

新エネルギー電源とパワーエレクトロニクス

伊瀬 敏史

大阪大学大学院工学研究科
電気電子情報工学専攻

概要: 太陽光発電、風力発電やコージェネレーションなどの新エネルギー発電を使うためには、必ず何らかの電力変換器を介する必要がある。このような電力変換器は高効率であること、系統の擾乱に対して強いことなどが求められる。また、新エネルギー発電は一般的に分散形の電源であり、このような電源を多数含む電力システムとしてマイクログリッドがある。本報告では、マトリクスコンバータによるガスエンジンコージェネレーションの系統連系、直流マイクログリッド、および交流側擾乱時のインバータの制御方式の研究を紹介する。

1. はじめに

大阪大学伊瀬研究室では環境低負荷の未来の電力システムのための技術の創造を目指し、「パワーエレクトロニクスと電気エネルギー」に関する研究を推進している。研究テーマとして、環境低負荷の分散電源を多数含む新しい電気エネルギー流通システムの研究、高効率電力変換器を備えた分散電源および電力貯蔵装置に関する研究、超伝導電力貯蔵装置、直流広域ネットワークなど超伝導の電力応用に関する研究、パワーエレクトロニクスによる電力系統制御装置に関する研究があるが、これらの分野はいずれも次世代パワー半導体デバイスの適用による効果が大きい有望な応用先である。以下では、これらの研究のうちで、マトリクスコンバータによるガスエンジンコージェネレーションの系統連系、直流マイクログリッド、および交流側擾乱時のインバータの制御方式の研究について成果を紹介を行う。

2. マトリクスコンバータによる

ガスエンジンコージェネレーションの系統連系¹⁾

GaNやSiCなどの次世代パワーデバイスの有望な応用先として分散電源用の電力変換器がある。本研究では分散電源の中でも家庭用の1 kW出力のガスエンジンコージェネレーションシステム(GES)に注目し、そのシステムの高効率化を目指している。検討対象の家庭用GESでは、マトリクスコンバータは出力周波数約300 Hzの永久磁石同期発電機であり、その出力を単相の60Hzあるいは50Hzの低圧配電線に接続する。そのために周波数および相数の変換が必要となるが、当研究室ではその電力変換器にマトリクスコンバータの適用を検討し、更なる高

効率化・小型化・長寿命化を行うことを目的としている。マトリクスコンバータとは、交流/直流/交流の順で電力を変換する間接型の周波数変換方式とは異なり、交流から交流に直接変換を行う周波数変換器である。マトリクスコンバータを適用することによって、(a)周波数変換器の損失低減、(b) 直流リンク部大容量キャパシタの省略による小型化・長寿命化、(c) 発電機の力率制御による発電機効率の向上、などが期待できる。

しかし、本GESは単相の系統に連系しなければならないため、単相電力に起因して系統周波数60Hzの場合には120Hzの電力脈動が発生する。一般のインバータでは直流部の大容量キャパシタによってこの電力脈動を吸収できるが、キャパシタを持たないマトリクスコンバータにおいてはその処理が問題となる。そこで我々は発電機回転子の慣性を利用してこの電力脈動を吸収する手法を提案してきた。しかし、この提案を実現するためには、三相側の瞬時電力を単相電力の脈動に応じて変調する制御方法の実現が課題であった。

この課題に対し、(1) マトリクスコンバータによる三相側電力の変調が、電流振幅変調法と力率変調法の二つの方法によってそれぞれ実現できることを回路シミュレーションによって示し、(2) 実際に製作したマトリクスコンバータ回路と、ガスエンジンを誘導電動機で模擬した電動機/発電機装置を用いて実験を行い、電流振幅変調法を実現し、発電機回転子の慣性によって電力脈動を吸収する提案手法を実証した。また、(3) 制御周期15 μ sのリアルタイムシミュレータを用いて仮想的なガスエンジン/発電機モデルを実現し、ガスエンジンのトルク脈動と電力変

調制御による発電機出力電圧の変動を模擬した運転条件下においても、接続されたマトリクスコンバータの実回路が安定に動作することを確認した、等の成果を得ることができた。

今後、次世代パワーデバイスによりパワーデバイスの高耐圧化・高効率化が進めば、分散電源だけではなく送配電システムへの応用が広がり、マトリクスコンバータは将来的には60Hzと50Hzの系統間の周波数変換所や配電システムにおけるループコントローラへの適用が考えられるようになる。当研究室でもこれら大容量電力変換器への適用も検討しており、配電システムのループコントローラをはじめとする系統連系への適用を想定したマトリクスコンバータについても回路および制御方式の検討を行っている²⁾。

3. 直流マイクログリッド³⁾

環境問題および省エネルギーへの関心の高まりを背景として、自然エネルギー発電やコージェネレーションなど分散電源の導入が進んでいる。更なる分散電源の導入促進のために系統への影響を緩和できるマイクログリッドと呼ばれる新しい電力供給システムの構築が挙げられる。太陽光発電や燃料電池等

の分散電源や、二次電池・電気二重層キャパシタ(EDLC)等の電力貯蔵装置は直流出力であり、またガスエンジンや風力発電などの回転機であっても一旦直流に変換した上で交流に変換されているものが多い。

そこで、当研究室では直流配電を用いたマイクログリッドを提案し研究を進めている。直流システムでは分散電源が連系する際に同期の必要が無いため、系統の瞬低時などの擾乱時に分散電源がトリップする可能性が低くなる。また、直流負荷に給電する場合はシステム全体で見たとときに交直変換の回数が少ないので高効率が見込まれる他、交流系統停電時の自立運転も容易である。現在、直流マイクログリッドの一構成として、各住戸に分散電源が設置された集合住宅等に適用可能なシステムを想定した研究を行っている。システムの概念図を図1に示す。また、学内に構築した実験用のミニモデルの外観を図2に示す。このようなミニモデルによる実験を通してシステムの系統連系運転および自立運転に関する制御方式を確立させた。これまでに研究を実施した項目を表1にまとめて示す。

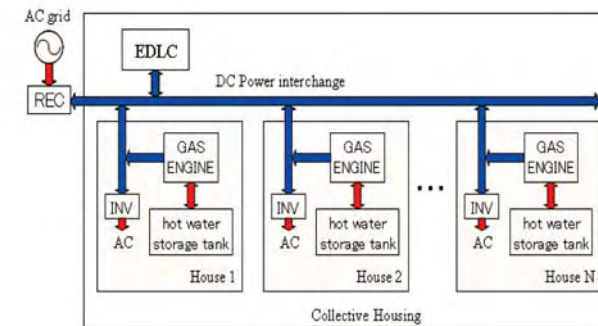


図1 直流マイクログリッドの一構成

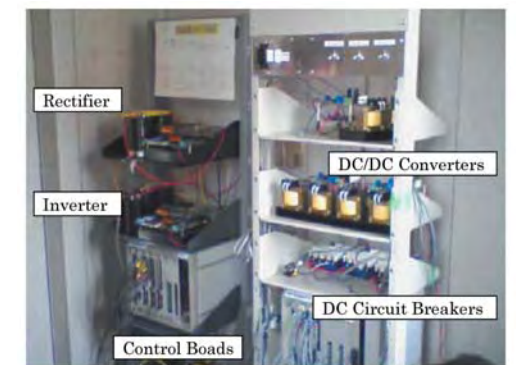


図2 実験システムの外観

表1. 直流マイクログリッドに関する研究実施項目

1. 運転制御技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 自立運転時の分散電源台数制御および直流電圧制御 EDLCを活用した連系運転時の制御法 連系運転と自立運転の切り替え制御
2. システム特性の改善	<ul style="list-style-type: none"> デッドビート制御を用いた負荷側インバータの開発 半導体リレー、高速リレーを用いた遮断器の検討
3. 安定性評価	<ul style="list-style-type: none"> 集合住宅規模の直流配電システムの安定性評価
4. 超伝導の適用検討	<ul style="list-style-type: none"> 超伝導導体の適用による損失低減の評価 超伝導導体適用時の安定性評価

これらの結果の中で、図1に示す各住戸を500Wのガスエンジン2台と負荷1つを有する集合住宅の1フロアと考え、自立運転時の各フロアの負荷を変動させる実験を行った結果を図3に示す。実験開始時、負荷はフロア3の750 Wのみが接続されており、ガスエンジンはフロア1の1台(500 W)が起動している。そのためEDLCからは約250 W出力されている。

(a) 負荷の増加

2 s付近でフロア1の単相負荷を0 → 500 Wにおよそ1秒かけて増加させた。それによりフロア1への入力電力 P_1 は -500 → 0 Wに変化し、 P_{EDLC} が増加している。 P_{EDLC} がしきい値の500 Wを越えるとフロア2のガスエンジンが1台起動し、この結果フロア2への入力電力 P_2 は0 → -500 Wとなり、 P_{EDLC} は約250 Wとなった。5 s付近で住戸2の直流負荷をステップ的に1000W増加させた。 P_{EDLC} が一時的に1250 Wまで増加し、ガスエンジンが新たに2台(フロア3および1それぞれ1台)起動している。その結果 P_3 が750 → 250 W、 P_1 が0 → -500 Wとなり P_{EDLC} は約250 Wとなった。

(b) 負荷の減少

8 s付近でフロア1の単相負荷を500 → 0 Wに減少させ始めた。それに伴い P_{EDLC} が減少し、しきい値である0 Wを下回ったときにフロア1のガスエンジンが1台停止し、その結果 P_1 が-500 → -1000 → -500W、 P_{EDLC} は250 Wとなった。12 s付近でフロア2の負荷を

ステップ的に0まで減少させた。 P_{EDLC} が一時的におよそ-750 Wまで減少し、ガスエンジンが2台(フロア2および3それぞれ1台)停止した。その結果、 P_2 が500 → -500 → 0 W、 P_3 が250 → 750 Wとなり、 P_{EDLC} は約250 Wとなった。負荷変動に対して P_{EDLC} が0 ~ 500 Wの間に収まるようにガスエンジンが起動・停止していることが分かる。これより、ランブ的・ステップ的な負荷変動いずれに対しても提案した台数制御が適切に動作していることが確認できた。また、負荷変動や住戸間の電力融通に対して各フロアの直流配電電圧もおおよそ±170 Vに保たれており、各住戸への安定した電力供給も確認できた。

4. 半導体チップ温度検出を用いた交流側擾乱時のインバータの制御方式⁴⁾

分散電源では瞬低などの交流側擾乱時にインバータにおいて過電流が起こりうる。インバータが過電流保護を有している場合は、インバータの半導体素子を過電流による過熱破壊から防ぐためにインバータが停止し電力供給が停止する場合がある。過電流が流れている際にはインバータの出力電流をある一定値に制限する手法があるが、信頼性を重視して設計すると大きめの電流定格の半導体素子を用いることになり半導体素子の定格を十分に生かすことができない。そこで過電流の際に、インバータの半導体素子において熱定格に余裕があ

る場合は電流リミッタを上げ、熱定格に達した場合は電流リミッタを下げるというインバータの制御方式が考えられる。

本研究では半導体素子の温度検出機能を有するIPM(Intelligent Power Module)をインバータ部に用いてIGBTの温度に応じて電流リミッタをダイナミックに変化させることにより、IGBTの熱定格を最大限に生かした制御アルゴリズムを提案し、その効果を製作した分散電源の模擬回路による実験で検証を行った。IPMとは、電力を制御するIGBTなどのパワーデバイスとその駆動回路や自己保護機能を組み込んだパワーモジュールである。IPMは温度測定用ダイオードがIGBTと1チップ化されており、過熱保護機能を有する。過熱保護は標準145°Cでトリップするが、トリップして1.8ms後に125°C以下であればリセットされ、再びスイッチング可能となる。IPMは保護回路からのトリガ信号を受けると、内部の保護回路の状態をセットし、エラー信号(フォールト信号)を出力すると同時に、制御入力信号を無効にして駆動回路を停止させる。そこで今回電流リミッタのダイナミック制御として、エラー信号をフィードバックし、図4に示すように瞬低直後は初期設定の電流リミッタで過電流を抑制し、エラー信号が検出されれば電流リミッタを下げる、エラー信号が検出されなければ電流リミッタを上げるというように段階的に電流リミッタを変化させて過電流を抑制する手法を提案し、その効果を実験により検証した。電流リミッタの変化範囲には上限、下限を設け、上限は初期設定値、下限は誘導電動機投入後の定常状態の電流値を考慮して設定する。半導体素子の温度をフィード

バックすることが出来ればさらにきめ細かく電流リミッタを制御することも可能である。

5. むすび

以上、大阪大学伊瀬研究室における新エネルギー電源とパワーエレクトロニクスに関する研究の一端を示した。当研究室では、基幹系統におけるパワーエレクトロニクスについても研究を進めている。いずれの分野においても、新しい半導体を用いたパワーデバイスの出現によって、より低損失で頑強なものが実現でき、大きな適用効果が期待できる。

参考文献

[1] 堀江悟史, 三浦友史, 伊瀬敏史, 百瀬敏成, 佐藤裕紀「三相-単相マトリックスコンバータで系統連系されたガスエンジンコージェネレーションの発電効率評価」電気学会電力技術 電力系統技術 半導体電力変換技術合同研究会資料, PE-09-36, PSE-09-44, SPC-09-78 (2009)

[2] 芦田剛, 三浦友史, 伊瀬敏史「異系統連系のためのマトリックスコンバータの検討」電気学会電力技術 電力系統技術 半導体電力変換技術合同研究会資料, PE-09-37, PSE-09-45, SPC-09-79 (2009)

[3] H.Kakigano, Y.Miura, T.Ise, T.Momose, H.Hayakawa " Fundamental characteristics of DC microgrid for residential houses with cogeneration system in each house" IEEE Power and Energy Society General Meeting, 20-24 July 2008

[4] 河野佑介, 小川優里, 三浦友史, 伊瀬敏史, 杉本重幸「半導体チップ温度検出を用いた交流側擾乱時の運転継続のためのインバータ制御法」電気学会電力技術 電力系統技術 半導体電力変換技術合同研究会資料, PE-09-41, PSE-09-49, SPC-09-83 (2009)

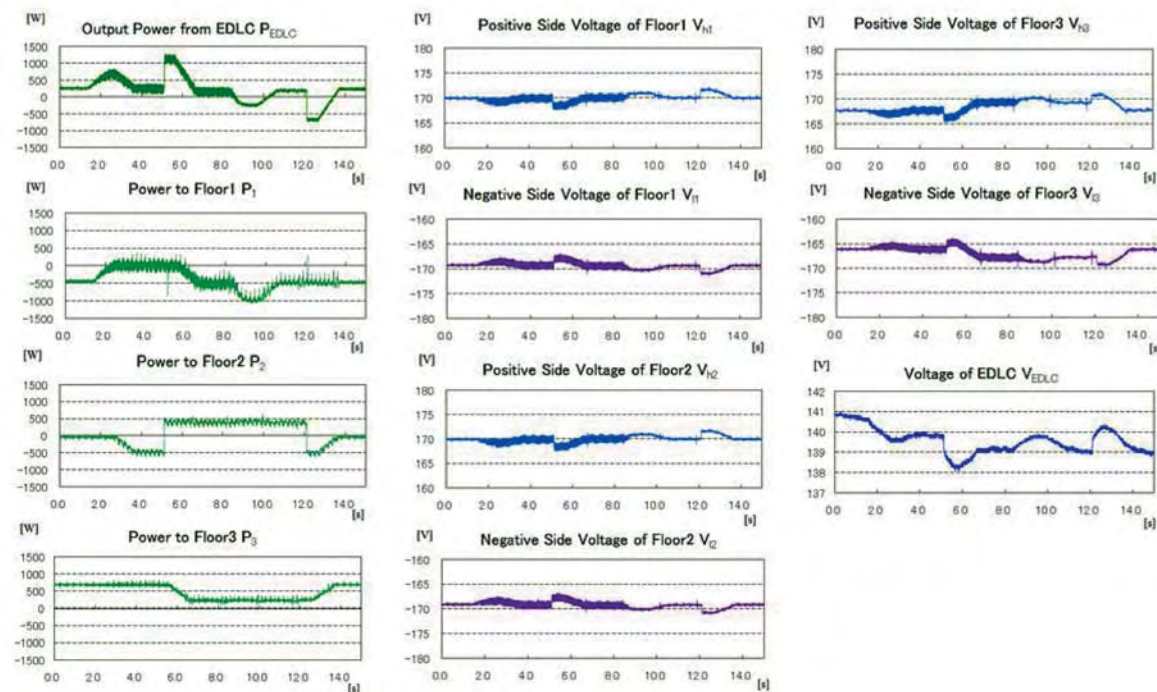


図3 自立運転時の実験波形

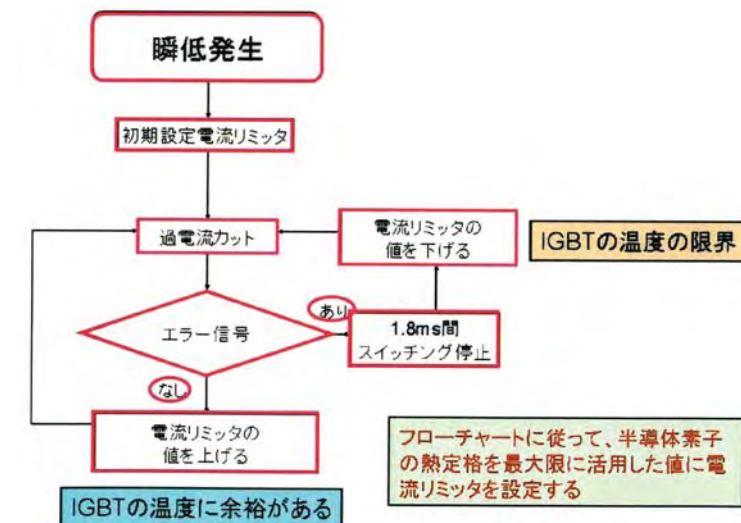


図4 電流リミッタダイナミック制御のアルゴリズム