

## 産業用電力システムのトラブルと解析

# 電力系統解析の必要性

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

前号では産業用電力系統におけるトラブル事例を紹介した。今月号では、このような電力系統の問題を明らかにする道具である、系統解析手法と汎用系統解析ソフトウェアの必要性について述べる。

## 1. 系統解析の必要性

電力系統解析技術は電力会社と重電メーカーならびに大学の研究機関を中心に発展してきた分野であり、自家用電力技術者にはなじみが薄く、これらを平易に解説する文献も少なかった。

産業用電力系統（自家用電力系統）は電力会社の電力系統と接続され系統の一部を構成するが、この巨大な系統は、発電機と負荷が送配電網で接続され、雷、雪害、塩害などの自然災害のほか、鳥害や小動物、また、飛来物、機器の汚損、保守不良、機器の欠陥、さらにはオペレーションの問題などによって、つねにじょう乱が引き起こされる可能性がある。

電力会社側のじょう乱は需要家の電力系統側にも影響を及ぼすため、大きなじょう乱が発生した場合の系統の振る舞いのある程度予測し、適切な保護機能を付加させることは、安定操業確保および損失軽減の観点から見逃げせないことである。また、この技術は、電力自由化を迎えるに当たり、一般産業においても重要度の高いものになりつつある。

系統解析技術は多岐にわたるが、これを体系的に表すと次のようになる。

### 【静的解析】

- 設備容量計算
- 定常時の電圧計算、電圧降下計算、力率計算
- 短絡電流計算
- 地絡電流計算

- 潮流計算と定常安定度解析（潮流分布、電圧分布、調相設備配置）

### 【動的解析】

- サージ解析（雷、開閉、地絡、短絡）
- 異常電圧解析（商用周波過電圧、高調波過電圧、非線形振動）
- 高調波解析（高調波共振、電圧歪）
- 安定度解析（過渡安定度、電圧安定性）
- 長時間動特性解析（系統分離と周波数変動、VQ制御）
- 軸ねじれ共振現象（SSR）解析（発生限界、抑制対策）
- 系統計画および運用解析（需要予測、発電計画、送電計画）

この連載は、この中から特に、安定度解析と長時間動特性解析について述べるものである。

以下、産業用電力系統で比較的多く試みられる動的解析の事例<sup>(1)</sup>から、下記事項について具体例を示しながら紹介する。

- (1) 同期発電機の過渡安定度と電力動揺検討
- (2) 自家用発電設備を持つ需要家の系統が自立運転に移行する際の周波数変動検討
- (3) 瞬時電圧低下発生時の電圧と電動機の動向検討
- (4) その他の解析事例

なお、自立運転とは、発電設備を持つ電力系統が上位系統（電力会社の系統）から解列された状態において、発電設備を用いて単独で構内負荷に電力を供給する状態を指す<sup>(2)</sup>。

- (1) 同期発電機の過渡安定度と電力動揺検討

需要家の電力系統および上位系統の至近端で短絡事故が発生した場合、同期発電機の内部相差角は大きく動揺するが、特に、最も厳しい三相短絡事故の場合は、同期発電機が脱調（同期はずれ）して運転継続できない場合がある。これは過渡安定度問題といわれ、同期発電機を有する系統の重要な課題

\* 1 旭化成(株) 水島支社 設備管理部 電気設備グループ長 (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 フミハル)  
\* 5 (有)エルテクス設計 代表取締役 (カメダ カズユキ)

である。

a. 内部相差角と電力動揺

内部相差角とは、界磁巻線によって発電機固定子に発生する誘起電圧（内部誘起電圧）と、発電機端子電圧の位相角（ $\delta$ で表す）である。

電力動揺は、事故発生によって発電機が発生する電気エネルギーと原動機入力エネルギーのバランスが崩れ、ロータが加速または減速して内部相差角が変化し、事故除去後も動揺が継続することをいうが、同期発電機の出力は内部相差角によって変化するため、内部相差角の動揺は電力の動揺を伴う。なお、これらの解説については別途文献<sup>(3)</sup>を参照されたい。

同期発電機の近くで三相短絡が発生した場合は、発生電気エネルギーが減少（負荷に伝達されない）するが、ガバナの応答が遅れるために入力エネルギーは変化せず、入力過剰となってロータが加速し内部相差角が増す。これが $\pi$  [rad]（電気角）を超過して元に戻らなくなれば脱調である。

三相短絡事故の際に安定運転を継続できる場合と脱調に至る場合のそれぞれの内部相差角のようすを図1に示す。

安定運転継続の条件は、事故除去時間、発電機と事故点間の電気的距離（インピーダンスの大きさ）、発電機励磁系とガバナの性能、発電機と原動機の慣性などによって左右される。

なお、電力動揺が継続して収束しない状態に陥ることを乱調という。また、脱調の形態は図1（b）のような脱調（第1波脱調）だけではなく、動揺が徐々に拡大、発散して最終的に内部相差角が $\pi$  [rad]を超過していく脱調の形態（ $n$ 波脱調）も存在する。

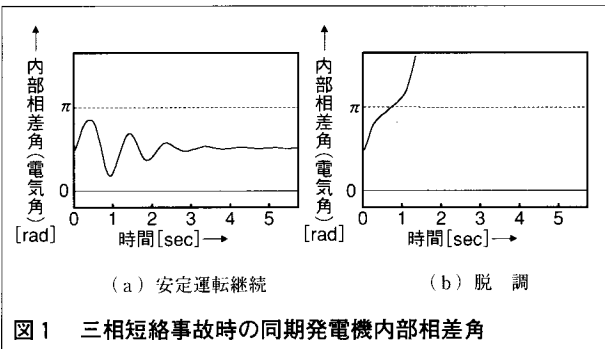
b. 脱調の影響

このように、脱調した同期発電機と上位系統は位相・周波数の差異を生じることになる。

事故点には上位系統と脱調した同期発電機の双方から電流が供給されるが、それぞれの位相・周波数が異なる。したがって、これを総合した事故電流は周波数差に相当する周期で増減を繰り返す様相となり<sup>(4)</sup>、過電流保護リレーを用いた事故検出が困難となる。

脱調保護の手段として同期発電機側に脱調検出リレーを設け、検出によって発電機を停止させる方法もあるが、事故の影響は大きくなる。

なお、脱調に至らない場合であっても、電力動揺によって各部の電力潮流、電圧の位相差などが通常状態を大きく逸脱して、系統連系点、他の保護装置が思わぬ不要動作をきたす



場合もあるので注意を要する。

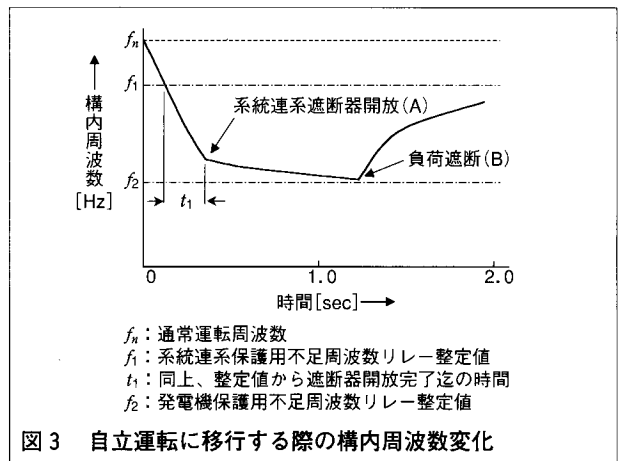
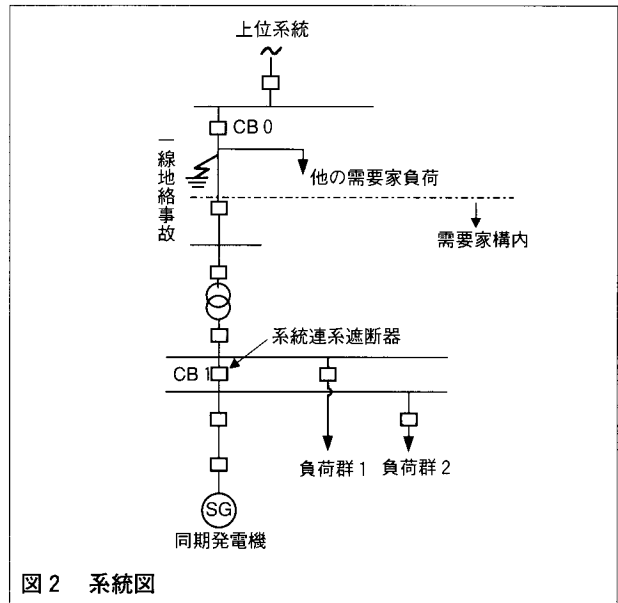
(2) 自家用発電設備を持つ需要家の系統が自立運転に移行する際の周波数変動検討

前号で述べたが、電力会社側の事故形態によっては、いち早く系統連系遮断器を開放して需要家構内の系統を自立運転に移行させる必要がある。

これを成功させるためには、適切な事故検出に加え、電力会社側保護システムとの協調および構内系統各設備間の協調を十分検討する必要がある。

例として、前号のトラブル事例1に類似した周波数の問題を検証するために行った解析事例を紹介する。なお、事故形態は電力会社側の1線地絡事故とし（前号では短絡事故）、電力系統は図2に示す構成とした。

- ① 電力会社の特別高圧配電フィーダで1線地絡事故が発生し、電力会社の送出端遮断器（CB0）が開放される
- ② 需要家の発電機は他の需要家（自家用発電設備を持たない）負荷も背負う形態となり、負荷電力に対して発電電力が不足し、構内電力系統の周波数は急激に低下するが、系統連系保護用不足周波数リレー：UFR（または逆電力リレー：RPR）動作によって系統連系遮断器（CB1）



が開放し、自立運転に移行して同期発電機 (SG) は負荷群 2 に電力を供給する形態となる (図 3、A 点)

- ③ 負荷群 2 の消費電力が発電電力よりも多い場合は、更に周波数は低下し続けるが、適切な選択負荷遮断によって周波数は回復に向かう (B 点)

なお、図 3 から読み取れるが、この事例のように周波数が急激に低下する可能性があるケースにおいては、系統連系保護用リレーのタイマ整定値によっては、発電機保護用不足周波数リレーの整定値まで構内周波数が低下し、発電機も停止し構内電力系統が全停電に至ることがあるので留意すべきである。前号の例からも保護リレーのタイマ整定値については注意を要することがわかる。

(3) 瞬時電圧低下発生時の電圧と電動機の動向検討

a. 誘導電動機負荷の問題

上位電力系統で短絡事故が発生した場合、需要家構内の電力系統は瞬時電圧低下 (以下「瞬低」と記す) の影響を受ける。誘導電動機が発生するトルクは電圧の 2 乗に比例するため、ポンプ、ファンなど、負荷機器のトルク特性との関係から、瞬低継続の間に誘導電動機のスベリが増大する。

事故点除去から上位電力系統の電圧回復とともに、構内電力系統の誘導電動機が一斉に再加速し始め、この電流によって系統末端の電圧回復の遅れや、負荷幹線あるいは分岐回路の過電流保護リレーの動作により、負荷群が脱落して行き工場の操業に大きな打撃を与える場合がある。

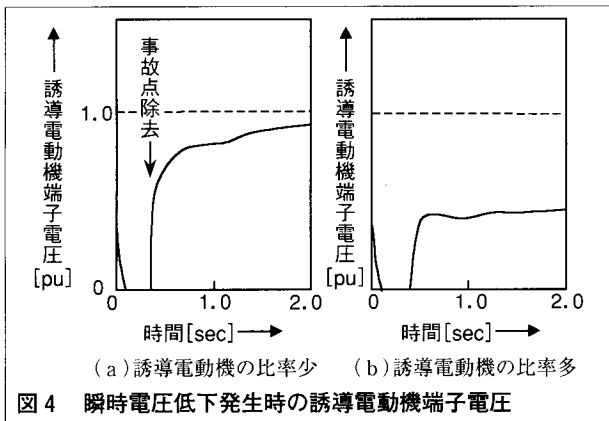
これは、電動機スタータに遅延積放方式や再投入方式の瞬低対策が施された場合でも、システム構築によっては逆効果を招くおそれがあることを示唆している。

図 4 は自家用発電設備を持たない需要家の解析事例であるが、構内負荷の誘導電動機比率を変えて検討したものである。構内電力系統末端の電圧回復は、系統のインピーダンス条件や誘導電動機群の容量および負荷機器の慣性とトルク特性などによって左右される。

また、図 2 のように自家用発電設備を持つ需要家の場合は、自立運転に移行後、スベリが増大した誘導電動機群が要求する無効電力に同期発電機が対応できず、発電機自身の電圧が崩壊していく場合があるので留意すべきである。

このような事例に対する手段として次がある。

- ① 誘導電動機に順次再始動方式を適用する (ただし、生



産プロセスの動向に注意を要する)

- ② 電源変圧器容量に対する瞬低対策電動機の割合を制限する
- ③ 自家発電設備を持つ需要家にとっては、系統解列 (自立運転移行) の高速化、選択負荷遮断システムの構築、および同期発電機励磁系の適切化 (界磁頂上電圧アップなど)
- ④ 需要家構内の事故にとっては事故除去の高速化など

b. 同期電動機負荷の場合

産業用電力系統に同期電動機が存在する場合、瞬低の規模によっては同期電動機が脱調して運転継続できない場合があるため注意を要する (後述)。

(4) その他の解析事例

その他、産業用電力系統において近年比較的多く行なわれるようになった解析の一つに、航空機転用形ガスタービン発電設備の軸系に対する軸ねじれ現象の解析がある。

これは系統事故の際に発電機が大きな過渡トルクを発生し、軸系の共振との相乗効果でシェアピンが破断する事例が多いことが背景にある。この解析はEMTP (Electronic Magnetic Transient Program) などの瞬時値計算ソフトウェアおよびモード解析の手法を用いて行われる<sup>(5)</sup>。

2. 簡易解析手法と汎用系統解析ソフトウェア

次に、電力系統の簡易解析手法を紹介し、汎用系統解析ソフトウェアの必要性について述べる。

過渡安定性や電力動揺を解析するための手法の一つとして、電力系統の過渡現象や非線形性および制御系の伝達などを無視した簡易的な手法が存在する。これらは現象の基礎に対する理解を得るために有用であり、多くの文献<sup>(3)(4)(6)</sup>で紹介されている。しかし、得られた解は誤差が多いため、実務に用いる場合は適切さを欠く場合がある。厳密な解を得る必要がある場合、また複数の機器で構成された一般の電力系統に適用する場合には、汎用系統解析ソフトウェアが不可欠である。

以下、産業用電力系統の代表的な構成機器である、同期電動機と同期発電機を例に簡易解析手法を紹介し、汎用系統解析ソフトウェア (ETAP Power Station) で得た解との比較を行いながら実務への展開を解説する。

(1) 同期電動機の場合

瞬低発生時の同期電動機 (突極機) の安定性検討を例に述べる。

同期電動機が同期速度付近で動揺 (内部相差角) する場合の運動方程式は簡易的に (1) 式で表される<sup>(7)</sup>。

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} + C_D \{1 - b \cos(2\delta)\} \frac{d\delta}{dt} + \frac{3}{\omega_0} \left( \frac{E_0 V}{X_d} \sin \delta + \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} V^2 \cdot \sin 2\delta \right) = \tau_L [N \cdot m] \quad (1)$$

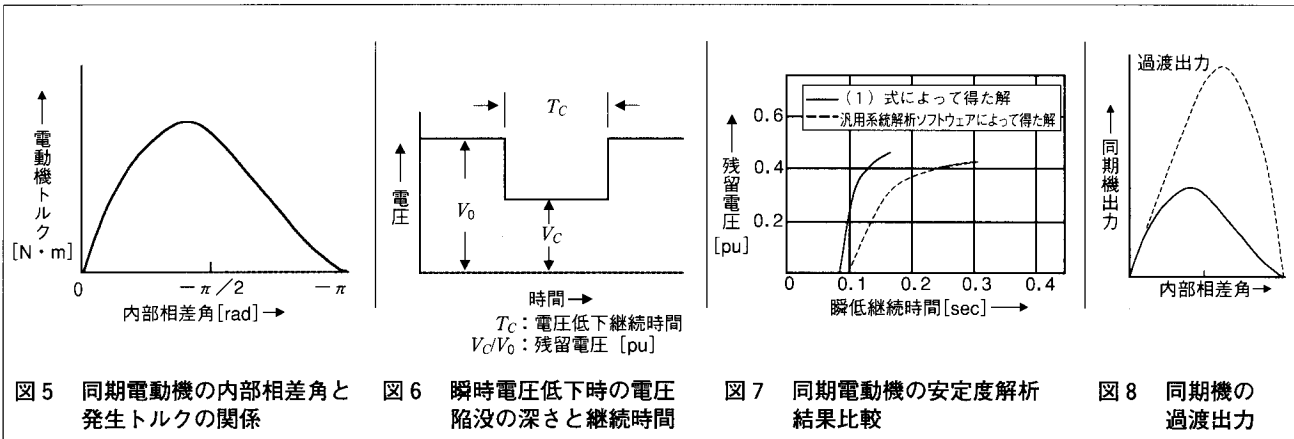


図5 同期電動機の内部相角と発生トルクの関係

図6 瞬時電圧低下時の電圧陥没の深さと継続時間

図7 同期電動機の安定度解析結果比較

図8 同期機の過渡出力

$$E_0 = V \cos \delta + X_d I \sin(\phi + \delta) \quad (2)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{I \cdot X_q \cos \phi}{V + I \cdot X_q \sin \phi} \right) \text{ [rad]} \quad (3)$$

$C_D$ は制動係数であるが、

$$C_D = \frac{\tau_D}{p \cdot \omega_0 \cdot s} V^2 \text{ [N} \cdot \text{m/rad/sec]} \quad (4)$$

として同期引き入れトルクと等価と考える。その他の定数は次のとおりである。

- $J$  : 電動機+負荷の慣性モーメント [kg·m<sup>2</sup>]
- $p$  : 同期電動機の極対数
- $\delta$  : 内部相角 [rad]
- $\omega_0$  : 同期電動機の定格回転数 [rad/sec]
- $\tau_L$  : 負荷側から要求されるトルク [N·m]
- $E_0$  : 等価内部誘起電圧 (一定とする) [pu]
- $V$  : 端子電圧 [pu]
- $I$  : 発電機電流 [pu]
- $X_d$  : 直軸同期リアクタンス [pu]
- $X_q$  : 横軸同期リアクタンス [pu]
- $b$  : 突極性による脈動係数 [pu]
- $\tau_D$  : 同期引き入れ直前の反抗トルク [N·m]
- $\phi$  : 力率角 [rad]
- $s$  :  $\tau_D$ に対する平均すべり

以上、励磁は別電源で一定とし上位システムのインピーダンスは考慮しない。また、突極性による脈動係数  $b$  を無視する。

(1) 式の内部相角と電動機トルクを概念を図5に示す。なお、図5の縦軸は電動機出力  $P$  と表記される場合があるが、

$$P = \text{回転数 [rad/sec]} \times \text{トルク [N} \cdot \text{m]}$$

の関係から意味は同じである。また、単位法で表したトルクと出力の関係は等しい。

(1) 式に端子電圧  $V$  の初期値および電圧の陥没深さと継続時間を入力することによって、内部相角の振る舞いを解析することができる。電圧の動きを図6に示すが、このようにして得た解と汎用系統解析ソフトウェアを用いて得た解を図7に示す。

曲線の上側が安定領域、下側が不安定領域であるが、(1) 式によって得た解は汎用解析ソフトウェアによって得た解よりも不安定方向である。これは、例えば、残留電圧0.4 [pu] で継続時間0.2 [sec] の瞬低が起こった場合、(1) 式による

解では不安定(脱調)と判定されるが、汎用系統解析ソフトウェアで得た解では安定となることからわかる。

この原因の一つが同期機の過渡出力によるものである。同期機はごく短時間であれば定常状態よりもはるかに大きな出力を出すことができるが、この概念を図8に示す。

以上、同期機特有の過渡現象が考慮されていない(1) 式から得た解は誤差が大きくなることがわかる。

一方、汎用系統解析ソフトウェアは詳細な数学モデルによるもので、一般に同期機モデルは有名なParkの式から展開されたものが用いられ、同期機の過渡的な定数変化などが配慮された(配慮されない簡易的なものも存在する)微分方程式の形式となる。

また、数学モデルの計算は、数値計算の手法を用いて計算機(PC含む)用ソフトウェアを構築し実行させるもので、動的計算(微分方程式の解法)部分はルンゲ・クッタ法<sup>(8)</sup>などを、また、電力潮流や電圧分布などの初期状態を求める部分はニュートン・ラフソン法<sup>(8)</sup>などの繰り返し収束計算手法が駆使されている。

(2) 同期発電機の場合

図9の1機無限大系統モデルを例に、同期発電機の過渡安定性について等面積法と汎用系統解析ソフトウェアを比較し

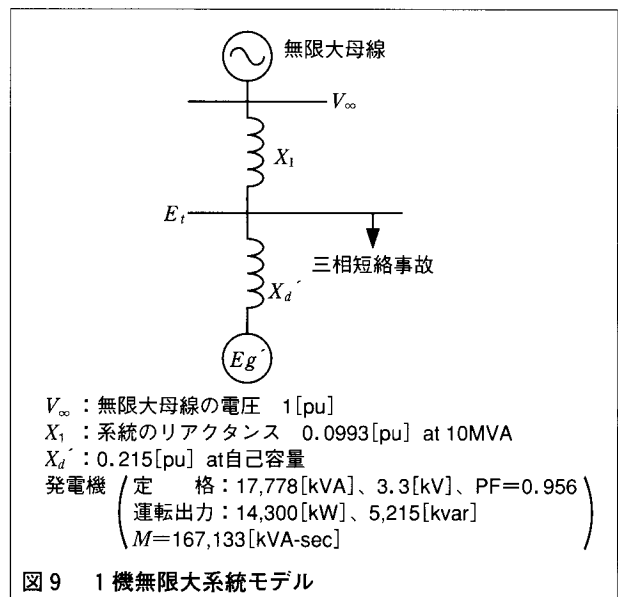


図9 1機無限大系統モデル

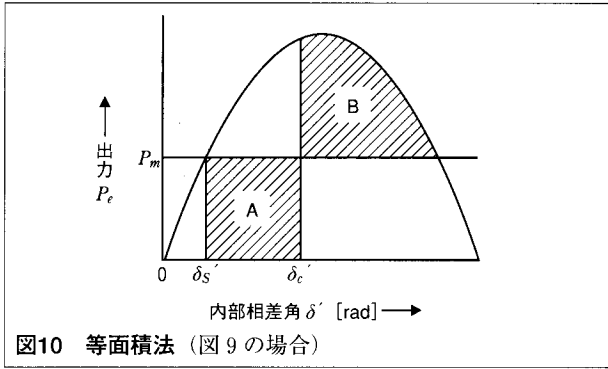


図10 等面積法 (図9の場合)

てみる。等面積法はいろいろな文献<sup>(3)(4)(6)</sup>で紹介されているため、ここでは詳細な説明を省略するが、この手法は「 $X_d'$ モデル」といわれる発電機モデルに立脚したものである。これは発電機過渡内部誘起電圧 $E_g'$ は、発電機端子電圧 $E_t$ に、直軸過渡リアクタンス $X_d'$ における電圧降下 $jX_d'I$ を加えたものとして求められ、また、その大きさは動揺中一定とみなしており、突極性も無視されている。

図10は図9の出力-内部相角 ( $E_g'$ と $E_t$ の相角は $\delta'$ で表す) 曲線であるが、等面積法は(A)、(B)部分の面積を比較して、(A)<(B)であれば安定、(A)>(B)であれば不安定と判定する。

また、事故継続中に内部相角 $\delta'$ は初期の $\delta_s'$ から $\delta_c'$ に増加する。

出力 $P_e$ は(5)式によるが、事故継続中はゼロである。

$$P_e = \frac{E_g' \cdot V_\infty}{X_d' + X_1} \sin \delta' \quad (5)$$

また、機械系の運動方程式は(6)式となる。

$$\frac{M}{\omega_n} \cdot \frac{d^2 \delta'}{dt^2} = P_m - P_e \quad (6)$$

$M$  :  $= J\omega_n^2$  ( $J$ は慣性モーメント[kg・m<sup>2</sup>])

$\omega_n$  : 定格回転数 [rad/sec]

$P_m$  : 初期の機械入力 [pu]

これより、事故遮断時間を $t$  [sec]として(7)式が導かれる。

$$\frac{M}{\omega_n} \left( \delta_c' - \delta_s' \right) = \frac{P_m \cdot t^2}{2} \quad (7)$$

また、

$$\dot{I} = p - jq \quad (p, q \text{は電力のpu値}) \quad (8)$$

$$\dot{E}_g' = \dot{V}_\infty + j(X_d' + X_1)\dot{I} \quad (9)$$

( $\dot{V}_\infty$ を基準ベクトルとする)

の関係を応用して、(5)式から $\delta_s'$ を求める。

以降、手計算で計算を進めることができるが、このようにして得た解と汎用システム解析ソフトウェアによって得た解を表1に比較する。表の数値は安定限界事故遮断時間であるが、これは事故継続時間がこれ以上長ければ、発電機が脱調することを意味する。

汎用システム解析ソフトウェアでは、励磁機の種類を2ケースとして解析した。励磁機1は励磁変圧器を介して発電機端子から励磁電源を得るもので、自家用発電設備には比較的多く見られる方式であるが、事故継続中は界磁電圧が低下する。

表1 解析手法と解の比較

| 解析手法                                   |      | 安定限界<br>事故遮断時間[sec] |
|--|------|---------------------|
| 等面積法                                   |      | 0.30                |
| 汎用システム解析ソフトウェア<br>(ETAP Power Station) | 励磁機1 | 0.33                |
|  | 励磁機2 | 0.35                |

励磁機1 : 自動静止方式、界磁頂上電圧=3.5[pu]

励磁機2 : 直流励磁方式、界磁頂上電圧=6.0[pu]

励磁機2は他励方式であるため、事故継続中も界磁電圧は供給され、また界磁頂上電圧も励磁機1より高い。

解析結果から、この差が安定限界事故遮断時間に影響することがわかる。

このように、等面積法は発電機の詳細や周辺制御装置について表現されないモデルに立脚したものであるため、得られた解は現実との乖離が大きくなる場合がある。

また、簡易解析手法の限界として最も重要な点は、前述のとおり、この手法は、1機無限大系統モデルのように、電力システムを局所的に単純化したモデルを前提としており、多くの同期発電機や他の機器が存在し、各発電機間の位相変化、機器相互の電力融通、さらに電力システム全体の電圧と周波数変化などを解析する必要がある場合には手が出せないことである。この点、汎用システム解析ソフトウェアは計算機によって数値解析を行うものであるから、膨大な計算の結果、解を得るものである。

なお、紹介したとおり、等面積法は同期発電機直近での三相短絡事故などの場合は、比較的現実に近い解が得られるので、汎用システム解析ソフトウェアで得た解をバックチェックする際に利用することもあり、使い方によっては有用である。

### 3. 産業用電力システムの特徴

産業用電力システムは、負荷の誘導電動機比率が多いことが特徴であり、この点の重要性は1.の(3)「a. 誘導電動機負荷の問題」に記載したとおりである。

次号では、汎用システム解析ソフトウェアの誘導電動機モデルおよび負荷モデルなどについて紹介する。

#### ◇参考資料◇

- (1) 関東通商産業局管内電気主任技術者会:「テーマ別専門委員会報告「電力システムのシミュレーションと保護協調」、平成11年3月
- (2) 資源エネルギー庁編:「解説 電力系統連系技術要件ガイドライン'98」電力新報社、平成10年
- (3) 新田目:「電力系統技術計算の応用」電気書院、昭和56年
- (4) 大浦、他:「保護リレーシステム工学」電気学会、平成14年
- (5) 壹岐、福田、加戸:「自家発電用ガスタービン発電設備の軸ねじれ現象(その2)」電気学会産業応用部門大会、平成11年
- (6) 長谷川、他:「電力系統工学」電気学会、平成14年
- (7) 電気学会技術報告:第798号「同期機諸定数の適用技術」、8.3章、平成12年7月
- (8) 星守、他:「新版 入門数値計算」、オーム社