

# 産業用電力システムのトラブルと解析

最終回

## 電力系統解析の反映事例 および今後の課題

加戸良英\*1 浦野恭博\*2 壹岐浩幸\*3 堀 史治\*4 亀田和之\*5

産業用電力システムのトラブル事例と電力系統解析について、6回にわたり連載してきた。連載の最後として、本号では電力系統解析の反映事例を紹介するとともに、産業用電力系統解析技術の動向と今後の課題について紹介する。

### 1. 電力系統安定度解析の反映事例

#### (1) 解析対象電力系統と設計上の課題

最初に、新設電力系統設計への電力系統解析の適用事例について紹介する。新設する電力系統は図1に示すように電力会社に連系する60MVA変圧器からなる受電系統と、40MWガスタービン発電機および17.2MW蒸気タービン機からなる発電系統とがあり、両母線は系統解列用遮断器で連系され、おのおの負荷フィーダに配電する系統である。

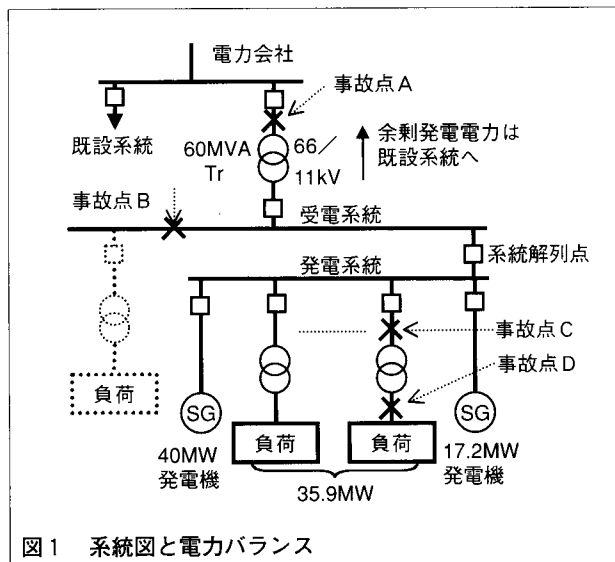


図1 系統図と電力バランス

発電容量は、新設プラント群の蒸気消費量に合わせて選定したため新設負荷に対して余剰となり、余剰電力は上位系統を介して既設系統に送電することとした。電力バランスを図1に併せて示す。

産業用の電力系統でも2月号で紹介したように、電圧安定性(回復性)と位相角安定度の問題があり、設計に当たって、電力系統解析によりこれらの問題を定量的に把握しながら対策を講じた。

#### ① 短絡事故時の電圧回復性の確認と対応

誘導電動機を多く有する電力系統では、短絡事故による電圧不安定現象の懸念がある。特に、受電系統の停止や系統解列を伴う電力系統の短絡事故(図1中事故点A)や受電母線の短絡事故(同事故点B)では、発電系統は発電機の自立運転に移り電力会社から無効電力が供給できなくなるため、電圧回復性の悪化が予想された。さらに、受電母線の短絡事故では電圧降下が大きいため、自立運転移行の可否そのものが懸念された。

#### ② 負荷フィーダ短絡時の発電機脱調の確認と対応

負荷フィーダ(同事故点C、D)で短絡事故が発生した場合、電圧降下により発電機の出力は低下するが、ガバナの応答は電気系の変動に対して応答が遅いため、機械入力には絞られず、ロータに対し加速エネルギーが蓄積され、事故遮断が遅ければ発電機は受電系統から脱調してしまうことがある。特に、変圧器二次側の事故D点では、下位との保護協調上高速で遮断することが難しく、脱調の有無が懸念された。

#### (2) 解析結果と問題点

##### a. 電圧安定性の解析結果と問題点

図2は受電系統短絡事故(事故点A)における発電機自立運転時の電圧回復性に関する解析結果である。短絡事故に対し0.15秒の高速遮断システムを構築したが、負荷の大半が誘導

\*1 旭化成(株) 水島支社 設備管理部 電気設備管理課長 (カド ヨシヒデ)  
 \*2 出光エンジニアリング(株) 技術部 主任部員 (ウラノ ヤスヒロ)  
 \*3 (株)FFCシステムズ テクニカルセンター シニアコンサルタント (イキ ヒロユキ)  
 \*4 日揮(株) エンジニアリング本部 チーフエンジニア(電気) (ホリ フミナル)  
 \*5 (有)エルテクス設計 代表取締役 (カメダ カズユキ)

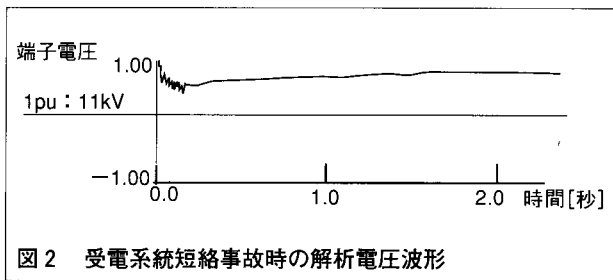


図2 受電系統短絡事故時の解析電圧波形

電動機であることから再起動電流が大きく、35.9MWの負荷を背負ったままでは発電機自立運転移行後、電圧の回復が遅れることが判った。

さらに解析を続け、負荷を受電系統に接続替えし、自立運転移行後の発電系統の負荷を30MWに制限すれば、電圧は回復することが判った。しかし、受電系統停電により受電系統に接続した負荷は停電してしまうため、全負荷を発電系統に接続できるように改善を図る必要があった。

受電母線事故(事故点B)については、発電出力の10~20%まで負荷を制限しなければ、電圧が回復しないことが判った。この負荷制限量では、残負荷は発電機補機程度でありほとんどの装置を停止せざるを得ず、また、改善も難しいことから、受電母線短絡事故時は、新設電力系統は全停電してしまうことで社内のコンセンサスを得た。

**b. 位相角安定度の解析結果と問題点**

位相角安定度については、負荷フィーダの事故(事故点C, D)を対象に実施した。解析結果は割愛するが、他励ブラシレス励磁方式(PMG方式)を採用したため、短絡事故時も内部誘起電圧の落ち込みがないので、他方式に比較して安定度が高く、事故遮断が0.5秒でも脱調せず、保護協調上問題がないことが判った。

**(3) 対策と効果**

受電系統短絡事故時の電圧回復性の改善策として、AVR(自動電圧調整装置)の頂上電圧の改善を実施した。

**a. 改善内容**

定格点におけるサイリスタ制御角を60°から90°に変更し、(制限抵抗値を下げ定格点の励磁電流は同一とした)、突き上げに対する余裕を持たせるとともに、上限リミットを撤去した。これらにより、ガスタービン発電機の頂上電圧は3.68[pu]から5.48[pu]へ、蒸気タービン発電機の頂上電圧は3.52[pu]から4.61[pu]へ上げることができた。

**b. 効果**

頂上電圧変更後の受電系統短絡事故時の解析結果を図3に示す。この時の負荷は、35.9MWの負荷をすべて発電母線に

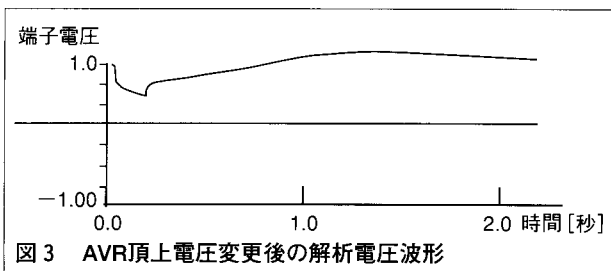


図3 AVR頂上電圧変更後の解析電圧波形

接続するものとしたが、発電機の電圧は1秒以内に回復しており改善効果が見られた。

本事例では、AVRの頂上電圧を変更することによって改善を図ったが、こうした変更は特性が変わるためダンピング特性の再調整、周波数特性確認試験、負荷試験等が必要であり、発電機メーカーとも相談し決定しなければならない。

**2. 解析データに対する留意点**

電力系統解析を実施するに当たり大切なことは、3月号で述べたように、解析の目的を明確にして解析ソフトウェア、シミュレータなどを的確に選択し、また、解析結果の評価と設備への確実な反映を行うことである。このほか、解析を効率良く進めるため、計算ケースを適宜絞り込むことも重要である。

さらに留意すべき項目として、機器定数、制御系定数など解析データ取り扱いの問題があるが、以下にこれらの項目について述べる。

**(1) 系統構成機器のデータ**

電力系統を構成する各機器のデータは、機器仕様書、試験成績書などによって把握することができる。また、受電点の短絡容量および系統の抵抗分とリアクタンス分の比(X/R)などを電力会社から入手する必要がある。

**(2) 発電機本体のデータ**

解析目的と要求精度によって、必要となるデータが異なるため注意を要する。

3月号で述べたとおり、一般に発電機モデルはParkの式から得られる過渡モデル、初期過渡モデルおよび瞬時値モデルが適用されるが、初期過渡モデルの場合はd軸/q軸それぞれの同期、過渡、初期過渡リアクタンス、電機子漏れリアクタンスと電機子抵抗、さらに、d軸/q軸それぞれの過渡および初期過渡開路時定数が必要となる。また、瞬時値モデルの場合は電機子時定数が必要である。

単位慣性定数は、発電機、原動機に加え、減速機などの回転系全体の定数を入力する必要がある。また、ソフトウェアに入力すべき数値が、JEC-2130(旧114)「同期機」で規定されたH(蓄積エネルギー定数)に相当するものか、加速定数 $T_j$ であるのか明確にしておく必要がある。

なお、「 $T_j = 2H / \text{力率}$ 」の関係がある。

**(3) AVRとガバナ**

AVR(自動電圧調整装置)とガバナ(調速機)は、ブロック図(伝達関数モデル)を入手し、ソフトウェアにはブロック構成と伝達関数それぞれを入力する必要があるが、ブロック構成は標準モデル(国内標準モデル、IEEE Typeなど)が適用できる場合がある。また、励磁系のブロック構成は、AVRと励磁機を含む系全体の構成として入手すべきである。

AVRの制御ブロックは、国内ではメーカーごとに方式が異なるので、メーカーからデータ入手を必要とする場合がある。また、大容量機の場合はAVRにOCL(過電流制限装置)、OEL(過励磁制限装置)、UEL(不足励磁制限装置)およびPSS(系

統安定化装置)などの付加装置が装備される場合があり留意すべきである。これらのうち、PSS以外は過渡安定度解析のような一般的な系統解析においては無視して差し支えない場合が多い。この理由を以下に示す。

OCLは発電機電機子電流を、OELは励磁電流を制限して、機器の限界を逸脱させないための保護装置であるが、両者は高速動作を要求されることはなく、反限時特性を有している。一方、UELは、同期発電機を進相(低励磁)運転による安定限界内につねに追い込むことを目的としているため、高速動作が要求される。しかし、低励磁状態は通常運転で続くことは考えられず、また、系統事故の際には励磁電流は増加する方向に動作すること、さらに、発電機の動揺は回転系の慣性の影響が大きいことがあげられる。

PSSは、応答性の高い励磁系を採用する際に、定態安定度および事故除去後の安定性向上のために装備されるものであり、よって、過渡安定度解析を行う際にはモデルに織り込むべきである。

小容量機の場合、AVRのデータが不明な場合は、一定励磁として解析を行う場合がある。また、ガバナについても、解析の目的が過渡安定度解析(1秒以内の現象)であれば、通常ガバナは応答しないので、機械的入力一定としてもよい。

以上、AVRとガバナについて一般的な注意事項を述べたが、入力したデータの妥当性を確認するため、負荷遮断試験を模擬して解析を行い、実際の試験データと負荷遮断後の周波数(回転数)および発電機端子電圧の変化状態を比較することが有効である。なお、自家用発電設備のガバナは、負荷遮断した際(無負荷運転)および電力会社と解列して自立運転に移行した際には、速度調定率(Droop)制御から周波数一定(Isochronous)制御に切り替る設定となっている場合があるため注意を要する。

参考として、発電機端子電圧から励磁電源を供給する自動静止方式の励磁系モデルを図4に示す。そのほか、励磁系モデルについては各種文献<sup>(1)(2)</sup>を参照されたい。また、汎用

系統解析ソフトウェアETAP PowerStationにも多数の励磁系モデル、ガバナモデル、PSSモデルがプレインストールされているので参考にさせていただきたい。

(4) 負荷および誘導電動機

3月号の第4項「負荷モデル」を参照されたい。

なお、実務において多数の誘導電動機と、これに接続された負荷の特性を正しく知り、これらのデータをソフトウェアに入力することはかなりの労力を要する。これを解決する手段の一つが、3月号で紹介した誘導電動機群の縮約(集約)である。本号では、誘導電動機と負荷の単位慣性定数(H)について代表的な計算例を表1に紹介する。

ポンプ、ファンなどは容量にかかわらず、ほぼ一定の範囲であるため、解析に用いるデータは回転機種類によって代表値を用いる場合がある。

(5) 系統の初期条件と事故条件

事故前の潮流バランス、各部の電圧および事故形態と事故除去時間などを明確にしておく必要がある。なお、事故形態がアーク短絡などで完全短絡とならない場合は、インピーダンスを挿入して解析を行う必要があるが、この値は高圧系では0.1Ω(抵抗分)程度がよく使われる。

実際に起こった事故の検証を行う場合は、故障記録などを参照して各部の残留電圧から事故点インピーダンスを逆算する方法が用いられる。また、選択負荷遮断の量と動作タイミングを明確にする必要がある。

(6) 負荷機器の応動

短絡事故による瞬時電圧低下によって、電動機スタータ(電磁接触器)の開放と再投入が起こる場合は、応動する機器との動作タイミングを明確にしておく必要がある。

電磁接触器の開放電圧、動作電圧および動作時間などのデータは、文献<sup>(3)</sup>で紹介されているので参照されたい。ただし、近年市場に出回っている電子式安定化装置を内蔵した電磁接触器は旧来品と特性が異なる。また、電子式制御装置を装備した電動機スタータも、旧来製品と瞬時電圧低下に対する応

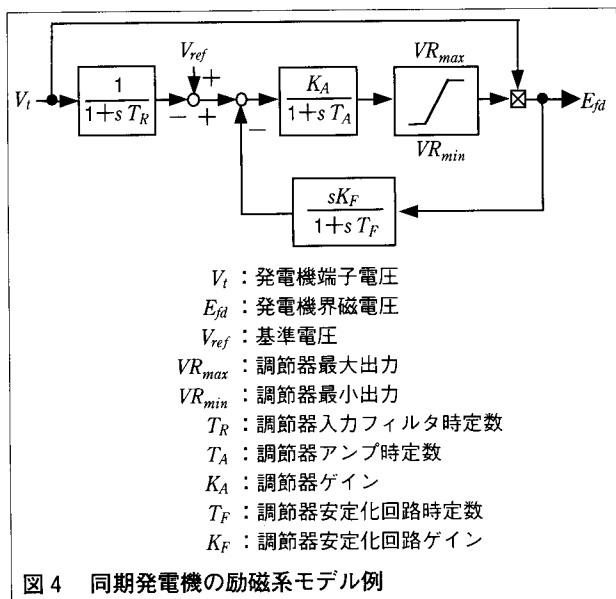


表1 代表的な単位慣性定数(60Hz機)

回転機名称	電動機 定格出力 [kW]	定格 回転数 [min <sup>-1</sup> ]	電動機 +負荷GD <sup>2</sup> [kg·m <sup>2</sup> ]	単位慣 性定数 [kW·sec/ kVA]
海水ポンプ (冷却水ポンプ)	1,100	505	1,230	0.36
一般の遠心ポンプ	100	1,750	10	0.37
ボイラ給水ポンプ (タービンポンプ)	420	3,565	41	1.57
豎形多段ポンプ	125	1,750	11	0.35
ボイラ押込ファン (両吸込ターボ)	280	1,750	372	5.13
ボイラ押込ファン (両吸込ターボ)	280	1,750	377	5.20
レシプロ	120	585	400	1.44
ガスコンプレッサ	850	873	5,750	6.50

表2 電子式制御装置の瞬時電圧低下特性例

	検出電圧レベル [%]	動作時間 [ms]
電圧低下時	72.5±10	30以下
電圧回復時	80.0±10	30以下

動状況が異なるため注意を要する。代表的な電子式制御装置の特性を表2に示す。

機器の応動を正しく掌握するには、電子式制御装置と電磁接触器の接続およびシーケンシャルな動きを明確にする必要がある。

(7) ソフトウェア使用上の注意事項

電力系統解析ソフトウェアは、近年GUI(Graphic User Interface)機能向上など、ユーザーフレンドリーであることが求められ、また、この点について進歩を遂げている。しかし、反面ユーザーにとって、この点がソフトウェアをブラックボックス化させる原因ともなっており、問題が懸念される。すべてのソフトウェアは、計算に対して前提条件と仮定および適用範囲が存在し、内部の理解が不足する場合は初歩的な段階で大きな間違いを招くおそれがある<sup>(4)</sup>。

ユーザーとしては、電気工学の基礎をよく理解し、ソフトウェアが導き出した解の妥当性を判断することができる力量を持つことが、何よりも増して重要である。

われわれ、ETAP PowerStationユーザー会では、自家用電気技術者の技術力向上を目的に、系統解析を通じて電力系統における系統安定度の課題に取り組むとともに、ソフトウェアの特質についても正しい理解をするよう検討を続けている。

### 3. 今後の課題

1月号からの6回にわたる連載で、産業用電力系統の特殊性を振り返り、その特徴的な事例に基づいて系統解析の必要性を考えてきた。また、産業用電力系統の解析を行う際に有益な、誘導電動機の縮約法などについても紹介した。しかし、誌面の都合もあり、取り上げることができたのは、多くの系統解析のうちでも、主として安定度解析と長時間動特性解析、そして、雷サージを対象にした技術のみである。

連載の最後に当たり、多少視点を変えて電力系統を眺めながら、今後の課題をその他の解析とともに考えてみたい。

(1) 使用機器の変化・環境の変化

技術の進歩に伴う使用機器の変化や、電力系統を取り巻く大きな環境の変化が起きており、産業用電力系統もその影響を受けつつある。

前者の代表的な例として、インバータをはじめとする半導体使用機器の増加や大容量化を上げることができる。半導体使用機器の増加は、取りも直さず高調波発生源の増加であり、高調波解析の必要性が高まるのはもちろんであるが、以下のような現象も起こり得るので十分な検討が必要である。

- 系統電圧低下によるインバータ停止
- サイリスタ制御型機器の影響によるタービン発電機の振動

この種の解析は、汎用解析ソフトウェアの機能の制約やモデル化が単純でないこともあり、これまで産業分野ではあまり検討されていない。しかし、半導体使用機器の用途の拡大、高機能化、大容量化などにより新たな問題の発生が予想される。産業用電力系統において、この種の解析をどのように進めるかは、今後の検討課題であろう。

後者の例としては、環境負荷の低減や投資効率の向上に向けた流れであり、設備全体を一つのシステムとして捉えた最適化、時間軸で捉えればライフサイクル全体での最適化追求への流れと考えられる。産業分野の電気技術者もその流れの中にあり、広い意味での電力系統解析も、その重要な役目を担っている。

(2) 電気以外の解析との関係

ここでは、投資効率向上を旨として大容量化されたがゆえに、電力系統の解析との関係を考える必要が生じた例について紹介する。

3月号で述べたように、解析の対象となる時間スケールにより、さまざまな電力系統解析の種類がある。その中でも、自家用発電設備を持つ産業用電力系統では、電力潮流から電力動揺までの系統解析が主な検討対象となることもすでに述べたとおりである。

一方、現実の産業設備では電気エネルギーを利用してさまざまな装置やプロセスを動かしており、電気系統の動揺は他の装置やプロセスへ影響を与える。しかし(例えば)、液体やガスを取扱うプロセス系の装置では、電気系統の過渡現象とプロセス系の過渡現象では応答時間が大きく異なるため、個別に独立した解析を行い、必要に応じて人的な介入による相互チェックで十分なものと考えられてきた。

しかし、近年のスケールメリットを追求したプラントにおける超大型コンプレッサ系などでは、駆動機のトリップや電力系統での事故などの、外乱発生時における内部ガスの急激な過渡的挙動により、機器の耐力やプロセス系への影響が問題となる場合がある。

このようなケースでは、0.1秒程度からの時間スケールでの挙動が問題となり、電力動揺解析と同等の時間スケールでのサージ解析が必要になってくる(3月号の図2参照)。その重要度や影響度によっては、電力系統のシミュレータとプロセス系のシミュレータを結合し、予測される過渡現象時の挙動を総合的に解析するなどの手法が求められる場合があり、現にこのような解析も始まっている。

前述した内容は一つの例であるが、スケールメリットや高機能化を追求した生産設備では、他にも同様の事例が出てくるのが予想され、電気技術者としても他のシステムへの一歩踏み込んだ理解が求められる時代になりつつあることを肝に銘じなければならない。また、電力系統解析ソフトウェアも、このような外部の解析ソフトウェアと連携した解析ができるよう、柔軟なインタフェースをとることができるものが求められてくる。

(3) 電力系統解析とデータ管理

IEEE Std 399-1997の分類に従えば、一般的に必要とされる

電力系統解析には、以下のようなものがある。

- Load flow studies：電力潮流解析
- Short-circuit studies：短絡解析
- Stability studies：安定度解析
- Motor-starting studies：電動機起動解析
- Harmonic analysis studies：高調波解析
- Switching transient studies：切替時の過渡解析
- Reliability studies：信頼度解析
- Cable ampacity studies：ケーブル電流量解析
- Ground mat studies：接地網解析
- Coordination studies：保護協調解析
- DC auxiliary power system analysis：DC補助回路解析

これらの解析は、計画、設計、製造・施工、検査、運転、保守、廃棄のライフサイクルにおけるさまざまな段階で、その時点での検討対象や検討内容に応じた精度で、繰り返し行われる。

段階は異なっても、解析の対象となる電力系統は同じものであり、相当部分のデータは共通に使えるものである。にもかかわらず、従来は、使うソフトウェアの制約や目的の違いから、それぞれの解析のために何度もデータやモデルを作成し直して利用せざるを得ないケースが多々見られた。

このことは、データ収集・作成やデータ管理のために電気技術者に多大な負担をかけるだけでなく、解析の精度にも影響を及ぼすおそれがある。計画・設計段階で作成・整理された設計情報やデータを、プラントのライフサイクル全般にわたって効率的に管理し、さまざまな解析はもとより、運転・保守の計画・管理に利用することを考えていかなければならない。

総合効率向上、安全性の追及、環境負荷低減の流れなどから、産業設備におけるエネルギー伝送手段としての「電気」の重要度はますます高まってきている。これに伴い、信頼性の高い最適化されたシステムを構築し運転を行うため、系統解析の果たす役割もますます大きくなりつつある。その一方で、企業の競争力向上の波は最小限の人員で最大効果の業務遂行を迫っており、電気技術者にとってはいかにしてより効率的に、高度な検討を行うかが今後の課題である。

幸い、最近の主要な市販汎用ソフトウェアは、前述した電力系統解析ツールをほとんど揃え、共通のデータベース上で動かすことができるものが多い。また、ETAP PowerStation-PSMS-e-DPPシリーズのように、系統解析ソフトとオンライン・シミュレーションソフトや設計ツールとのスムーズな関係を可能にしたものも現れている。これらの中から有益なものを選択し活用することは、その一助となろう。

#### (4) 電力系統解析と最適化

計画・設計段階における、さまざまな解析や検討を経て、最適化を旨とした生産設備が建設される。これらの設備は、電力、蒸気、あるいは燃料などの購入も含め、所内の発電機、ボイラ、あるいは吸収式冷凍機など、さまざまなユーティリティ設備から供給されるエネルギーを利用して運転される。したがって、稼働段階では、天候などの環境条件、燃料コスト

ト、生産すべき製品の種類や数量に関する要求などを変動要因として、より効率的な運用を旨として日常的な運転や保守を行わなければならない。

従来のプラント最適化は、(安全性の確保、運転や保守の容易さの追求は別にして)投資コストの最小化の追求が主目的であったが、近年はライフサイクルコストの最小化の追求に比重が移りつつある。このことは、見方を変えれば、ハードの最適化から「ハード+ソフト」の最適化、あるいは個別機器の最適化からプラント全体での最適化への変化として捉えることができる。

そのためには、最適なシステムを構築したり、さまざまな現象を解析したりするだけでなく、リアルタイムのデータに基づいたシミュレーション、将来の予測機能などを連携してデータ管理ができる、広い意味での系統解析ソフトウェアの出現が待たれる。

言い換えれば、これからの電気技術者にはより広範な知識が求められ、電力系統解析ソフトウェアには、最適なシステムを構築したりさまざまな現象を解析したりするだけでなく、リアルタイムのデータに基づいたシミュレーションや、将来の予測機能などを連携して、ライフサイクル全体にわたったデータ管理が可能な機能が求められると言っても過言ではないであろう。



電力自由化が進展し、消費地の近くで系統に接続される発電機がますます増加している。また、同時に系統に接続される中小規模の多種多様な分散電源がますます増加していくことが予想される。

連載の中でも、系統側の状況の違いにより産業用電力システムの安定性も影響を受ける可能性があることに触れた。それだけではなく、産業分野に従事する電気技術者にとっては、自分の会社が自由化に乗ったビジネスに進出したり、自分が属する事業所に分散電源を設置したりという機会も増えていくであろう。

より複雑化・多様化する電力系統は、計画段階から十分な検討を要求されており、これに伴い系統解析の重要性がますます高まっている。6回にわたって紹介した事例や考察が、そのような産業分野の電気技術者の方々にとって、少しでもお役に立ったところがあれば、この上ない喜びである。(完)

#### ◆参考文献◆

- (1) 電気学会技術報告：「同期機励磁系の仕様と特性」, 第536号, 平成7年2月
- (2) 電気学会技術報告：「電力系統の標準モデル」, 第754号, 平成11年11月
- (3) 電気協同研究：「瞬時電圧低下対策」, 第46巻第3号, 平成2年7月
- (4) 電気協同研究：「電力系統・設備のシミュレーション技術」, 第51巻第4号