximum supply	kWh	1.38	4.05	0.86	2.08	1.34	1.34
Reverse power (Loss)	kWh	199.8	484.0	57.0	290.5	165.9	156.8

3. リチウムイオン電池劣化予測モデル

3・1 概要

本モデルは、島本卓也・田中竜太によって 2013 年度に開発されたものである。本モデルは、標準的な充放電サイクル試験と満充電保存試験を複数条件下で行った実験データを用いて劣化データベースを構築し、それに任意の電池運用パターン（経過日数、SOC、温度、C レート）を掛け合わせることで劣化量を算出する。また、容量劣化は、保存による劣化（ $\Delta Q_{\text{storage}}$ ）と電流が流れることによる劣化（ ΔQ_{cycle} ）の和によって表されるとし、各動作条件における劣化速度（即ち、劣化の微分係数）と滞在時間を下式のように積分することで総劣化量を求める。なお、SOC（State of Charge）は充電率、C レートは満充電容量当たりの電流量を指す。

$$\Delta Q(\text{Day}) = \Delta Q_{\text{storage}}(\text{Day}) + \Delta Q_{\text{cycle}}(\text{Day}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_{storage}(Day) = \int_0^{Day} \int_{SOC_L}^{SOC_H} \int_{T_L}^{T_H} \left(\int \frac{dQ_S(Day, SOC, T)}{dt} dt \right) dT dSOC dDay \quad (2)$$

$$\Delta Q_{cycle}(Day) = \int_0^{Day} \int_{SOC_L}^{SOC_H} \int_{T_L}^{T_H} \int_0^C \left(\int \frac{dQ_C(Day, SOC, T, C)}{dt} dt \right) dC dT dSOC dDay \quad (3)$$

また、実験データを用いて劣化速度データベースを構築する際、任意の電池運用パターンに対応するため、実験データを補間した。補間方法は、経過日数に関しては時間の累乗型、SOC に関してはエクスポネンシャル型、温度に関してはアレニウス則、C レートに関しては線形型をそれぞれ採用した。これらの補間方法は、化学反応を司る反応式や、電池セル実験結果を記した論文等をもとに決定された。以下に、本モデルの全体像を示す。

Fig. 4 Flowchart of estimation model for battery performance

引用元：(6)

3・2 適用例

本モデルの適用例として、モデルの検証結果を以下に示す。SOC 範囲が 0-100%の充放電サイクル試験結果を用いて手法の妥当性を確認したものである。実験値と予測値の R2 値は 0.98 と高く、本モデルは妥当であると言える。また、充放電サイクルと保存の両試験条件を表 2 に示す。このうち劣化速度データベース構築に使用した条件は、SOC 範囲 0-100%を除く全条件である。実験値の無い範囲は、上記のように補間した。

Table 2 Test conditions

Items	SOC	C-Rate	Temp.
Charge Discharge Cycle	5~25%	1C (CC)	25℃ 50℃
	25~45%		
	45~65%		
	65~85%		
	0~100%	1C (CCCV)	
0~100%			
Storage	100%(4.2V)	---	
	90%(4.1V)		
	80%(4.0V)

Fig. 5 Model validation

引用元 : (6)

4. 本研究にて構築したモデル

本研究では、これまでに述べた二つのモデルを統合することで、対象地域における再生可能エネルギーとリチウムイオン電池の導入量の決定からその劣化までを一括でシミュレーションできるモデルを構築した。以下に、本モデルの全体像を示す。

Fig. 6 Contents of integrated model

CSSD は、対象地域の電力需要データや気象データ等を用いて、仕様を変更しながら時間発展的なシミュレーションを繰り返し、評価関数に基づいた最適な仕様を提案する。その際、各仕様における各導入機器の電力推移も同時に記述する。即ち、当該仕様における“電池運用パターン”を記述する。これは電池劣化予測モデルのインプットのひとつであり、当データを入力することで、劣化速度データベースを参照しながら当運用パターンにおける電池劣化を算出する。本モデルはこれを一括で行うものであり、電池劣化を加味した評価値を算出することができる。

よって本モデルは、対象地域の電力需要データや気象データ、評価値算出用の各種料金データ、そして劣化速度データベース構築用の電池実験データを入力とし、劣化を加味した上での最適な仕様の提示を行う。劣化を加味して計算を行うことにより、より現実に則したシミュレーションを行うことが可能となり、投資判断等の意思決定を支援することができる。

5. ケーススタディ

ケーススタディとして、東北地方にある公共施設を対象とする。当施設は、利用者数の割に電気料金が高く、太陽光発電および蓄電池の導入による電気料金削減を目指している。よって、電気料金削減を主目的とした電池運用アルゴリズムを採用し、投資回収年数を評価関数とした。電力需要データは当該施設の1年間の実データ、気象データは気象庁ホームページに記載されているもの、電池劣化試験データは、3・2節にて述べたモデル検証用の実データを使用した。本電池劣化試験は、一般社団法人日本自動車研究所（JARI: Japan Automobile Research Institute）にて実施された、18650 型リチウムイオン電池（2.4Ah, LCO 正極, グラファイト負極）を対象としたものである。経済評価用に用いた各種料金データを以下に示す。

Table 3 Price data for economic evaluation

Items	Unit	Price
Unit price of Photovoltaic	¥/kW	300,000
Unit price of Lithium-ion Battery	¥/kWh	100,000
Contract fee	¥/kW	1,348
Electricity fee (daytime)	¥/kWh	14
Electricity fee (nighttime)	¥/kWh	9

以下に、各仕様における年間の従量料金削減率および契約料金削減率を示す。なお、現状は従量料金が154万円/年、契約料金が72万円/年である。

下記の数字を見ると、表4に示す従量料金は太陽光発電導入量に比例していることが分かる。これは、従量料金は購入した電力量の積算値によって決まるため、太陽光発電による自家製電力が増加するほど購入する電力を減らすことができるためである。一方、表5に示す契約料金は蓄電池導入量に比例して削減率が大きくなっている。これは、契約料金はピーク時の電力購入量によって決まるため、蓄電池を導入によりピークカット及びピークシフトが可能になればピーク時の電力購入量を小さくすることができるためである。

Table 4 Reduction rate of commodity fee

		Lithium-ion Battery [kWh]							
		0	20	40	60	80	100	120	140
PV [kW]	10	10.4	10.9	12.3	13.7	14.9	15.7	16.2	16.6
	20	20.4	21.1	22.5	23.6	24.4	25.0	25.4	25.7
	30	28.7	29.6	31.2	32.4	33.3	33.9	34.4	34.6
	40	35.0	36.0	37.8	39.3	40.5	41.4	42.1	42.6
	50	39.7	40.8	42.8	44.7	46.3	47.6	48.7	49.4

Table 5 Reduction rate of contract fee

		Lithium-ion Battery [kWh]							
		0	20	40	60	80	100	120	140
PV [kW]	10	1.4	9.0	13.5	17.5	21.5	25.1	28.6	31.7
	20	2.7	11.2	15.9	19.8	23.8	27.3	30.6	33.7
	30	3.7	13.4	18.0	22.1	26.0	29.4	32.6	35.7
	40	4.3	15.0	19.9	24.3	28.2	31.4	34.5	37.7
	50	5.0	16.0	21.8	26.3	30.2	33.4	36.5	39.7

以下に、各仕様における投資回収年数を示す。ここでの投資回収年数とは、初期投資額を毎年の電気料金削減額で除したものである。なお今回のシミュレーションでは、蓄電池導入量を 0kWh から 140kWh まで 20kWh 刻みで 8 通り、太陽光発電導入量を 10kW から 50kW まで 10kW 刻みの 5 通りとし、全 40 通りについてシミュレーションを行った。このように、仕様毎に評価値を算出し、意思決定を支援することができる。

Table 6 Payout time in each specification

		Lithium-ion Battery [kWh]							
		0	20	40	60	80	100	120	140
PV [kW]	10	13.3	15.6	18.9	21.1	23.4	25.4	27.3	29.3
	20	14.6	14.6	16.5	18.1	20.0	21.8	23.5	25.3
	30	16.2	15.4	16.9	18.1	19.7	21.1	22.6	24.1
	40	18.2	16.8	18.0	19.0	20.2	21.4	22.6	23.9
	50	20.3	18.5	19.4	20.1	21.1	22.1	23.1	24.2

また、以下に劣化を加味した場合と加味しない場合の投資回収年数の差を示す。投資回収年数の 5%程度の差が現れており、より現実に近い評価が可能となった。なお、太陽光発電導入量は 30kW で固定している。

Fig. 7 Difference between with and without degradation

最後に、東北以外で運用した場合の電池劣化を示す。対象となる公共施設が東北地方に在ったため上記のシミュレーション結果は全て当該地域での運用を想定したものであるが、他の地域の気象データを用いると、そこでの運用シミュレーションが可能である。今回は、東北地方以外に東京・沖縄の 2 県でシミュレーションを行った。その際の電池性能（容量）の経年推移が以下に示す図 8 である。なお、電力需要データは東北の公共施設のものをそのまま使用している。

図 8 から分かるように電池性能の劣化は温度によって大きく左右される。従って、沖縄で運用した場合が最も劣化が激しい。また、今回の劣化計算に用いた電池実験データは 18650 型リチウムイオン電池のものであり、図 8 に示す結果は、“18650 型リチウムイオン電池を使用した場合”のものである。これは、現時点で実験データを保有しているのが 18650 型のみであったためであり、今後様々な電池についての劣化試験結果が集まればその通りではない。

Fig. 8 Capacity estimation

6. 結 語

本研究において、CSSD とリチウムイオン電池劣化予測モデルの統合を行った。これにより、昨今再生可能エネルギーへの関心が高まるなかで、どれだけ再生可能エネルギーと蓄電池を導入すればよいかの検討を可能とし、さらに電池の性能劣化を加味することでより現実のオペレーションに則った検討が可能となった。

今後は両モデルの融合性をさらに高め、エネルギーマネジメントシステム導入の目的を達成しつつ電池を可能な限り劣化させないオペレーション方法等を提案できるシステムとしていきたい。

謝 辞

電池劣化試験データに関して、一般社団法人日本自動車研究所にご協力いただきました。関係者各位に対し、深く御礼申し上げます。

文 献

- (1) NEDO, “NEDO 二次電池技術開発ロードマップ (Battery RM2010)”, 2010
- (2) J. Vetter, “Aging mechanisms in lithium-ion batteries”, Journal of Power Sources, Vol. 147, pp. 269-281, 2005
- (3) EPRI, “EPRI Smart Grid Demonstration Initiative 5-Year Update”, 2013
- (4) 柴田一樹, “スマートハウスの仕様設計法と電力経営支援法の研究”, 東京大学卒業論文, 2011
- (5) 島本卓也, “リチウムイオン電池の残存性能評価における実験データ解析手法”, 東京大学卒業論文, 2013
- (6) 田中竜太, “リチウムイオン電池の任意運用パターンを想定した劣化予測に関する研究”, 東京大学総括寄付講座, 2013