

スマートグリッドを支える シミュレーション技術

河野良之*
北山匡史*
高野富裕**

Simulation Environment for Smart Grid Application

Yoshiyuki Kono, Masashi Kitayama, Tomihiro Takano

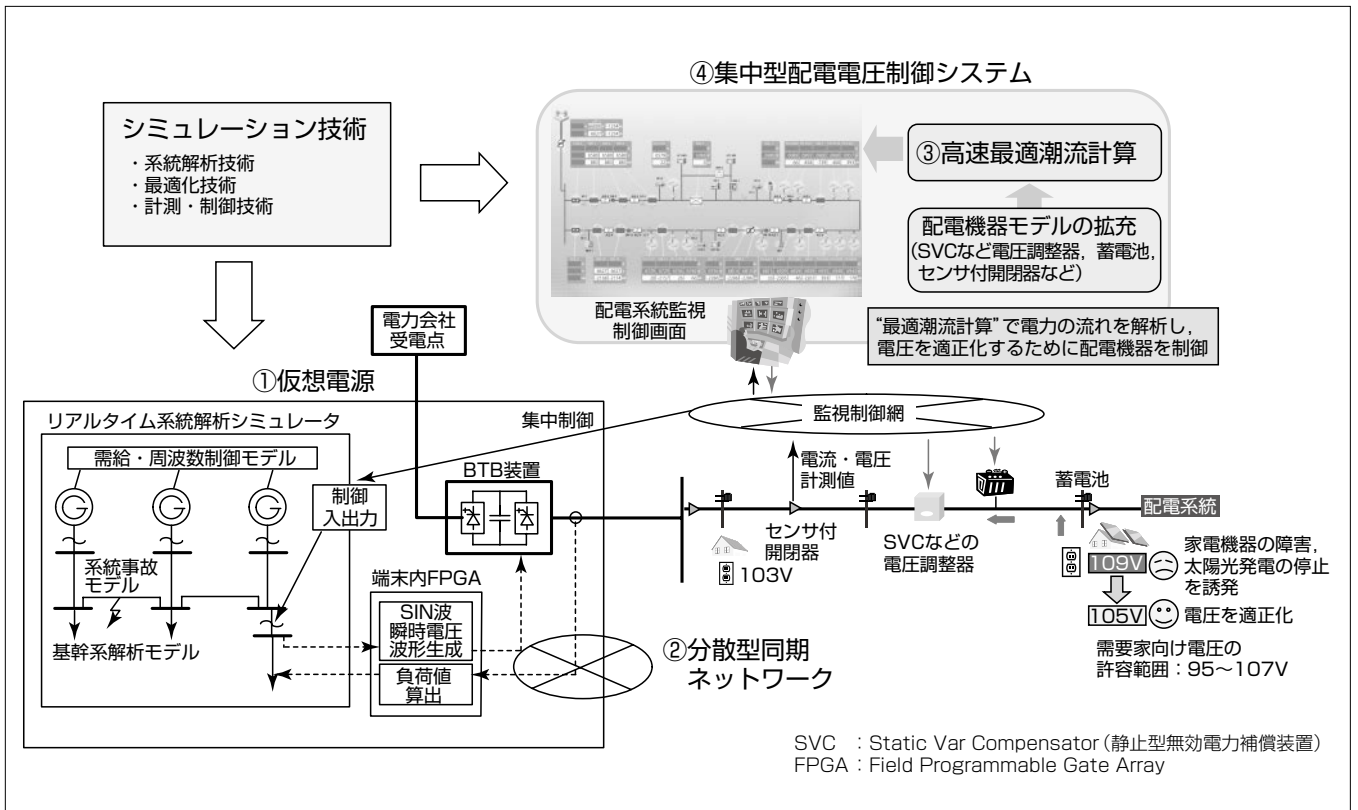
要 旨

高品質な電力供給を維持しつつ、電力系統への自然エネルギー導入を促進するためには、全系周波数維持、系統安定度確保、配電電圧制御、高調波抑制等、多くの課題を解決していく必要があり、スマートグリッドとして情報・通信技術を活用して系統全体での統合化した運用・制御が期待されている。

これを実現していくためには、既存系統に対する解析技術に加えて、従来は別々に扱われていた基幹系統と配電系統を組み合わせた新たなモデリング・シミュレーション・実証が必要不可欠である。三菱電機は伊丹地区でスマートグリッド実証実験環境を構築中であり、パワーエレクトロニクス機器であるBTB(Back-To-Back)装置を系統解析シミュレータと組み合わせた仮想電源、及び複数地点での実時間計測制御環境である分散型同期ネットワークシステムを用いてこれを実現していく。

また、スマートグリッドでは、配電系統レベルに分散電源・電力貯蔵・デマンドレスポンス(Demand Response: DR)等、制御可能な機器が大幅に増えることになり、従来は基幹系のみで行われていた最適化の考え方を配電系レベルまで拡張することで得られるメリット(自然エネルギー連系可能量増大、損失削減による効率化等)は大きい。これに向けて当社では、配電系統向け高速最適潮流計算をコア技術とした、集中型配電電圧制御システムを開発した。

本稿では、当社の保有する系統解析・最適化技術の概略を述べた後、スマートグリッドに必要な系統解析・最適化技術として、BTB装置と系統解析シミュレータによる仮想電源、最適潮流計算を用いた配電電圧制御システムについて述べる。これらは、当社伊丹地区での実証実験環境に適用中である。



スマートグリッド実証実験環境

仮想電源と配電電圧制御関連部分(①BTB装置とリアルタイム系統解析シミュレータによる仮想電源、②分散型同期ネットワーク、③高速最適潮流計算、④集中型配電電圧制御システム)を示す。

1. ま え が き

東日本大震災後、政府方針によって、エネルギーのベストミックス、分散型エネルギーシステムの構築が重点課題となってきた。我が国における高品質な電力供給を維持しつつ、電力系統への自然エネルギー導入を促進するためには、全系統周波数維持、系統安定度確保、配電電圧制御、高調波抑制等、多くの課題を解決していく必要がある。これらの課題解決には、基幹系統・配電系統のモデリング・シミュレーションが必要不可欠である。

本稿では、当社で保有する基幹系統・配電系統におけるシミュレーション技術と、現在進めている実証実験への展開について、事例を挙げて取り組みについて述べる。

2. 当社の保有する系統解析・最適化技術

電力系統の計画・運用・事故解析等のために、発電機、送変配電機器、需要家負荷を組み合わせる挙動を調べる電力系統解析技術が必要となり、当社では1960年代より技術蓄積を重ねてきた。数秒～数時間程度の系統全体の動きを模擬する、当社独自の実効値解析プログラムを開発し、近年は分散電源などの新規モデルの迅速な組み込み機能を強化している。マイクロ秒～数十秒程度の解析を行う瞬時値解析プログラムは標準化が進んでいるEMTP(電磁過渡解析プログラム)と市販ツールを組み合わせ使用している。いずれも高精度で効率的な数値解析手法と併せて、適正な機器モデル及び制御アルゴリズムの蓄積が重要となる。また、製品検証にはリアルタイムで信号を入出力できる系統解析シミュレータが必要となり、当社では高性能の自励式変換器に対応できるハイブリッド(アナログ+デジタル)シミュレータ(図1)と、他励式変換器用で運搬可能なフルデジタルシミュレータ4セットを保有し活用している。近年、パワーエレクトロニクス機器の適用が広がり、シミュレータによるリアルタイム検証の必要性が増している。

また、解析結果を踏まえて電力系統を適正に運用するための技術として、様々な組み合わせ候補の中からベストアンサーを求める最適化技術も並行して開発を続けており、中央給電所の発電制御を始め、系統制御へ幅広く適用している。



図1. 当社(神戸)のハイブリッドシミュレータ

3. スマートグリッドに必要となる系統解析・最適化技術

従来の電力系統解析では、発電所・超高圧送電線等、大電力を扱う基幹系統解析と、需要家・配電線などの低い電圧階級を扱う配電系統解析とは独立して実施されていた。図2に示すとおり基幹系統解析では下位の配電系は集約して負荷として扱い、逆に配電系統解析では上位の基幹系は固定電源として扱われていた。これは、両者の間の相互作用が少なく、また、運用・制御上も分離・階層化がされていたことに由来している。一方、スマートグリッドでは、基幹系と配電系との相互作用が密になると考えられる。表1に示すように、分散電源の大量導入時には、配電系での電圧・電力品質問題のほかに、基幹系での周波数問題等を発生しうる。例えば、系統事故時の瞬時電圧低下で分散電源が脱落すると基幹系の周波数・安定度に影響する。分散電源の事故時運転継続能力(Fault Ride Through : FRT)が重要となる。デマンドレスポンスも同様である。

これらの相互作用を解析する際の課題として、①分散電源・需要家機器などのモデル作成、②多数の分散電源・需要家機器の集約表現、③情報・通信系を含めた模擬方法などがある。当社では、風力発電機、太陽光発電等のモデルを既に作成し適用範囲を広めつつあるが⁽¹⁾、内部構造自体が明らかにされていない装置もあり、適切なモデルの導出には時間がかかる。このような場合、特に配電系では実機を用いて模擬配電系統で試験を行う方法が有効である。試

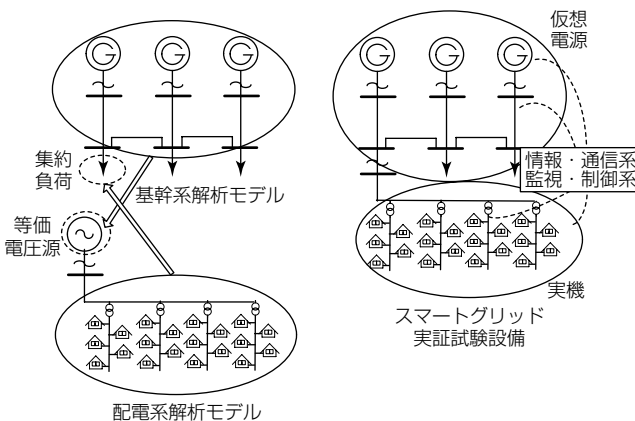


図2. 従来の系統解析モデルとスマートグリッド実証モデル

表1. 基幹系・配電系の系統課題と影響要素

解析対象	系統課題	影響要素					
		需給制御	系統運用	配電制御	フリッカ	分散電源	電力貯蔵
基幹系	周波数変動	○				○	○
	余剰電力	○				○	○
	安定度(過渡, 電圧)		○			○	
配電系	電圧上昇・変動			○		○	○
	電力品質				○	○	
	単独運転・保護協調					○	

験結果を基に種々の現象に適したモデルを導出し、以後、実験とシミュレーション解析を組み合わせることで幅広い検討を行っていくことができる。4章ではこの考え方に基き当社が伊丹地区に構築した実証設備について述べる。

また、スマートグリッドでは、配電システムレベルに分散電源・電力貯蔵・デマンドレスポンス等、制御可能な機器が大幅に増えることとなり、従来は基幹系のみで行われていた最適化の考え方を配電系レベルまで拡張することで得られるメリット(効率化、自然エネルギー連系可能量増大等)は大きい。5章でこの例を示す。

4. 系統解析環境の構築事例

4.1 仮想電源

従来の配電系実証設備では、上位電源を電力会社実系統から取る場合が多く、周波数変動・瞬低・高調波等の擾乱(じょうらん)を自由に設定することはできなかった。一方、電力用機器・保護リレー装置・FACTS機器(パワーエレクトロニクス応用電力制御機器)の試験には、図3(a)のように試験用の電圧波形を作成し、そのデータをアンプで所定の電圧に昇圧して試験対象機器に印加する方式が用いられている。この方式では、あらかじめ作成した電圧波形を再生する電圧源とみなすことができ擾乱を自由に設定することができるが、アンプの容量制約によって試験対象は機器単体に限られていた。

近年、図3(b)のようにパワーエレクトロニクス機器であるBTB装置(Back-To-Back変換器)を大容量アンプとして用いて擾乱の設定が自由な実規模配電試験システムが構築されている⁽²⁾。さらに、試験用の電圧波形をあらかじめ作成しておくのではなく、図3(c)のように基幹システムをリアルタイムシミュレータで模擬し、模擬配電システムでの電圧・電

流・有効電力・無効電力をリアルタイムで測定し、シミュレータにフィードバックして閉ループ制御を構成することによって、模擬システムに連系した複数の機器・システムと基幹システムの相互作用など系統全体での機能評価を行うことができる⁽³⁾。基幹系模擬では、需給/周波数制御・安定度・系統事故模擬等が重要となる。この方式では、試験対象機器から見ると基幹システムの挙動を模擬した仮想電源とみなすことができる。リアルタイムシミュレータを用いることによって、GUI(Graphical User Interface)による柔軟なシステムモデリングやI/O(Input/Output)による実機との信号のやり取りが柔軟にできるため、試験作業の効率化・高品質化に寄与する。

4.2 分散型同期ネットワーク

実証実験では模擬システムの複数か所の電圧・電流値を計測するために、広域でリアルタイムのデータ計測・収集ネットワークが必要となる。系統擾乱時の挙動や電力品質(高調波など)を評価するためには、瞬時波形レベルで正確に同期の取れた計測が望ましい。また今回、仮想電源を構成するBTB装置と系統解析シミュレータは閉ループで制御を行うが、数百m離れた配置となりその間の高速制御用通信も必要となる。

これらの要求に対し、従来のイーサネット^(注1)LANを用いるとデータのリアルタイム性が保証されず、専用回線とすると費用が高くなる課題があった。

今回、変電所内監視制御を目的に開発中である“分散型同期イーサネットワークシステム”を適用した。15箇所の端末とそれぞれ電気角約1度(約45μs(60Hz))で通信し、電気角15度の一定周期で一巡する。親局と各端末は、誤差±0.1μsで同期できるため正確な同時刻データを瞬時波形として取得できる。独自の通信制御アルゴリズムをFPGA上に実装し、汎用イーサネット機器と組み合わせて実現しており、ノイズの多い所では光通信を使うなど柔軟な構成ができる。また、FPGAを採用することによって、通信処理だけでなく計測データのフィルタ処理・高調波分析等の各種の高速リアルタイム演算を自由に実装することができる。

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

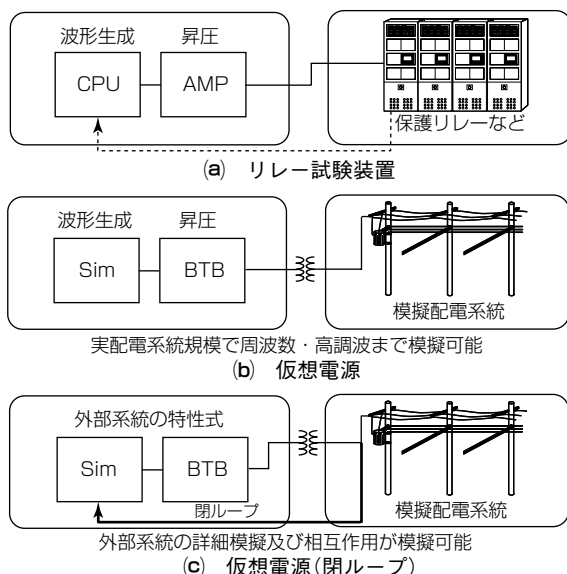
5. 最適化技術

5.1 配電システム向け高速最適潮流計算

住宅用太陽光発電普及による配電システムでの潮流複雑化に対応するための、基幹システムの解析・制御向けに保有する最適潮流計算(Optimal Power Flow calculation: OPF)パッケージを拡張し、配電システム向けの高速OPFを開発した。主な特長は次のとおりである。

(1) 系統解析高速化

樹枝状システムである配電システムの特徴をいかし、潮流計算も



CPU: Central Processing Unit, AMP: Amplifier, Sim: Simulator

図3. 仮想電源を用いた試験環境

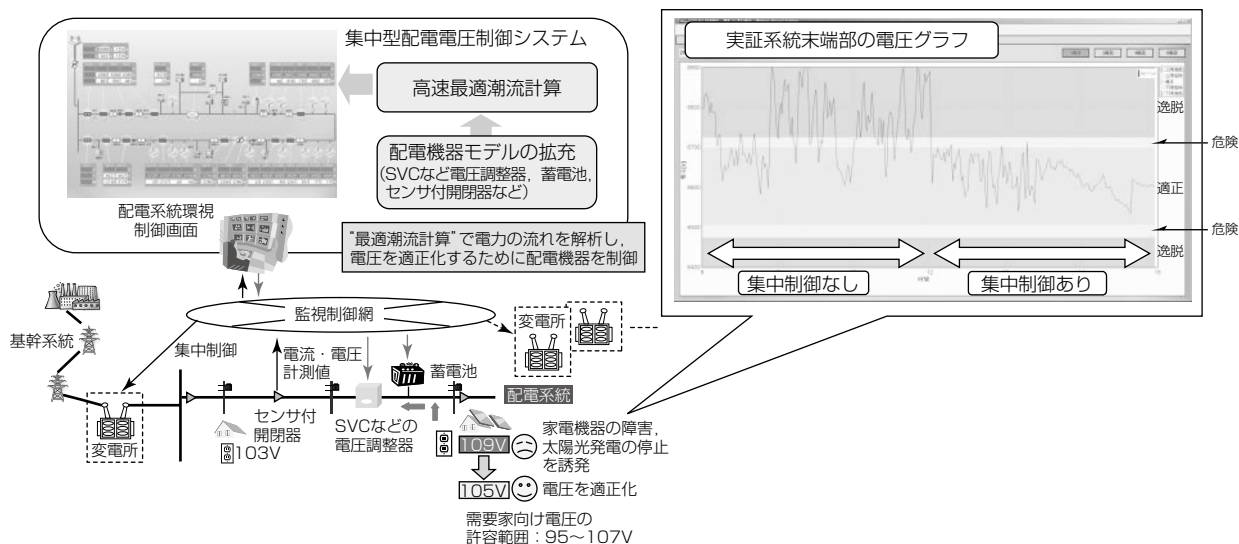


図4. 集中型配電電圧制御システムの枠組み

配電系統向けにカスタマイズする。配電特有の短距離ブランチやゼロインピーダンス機器による難収束性にも対応できる。

(2) 配電モデルの充実

配電向け電圧調整器にはLRT (Load Ratio Transformer: 変電所のタップ制御付変圧器) やSVR (Step Voltage Regulator: 配電線上に設置するタップ制御付変圧器) といった従来の分散制御型電圧調整器に加え、SVC (Static Var Compensator: 静止型無効電力補償装置) やPV-PCS (Photo Voltaic-Power Conditioning System: 太陽光発電向けパワーコンディショナ) といった新たな連続制御型電圧調整器が存在する。そのため、異なるタイプの高速度最適化技術である高速内点法 (連続変数対応) と問題空間探索法 (分散変数対応) を組み合わせ、分散型/連続型制御機器の同時最適化に対応できる。

これらの配電向け潮流計算と高速最適化技術との融合によって、従来に比べて数十倍の高速化を実現した。数千台の配電機器を含む系統でも、1秒で系統を解析し、最適制御を決定できる⁽⁴⁾。

5.2 集中型配電電圧制御システム

太陽光発電が普及するにつれ、それによって生じる逆潮流や潮流変動によって、配電系統の電圧が規定電圧を逸脱することが懸念されている。それら配電系統の諸問題に対応するための、5.1節で述べた配電系統向け高速OPFをコア技術とし、図4に示す集中型配電電圧制御システムを開発した。

図4に示すように、配電系統に設置されたセンサ付開閉器から電流・電圧計測値を取り込み、集中制御システムの配電OPFで電力の流れや電圧分布を解析する。その結果電圧逸脱が認められれば、最小の制御で最大効果が得られる制御機器と制御量の組み合わせを決定し、各機器へ指令として配信する。ここでは、最適の指標として下記を考慮している。

(1) 系統電圧が、全域にわたって目標上下限内に収まること

(2) 機器制御量が最小であること

(3) SVCなど無効電力制御によって生じる配電ロスが最小であること

図4の吹き出しは、3,000kWの太陽光発電が連系した模擬系統での電圧変動例であり、左半分が集中制御前、右半分が集中制御後の配電線末端電圧を示している。集中制御によって、電圧が目標内に維持されていることが分かる。

このシステムは、当社のスマートグリッド実証実験設備で、2011年度から2012年度にかけ、通信や機器応答性も含めて性能と効果を評価し、その後、実フィールドへ展開していく予定である。

6. むすび

スマートグリッドの実現のためには、従来の電力系統解析技術に加えて、パワーエレクトロニクス技術、情報通信技術、最適化技術を組み合わせた総合的な取り組みが必要である。また、上位系の動きを模擬した仮想電源を用いた実証実験によってより実際的な多くの知見が得られると期待している。

参考文献

- (1) S.C.Verma, ほか: 風力発電機のシミュレーションモデルの高速化, 電気学会全国大会講演論文集 (2008)
- (2) 小林広武, ほか: 瞬時電圧低下が太陽光発電と風力発電に与える影響の実験解明, 電力中央研究所報告 R10037 (2011)
- (3) 高崎昌洋, ほか: アナログ-デジタルシミュレータの結合技術の開発, 電気学会全国大会講演論文集, 6-118 (2005)
- (4) 大野哲史, ほか: スマートグリッド対応の配電系統向け最適制御技術, 電気学会B部門大会論文集, 27-1~27-2 (2010)