住宅地型マイクログリッドの地域的な優位性の把握および予測モデルの構築* (運用段階における CO₂ 排出量の評価)

樋口 恭弘^{*1}, 齋藤 篤史^{*2}, 千田 二郎^{*3}

Prediction of Optimum High-Efficiency Devices Setting in Residential Micro Grid (Assessment of CO₂ Emission in the Stage of Operation)

Yasuhiro HIGUCHI^{*1}, Atsushi SAITO and Jiro SENDA

^{*1} Graduate School of Doshisha Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Tatara 1-3 Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

Microgrid is noticed as the system that can reduce CO₂ emission from residence area. Microgrid can absorb the fluctuation of electricity power which might be originated with several kinds of renewable energy, therefore it doesn't negatively affect the stability of utility grid. In addition, microgrid has a capability to control the heat-and-power ratio in demand and supply by optimizing the combination of several kinds of high efficiency residential devices in the area. However, here are few researches on this optimum combination of the eco-system devices. Therefore in this report, microgrid was evaluated in consideration for regional characteristics; those are 12 kinds of demand patterns and 3 kinds of electricity CO₂ emission coefficient. As a result of analysis, the region that has high heat-to-power ratio, large demand, and large capacity of photovoltaics makes much advantage of microgrid relating to CO₂ emission reduction.

Key Words : Energy Management, Engineering Optimization, Cogeneration, Distributed Generation, Solar Energy

1. 結 言

マイクログリッド (以下: MG) は適用される地域および住宅の特徴により CO₂ 排出量が異なる. そこで本研究では, 地域および住宅の特徴が MG の CO₂ 排出量に与える影響を把握し, 汎用的な予測モデルを構築することを目的とする. 本報では運用段階の CO₂ 排出量に着目し, 住宅地を対象とした MG を評価した. 比較対象として, 既存の住宅において最も CO₂ 排出量が低下する省エネ住宅 (以下: w/o MG) を想定した. また, 地域および住宅の特徴を 12 種類の需要形態, 3 種類の系統電源の CO₂ 排出係数 (以下: EEC), および 4 種類の太陽光発電 (以下: PV) の容量を設定することで模擬した. 導入する機器として, 4 種のコージェネレーションシステム (以下: CGS), PV, ヒートポンプ給湯器 (以下: HP), ならびに潜熱回収型ガス給湯器 (以下: LRWH) の計 7 種を想定した. 解析には最適化手法を用い, MG における機器の構成や, MG および w/o MG における運用計画の最適化により CO₂ 排出量を最小化した. さらに, 得られた結果から MG の優位性を予測する数式を構築した.

2. 解析条件

2・1 住宅形式

本報の MG は 100 軒の戸建住宅を想定した. 図 1 に本報で想定した MG の模式図を示す. 各戸に PV を導入し, 配置する 4 種の CGS, HP, および LRWH の機器構成を, 年間の CO₂ 排出量が最小となるように最適化した. また本報では, MG の比較対象となる w/o MG を想定した. PV を各戸に導入し, 4 種類の CGS, HP, および LRWH から CO₂

* 原稿受付 2011 年 8 月 26 日

^{*1} 学生員, 同志社大学大学院 工学研究科 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

^{*2} 東洋設計事務所 (株)

^{*3} 正員, フェロー, 同志社大学理工学部

E-mail: dtl0316@mail4.doshisha.ac.jp

排出量が最小となる機器を選定した。なお、w/o MG においては、PVによる電力のみ系統電源に売電可能とした。さらに、MGおよびw/o MGのCO₂削減量を評価するため、基準となる標準住宅を想定した。標準住宅には効率80%のガス給湯器（以下：WH）のみを設置した。

2・2 機器特性

本報で使用した機器として定格出力の異なる2種類の固体高分子形燃料電池CGS（以下：PEFC）、ガスエンジンCGS（以下：GE）、HP、LRWH、PV、蓄電池、およびWH、ならびに固体酸化物形燃料電池CGS（以下：SOFC）を想定した。なお、PEFCはそれぞれ定格出力が0.7kWおよび1.0kWであり、それぞれPEFC0.7ならびにPEFC1.0と記述する。表1に各機器の仕様を示す。また、全てのCGSにはガス給湯器が補助熱源として付属しており、CGSの回収熱量のみで熱需要を賄えない場合に稼働する。なお、全てのCGSおよびHPに付属している貯湯タンクの放熱損失は1%/hourとした⁽¹⁾。また、MGに設置する蓄電池の充放電効率を77%とした。PVの発電量は京都市南部における各月の平均日射量を使用して算出した⁽²⁾。

2・3 住宅および地域の特徴

本報では各戸にPVを設置した。各戸のPV容量を0kWから3kWまで変化させることで、地域によるPV容量の差異を模擬した。また、様々な地域における住宅の需要形態を模擬するため、文献（3）および文献（4）を参考として12通りの需要を作成した（図2）。例として需要番号10における各期の1時間毎の需要を図3に示す。さらに、地域による電源構成の差異を模擬するためEECを0.2、0.4、および0.6kg-CO₂/kWhとした。また、本報で使用されるガスは都市ガスとし、都市ガスのCO₂排出係数には2.23kg-CO₂/m³、発熱量には44.8MJ/m³（HHV）を用いた⁽⁵⁾。

3. 解析および評価手法

3・1 最適化手法および目的関数

MGの運用段階におけるCO₂排出量を最小化するため、以下のように定式化を行った。目的関数を（1）式とした。解析に用いた変数は、一日の各時刻における系統電源、CGS、HP、LRWH、蓄電池、および貯湯タンクの入出力、ならびに各機器の構成割合である。この最適化問題の計算にはMAPLEを用いた。

$$Z = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{24} (CO2E_{ij} + CO2G_{ij}) \times D_j \quad (1)$$

Z：年間のCO₂排出量[kg/year]，i：1-24[hour]，j：季節 1 夏期，2 冬期，3 中間期，CO2E：系統電源使用によるCO₂排出量[kg-CO₂]，CO2G：都市ガス使用によるCO₂排出量[kg-CO₂]，D：各期の日数[-]

Fig. 1 Schematic of microgrid

Table1 Specifications of devices

Device	Power generation [kW]	Generating efficiency [%] (HHV)	Heat recovery and heat output [kW]	Heat efficiency [%] and COP [-] (HHV)	Capacity of hot water storage tank [m ³]
Solid oxide fuel cell (SOFC)	0.7	41	0.61	36	0.20
Polymer electrolyte fuel cell (PEFC)	0.7	31.5	0.9	40.5	0.20
Gas engine (GE)	1.0	33	1.42	47	0.14
Heat pump water heater (HP)	1.0	20	2.85	57	0.37
Latent heat recovery type water heater (LRWH)			4.5	5.63(summer) 3.00(winter) 5.03(middle)	
Gas water heater (WH)			44.1	95	
			34.8	80

Fig.2 12 kinds of demand

Fig.3 Demand of residence (demand number 10)

3・2 制約条件

MG内の各機器の設置割合および各住宅における1時間毎の熱と電力の需給は、以下の制約式により定式化した。

$$PE7R + PE10R + SOR + GER + HPR + LRWHR = 1 \quad (2)$$

$$CGSEO_i - HPI_i + PVO_i + UE_i + BATO_i - BATI_i = ED_i \quad (3)$$

$$BATC_{i-1} - BATO_{i-1} + BATEf \times BATI_{i-1} = BATC_i \quad (4)$$

$$CGSHO_i + WHO_i - CGST_i + TEf \times CGST_{i-1} \geq HD_i \quad (5)$$

$$HPO_i - HPT_i + TEf \times HPT_{i-1} \geq HD_i \quad (6)$$

$$LRWHO_i \geq HD_i \quad (7)$$

$PE7R$: PEFC0.7 の設置割合[-], $PE10R$: PEFC1.0 の設置割合[-], SOR : SOFC の設置割合[-], GER : GE の設置割合[-], HPR : HP の設置割合[-], $LRWHR$: LRWH の設置割合[-], $CGSEO$: CGS の発電量[kWh], HPI : HP への投入電力量[kWh], PVO : PV の出力[kWh], UE : 系統電源使用量[kWh], $BATO$: 蓄電池の放電量[kWh], $BATI$: 蓄電池への充電量[kWh], ED : 電力需要[kWh], $BATC$: 蓄電池内の蓄電量[kWh], $BATEf$: 蓄電池の充放電効率[-], $CGSHO$: CGS の排熱回収量[kWh], WHO : 補助熱源出力[kWh], TEf : タンクの貯湯効率[-], $CGST$: CGS タンク内の熱量[kWh], HD : 熱需要[kWh], HPO : HP の出力[kWh], HPT : HP タンク内の熱量[kWh], $LRWHO$: LRWH の出力[kWh]

式 (2) は各機器の設置割合, 式 (3) は電力の需給, 式 (4) は蓄電池の入出力に関する制約条件である。式 (5) は CGS を選択した住宅の熱の需給に関する制約条件であり, 解析では 4 種類の CGS に関してそれぞれ用いて定式化を行った。式 (6) は HP を選択した住宅の熱の需給, 式 (7) は LRWH を選択した住宅の機器の熱の需給に関する制約条件である。また, 式 (2) から式 (7) 以外に機器の定格出力に関する制約条件を設けた。

3・3 マイクログリッドの評価方法

本報では, 標準住宅の CO₂ 排出量から MG もしくは w/o MG の CO₂ 排出量を減じた値をそれぞれ MG または w/o MG の CO₂ 削減量と定義した。さらに MG の CO₂ 削減量から w/o MG の CO₂ 削減量を減じた値を MG の優位性と定義した。本報の MG の評価においては MG の優位性を用いた。

4. 結 果

4・1 地域の特徴がマイクログリッドに与える影響

4・1・1 地域の特徴と優位性の関係

まず, 図 4 に熱電比と各熱電比において平均した MG の優位性の関係を示す。図 4 が示すように, 熱電比の増加に伴い MG の優位性が増大した。また優位性の増加量は EEC の上昇に伴い顕著になった。なお, 図 4 は需要の熱電比と優位性の関係を明確にするため, PV 容量が 0kW の場合のみを示した。次に図 5 に EEC と各 EEC において平均した MG の優位性の関係を示す。図 4 および図 5 が示すように, EEC の上昇に伴い優位性が増加した。

4・1・2 地域の特徴と機器構成の関係

最適化により決定された MG および w/o MG の機器構成について述べる。表 2 に EEC が 0.4kg-CO₂/kWh の場合における機器構成をまとめた。表中の比は, 各住宅形式および需要番号における HP, PEFC1.0, および SOFC の構成比率を示す。年間の総需要量が小さい場合, 熱電比の増加により, MG において, SOFC 中心の機器構成から, PEFC1.0 中心の機器構成を経て HP 中心の機器構成となった。年間の総需要量が多い場合, SOFC 中心の機器構成から, HP 中心の機器構成となった。また表 3 に EEC が 0.6kg-CO₂/kWh の場合における機器構成をまとめた。MG および w/o MG において, 年間の総需要量に関わらず, 熱電比の増加に伴い SOFC 中心の機器構成から,

PEFC1.0 中心の機器構成となった。なお、EEC が $0.2\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ の場合においては、MG および w/o MG の全条件下で HP のみが選ばれた。

4・2 我が国において予測されるマイクログリッドの優位性

解析から得られた結果を基に、各 PV 容量において年間の総需要量、需要の熱電比、および EEC を変数とした重回帰分析を行った。重回帰分析により得られた優位性の予測式を以下に示す。

$$Y_{PV0} = 0.00227x_{H+E} + 64.0x_{H/E} + 353x_{EEC} - 183 \quad (8)$$

$$Y_{PV1} = -0.00185x_{H+E} + 102x_{H/E} + 613x_{EEC} - 243 \quad (9)$$

$$Y_{PV2} = -0.0124x_{H+E} + 175x_{H/E} + 915x_{EEC} - 193 \quad (10)$$

$$Y_{PV3} = -0.0145x_{H+E} + 206x_{H/E} + 1.28 \times 10^3 x_{EEC} - 140 \quad (11)$$

Y_{PV0} , Y_{PV1} , Y_{PV2} , Y_{PV3} : 各 PV 容量における MG の優位性[$\text{kg-CO}_2/\text{year} \cdot \text{household}$], x_{H+E} : 熱と電気需要の和[$\text{kWh}/\text{household}$], $x_{H/E}$: 熱電比[-], x_{EEC} : 系統電源の CO_2 排出係数[$\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$]

式 (8) から (11) に 47 都道府県のデータを代入し、日本における MG の優位性を推定した。得られた結果を図 6 に示す。図 6 が示すように PV 容量の増加に伴い日本における MG の優位性は増加した。

5. 考 察

5・1 地域の特徴がマイクログリッドに与える影響

5・1・1 熱電比と優位性の関係

熱電比の上昇に伴う優位性の増加に関して考察する。表 2 および表 3 が示すように、MG は需要の熱電比に応じて複数の機器を組み合わせることが可能である。しかし w/o MG においては、電力の融通が不可能なため、機器の構成は単一となる。そのため、w/o MG が CGS を利用する場合、熱電比の増加に伴い補助給湯器の使用量が増加する。一方 MG においては、需要の熱電比に応じた機器構成を適用することで、CGS の出力のみで需要を賄うことが可能となる。また w/o MG において HP を利用する場合、熱電比の増加に伴う貯湯量の増大により放熱

Fig.4 Average advantage for heat-to-power ratio

Table 2 Choice of devices in MG
(EEC=0.4 $\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$)

Type	Demand number	1	2	3	4	5	6
MG	PV0	0:0:100	100:0:0	100:0:0	100:0:0	0:0:100	15:85:0
	PV1	0:0:100	100:0:0	100:0:0	100:0:0	0:0:100	45:55:0
	PV2	0:0:100	100:0:0	100:0:0	100:0:0	2:0:98	85:15:0
	PV3	11:0:89	100:0:0	100:0:0	100:0:0	10:0:90	100:0:0
w/o MG	PV0	0:0:100	0:100:0	100:0:0	100:0:0	0:0:100	0:100:0
	PV1-3	0:0:100	100:0:0	100:0:0	100:0:0	0:0:100	0:100:0
Type	Demand number	7	8	9	10	11	12
MG	PV0	78:22:0	100:0:0	0:0:100	27:0:73	41:59:0	58:42:0
	PV1	100:0:0	100:0:0	0:0:100	46:0:54	80:20:0	93:7:0
	PV2	100:0:0	100:0:0	0:0:100	65:0:35	100:0:0	100:0:0
	PV3	100:0:0	100:0:0	30:0:70	100:0:0	100:0:0	100:0:0
w/o MG	PV0	100:0:0	100:0:0	0:0:100	0:0:100	100:0:0	100:0:0
	PV1-3	100:0:0	100:0:0	0:0:100	0:100:0	100:0:0	100:0:0

Fig.5 Average advantage for EEC

Table 3 Choice of devices in MG
(EEC=0.6 $\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$)

Type	Demand number	1	2	3	4	5	6
MG	PV0	0:0:100	0:100:0	16:84:0	27:73:0	0:0:100	0:100:0
	PV1	0:0:100	1:99:0	23:77:0	39:61:0	0:0:100	5:95:0
	PV2	0:0:100	8:92:0	29:71:0	55:45:0	0:0:100	14:86:0
	PV3	0:0:100	15:85:0	47:53:0	71:29:0	0:0:100	23:77:0
w/o MG	PV0	0:0:100	0:100:0	0:100:0	0:100:0	0:0:100	0:100:0
	PV1-3	0:0:100	0:100:0	0:100:0	0:100:0	0:0:100	0:100:0
Type	Demand number	7	8	9	10	11	12
MG	PV0	30:70:0	39:61:0	0:0:100	17:0:83	33:0:67	43:57:0
	PV1	37:63:0	46:54:0	0:0:100	28:0:72	42:37:20	53:47:0
	PV2	45:55:0	62:38:0	0:0:100	39:0:61	55:45:0	65:35:0
	PV3	63:37:0	78:22:0	0:0:100	50:0:50	81:19:0	100:0:0
w/o MG	PV0	0:100:0	0:100:0	0:0:100	0:0:100	0:100:0	0:100:0
	PV1-3	0:100:0	0:100:0	0:0:100	0:100:0	0:100:0	0:100:0

Fig.6 Predicted advantage of MG in Japan

損失が増加する。しかしながら MG においては、HP は常時運転可能なため放熱損失を伴わない。以上の理由から、熱電比の増加に伴い MG の優位性が増加する。

5・1・2 CO₂排出係数と優位性の関係

まず PV 容量が 0kW の場合に注目し、EEC の増加に伴う MG の優位性の増加を考察する。MG においては CGS から HP に電力を供給可能なため、系統電源からの買電を抑制しつつ HP の使用が可能となる。よって表 3 が示すように、EEC が 0.6kg-CO₂/kWh の場合でも電力を消費する HP の導入が可能となる。そのため補助給湯器へのガス投入量が低下する。一方 w/o MG においては、熱電比の増減に関わらず、EEC の増加に伴い HP は選択されなくなる。そのため、補助給湯器の使用量が増加する。以上から、EEC の増加に伴い MG の優位性は増大する。

5・2 我が国においてマイクログリッドの優位性が得られる地域の特徴

図 6 より PV 容量が 0kW の場合において、全ての都道府県で優位性が得られた。特に北海道や沖縄において高い優位性が得られた。その理由として、北海道における需要の熱電比および EEC，ならびに沖縄における EEC が高いという点が考えられる。

6. 結 語

- (1) 需要の熱電比が高い地域において、MG の優位性は大きくなる。
- (2) EEC の増加に伴い MG の優位性が増大する。
- (3) 日本においては、北海道および沖縄において高い優位性が得られる。

謝 辞

本研究は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「ゼロエミッション技術を基盤とした環境調和型エネルギーグリッドの最適化研究」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 坂東茂, 渡辺裕己, 浅野浩志, 辻田伸介, “電力・熱負荷特性がマイクログリッドにおける電源システム機器容量設計に与える影響について”, 電気学会論文誌 B, Vol.128, No.1, (2008), pp.67-73.
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部, “アプリケーション (MET-PV3)”, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, http://www.nedo.go.jp/library/shiryou_application.html, (参照日 2010 年 9 月 9 日).
- (3) 新エネルギー財団編, “平成21年度 定置用燃料電池大規模実証事業報告書 (2010)”, p.22, 新エネルギー財団
- (4) 日本エネルギー学会編, “天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008 (2008)”, pp.64-69, 日本エネルギー学会.
- (5) 環境省, “算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧”, 環境省, <http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/itiran.pdf>, (参照日 2010 年 10 月 27 日).