

系統連系変換器の円滑導入を可能とする 系統状態に応じた高調波共振抑制制御技術

Higher Harmonic Resonance Suppression Control Technology for Smooth Introduction of
Grid-Connected Converters Applying Adaptive Approach Based on Grid Conditions

場所・時間ごとに変化する系統状態に応じて系統連系変換器を 制御し、再生可能エネルギーや直流送電の安定運用を実現

カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーや蓄電池の導入、高効率な直流送電システムの構築が急速に進んでいます。系統連系変換器は、これらと電力系統との接続に不可欠ですが、場所・時間ごとに変化する系統状態によって系統と変換器の間に高調波共振が発生し、運転できなくなる問題が多数報告されています。そこで、変換器制御の特性を動的に調整することで、系統状態の変化にも対応し、高い安定性が得られる高調波共振抑制制御を開発しました。複雑化する系統にも円滑に系統連系変換器が導入可能となることから、電力系統の高信頼化に加え、再生可能エネルギーの増加にも貢献します。

背景

脱炭素社会・カーボンニュートラルの実現に向けて、太陽光発電・風力発電などの再生可能エネルギーや蓄電池の導入、更には送電効率の高い直流送電システムの構築がますます進んでいます。半導体デバイスで交流/直流変換する系統連系変換器は、これらと電力系統との接続に不可欠ですが、系統の複雑化や状態変化が安定運転上の課題になっています。例えば、系統インピーダンス(送電線や負荷などの抵抗、インダクタンス、キャパシタンス)は、発電所との距離や近隣需要家の状況などによっても変化し、それと変換器との意図しない相互作用によって高調波共振が発生する場合があります⁽¹⁾。

高調波共振は、変換器の運転を不安定化させるだけでなく、系統に接続された機器の焼損や誤動作を引き起こすおそれがあります。従来、このような問題の多くは変換器設置後に顕在化するため、十分な事前対策が困難でした。変換器回路上の対策として、大容量の高調波フィルターを設けることが考えられますが、コストや体積の増加につながります。また、別の対策として、変換器制御の変更が考えられますが、時々刻々と変化する系統状態への対応は困難でした。

そこで、変換器制御の特性を動的に調整することで系統状態の変化に対応し、制御演算の工夫によって高い安定性が得られる高調波共振抑制制御を開発しました。

高調波共振抑制制御

図1に、開発した高調波共振抑制制御の作用を等価的に表現した系統連系変換器システムの構成を示します。従来の変換器制御は交流電流制御部だけを備え、あらかじめその特性を設計します。交流電流制御部は、変換器と系統を流れる電流の系統周波数(50 Hz又は60 Hz)成分だけでなく、高調波成分にも作用します。したがって、系統状態や設計によっては高調波共振が増幅される場合もあり、大きな系統状態の変化には対応できません。

開発した制御では、新たに共振周波数分析部と、デジタルフィルター部、仮想インピーダンス部を導入しました。これらの演算処理は、全て制御装置のソフトウェア上で実行され、変換器回路の設計変更は不要です。

具体的には、最初に系統電圧を検出し、リアルタイムに共振周波数を分析します。デジタルフィルター部と仮想インピーダンス部の特性は、実際の共振周波数に合わせて最適調整されます。調整されたデジタルフィルター部は、系統と変換器の間に流れる電流の検出信号を、共振周波数成分を含まない信号と含む信号に分けて、それぞれの制御部に入力させます。

交流電流制御部は、従来とは異なり、共振周波数成分を含まないため、その制御の作用によって高調波共振が増幅されることはありません。一方、仮想インピーダンス部は、

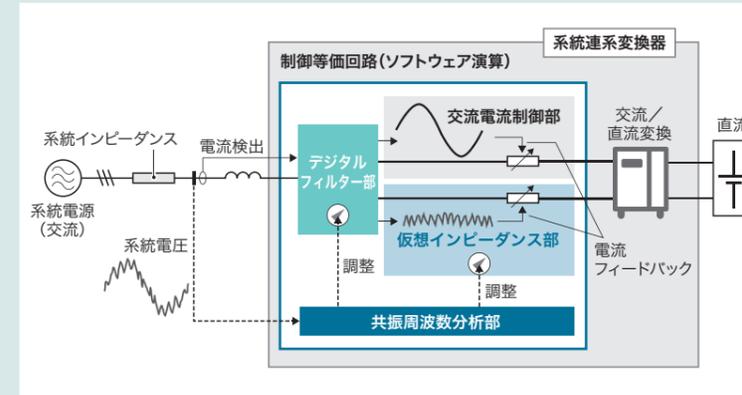


図1. 系統連系変換器システムと高調波共振抑制制御の等価回路

各電流フィードバック部(等価的に可変抵抗)は、系統周波数と共振周波数の制御に最適化されています。

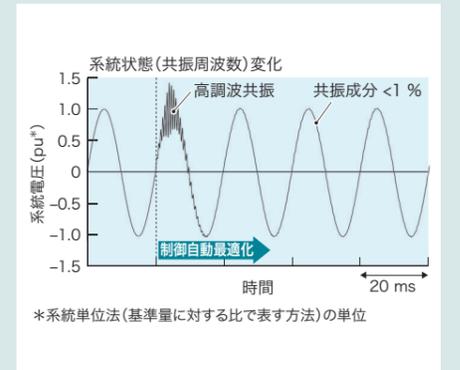


図2. 系統状態変化時の系統電圧シミュレーション波形

高調波共振は、ごく短時間で抑制されるため、変換器や近隣機器への影響はほとんどありません。

交流電流制御部から分離された共振周波数成分に対して、それを抑制する抵抗のように作用します。

このように、各部に作用する周波数成分を分け、その特性をリアルタイムに調整することで系統状態の変化にも対応した制御を実現します。

制御理論を用いた安定性検討

この制御の安定性(高調波共振抑制性能)は、制御理論⁽²⁾を用いて説明できます。デジタルフィルター部は、高調波共振の発生しやすい“不安定”状態を“安定限界”状態まで改善します。これは、高調波共振の更なる増幅を防止することに対応します。一方、仮想インピーダンス部を安定限界状態で組み合わせると、更に“安定”状態に改善されます。これは、高調波共振が積極的に抑制されることを意味します。この制御では、高調波共振を増幅しない作用と積極的に抑制する作用を組み合わせることで高い安定性が得られます。

シミュレーション検証

この制御は、低圧・中小容量変換器から高圧・大容量変換器まで幅広く応用できます。ここでは、数百kVの特別高圧系統に適用される直流送電用変換器にこの制御を適用した場合の動作をシミュレーション検証しました。

図2に、系統状態(共振周波数)変化時の系統電圧波形を示します。系統状態変化前は、周波数50 Hzの安定した

交流電圧を示しています。系統状態が変化した直後には、十数msだけ顕著な高調波共振が見られますが、高速に高調波共振抑制制御が最適化されます。高調波共振は20ms(系統電圧1周期)以内に抑制され、高調波成分は十分に小さくなること(共振成分1%未満)を示しました。

今後の展望

今後は、具体的な系統連系変換器製品への適用に向けてこの制御の性能限界を明らかにし、それを考慮した製品実装検討や検証に取り組みます。様々な系統連系変換器製品への適用を検討し、電力系統の高信頼化や再生可能エネルギーの導入促進に貢献します。

文献

- (1) 中島達人, ほか. 自動式変換器-交流ケーブル系の高次高調波共振現象の検討. 電気学会論文誌B. 2004, 124, 1, p.69-76.
- (2) Sun, J. Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters. IEEE Trans. Power Electron. 2011, 26, 11, p.3075-3078.

関口 慧

東芝インフラシステムズ(株)
インフラシステム技術開発センター 電機応用・パワーエレクトロニクス開発部
電気学会会員