

系統連系インバータのシミュレーション解析

中森 昭(なかもり あきら)

江口 直也(えぐち なおや)

① まえがき

近年のパワーエレクトロニクス技術の発達により、電力・産業分野で大容量自励式インバータシステムが電力系統に導入され、今後、さらにその適用が拡大していく傾向にある。例えば、アーク炉で発生するフリッカを高速・高性能で補償するための自励式フリッカ補償装置や電気鉄道で発生する三相不平衡電圧を是正する装置として、自励式無効電力補償装置による不平衡補償装置が開発・導入されている。また、燃料電池や新形電池を用いた分散電源や電力貯蔵設備も近い将来、大容量自励式インバータを用いて運用されようとしている。このように、その用途と配置は多岐にわたっており、その制御システムは、年々、高機能・高性能が要求され、複雑化の傾向にある。

これらの電力系統に連系して用いる新しい大容量自励式インバータシステムの開発に際し、これが大規模・大容量であること、制御が高機能で高度化していること、連系する系統がそれぞれ固有な特性を持つことなどから、①インバータ制御系の最適設計、②電力系統と連系する装置性能把握、③電力系統の固有特性に対する解析検討、のために、大容量化を実現するインバータの多重化やインバータ制御系および電力系統の詳細モデル化によるコンピュータシミュレーションが不可欠な存在となっている。

本稿では、大容量パワーエレクトロニクス装置の開発に際して行っているコンピュータシミュレーションの適用例について紹介する。

② 自励式フリッカ補償装置の制御解析⁽¹⁾

本章では、インバータ制御系の最適設計のためにコンピュータシミュレーションを行った解析例を紹介する。

自励式フリッカ補償装置は、アーク炉の稼動によって起きるフリッカを補償対象とする瞬時電流補償装置である。この場合、ランダムに変化するフリッカを効果的に補償するため、応答速度の高速性が重要課題となる。そこで、インバータ全体の制御遅れの目標を約1ms以内に設定し、

シミュレーションを利用して、インバータ制御系の定常特性と過渡特性の精度向上を達成した。

2.1 シミュレーションモデル

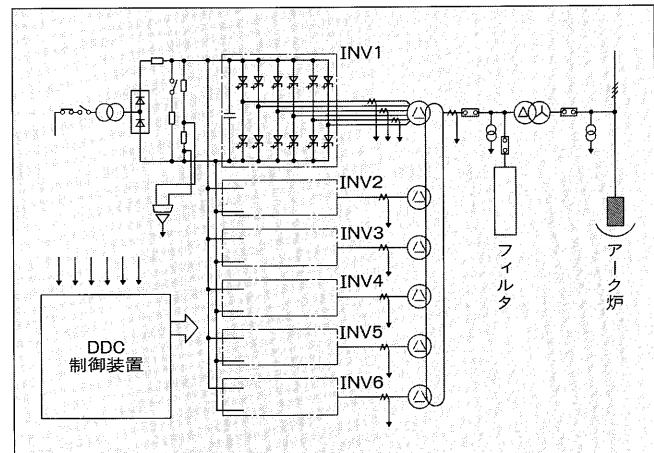
インバータの主回路構成を図1に、インバータ制御系を図2に示す。主回路は、実機のGTO(Gate Turn-Off Thyristor)の数式モデルとして、インバータ制御系の出力信号に応じてオン・オフするスイッチと、それに並列に接続される抵抗およびコンデンサの直列回路で構成されるスナバ回路で模擬した。

インバータは大容量化のために、6多重化されており、合計72個のGTOから構成されている。シミュレーションでは、72個すべてのGTOを上記のスイッチモデルで模擬し、制御系もGTOへのパルス発生部まで実機に忠実なモデル化を行った。

2.2 定常特性の向上

実験とシミュレーションにより、正弦波のインバータ出力電流指令値に対するインバータ出力電流の定常波形を解析した。その波形を図3(a)に示す。両者の波形はよく一致しており、シミュレーションモデルの妥当性が確認できる。ここで、インバータ出力電流波形は、その三相出力電流の

図1 自励式フリッカ補償装置の主回路



中森 昭

コンピュータシミュレーションによる電力系統解析技術の研究に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所系統制御開発グループ。

江口 直也

各種半導体電力変換装置の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所変換装置開発グループ主任技師。

図2 自励式フリッカ補償装置のインバータ制御系

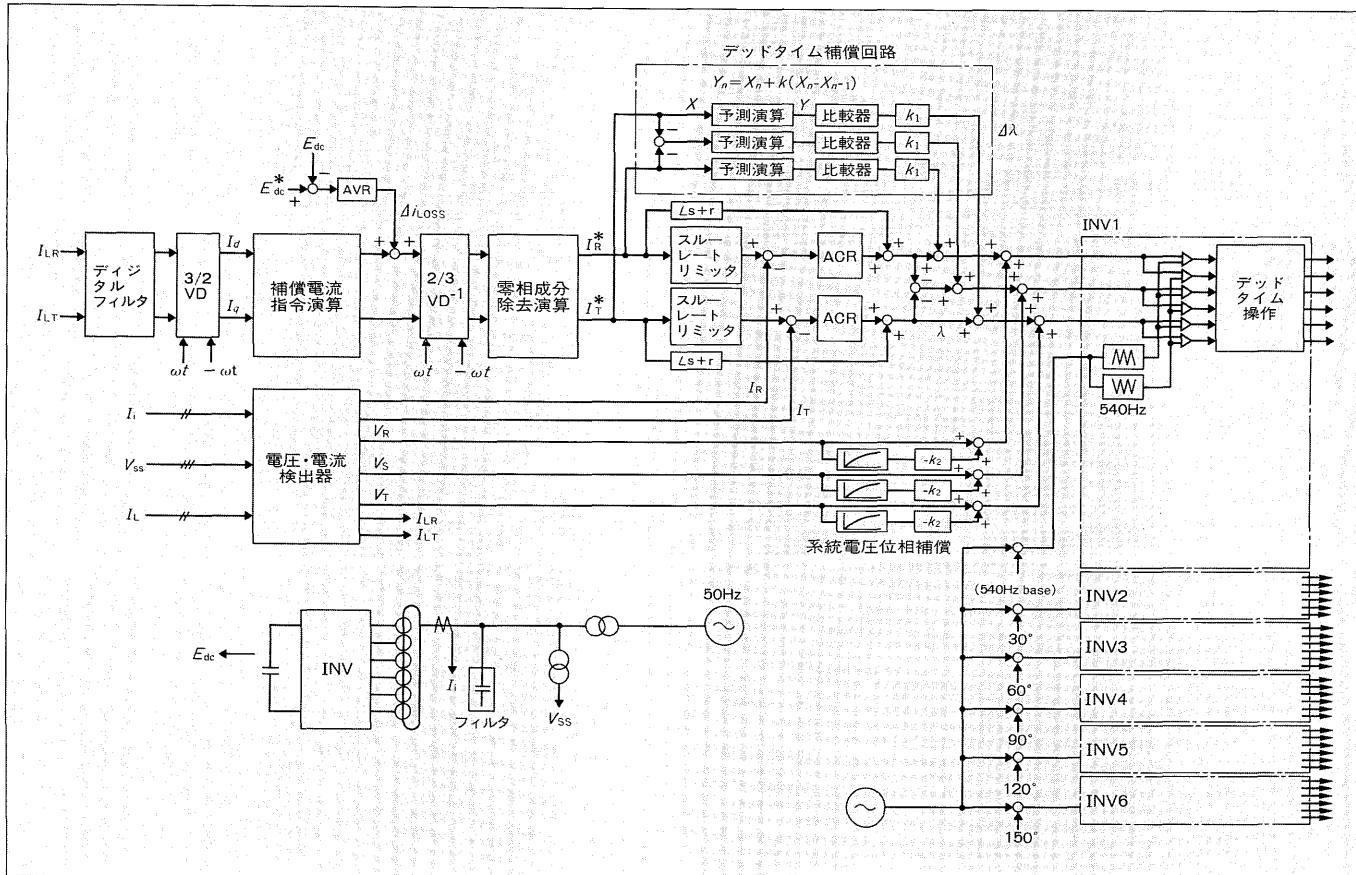
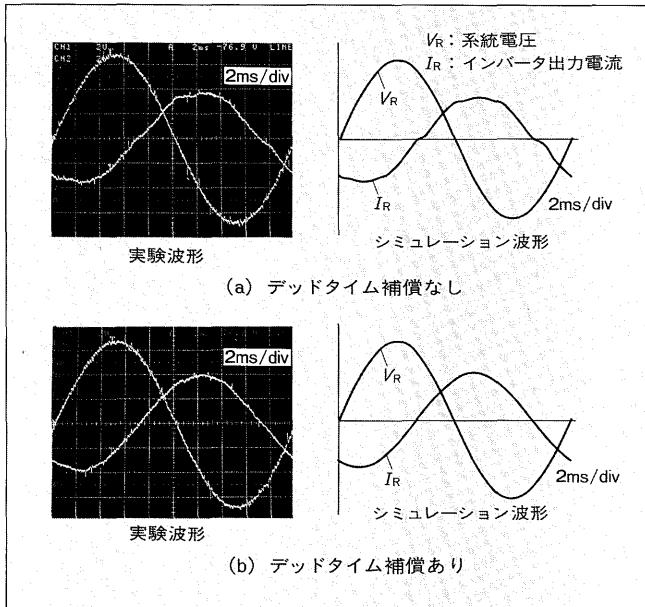
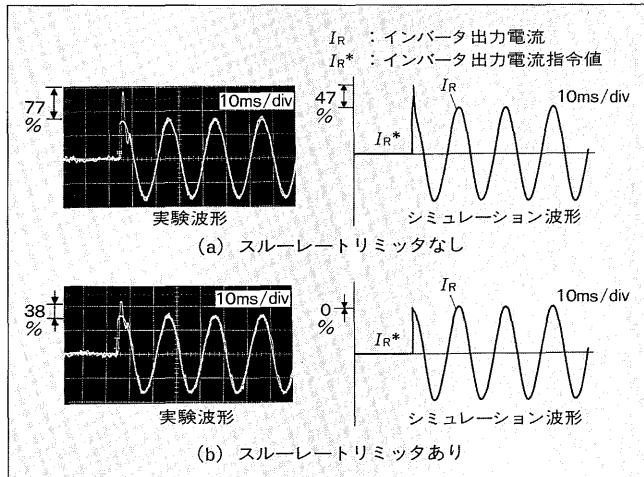


図3 定常波形



零クロス点で、電流指令値との間に定常偏差が生じていることが分かる。この原因はインバータの上・下アームの短絡を防止するためのデット"タイム"であることが判明した。そこで、この偏差を補償するための対策として、デットタイム補償回路(図2参照)を追加し、定常偏差の向上を図った。デットタイム補償回路追加後の実験波形とシミュレーション波形を図3(b)に示す。この波形から、インバータ出力電流波形は完全な正弦波となり、定常特性が改善さ

図4 過渡波形



れることを確認した。

2.3 過渡特性の向上

インバータ制御系の電流指令値のステップ変化に対するインバータ出力電流波形を図4(a)に示す。この波形から、インバータ出力電流がデバイスの容量限界を超える過電流となることが判明した。その対策としてインバータ制御系内のACR(Automatic Current Regulator)の前に、定常特性には影響を与えないスルーレートリミッタを追加した。本リミッタの追加後における電流指令ステップアップ急変時の実験波形とシミュレーション波形を図4(b)に示す。

この波形から、本対策による十分な過電流の抑制効果が確認できる。

③ 大容量に適した系統連系インバータ装置の特性解析

本章では、大容量のインバータ装置を電力系統と連系する場合の装置全体の性能把握について紹介する。

大容量インバータ装置の開発に際し、装置製作・運用・系統連系要件の面から、次の三つの課題が挙げられる。

- (1) インバータ損失の低減
- (2) 系統じょう乱対策
- (3) 高調波低減

これらの課題を同時に解決するため、GTO と IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) インバータのハイブリッドインバータの開発を行った。このなかで上記(2), (3)の課題について、インバータ装置全体設計の妥当性を確認するため、シミュレーション解析を行った。

図5 ハイブリッドインバータの主回路

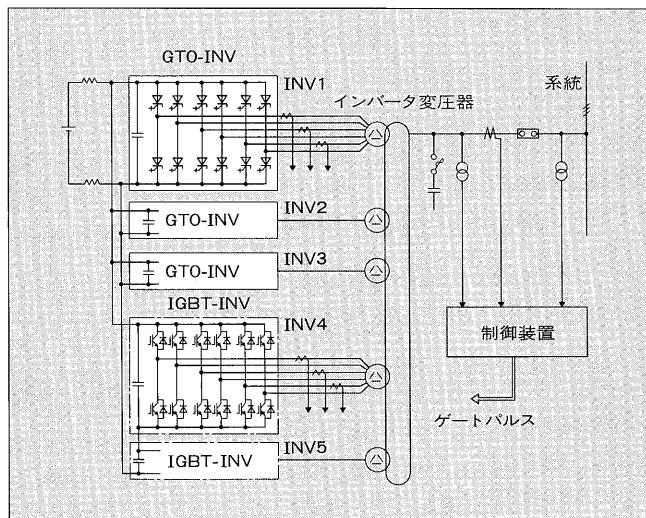
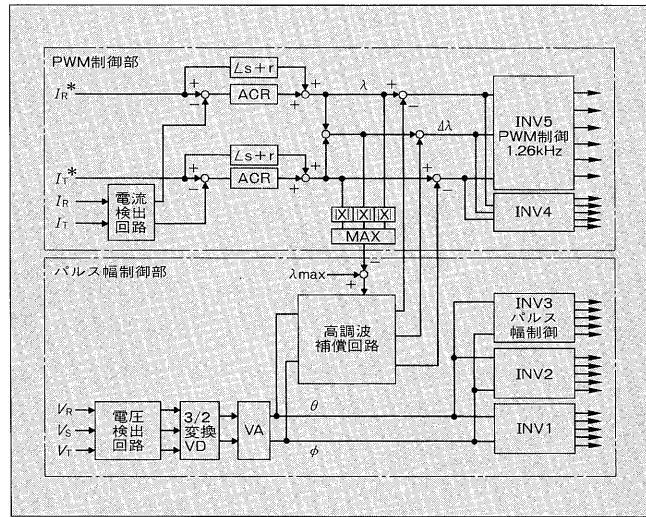


図6 ハイブリッドインバータのインバータ制御系



3.1 シミュレーションモデル

主回路構成を図5に、インバータ制御系を図6に示す。主回路は GTO で構成される低速・大容量インバータと IGBT で構成される高速・小容量インバータからなり、GTO による大容量化と IGBT による高速化を狙っている。インバータ制御系は、パルス幅制御部と PWM (Pulse Width Modulation) 制御部で構成しており、制御系内部で高調波補償対策を行っている。

3.2 解析結果

高調波補償の効果を解析するために、補償回路の有無による定常解析を実施した。定常時のインバータ出力電流の波形とそのスペクトルを図7に示す。本図から、17次と19次の理論高調波が抑制されていることが確認できる。

さらに、系統電圧の瞬時電圧低下時のインバータ出力電流解析波形を図8に示す。系統電圧 20 % の電圧低下に対して、インバータ出力電流の過電流は、リレー整定値以下の 122 % となる。また、30 % 低下に対しても過電流 136 % と問題のないレベルに制御できることが分かった。系統電圧の瞬時電圧低下の半数以上は 20 % 以内の低下であることが知られており、通常運用では、パルスゲートブロックや系統と解列遮断するような実運用上の問題は解決

図7 定常時のインバータ出力電流とそのスペクトル

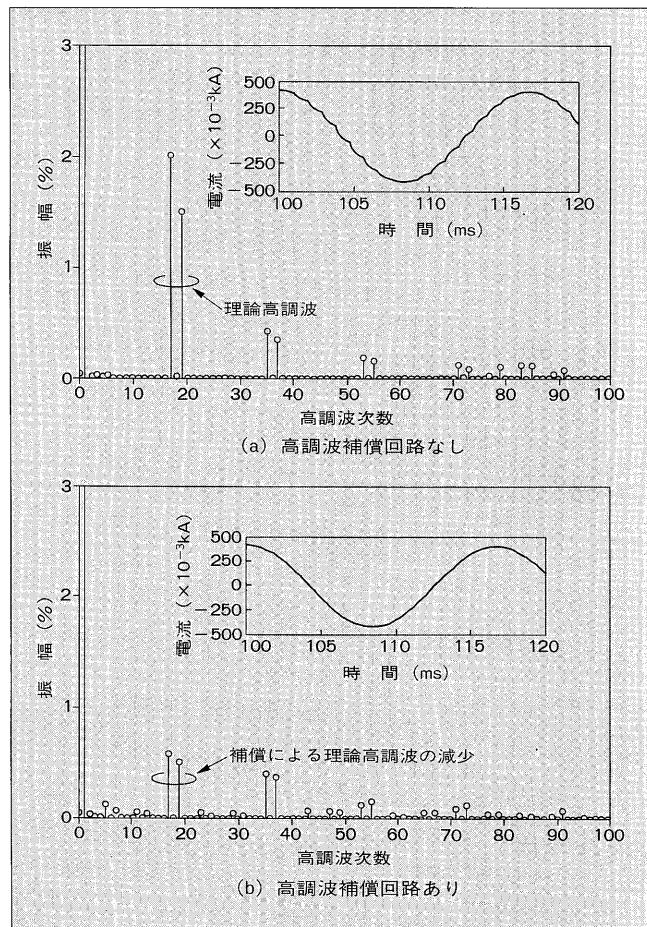
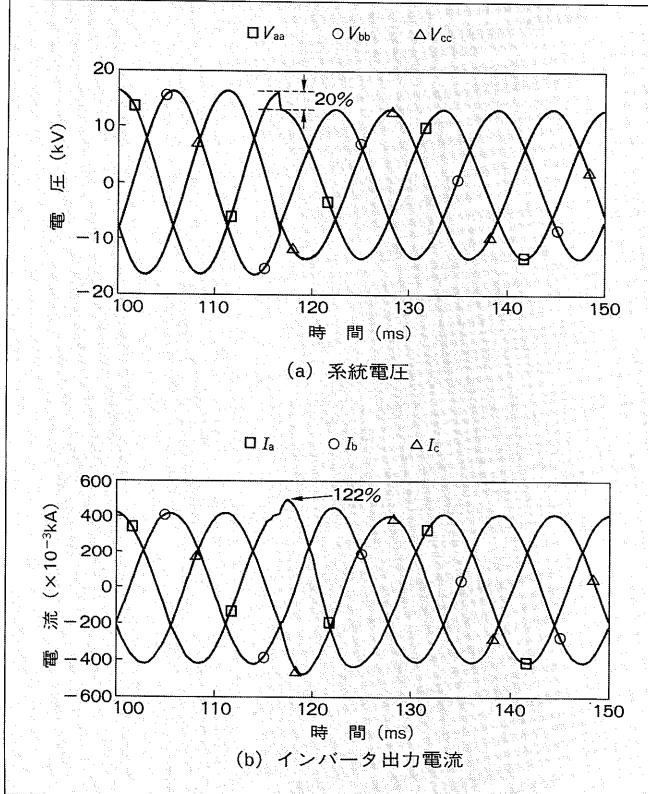


図8 20%瞬時電圧低下時の過渡波形



される。

4 系統事故の影響の解析⁽²⁾

本章では、系統固有の特性に対する解析の一例として、瞬時停電復電時の事前検討について述べる。

ここで検討対象とするのは、電気鉄道で発生する三相不平衡電圧を是正する自励式無効電力補償装置が接続された電力系統である。本無効電力補償装置は、多重インバータ変圧器を介して電力系統に連系している。この多重インバータ変圧器は、インバータ停止時の系統側からの励磁に対して、ギャップ付主脚鉄心および中間ヨークの適用など、各直列多重巻線間に均等に電圧分担する設計が施されている。

しかし検討の結果、無励磁状態からある条件下で系統電圧を印加した直後の過渡状態においては、鉄心飽和に伴って巻線間の電圧分担がアンバランスとなり、インバータ変圧器の二次側が部分的に過電圧となるおそれのあることが分かった。この結果、インバータのフリーホイーリングダイオードを介して直流回路に電流が流れ込み、コンデンサを充電し、場合により直流過電圧を発生させることとなる。実際の運用で、この状態が発生するのは、電力系統で短絡などの事故が起きて、ある一定期間系統の電圧が低下した後に復電するような瞬時停電復電時の場合が考えられる。そこでこれに注目して、電力系統を詳細にモデル化したシミュレーション解析を行った。

図9 全体系統構成

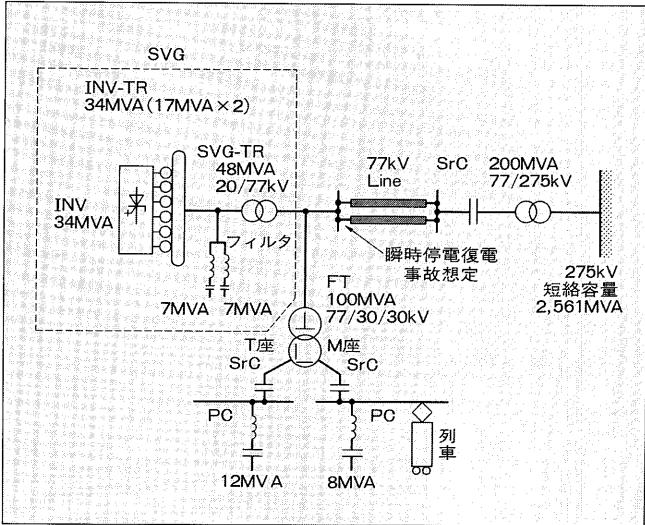
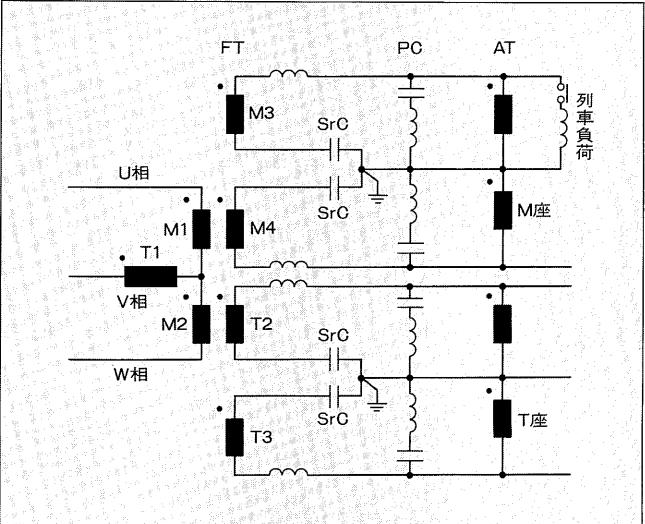


図10 き電系統



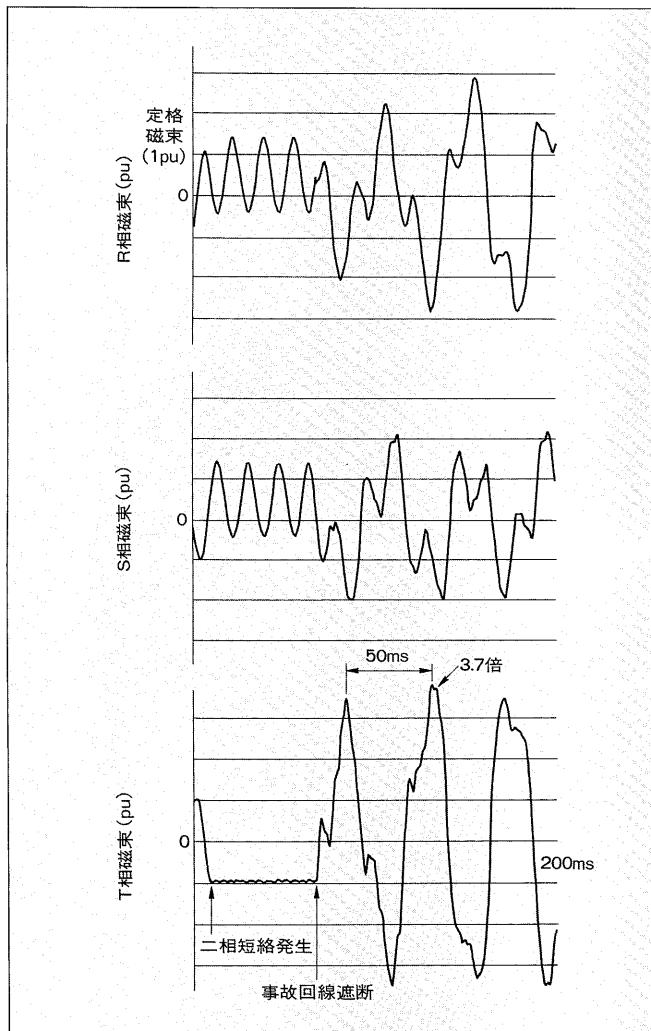
4.1 シミュレーションモデル

対象系統の全体系統構成を図9に示す。系統は275kVの上位系統を、2,561MVAの短絡容量で決まるインピーダンスと電源で模擬しており、列車負荷へは275kVから77kVへの降圧変圧器、SrC (Series Capacitor)、77kVの2回線専用線、100MVAのFT (Feeding Transformer) を通して給電している。

き電系統を図10に示す。き電線側は、FTで77kVから30kVのT座、M座に降圧しており、インピーダンス補償や力率補償用のSrC、PC (Parallel Capacitor) とAT (Auto-Transformer) から構成されている。

電力系統の事故について、多重インバータ変圧器にとって最も厳しい条件となるのは、停電時にいったん電圧がほぼ零まで低下し、短時間に復電するような場合が考えられる。そこで、最悪条件として、図9に示すとおり、受電点近傍の77kVライン1回線が二相短絡事故を起こし、短時間に事故回線切離しにより復旧した場合を想定した。

図11 コンピュータシミュレーション波形



4.2 解析結果

多重インバータ変圧器 20 kV 側の各相の磁束を図11に示す。本波形には、一周期が 50ms の低周波振動が含まれている。これは系統に設置された SrC によるものと考えられる。この振動が主な原因となって、変圧器の過渡磁束

のピークは定格磁束の約3.7倍となる。このため、多重インバータ変圧器は深い飽和領域に至り、多重巻線間の電圧アンバランスにより変圧器二次側に過電圧を発生するとともに、直流コンデンサに直流過電圧を引き起こすおそれがあることが判明した。

したがって、実機の運用シーケンスにおいて、瞬時停電復電時には、インバータはいったん、積極的に系統からトリップさせることにした。

5 あとがき

電力用・産業用とともに電力系統に連系される大容量インバータシステムは、今後も、その適用技術の発達により、制御装置は高度化され、広範囲な用途として普及するものと予想される。その高度化により複雑化する制御装置の設計および電力系統との連系でおきる諸問題などの解決には、全体システムの動作を把握するために、大規模システムを詳細にモデル化するコンピュータシミュレーション技術が、さらに必要不可欠となる。

富士電機では、これらの要求に対し、電力系統現象解析用に開発され、世界的なスタンダードプログラムとなっている EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) および電気回路網と任意制御系データのグラフィカル入力が可能な EMTDC プログラムのほか、種々の専用プログラムを利用して、解析技術の向上を進めている。

今後は、FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器の適用技術を確立するために、シミュレーション解析を実施する予定である。

参考文献

- (1) Nakamori, A. et al. : SVC Control System for Arc Furnaces. IPEC 横浜'95 (1995)
- (2) 土井追修二：電気鉄道用静止形無効電力発生装置の系統解析，平成 6 年度電気学会産業応用部門全国大会 (1994)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。