

仮想同期発電機制御試験の環境構築

理工学研究科 電気電子情報工学専攻
電力システム工学研究

AE20054 藤井 健人
指導教員 藤田 吾郎

1. はじめに^{[1][2]}

近年、再生可能エネルギー電源の大量導入に伴い、電力系統は従来の同期発電機主体の構成から、パワーエレクトロニクス機器主体の構成へと急速に移行している。この変化により、系統慣性の低下や短絡容量の減少といった新たな課題が顕在化しており、電力品質および系統安定度の維持が重要な研究テーマとなっている。

学部時代の研究では、太陽光発電システムにおける電力制御として、昇降圧および双方向電力変換が可能な ZETA-SEPIC コンバータの設計・製作を行ってきた。本研究では、そのコンバータを含む発電システム全体の系統連系を見据え、後段となるインバータを用いた電力変換システムの実験環境を構築し、制御系および計測系が実機において適切に機能することを確認することを目的とする。特に、電圧・電流センサの設計変更および校正、PWM 制御の検証を通じて、実験的検討に耐え得る基盤の確立を目指している。

2. インバータ実験システムの構成および設計

本研究で構築した実験システムは、Myway 製インバータモジュールを中核とし、直流電源、リアクトルモジュール、コンデンサモジュールおよび負荷から構成されている。制御部には Texas Instruments 製 C2000 シリーズマイコンを用い、MATLAB/Simulink を用いたモデルベース開発環境により PWM 信号を生成している。三相インバータ出力 LC フィルタを介して負荷へ供給され、相間電圧および各相電圧の波形観測が可能な構成とした。設計にあたっては、将来的な系統連系試験を想定し、電圧レベル、絶縁、安全性を考慮した実験条件を設定するとともに、各モジュール間の接続が制御性能や計測精度に与える影響を評価できるよう配線および測定点を整理した。

3. センサの特性解析および校正手法の確立

インバータ制御および状態把握に不可欠な電圧・電流計測を実現するため、本研究では既存センサを用いた計測系の設計変更および校正を行った。電圧計測には MWPE-VS-01 電圧センサを用い、標準仕様である $\pm 400V$ 入力・ $\pm 5V$ 出力

に対し、本研究の実験条件である $\pm 200V$ 入力を $0\sim 3V$ の範囲で取得することを目的として回路定数の再設計を行った。製品仕様に基づく理論計算により、既存のゲインおよびゼロ調整範囲では所望の変換特性が実現できないことを明らかにし、抵抗の並列接続によって調整範囲を拡張した。これにより、直流および交流入力に対して適切な電圧変換が可能であることを実験的に確認した。

一方、電流計測には MWPE-IS-01 電流センサを使用し、 $\pm 1.5A$ の電流範囲を $0\sim 3V$ の電圧信号として制御系に入力する構成を検討した。本センサは本来高電流用途を想定した仕様であるため、低電流領域における分解能およびゼロ点安定性が課題となる。そこで、微小なセンサ出力を考慮したオフセット調整およびゲイン調整を行い、制御用途に適した信号レベルへ変換する回路構成を採用した。実測結果から、電流値と出力電圧の対応関係を確認するとともに、ノイズやオフセット変動が計測精度に与える影響について検討を行った。

ここで構築した校正モデルを図 1 に示す。これは、電圧電流センサから得られた信号を、Simulink のスコープ上で実際に計測した数値に変換するためのモデルである。

以上より、本研究では電圧・電流センサを含む計測系全体を再設計・校正することで、インバータ制御実験に適した信号取得環境を構築し、今後の高度制御手法の検証に必要な基盤を整備した。

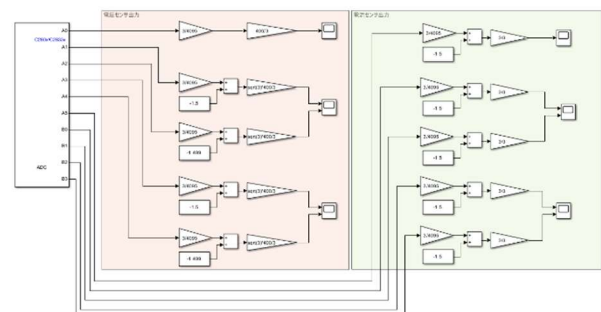


図 1 センサ校正の Simulink モデル

4. 突入電流防止回路および PWM 制御動作の検証

直流側回路には突入電流防止を目的とした抵抗およびリレー回路が実装されているが、過去

の使用履歴により抵抗の焼損や動作不良が確認されていた。本研究では回路構成を整理し、リレーを強制的に動作させることで突入電流防止回路を解除する手法を検討した。テスターによる抵抗値測定およびリレー動作確認を行い、安全に定常運転へ移行できることを実証した。また、C2000 から出力される ePWM 信号について、デッドタイムや位相関係をオシロスコープで詳細に確認し、インバータ駆動に必要な条件が満たされていることを検証した。図 2 は EPWM の動作確認のためにオシロスコープで計測した波形であり、U 相の出力電圧を示している。

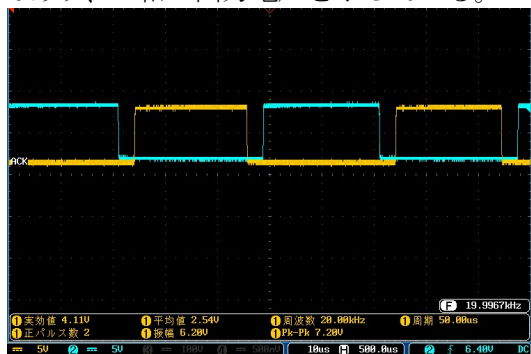


図 2 U 相の PWM 波形

5. センサ組み込み時のシステム挙動評価および今後の課題

電圧・電流センサを制御系に組み込んだ状態でインバータを動作させ、センサ未接続時との比較評価を行った。図 3 に、オープンループでインバータを操作した際に計測した、U-V 間の線間電圧波形を示す。その結果、PWM 信号およびインバータの基本動作は正常である一方、センサ信号を含めた場合には、計測値のずれや Simulink 上でのサンプリング点数の不足といった問題が確認された。これらの結果から、ADC のサンプリング周期と PWM 周期の整合性、配線およびコネクタの接触状態がシステム全体の挙動に大きく影響することが示唆された。今後は、サンプリング同期の最適化およびノイズ対策を進めることで、より高精度かつ安定した制御実験環境の構築を目指す。

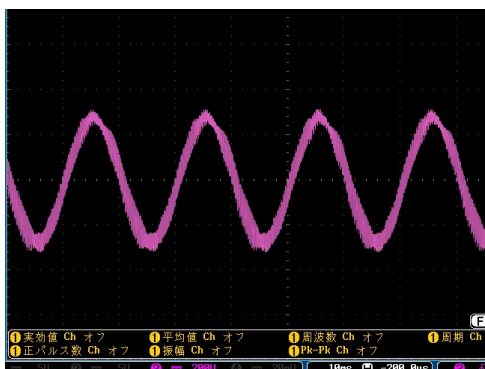


図 3 オープンループでの U-V 線間電圧波形

6. 仮想同期発電機制御モデルの実装設計

本研究では、ハードウェア環境の構築と並行して、MATLAB/Simulink を用いた仮想同期発電機 (VSG) 制御アルゴリズムの設計を行った。構築した Simulink モデルは、同期発電機の持つ慣性特性および制動特性を模擬するための「揺動方程式」を基本骨格とし、有効電力-周波数 (P-f) 制御および無効電力-電圧 (Q-V) 制御ブロックから構成されている。実機 (C2000 マイコン) への実装を見据え、制御モデルは離散時間領域で設計し、電圧・電流センサから取得した三相交流信号を dq 回転座標系へ変換してフィードバック制御を行う構成とした。本モデルにより、インバータが擬似的な慣性を持つことで、負荷急変時などの過渡的な周波数変動を抑制する効果が期待できる。現在はシミュレーション環境における基本動作の検証を完了しており、構築した実機環境への実装フェーズへと移行している。

7. まとめ

本研究では、高度インバータ制御手法の実装を見据え、Myway 製インバータと C2000 マイコンを用いた実験環境を構築した。PWM 制御による安定した三相電圧出力を確認するとともに、電圧・電流センサの回路定数再設計と校正を行い、実験に必要な計測範囲と分解能を確保した。また、突入電流防止回路や実機特有の接触不良等の課題に対処し、ハードウェアと制御系を含めた実用的な実験基盤を確立した。

今後は、本環境に仮想同期発電機制御をはじめとする系統連系制御を実装し、負荷変動や外乱に対する安定性評価を進める。さらに、PWM 周期と ADC サンプリング周期の厳密な同期やノイズ対策を行うことで、計測精度と再現性の向上を図る。これらを通じて、再生可能エネルギー主体の電力系統における安定供給実現のための基盤技術確立を目指す。

文 献

- [1] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge University Press, 2021.
- [2] 経済産業省 資源エネルギー庁, "第 6 次エネルギー基本計画," 2021 年 10 月.

代表的な研究業績

- (1) 藤井健人, 藤田吾郎 「太陽光発電学習用双方向昇降圧コンバータの設計と計測」令和 6 年電気学会・電力・エネルギー部門大会