

DEN-CHU-KEN

TOPICS

2015 5 MAY

VOL.20

Central Research Institute of Electric Power Industry

再生可能エネルギー大量導入時の 電力系統安定運用技術

1. 太陽光発電の大量導入と電力系統安定運用のための課題
2. 需要地系統における電力需給協調技術
3. 系統周波数維持のための電力貯蔵活用技術と日射量予測技術
4. 基幹系統事故に対する系統セキュリティ評価
5. 汎用技術を活用した電力系統監視制御用情報通信システム

再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定運用技術

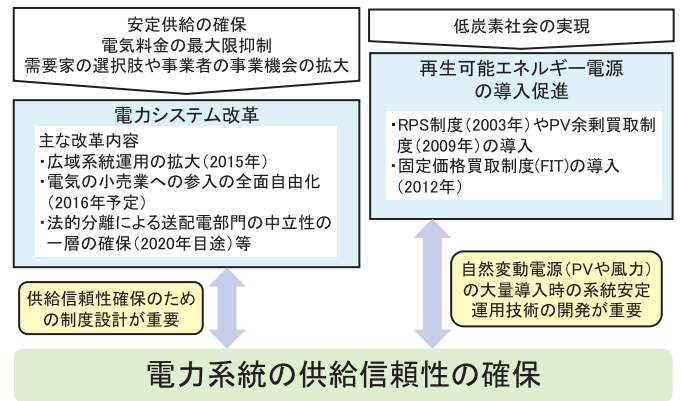
1. 太陽光発電の大量導入と電力系統安

わが国では電気事業に競争原理を導入するため、1995年から累次にわたる電気事業制度改革が行われ、小売の部分自由化等が実施されました。また、地球温暖化対策の一環として、2003年から再生可能エネルギー（再エネ）の導入が推進され、さらなる再エネの普及拡大を目的として2012年に固定価格買取制度（FIT）が導入されました。2015年からの電力システム改革では、広域系統運用の拡大、小売および発電の全面自由化、法的分離方式による送配電部門の中立性の一層の確保という3段階からなる改革が進められています。

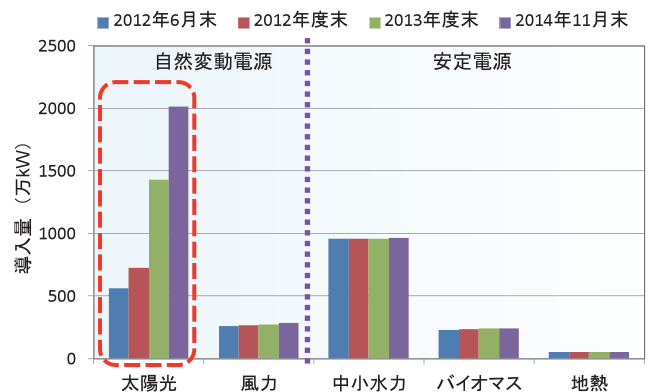
このように、新しい電力供給体制に向けて電気事業を取り巻く環境は大きく変化していますが、電力系統の供給信頼性^{※1}の確保が根底にあることは変わりません。

本稿では電力系統の供給信頼性の確保に不可欠な電力系統の安定運用技術、特に再エネのうち近年導入量が急増している太陽光発電（PV）が大量導入された時の安定運用技術に関する電力中央研究所の主な研究成果を紹介します。

システム技術研究所
研究参事
井上 俊雄



電気事業を取り巻く環境



再生可能エネルギー導入量の推移

系統安定運用に影響する自然変動電源のうち、太陽光発電(PV)がFIT導入後に急増

※1 電力系統の供給信頼性:発電、送電、配電で構成される系統全体の頑健性のことで、その度合いは需要家の停電の少なさで測られる。

定運用のための課題

研究成果の各論に入る前の予備知識として、PVの特徴(配電システムへの連系(接続)、出力変動、パワーコンディショナー^{※2}連系)によって生じる系統安定運用面の課題を表1-1に示します。配電システムへの連系は、配電システムの①事故時復旧、②電圧管理に影響を与えます。出力変動は、系統全体の③余剰電力、④需給・周波数調整力^{※3}に影響を与えます。パワーコンディショナー連系は、系統全体の⑤事故時の系統安定性に影響を与えます。

これらの課題の顕在化はPVの導入量と関係すると考えられます。導入量が増加するにつれて、左記の①～⑤の課題が図1-1に示すように重畳していきます。

本稿では当研究所の最近の主な取り組みとして、第2章で②、③、第3章で④、第4章で⑤の各課題に対する技術開発状況を紹介します。最後の第5章では、各技術を活用するために必要な共通インフラである情報通信システムの開発状況を紹介します。

表1-1 PV大量導入による系統安定運用面の課題

PVの特徴	影響	課題	概要
■配電システムに連系 ⇒住宅・商店、小規模工場・ビル、大規模工場・事業用として、それぞれ、低圧(PV容量:50kW未満)、高圧(同:50~2000kW未満)、特別高圧(同:2000kW以上)で連系	配電システム	①事故時復旧	配電線事故で生じた停電区間に他の配電線から電力を融通する場合、停電区間で停止したPVの発電量も賄わなければならない、融通する配電線に過剰の電流が流れる可能性がある(過負荷が発生)
		②電圧管理	PVから配電システムへの逆潮流の増大に伴い、配電線電圧の管理が困難になる
■出力が大きく変動する ⇒出力制御可能な電源(火力、水力等)と比較して、発電出力は天候依存で大きく変動	系統全体	③余剰電力	火力発電が運転を継続するには一定値以上の発電出力を維持する必要があり、電力需要が少ない時でも出力をそれ以上下げることができず、再エネ電源の発電により系統の需要を超過する
		④需給・周波数調整力	PVや風力発電の出力変動幅の拡大に伴う調整力不足が発生し、周波数変動が拡大する
■パワーコンディショナーによって系統と連系 ⇒発電機(蒸気・水車タービン発電機)との直接連系電源と比較して、同期化力や慣性力を持たない	系統全体	⑤事故時の系統安定性	火力発電の運転台数減少に伴い同期化力(発電機が系統に連系している状態で、その同期状態を乱す系統事故などがあった場合、元の同期のとれた運転状態に戻すために発電機間に働く復元力)が低下するなど

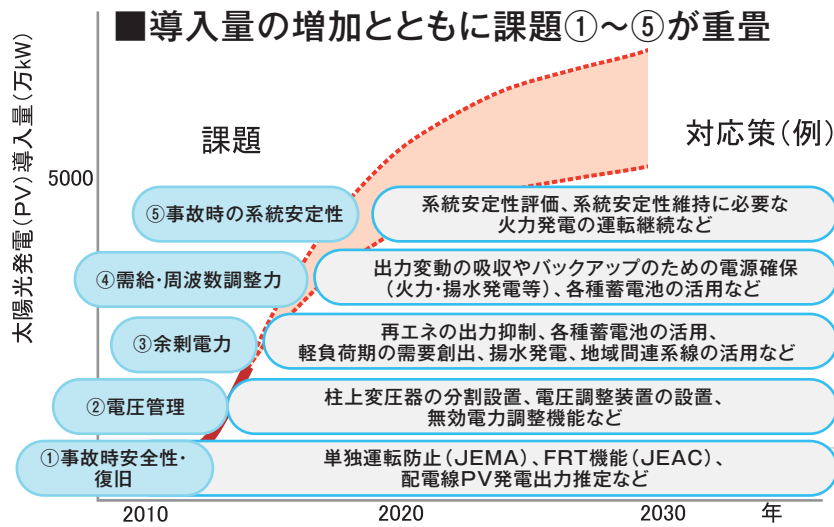


図1-1 PV導入量と系統安定運用面の主な課題

※2 パワーコンディショナー:PVなどで発電された「直流」の電気を家庭で用いられている「交流」に変換する機器。
 ※3 調整力:既存の火力発電機などが持つ調整能力。

再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定運用技術

2. 需要地系統における電力需給協調

再生可能エネルギーの導入促進策や、停電リスク回避の意識の高まりにより、太陽光発電、コージェネレーション(熱電併給)システム、蓄電池等の分散形エネルギーシステムを所有する需要家が増えており、今後は需要家群単位で一括運用されるケースも想定されます。

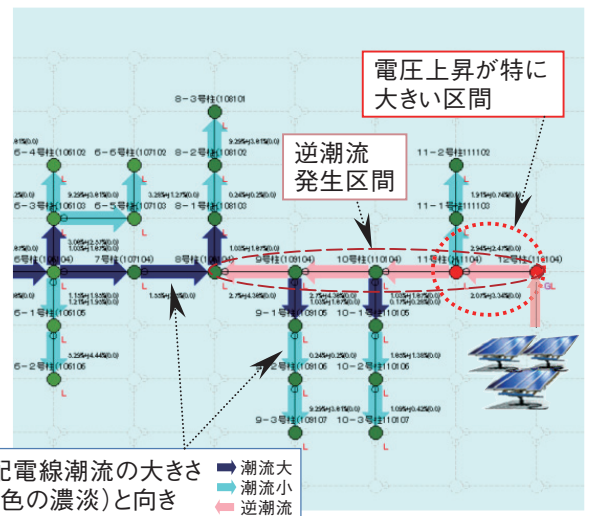
これによって、配電線の電圧管理や事故時運用への影響が一層増大するとともに、電力系統全体の安定運用にも影響を及ぼす可能性があります。これらの対応策として、当研究所所有の需要地系統実験設備による実験と、開発した各種プログラムによるシミュレーション解析により、スマートメータ情報を活用した配電自動化システムの高度化、ならびに需要家の利便性や経済性を維持しながら系統影響を低減させる給湯機や蓄電池等の機器の運転方法の研究開発を進めています。

本章では、需要地系統の電力需給協調技術開発の概要と、これまでの成果として、配電技術の高度化を図るツールとなる「配電系統総合解析プログラム」、および需要家の便益と系統への影響(逆潮流)抑制を両立させるための「需要家機器運転計画手法」について紹介します。

システム技術研究所
研究参事
小林 広武



需要地系統実験設備(赤城試験センター)



配電系統総合解析プログラムの出力結果表示例

技術

2.1 需要地系統における課題

太陽光発電(PV)を中心に、今後さらに多くの分散形エネルギーシステムが需要地系統^{※1}に連系されることが想定されます。

これにより、配電系統では逆潮流^{※2}に伴う電圧上昇など、電圧管理面への影響が一層増大する可能性があります。また、配電線事故により分散形エネルギーシステムが停止した場合、他の配電線からの融通時に過負荷が発生するなど、復旧運用に支障が生じる可能性があります。さらに、三相配電線において一相が断線した場合、分散形エネルギーシステムにより電圧が維持されて事故検出が困難になるなど、保護・保安面への影響も増大する可能性があります。

配電系統ならびに電力系統全体の安定運用を的確かつ合理的に図るためには、需要家や需要家群(以下、コミュニティ)との連携・協調を考慮した電力需給協調技術の開発が重要です。

2.2 電力需給協調技術開発の概要

(1) 配電自動化・制御システム高度化技術

当研究所では分散形エネルギーシステムなどの需要家機器との協調・連携を考慮した配電系統の管理・運用面の対策技術として、配電線センサ^{※3}やスマートメータ情報を活用した配電自動化^{※4}・制御システム高度化技術(図2-1)を開発しています。

その中では、電力会社の配電系統の管理・運用の現場で活用できるように、配電系統の電圧管理への影響評価と、分散形電源と配電系統との協調制御も含めた対応策の検討を支援する解析ツール「配電系統総合解析プログラム」の開発を進めています¹⁾。本プログラムは、当研究所赤城試験センター

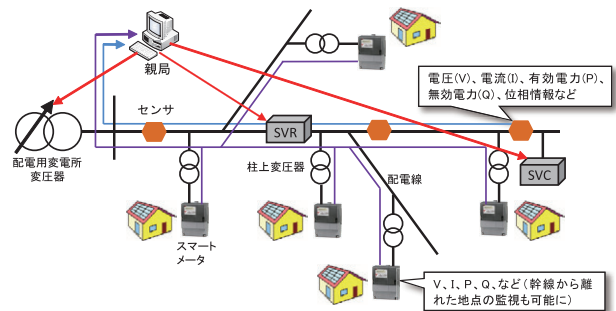


図2-1 配電自動化・制御システム概念(通常時)

配電線センサ・スマートメータ情報をもとに、PV出力の逐次推定や、配電用変電所変圧器タップ、SVR、SVC制御を実施

の需要地系統実験設備(各種分散形エネルギーシステムを連系した実規模配電系統実験設備)において過去10年余りにわたって実施した各種実証試験の結果を反映させたもので、現バージョンは電力10社において実際の配電運用や研究開発に活用されています。

また、本プログラムでの解析および需要地系統実験設備での実験により、電力各社が設置・更新を進めている配電線センサと、設置が始まっているスマートメータの情報を活用した配電線負荷やPV出力の推定手法の開発を行っています。

これらの情報に基づき、配電用変電所の変圧器タップ、配電線に設置される自動電圧調整器(SVR: Step Voltage Regulator、TVR: Thyristor type step Voltage Regulator)、静止形無効電力補償装置(SVC: Static Var Compensator)などの配電線電圧制御装置をよりの確に制御する方式の開発も進めています。

さらに、配電線センサやスマートメータ情報を活用した配電線事故地点の探索方式、断線検出方式などを開発する計画です。

(2) 需要家と既存系統との協調運用技術

電力系統大の需給運用面を含め、分散形エネルギーシステム導入時の各種課題に対応する技術

※1 需要地系統:従来の配電系統に需要家などが保有する分散型エネルギーシステムが多数連系した系統。

※2 逆潮流:需要家の余剰電力が電力会社の配電線側に流れること。

※3 配電線センサ:断線などの事故を検出するため、配電線上の異なる地点の電圧などを計測するセンサ。

※4 配電自動化:配電線の各開閉器を自動で操作し、系統事故による停電の早期復旧や平常時の系統運用の効率化を図る配電システム。

として、自律分散形概念を取り入れた需要家やコミュニティと既存系統との協調運用技術の開発を進めています。

その中では、利便性や経済性などの需要家便益を考慮しながらPVからの逆潮流を抑制し、配電線電圧上昇や余剰電力問題に対応する「需要家機器運転計画手法」の開発、実証を行いました^{[2][3]}。

将来的には、分散形エネルギーシステムを所有したコミュニティ単位で一括運用されるケースも考えられます。このため、コミュニティと既存系統との協調運用方式の確立を目的に、経済性を考慮した実現可能性のあるコミュニティモデルの調査・類型化、コミュニティが配電系統運用や電力系統大の需給運用に与える影響の解明、およびコミュニティの便益を維持しながら上記の各影響を回避するコミュニティ構成・運用方式について研究を進めています。

以下に、これまでの成果として、「配電系統総合解析プログラム」の概要と解析事例、ならびに「需要家機器運転計画手法」の概要と実証結果について紹介します。

2.3 配電系統総合解析プログラムの開発

PVを中心とした分散形エネルギーシステムの連系量拡大や、高圧需要家における力率^{※5}改善用コンデンサによる電圧上昇問題が顕在化しています。本プログラムはそれらの電圧管理上の問題解明と解決策の検討・開発を支援するツールです^[1]。その特徴は、電力会社の配電業務の現場でも利用できるように、汎用PC上で動作し、GUI(Graphical User Interface)を用いることにより操作が容易であり、任意の配電系統構成(高圧・低圧線路形態、各地点の電力需要パターン、分散形電源の運転パ

ターン・電圧制御方式など)に対応しています。また、配電線側のあらゆる対策技術の評価(各種技術適用時の各地点電圧・潮流時系列特性、分散形電源の抑制出力量など)や、三相不平衡解析^{※6}も可能です。

図2-2にPC上の高圧配電線構成例と入・出力項目を示します。配電線電圧制御機器としては、配電用変電所の主変圧器タップ制御方式、SVC、SVR、TVR、LPC(Loop Power Controller、当研究所開発の配電線間に接続する双方向形潮流・電圧制御機器)、および需要家力率改善コンデンサの各制御方式を設定できます。

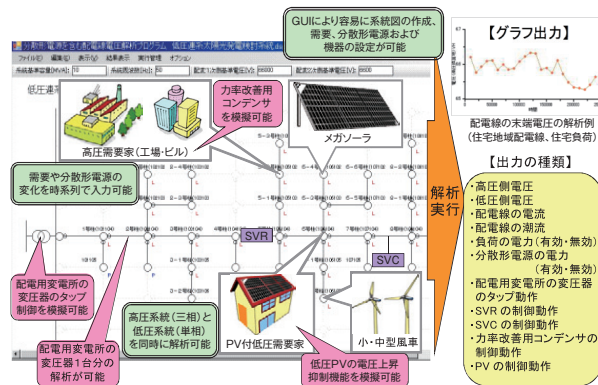


図2-2 高圧配電線構成例と入・出力項目

本プログラムによる解析結果例を図2-3に示します。PV連系時に、逆送形SVRでは電圧を適正に維持できますが、従来形SVRでは逆潮流が発生すると電圧を適正に制御できなくなる場合があること、またSVRの代わりに1000kVA程度のSVCを配電線末端に接続すると適正電圧に制御可能であることを示しています。現在、電力10社が本プログラムを使用しており、一部の会社では配電運用業務システムに組み込み、実務で活用されています。

今後は、本プログラムにより、配電線センサやスマートメータ情報を活用した配電自動化・制御

※5 力率:交流電源から供給された電力のうち、モーターなどの負荷によって有効に消費された電力(有効電力)の割合。消費されなかった電力(無効電力)は、負荷と電源を往復するだけで実際に仕事をしない電力。

※6 三相不平衡解析:三相の配電線において、各相に接続している負荷や分散形エネルギーシステムの量が相間で不均一の場合の解析。

システム高度化技術の開発を進めます。

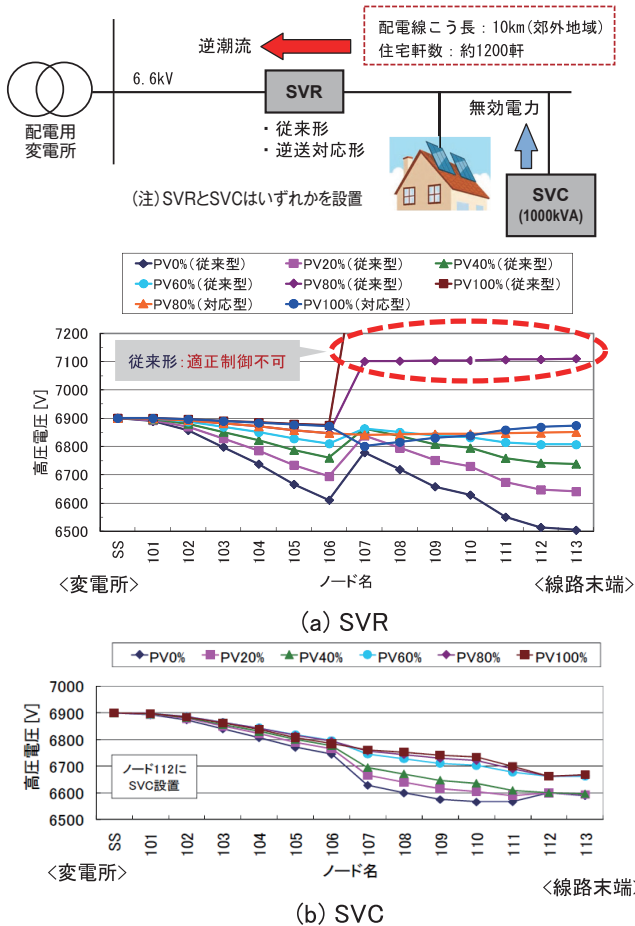


図2-3 配電線電圧制御方式の解析結果例

2.4 需要家機器運転計画手法の開発

逆潮流に伴う電力系統への様々な影響を回避するための技術として、PVによる需要家からの逆潮流値(もしくはPV出力値)に制限がかかった場合に、需要家所有のヒートポンプ(HP)式給湯機や蓄電池などを運転し、PVの機会損失(出力抑制により失われる電力)を極力低減させる需要家機器運転計画手法を開発しました。本手法は、系統から送られてくる逆潮流制約情報、翌日のPV出力や電

力需要パターンの予測に基づき、需要家の利便性に影響を与えないことを条件に、各機器の翌日の運転計画を作成するものです。また、予測の不確実性を考慮し、統計的手法を取り入れて、予測がある程度はずれた場合でも、需要家の利便性や電気料金への影響を最小限に抑えるようにしています。

HP式給湯機を用いた本手法の実証試験結果例を図2-4に示します。HP式給湯機が日中に運転され、逆潮流制約条件(2kW)により本来損失となってしまうPV出力電力の一部が有効利用されていることがわかります。年間を通じて同様の逆潮流制約条件が与えられた場合、発電機会損失を30%程度低減できる見通しを得ています。また、予測はずれに伴う利便性、電気料金への影響をさらに抑える蓄電池による予測誤差のリアルタイム補償方式も開発し、実験とシミュレーションによりその有効性を検証しました^[3]。

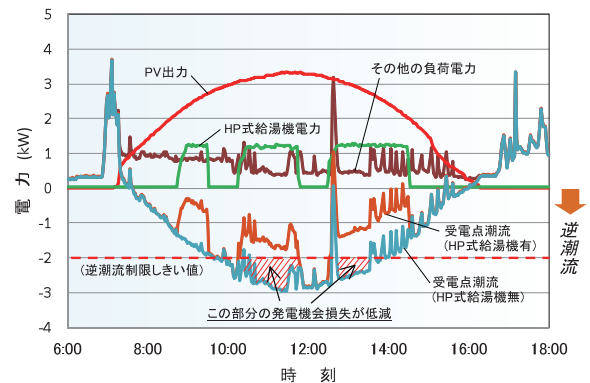


図2-4 需要家機器運転計画手法の実験結果例
需要地系統実験設備(赤城試験センター)設置の4kW級PVと1kW級HP式給湯機によるもの。逆潮流上限値:2kW

<参考文献>

- [1]上村:配電系統総合解析ツールの開発(その1)-PV大量導入に対応する配電・需要家機器動作解析プログラム-,電力中央研究所報告R11025、2012
- [2]浅利:需要家機器との連携制御を用いた太陽光発電逆潮流制御方式-ヒートポンプ式給湯機翌日運転計画手法の実証試験と改良-,電力中央研究所報告R10042、2011
- [3]大嶺、浅利:需要家機器による太陽光発電余剰電力有効利用手法の改良-当日補正機能の追加と検証-,電力中央研究所報告R13022、2014

再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定運用技術

3. 系統周波数維持のための電力貯蔵活用

工場や家庭などで安心して電気を使うためには、発電所から送られてくる電気の周波数、電圧、系統安定度^{※1}の3種類の指標が適正な範囲に維持されることが重要です。周波数については、天候に左右されやすい再生可能エネルギー（再エネ）電源が大量に導入される状況の中、時々刻々変化する電力需要に合わせて供給量を一致させる需給調整技術が必要です。

需給を適切に調整するには、まず翌日の需要や再エネ出力の大きさを予測して事前に発電機群を準備し（需給計画）、当日に生じる需給計画との誤差を解消するための周波数制御を実施します。その時、電力貯蔵装置を上手く活用することで、より経済的で効果の高い周波数制御が期待できます。また、需給計画における再エネ出力予測結果の精度も重要な鍵を握ります。

本章では、既存電源と蓄電池の協調制御による新しい周波数制御方式、太陽光発電出力変動の主因である日射量を数値気象モデルを用いて予測する技術、実システムを用いた実証例を紹介します。

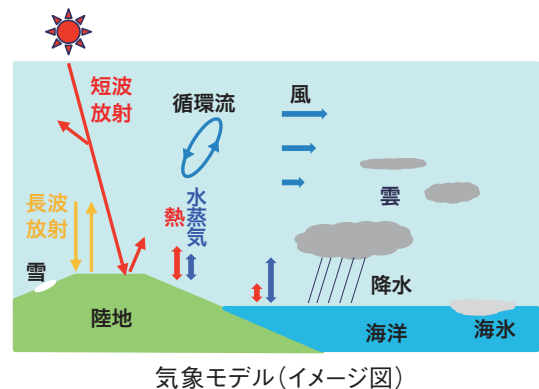
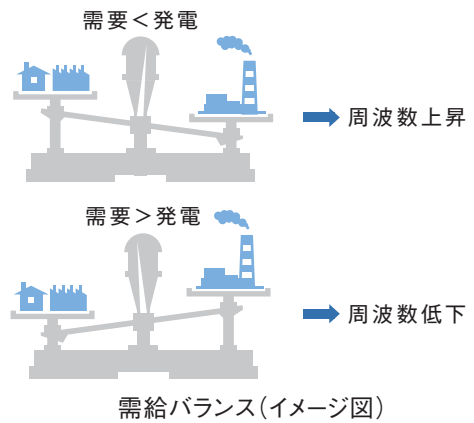
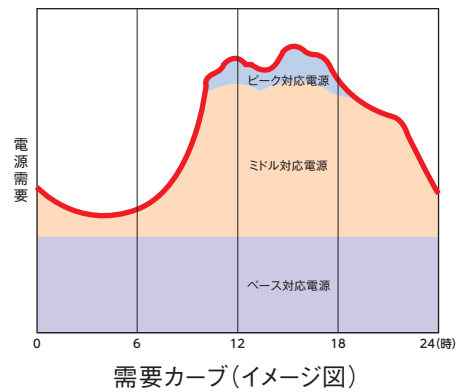
システム技術研究所
上席研究員
吉村 健司



地球工学研究所
主任研究員
田村 英寿



需要の変化に対応した電源の組み合わせ（ベストミックス）



※1 系統安定度: 発電された電力と使用された電力のバランスが事故などによって崩れた場合、バランスがとれた状態に収束する力のこと。

技術と日射量予測技術

3.1 PV大量導入による需給運用面での課題

低炭素社会の実現に向けて、太陽光発電(PV)や風力発電(WT)等の再エネ導入の動きが進む中、固定価格買取制度(FIT)の導入を契機として、さらにその動きが活発化しました。

PV大量導入による影響のひとつとして、見かけの需要^{※2}曲線の変化が挙げられます。従前は、昼間にピーク需要を記録し、深夜に向かって次第に減少していく山のような曲線となることが多くありました。PVの大量導入により、昼間にPVによる発電量が急増することで、見かけの需要は減少し、PVの発電量が減少する日没後に見かけの需要は急増する傾向が強まりました。火力発電機は出力可能な上下限值が決まっているため、昼間の見かけの需要が想定よりも低すぎると、発電機の安定運転に支障が生じる可能性があります。このため、従来以上に、精度の高い需要予測と再エネ出力予測が重要です。

また、PVやWTは天候によって発電出力が大きく変動するため、大量に導入された場合の出力変動に対して、既存の火力発電機等による負荷周波数制御(LFC:瞬時瞬時の需給のアンバランス量を解消させる制御)では、系統周波数が適正範囲を逸脱するおそれがあります(図3-1^[1])。

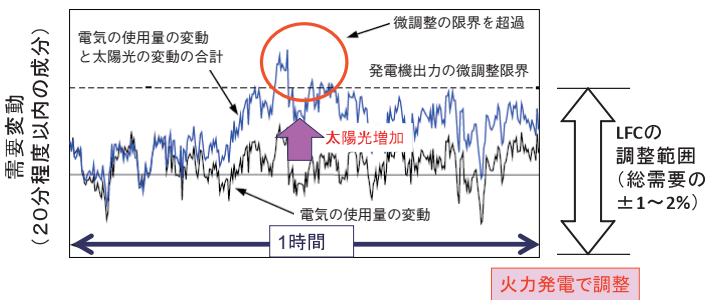


図3-1 再エネ大量導入時の周波数面の課題

3.2 電力貯蔵装置を活用した周波数制御技術^[2]

(1) 実システムを対象とした当研究所の取り組み

再エネ大量導入に伴い増大する周波数の乱れを抑制するためには、既存の火力発電だけでなく電力貯蔵装置を効果的に活用する方策が考えられます。これに関し、沖縄電力は経済産業省の離島独立型系統新エネルギー導入事業として、宮古島の実システムに電力貯蔵装置としてナトリウム硫黄電池(NaS)を併設してPVを大量に導入し、その影響や蓄電池を用いた系統周波数維持効果等を検討する実証試験を行っています。宮古島系統は系統規模に対するPV連系量と蓄電池の容量が比較的大きいこと、需給運用を島内で独立して行う給電所および給電設備を有していること、複数の系統電源(ディーゼル(DG)、ガスタービン(GT))で供給していることなどから、宮古島で得られた知見は再エネが今後大量導入されると想定されている本土系統でも活用できると期待されます。当研究所では、沖縄電力の協力を得て、宮古島で既存電源と蓄電池を組み合わせた協調制御技術の研究開発に取り組んでいます。

これまでに、周波数変動を生じさせるLFC対象の需要変動を長周期成分と短周期成分に分割し、既存電源には追従可能な範囲の長周期の変動を分担させ、蓄電池には残りの短周期の変動を分担させる技術を開発・提案しました(図3-2)。これにより、少ない蓄電池容量で高い周波数変動抑制効果を期待できます。

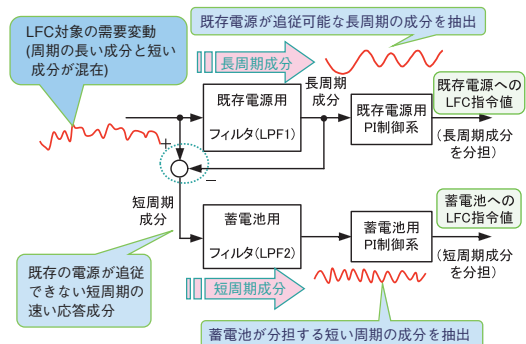


図3-2 提案した新しいLFC方式

※2 見かけの需要:トータルの電力需要からPV発電量を差し引いた既存電源が分担する需要。

(2) 実証試験設備の概要と試験結果

宮古島系統は、総需要がおよそ18,000～55,000kWの離島独立系統です。電源構成はDGとGT発電機で合計80,000kW、WTが4,200kW、PV（メガソーラー）が4,000kW、NaSが4,000kWとなっています。また、中央制御システムから、経済負荷配分制御（EDC）およびLFCを行うことが可能です（図3-3）。

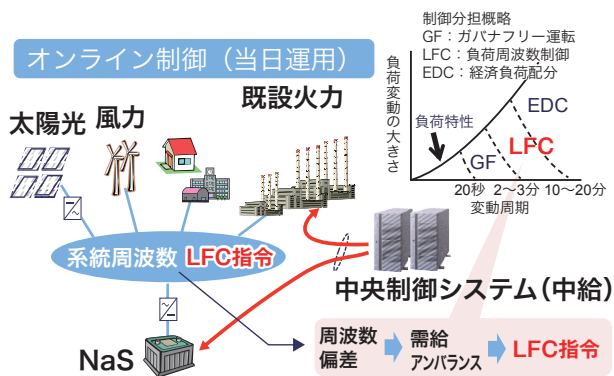


図3-3 LFC実証試験のイメージ

本実証試験では、DGのみによるLFC方式（A方式）、応答速度の速いNaSのみによるLFC方式（B方式）、DGとNaSの協調LFC方式（提案方式）の3方式で実系統においてLFC制御を行い、周波数変動抑制効果と蓄電池所要容量を分析しました。

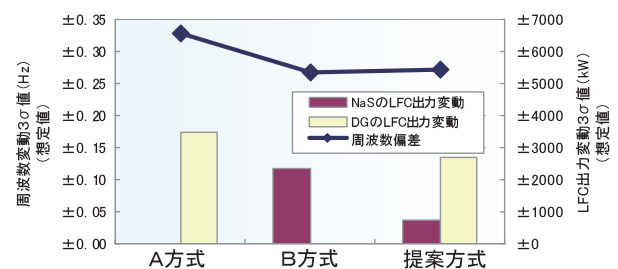
A方式の制御定数は可能な限り周波数変動を抑制できる設定とし、B方式と提案方式の制御定数は周波数変動の約99.7%（3σ相当値）が管理目標値である $60 \pm 0.3\text{Hz}$ 以内に収まる範囲でNaSの所要容量が可能な限り小さくなる設定としました。

LFCの制御対象量（見かけの需要のうち、数分～数十分程度の比較的周期の短い需要変動量）に対する周波数変動およびDGやNaSのLFC出力変動の関係をPV、WTの出力変動が共に大きい時間帯を対象として分析しました（図3-4）。

A方式は、他の2方式に比べて周波数変動抑制

効果が小さく、試験期間中の最大のEDC制御残を想定すると、周波数変動の3σ相当値を今回の試験での目標値である $60 \pm 0.3\text{Hz}$ 以内に抑制できないおそれがあります。

一方、B方式と提案方式は、試験期間中の最大のEDC制御残を想定しても周波数変動の3σ相当値を $60 \pm 0.3\text{Hz}$ 以内に抑制できます。さらに、提案方式はB方式よりもNaSのLFC出力変動の3σ相当値が小さく、周波数変動の抑制に必要な蓄電池容量を低減できます。



（注）試験期間中のEDC制御残の3σ相当値の最大値を想定して周波数変動とDG・NaSのLFC出力変動の3σ相当値を算出した。（実際の試験はいずれの方式についても周波数変動3σ相当値が $\pm 0.3\text{Hz}$ 以内の範囲で実施した。）

図3-4 LFC実証試験結果（3方式の比較）

(3) 本土系統への展開

PVが大量導入された場合の周波数維持方策として、今回開発したLFC方式が有効であることを実系統において確認しました。本LFC方式は本土系統への展開も期待されますが、系統の既存電源の応答速度により蓄電池の所要容量が異なることを試験で確認しており、留意する必要があります。適用する系統の特性に応じた蓄電池所要容量とすることで、設置コストを抑制させた効果の高い系統安定化対策とすることが期待できます。

3.3 経済的な需給運用のための日射量予測技術

翌日の需給バランスを決める需給計画におい

て、既存電源のコスト(燃料費や起動費)を抑えつつ、限りある容量の蓄電池を有効活用するためには、PV出力が不安定に変動する最大の要因である日射量を前日計画の段階で精度よく予測することが重要です。日射量の予測は様々な手法を行えますが、翌日以降を対象としたやや長期の予測を高い精度で行うには雲の複雑な動きを考慮することが重要で、それに適した手法として数値気象モデルがあります。

(1) 数値気象モデルで日射量を予測する技術

当研究所では、電力施設を雨、風、雪などによる気象災害から守ることを目的として、数値気象モデルを中核とする「気象予測・解析システム(NuWFAS)」(図3-5)を開発しました。このNuWFASを関東地方の翌日の日射量予測に適用して精度検証を行ったところ、特に夏季に予測誤差が大きく、改良の余地があることがわかりました。そこで、日射量をより高い精度で予測できるよう、日射変動の主因である雲の予測条件を改良した結果、夏季の日射量の予測誤差を約20%低下させることができました^[3]。さらに、雲の凝結に関わる物理モデルを詳細に改良したところ、夏季に日射量が実際よりも非常に大きく予測された日の予測誤差が大きく改善されました。

(2) 予測結果の信頼性を評価する技術

気象を100%に近い精度で予測することは非常に困難です。このため、予測精度を向上させる取り組みに加えて、日々の予測誤差の大きさ、つまり予測結果の信頼性に関する情報を事前に把握する手法を検討しました^[4]。この手法は、気象庁の週間アンサンブル予報で得られた複数ケースの雲量の計算結果のバラツキ具合をもとに、日々

の日射量予測結果の信頼性指標を算出するものです。予測の時点で得られるこの信頼性指標と、事後に得られる観測値に基づくNuWFASの日射量予測誤差とを比べたところ、信頼性が低いと判定された日に誤差が大きくなりやすい傾向が見られ(図3-6)、本指標が予測誤差を事前に推定する有益な付加情報となりうることがわかりました。

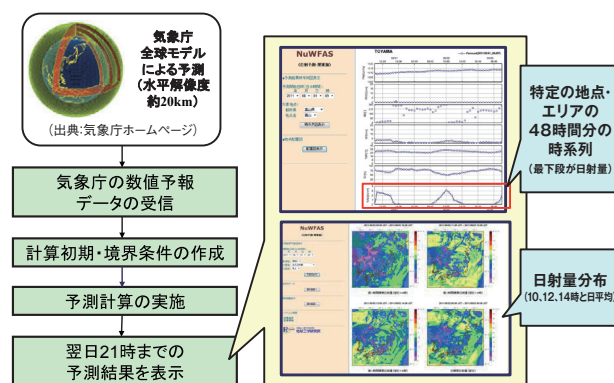


図3-5 NuWFASによる日射量予測の概要

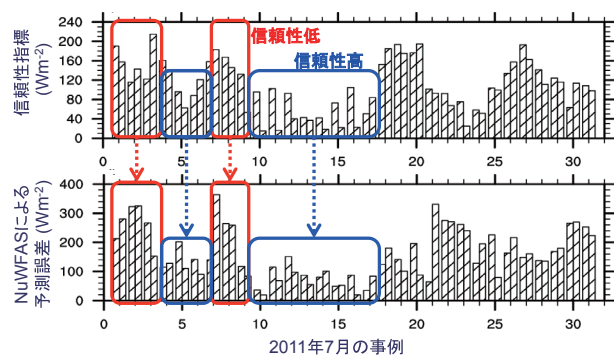


図3-6 31日間の信頼性評価を行った例

赤囲みの信頼性が低い日に誤差が大きくなりやすい

<参考文献>

- [1]資源エネルギー庁:新エネルギーの大量導入に伴う影響とその対応策について、2008
- [2]天野、島、川上、井上、上原、仲間、大城、渡久地:既存電源と蓄電池を協調させたLFC方式の制御効果の実証、平成25年電気学会電力・エネルギー部門大会、1-103
- [3]田村、平口、橋本、西澤、和田:太陽光発電のための日射量予測手法の開発(その1)ー気象予測・解析システムNuWFASによる翌日の予測精度の評価ー、電力中央研究所報告N10029、2011
- [4]野原、田村:太陽光発電のための日射量予測の信頼性指標、電力中央研究所報告V12015、2013

再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定運用技術

4. 基幹系統事故に対する系統セキュリティ

再生可能エネルギー（再エネ）、特に太陽光発電（PV）の大量導入は、配電系統から基幹系統まで、また電力系統の計画から運用・制御まで、様々な影響を与えるため、その解決に向けた技術課題が数多く挙げられます。現在、再エネ導入可能量は平常時の周波数を一定に保つための需給バランスのみを考慮して決定されています。しかし、多くの大規模停電は落雷などによる基幹系統事故が原因で、電力系統が不安定になり引き起こされます。そのため、再エネ大量導入時の基幹系統の事故が電力系統の安定性（周波数、電圧、系統安定度など）に与える影響の評価、および安定性を保つための対策の開発が喫緊の課題となっています。

本章では、再エネ大量導入時の基幹系統事故が電力系統に与える影響を、当研究所の電力系統シミュレータを用いた実験、およびPV用パワーコンディショナーの数値計算モデルを用いた計算機シミュレーションにより評価した結果について紹介します。

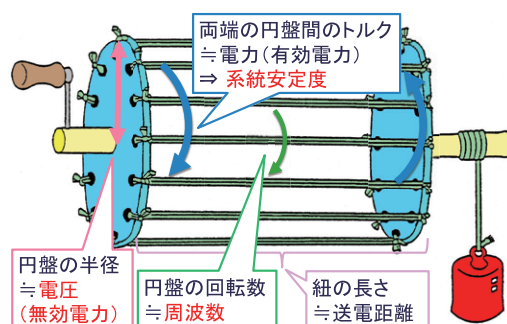
システム技術研究所
副研究参事
北内 義弘



電力系統シミュレータ（電中研 狛江地区）



大容量発電機模擬装置



交流送電の概念的モデル（周波数、電圧、系統安定度）

ティ評価

4.1 電力系統シミュレータの整備

現在、電力系統への再エネ導入可能量は平常時の周波数を一定に保つための需給バランスのみを考慮して決定されています。ところが、多くの大規模停電は落雷などによる基幹系統事故が原因で発生していますので、PVが大量導入された場合の基幹系統事故時の系統現象を評価することが喫緊の課題になっています。しかし、そうした系統現象を実験的に評価した例はありません。また、PVを電力系統に連系するために必要なパワーコンディショナー*1 (PCS)の系統事故時の動的な応答特性が、系統の安定性に及ぼす影響についても十分に解明されていません。

このため、当研究所の大形アナログシミュレータである電力系統シミュレータに、新たに新形PCS、PVパネル模擬電源、66kV送電線模擬装置、分散形模擬電源、負荷用変圧器、小容量調相設備などを導入・設置しました(図4-1)。そして、再エネ大量導入時の基幹系統事故が電力系統に与える基本的な影響の実験的検証、および計算機シミュレーションによる影響評価のためのPV用PCSの数値計算モデルの開発を行っています。

4.2 電力系統の安定運用に必要な3つの条件

電力系統を安定に運用するために必要な条件として、①周波数を一定に保つ、②電圧を一定に保つ、③系統安定度を維持する、の3つが挙げられます。

基幹系統の事故時にこれらの3条件を保つことを「系統セキュリティ」と呼びます。この系統セキュリティは、主に電力系統に並列されている大容量

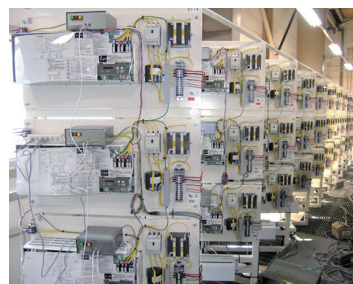
発電機*2によって維持されています。表4-1に大容量発電機が持つ特長をまとめました。



太陽光パネル(4.5kW×3セット)



電力系統シミュレータ 2階制御室



PCS合計45台(市販品および改造品)
▶市販品 約4.5kW×3相×4社(12台)
▶改造品 4.5kW×3相×8セット(24台)
▶新形FRT対応品 4.0kW×3相×3セット(9台)



PVパネル模擬電源
(11kW×36台)
▶PVパネルのI-V特性を模擬



66kV送電線模擬装置(40km×6組)
▶40kmは等価的に約9kmに相当



負荷用変圧器(60kVA×3台)
3.3kV/1.65kV/200V
負荷時タップ切替器付(9タップ)

図4-1 電力系統シミュレータに導入した設備

*1 パワーコンディショナー:PVなどで発電された「直流」の電気を家庭で用いられている「交流」に変換する機器。

*2 大容量発電機:基幹系統の周波数や電圧を変えることができる大きな容量を持つ発電機。

表4-1 大容量発電機の系統セキュリティへの貢献

大容量発電機の特長	系統セキュリティへの貢献
■ 周波数に応じて出力調整が可能	周波数
■ 同じ速度で回ろうとする力(同期化力)がある	周波数
	系統安定度
■ 慣性力を持っている(慣性定数が8秒程度)	周波数
	系統安定度
■ 系統事故時の瞬時電圧低下時(瞬低時)に停止しない	電圧
	系統安定度
■ 基幹系統の電圧調整が可能	電圧
	系統安定度

4.3 PV大量導入時の基幹系統への基本的な影響に関する実験的検証

系統事故時の挙動が従来の大容量発電機と異なるPVが大量導入された場合の基本的な影響を電力系統シミュレータを用いて実験的に検証しました(図4-2)。図中の遮断器CB1を開放させた場合に、発電機1が安定に送電できる電力(限界送電電力)は、発電機1と発電機2が連系された場合は84kWでしたが、発電機2と同出力のPVが導入されると55kWまで約2/3に低下することがわかりました(図4-3)。

このように発電機を同容量のPVに置き換えることにより、系統安定度が低下することが示されました。

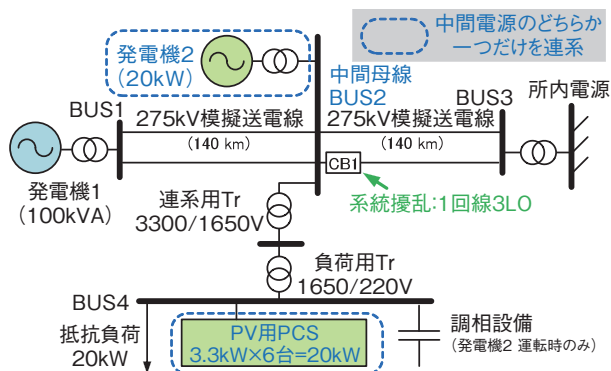


図4-2 発電機をPVに置き換えた場合の系統安定度への影響を検証するための実験系統

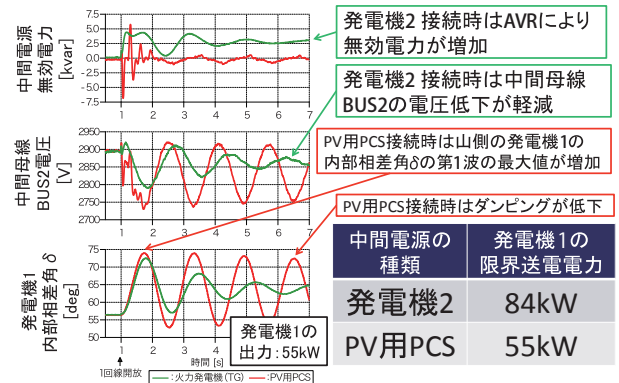


図4-3 発電機をPVに置き換えた場合の試験結果

4.4 再エネ大量導入時の系統安定度への基本的な影響^[1]

再エネ大量導入が基幹系統の安定度に及ぼす影響は、発電機や再エネの運転状態、導入地点などの系統条件によって大きく異なるため、その影響把握が困難となっています。そのため、実系統データを用いた解析結果から得た知見を活用し、再エネ大量導入時の個々の系統条件が系統安定度に及ぼす基本的な影響を整理しました(図4-4)。

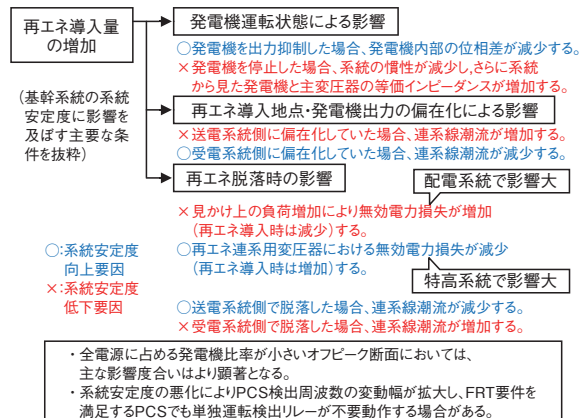


図4-4 再エネ大量導入時の系統安定度への基本的な影響の評価

また、275kV以下の下位系統モデルを追加した電気学会WEST10機系統モデル^[2](図4-5)を用いた再

エネ大量導入シナリオ(表4-2)を設定し、地絡事故が起きた場合の系統安定度に及ぼす影響をPV用PCS数値計算モデルを用いた計算機シミュレーションにより評価しました(図4-6)。ただし、発電機の運転台数を減らすと系統安定度が低下するため、中間導入時は再エネが導入された分だけ各発電機の出力を減少させ、発電機の運転台数をほとんど減らさない条件で評価しています。その結果、系統安定度は再エネ導入量の違いによって向上することも低下することも起こり得ること、またその要因を容易に把握できることを示しました。

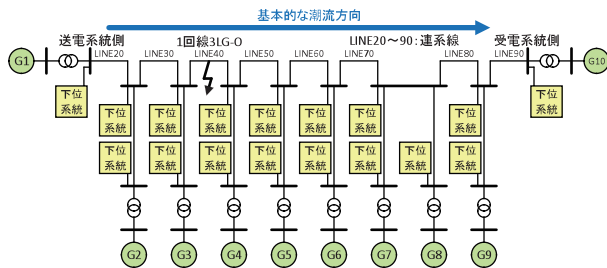


図4-5 下位システムモデルを追加した電気学会WEST10機システムモデル

表4-2 再エネ大量導入シナリオ

	再エネ導入量	電力需要の合計	発電機出力合計	発電機容量合計
(1) 再エネ導入前	0 GW	47 GW	47 GW	72 GVA
(2) 中間導入時 → 全国28 GW導入相当	14 GW (総需要の30%)		33 GW	71 GVA
(3) 最終導入時 → 全国53GW導入相当	27 GW (総需要の57%)		20 GW	56 GVA

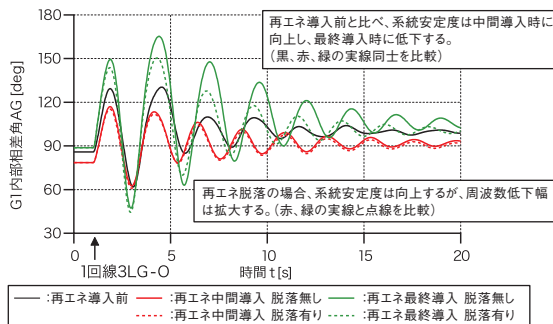


図4-6 計算機シミュレーションによる再エネ大量導入時の系統安定度への影響評価例

4.5 再エネ大量導入時の対策

再エネ大量導入時の定常時のみならず落雷などによる系統事故発生時に基幹系統の安定性を保つため、以下の様々な対策が検討されています。

- (1) 電力系統に連系する大容量火力発電機の台数の確保(周波数・電圧・系統安定度の維持に貢献)
- (2) 無効電力の供給・消費が可能な電圧制御機器(STATCOM、SVCなど)の設置(電圧の維持に貢献)
- (3) 蓄電池の設置(周波数の維持に貢献)
- (4) 再エネによる系統事故時の運転継続および事故除去後の速やかな有効・無効電力制御(周波数・電圧の維持に貢献)

当研究所では、電力系統シミュレータを用いた実験およびPV用PCS数値計算モデルを用いた計算機シミュレーションにより得られた研究成果を活用して対策を検討する予定です。

今後、上記の対策を上手く組み合わせ、経済的で現実的な対策を選択する必要があると考えており、それに向けて当研究所はさらなる貢献をしたいと考えています。

<参考文献>

- [1] 白崎、北内:再生可能エネルギー大量導入時の各種系統条件が基幹系統の系統安定度に及ぼす基本的な影響、電力中央研究所報告R14013、2015(印刷中)
- [2] 電気学会技術報告 第754号、電力系統の標準モデル、電気学会 電力系統モデル標準化調査専門委員会編、1999

再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定運用技術

5. 汎用技術を活用した電力系統監視制御

これまで紹介したように、当研究所では再生可能エネルギーの大量導入を見据え、需要地系統における電力需給協調技術や蓄電池の活用技術、太陽光発電の出力予測技術、基幹系統事故時の系統安定性評価技術などの開発を進めています。

これらの技術を活用するためには、その基本となる電流、電圧、周波数などの情報をきめ細かく収集するとともに、電力潮流が様々に変化する状況においても高速・確実に事故を除去できる監視制御のための情報通信システムが必要です。

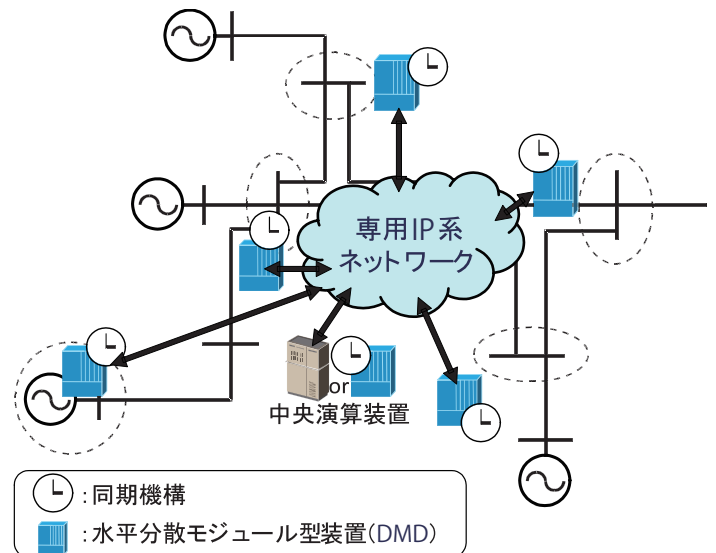
近年、通信ネットワークの分野では、インターネットプロトコル(IP)に代表される汎用・標準の通信方式の進展が目覚ましく、監視制御のための通信ネットワークにおいても導入が進められています。汎用技術を活用することにより、システムの構築コストを低減できるなどのメリットがあります。

本章では、当研究所が開発を進めている汎用技術を活用した電力系統監視制御用情報通信システムの構成と検証・評価結果について紹介します。

システム技術研究所
上席研究員
大場 英二



システム技術研究所
研究参事
芹澤 善積



同期機構を備えたDMDとIP系ネットワークにより構成される電力系統監視制御用情報通信システムのイメージ



DMDのプロトタイプ装置

用情報通信システム

5.1 電力系統監視制御用 情報通信システムの構成

当研究所が開発したシステムは監視制御装置と通信ネットワークから構成されます(図5-1^{[1])}。監視制御装置は、入出力機能、演算機能、通信機能をモジュール化するとともに、任意の装置が設置箇所に拘わらず通信ネットワークを介して処理(計測、演算、制御)を行えるようにして、システムの柔軟性や信頼性を向上させています。

通信ネットワークは、インターネットでも使用されている汎用的なイーサネット技術を活用することにより、システムの構築コストの低減や運用性の向上を図っています。また、系統保護や安定化制御などに必要な時刻同期機能も搭載しています。

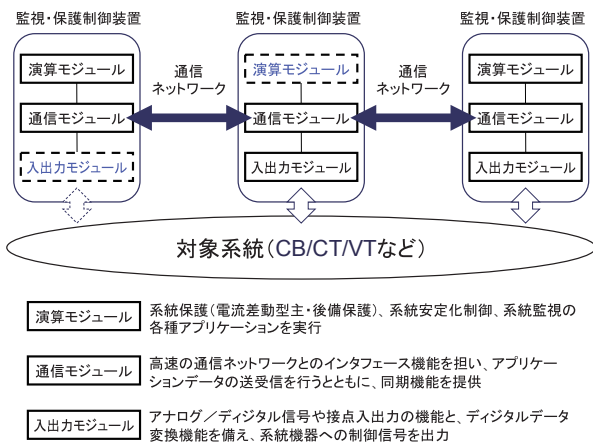


図5-1 情報通信システムの構成イメージ
破線部分は機能を除外したモジュール

(1) 監視制御装置

監視制御装置はネットワーク内に水平的に分散配置できることから、水平分散モジュール型装置(Decentralized Modular Device:DMD)と呼んでいます。DMDは、その機能を計測・制御機能を含む入出力モジュール、演算モジュール、通信モジュールの三つに分離しています(図5-1)。

これにより、必要な箇所に必要なモジュールを装備することができます。

また、すべてのDMDは通信モジュールを持ち、高速通信ネットワークで相互に接続されています。そのため、DMDをネットワーク内のいかなる箇所にも設置でき、任意の箇所から必要な処理(計測、演算、制御)を行うことができます。これにより、従来の装置単位での冗長化(多重化)に加え、複数DMDに演算モジュールを搭載して演算モジュール単位での冗長化を行うことや、作業により装置を停止させる際に演算モジュールを切替えることによる可用性(システムが稼働できる時間の割合)の向上が可能です。また、計測情報も任意のDMDで共有できるため、後備保護^{*1}にPCM電流差動リレーシステム^{*2}を適用可能であり、従来の距離リレー方式よりも高速に事故を除去することが可能です。

(2) 通信ネットワーク

電力会社では業務系のネットワークとは独立に監視制御、保護制御、給電指令用電話などの各種アプリケーションの情報を収容する通信ネットワーク(以下、電力保安通信網)を構築しています。従来、電力保安通信網では時分割でデータを伝送する通信方式が利用されてきましたが、近年のインターネットの進展とともにIP(Internet Protocol)方式が利用されるようになってきました。

IP方式では複数のアプリケーションで伝送路の帯域を共有することにより効率的に帯域を利用できます。また、汎用の通信機器を利用することによりコストダウンが期待できます。一方、機器や伝送路を通過する際に遅延時間が発生します。また、送信時に待ち合わせが生じる場合があり、

^{*1} 後備保護:電力設備には一般的に主保護と後備保護が設けられている。後備保護は主保護が何らかの原因で保護し損じた場合、または保護し得ない場合に動作する保護継電方式。

^{*2} PCM電流差動リレーシステム:保護対象とする送電線の各端の電流値を合計し、総和が0とならない場合に対象範囲に事故があると判定する方式を備えたシステム。

その度合いに応じた遅延時間や遅延時間変動が発生します。電力保安通信網を利用するアプリケーションのうち、PCM電流差動リレーや安定化制御は遅延時間や遅延時間変動に厳しい要件があります。遅延時間については、近年普及している1Gbpsクラスの伝送速度のネットワークを構築することにより、要件を満足することが可能です。一方、遅延時間変動については、その影響を低減し、利用する電流データ等のサンプリングタイミングを同期させる仕組みが必要になります。

本システムでは、図5-2に示すように、イーサネット技術を活用した専用の広域ネットワークを構築することにより、広帯域で低遅延な通信ネットワークを実現しています。

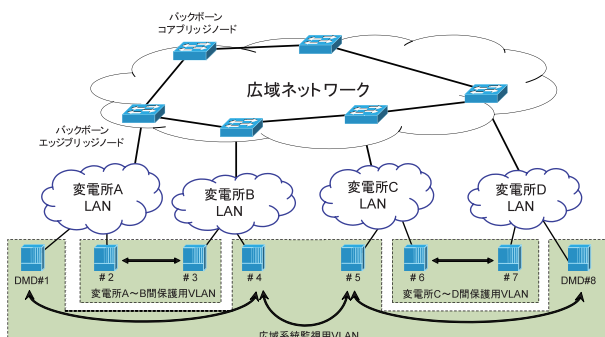


図 5-2 イーサネット技術を活用した通信ネットワーク

(3) サンプリング同期の確保

IPネットワークにおいてサンプリング同期を行う方式として、IEC 61588で規定されている高精度時刻同期方式(PTP: Precision Time Protocol)と、従来のPCM電流差動リレーの同期方式をIP系プロトコルで適用できるように置き換えたイーサネット型リレー同期方式(以下、リレー同期方式)を適用可能としました(図5-3)。

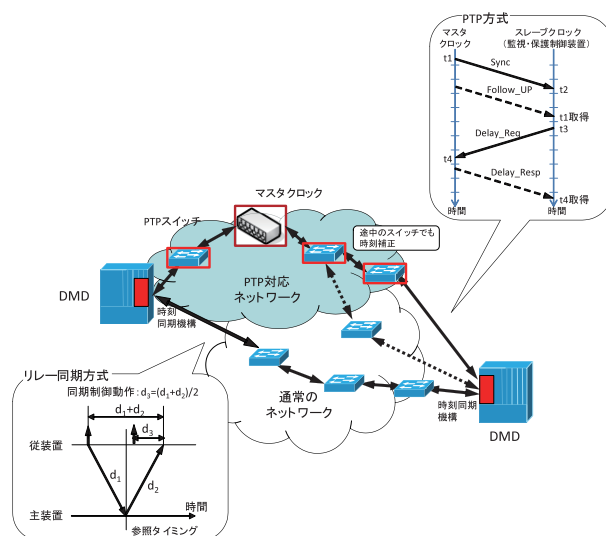


図 5-3 PTP方式とリレー同期方式による時刻同期

PTP方式は通信インタフェースのハードウェアに近い部分で時刻情報を処理することにより、ソフトウェア処理による同期精度への影響を極力低減する方式です。PTP方式では基準となる時刻(時計)を持つPTPマスタと呼ばれる装置に対して、図5-3の右側に示すような時刻情報のやり取りを行い、PTPスレーブと呼ばれる複数の装置の時刻を合わせることで、ネットワーク全体を基準となる時刻に同期させます。PTP方式では、同期情報を中継する装置として、発生する遅延時間を補正する機能(TC: Transparent Clock)を持つ装置を利用することも可能であり、より高い同期精度を確保できます。

リレー同期方式は、従来のPCM電流差動リレー装置と同様に、装置間でのデータ送受信のタイミングを利用してサンプリング同期を確保する方式です。IP系ネットワークの利用により発生する遅延時間変動については、装置でデータ到着時間の揺らぎを補正する処理を行うことにより、その影響を低減する方式としました。

5.2 系統監視制御用情報通信システムの検証・評価

(1) 保護機能の評価

DMDのプロトタイプを開発し、当研究所の電力系統シミュレータを用いて、①PCM電流差動リレーに

よる事故除去における主保護・後備保護機能、②送電線事故時の過負荷発生による電圧低下を回避するための負荷遮断機能について検証を行ない、いずれの場合も装置が所期の動作を行うことを確認しました(図5-4、図5-5)^[1]。

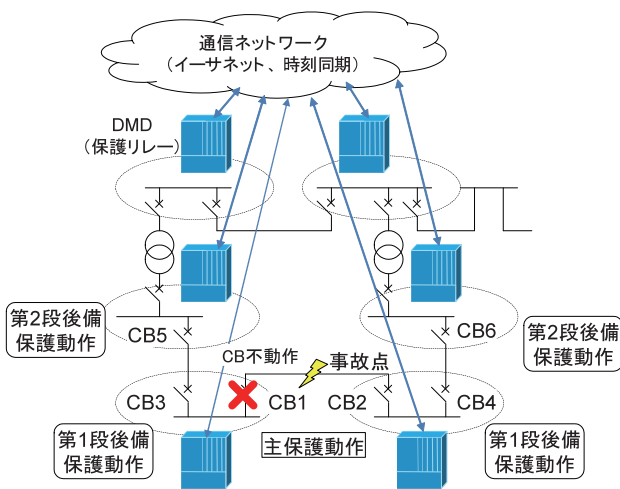


図 5-4 電力システムシミュレータによる保護機能試験構成

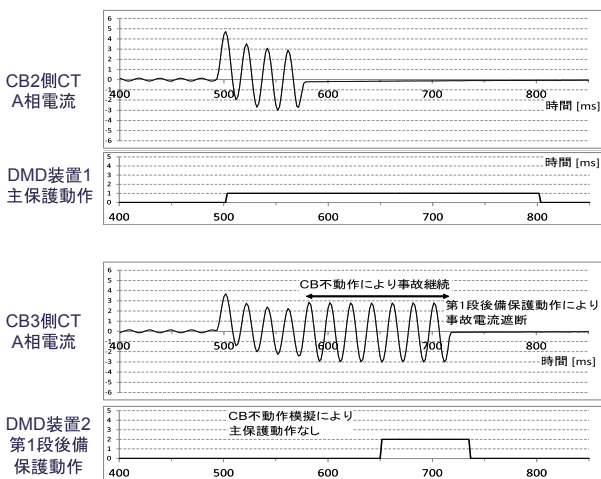


図 5-5 後備保護機能試験結果
CB不動作時、後備保護機能により第1段のCBが動作

(2)同期性能の評価

PTP方式、リレー同期方式のそれぞれに対し、5～10段程度の装置を中継する評価システムを構成し

て、同期精度の評価を行いました。その結果、中継装置にTC機能を持たない装置を用いた場合は数十μsec、TC機能を持つ装置を用いた場合は1μsec以下の同期精度を確保することができました。リレー同期方式についても数十μsecの同期精度を得ることができました^[2]。

(3)システムの信頼度評価

本システムを基幹系の主保護システムであるPCM電流差動リレーシステムに利用する場合、その目標信頼度(不稼働率:10⁻⁷)を満足する必要があります。各種装置の現状の不稼働率諸元に基づく机上評価を行った結果、図5-6に示すような光ファイバとマイクロ波無線を利用した構成により、目標信頼度を満足できることがわかりました^[1]。

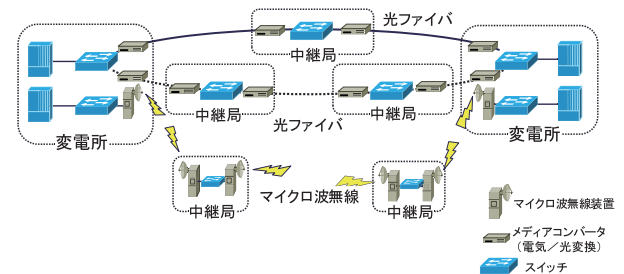


図 5-6 光ファイバ回線とマイクロ波回線構成による高信頼通信ネットワーク

<参考文献>

- [1] 芹澤、藤川、大場、柴山、千家、杉浦、河原田、中司、田中、佐藤・汎用・標準技術に基づく広域系統監視・保護制御システムのアーキテクチャと電力系統シミュレータでの検証、電力中央研究所報告R13012、2014
- [2] 藤川・広域電力系統の高速制御ネットワークの大規模・高信頼化方式の開発—IEEE 1588による時刻同期網の大規模化・高信頼化手法とその検証、電力中央研究所報告R13023、2014

DEN-CHU-KEN
TOPICS

発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 (大手町ビル7階)

TEL:03-3201-6601 FAX:03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>