



再生可能エネルギー導入拡大に対応した 系統解析技術

Power System Analysis for Solving Problems with Expanding
Introduction of Renewable Energy Sources

黒田 和宏*
Kazuhiro Kuroda

久保 敏裕
Toshihiro Kubo

中島 宗一
Soichi Nakajima

長崎 則久
Noriyoshi Nagasaki

村井 正樹
Masaki Murai

河崎 吉則
Yoshinori Kawasaki

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への日新電機㈱の取り組みを、系統解析技術の観点で紹介する。

The Great East Japan Earthquake and subsequent electricity crisis, introduction of the feed-in tariff (FIT) scheme, and reforms have caused huge changes in the Japanese power system. These changes include the acceleration of installing renewable energy equipment, the enhancement of interconnections among regional power electric utilities, and the increasing number of new power suppliers resulting from the full liberalization of retail power sales. This paper introduces Nissin Electric's activities to solve power quality problems caused by the above-mentioned changes, using power system analysis.

キーワード：再生可能エネルギー、系統解析技術

1. 緒 言

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、電力システム改革により、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入加速、新電力の増加、電力系統の地域間連系の増強計画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に対する日新電機の取り組みを、系統解析技術の観点から紹介する。

2. 日新電機の系統解析技術^{(1),(2)}

当社は、1945年に住友電気工業㈱よりコンデンサ製造を引継いで以降、力率改善用コンデンサ設備（以下、SC）、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、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、我が国の電力系統拡大に貢献してきた（表1）。

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。

表1 当社の電力品質機器と系統技術の貢献^{(1),(2)}

	日新電機の 主要機器納入の経緯	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：コンデンサ補償度の選定
1973	関西電力275kV系 直列コンデンサ ('82、'84増設)	●系統短絡故障時の保護対策 ●直列コンデンサ再挿入時の端子間過電圧対策
1973	SVC（静止形無効電力補償装置） （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 ●高速な無効電力検出制御法選定 ●最適な高調波フィルタ設計
1987	首都圏大停電を契機とする コンデンサ、SVC需要	電圧不安定現象の解析と対策 ●電圧安定化用SVC制御法選定
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	系統高調波の分析と将来予測 ●最適なフィルタ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）まで幅広い実績を有している。

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	過渡現象 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	1~10s
5	潮流解析		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諸国における再生可能エネルギー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可能エネルギーを主とする分散電源の系統連系、需要家の事業継続計画(停電対策)に関して、その課題と解析事例を紹介する。

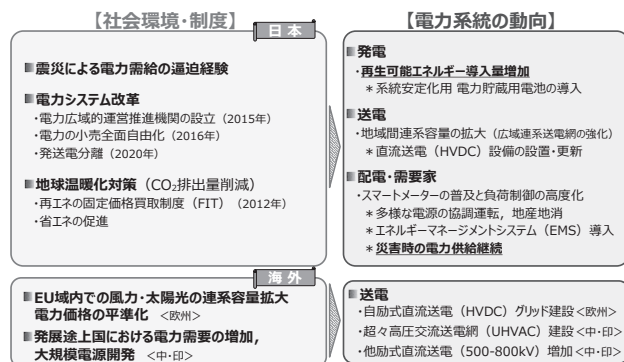


図1 社会環境・制度変化と電力系統の動向

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。

再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。

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

にSVC機能を持たせることができる⁽³⁾。図3の系統で太陽光発電電力による連系点の電圧変動 ΔV は、有効電力変動 ΔP 、無効電力変動 ΔQ 、配電線インピーダンス $r+jx$ とすると、簡易的に $\Delta V=r \cdot \Delta P-x \cdot \Delta Q$ としてあらわされる。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ことで電圧変動を抑制できることになる。

表3 分散電源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
再エネ電源連系時の系統安定性	【課題】図2 【対策例】パワコンの力率一定制御(電圧変動対策) FRT機能の具備など
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、二次側からの励磁による同期投入
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インダクタンス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】可飽和リアクトルのVT二次側設置、VTの三次負担の追加

■ 再生可能エネルギーの大量導入で何が問題になるのか？

■ 系統安定性に対する3つの課題

- 逆潮流が増大 → 高圧配電網の電圧上昇
- 天候などによる出力変動 → 周波数調整力の不足, 電圧変動
- 軽負荷時にも発電 → 余剰電力の発生

■ その他の課題

- 系統停電中にも発電 → 単独運転による感電や機器損傷
- 系統擾乱で解列 → 一斉解列による需給アンバランス

図2 再生可能エネルギー大量導入による系統上の課題

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ことがわかる。

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。さらに、誘導機直結型の風力発電機では、瞬時電圧低下(以下、瞬低)中の誘導機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ことがある。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

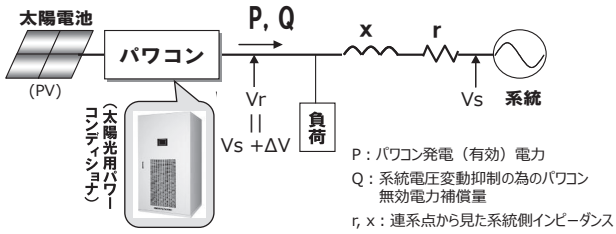


図3 電圧変動対策を説明するための系統図⁽³⁾

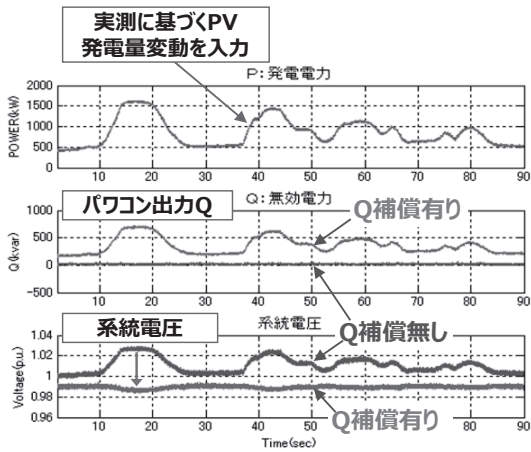
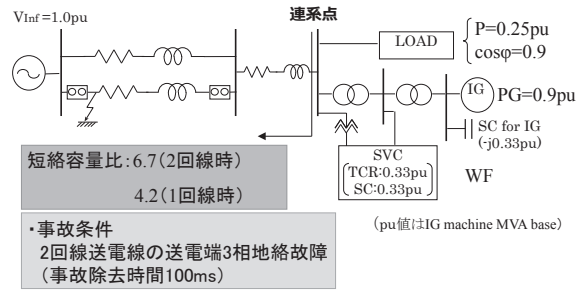


図4 電圧変動対策の解析結果⁽³⁾

容量を検討した解析事例である⁽⁴⁾。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ことがわかる。

なお、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突入電流が引き起こす電圧低下や併設するSC (力率改善用コンデンサ設備) への高調波電流



Induction Generator Parameters (machine base)	
Resistance of stator winding R_s	0.007pu
Leakage reactance of stator winding X_{ls}	0.093pu
Resistance of rotor winding R_r	0.010pu
Leakage reactance of rotor winding X_{lr}	0.097pu
Mutual reactance X_m	3.0pu
Inertia Constant H	2.0sec
SC for IG (Capacity)	0.33pu (L=0%)

図5 大規模風力発電連系系統の系統構成と誘導機定数⁽⁴⁾

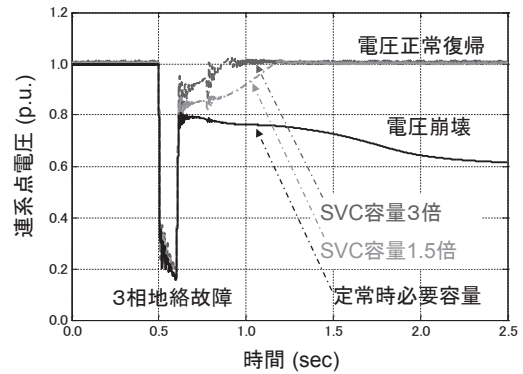


図6 系統擾乱時の連系点母線電圧解析結果⁽⁴⁾

の流入についても検討が必要である。図7は、SC投入状態でSVC用変圧器を投入した時の解析結果である。

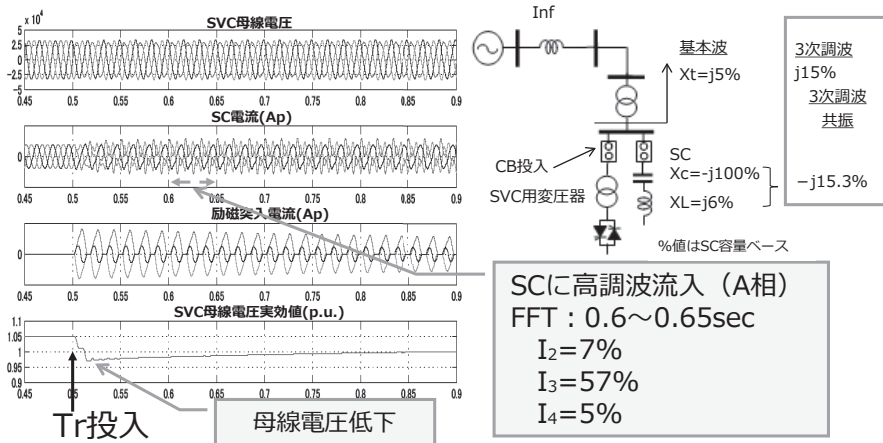


図7 無負荷変圧器投入時のSC過電流解析事例

この事例では、SCと電源系統側のインピーダンスが3次調波で共振し、励磁突入電流に含まれる3次調波電流成分が拡大してSCに流入することが解析により把握できる。また、変圧器からの励磁突入電流が電源系統側に流れることで、SVC設置母線の電圧が低下することがわかる。本現象の対策として、無負荷変圧器投入時はコンデンサを事前に開放しておく、あるいは主回路の共振周波数をずらす、といった検討が必要になる⁽⁵⁾。

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、その目安は概ね30～60km (OFケーブルの場合)⁽⁶⁾程度とされている。

長距離ケーブルにおいて交流送電が適用される場合には、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ため、十分な事前検討が必要である。表4は、長距離ケーブルによる交流送電時の主な特異現象と対策例をまとめたものである。当社では、系統解析により、これらの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と対策例

事象	懸念される現象と対策例
ケーブル残留電圧	遮断器開放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】線路VTの設置による放電(巻線耐量を確認)
高調波共振	長距離ケーブルの静電容量Cが大きく、系統のインダクタンスLとの共振周波数が低下し、特定高調波が拡大 共振周波数 = $1/(2\pi\sqrt{LC}) \rightarrow C$ 大により共振周波数が低下 【対策】高調波フィルタの設置
電流零ミス現象	ケーブルの充電電流と変圧器励磁突入電流などが重なると、電流零点のない期間が発生し、系統故障時に遮断器が遮断できない恐れがある 【対策】系統運用による対策、抵抗器付遮断器での変圧器投入など
電圧変動	長距離ケーブル開閉時の電圧変動(特に電圧上昇) 【対策例】分路リアクトル(ShR)、SVCの配置

さらに、分散電源の新規連系では、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気的ショックにより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ことが知られている。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進展するケースがある。

表5、図8に、鉄共振現象の解析事例⁽⁷⁾を示す。図8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わかる。同表の右側に示した、実系統条件を用いた再現シミュレーション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ため、当社では豊富な実績を基にお客様への解析検討や対策提案を実施している。

表5 VT各相及び線間電圧と零相電圧(実測と解析)⁽⁷⁾

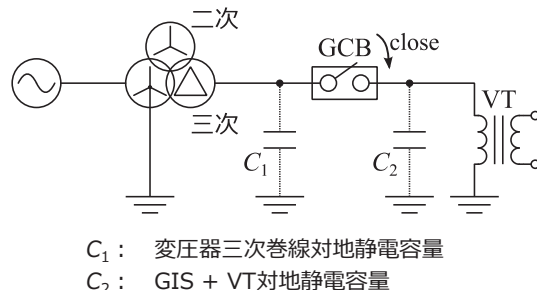
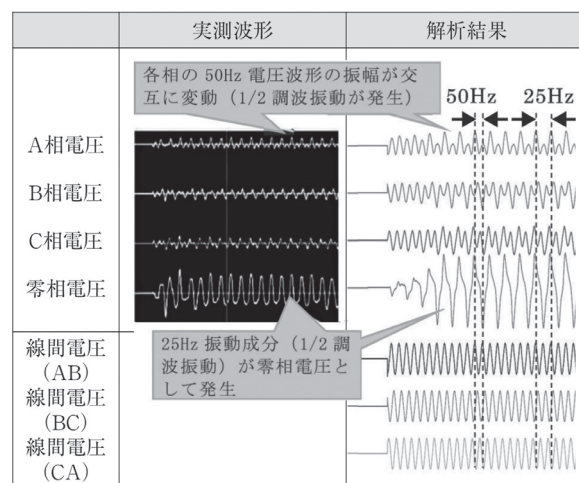


図8 海外500kV変電所三次回路用GIS系統の回路構成⁽⁷⁾

3-3 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・停電対策についての解析事例を紹介する。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9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⁽⁸⁾を、図10は、その工場試験時の実測波形と瞬時値解

表6 需要家システム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の検証、再生電源の変動 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、二次側からの励磁 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の有無 【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)

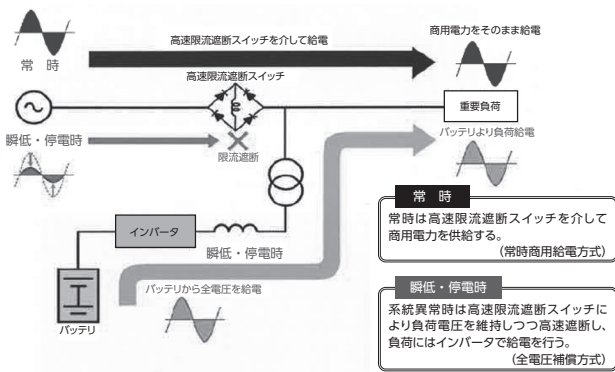


図9 瞬低・停電対策装置(オールセーフ)の動作概要(8)

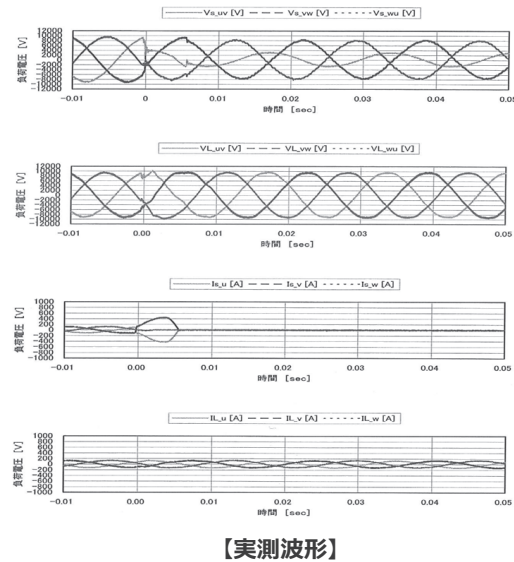
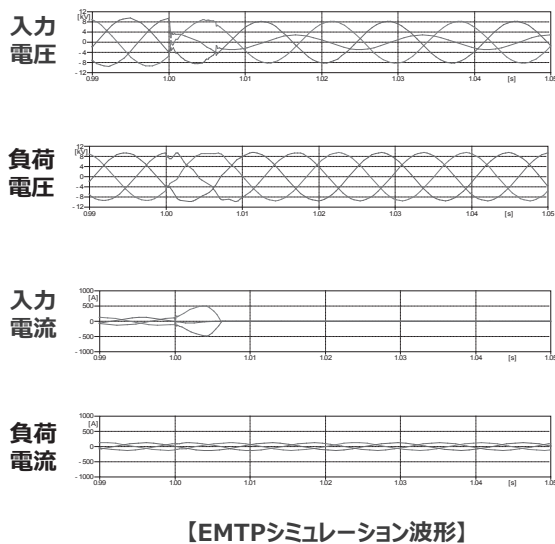


図10 瞬低・停電対策装置 工場試験時の動作解析

析ソフトEMTPによる解析波形の比較である。図10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。

4. 結 言

太陽光発電の大量導入、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。

用語集

※1 フリッカ

アーク炉のような変動負荷がある場合に発生する電圧変動。照明のちらつきの原因となる。

※2 SVC(静止形無効電力補償装置)

Static Var Compensatorの略。半導体素子を用いた、無効電力の大きさを連続的に制御できる装置。TCRはThyristor Controlled Reactorの略で、サイリスタ素子の位相制御によりリアクトル電流を連続的に制御することで遅相電力を制御する装置を指す。

※3 高調波

電力系統の基本周波数（東日本は50Hz、西日本は60Hz）の整数倍の周波数を有する電圧または電流。

※4 パワコン

Power Conditioning Systemの略。発電電力を交流に変換し、電力系統に連系する機器。

・オールセーフは日新電機(株)の登録商標です。

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) 「2010年の技術と成果」、日新電機技報Vol.56、No.1 (2011年4月)
- (4) 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No.242
- (5) 「並列コンデンサ適用回路の回路現象」、日新電機資料II-C-54G
- (6) 町田 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VT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)

執 筆 者

黒田 和宏* : 日新電機(株) 電力技術開発研究所
グループ長



久保 敏裕 : 日新電機(株) 電力技術開発研究所



中島 宗一 : 日新電機(株) 変成器事業部
主任



長崎 則久 : 日新電機(株) コンデンサ事業部
主幹



村井 正樹 : 日新電機(株) システムエンジニアリング部
グループ長



河崎 吉則 : 日新電機(株) 電力技術開発研究所
主幹



*主執筆者