

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築
のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」

研究課題「パワーデバイスレベルまで考慮した高精度なシミュレーション技術に関する基礎的理論および方法論の構築」

研究終了報告書

研究期間 平成25年10月～平成27年3月

研究代表者：造賀 芳文
(広島大学大学院工学研究院、
准教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究では、本 EMS 領域の目指す「分散協調型 EMS」としての電力システム、大量導入されるパワエレ機器およびパワーデバイスの各領域を見通すことのできるような、高精度かつ効率的なシミュレーション解析技術の基礎的理論・方法論の構築を目指して、種々の検討を行うことを目的として研究を行った。また、今後も進む太陽光発電(PV)の大量導入を見据え、EMS 領域で必須となると考えられる「より柔軟で高度な制御」が要求されるパワエレ機器について、特に疑似同期化インバータに関する研究を行った。

具体的には、研究テーマを主に 3 つに分けて、提案するシミュレーション技術の有効性評価および簡易検証実験による検証を行った。

- ① パワーデバイスのハイスピードかつ高精度なシミュレーション解析法の開発
- ② 高精度なパワーデバイスモデルを活用したパワエレ回路設計法の開発と簡易検証実験
- ③ 事故時等の過渡状態を考慮した電力システムシミュレーション解析法の検討

① パワーデバイスのハイスピードかつ高精度なシミュレーション解析法の開発

パワーデバイス単体及び誘導負荷回路の測定を複数条件下で行い、HiSIM モデル(広島大学で開発された半導体デバイスモデルの総称: <http://www.hisim.hiroshima-u.ac.jp/>) のパラメータを決定し、実測値を広範囲で再現できることを確認した。その結果、誘導負荷を取り替えてもモデルの再調整の必要なく、波形及びエネルギー損失値を十分な精度で予測できることが確認された。この際、②でのパワエレ回路設計の準備として、誘導負荷回路の試作も行った。次年度では、②と③との連携による一気通貫シミュレーションに焦点を絞り、それに最も適した MATLAB/Simulink 環境でのモデルの開発を行った。試行錯誤の末、モデルの実装方法の最適化により、シミュレーションの安定性とスピードを改善することができた。この結果、HiSIM モデルを使用した系統事故の瞬時値解析や疑似同期化力制御等が可能になった。

② 高精度なパワーデバイスモデルを活用したパワエレ回路設計法の開発と簡易検証実験

①と連携をとり、最近注目されている双方向絶縁型 DC/DC コンバータ回路を対象として、開発した HiSIM モデルを用いたシミュレーションを実施し、デバイス構造や回路中のコンポーネントの値を最適化することによってコンバータの変換効率が最適化できることを実証した。実際に 98% の高い変換効率を実現しており、得られた回路設計法はインバータ等にも応用可能である。

次に、共通プラットフォームとして決定した MATLAB/Simulink 上で、理想パワーデバイスモデルを用いた三相 PWM インバータ回路を作成し、回転機と同等にふるまう疑似同期化力インバータを開発した。特に、③の電力システムの事故シミュレーションが柔軟にできるようインバータのパラメータ設計自由度を高める工夫を行った。具体的には、発電機の慣性定数に相当する係数等を可変できるようにしたことなどが挙げられる。

シミュレーション解析と同時に、高精度なシミュレーション技術に関する基礎的理論の構築のためには比較評価用の実測データが必要となる。そこで検証用実験環境の構築を行い、構築した実験環境が正常に機能することを確認するための簡易検証実験を行った。具体的には、インバータ・コントローラのプログラムを C 言語で記述した上で制御信号生成システムに実装し、実際にインバータを駆動させた。このとき、インバータ上のパワーデバイスへと入力される制御信号やインバータ出力電圧・電流を測定機器にて実測し、シミュレーションにより得られた理論値との比較検証が可能であることを確認した。また、小容量のインバータを試作し、市販インバータよりも詳細なデータが取得できることを確認した。

③ 過渡状態を考慮した電力システムシミュレーション解析法の検討

電力システムシミュレーション解析法の高速度および効率化のためにはシミュレーション結果と実験結果を比較し、比較結果に基づいて解析法を改良することが重要と考え、②で実施したシミュレーションおよび実験環境を拡張したテストシステムモデルを検討し、疑似同期化力インバータを用いた事故時シミュレーションの実施および実証実験との比較を行った。まず、同期機 2 台とインバータが連系された小規模電力システムを実験環境上に構築した。構築した電力システムは同期機と負荷の設定を調整することで再生可能エネルギーが大量導入された状態を模擬しており、②にて開発・改良されたインバータ制御系を実装したインバータユニットを系統へ連系させた上で事故を起こし、

同期機とインバータの挙動を実測した。実験においては事故時の同期機とインバータの過渡応答が模擬できていることを測定結果に基づき確認しており、電力システムシミュレーション解析法との比較が可能な環境の構築を完了した。また、実験における発電機やインバータ出力等の各種実測データに対する過渡解析により、開発したインバータ制御系が電力システムの安定化に寄与することを明らかにした。さらに、過酷な事故においてシステムを安定化させるためにはインバータ容量が増加することを確認しており、再生可能エネルギーが大量導入された EMS における事故をシミュレーションにより高精度に推定し、疑似同期化力インバータに対する容量等の各種要件を適切に設定してインバータの設計段階に活かすべきという知見を得た。また、①で開発した高精度モデルを用いた事故時シミュレーションを実施し、事故時の過負荷や制御がデバイスに与える影響、及び出力特性に与える影響を定量的に解析できることを示した。

以上の結果は、デバイスレベルからシステムまで考慮した一貫通貫のシミュレーション体系を整備する一助になると考える。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. MATLAB 環境で異分野連携を可能にする高精度デバイスモデルの開発
SPICE では非線形連立方程式を各時間ステップで厳密に解くため、時間ステップ幅が短くなり、計算時間が増大したり、時間ステップの制御がうまくいかず発散したりしてしまうことが多々ある。一方、本研究では SPICE 環境と同程度の精度のデバイスモデルを、異分野連携に適した MATLAB/Simulink 環境において、任意の時間ステップで発散することなく安定的に動作させることに成功した。
2. 高精度デバイスモデルを用いた迅速な最適回路設計手法
回路設計用デバイスモデル HiSIM_HV を用いて、市販のデバイスを使用して DC/DC コンバータの設計をシミュレーションベースで実施し、98% の高い変換効率を実現した。このシミュレーションツールを用いて、用途に合わせた様々な変換仕様に対して迅速な初期設計が可能になると同時に、用いるデバイスや回路中のコンポーネントの最適化も可能になる。DC/DC 変換から更に DC/AC 変換への接続も可能で、電力最適制御シミュレーション実現の可能性を開いた。
3. 分散協調 EMS 対応型パワエレ設計法に対する知見
パワエレ機器により模擬された試作仮想回転機の実運用においては、パワエレ機器容量、特にデバイス容量に関する制約が課題となるとの知見を得ており、分散協調 EMS 対応型パワエレ設計法として、パワーデバイスレベルまで考慮したパワエレ機器の設計の重要性を明らかにした。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. HiSIM モデルを用いた高精度な制御系設計環境の提案
本研究で開発した、デバイスレベルまで考慮した制御系や電力システムを含むシミュレーション環境は、出力電圧や電力ロスの正確な予測に基づいた高精度な制御系の開発を可能し、パワエレ機器の実効的な変換効率や事故時の振る舞いを改善する高度な制御技術の開発に寄与すると期待される。また、自動車開発等の電動機駆動制御の分野にも貢献できる。
2. パワエレ機器を含む EMS 事故/緊急時シミュレーション
都市部や未電化地域など EMS 構成に依らない多様なスマートグリッドシステムに対して、事故/緊急時のシミュレーション解析を確実に行うことができる。事故/緊急時における安定したエネルギー供給は必要不可欠であり、本解析はこれらの特異状態においても解析を実施することができる。特に、本研究で開発した疑似同期化力インバータはこのような不安定な事象に対して頑健なパワエレ機器となりうる。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 研究代表者(造賀)グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
造賀 芳文	広島大学大学院工学研究院	准教授	H25.10～
三宅 正堯	広島大学 HiSIM 研究センター	准教授	H25.10～
佐々木 豊	広島大学大学院工学研究院	助教	H25.10～
Mattausch Hans Jürgen	広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所	教授	H25.10～
三浦 道子	広島大学大学院先端物質科学研究科	教授	H25.10～
餘利野 直人	広島大学大学院工学研究院	教授	H25.10～
関崎 真也	同上	特任助教	H25.10～
渡辺 文雄	広島大学技術センター	技術班長	H25.10～

研究項目

(本チームは、研究代表者グループのみから構成されます。)

- パワーデバイスの物理法則に基づいた高速かつ効率的なシミュレーション解析法のための基礎的理論の構築およびそれを利用したパワエレ機器の解析・設計を含む、効率的な電力システム解析手法の構築を目指してさまざまな検討を行う。

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

(研究チーム外での連携や協働についてご記入ください。ライフ分野では臨床医等を含みます。)

① MathWorks Japan (マスワークス合同会社)

MATLAB®/Simulink®の開発会社の日本法人である MathWorks Japan (マスワークス合同会社: 〒107-0052 東京都港区赤坂 4 丁目 15-1 赤坂ガーデンシティ 7F) とは、連携に関する会議も開催し、かつ日常的に情報交換を行ってモデル開発を進めており、現在も引き続き連携をとっている。

また、年に 1 回開催されている MathWorks EXPO において、我々の研究内容についての招待講演を依頼され、2014 (平成 26 年) 10 月 29 日 (水) に東京・台場のホテルグランパシフィック LE DAIBA にて、代表者の造賀およびデバイスモデル担当の三宅が講演を担当した。

② Myway プラス株式会社

本チームでは、Myway プラス株式会社 (本社: 〒220-0022 神奈川県横浜市西区花咲町 6-145 横浜花咲ビル) からパワエレ機器関連の実験機器の一部を購入しているが、本研究テーマについての連携に関する会議も開催し、かつ日常的に情報交換を行っており、現在も引き続き連携をとっている。

③ オムロン株式会社

太陽光発電などに利用されるパワーコンディショナの主要メーカーであるオムロン株式会社 (本社: 〒600-8530 京都市下京区塩小路通堀川東入) とは、主に配電系の EMS について情報交換を行い連携をとっている。2014 (平成 26 年) 9 月 22 日 (月) には、環境事業本部・経営基幹職 (工学博

士)である緒方司郎様に広島大学にてご講演いただき、主に配電システムの制御における今後の技術動向について、特にパワーコンディショナの役割などについての意見交換を行った。

④株式会社計測技術研究所

広島大学では双方向電源(EMS 簡易模擬装置)を設置しているが、今後の研究展開を想定して本研究で用いた簡易実証試験設備との連系システムを構築している。全体システムに関する意見交換、本研究の実施内容などを含めて、平成 26 年 11 月に広島大学において打ち合わせ会議を実施した。本打ち合わせ内容は(株)計測技術研究所の Web サイト

<http://www.keisoku.co.jp/pw/case-ex/case-ex.html>

内で公開される予定である。

⑤サイバネットシステム株式会社(日本ケイデンス・デザイン・システムズ社)

本チームでは、連成環境の構築に向けて、MATLAB/Simulink 以外のツールとして、サイバネットシステム株式会社(本社:〒101-0022 東京都千代田区神田練塀町 3 番地 富士ソフトビル)から連成ツール関連のソフトウェアを購入しているが、本研究テーマについての連携に関する会議(平成 25 年 2 月本社訪問, メール打ち合わせ)も開催し、かつ日常的に情報交換を行っている。なお、平成 26 年 12 月からは購入ソフトウェアサポートが日本ケイデンス・デザイン・システムズ社(本社:〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 2-100-45 新横浜中央ビル)に移管される。

④ FS 井村チーム

第 1 フェーズ, 第 2 フェーズを通じて, FS 主要メンバーである

- 井村順一先生(東京工業大学・教授),
- 植田譲先生(東京理科大学・講師),
- 大関崇様(産業技術総合研究所・主任研究員),
- 益田泰輔様(エネルギー総合工学研究所・主任研究員),
- 中島映至先生(東京大学・教授),
- 鈴木秀幸(東京大学・准教授),
- 太田快人(京都大学・教授),
- 服部将之様((株)ダイヘン分散電源システム事業部・グループ長),
- 杉原英治先生(大阪大学・准教授),
- 山口順之様(電力中央研究所・主任研究員),
- 東俊一先生(京都大学・准教授),
- 津村幸治先生(東京大学・准教授)

上記の方々, および各グループの研究者の方々とは, 密に連絡をとり, 連携を深めている。FS の主要行事としては, 泊まり込みの合宿形式 1 回を含む計 6 回の会議を開催しており, その他, インターネットテレビ会議, メールでの討論など, 多くの議論が活発に行われた。引き続き, 連携を進めていく予定である。

⑤ FS 藤崎チーム

第 2 フェーズからの参加となったが, FS 主要メンバーである

- 上田博先生(名古屋大学・教授)
- 森西洋平先生(名古屋工業大学・教授)
- 杉原 英治 先生(大阪大学・准教授)
- 薄 良彦 先生(京都大学・講師)
- 藤崎 泰正 先生(大阪大学・教授)
- 土屋 達弘 先生(大阪大学・教授)

上記の方々, および各グループの研究者の方々とは, 密に連絡をとり, 連携を深めている。FS 会議を計 6 回開催し, また頻繁にメールでの議論などが活発に行われた。また, 国際シンポジウムも共同主催し, 国際連携も積極的に進んできた。引き続き, 連携を進めていく予定である。

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 パワーデバイスのハイスピードかつ高精度なシミュレーション解析法の開発

(広島大学 造賀グループ デバイス担当)

(1)研究実施内容及び成果

<目的>

再生可能エネルギー電源大量導入後の電力システムおよびEMSにおいて想定される系統事故時の問題解決のために、パワエレ機器の高度な制御(疑似同期化力制御など)が必要とされている。制御系のシミュレーションを行う際に、パワー半導体デバイスは単純な理想スイッチとしてモデル化されるのが通常であり、演算時間の都合から見れば適切である。しかし、事故時の瞬時の制御によって、デバイスには過負荷がかかり、静的なデバイス特性のみならず、動的なデバイス特性にも大きな影響が想定され、制御への想定外のフィードバックだけでなく、デバイスやパワエレ機器の損傷等の危険も懸念される。これらの懸念について定量的に評価し、制御系の適切な設計を保証するために、高精度なパワー半導体デバイスモデルをシステムレベルのシミュレーション環境で開発することを目的とした。これにより、以下のような一気通貫したシミュレーションによる異分野連携が可能になった。

- ・パワエレ機器中のデバイスの応答を正確に考慮した、系統事故時等の制御系の設計。
- ・系統事故やその際の制御が与える過負荷等に対する、デバイス特性の診断(解析)。

<実施内容>

I. 実デバイスへのモデルの適用 これまでに開発してきた高精度パワーデバイスモデル HiSIM_HV を用いて、電力変換等の基本回路について回路中のコンポーネントを選定することによって回路性能の最適化が可能であることを実測値との比較で検証した(原著論文発 1.)。具体的には、まず、デバイス単体の実測値を用いてパワーデバイスモデルのパラメータの一部を決定し、実測値を再現できることを確認した。次に、図 3.1.1 に示す誘導負荷スイッチングテスト回路を用いて基本動作波形の測定を行い、図3.1.2に一例を示すようにモデルとの比較・評価を行い、残りのパラメータを決定した。この結果、表 3.1.1 に概要を示す通り、負荷インダクタを取り替えてもモデルの再調整の必要なく、波形及びエネルギー損失値を十分な精度で予測できることが確認された。また、パワエレ回路設計の準備として、図 3.1.2 の測定に用いた誘導負荷回路(図 3.1.1)の試作も併せて行った。

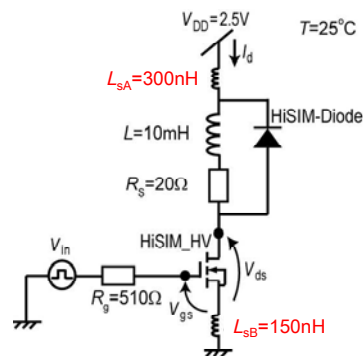


図 3.1.1 誘導負荷スイッチングテスト回路

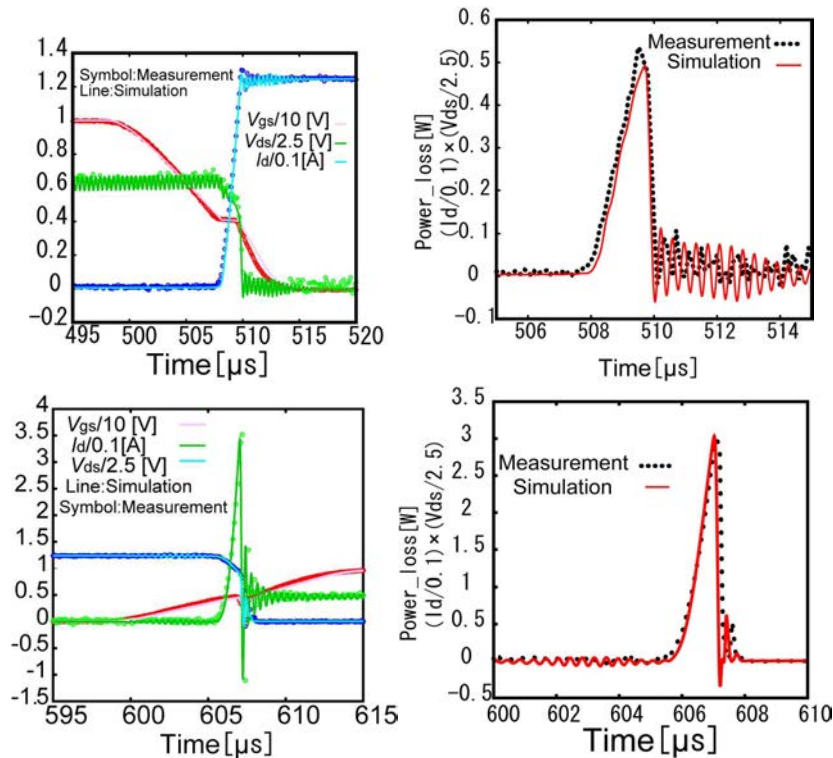


図 3.1.2 第一次試作回路のシミュレーション結果と測定結果の比較

表 3.1.1 スイッチング時のエネルギー損失及び予測誤差のまとめ

L_{load} [mH]	Turn-off Turn-on	(Switching Loss) × 10 ⁻⁷ [J]		Error [%]
		Simulation	Measurement	
5.0	Turn-off	2.44	2.70	9.6
	Turn-on	7.72	7.93	2.6
10	Turn-off	1.32	1.43	7.6
	Turn-on	5.91	5.92	0.16
20	Turn-off	0.493	0.517	4.6
	Turn-on	2.77	2.60	-6.5

II. 一貫通シミュレーションのために、MATLAB/Simulink の SimPowerSystems 環境でモデルを開発した。動作の安定化と高速化に必要なモデルの実装方法の最適化を行った。

III. SPICE との比較による実装検証 開発したモデルの検証のために、SPICE によるシミュレーション結果との比較を行った。図 3.1.5 に実測、SPICE、MATLAB によるパワー半導体デバイスモデルの電流・電圧特性の比較を示す。次に、図 3.1.1 に示した誘導負荷スイッチングテスト回路を用いて SPICE と MATLAB それぞれでシミュレーションした結果を図 3.1.6 で比較する。電流・電圧特性はよく一致しており、スイッチング特性も概ね一致している。ただし、ドレイン電流 I_d に見られる、ダイオードのリバースリカバリー特性によるピーク値が SPICE のほうが大きいのは、SPICE 環境では厳密な収束解を得るためにタイムステップが非常に細かく刻まれたためである。

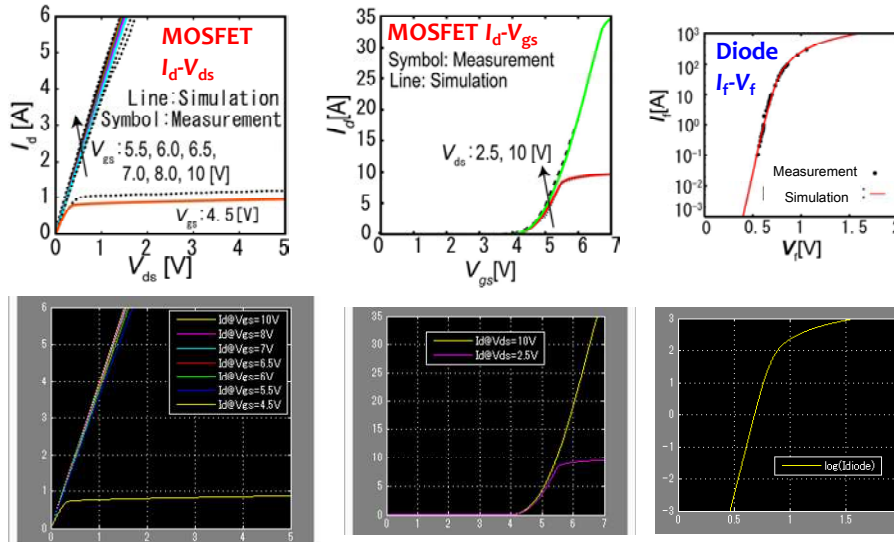


図 3.1.5 デバイス単体特性の SPICE(上段)と MATLAB/Simulink(下段)による結果の比較

SPICE3f5による結果 ⇔ MATLAB®/Simulink®による結果

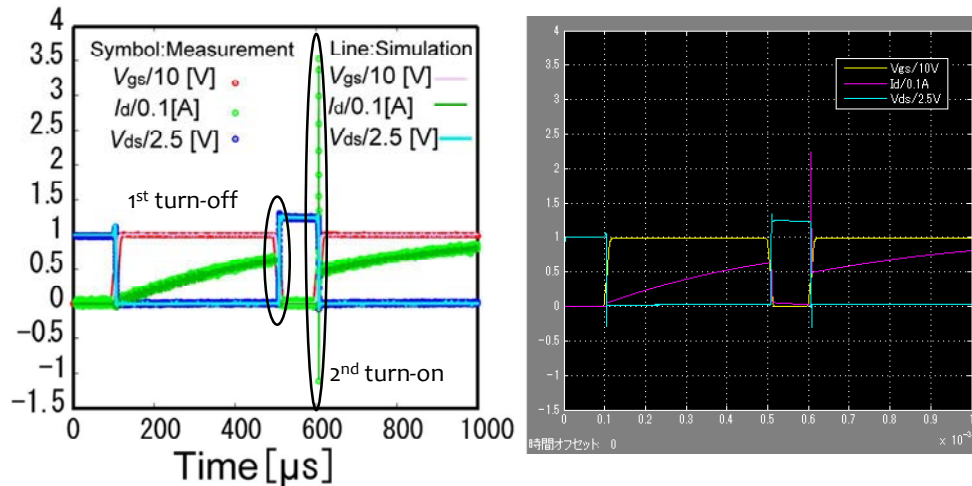


図 3.1.6 誘導負荷スイッチングテストによる SPICE(左)と MATLAB/Simulink(右)の比較

IV. PCS の動作確認

続いて、図 3.1.7 に示す PCS のシミュレーションの動作確認を行い、SimPowerSystems の標準モデルを使った場合との波形比較を行った。結果を図 3.1.8 に示す。また、SimPowerSystems 標準のオン抵抗・オフ抵抗といったパラメータでできた簡易デバイスモデルとの比較を、インバータ部分の各アームの電流・電圧波形について図 3.1.9 に示す。さらに、その中の1アームについて拡大したものを図 3.1.10 に示す。HiSIM モデルでは、パワーダイオードのリバースリカバリー電流(3本目の青線の山の部分)等の動的なデバイス特性も考慮されていることがわかる。

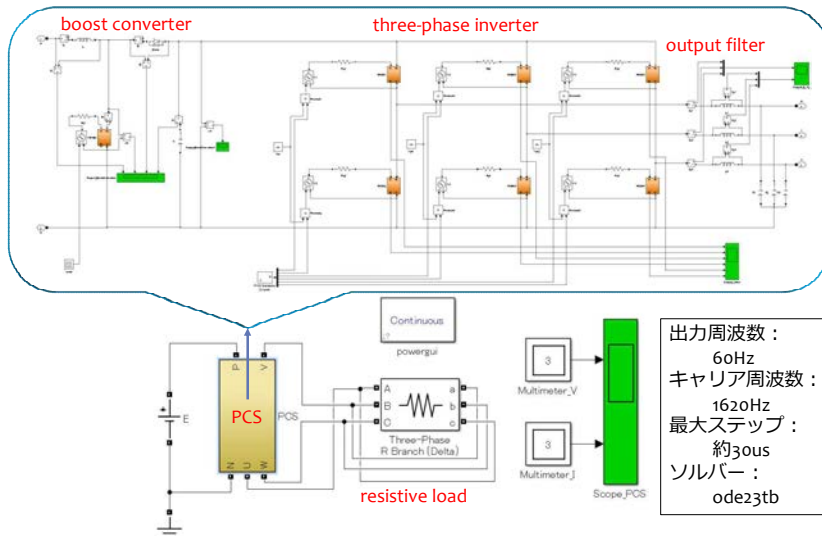


図 3.1.7 PCS のブロック線図(上段は PCS のサブシステム内部)

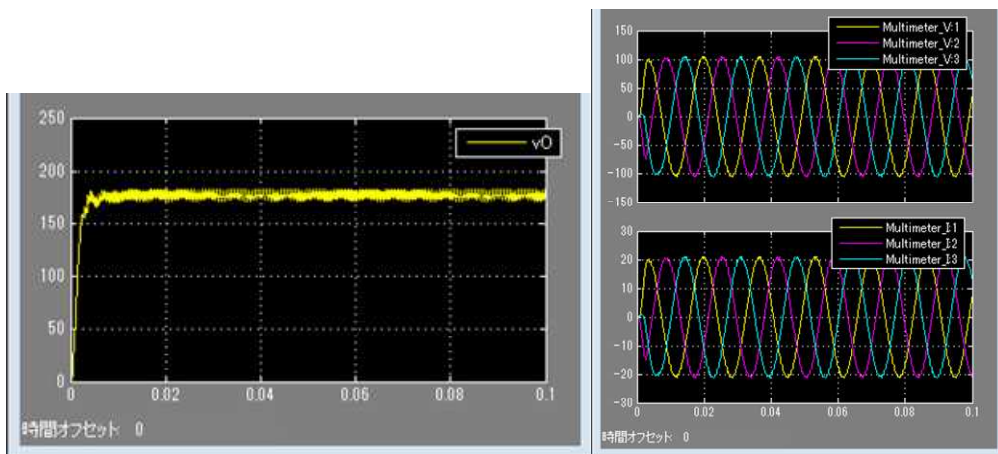


図 3.1.8 PCS のシミュレーション結果(左図:昇圧回路部の出力電圧、右図:PCS出力電圧・電流)

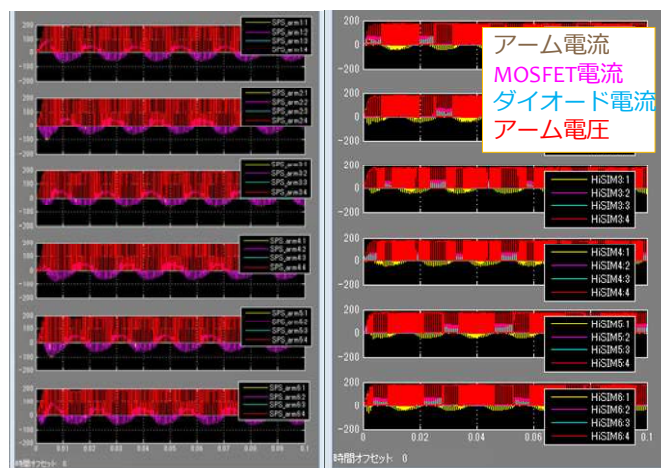


図 3.1.9 PCS 内のインバータ部6アームの波形(左:従来モデル、右:HiSIM モデル)

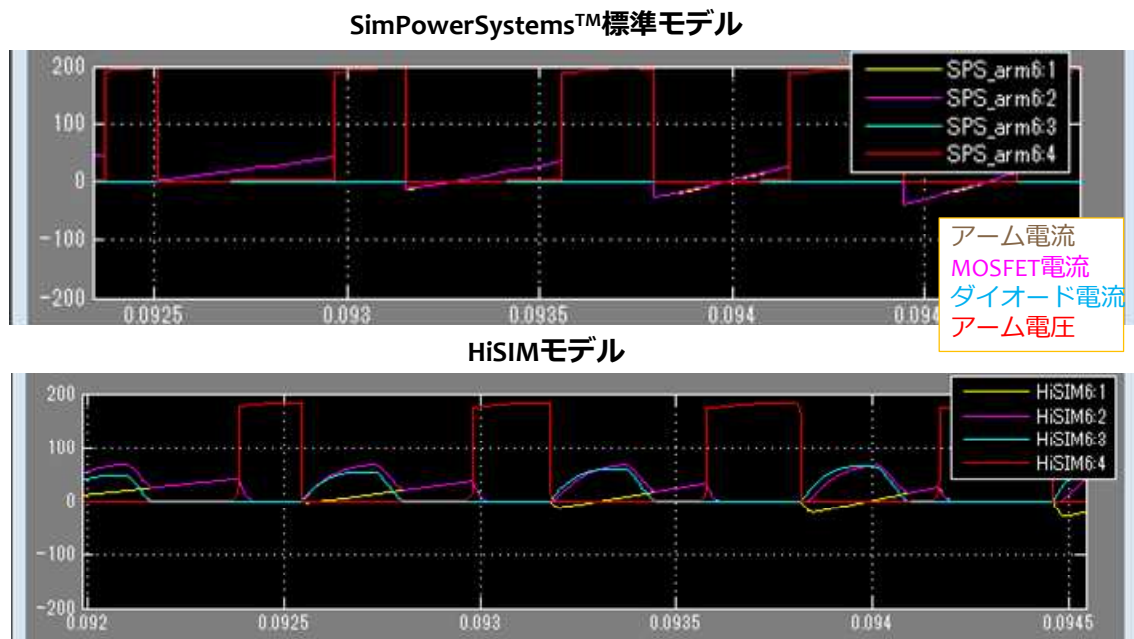


図 3.1.10 PCS 内のインバータ部1アームの電流・電圧波形の拡大図

〈成果の位置づけ〉 本研究では、パワエレ機器の制御系のシミュレーションに高精度なパワーデバイスモデルを適用する具体的方法を開発した。使用例については 3.3 を参照。

〈類似研究との比較〉 SPICE 系回路シミュレータ向けの高精度パワー半導体デバイスモデルの研究や、単純なパワー半導体デバイスモデルを用いた制御系の研究は多数存在するが、これらの融合により系統事故時の制御システム、パワエレ機器、パワー半導体デバイスまでの一気通貫した高精度な解析を可能にした研究は他にない。また、電源装置や輸送機械用のパワエレ機器の開発においては、RCP (Rapid Control Prototyping)や HILS (Hardware-In-Loop Simulation)と呼ばれる制御対象に実機を用いた半シミュレーション実験が可能であるが、マイクログリッド以上の規模の電力系統ではほとんど不可能となる。このため、実機に頼らず、全てを正確にモデル化したシミュレーション技術(モデルベース設計環境)が事故時等の高精度かつハイスピードな制御が求められる場合に特に必要となる。

3.2 高精度なパワーデバイスモデルを活用したパワエレ回路設計法の開発と簡易検証実験 (広島大学 造賀グループ パワエレ担当)

(1)研究実施内容及び成果

〈目的〉

従来のパワエレ回路設計法は、所望の性能を得るために、最終的には実機での試験・測定を繰り返して試行錯誤が繰り返されるというのが実情であった。そこで、3.1 にて開発したデバイスモデルを用いてシミュレーションレベルで最適化を図ることができれば(モデルベース設計)、大きな労力の削減が図られ、実際の設計に対する大きな貢献が期待できる。また、パワエレ回路におけるシミュレーションレベルでの最適化が可能であれば、本研究テーマであるシステムレベルまでのシミュレーションによる全体の最適化にも道が開けると考えられる(I.)。

次に、太陽光発電などの再生可能エネルギー電源が大量導入された電力システム(分散協調EMS)では、システムの事故/緊急時に備えて供給予備力確保などさまざまな問題が存在する。特に、パワエレ機器は分散協調EMSに必須の要素技術でありながら、事故時には停止して本来の役割が果たせない可能性がある。そのため、新しいインバータ制御手法として疑似同期化力制御などが必要とされている。本研究では同期発電機の特性を疑似同期化力という形にしてインバータ

に実装する方法を開発し、事故時の有効性をシミュレーション上で確認するとともに、簡易実証実験によって実機による検証も行う。

すなわち、システム側で要求されるこれらの条件を満たすようなパワエレ回路の解析・設計に資するシミュレーション体系の構築を目指す。

〈実施内容〉

まず、3.1 にて開発した高精度パワーデバイス HiSIM モデルを用い、現在注目を浴びている双方向絶縁型 DC/DC コンバータ回路を例にとりシミュレーションベースの最適化を試みた。シミュレーションを実施しつつデバイス構造や回路中のコンポーネントの値を最適化することによってコンバータの変換効率が最適化できることを確認した。

続いて、分散協調型エネルギー管理システムを構築するための重要な要素技術として、II. 高精度パワーデバイスモデルを組み込んだ疑似同期化ラインバータを開発し(II.)、実験環境と同等のシミュレーションを実施してシミュレーションと実験値との比較を行った(III.)。高精度パワーデバイスモデルの導入に当たっては連成シミュレーションが必要となるが、これについても平成 25 年度に調査検討し、結果として MATLAB/Simulink SimPowerSystems を用いることに収束した。

I. 高精度デバイスモデル(HiSIM)を用いた DC/DC コンバータのパラメータ最適化

DC/DC コンバータの仕様を決定して、これを市販の SiC-MOSFET を用いて高効率に変換するための最適化を実施した。高精度モデル HiSIM_HV を用いて、変換効率 98%を達成する回路構成を決定し、デバイス性能からくるパワーロスを抑えるためのデバイス構造の最適化を明確にした。災害時を想定した同期化回路をつなげることを想定して、入力制御信号の関数として検証している。

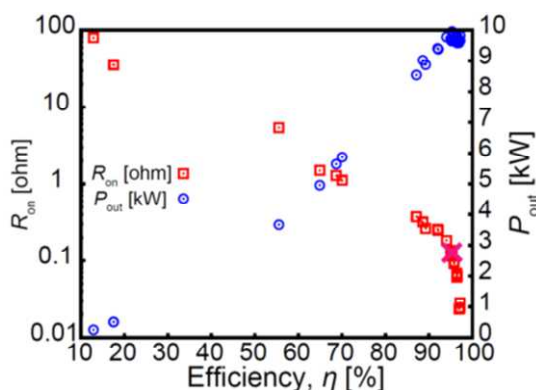


図 3.2.1 DC/DC コンバータの回路シミュレーション結果

本シミュレーション技術が予測できるデバイスと回路の関連性の具体例として、図 3.2.1 の各軸に DC/DC コンバータの回路シミュレーション結果から抽出したデバイスのオン抵抗 R_{on} 、DC/DC コンバータの出力容量 P_{out} 、変換効率 η を示す。図中の右端付近に位置する“X”はデバイスの最適化前の値を示す。このように、今回開発したデバイスモデルを活用すれば、シミュレーションベースで所望の変換効率を実現する設計が可能となることが分かった。本件に関する成果は、現在論文投稿中(原著論文 7.)である。

II. 疑似同期化力機能を有する新しいインバータモデルの開発

現状の電力システム解析ではパワエレ機器を線形(理想スイッチング)モデルで表現したうえで、実効値レベルの解析シミュレーションを主に実施している。まず、理想パワエレモデルを用いた電力システムの事故時の安定度シミュレーションを MATLAB/Simulink 上で実施した。ここでは新たにインバータ(パワーコンディショナ:PCS)に同期化力機能を付与した疑似同期化力インバータを開発した。EMS との連系概念を図 3.2.2 に示す。

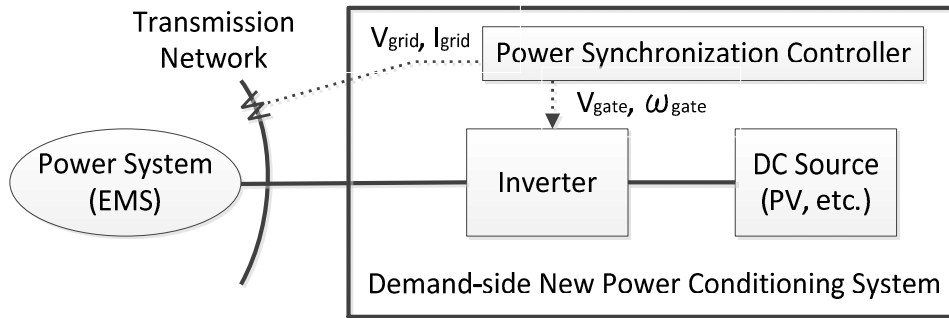


図 3.2.2 電力システム(EMS)における疑似同期化力インバータの位置付け

まず、インバータのゲート信号生成ブロックに対して、図 3.2.3 に示す新しい制御ロジック(同期発電機と同等の能力を持つ、疑似同期化力機能ロジック)を持たせた。本研究ではこの制御ロジックを SPGL(Synchronous Power Generating Loop)と名付けた。

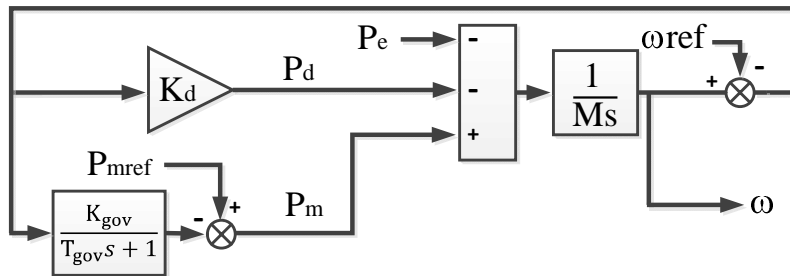


図 3.2.3 開発したインバータ制御ロジック(SPGL)

上記の制御ロジックは、次式で表される同期発電機と同様方程式から求められる。

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - P_d \quad (3.2.A)$$

δ は発電機内部位相角[rad]であり、開発した疑似同期化力インバータでは、この δ を同期発電機と同様にゲート入力信号生成ブロック内で擬似的に作り出している。また、 M は慣性定数であり、一般に同期発電機の作製段階で決まる定数であるが、本インバータでは自由に M を変更することができる。その他の変数、 P_m 、 P_e 、 P_d はそれぞれ発電機機械的入力(インバータの背後電圧、すなわち直流電源である、太陽光発電(PV)やバッテリーの出力に相当する)、電氣的出力(実際に発電機(インバータ)から系統に注入される電力である)、制動力である。

(3.2.A)式は、同期発電機一機についてのみを表した数式であるが、発電機が複数ある電力システム、すなわち多機系では発電機間で相互に事故時等の影響が作用するため、単純な数式では表すことができない。そのため、一般に、多機系での解析には微小変動成分についての考察が行われ、次式が用いられている。

$$\Delta P_e = \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P_e}{\partial \omega} \Delta \omega + \dots \quad (3.2.B)$$

上式における右辺第一項が同期化力係数と呼ばれるものであり、本研究で開発した疑似同期化力インバータの内部で決定される重要なファクターである。通常の同期発電機では、パラメータ M 、 P_e 、 P_d を任意に変更することはできないが、疑似同期化力インバータは比較的自由にパラメータを決めることができる。ただし、パラメータ次第では系統不安定化を招く可能性があり、適切にパラメータチューニングを行わなければならない。図 3.2.3 の SPGL は、図 3.2.4 のようにインバータモデルに実装する。ここでいうインバータモデルとは汎用ツール(MATLAB/Simulink SimPowerSystems)上の理想パワーデバイスあるいは本研究で開発した高精度パワーデバイスで構成されるインバータを指す。

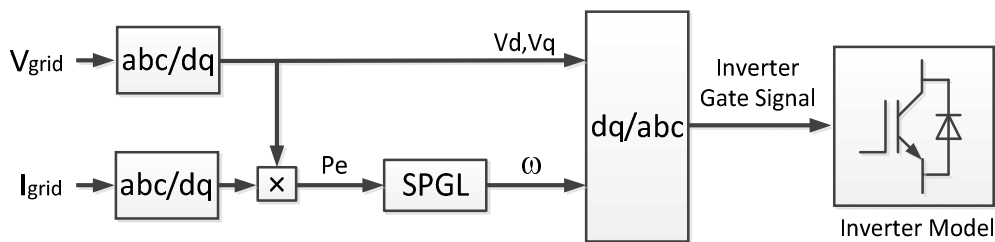


図 3.2.4 インバータモデルへの SPGL の実装

以上の疑似同期化カインバータを実装したパワエレ機器を以下のテストシステムモデルに適用し、その有効性を検証した。

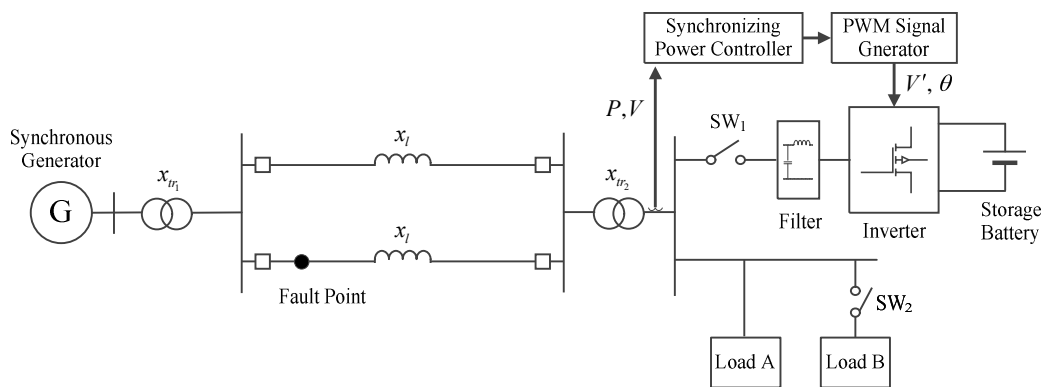


図 3.2.5 テストシステムモデル

シミュレーション条件を以下に記す。上記、テストシステムモデルにおいて、設定する同期発電機(図中の“G”)は、一機のディーゼル火力発電機とする。この発電機には回転数と電圧を一定に保つための调速機(ガバナー)と励磁機が備えられている。発電端電圧は 2 kV と設定し、変圧器により 6.6 kV へ昇圧させている。また、基準周波数は 60 Hz である。インバータの電源は、簡略的に直流 200 V の理想電圧源を用いる。制御方式は n 型 MOSFET を用いた PWM 電圧型インバータを採用した。ただし、トランジスタの特性は線形モデルを仮定しているため、ダイオードのオン抵抗等は考慮していない。キャリア周波数は 20 kHz としている。出力されるパルス波形は、LC フィルタにより平滑化している。フィルタによる平滑化は電圧降下を誘起するため、インバータを系統から電氣的に絶縁するための変圧器により 200 V に昇圧させ、これをインバータの出力とする。その後、インバータは変圧器を通じて 6.6 kV 系統へと接続されている。システム側とインバータとの連系点の電圧は 200 V、インバータ容量は 10 kVA とし、出力制限制御により最大 7 kVA が出力可能としている。

MATLAB/Simulink および PSIM を用いて、テストシステムモデルを作成してシミュレーションを以下の手順により実行した。なお、インバータを同期発電機側の系統に連系し、その後、じょう乱を発生させ、各位置での波形を観測した。その観測波形から、インバータに同期化力が実装されているかを検証した。初期状態は、発電機側の系統とインバータ側の系統を切り離れた状態とした。シミュレーション開始後、両系統の電圧位相を観測しつつ、同相となり双方が安定状態となった瞬間に並列投入を行った。並列のタイミングは発電機が安定状態になる 2.5 sec 以降で行い、位相差が $\pm 5^\circ$ 以内であれば並列可能とする。さらに時刻 3.5 sec で SW2 において新たな負荷を投入し、負荷変動を模擬した。加えて時刻 6.0 sec で 0.1 sec 間の三相地絡故障 (1cct 3LG) を発生させ、波形の動揺を観測した(図 3.2.6)。

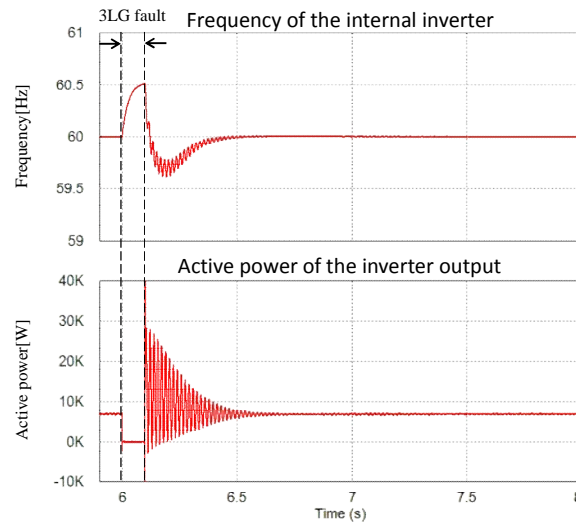


図 3.2.6 三相地絡故障時におけるインバータの内部周波数と出力波形

シミュレーション結果より、地絡故障後においても動揺を抑えながら一定出力に収束していることが確認できる。周波数においても、微小変動が残存してはいるものの過渡的な動揺は抑えられていることがわかる。残存しているこれらの微小動揺は、スイッチングによるパルス波形の平滑化や計算シミュレーション上で発生する高周波ノイズであり、改善の余地が残っている。再生可能エネルギー電源（パワーエレクトロニクス機器）が大量導入される電力システム(EMS)のシミュレーション解析においてはこのような高周波ノイズを多数含むことが予想される。このため、各パワーエレクトロニクス機器の出力特性を踏まえた上でシミュレーション解析を実施しなければならないことが本研究よりわかった。そのためにも、本研究で提案した高精度パワーデバイスモデルの導入が必須であると考えられる。

本成果は IEEJ P&ES Symposium on Advanced Technology in Power Systems 2014 において公表した。

III. インバータを用いた簡易実証試験

パワーエレクトロニクス機器シミュレーション技術の妥当性を検証するための実験環境を、再生可能エネルギーが導入された EMS を想定して構築した。まず、再生可能エネルギーが導入された電力システムを模擬するために電動発電機実験装置、模擬送電盤、計測用機器といった実験機器を導入した。電動発電機実験装置は直流電動機を用いて同期発電機を回転させて発電を行う実験機器であり、発電機のタービンに相当する直流電動機を制御することで、発電機の出力周波数を任意に制御可能である。また、開発したインバータ制御系を実機へ搭載した上で有効性を検証するためには、開発した制御系を実装可能な実機のインバータ、およびゲート信号を高速に演算しパワーデバイスへと低ノイズで送る機器が必要になる。そこで、任意のゲート信号で駆動する実験用インバータユニットを導入した。パワーエレクトロニクス機器シミュレーションの精度を向上させるためには、パワーデバイスへ入力されるゲート信号やインバータ内部電圧、インバータ出力電圧・電流などを測定し、実測値とシミュレーションで得られた値との比較検証を行うことが必要になるため、これらの物理量を測定可能なインバータユニットを選定し、パワーデバイスレベルでの検証が可能な環境を構築した。異なるパワーデバイス (IGBT, SiC) を用いた 2 種類のインバータユニットを導入し、汎用的に用いられる IGBT のみならず、高効率・高機能パワーデバイスとして注目されている SiC についても実験可能な環境を整備し、異なるデバイス特性を考慮した多面的な評価・検証を可能にした。また、開発したインバータ制御系は複雑な制御を必要とするため、実験用インバータ駆動用のゲート信号を高速に演算することが可能なシステムおよびそれを制御するためのソフトウェアを導入し、計算機からパワーデバイスへと低ノイズでゲート信号を送信するための実験・通信環境を構築した。さらに、高電圧・大電流を扱うインバータを用いた検証実験を行うために、インバータや測定機器などの実験機器およびその配線を実験室に配置した。同時に、高周波数・高電圧・大電流の実験結果を測

定・記録するために導入したスコープコーダおよび電力測定・解析を行うためのパワーアナライザのセットアップを行い、実験結果を高精度に評価するための環境を整備した。構築した実験環境の概要を図 3.2.7 に、実験機器を図 3.2.8 に示す。

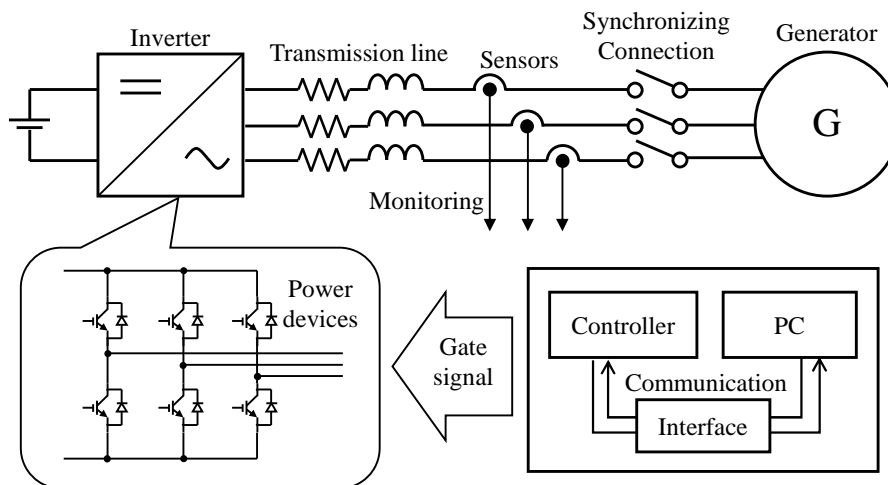


図 3.2.7 構築した実験環境

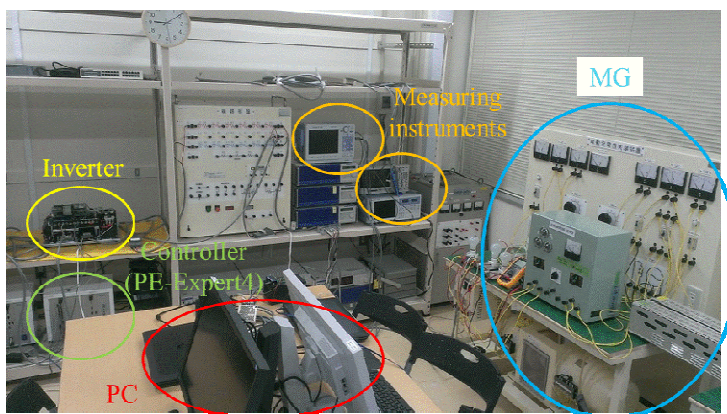


図 3.2.8 実験機器

構築した実験環境が正常に機能することを確認するために、簡易検証実験を行った。まず、三相平衡電圧を出力するインバータプログラムを C 言語で記述した上でインバータ制御システムの DSP ボードに実装し、プログラムにより発生させたゲート信号をインバータユニットへ送信することによりインバータを駆動させた。このとき、インバータ上のパワーデバイスへと入力されるゲート信号やインバータ出力電圧・電流を測定機器にて測定し、シミュレーションによる理論値との比較検証が可能であることを確認した。次に、インバータと発電機を同期させた上でインバータの系統連系実験を行い、インバータと発電機が同期して運転可能なことを確認した。これにより、電力システムや電力システムに連系したインバータの物理量を測定できるようになり、電力システム(EMS)からパワーデバイスまで考慮したパワエレ機器シミュレーションとの比較検証を行う環境が整備された。

なお、事故時の電力システムまで考慮した検証実験については 3.3 での知見を反映させた上で行うことが有効であると考え、システム担当グループと連携して実験環境の構築および実験を行った。その詳細は 3.3 で述べる。当初の研究計画においては 3.2 において開発したパワエレ機器設計法を簡易検証実験結果と比較する予定であったが、分散協調 EMS の実現には開発した同期化力インバータ制御系の有効性を実機により検証することが最優先であると考え、システム担当グループと連携した同期化力インバータに関する実験に注力した。

〈成果の位置付け〉

将来のパワエレ機器が大量導入される電力システムのシミュレーション解析について、特に事故/緊急時のシミュレーション解析は必要不可欠と考えられる。同時に、実験による検証も不可欠であり、本研究では高精度モデルである HiSIM を組み込むとともに、シミュレーションと実験との比較検討を実施した。したがって、安定供給を実現する分散協調 EMS を構築するために、本研究で開発した疑似同期化力インバータ(II./III.)も含めパワエレ機器の挙動を高精度に把握でき、かつ最適化も可能(I.)であるような環境を構築した。

〈類似研究との比較〉

パワエレ回路設計レベルでは、いわゆる「モデルベース設計」はまだ浸透していないと考えられる。今回の I. で得られたレベルの HiSIM モデルを用いたモデルベース設計・開発は類を見ないものと考えており、EMS の構築、最適化に威力を発揮すると考えられる。

また、疑似同期化力インバータについては、発電機と同じ振る舞いをさせる仮想同期発電機(VSG)が提案されており、本研究内容と類似している。ただし、VSG は発電機と全く同じ機能を実装するが故に、非常に高機能なインバータである。一方、本研究で開発したインバータは発電機の回転エネルギーのみを再現するものであり、インバータへの実装も非常に簡単である。パワエレ回路の設計にはシミュレーションのみならず実験との比較検証を行う必要があるが、多くの研究ではパワエレ回路に重点が置かれており、パワエレ機器を連系させる電力系統側に着目している研究は少ない。本研究では発電機や送電線まで模擬した電力系統にインバータを連系させた上で実験を行う環境を構築しており、分散協調 EMS に適したパワエレ回路設計法を検証するための柔軟な実験を可能にした。

3.3 事故時等の過渡状態を考慮した電力システムシミュレーション解析法の検討

(広島大学 造賀グループ システム担当)

(1)研究実施内容及び成果

〈目的〉

分散協調 EMS(電力システム)からパワーデバイスまで一気通貫したシミュレーション解析法を確立するために、高精度デバイスモデル(HiSIM)および理想デバイスモデルを用いた疑似同期化力インバータによる事故時挙動について、MATLAB/Simulink によるシミュレーション(I.)と、検証実験(II.)を実施する。

〈実施内容〉

電力システムからパワーデバイスまで考慮したシミュレーション解析法の精度を向上させるための比較検討用に、シミュレーションシステムモデルおよび実験環境の拡張を行った。例題となるテストシステムモデルを実験環境下で新たに構築し、三相地絡事故を模擬できるような実験環境を構築した。また、同期化力を具備したインバータ制御系を実機のインバータユニットへ実装した上で実験システムへ連系させ、実際に事故を発生させて電力システムの過渡状態を実測した。また、デバイスモデル実装完了後、例題となるテストシステムモデルを準備し、理想デバイスモデルまたは高精度デバイスモデル(HiSIM)から構成されるインバータを連系させ、三相短絡事故のシミュレーションを行った。

I. テストシステムモデルを用いた事故時シミュレーション

簡易検証試験との比較検討を実施するために、テストシステムモデルを図 3.3.1 のように拡張してシミュレーション解析を実施した。シミュレーション条件は後述の簡易実証実験で用いた機器パラメータと同一である。

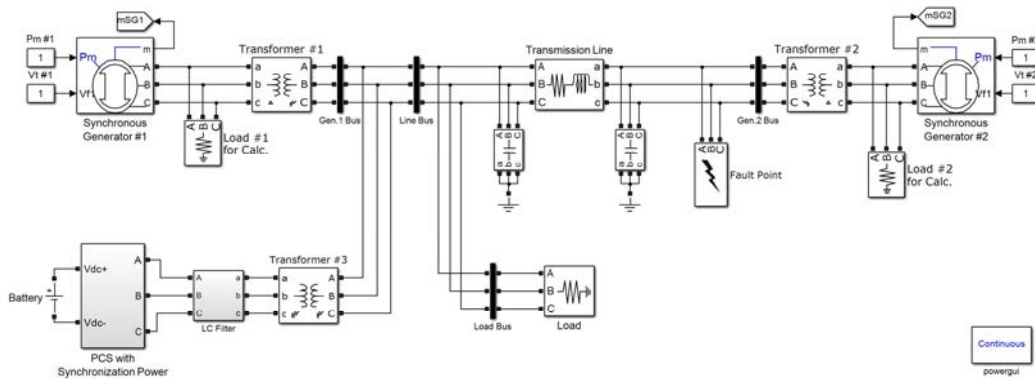


図 3.3.1 テストシステムモデル

事故条件として、シミュレーション開始後、1sec 後に事故点において三相地絡故障を発生させ、0.07sec 後に故障除去を行う現象を模擬した。疑似同期化力インバータの有効性を確認するためにシステム事故時のインバータからの有効電力出力と連系点電圧を観測した。慣性定数 M を変更してシミュレーションを行った結果を図 3.3.2 および図 3.3.3 に示す。シミュレーション結果の有効電力出力を見ると、慣性定数 M を大きくすることでじょう乱に対する変動抑制を行っていることがわかった。本研究では図 3.3.1 に示した同期発電機(#1 および#2)には電圧調整装置(AVR)を備えておらず、インバータにも AVR 機能を設けていないため電圧制御は行っていない。そのため、インバータ連系点の電圧変動はほとんど変わっていない。これより、回転機としてのみ振る舞っているということが確認された。慣性定数はシステム状態を観測して、適切に設定する必要があるとの知見が得られた。

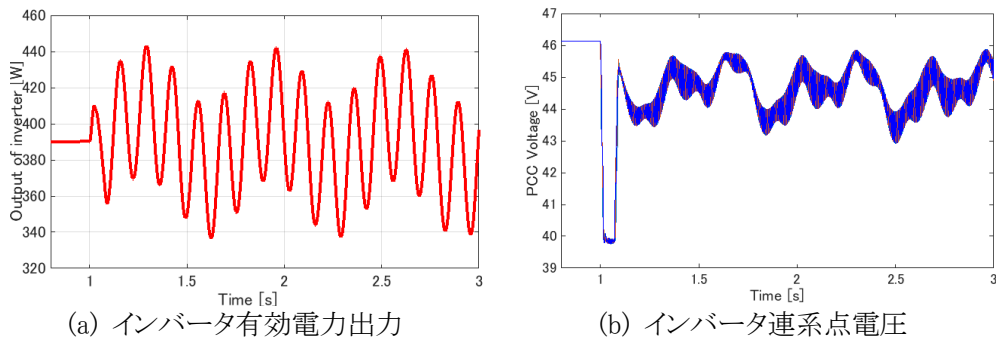


図 3.3.2 疑似同期化力機能を搭載したインバータの事故時挙動(慣性定数:小)

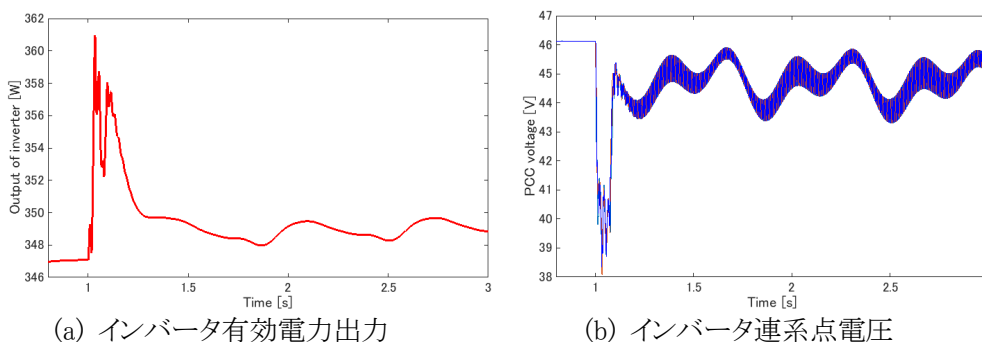


図 3.3.3 疑似同期化力機能を搭載したインバータの事故時挙動(慣性定数:大)

本成果はパワーエレクトロニクス学会第 206 回定例研究会～若手のための研究発表会～、および電気学会保護リレーシステム研究会～電力システムの保護・監視制御・計測解析技術～において公表した。

II. テストシステムモデルにおける事故時現象の検証実験

本研究を遂行していくなかで、開発した電力システムシミュレーション解析法を高速化、効率化するためには、実験との比較結果をフィードバックすることが必要になるという結論に至った。また、再生可能エネルギーが急速に普及している現状を踏まえ、分散協調 EMS の実現に重要な同期化力インバータの有効性を実証することが本 CREST 研究で優先すべき事項と考え、分散協調 EMS を想定し再生可能エネルギーが導入された電力システムを模擬した実験環境を、3.2 で構築した実験環境を拡張することで構築した。まず、発電機 2 機が模擬送電盤に連系されたシステムを実験設備上に構築した。模擬送電盤には送電線の対地静電容量を模擬したコンデンサを接続し、長距離送電線を想定して π 型回路とした。また、事故時の保護の観点から単相変圧器を 6 台用いて発電機 2 機を Y- Δ 結線で接続し、Y 結線の中性点を模擬接地し、特別高圧システムにおける地絡事故を再現できるようにした。再生可能エネルギーの大量導入を模擬した上で発電機 2 機を運転させることで、同期化力が低下した電力システムにおける複数の同期機の動揺を模擬可能である。構築した 2 機システムを図 3.3.4 に示す。

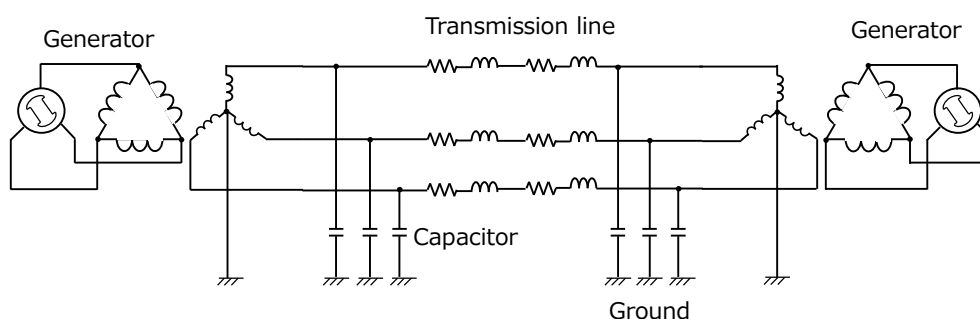


図 3.3.4 拡張した実験環境(発電機二機)

開発した同期化力コントローラを用いてインバータを制御するために、インバータユニットを系統連系用リアクトルおよび Y- Δ 結線の絶縁変圧器を用いて図 3.3.4 に示した系統へ連系した。さらに、インバータから発生される高調波を低減するために、インダクタとコンデンサを用いて LC フィルタを作成した。構築したインバータ実験回路を図 3.3.5 に示す。

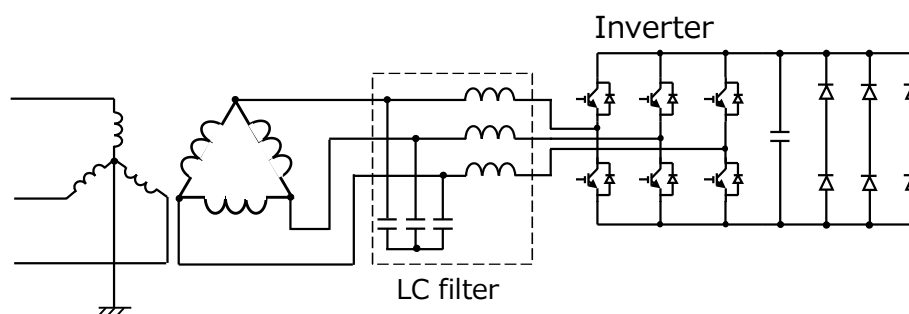


図 3.3.5 インバータ実験回路

構築した 2 機システムに分散型電源を模擬したインバータを接続することで、再生可能エネルギーが導入された電力システムを模擬した。これを図 3.3.6 に示す。模擬送電線を介して 2 つの発電機母線が存在し、それぞれに対し 2 機の発電機 A, B を変圧器を介して接続した。母線 A にはインバータが LC フィルタと変圧器を介して接続されており、母線 B には RLC 負荷が接続されている。RLC 負荷は大きさを任意に調整可能であるが、本実験では簡単化のために純抵抗とした。さらに、再生

可能エネルギー大量導入時を想定し、発電コストの安価な発電機を最大出力で運転し、周波数調整用の発電機が下げ代 0 の限界点で運転している状況を模擬し、2 機発電機出力を設定した。本実験では、発電機 A を周波数調整用の発電機、発電機 B を発電コストの安価な発電機として仮定し、タービンに相当する直流電動機の励磁電圧を調整することで発電機の出力を調整した。

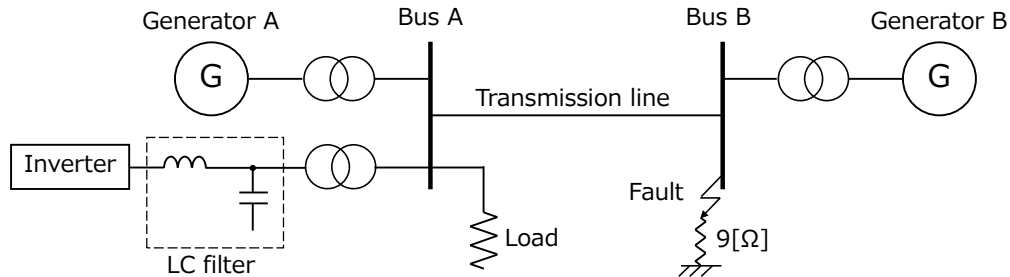


図 3.3.6 再生可能エネルギーが大量導入された模擬電力系統

次に、再生可能エネルギーが大量導入されることで同期化力が減少した電力システムを模擬した実験系統(図 3.3.6)において事故を発生させ、発電機動揺を発生させる事故模擬システムを構築した。本実験環境が想定している特別高圧系統における事故に対する保護システムは、事故を検出した保護継電器からの信号により遮断器が開放されることで事故が消去されるものとした。そこで、短時間での事故除去を模擬可能な遮断器を作成し、事故による発電機動揺を模擬した。想定している事故は母線 B における母線事故であるため、事故時の短絡電流が非常に大きなものになっている。本実験ではインバータ連系点から離れた地点での事故を想定しており、またインバータユニットやその他の機器の保護を目的として、地絡抵抗を介して 3 線地絡事故が発生するようにした。地絡抵抗の大きさは、インバータユニットが事故時の過電流保護のために停止してしまう電流値を考慮して設定した。

本 CREST 研究では分散協調 EMS の実現のための基礎理論の構築を目的としているため、EMS の安定運用に重要な同期化力インバータが電力系統に連系している状態を想定して実験環境を構築した。同期化力を発生させる制御系を実機のインバータユニットへ実装するために構築した制御システムを図 3.3.7 に示す。実験に使用したインバータには電圧・電流センサが内蔵されており、センサで取得した値を A/D 変換により DSP ボードに取り込み、電圧・電流値を基に出力電圧指令値を同期化力コントローラにより演算し、ゲート信号を生成した。生成されたゲート信号はノイズ低減のため光信号に変換され、インバータ搭載のパワーデバイスのゲート部へ入力した。作成した LC フィルタの系統側端子から系統の U 相電圧 V_{u_grid} および W 相電圧 V_{w_grid} を取得し、三相平衡を仮定して V 相電圧 V_{v_grid} を求める。同様にして、電流値 I_{u_grid} , I_{v_grid} , I_{w_grid} についても求めた。

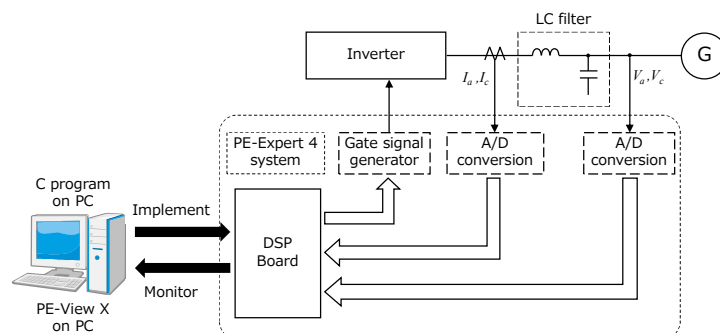


図 3.3.7 インバータのデジタル制御システム

開発した同期化力インバータには、同期化力のみならず周波数維持のためのガバナ制御機能も具備した。これは、再生可能エネルギーが大量導入された電力系統における周波数変動を緩和し、安定的に系統を運用することを目的とするものである。同期発電機の挙動を模擬するために、同期発電機のガバナを一次遅れ系で模擬し、周波数偏差を入力としてガバナ制御を実装した。また、周波数偏差に対する制動力についても実装した。以上の構築した実験環境の写真を図 3.3.9 に示す。

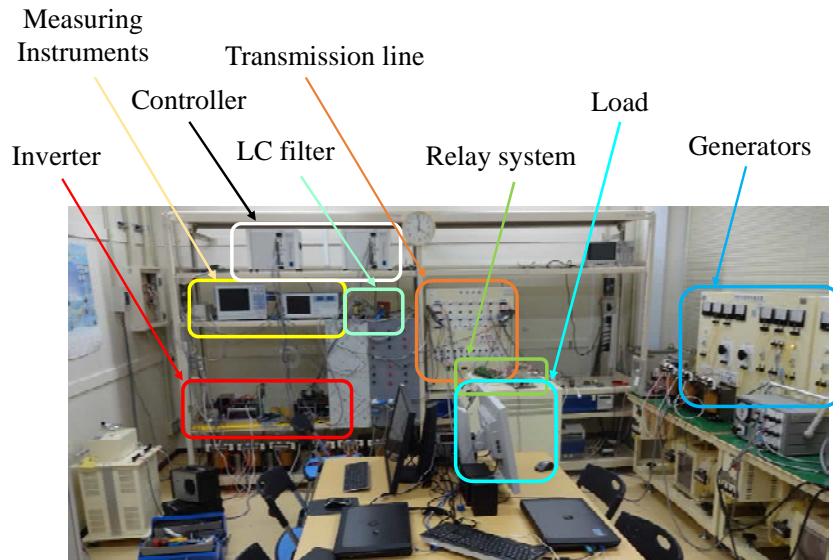
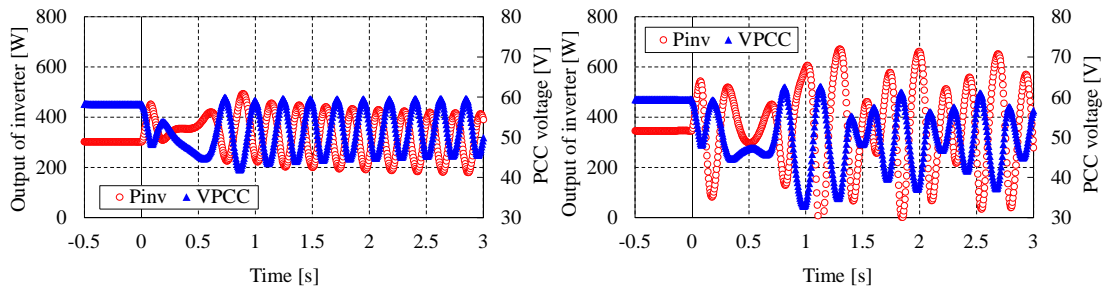


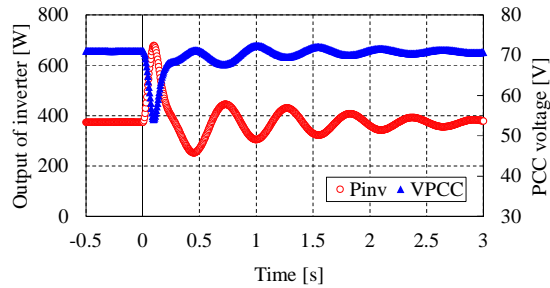
図 3.3.9 実験環境

構築した実験環境を用いてシミュレーションとの比較を行うことができるか確認するために、実際に事故を発生させた。事故時のインバータ出力、インバータ連系点(PCC)電圧をパワーアナライザを用いて計測した。作成した事故模擬システム(事故発生および遮断)により模擬される 3 線地絡事故の継続時間は 74ms として検証を行った。インバータ出力および連系点電圧を図 3.3.10 に示す。比較のために、同期化力をもたせていないインバータ(300W 一定出力制御)を連系させた場合の結果を図 3.3.10(a)に、慣性定数が小さい回転機を模擬した同期化力インバータを連系させた場合の結果を図 3.3.10(b)に、慣性定数が大きい回転機を模擬した同期化力インバータを連系させた場合の結果を図 3.3.10(c)に示している。図 3.3.10 の左側の縦軸はインバータ出力 P_{inv} を、右側の縦軸は連系点電圧 V_{PCC} を表しており、横軸は事故発生からの時間である。なお、事故が発生する時間を 0.0[s]として図に表示している。



(a) 一定出力インバータ連系時

(b) 同期化力インバータ連系時：慣性定数小



(c) 同期化力インバータ連系時：慣性定数大

図 3.3.10 事故時のインバータの挙動

0.0[s]の事故の発生によりインバータ出力 P_{inv} が増加し、同時にインバータ連系点電圧 V_{PCC} が低下した。いずれの実験結果においても 0.074[s]で事故が除去されてからは P_{inv} が減少し V_{PCC} が上昇しているが、インバータの制御手法によって異なる波形が得られた。

(a) 一定出力インバータ連系時

同期化力を持たない一定の出力(300[W])で駆動するインバータを系統に連系させた場合、3線地絡事故により発電機が脱調することが分かった。これは、インバータが同期化力を持たず、発電機が事故時に不安定領域へ遷移したためと考えられる。

(b) 同期化力インバータ(慣性定数小)連系時

慣性定数が小さい同期機を模擬した同期化力インバータを系統に連系させた場合、3線地絡事故発生時においてインバータ出力が回転機のように振動したことから、同期化力を具備させることができたと判断した。しかし、慣性定数が小さい同期機を模擬させたため、発電機が不安定領域へ遷移することは回避できず、発電機が脱調した。

(c) 同期化力インバータ(慣性定数大)連系時

慣性定数が大きい同期化力インバータを系統に連系させた場合、3線地絡事故発生時においても発電機が脱調せず事故前の定常状態に戻った。理由としては、慣性定数が大きいため事故時にインバータ出力が大きくなり、発電機が安定点から不安定状態へ遷移するのを抑制したことが挙げられる。慣性定数が大きい回転機を模擬しているため事故除去後に若干の振動が残ったが、徐々に事故前の定常状態に戻った。

以上の(a)(b)(c)の結果より、インバータに同期化力を具備させることで再生可能エネルギーを導入した電力システムを安定化できることを実験的に検証した。再生可能エネルギーが大量導入された分散協調 EMS の実現に対し、要素技術として同期化力インバータが重要になるものと考えられる。

〈成果の位置づけ〉

電力システムシミュレーション解析法を高速化、効率化するための検証実験を行う実験環境を構築した。実験では同期化力インバータの制御系を実機のインバータユニットへ実装し、インバータを再生可能エネルギーが大量導入された模擬電力系統に連系させた上で事故時の実験を行った。これによりシミュレーションとの比較検討が行えるようになっただけでなく、分散協調型 EMS の要素技術になり得る同期化力インバータが及ぼす影響について実験に基づいた評価が行えるようになった。また、事故時の実験において同期化力インバータが系統の安定化に有効であることが確認できており、分散協調型 EMS の実現に同期化力インバータが重要になることを実証した。同期化力インバータはその特性上、事故時のような系統条件が過酷な場合でも系統から解列せず、同期化力を発生しなければならないため、機器仕様として事故時の過電流に耐えることが要求され、インバータの設計に影響を及ぼす。適切に EMS を設計するためには、事故時の耐量や通常運用時の効率を考慮することが求められると考えられる。

〈類似研究との比較〉

類似研究においては、電力系統を一機無限大系統として扱っているものや、インバータの制御に重点を置いたものが多く、再生可能エネルギーが大量導入された電力系統において実験的に有効性を検証したものは少ない。本研究では実系統に近い条件で実験を行っており、分散協調型 EMS の要素技術としての同期化カインバータの有効性を実験的に実証した。

なお、本成果の一部については平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会において公表した。

以上、サブテーマ①高精度デバイスモデルの構築、②パワエレ回路設計・同期化カインバータの開発・検証実験、③システムレベルシミュレーション・検証実験の 3 テーマにて、相互に連携をとりながら研究を行った。結果、高精度デバイスモデルをベースとした、回路レベルの設計・解析、システムレベルの影響解析が効率的にできることを示した。今後は、この成果をベースとして融合研究へとさらに発展させていき、さらなる計算の効率化についても実施する予定である。

§ 4 成果発表等

本報告書提出締切日(26年12月1日)以降に成果発表等を追記・提出する場合は、該当箇所は青字で記載をお願いいたします。

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌0件、国際(欧文)誌6件)

1. A. Saito, M. Miura-Mattausch, M. Miyake, T. Umeda and H. J. Mattausch, "Experimental Verification of Power MOSFET Model under Switching Operations," The 11th International Workshop on Compact Modeling (IWCM'14), pp. 41-44, Singapore, Jan. 2014.
2. Y. Sasaki, K. Kanaya, Y. Zoka, and N. Yorino, "Probabilistic constrained dynamic economic load dispatch for renewable energy sources," Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition (GRE2014), No.P-Pe-2-3, 2014
3. Y. Zoka N. Yorino, M. Watanabe, and T. Kurushima, "An Optimal Decentralized Control for Voltage Control Devices by means of a Multi-agent System," 18th Power Systems Computation Conference, No. ID385, 2014
4. Y. Sasaki, D. Seikoba, J. Okihara, K. Kanaya, Y. Zoka, and N. Yorino, "A Robust Supply and Demand Controller Against Uncertainties of Renewable Energy Sources," 18th Power Systems Computation Conference, No. ID352, 2014
5. Y. Zoka, M. Miyake, Y. Sasaki, S. Sekizaki, M. Miura-Mattausch, H. J. Mattausch, and N. Yorino, "An Advanced Control Implementation for Inverters including Device-level Modeling," The 6th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources (IRE2014), No. ID 3048, 2014
6. N. Yorino, Y. Zoka, M. Watanabe, and T. Kurushima, "An Optimal Autonomous Decentralized Control Method for Voltage Control Devices by using a Multi-agent System," IEEE Trans. on Power System (accepted), 2014.
7. A. Saito, Y. Tanimoto, K. Sato, Y. Sasaki, M. Miura-Mattausch, H. J. Mattausch, and Y. Zoka, "Efficiency Optimization of SiC-MOSFET-Based Bidirectional Isolated DC/DC Converter by Circuit Simulation with Physically-Accurate Surface-Potential Compact Model", IEICE, 2014 (submitted).

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

なし

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議2件、国際会議1件)

(主要な国際会議への招待講演の前に*を付記してください)

1. *Y. Zoka (Hiroshima University), "Present situation of Japanese power system and an outline of recent research activities," 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP), Hiroshima, May 28-30, 2014.
2. 餘利野直人(広島大学):「不確定環境に対応するスマートグリッドのロバスト信頼度と需給制御技術」, MIMS「現象数理学拠点」共同研究集会, 明治大学, 2014年10月23日
3. 造賀芳文, 三宅正堯(広島大学):「パワエレデバイスから電力システムまでの縦断的なシミュレーションの試み」, MATLAB EXPO 2014 Japan, 2014年10月29日

② 口頭発表 (国内会議3件、国際会議1件)

1. 野口敬太, 佐々木豊, 造賀芳文, 餘利野直人:「同期化カインバータを用いた系統

- 安定化制御」,平成 25 年度(第 64 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, No.7-3, 岡山大学, 2013 年 10 月 19 日
2. Y. Sasaki, K. Noguchi, Y. Zoka, N. Yorino, S. Sekizaki, Y. Nakamura, M. Matsuyama (Hiroshima University), “A Novel Control Scheme of Voltage Source PWM Inverters for Improving Power System Stability,” IEEJ P&ES Symposium on Advanced Technology in Power Systems 2014, pp.1-6, Mar. 2014.
 3. 関崎真也, 中村優希, 佐々木豊, 造賀芳文, 餘利野直人(広島大/JST CREST):「インバータによる系統安定化実験環境の構築」,平成 26 年度(第 65 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 福山大学, 2014 年 10 月 25 日
 4. 中村優希, 関崎真也, 佐々木豊, 三宅正堯, 造賀芳文:「系統安定化を目的とした同期化力インバータによる過渡安定度シミュレーションと簡易実験」, 電気学会保護リレーシステム委員会パワーエレクトロニクス 電力系統の保護・監視制御・計測解析技術, 中国電力本社, 2015 年 2 月 25 日
- ③ ポスター発表 (国内会議 1 件、国際会議 1 件)
1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日
 1. Y. Zoka, M. Miyake, Y. Sasaki, S. Sekizaki, H. J. Mattausch, M. Mimura, N. Yorino, “Basic theory and methodology development of highly accurate simulation technology for power systems incorporating device-level modeling of the applied power electronics,” JST-NSF-DFG Joint Workshop, Hawaii, Honolulu, Jan. 13, 2014.
 2. 中村優希, 関崎真也, 佐々木豊, 三宅正堯, 造賀芳文:「系統安定化を目的とした同期化力インバータを用いた電力システムシミュレーションと簡易実験による検証」, パワーエレクトロニクス学会 第 206 回定例研究会～若手のための研究発表会～, 同志社大学, 平成 26 年 12 月 20 日

(4)知財出願

- ①国内出願 (0 件)
なし
- ②海外出願 (0 件)
なし
- ③その他の知的財産権
なし

(5)受賞・報道等

- ①受賞 (顕著な受賞の前に*を付記してください)
1. *Best Poster Presentation Award
Y. Sasaki, K. Kanaya, Y. Zoka, N. Yorino, “Probabilistic constrained dynamic economic load dispatch for renewable energy sources,” Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition (GRE2014), No.P-Pe-2-3, 2014.7.28
 2. 電気学会中国支部奨励賞
野口敬太, 佐々木豊, 造賀芳文, 餘利野直人:「同期化力インバータを用いた系統安定化制御」,平成 25 年度(第 64 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, No.7-3, 2013 年 10 月 19 日
 3. YPC 優秀賞
清木場大, 金谷浩平, 沖原潤, 信長翔太, 佐々木豊, 造賀芳文, 餘利野直人:「需給制御マネージャにおける PV 予測の影響評価」,平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. P21, 2014 年 9 月 12 日

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 電気新聞(日本電気協会新聞部):全国理系学び舎紀行「広島県・広島大学 電力・エネルギー工学研究室」, 2014年3月4日
2. 電気設備学会誌(電気設備学会):研究事例・研究室紹介「電力・エネルギー工学研究室 広島大学大学院工学研究院」, 第34巻11号, 2014年11月

③その他

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

なし

②社会還元的な展開活動

- ・ パワエレデバイスモデルの構築およびそれを活用したシミュレーション事例について, Matlab EXPO 2014 という展示会にて招待講演を開催し, 観客 80 名程度を集めた。
- ・ 構築した実験設備の情報を設備会社に提供し, 実施例として活用されている。

§ 5 研究期間中の活動

主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2013/10/22	チーム内ミーティング(非公開)	広島大学	4名	研究計画書などについてのミーティング
2013/11/19	MathWorks社・意見交換会(非公開)	広島大学	7名	研究課題に関し, シミュレーションツールを開発しているMathWorks社との意見交換
2014/1/31	サイトビジット(非公開)	広島大学	8名	サイトビジット開催。研究総括の藤田先生と意見交換
2014/2/4	Cybernet社・意見交換会(非公開)	Cybernet本社	4名	研究課題に関し, シミュレーションツールを開発しているCybernet社との意見交換
2014/2/8	井村FS・意見交換会(非公開)	京都大学	15名程度	井村FS参加にあたり, 既存メンバーと意見交換
2014/2/13	チーム内ミーティング(非公開)	広島大学	7名	進捗報告および今後の進め方についてのミーティング
2014/3/5	チーム内ミーティング(非公開)	広島大学	7名	進捗報告および今後の進め方についてのミーティング
2014/3/12	Martin Hundhausen 教授との意見交換会(非公開)	広島大学	10名程度	学術交流
2014/3/14	パワエレ回路制作・意見交換(非公開)	東京国際フォーラム	4名	学術交流
2014/3/17	井村FS・ミーティング(非公開)	東京工業大学	15名程度	井村FS・融合研究についてのミーティング

2014/4/21	井村 FS・ミーティング (非公開)	東京理科大学	15 名程度	井村 FS・融合研究についてのミーティング
2014/5/2	藤崎 FS・ミーティング (非公開)	京都大学	6 名	藤崎 FS 参加にあたり, 既存メンバーと意見交換
2014/6/3	藤崎 FS・ミーティング (非公開)	大阪大学	6 名	藤崎 FS・融合研究についてのミーティング
2014/6/8- 2014/6/9	井村 FS・ミーティング (非公開)	クロスウェーブ船橋	27 名	井村 FS・融合研究についてのミーティング (合宿形式)
2014/6/12	藤崎 FS・サイトビジット (非公開)	大阪大学	14 名	藤崎 FS・サイトビジット (アドバイザーご出席)
2014/6/25	井村 FS・サイトビジット (非公開)	東京大学	20 名	井村 FS・サイトビジット (アドバイザーご出席)
2014/7/8	藤崎 FS・ミーティング (非公開)	大阪大学	11 名	藤崎 FS・融合研究についてのミーティング
2014/7/18	井村 FS・ミーティング (非公開)	キャンパスプラザ京都	25 名	井村 FS・融合研究についてのミーティング
2014/8/4	チーム内ミーティング (非公開)	広島大学	7 名	進捗報告および今後の進め方についてのミーティング
2014/8/23	藤崎 FS・ミーティング (非公開)	大阪大学	12 名	藤崎 FS・融合研究についてのミーティング
2014/9/1	藤崎 FS・サイトビジット (非公開)	大阪国際会議場	18 名	藤崎 FS・最終サイトビジット (アドバイザーご出席)
2014/9/1	Mini-Workshop on Dependable Energy Management	大阪国際会議場	50 名程度	藤崎 FS 参加グループでの共同主催
2014/9/2	井村 FS・サイトビジット (非公開)	電力中央研究所	33 名	井村 FS・最終サイトビジット (アドバイザーご出席)
2014/9/22	オムロン株式会社講演会・意見交換会	広島大学	28 名	オムロン (株) 緒方氏によるご講演および意見交換
2014/9/28	井村 FS・ミーティング (非公開)	東京工業大学	28 名	井村 FS・融合研究についてのミーティング
2014/9/30	藤崎 FS・ミーティング (非公開)	大阪大学	12 名	藤崎 FS・融合研究についてのミーティング

§ 8 最後に

特になし