

一般論文

再生可能エネルギー導入拡大による課題とその解決に貢献する当社系統解析技術

Nissin Electric's Power System Analysis for Solving Problems with Expanding Introduction of Renewable Energy Sources

黒田 和 宏*	久保 敏 裕*
K. Kuroda	T. Kubo
中島 宗 一**	長崎 則 久**
S. Nakajima	N. Nagasaki
村井 正 樹***	河崎 吉 則***
M. Murai	Y. Kawasaki

概要

東日本大震災およびその後の電力需給の逼迫経験、固定価格買取制度 (FIT) 導入、電力システム改革により、日本の電力系統は、①太陽光発電などの再エネ導入加速、②地域間連系の増強、③電力の小売り完全自由化にともなう新電力の増加、など大きな変化の時代を迎えている。本稿では、再エネ導入拡大により懸念される電力品質上の課題、あるいは地域間連系増強対策への当社の取り組みを系統解析技術の観点で紹介する。

Synopsis

The Great East Japan Earthquake and the subsequent electricity crisis, introduction of the feed-in-tariff scheme and the reform of the electricity system cause huge changes in the Japanese power grid system. These changes include the acceleration of installing the renewable energy equipment, the enhancement of the interconnections among the regional power electric companies, and the increase of the new power suppliers based on the full liberalization of retail power sales, and so on. In this article, we will discuss our activities to solve the problems caused by the above-mentioned changes, from a viewpoint of the power system analysis.

1. はじめに

東日本大震災およびその後の電力供給の逼迫を経験した我が国は、FIT導入と電力システム改革により、太陽光発電などの再生可能エネルギー（以下、再エネ）導入加速、電力系統の地域間連系の増強、電力の小売り完全自由化にともなう新電力の増加など大きな変化の時代を迎えている。

当社では、この変化に対して、系統解析技術、パワーエレクトロニクス技術を核として、機器監視技術にエネルギーマネジメントシステム (EMS) を加えて電力ソリューションを提供するSPSS (スマート電力供給システム) を提案し、当社前橋工場で実証検証に取り組んでいる。

本稿では、再エネ導入拡大により懸念される電力品質上の課題、地域間連系の増強対策への当社の取り組みを系統解析技術に着目して紹介する。

2. 日新電機の系統解析技術<sup>(1), (2), (3)</sup>

当社は、1945年に住友電気工業よりコンデンサ製造技術を引継いで以降、電鉄向けおよび電力会社向け直列コンデンサ設備、世界に先駆けて開発したアーク炉フリッカ対策用の他励式SVC (静止形無効電力補償装置) などの電力品質向上に貢献する設備を製品化してきた。さらに、地域間連系として電力会社間を直流連系 (交流⇔直流⇔交流) するすべての変換所向けに、他励式交直変換器から発生する高調波を抑制する高調波フィルタと、変換器の消費無効電力を供給する調相機器を納入し、日本の電力系統拡大に貢献してきた (表1)。

当社の系統解析技術は、これらの製品の電力系統への適用に際して、対策効果の事前検討・設備容量や制御方式の選定に大きな役割を果たし、その豊富な実績を強みとしている。

\* 研究開発本部  
\*\* 電力機器事業本部  
\*\*\* 新エネルギー・環境事業本部

表1 当社の電力品質機器と系統技術の貢献<sup>(1)・(2)・(3)</sup>

	日新電機の主要機器の経緯	系統技術の果たした役割
1945	住友電工からコンデンサ製造引継	
1964~	電鉄向け直列コンデンサ	電圧降下対策：コンデンサ補償度選定
1973	関西電力275kV系 直列コンデンサ (82, 84増設)	●分数調波振動抑制対策 ●直列コンデンサ再挿入時の過電圧対策
1973	SVC (静止型無効電力補償装置) (アーク炉フリッカ対策用, 世界初)	屑鉄溶解時のアーク炉特性の分析 ●高速なQ検出制御方法 ●最適な高調波フィルタ設計
1987	首都圏 大停電 →コンデンサ, SVC需要増加	電圧不安定現象の解析と対策 ●電圧安定化用 SVC 納入
2000	関西電力-四国電力 紀伊水道直流連系設備用 高調波フィルタ	系統高調波の解析と将来予測 ●最適な分路構成と容量選定 ●フィルタ回路開閉時の過渡過電圧と対策の評価

また、表2は解析対象と解析ツールを示す。対象時間領域として、サージ領域(μs領域)から安定度(秒領域)、潮流解析(定常)まで幅広く対応が可能である。

表2 解析対象と解析ツール

解析対象		解析ツール	時間領域
1	雷サージ	瞬時値解析プログラム	1~100μs
2	過度現象 過渡過電圧 (投入・開放、地絡)		1~200ms
3	高調波	高調波解析プログラム	20ms
4	系統動揺、安定度	潮流計算・安定度解析プログラム	1~10s
5	潮流解析*1		定常

\*1 母線電圧の調整に必要な調相機器、SVCの容量検討等で活用

### 3. 電力系統の課題と解析事例

#### 3.1 電力系統の環境変化と動向

近年の日本の電力系統の環境変化および、GDPで世界2位の経済大国となった中国やインドなどでの電力需要の増加、EU諸国における再生エネの導入拡大や域内での電力価格の平準化を目的とする直流送電グリッド建設の進展など、電力系統に関する環境変化とその動向を図1にまとめた。

この内、発電分野における再生エネを主とする分散電源の系統連系、送電分野における地域間連系の増強、需要家の事業継続計画(停電対策)や多様な電源構成での協調制御に関して、その課題と解析事例を以下に紹介する。

#### 3.2 分散電源連系時の課題と解析事例

分散電源連系時の主な検討項目と対策例を表3に示す。本節では、これらの検討項目について、解析事例を紹介していく。

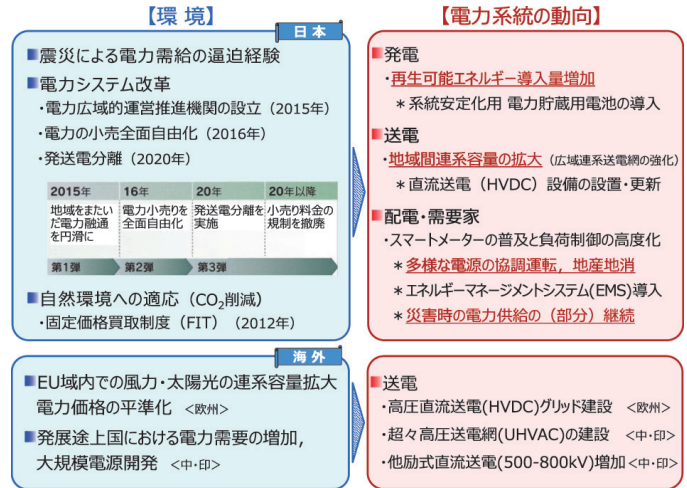


図1 環境変化と電力系統の動向

表3 発電機連系時の主な検討項目と対策例

検討項目	検討課題と対策例
再生エネ電源連系	【課題】 図2 【対策例】 力率一定制御(電圧変動対策) FRT機能の具備 など
発電機用等変圧器投入時の瞬時電圧低下	【課題】 投入時の励磁突入電流による瞬時電圧低下、保護リレー誤動作 【対策例】 抵抗投入、投入位相制御、2次側からの励磁による同期投入
長距離ACケーブル送電時の特異現象(洋上風発など)	【課題】 ケーブルCと系統Lによる高調波共振、ケーブル開放時の再点弧など 【対策例】 コンデンサバンク対応VCB適用高調波フィルタの設置
計器用変成器(VT)の鉄共振現象	【課題】 VT：鉄心を有する機器のLと静電容量(C)との非線形現象(鉄共振)の発生可能性 【対策例】 過飽和リアクトルの設置、VTの3次負担の追加

再生エネの大量導入による系統連系時の主な課題を図2に示す。この内、出力変動による電圧変動の抑制、系統擾乱時の一斉解列の防止に関連する解析事例を紹介する。

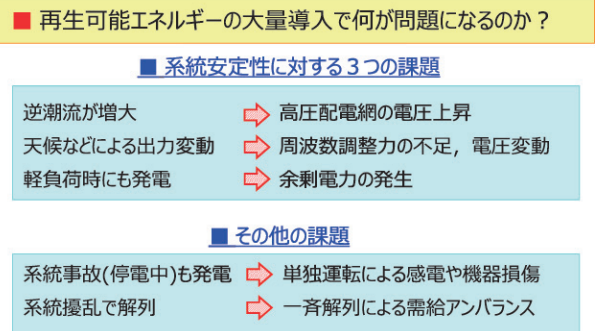


図2 再生可能エネルギー大量導入による系統上の課題

大容量の太陽光発電設備を配電系統に設置する場合には、その発電電力の変動による電圧変動が無視できないケースが考えられる。風力発電設備では電圧変動対策としてSVC（静止形無効電力補償装置）を併設するケースが多いが、太陽光発電設備ではパワコン自体が無効電力を発生できることから、パワコン自身にSVC機能を持たせることができる<sup>(4)</sup>。図3の系統で太陽光発電電力による連系点の電圧変動 $\Delta V$ は、簡易的に $\Delta V = r \cdot \Delta P - X \cdot \Delta Q$ として表される。よって、 $\Delta Q = (r/X) \cdot \Delta P$ の無効電力をパワコンから出力する事で電圧変動を抑制できることになる。

図4は、上記の原理による電圧変動対策効果の解析結果である。太陽光による発電電力データは実測値を使用し、無効電力出力Qは、発電電力Pに対する比率でフィードフォワード制御する方式（フリッカ対策において当社実績あり）とした。解析結果から本変動対策の有効性が明らかであり、太陽電池からの発電電力を制限することなく電圧変動を抑制できる事が分かる。

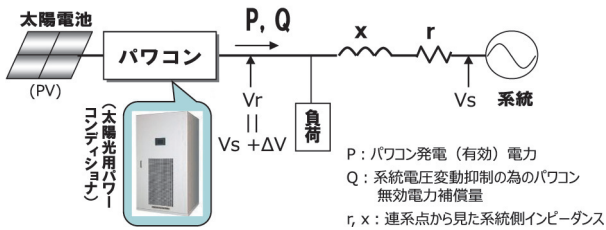


図3 電圧変動原理説明用簡易系統図<sup>(4)</sup>

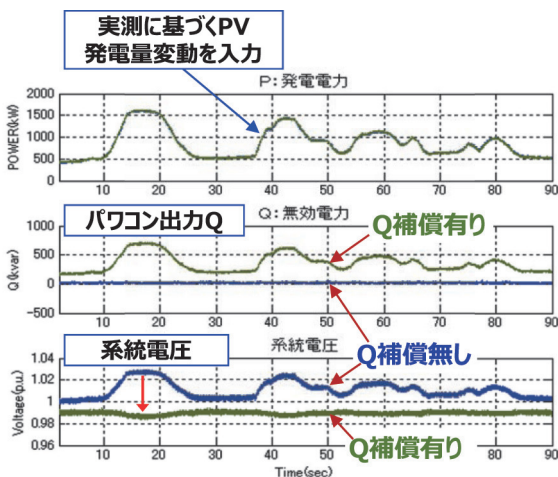


図4 電圧変動対策の解析結果<sup>(4)</sup>

また、風力発電に対しても、太陽光発電と同様に系統擾乱時の運転継続により、系統の安定運用へ寄与することが要求されている。誘導機直結型の風力発電機では、瞬時電圧低下（以下、瞬低）中の回転数の低

下により、発電機が消費する無効電力が増加し、電圧回復を遅延させる事がある。図5、6は、大容量誘導機直結型の風力発電所を対象として、瞬低後の電圧回復に必要なSVC容量を検討した解析事例である<sup>(5)</sup>。誘導機の慣性定数・電気定数を詳細に模擬した解析により、誘導機のすべり増加による電圧回復特性の遅延を模擬できており、電圧回復特性の改善には、電圧変動抑制用に設置されるSVC容量の増加が効果的である事が分かる。

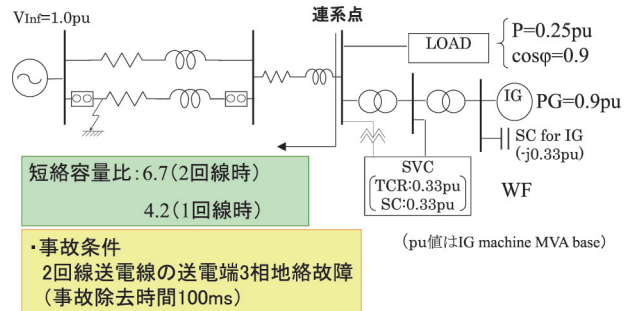


図5 大規模風力発電連系系統の系統構成<sup>(5)</sup>

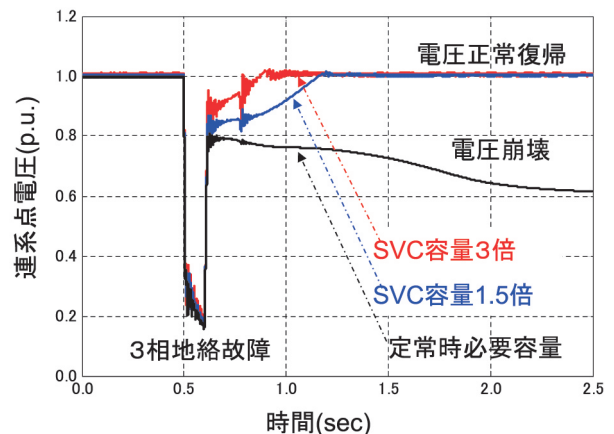


図6 系統擾乱時の連系点母線電圧解析結果<sup>(5)</sup>

なお、この例のように電力系統にSVCを設置する場合には、SVC用変圧器の無負荷投入による電圧低下や併設するSC（調相用コンデンサ設備）への高調波電流の流入についても検討が必要である。図7は、SVC用変圧器とSCを同時投入した時の解析結果である。

この事例では、変圧器投入により、SVC設置母線の電圧が10%程度低下している。また、励磁突入電流に含まれる3次調波がSCに過渡的に流入する事が解析により把握できる。

また、近年では、日本においても洋上風力発電の計画が拡大する傾向にある。洋上風力発電の送電方式は、陸地までの送電距離が短距離の場合は交流送電が、長距離の場合は直流送電が選択されることが多く、その境界の目安は概ね30~60km<sup>(6)</sup>程度とされている。

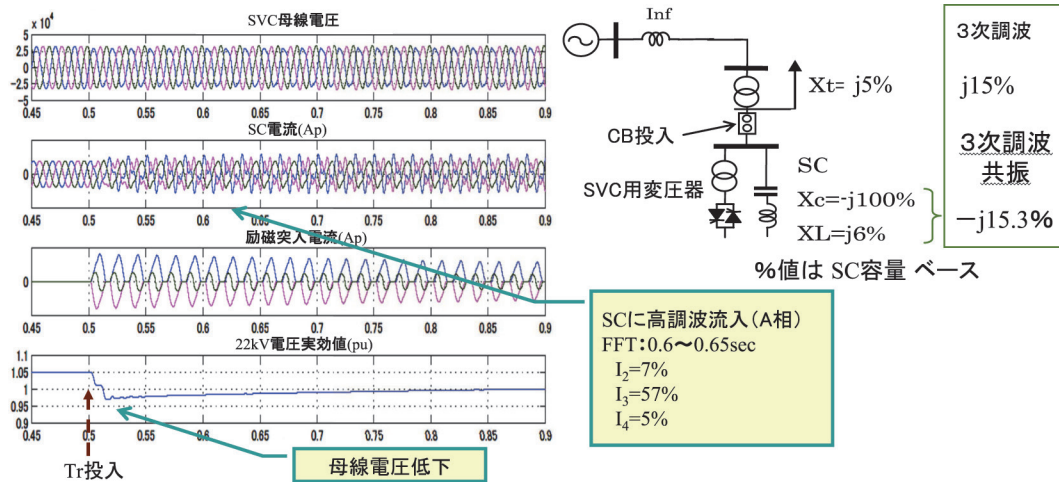


図7 無負荷変圧器投入時のSC電流解析事例

交流送電が適用される場合には、送電距離によって海底ケーブルの対地静電容量に起因する特異現象の発生が懸念される為、十分な事前検討が必要である。表4は、海底ケーブルによる交流送電時の主な事象と対策例をまとめたものである。当社では、これらの事象に対する系統解析により、対策要否の検討および対策機器の仕様提案を行っている。

表4 長距離ケーブル交流送電系統の特異現象

事象	懸念される現象と対策例
電圧変動(上昇)	長距離ケーブルはコンデンサとして作用し、離島側の電圧が上昇する 【対策】 SVC、ShRの設置など
高調波共振	長距離ケーブルCが大きく系統のLとの共振点が低下し、高調波が拡大 共振周波数 = $1/(2\pi\sqrt{LC})$ ⇒ C大により共振周波数が低下 【対策】 高調波フィルタの設置
雷・開閉サージ共振	長距離ケーブルCによる遮断時の再点弧(絶縁破壊) 【対策】 コンデンサバンク対応VCBの適用：進み電流遮断能力
ケーブル残留電圧	遮断時にケーブルにはピーク電圧が残留する。この状態で遮断器を投入すると、過電圧が発生し、機器を損傷する可能性がある 【対策】 残留電荷放電装置の設置

さらに、発電機の新規連系では、VT (Voltage Transformer)、CT (Current Transformer) など計器用変成器の設置が必要となる。VTのような鉄心を有する機器の励磁インダクタンス (L) と静電容量 (C) が共存している回路では、遮断器開閉などの電氣的ショックによりLが一時的に磁気飽和するとL-C間でエネルギー授受が発生して、稀に鉄共振と呼ばれる持続性の振動現象が発生する事が知られている。このような鉄共振現象が継続すると、過熱による機器の焼損、さらに絶縁破壊による主回路の地絡故障に発展するケースがある。

表5、図8に、鉄共振現象の解析事例<sup>(7)</sup>を示す。図8は海外の500kV変電所の三次回路用GIS系統の回路図で、三次回路は非接地である。この系統において無負荷で遮断器を投入したところ、表5に実測波形として示した零相電圧(各相に同じ大きさ、同じ位相で含まれる電圧)が発生した。零相電圧は基本周波数50Hzの1/2調波にあたる25Hzで振動しており、各相の電圧には、同じ成分が重畳していることが分かる。同表の右側に示した、実系統の条件による再現シミュレーション結果波形でも実測波形と同様の1/2調波振動が発生していることから、鉄共振現象の一種である中性点不安定現象の発生が確認できた。

このように、鉄共振現象の発生有無は周囲の回路定数や運用条件に左右される。したがって、当社では豊富な実績を元にお客様への対策提案や解析による技術協力を実施している。

表5 VTの各相および線間電圧と零相電圧（実測と解析結果）<sup>(7)</sup>

	実測波形	解析結果
A相電圧		
B相電圧		
C相電圧		
零相電圧		
線間電圧 (AB)		
線間電圧 (BC)		
線間電圧 (CA)		

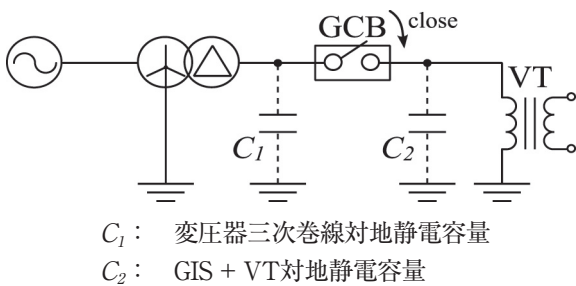


図8 海外500kV変電所三次回路用GIS系統の回路構成<sup>(7)</sup>

### 3.3 地域間連系増強対策における解析事例

東日本大震災後の東日本地域の電力需給逼迫や再エネの導入容量拡大、さらには、電力小売りの全面自由化により、これまで緊急時の融通としての活用が主であった地域間連系の増強が図られている。

図9は地域間連系の現状と電力広域的運営推進機関（広域機関）にて検討中の地域間連系の概要をまとめたものである。

当社では、直流を介する地域間連系で使用されるフィルタ設備を納入してきた。図10は、直流送電用変換所の主要機器構成を示す。高調波フィルタには、直流送電線からの誘導障害を防止するための直流フィルタと、交流系統への高調波流出による電力機器の過熱・焼損などの不具合を防止するための交流フィルタがある。交流フィルタは、他励式変換器から発生する $12n \pm 1$ 次（ $n$ は自然数）の高調波を抑制する11th、13th、高次分路（HP）フィルタおよび、系統に多く残留する5次調波の拡大を防止する5thフィルタから構成されるのが一般的である。

超高圧・大規模設備では実規模試験は困難である一方で、高い信頼性が要求される。設備の絶縁設計は、開閉時・系統故障時の過渡過電圧解析結果が反映されることから、系統解析の信頼性が重要である。図11は阿南変換所納めの大地置き式交流フィルタの事前シミュレーションの結果と現地試験波形<sup>(3)</sup>である。交流フィルタ投入時の過渡過電圧の最大値は、事前解析と実測で良く一致しており、解析結果を元にした超高圧機器の合理的な絶縁設計を実現できた。

## ●地域間連系容量の拡大：直流および交流で電力会社間を連系

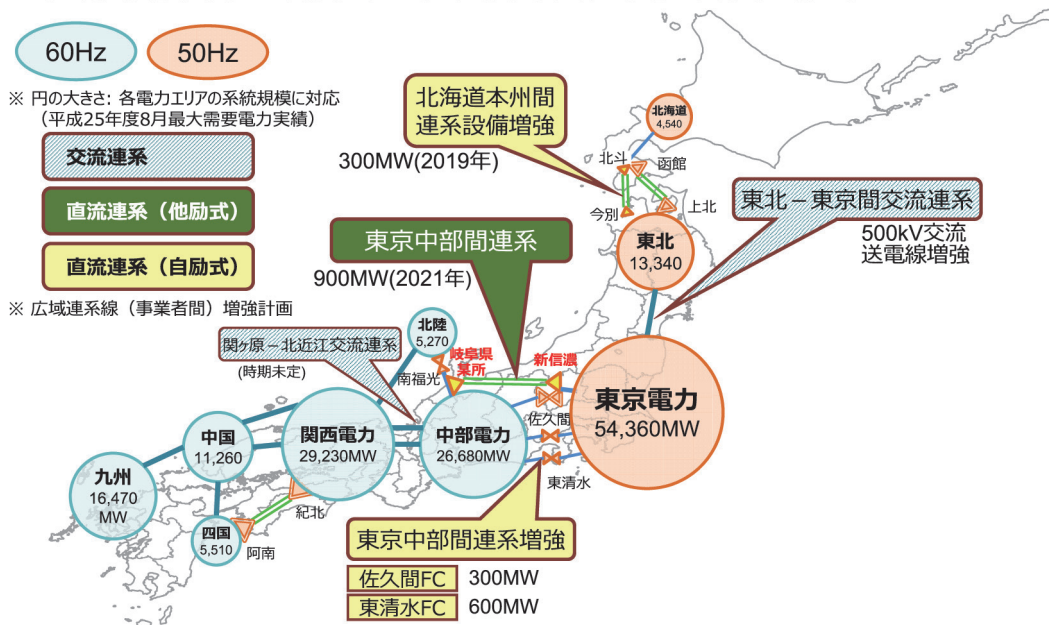


図9 現状および整備計画中の地域間連系

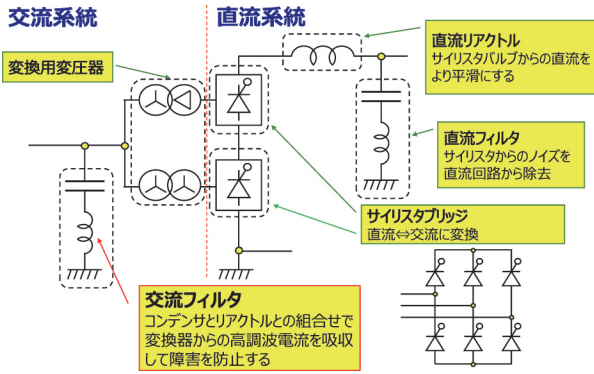


図10 直流送電用変換所の主要機器構成

### 3. 4 需要家系統における解析事例

需要家系統における主な検討項目の例と対策例を表6に示す。瞬低・停電対策技術は、近年の自然災害の増加、再エネ導入拡大による電力品質低下への懸念が高まる中、事業継続の実現のために更に重要性を増すものと考えられる。

本節では、瞬低・停電対策、および、再エネを含む多様な電源構成での協調制御について解析事例を紹介する。

表6 需要家系統に対する主な検討項目と対策例

検討項目	検討課題と対策例
瞬低・停電対策 (災害時の操業継続)	【課題】 瞬低・停電時の対策装置の補償動作の事前検討：負荷機器による補償動作への影響、回転機軸トルクの検討 【対策例】 対策装置（直列型・並列型、限流遮断装置など）の設置
多様な電源導入時の協調制御・安定運転	【課題】 系統擾乱時の安定運用、再エネ電源の変動補償 【対策例】 系統安定化装置（蓄電池など）の設置
受電用変圧器投入時の電圧変動	【課題】 投入時の励磁突入電流による瞬時電圧低下、保護リレー誤動作 【対策例】 抵抗投入、投入位相制御、2次側からの励磁による同期投入
負荷機器などによる高調波問題	【課題】 需要家構内回路による高調波拡大 【対策例】 高調波フィルタの設置、発生源の抑制（ACリアクトル設置など）

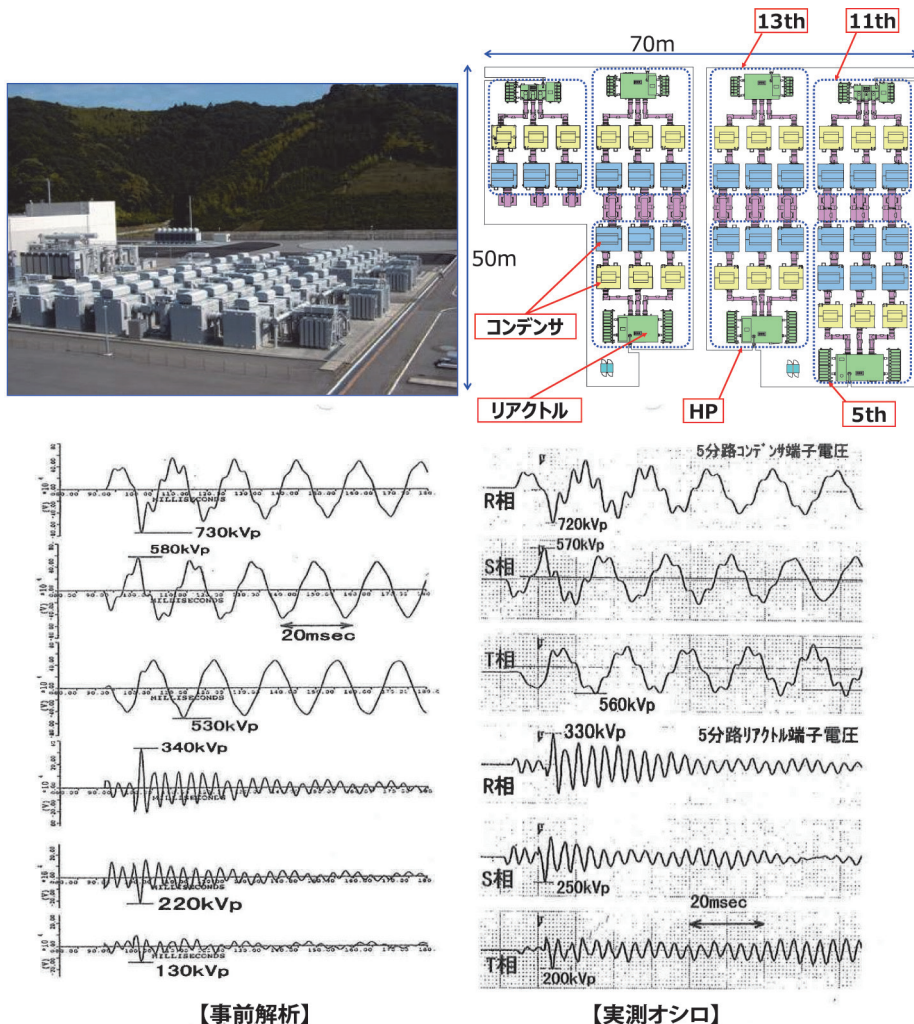


図11 紀伊水道直流連系：阿南側交流フィルタの設備概要と充電開閉試験時の電圧測定オシロ例<sup>(3)</sup>

当社では、主に半導体工場向けとして系統故障・停電時の対策装置を開発・納入してきた。図12は、当社の並列形全電圧補償方式の瞬低・停電対策装置（オールセーフ）の概要<sup>(8)</sup>を、図13は、その工場試験時の実測波形と瞬時値解析ソフトEMTPによる解析波形の比較である。図13で示した通り、対策装置の実動作を良好に再現できる解析モデルの構築で、需要家の系統条件に合わせた最適設計を行っている。

さらに、長時間停電時には非常用発電機へ負荷移行するシステムも製品化している。

また、近年は需要家においても、多様な電源の導入と協調制御によるエネルギーコストミニマムが志向されている。FITにおける再エネ買取価格の低下により、今後は地産地消型のマイクログリッド形式の採用増加が予想される。このような多様な電源の協調制御の検討事例として、離島独立系統の解析事例を紹介する。

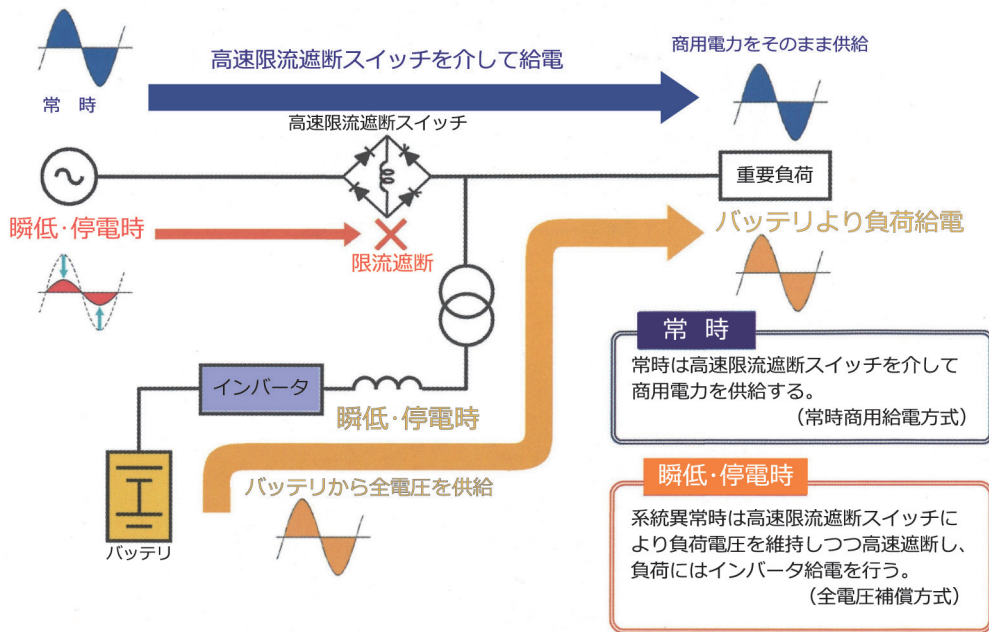


図12 瞬低・停電対策装置（オールセーフ）の動作概要<sup>(8)</sup>

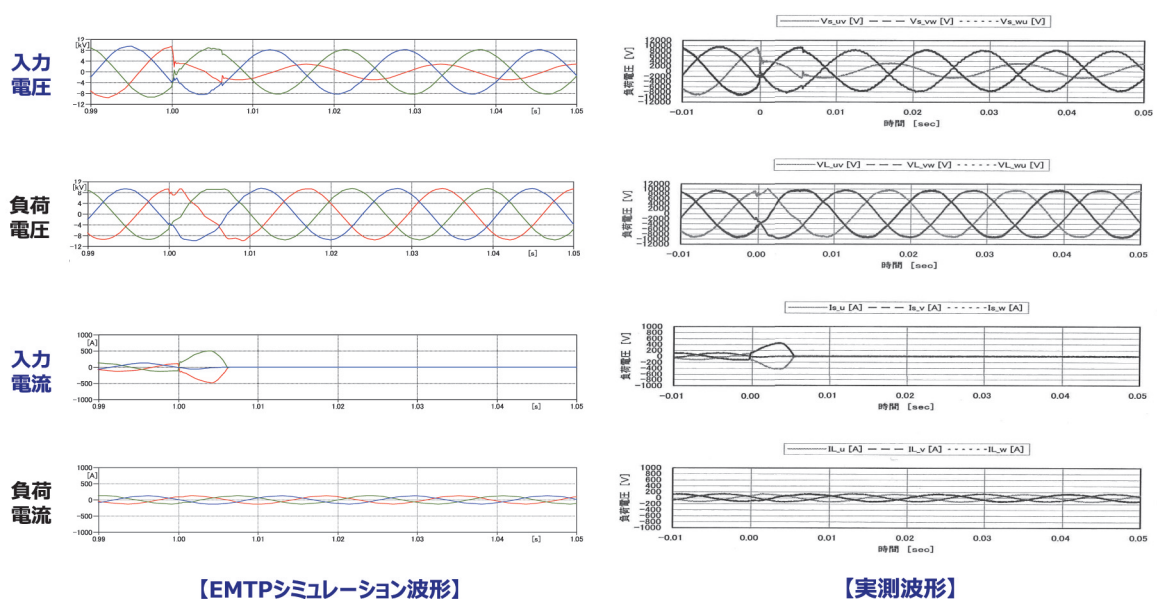


図13 瞬低・停電対策装置 工場試験時の動作解析

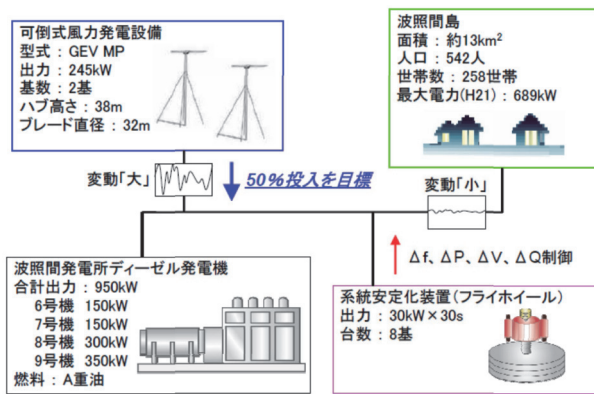


図14 離島独立系統における系統安定化<sup>(9)</sup>

発電機の脱落で模擬した風力発電電力の急変に対応して、急峻な電力変化をフライホイールが補償し、その後、ディーゼル発電機へと負荷移行しているが、解析結果でもその動作を良好に再現できている。

このように、当社では、回転機型の発電機（ガバナ制御）とインバータによる系統安定化装置を組み合わせた協調制御の構築・検証も、解析技術ベースで実施している<sup>(10)</sup>。

#### 4. あとがき

太陽光発電など再エネの大量導入、電力システム改革、地域間連系の拡大など電力系統は大きな変化の時代を迎えている。本稿では今後の電力系統、需要家系統における課題に対する当社の取り組みを、系統解析技術に着目して紹介した。今後もこれまでの知見を活かしつつ、系統解析技術により、電力系統の課題解決と発展に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 田辺、武居、植月、室谷、深川、井上：「大黒部幹線用直列コンデンサについて」、日新電機技報 Vol.28、No.3(1983年9月)
- (2) 箱田、宮田、近藤：「当社のSVCの歩みと動向」、日新電機技報 Vol.36、No.4(1991年11月)
- (3) 小松、畑野、村岡、松本、陰野：「500kV交流フィルタの絶縁構造と耐電圧試験結果」、平成13年電気学会全国大会6-142
- (4) 「2010年の技術と成果」、日新電機技報 Vol.56、No.1(2011年4月)
- (5) 大西、黒田：「風力発電用SVCによる事故時過渡安定性の検討」、平成17年電気学会電力・エネルギー大会No242
- (6) 町田武彦編著：「直流送電工学」、東京電機大学出版
- (7) 小島、中島、久保、黒田：「ガスV Tの鉄共振現象の解析と対策」、日新電機技報 Vol.56、No.2(2011年11月)
- (8) 河崎、佐野、村井：「高圧・大容量瞬低停電対策装置」、日新電機技報 Vol.52(2007年3月)
- (9) 村井、井筒、後藤、黒田：「離島グリッドにおける再生エネルギー導入比率拡大に向けた系統安定化技術」、日新電機技報 Vol.59、No.2(2014年10月)
- (10) 雨谷、室谷他：「過渡現象解析プログラム(EMTP)の適用について」、日新電機技報 Vol.27、No.1(1982年1月)

#### ディーゼル発電機脱落で発電電力急変を模擬

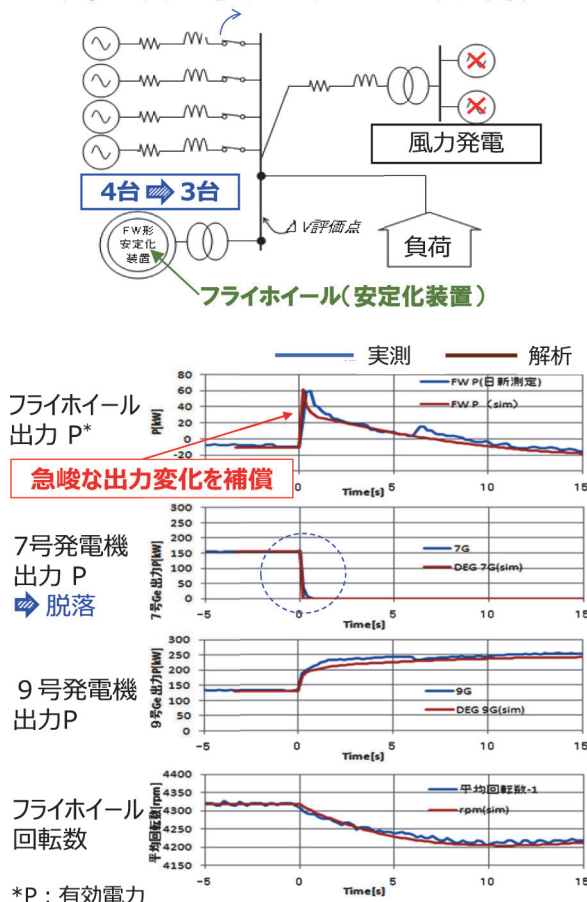


図15 風力発電電力急変時の電力補償（実測と解析結果）

図14に波照間島（離島独立系統）のシステム概要を示す。ディーゼル発電機、風力発電機を電源とし、エネルギー蓄積要素としてフライホイールを採用して、風力発電による系統への擾乱を安定化することを目的としている。

図15は、風力発電電力急変時の系統安定化装置の動作確認試験時とその再現解析結果である。ディーゼル



✎ 執筆者紹介



**黒田 和宏** Kazuhiro Kuroda  
研究開発本部 電力技術開発研究所  
系統技術グループ長



**久保 敏裕** Toshihiro Kubo  
研究開発本部 電力技術開発研究所  
系統技術グループ



**中島 宗一** Soichi Nakajima  
電力機器事業本部 変成器事業部  
設計部 主任



**長崎 則久** Norihisa Nagasaki  
電力機器事業本部  
コンデンサ事業部  
技術部 主幹



**村井 正樹** Masaki Murai  
新エネルギー・環境事業本部  
新エネルギー事業部  
システム設計部 システム設計グループ長



**河崎 吉則** Yoshinori Kawasaki  
新エネルギー・環境事業本部  
新エネルギー事業部  
システム設計部長