

## 論文の内容の要旨

論文題目：

周波数特性同定に基づいたリアルタイム電力系統デジタルシミュレータにおける送電網モデルに関する研究

氏名： 安田 祐治

年々大規模化、複雑化を続ける電力系統において、その系統上で発生する諸現象を解析することは重要なことであり、特に保護リレーやその他の新たなパワーエレクトロニクス応用電力制御機器の有用性を検証する際には、リアルタイム電力系統シミュレータを用いるのが大変有効な手段となってきた。現在では、コンピュータの性能の向上に伴い、場所を取らず、操作性の良いフルデジタルタイプのシミュレータが主流になってきている。電力系統の過渡現象の三相瞬時値解析ツールとしては、これまで世界的にはEMTPが広く利用されてきた。この計算をリアルタイムで処理し、保護・制御システムなどの検証試験に利用するなどの応用をはかることが行われている。しかしながら、リアルタイム処理の側面から大規模系統への適用には限界があり、また、このようなデジタルタイプのシミュレータ装置は高価であり、またデータ収集の手間、装置のデータフォーマットやそれに合わせたデータ処理などに知識や慣れが必要となるなど、これらの諸問題を解決するために、近年では、市販のCADソフトであるMATLAB/SIMULINKを用いてプログラムを作成し、それを近年処理能力が極めて向上しているDSPで処理する手法の研究が行われている。この手法を用いることにより、開発コストを抑えて従来のものよりも安価で汎用性のあるものにしたデジタルシミュレータの研究が進められている。このようなコンセプトを基に商品化されているARTEMISのようなソフトもすでに存在している。ARTEMISでは微分方程式の解法として台形法を用いており、SVC、TCR、インバータといった機器に関するシミュレーション例が多く扱われている。

電力系統においてデジタルシミュレーションを行う際、系統を構成する要素は電力源、電圧源、電流源のどれかの形でモデル化されてきた。これは電力系統というものが巨大な電気回路網であるという事実から当然のことである。本研究では3相瞬時値でのシミュレーションを行うため電力源形式のモデルではなく、電圧源、電流源のモデルを用いる。

リアルタイムシミュレーションのための送電線モデルに関しては、これまでも研究がなされてきており、IEEEなどで発表されている。その中には実用化技術として、デジタルタイプの電力系統リアルタイムシミュレータがある。TNAやRTDSに組み込まれているものも存在する。この送電線モデルは、J.R.Martiの提案したBergeron法を用いたモデルを発展させたもので、す

すべての周波数帯域を網羅した非常に詳細なモデルであり、主として HVDC や異国間の連系線モデルとして送電線自体の特性解析に用いられている。電力系統に生じる諸現象は、周波数変動や電圧不安定といったものからサージ現象や高調波といったものまでその周波数は幅広く分類される。従来のリアルタイムシミュレーション技術は基幹系統を中心に据えていたため高コストの解析技術でも開発が行われてきたが、今後は分散電源の導入などを背景に、サージ現象などの非常に速い現象の解析領域の外で装置の運転特性などをリアルタイムに確認したいといったニーズも高まることが予想される。このような目的のためには、低コストで諸現象をリアルタイムに再現することを可能にする技術が必要になると考えられる。そこで本研究では、シミュレータによる解析対象を電圧不安定現象、過渡不安定現象、定態不安定現象、周波数変動といった安定度に関する諸現象に絞り、1kHz 付近以下の帯域の現象を扱うこととし、それ以上に高い周波数領域であるサージ現象などは対象としない。そのため、送電網の基礎となる送電線のモデルは、分布定数線路を用いた Bergeron 法などサージ領域まで網羅した方法を用いる必要はなく集中定数回路で十分なモデル化ができると考えられる。このことにより、演算コストを低減し、汎用のハードウェアにおける、相互インピーダンスを考慮した送電線モデルを組み込んだ大規模電力系統でのリアルタイムシミュレーションの実現を目指している。また、従来の安定度計算においては対称故障で三相地絡事故が多かったため、相互インピーダンスの有無が問題視されることはあまりなかった。しかし実際の系統において、ほとんどの事故、故障は不平衡であることから、実系統に生じる現象から考えて、不平衡故障を取り扱うことのできるモデルを提案する。

デジタルタイプのシミュレータの特徴としては、モデル化の精密さと比例してシミュレーションの精度が向上するという点である。しかしその反面、より詳細なモデル化は計算時間の増大につながる。また、電力系統のモデルにおいて、系統が大規模かつ複雑になるほど、系統の構成に労力を要する。また、発電機その他の系統機器と比較して、大規模系統になるほど送電網部分の計算量というものがシミュレーション全体の中で大きな割合を占めることになる。

電力系統を構成する際、送電網部分とそれ以外という分割の仕方でもモデル化を行うと、送電網モデルの自由度が不足するというデメリットが存在する。そこで本研究では、送電網モデルをさらに2つの部分で構成することを提案する。発電機モデルと接続する送電線モデルの対地キャパシタンスを引き出し、送電網モデルを2つのブロックに分けそれぞれが独立して演算を行うという形をとる。この形をとることで、対地キャパシタンス部分の処理方法を変更するだけで入出力の自由度を確保することができる。

送電網モデルをこのような構造にすることで、そこに接続する発電機その他の機器モデルにおいてもメリットが生じる。電圧源モデル、電流源モデルのどちらを用いるにしても、送電網モデルにおけるデータの入出力関係を気にする必要がなくなり、系統を簡単に構成することができる。本研究では、大規模複雑系統でのシミュレーションにおける送電網部分の計算時間短縮、送電網モデルの自動作成による労力の削減を目的としている。そのため、周波数特性の数値データから次数を抑えた有理伝達関数行列の形に同定することにより、電圧源、電流源の双方に接続することが可能な低次同定送電網モデルを自動的に作成する手法を提案する。同定手法には、初期値に

依存せず、また繰り返し計算を削減できる重み付け線形化最小二乗法を用いる。

ラプラス領域 ( $s$  領域) での同定 (連続時間領域) は、相互インピーダンスを考慮しない簡易送電線モデルを用いて構成した系統では非常に精度のよい同定結果を得ることができた。一方で相互インピーダンスを含めた場合、同定する有理伝達関数の分子側の次数が分母側よりも高次になってしまうため、周波数特性は精度よく同定されるものの伝達関数の極の実部が正になってしまい安定に同定することができないという現象が問題となった。そこで、 $s$  領域ではなく、 $z$  領域での同定 (離散時間領域) を用いることで問題の回避を試みた。標準  $z$  変換だけでなく、台形法近似、テイラー展開一次近似などの手法を用いて同定を行うことで相互インピーダンスを考慮した送電線モデルで系統を構成した場合でも低次同定送電網モデルを安定なシステムとして同定することを可能にした。提案手法を用いてさまざまなパターンの系統のモデルを作成し、送電網を詳細にモデル化した場合のシミュレーション結果との比較を行い提案手法の妥当性の評価を行った。その結果、低次伝達関数同定送電網モデルは十分な精度を持つことが確認され、また負荷ノードを多く含む大規模な系統において計算時間の短縮効果が得られることがわかった。

これら提案してきた手法を用いて作成したプログラムを DSP へ実装し、実際にリアルタイムシミュレータとしての評価を行った。DSP への実装に際しては、MATLAB/SIMULINK との整合性から、dSPACE を用いている。この dSPACE に MATLAB/SIMULINK のモデルファイルをダウンロードする際に、シミュレーション時に収束計算を必要とする代数ループを含んではならないこと、微分方程式の解法はオイラー法を用いること、というのが使用条件になっている。また、DSP の能力ではリアルタイムで処理することが不可能と判断されたプログラムをダウンロードすることはできないことになっている。代数ループを含まないようにするという条件に関しては、送電網モデルを同定する際に必ず分母の次数を分子の次数よりも最低 1 大きくするという条件を設定することで代数ループを回避することができる。オイラー法を用いなければならないという条件により、本来システムとして安定であり、ルンゲ・クッタ法など高次の解法を用いれば収束するシミュレーションが発散してしまうということが考えられるが、これは送電網モデルを  $z$  領域で離散化して同定することで解決することができる。これらを踏まえた上で DSP 1 台あたりで扱える系統規模の検証を行った。その結果、提案手法を用いることで DSP に問題なくダウンロード可能なことが確認され、また DSP 1 台あたり発電機 3 機を含む系統まで扱えることがわかった。DSP を並列することでその倍数台発電機を含む系統のリアルタイムシミュレーションが行えると考えられる。

以上、周波数特性から低次伝達関数行列型に同定した送電網モデルが十分な精度をもつこと、大規模系統を扱う際に計算時間を短縮できることが確認された。また、 $s$  領域ではなく近似を用いた  $z$  領域で同定することにより相互インピーダンスの考慮が可能になることがわかった。それらを DSP にダウンロードすることでリアルタイムシミュレーションを実現し、DSP の並列によりより大規模な系統を扱うことができることを確認した。