集合住宅におけるマイクログリッドの一構成と特性検証

柿ヶ野浩明* 橋本卓也* 岩本和多留* 黒谷崇史* 三浦友史*
伊瀬敏史* 百瀬敏成**

A Configuration of DC Microgrid for Collective Housing and its Characteristics

Hiroaki Kakigano*, Takuya Hashimoto*, Wataru Iwamoto*, Takashi Kurotani*, Yushi Miura*
Toshifumi Ise*, Toshinari Momose**

Abstract - DC microgrid is a novel power system using dc distribution in order to provide a super high quality power. This dc system is suitable for dc output type distributed generations and energy storages. The dc power can be converted to required ac or dc voltages by load side converters, and these converters do not require transformers by choosing proper dc voltages (± 170 V). This distributed scheme of load side converters also contributes to provide supplying high quality power. In this research, we assumed one type of the dc microgrids for residential houses. All residences have distributed generations such as gas engine cogenerations or fuel cells. Those generations are connected to the dc power line, and the electricity from the generations can be shared among the residences. We constructed an experimental system based this concept in an experimental collective house (NEXT21). We studied the fundamental characteristics and the quality of the supplied power by using practical power line and some appliances. Experimental results demonstrated that the system could supply high quality power to the loads stably.

キーワード : マイクログリッド, 直流配電, 分散電源, 高品質電力

Keywords : microgrid, distributed generation, dc distribution, high quality power

1. はじめに

環境問題への取り組みとして太陽光発電やコージェネレーションなどの分散電源の導入が進んでいるが、これらの分散電源が多数連系されると配電線の電圧が変動するなど配電線の電圧管理が困難となる。この問題の解決法として、マイクログリッドの導入が挙げられ各地で実証研究が行われている[1]。現在のマイクログリッドは交流システムが主流であるが、直流システムであれば、連系に同期の必要もなく交流システムの擾乱時にも分散電源がトリップする可能性が低くなる等の利点がある。また、直流負荷に給電する場合はシステム全体で見たときに交直変換回数が少ないので高効率が見込まれ、停電した場合の無瞬断での自立運転も容易となる。

一方、近年安全・安心に対する意識と投資が必要な社会の構築が必要とされており、それに向けた科学技術の強化

が推進されている[2]。その重点課題の一つとして、耐災害性、信頼性の高い情報システムおよび情報ネットワークの構築が挙げられているが、これらの実現には高品質・高信頼な電力供給が必要不可欠である。

筆者らは、これまで直流配電を用いた超高品質電力供給を可能とする DC マイクログリッドを提案し、研究を行ってきた[3]。現在、その一構成例として各住戸に分散電源が設置された集合住宅等に適応可能なシステムの提案を行い、それに基づいた小規模実験システムを研究室に構築して実験を行っている[4]。本稿では、上記実験システムを集合住宅 NEXT21 の一室に移設し実配線を用いた実験を行ったので、その実験結果について報告する。

2. 想定するシステム

本研究で想定しているシステムの概念図を図 1 に示す。各戸にガスエンジン（燃料電池も可）を有する集合住宅(50～100 住戸)における DC マイクログリッドで、各戸の分散電源は棟内の直流配電線によって相互に接続されている。各分散電源は高効率を保つために部分負荷運転を行わず、定格運転による ON/OFF 制御を行う。余剰電力は直流配電線を通じて他の住戸に融通することが可能であり、これにより運転機会の増加が期待できる[5]。熱は各戸内で使用する

* 大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻
〒565-0871 吹田市山田丘 2-1
Division of Electrical, Electronic and Information Eng., Graduate
School of Eng., Osaka University

** 大阪ガス(株) エネルギー技術研究所
〒554-0051 大阪市此花区西島 6-19-9
Osaka Gas CO., LTD. Energy Technology Laboratories
6-19-9, Torishima Konohana-ku, Osaka, 554-0051

ることを想定しているが、隣接した住戸で共有することも可能である。基幹系統とは整流器を介して接続し、負荷へは各住戸に設置した変換器で単相 100 V の他、三相 200 V、直流 100 V など必要な電力形態に変換して供給することができる。

直流配電線には、二次電池や電気二重層キャパシタ (EDLC) などの電力貯蔵装置を接続することが可能であり、停電があった場合など、速やかに解列して棟内の電力供給を無瞬断で持続することが出来る。自立運転時の電力制御法としては種々の運用法が考えられるが、本研究では、棟内の発電電力の調節を分散電源の台数制御によって行い、過不足分については EDLC によって補償する方法を考えている。現在市販されている分散電源の多くは、起動または停止に数分～数時間かかるため、過不足分の補償に多くのエネルギーを必要とすることが予想されるが、本研究では起動・停止時間の短い分散電源を想定することで、電力貯蔵装置としては EDLC のみで自立運転が可能なシステムについて検討を行っている。本稿では、系統連系時における基本特性について調べるため、EDLC が接続されていないシステムでの検討を行っている。

3. 実験による特性検証

〈3・1〉 実験システムの構成 小規模直流システムの構成を図 2 に示す。基幹系統と直流配電線以外のほとんどの機器を NEXT21 の一室に設置し、住戸数が 3 戸からなるシステムを見立てて実験を行った。今回三相電力が得られなかったため、単相 100 V を変圧した単相 180 V を整流器にて直流 340 V に変換することとした。直流配電方式としては、 ± 170 V の二線と中性線の双極三線式を採用している。これは負荷側の単相 100 V の出力端の片側を現行の配電システムと同様に接地することができ、かつ配電線の対地電圧を ± 170 V と低く抑えることができるためである。各住戸はガスエンジンコージェネレーションを有していることを想定しているが、本実験ではガスエンジンを直流電源で模擬することとした。直流電源で模擬することの妥当性については、実機の出力特性の実験結果から、本システムの運用法のもとでは問題無いことを確認している。分散電源と直流配電線の間には dc/dc コンバータを接続して出力制御を行っている。負荷への電力供給については、1 戸はインバータを用いて交流単相 100 V に変換して供給し、残りは直流のまま電子負荷に接続した。また、各住戸には直流遮断器 (定格使用電圧 DC 600 V、定格電流 15 A) を設けている。

〈3・2〉 直流配電線 線路インピーダンスの影響について検討するため、集合住宅内に実際に直流配電線を設けた (図 3 に示す)。整流器から 2 つの住戸までの距離は約 100 m あるとし、さらに、住戸間の距離による影響を見るため 1 戸については他の住戸からさらに約 100 m 離れているとして、実験システムのある 3 階から地下 1 階までを往復させた。事前に行った線路インピーダンスの計算値は、整流器～住戸 1,2 間は 0.5Ω 、 $30 \mu\text{H}$ (導体公称断面積 5.5 mm^2 、

図 1 想定する DC マイクログリッドの概念図
Fig. 1. The concept of the proposal dc microgrid.

図 2 実験システムの構成
Fig. 2. Configuration of the experimental system.

図 3 直流配電線の簡略図
Fig. 3. Simple figure of the dc distribution line.

CV ケーブルの単位長 (1 km) あたりのインピーダンス $R: 4.34 \Omega$ 、 $\omega L: 0.110 \Omega$ (60 Hz) より [6])、また住戸 1,2～住戸 3 間は 1Ω 、 $30 \mu\text{H}$ (導体公称断面積 2 mm^2 、VVF ケーブルの単位長 (1 km) あたりのインピーダンス $R: 10.9 \Omega$ 、 $\omega L: 0.119 \Omega$ (60 Hz) より) であったが、実測した結果は整流器～住戸 1,2 間は 0.5Ω 、 $100 \mu\text{H}$ 、住戸 1,2～住戸 3 間は 0.8Ω 、 $100 \mu\text{H}$ と、抵抗値はほぼ計算通りとなったがインダクタンスが約 3 倍の値であった。これは計算では線路を直線として求めているが、実際は往路と復路の磁気結合のためインダクタンスが増加したと考えられる。

〈3・3〉 システムを構成する機器 以下にシステムを構成する機器についての概要と制御法について述べる。全体の回路図を図 3 に、主な回路定数を表 1 に示す。

〈3・3・1〉 単相整流器 基幹系統と接続する整流器は、直流配電線電圧が 340 V ($= 170 \text{ V} + 170 \text{ V}$) となるように電圧一定制御を行っている。回路および制御ブロックを図 5 に示す。電圧制御に用いている PI 制御の比例ゲインを 1 とし、

図4 実験システムの回路図
Fig. 4. Circuit of the experimental system.

図5 単相整流器の回路および制御ブロック
Fig.5 Circuit and control block of rectifier.

積分時間は1 sとした。また電流マイナーループの比例ゲインも1とした。

〈3・3・2〉 電圧バランサ 負荷の突入電流や非平衡負荷接続などに対応するために、電圧バランサを設けた。制御は、+170 V～GND間（正極側）とGND～-170 V間（負極側）の電圧をフィードバックし比例制御を行った[7]。

〈3・3・3〉 単相インバータ 負荷端で直流電力を単相交流100 Vに変換するためのインバータは、出力端の片側を直流配電線の中線とし、1レグによる回路構成としている。制御は、電流マイナーループを用いた電圧フィードバック制御を行っている[8]。

表1 主な回路定数
Table 1. Main parameters.

rectifier			
L_s	2 [mH]	C_s	10 [μ F]
C_{rec}	13500 [μ F]		
switching frequency		10 [kHz]	
voltage balancer			
L_1	2 [mH]	C_1	4700 [μ F]
switching frequency		10 [kHz]	
single phase inverter			
L_{inv}	2 [mH]	C_{inv}	18.3 [μ F]
C_2	12200 [μ F]		
switching frequency		9 [kHz]	
dc/dc converter			
L_{con}	5 [mH]	C_{con}	220 [μ F]
C_3	440[μ F]		
switching frequency		10 [kHz]	

〈3・3・4〉 dc/dc コンバータ マイクロガスエンジンコージェネレーションのほとんどは、一度直流に変換した後にインバータで交流連系している。研究室で使用している1 kW出力のガスエンジンの直流出力電圧は390～400 Vのため、そこから電力を取り出す際に直流配電線との間にdc/dcコンバータが必要となる。回路は中性線に対して対称となるように構成し、制御は出力電力が定格(1 kW)となるよう比例制御を行っている。ON/OFF時は、1秒かけて分散電源出力が0→1 kWまたは1→0 kWと変化するように制御を行う。ガスエンジンを模擬した直流電源の出力電圧は400 Vとした。

4. 実験結果

構築した実験システムを用いて、発電機の起動・停止や交流での負荷短絡試験など種々の実験を行った。本稿では、

図6 負荷のステップ変動に対する実験結果
Fig. 6. Experimental results of the step variation of load power.

図7 電圧バランサの効果（負荷は部屋の照明（蛍光灯））

Fig. 7. Effect of the voltage balancer.

表 2 各住戸の負荷と発電出力
Table 2. Condition of the experiments.

No.	Title	House 1		House 2		House 3	
		Load [kW]	DG [kW]	Load [kW]	DG [kW]	Load [kW]	DG [kW]
4-1	Load step variation	0 → 1.2	1	0.6	0	0.6	0
4-2	Effect of the balancer	OFF → ON	1	0.6	0	0.6	0
4-3	Appliances (Cleaner)	OFF → ON	1	0.6	0	0.6	0

負荷のステップ変動時と、電圧バランサの効果、および実負荷への電力供給の実験結果について述べる。それぞれの実験における各住戸の条件を表 2 に示す。

〈4・1〉 負荷のステップ変動変化 住戸 1 において分散電源が 1 kW 発電し他の住戸へ電力融通を行っている際に住戸 1 の負荷を 0→1.2 kW にステップ変化させた場合の結果を図 5 に示す。グラフは左上から整流器の交流側の電圧、電流と直流側の電圧、右上に住戸 1 の直流配電電圧と出力電圧の実効値と電流。左下に住戸 2 の直流電圧と電流、右下に住戸 3 の直流電圧と電流を示している。負荷の変化時に単相インバータの電圧実効値が変動しているが 101±6V の範囲内に収まっており、直流配電線電圧も安定していることが確認できる。住戸 2,3 の負荷電流の細かいスパイクはノイズによるものである（以降のデータについても同様）。

〈4・2〉 電圧バランサの効果 突入電流を発生する負荷（部屋の照明）に対する電圧バランサの動作についての実験結果を図 6 に示す。電圧バランサが無い場合、照明を ON した際の突入電流により正極側と負極側の電圧に不平衡が生じてしまうことを確認しているが、電圧バランサにより定常状態ではおよそ±170 V に収まっており、他の住戸への電力供給も問題が無いことが分かる。

〈4・3〉 実負荷への電力供給 単相インバータの出力 AC 100 V を部屋の分電盤に接続し、コンセントを通じて実負荷に電力供給を行った。負荷には、テレビ・暖房・冷蔵庫・洗濯機（洗濯物なし）・乾燥機（負荷無し）・掃除機などを試したが、いずれも問題なく動作した。負荷電流の最も大きい掃除機の始動時の波形を図 7 に示す。コンセント端での電圧実効値が大きく落ちているが、これはインバータからコンセントまでの線路インピーダンスによる電圧降下であり（実測値 1 Ω, 110 μH）、インバータ出力電圧は一瞬低下しているものの、定常的には 101±6 V を保って電力供給を行っている。

5. まとめ

本稿では、住宅別に設置された分散電源の電力融通を行う DC マイクログリッドの概念について述べ、集合住宅における実験結果について報告を行った。負荷のステップ変動、等の実験結果を通して、本システムが安定に電力供給可能であることが実配線により実証できた。今後は、電力貯蔵装

図 8 実負荷（掃除機）の実験結果
Fig. 8. Experimental results (cleaner).

置として EDLC を追加したシステムを構築し、自立運転時の挙動について実験による検討を行う予定である。

(2007 年 8 月 4 日発表)

文 献

- [1] S. Morozumi: "Micro-grid Demonstration Projects in Japan", The Fourth Power Conversion Conference, Japan, pp.635-642 (2007)
- [2] 安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会：「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」報告書 (2004-4)
- [3] 柿ヶ野浩明・三浦友史・伊瀬敏史・打田良平：「超高品質電力供給システム「DC マイクログリッド—システム構成と分散電源および電力貯蔵装置の電力制御法—」, 電学論 B, 126, 12, pp.1207-1214 (2006)
- [4] 柿ヶ野浩明・橋本卓也・岩本和多留・黒谷崇史・三浦友史・伊瀬敏史・百瀬敏成：「住戸別に設置された分散電源の電力融通を行う DC マイクログリッドのミニモデルによる特性検証」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究, PE-07-128/PSE-07-142 (2007)
- [5] 川崎章司・林泰弘・松木純也・友本篤志・宮本英樹・舟橋俊久・奥野義道・林孝則：「燃料電池設置型集合住宅での戸別間電力融通による最適な熱電併給運用」, 平成 19 年電気学会全大, 6-084 (2007)
- [6] 昭和電線ケーブルシステム株式会社ホームページ：<http://www.swcc.co.jp/cs/index.htm>
- [7] 柿ヶ野浩明・三浦友史・伊瀬敏史・打田良平：「超高品質電力供給を可能とする DC マイクログリッドにおける直流電圧制御」, 電学論 D, 127, 8, (2007) (掲載予定)
- [8] 灘香帆・柿ヶ野浩明・三浦友史・伊瀬敏史・打田良平：「超高品質電力供給を可能とする DC マイクログリッドの負荷側インバータの有効・無効電力制御」, パワーエレクトロニクス学会誌, Vol.32, JIPE-32-20, pp.156-162 (2007)

【質 疑】

(株) GS ユアサパワーサプライ 山口雅英氏

【質問 1】 バランサを付けて直流を両極性にするメリットは対地電圧以外にありますか。

【回答 1】 本研究では双極三線式の直流配電線を用いていますが、これは本文中で述べましたように「負荷側の単相 100 V の出力端の片側を現行の配電システムと同様に接地することができ、かつ配電線の対地電圧を±170 V と低く抑えることができるため」です。他の方法として、グラウンドに対してキャパシタ分圧して対地電圧を低く保ちつつ二線で電力供給を行うことも考えられると思います。しかし、その場合単相インバータの回路構成を 2 レグにする必要があります、部品点数の増加や電圧利用率の低下といったデメリットが生じます。

また、DC 100 V 付近の電圧を必要とする直流負荷に電力供給を行う場合、提案方式では+170 V～中性線間からチョップによりトランスレスで電力供給を行うことが出来ます。この場合も、電圧利用率が二線で行う場合に比べて高くなりますので高効率となることが期待されます。

【質問 2】 分散電源側でのバランス動作は想定されていますか。

【回答 2】 今回の実験システムでは、分散電源側でのバランス動作は行っておりませんが、分散電源の出力インターフェイスである DC/DC コンバータを用いた電圧バランス制御については、現在検討を行っています。DC/DC コンバータの回路を中性線に対して対称とした理由の一つは、その様な制御に対応することを想定したためです。

【質問 3】 (直流配電線に) インダクタンスも挿入されていますが、その影響は何がありますか(直流なので静的には関係ないですね)。

【回答 3】 これまでに、直流配電線のインダクタンスと変換器との相互干渉による電圧発振現象が報告されています。本研究でも、直流配電線のインダクタンスの影響について調べるため、NEXT21 で実配線を用いた実験を行うとともに、大学内で使用している模擬インピーダンスの妥当性について検討を行いました。結果としましては、直流配電線の導体断面積が小さかったため抵抗成分の影響が大きく、インダクタンスによる影響はほとんどみられませんでした。ただ、導体断面積が大きい場合や超伝導線を用いた場合などについては、インダクタンスの影響は無視できなくなると考えています。

【質問 4】 負荷急変時の電圧の応答(約一秒)は何によ

るものですか(整流器の制御時定数は 14 ms と短いので)。

【回答 4】 付図 1 に単相整流器の回路と制御ブロックを示します。講演資料では、電圧制御の比例ゲインと平滑キャパシタ容量から 14 ms と計算致しましたが、ご指摘を受けまして再検討しました結果、電圧制御の応答は主に PI 制御部の積分制御(積分時間 1 s)によるものと思われます。なお、講演資料では、「(単相整流器の) 直流電圧一定制御の制御時定数は 14 ms とした。」と述べておりましたが、ご指摘の通り適切でないため本論文では該当文を削除させて頂き、代わりに単相インバータの回路および制御ブロックを図 5 に示し、電圧ループと電流マイナーループのゲインおよび積分時間について本文中に記載しました。

東京工業大学 嶋田隆一先生

【質問 1】 実負荷試験で掃除機の場合があるが、マイクログリッドの問題点が表れていてよい。電動機のラッシュ電流などの対策が必要であることを示している。

【回答 1】 電動機(掃除機)の突入電流は今回実験した家電の中では最も電流値が大きく、インバータの過電流保護にかかってしまうこともありました。今回は家電一つ一つについて実験しましたが、実際の家庭では複数の家電が同時に接続されますので、負荷としてはさらに厳しくなることが予想されます。そのような状況下でも安定して電力供給可能なインバータの開発も行っていく予定です。

ヤンマー(株) 茂木進一氏

【質問 1】 図 6 ②の電流が負荷急変に置いて(軽→重)において減少している理由は何故でしょうか。

【回答 1】 本文中の図 6 の-0.2～0.5s の範囲について、単相整流器電圧・電流および有効電力・無効電力を拡大した図を付図 1 に示します(無効電力は進みを正に取っています)。整流器の有効電力が上昇し、逆に無効電力が減少していることが分かります。負荷急変(軽→重)に対して皮相電力が減少したため、交流側電流の振幅も減少する結果となりました。図 6 の結果についても同様です。

-0.2～0 s の無効電流の要因ですが、電流マイナーループの制御時定数を 2 ms (カットオフ周波数 80 Hz) としていたことによる電流指令値の追従遅れと、図 5 の e_m のローパスフィルタ(カットオフ周波数 1600 Hz)によるものです。

付図 1 負荷のステップ変動時の拡大図
(有効電力，無効電力含む)