

系統連系インバータのデジタル制御に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科
郭 中為

地球温暖化や人口の増加あるいは経済の発展に伴うエネルギー問題に対応するために省エネを図ると同時に化石燃料から再生可能エネルギーへの転換を図ることが求められている。具体的には、太陽光発電、風力発電などの発電システムの利用が挙げられる。このような再生可能エネルギーは日照や風など自然条件に応じて変化するため単独で負荷装置へ安定な電力を供給することはできないという問題がある。そこで、商用系統と連系しながら負荷へ安定な電力を供給すると共に余剰な電力を商用系統へ売電する系統連系インバータが必要とされている。

このような系統連系インバータ装置が大量に導入された場合には、出力高調波歪みの影響により商用系統の電圧品質の低下が懸念される。そのために高調波抑制対策が必要となる。それと共に二酸化炭素の削減が目的であるので損失の少ない高効率電力変換を実現する技術が系統連系インバータの重要な研究課題となっている。さらに、前述の再生可能エネルギー発電システムは火力など従来の発電システムに比べ高価であり、普及するために太陽電池など再生エネルギー装置の低コスト化とともに系統連系インバータの低コスト・小型化が求められている。

系統連系インバータは太陽電池などからの直流電力を必要な交流電力に変換している。通常、ブリッジ構成のスイッチ回路が採用されており、回路の上下スイッチを交互にオン・オフするように制御している。上下スイッチの同時オンによるアーム短絡を防止するため、スイッチングする時に上下スイッチを同時オフする期間、即ち、デッドタイム期間を設ける必要がある。このデッドタイムの影響により、インバータシステムの動作が非線形動作となるため、出力の高調波歪が大きくなる問題がある。さらに、デッドタイムの影響によりスイッチング PWM 信号の有効オンデューティを 100%までリニアに出力することは出来ないため、直流リンク電圧の利用率が低下し、デッドタイムの必要がない理想スイッチに比べ、高い直流リンク電圧が必要とされている。結果として、高い耐圧のコンデンサ素子を必要とし、スイッチングロスおよびフィルタインダクタの鉄損が増加する問題がある。今までに様々なデッドタイム補償方法が提案されているが、その殆どが出力電流の極性に基づいた補償を行っている。しかし、低コスト化のために小容量インダクタが採用される場合には、電流の極性が変化しながら負荷に電流を供給する期間がある。そのために電流極性に基づいた補償は出力特性の改善ではなく逆に出力特性を悪化させる可能性がある。また、このような方法は出力特性改善に着目して提案されたものであり、損失が増加する問題およびコンデンサの高耐圧が要求されるという2つの問題が解決されていない。さらに、小容量インダクタが採用された場合にデッドタイムを含めた回路動作は電流の極性および電流の大きさに基づいて複数の動作モードに分ける必要がある。適切な制御則を検討するためにデッドタイムを含めた回路動作の高精度な数式モデルが必要とされるが、その研究例はまだ報告されていない。

これらを背景として、本論文は、まず、デッドタイムを含めた回路動作の非線形数式モデルを提案し、制御対象の特徴を明らかにする。次に、得られた数式モデルを基に新たな制御則を検討し、理想スイッチに近い制御特性を実現する。さらに、スイッチング動作に必要なPWMゲート信号を無くすことのできる新しいPWM制御方式を提案し、直流リンク電圧の低減および電力変換効率の向上を図る。これにより、高調波歪を改善すると共に、高効率電力変換、低コストおよび小型化のできる系統連系インバータ装置を実現する。

インバータのPWM変調方式として、バイポーラ変調とユニポーラ変調がある。ここでは、まず、バイポーラPWM変調系統連系インバータの非線形数式モデルを構築し、PI制御とスライディングモード制御を併用する新しい制御則を提案する。スライディングモード制御器の出力を基にスイッチング動作に必要なゲート信号を無くすことができるため、デッドタイムの悪影響を排除し、理想スイッチに近い回路動作を得られる。次に、受動素子の小型化を検討するために直流リンクコンデンサおよびフィルタリップル電流の数式計算方法を導出し、得られた数式により高い直流電圧の悪影響を明らかにして系統電圧に応じて直流リンク電圧を最小化する制御方式を提案する。さらに、PID制御とスライディングモード制御を併用する新たなCVCF制御方式(Constant Voltage Constant Frequency)を提案し、装置が単独で負荷へ電力を供給するCVCF運転機能を高性能かつ高効率に実現できる。単相系統連系インバータで実験した結果、従来制御に比べ、高調波歪が1/3以下、変換効率が約1.8%の向上、インダクタリップル電流が約25%の低減を得て提案方法の有効性を示した。さらに、直流リンク電圧が約10%で低減することができるため、コンデンサの小型化に寄与する。

バイポーラ変調に比べ、ユニポーラ変調方式が同じスイッチング周波数でフィルタのリップル成分を2倍周波数にすることができるため、高電力変換効率、受動素子の小型化ができるというメリットがある。しかし、回路非線形動作の影響により出力高調波歪が大きいという問題がある。それを解決するため、ユニポーラ変調の新たなPWMゲート制御方法を実現し、電流不連続モードを含めた回路動作の非線形数式モデルを提案する。得られた数式モデルを基にPI制御とオープンループ制御を含めたハイブリッド制御方法を提案し、実験結果により高調波歪が1/6以下、電力変換効率が約0.44%の改善、インダクタリップル電流の約20%の低減を得て提案方法の有効性を示した。

本論文は、第1章から第6章で構成され、以下は各章の概要を示す。

第1章では、本研究を行うに至った背景および要求と問題点を明らかにし、本研究の目的と意義を述べる。

第2章では、バイポーラ変調インバータの非線形数式モデルを提案し、PI制御とスライディングモード制御を併用する系統連系制御について述べる。

第3章では、数式計算を用いて受動素子に対して高い直流電圧の悪影響を明らかにし、直流リンク電圧を最小化する新しい制御方式を提案する。

第4章では、PID制御とスライディングモード制御を併用するCVCF制御方式について述べる。

第5章では、ユニポーラ変調系統連系インバータを対象に新たなPWM変調ゲート制御方法を提案したうえで、不連続モードを含めた回路動作の非線形数式モデルを構築し、PI制御とオープンループ制御を併用する新しい系統連系制御方式を提案する。

第6章では、本研究の成果を総括し、今後の課題にふれて結論とする。