

配電分野における再生可能エネルギー大量導入の対策と BCP への対応

Countermeasures Against the Introduction of Large Amounts of Renewable Energy in the Distribution Field and Support for BCP

松枝 剣 MATSUEDA, Tsurugi

望月 正希 MOCHIZUKI, Masaki

神通川 亨 JINTSUGAWA, Toru

「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」の導入以降、太陽光発電などの再生可能エネルギーが配電系統に大量に導入され、配電系統の電圧管理が複雑化している。これに対応するため、電圧調整機器とそれらを集中的に制御する集中電圧制御システムを開発した。また、東日本大震災以降、強く求められるようになった BCP に対応するため、仮想化技術や独自開発の構成制御ミドルウェアを適用した広域バックアップ型配電自動化システムを開発した。NEDO プロジェクトに参加してインドにおいて、これらの技術を使った総合配電管理システムの構築と、実証試験を行った。

Since the enactment of the Feed-in Tariff Scheme for Renewable Energy (FIT), large amounts of renewable energy such as solar power generation have been introduced into distribution systems, thereby complicating the voltage management of the distribution systems. To deal with that difficult situation, Fuji Electric has developed voltage regulators and centralized voltage control systems for centrally controlling the regulators. We have also developed a wide-area backup type distribution automation system that meets the requirements of business continuity plans (BCPs), which have been strongly required since the Great East Japan Earthquake, by using virtualization technologies and our proprietary configuration control middleware. Furthermore, participating in a New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) project, we have built a comprehensive distribution management system using these technologies and performed demonstration tests for it in India.

1 まえがき

2009 年の「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」(FIT) の運用開始以降、太陽光発電などの再生可能エネルギーが配電系統に大量に導入され、配電系統の電圧管理が複雑化している。そこで、富士電機は配電系統用の電圧調整機器である無効電力補償装置 (SVC: Static Var Compensator) を開発した。また、SVC を含む電圧調整機器を中央のシステムから制御する集中電圧制御システムも開発した。

また、東日本大震災以降、配電自動化システムは被災時にも継続的に業務を継続できるように事業継続計画 (BCP: Business Continuity Plan) を策定し、事前対策を実施することが求められている。その対応のために、仮想化技術や VNC (Virtual Network Computing) などの技術、および独自の構成制御ミドルウェアを開発した。

また、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) とインド・北ハリヤナ配電公社 (UHBVN) のスマートグリッド実証事業においてハリヤナ州パニパットに総合配電管理システムを構築し、インドの配電会社が抱える電力品質の課題に対するシステムの有用性を検証した。

2 配電系統用 SVC

従来の配電系統では、主に配電用変電所の負荷時タップ切替変圧器 (LRT: Load Ratio Control Transformer) や線路途中の自動電圧調整器 (SVR: Step Voltage Regulator) のタップ切替えによって電圧調整が行われている。しかし、これらの機器は制御応答が遅く、また離散

的な電圧調整しかできないため、再生可能エネルギーの出力が急変した場合などに電圧を適正範囲に維持することが困難となる。これを解決するために、電圧を高速かつ連続的に調整可能な FACTS (Flexible AC Transmission System) 機器の導入が進みつつある。

富士電機は、東北電力株式会社と共同研究を行い、磁束制御技術⁽¹⁾を適用した可変インダクタを用いて新型の他励式配電系統用 SVC を開発した。

この新型の他励式配電系統用 SVC の基本原理を図 1 に示す。直流電流によってリアクトルに流れる電流を制御できることから高調波フィルタが不要となり、従来に比べて

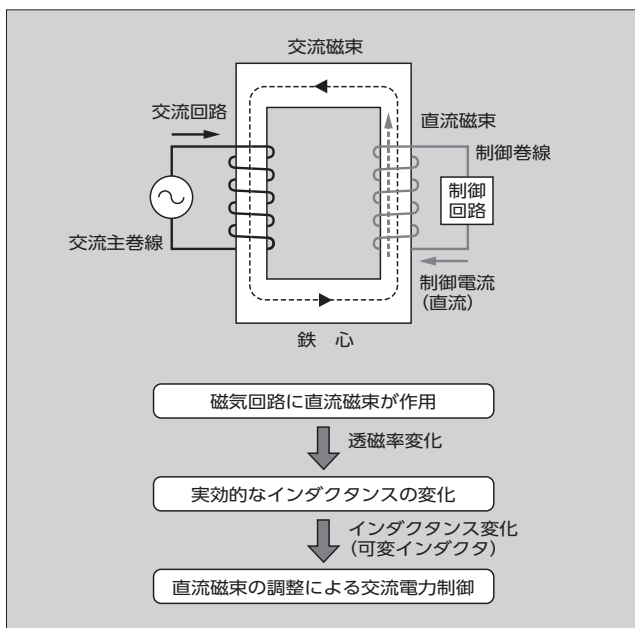


図 1 他励式配電系統用 SVC の基本原理



図2 他励式配電系統用 SVC の外観

表1 他励式配電系統用 SVC の仕様

| 項目 | 仕様 |
|------|---------------------------|
| 定格容量 | 300 kVA |
| 可変容量 | 0 ~ 300 kvar (遅れ) |
| 定格電圧 | 6,600 V |
| 周波数 | 50/60 Hz |
| 冷却方式 | 自然空冷 |
| 質量 | 4,000 kg以下 |
| 外形寸法 | W2,500×D1,500×H2,000 (mm) |
| 主回路 | 可変インダクタ (高調波フィルタレス) |

簡素な構成となっている。磁心に交流巻線と制御巻線を巻いている。制御巻線に直流電流を流すと磁気飽和が生じ、実効的な透磁率が減少する。この原理により、磁束密度を制御し、実効的な透磁率を変化させることでインダクタンスを制御して系統に流入する無効電力を調整する。主回路が鉄心や巻線だけで構成できるため、サージなどに対する耐性が強く信頼性を確保できる。また、無効電力を調整する制御電流が直流であるため、制御回路およびソフトウェアのアルゴリズムも簡素になる。

この新型の他励式配電系統用 SVC の外観を図2に、仕様を表1に示す。この SVC による電圧調整の動作を確認するため、東北電力株式会社の協力を得て、東北電力株式会社管内の実配電線においてフィールド試験を行っている。

3 集中電圧制御システム

従来の電圧調整機器は、接続点における計測情報を用いてそれぞれが制御量を決定している（ローカル制御）。しかし、再生可能エネルギーの大量導入により配電系統の電圧管理が複雑化する中で、既存の電圧制御方式では、機器間の協調ができず、的確な電圧制御が困難となる恐れがある。そのため、中央のシステムにセンサ付開閉器および電圧調整機器からの計測データを収集し、配電系統全体の電圧を適正範囲内に維持するように、各電圧調整機器をリア

ルタイムに制御する集中電圧制御システムが検討されている。

富士電機は、NEDO プロジェクトである“分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業”において、図3に示す集中電圧制御システムを開発した。なお、図中で集中電圧制御システムを一つの独立したシステムとして示しているが、配電自動化システムの一機能として将来は導入されるものと想定している。集中電圧制御システムには、次の特徴がある。

- (a) 配電系統の各点に設置されたセンサ付開閉器および電圧調整機器から計測データを定周期で収集する。
- (b) 配電系統全体の状態を把握した上で、各電圧調整機器に対する最適な指令値を演算する。
- (c) 各電圧調整機器に対して指令値をリアルタイムに配信し、これらを制御する。

開発した集中電圧制御システムでは、LRT、SVRといった従来の電圧調整機器のほか、新たに SVC や静止型同期直列補償装置（SSSC：Static Synchronous Series Compensator）などの次世代電圧調整機器を制御対象に加えた。SVC と SSSC には目標電圧を指令値として配信することで、機器内部の高速な電圧制御を生かし、高い電圧維持性能を実現した。

また、最適な指令値の演算に当たっては、配電系統全体の電圧適正化のほか、次の2点も考慮した。1点目は LRT や SVR のタップ切替え回数の低減である。これにより、LRT や SVR の寿命の延伸が期待できる。2点目は複数の SVC の出力分担最適化である。これにより、急峻（きゅうしゅん）な電圧変動に対する SVC の補償性能の維持、および無効電流による電力ロスの削減を図った。

図4に示す構成で、開発した集中電圧制御システムのリアルタイム総合動作試験を行った。電力系統と電圧調整機器はデジタルシミュレータ上に模擬し、IED（Intelligent

特集 電力の安定供給と最適化に貢献するエネルギーソリューション

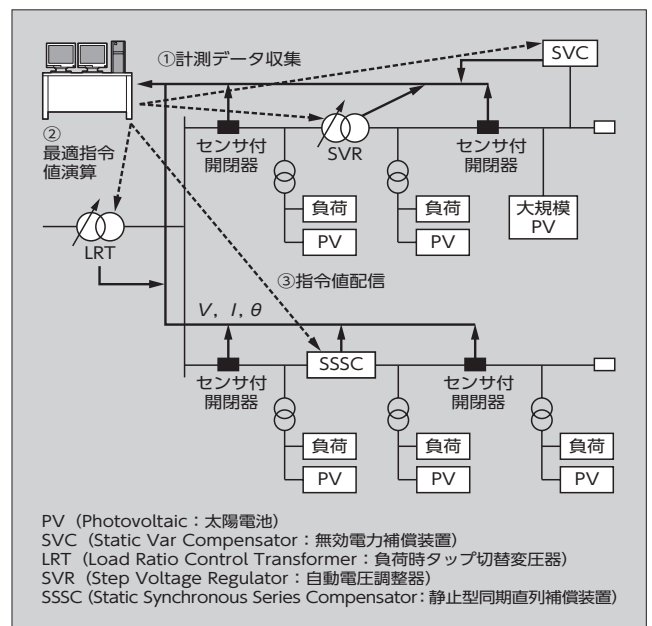


図3 集中電圧制御システムの概念図

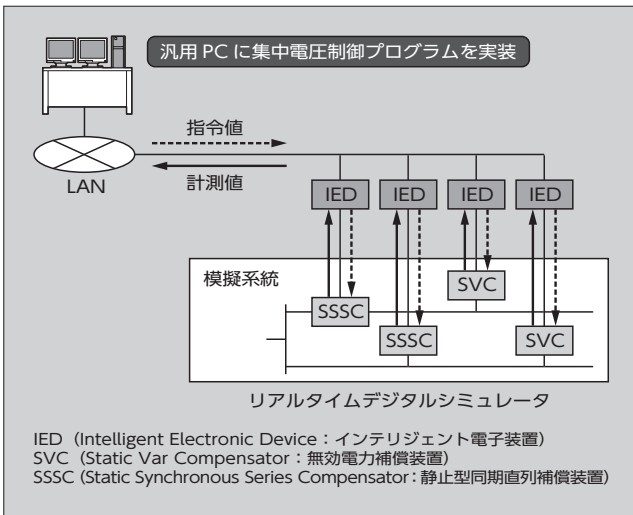


図4 リアルタイム総合動作試験の構成図

Electronic Device) を介して、汎用 PC 上に実装した集中電圧制御プログラムと連携させた。なお、高度な配電網管理を実現するためには、複数ベンダの相互運用性を確保する必要があることから、IED および汎用 PC には、電力向け通信規格である IEC 61850 に準拠した通信システムを実装した。

図5に示すように、SVC2台とSSSC2台で模擬システムを構成し、計測と制御の周期を1分を通して24時間の総合動作試験を行った。その結果、システムが問題なく動作することを確認した。また、図5に示したように、ローカル制御では電圧が適正範囲を逸脱してしまうが、集中電圧制御では電圧が適正範囲内に維持されており、その効果が確認できた。

さらに、オフラインシミュレーションにより、集中電圧制御システムの導入効果をさまざまな条件で検証した。長い配電線に複数の電圧調整機器が設置されている場合などにおいて導入効果が大きいことが分かった。特に、次世代機器を含む複数台の電圧調整機器で構成された系統では、集中電圧制御システムの導入により太陽光発電の導入可能

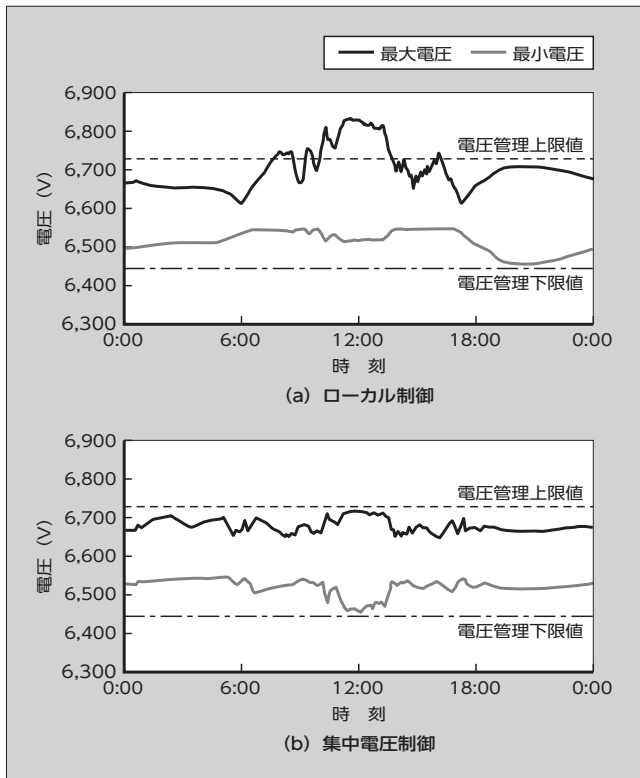


図5 リアルタイム総合動作試験の結果

性が10～20%向上する効果が期待できる。

4 広域災害時のBCP対応

①章で述べたように、BCPの観点から近年、配電自動化システムは、大規模災害によるサーバ設置箇所や運用拠点の被災に対しても、配電システム運用業務を継続することが求められる。そのため、富士電機はBCPに対応した広域バックアップ型配電自動化システムを開発した。

4.1 システム構成

広域バックアップ型配電自動化システムのシステム構成

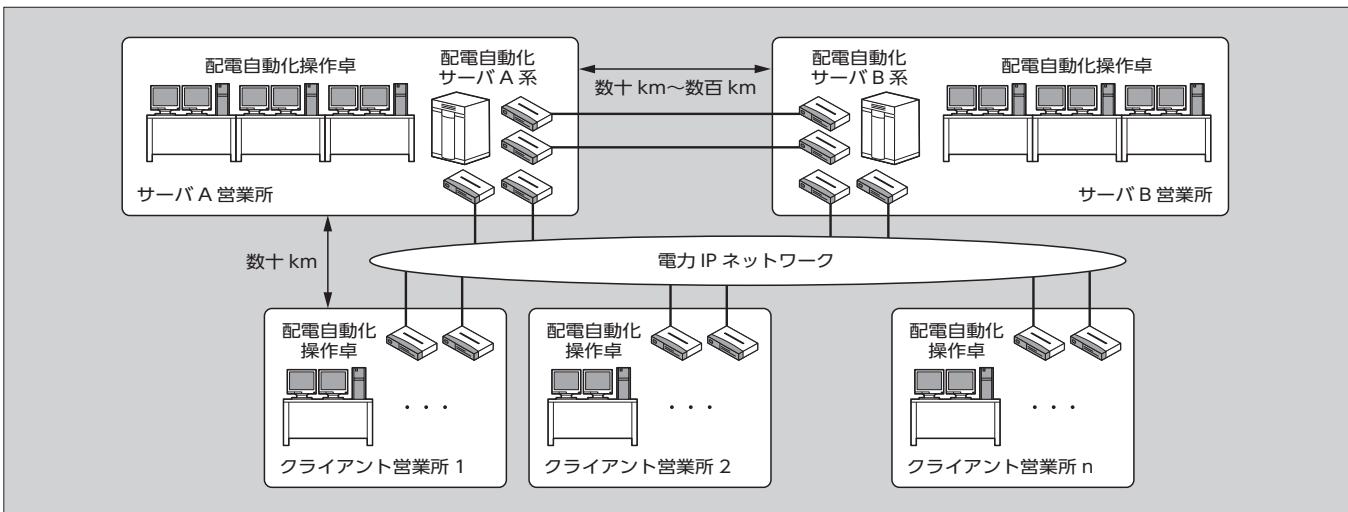


図6 広域バックアップ型配電自動化システム

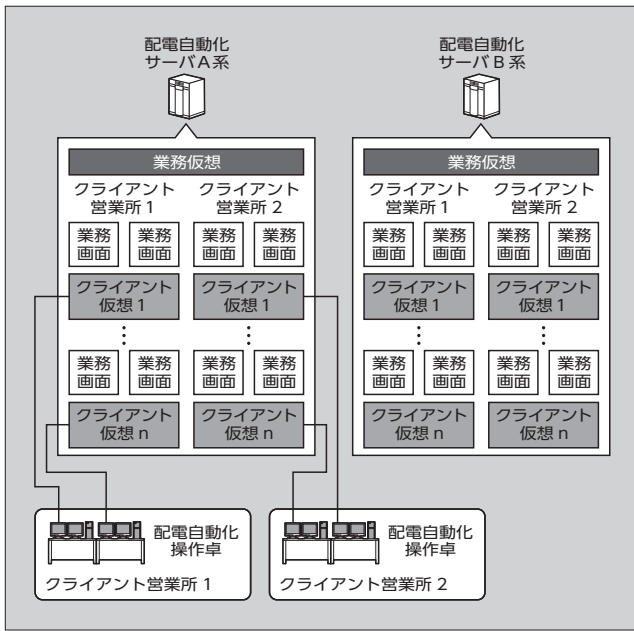


図7 BCP 対応配電自動化システムの仮想環境

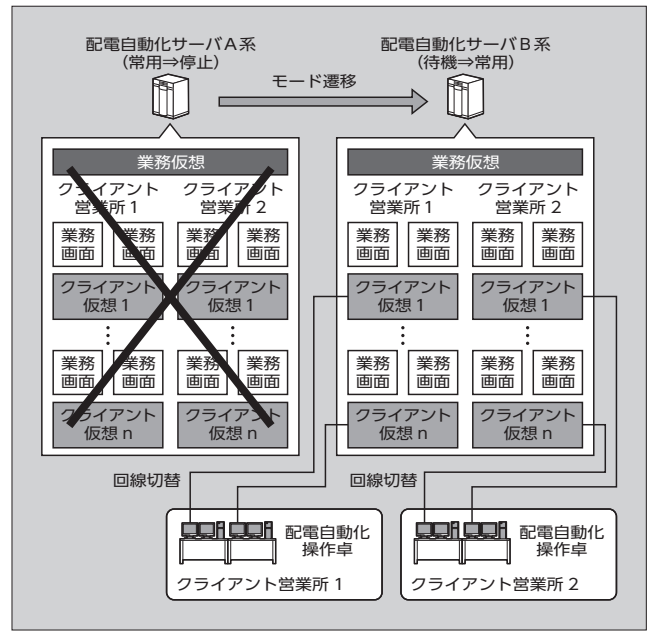


図8 サーバ A 停止時の動作について

を、図6に示す。本システムは、サーバを設置している営業所が被災しても運転が継続できるように、数十 km ～ 数百 km 離れた営業所 2 か所にサーバを分散して設置して二重化した。各営業所には複数台の操作卓用の PC を配置するプライベートクラウド型のシステム構成としている。操作卓用の PC はファンレス、ディスクレスのシンクライアント^(注)を採用し、各装置やネットワークを二重化することにより、単体故障、片回線異常でも運用が継続できるようになっている。

広域バックアップ型配電自動化システムでは、業務アプリケーションを動作させる“業務仮想”と画面を表示する“クライアント仮想”を各サーバ内に構築している。クライアント仮想は操作卓の数だけ配置する。図7に、広域バックアップ型配電自動化システムの仮想環境を示す。

操作卓用の PC は、常用モードのサーバ A 系内にあるそれぞれのクライアント仮想に VNC で接続し、画面表示を行う。VNC とは、サーバ内のクライアント仮想上の画面をネットワークにより、遠隔の操作卓用の PC に表示するためのリモートデスクトップソフトウェアである。仮想化技術と VNC を採用することにより、アプリケーションソフトウェアを含むすべての情報は、サーバ内に保管される。各操作卓用の PC では、サーバ内にある画面を表示し操作するだけであり、PC には情報が一切保存されないため、セキュリティが確保できるとともに保守も容易となる。

4.2 災害対応運用

サーバの点検やサーバを設置している営業所の被災などにより、あるサーバ（例えばサーバ A）が運用できなく

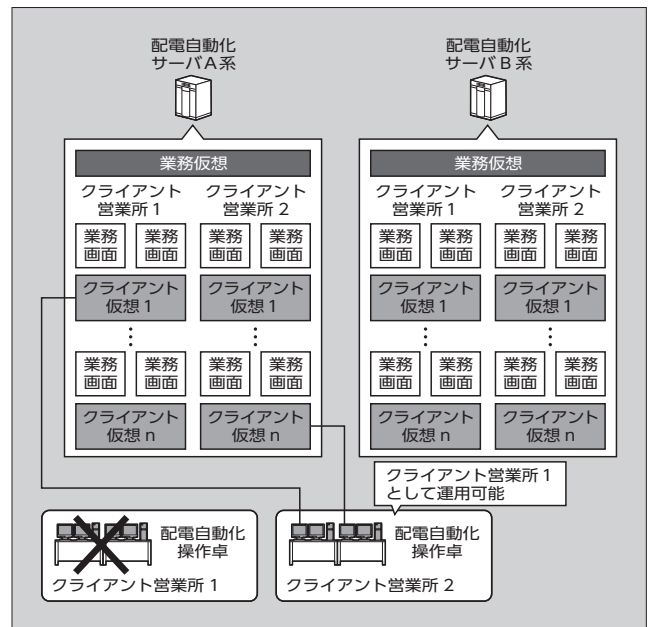


図9 クライアント営業所停止時の代行運用

なった場合に、運用の停止を最小限にとどめる必要がある。そこで富士電機は、異常を検出後サーバの運転モードを 1 秒以内で切り替える独自の構成制御ミドルウェアを開発した。

また、サーバ A 系、B 系両方のクライアント仮想は常に画面表示が可能な状態にしておき、サーバ A 系が停止した際には、操作卓用の PC はサーバ B 系のクライアント仮想に自動で接続を切り替える。図8に、災害などでサーバ A が停止した際の動作について記載する。

また、図9に示すようにクライアント営業所が被災した場合、他のクライアント営業所が被災営業所のクライアント仮想へアクセスすることで、被災営業所の監視制御が可能である。

〈注〉シンクライアント：ユーザが使用する端末に情報をほとんど持たず、サーバ側で処理を行う仕組みのこと

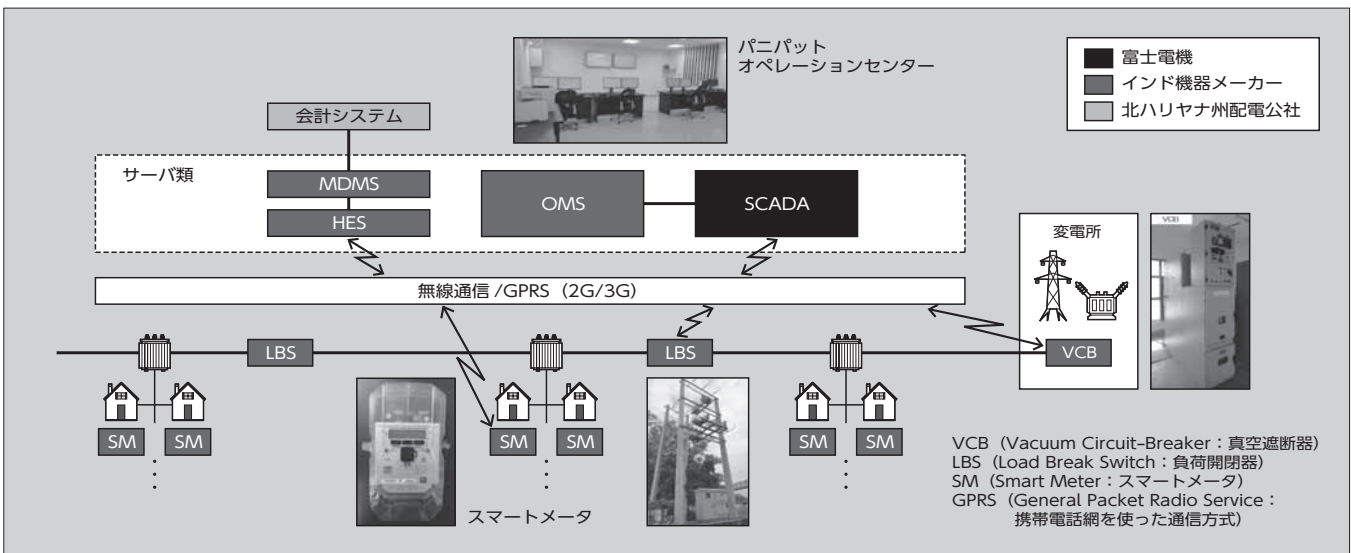


図 10 実証システム構成の概略図

5 総合配電管理システム実証 (NEDO インド実証)

インドでは、経済成長に伴う電力需要の増大に対し、インフラ整備の遅れから慢性的に電力が不足している。そのため、インドの多くの配電会社では、事故停電時間の短縮、負荷ピークの低減、配電ロスの低減などの電力品質に関する課題を抱えている。

基礎調査および実証前調査の結果、UHBVN のパニパット地区では、特にこれらの課題解決に対するニーズが高いことが判明した。そこで、NEDO の実証事業として、2015 年 10 月～2019 年 3 月の間、パニパットにてスマートグリッド関連技術を用いた総合配電管理システムを構築し、課題解決に対する実証および評価を行った。

5.1 実証システム構成

本実証では、パニパットの三つの変電所と 4 本のフィーダを対象に、図 10 に示す配電システムを構築し、配電機器およびスマートメータ関連機器を設置した。さらに、SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) を中心とする総合配電管理システムを構築し、課題解決における有効性を検証した。システムの各構成要素は、大きく次のように分類される。

(1) 上位系システム (SCADA など)

配電機器の監視制御を行う SCADA や、SCADA からの停電情報を基に停電管理を行う OMS (Outage Management System)、ならびにスマートメータデータを顧客単位に管理して UHBVN の既設の料金徴収システムと連携する MDMS (Meter Data Management System) を構築した。これらの上位系システムのサーバを UHBVN のデータセンターに設置し、操作卓 4 台を、新設したオペレーションセンターに設置した。

(2) 配電機器

3 か所の変電所に真空遮断器 (VCB: Vacuum Circuit-

Breaker) を 4 台、4 フィーダに負荷開閉器 (LBS: Load Break Switch) を 22 台設置した。また、各 VCB と LBS にはそれぞれ、通信機器 RTU (Remote Terminal Unit) と FTU (Feeder Terminal Unit) を設置し、SCADA から各 VCB と LBS への監視制御ができるようにした。

(3) スマートメータ関連機器

単相および三相のスマートメータ 11,000 台と、メータからのデータ収集や制御を行う DCU (Data Concentrator Unit) 67 台を設置した。DCU で収集したメータデータは、HES (Head End System) を介し、MDMS に伝送される。

5.2 実証システムの有効性検証

パニパットに構築した総合配電管理システムを使って UHBVN が抱える事故停電時間の短縮、負荷ピークの低減、配電ロスの低減という三つの課題の解決における有効性を検証した。

(1) 停電時間短縮効果の検証

実証を行ったパニパットにおいて、SCADA システム導入前後の SAIDI (System Average Interruption Duration Index) および SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) を比較することにより、停電時間・回数の改善効果を検証した。SCADA システム運用開始前の 2017 年と運用開始後の 2018 年を比較したところ、SAIDI では 66%、SAIFI では 26% 改善していることが確認できた。また、実証期間にて収集した事故停電事例において、SCADA システムによる迅速な事故点の特定や他フィーダからの融通により、実証対象フィーダにおける停電時間を平均で約 62% 短縮できることが確認できた。これらの結果より、SCADA システムによる実証対象フィーダの電力供給信頼性の向上が確認できた。ただし、この改善効果には、インドにおける近年の電力品質自体の改善も一部含まれている。また、本システムは、実証事業終了後に NEDO からインド電力省経由で UHBVN に譲渡され

た。今後は、精度の高い比較分析が継続される予定である。

(2) 負荷ピーク低減効果の検証

スマートメータから収集した電力量データを用いて、実証システムによる負荷ピーク低減の有効性を検証した。まず、需要家を電力使用量別にグループ分けし、各グループに対して、疑似的なデマンドレスポンスを行った。具体的には、スマートメータの電力制限機能を用いて、グループごとに輪番で電力使用量を制限し、需要削減効果をシミュレーションにより検証した。その結果、スマートメータの電力制限機能を用いることで、全体需要のピークを削減できることを確認した。

(3) 配電ロス低減効果の検証

実証フィード配下の DT (Distribution Transformer) と、DT 配下のスマートメータの合計電力量を比較し、該当フィードにおける配電ロスの測定と分析を行った。その結果、実証地域における 1 日当たりの平均配電ロス率は約 38.0% となり、かなり大きいことが確認できた。また、配電ロスの 1 日当たりの時間変化を分析したところ、需要家の電力使用量の時間変化とほぼ同じ推移となっていることが確認できた。この結果から、配電ロスの主な原因は、盗電などによる人為的ロスが大きな割合を占めていると考えられる。通信インフラを整備した上で、区間単位の DT とスマートメータの電力量を比較することにより、配電ロスの大きな区間を特定し、その区間について集中的に現地調査を行うことで盗電箇所を把握できると考えられる。

6 あとがき

富士電機は、今回述べた配電自動化システムや SVC により、再生可能エネルギーの大量導入による配電システムの不安定化問題への対策、被災時の系統運用業務の継続に貢献

している。今後も、より複雑となる系統運用に対応し、安心して配電システムの運用ができるように、システムおよび機器の開発を続けていく所存である。

この成果の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合研究開発機構 (NEDO) のプロジェクトである“分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業”の結果から得られたものである。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) 小島武彦ほか. 電圧変動問題の解決に貢献する配電系統用静止型無効電力補償装置. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.1, p.31-35.



松枝 剣

電力会社向け配電自動化システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部電力流通総合技術部長補佐。



望月 正希

電力会社向け配電自動化システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワーエレクトロニクス エネルギー事業本部エネルギーマネジメント事業部電力流通総合技術部。



神通川 亨

電力システムのシミュレーション・制御・解析に関する研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンターシステム制御研究部マネージャー。電気学会会員。





*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。