

## 産業用電力システムのトラブルと解析

# 電力系統解析のために 必要な技術

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>

パソコンの高速化、大容量化によりパソコン上でも電力系統解析が可能になり、汎用系統解析ソフトウェアが広く利用されるようになってきている。われわれ、ETAP ユーザ会ではETAP PowerStation を用いて産業用電力システムのトラブルの解析を行い、原因の究明と対策の検討を進めている。

本号では、産業用電力システムの解析に必要な技術概要を紹介する。

### 1. 系統解析の進め方と技術項目

#### (1) 系統解析の進め方と紹介技術の範囲

系統解析の主な手順は以下のとおりである。

- ① 解析目的の明確化
- ② 解析ソフトウェアおよびシミュレータの選定
- ③ 解析の実施
- ④ 解析結果の評価
- ⑤ 設計およびトラブル対策への反映

解析の対象は2月号で述べたように種々のものがあり、対象により用いる解析用ツールが異なる。さらに、解析目的により計算方法や必要とされる技術も異なるため、ここでは産業用電力システムの解析に最も用いられる安定度解析に限定して紹介する。また、安定度解析の各過程にもさまざまな技術が必要であるが、計算に直接係わる技術に限定して説明する。

#### (2) 安定度解析の計算手順

解析技術を明らかにするため、計算手順について述べる。安定度解析の計算に用いる方程式は、発電機や誘導電動機の内部状態を表す微分方程式と系統状態変化を示す系統方程式とこれらを連携する諸式である。その構成を図1に示す。

なお、図1は安定度解析に一般的に用いられる実効値解法

モデルを表現したものである。このモデルでは系統側の過渡現象を無視して代数計算（交流理論による実効値計算）が行われる。以下、計算手順を概説する<sup>(1)</sup>。

- ① 初期潮流の計算
- ② 発電機諸量の初期値計算（初期潮流で求めた内部相角度を元に計算）
- ③ 系統状態変化の修正（事故など、系統に状態変化が起きたときに系統の電圧、電流を計算するインピーダンス行列、アドミタンス行列を修正。この行列には初期過渡リアクタンス、発電機制御などを含む）
- ④ 系統各部の電圧、電流の計算（修正した行列を用い計算）
- ⑤ 微分方程式の解法（求めた電圧、電流値を用いて微分

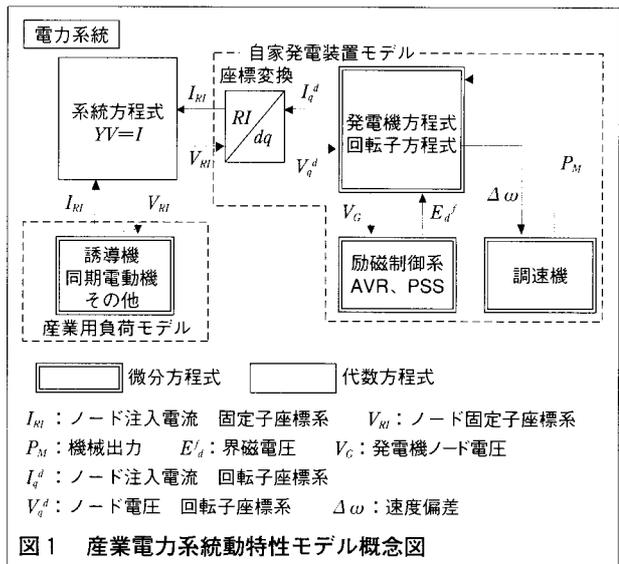


図1 産業電力系統動特性モデル概念図

\*1 旭化成(株) 水島支社 設備管理部 電気設備課長 (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 H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)

■ 産業用電力システムのトラブルと解析

方程式を解き、次の時刻の内部相差角、内部過渡誘起電圧などを計算)

- ⑥ 内部誘起電圧の計算 (微分方程式の計算結果より内部誘起電圧の計算)

以後、解析終了まで⑥の結果を④式に代入し④～⑥を繰り返す。

この計算に用いる同期機モデルおよび系統モデルの解説と必要技術を3章で、負荷モデルの解説と必要技術を4章で説明する。

## 2. 系統解析の種類と概要

一般に、汎用系統解析ソフトウェアおよびシミュレータ(アナログ、デジタル型)は電氣的な事故並びに異常現象の解析(事故並びに異常現象の再現)を行うためのものであり、電気設備の新規および更新に伴う事前検証や事故原因究明などに用いられる<sup>(2)</sup>。

電力系統の現象は、応答速度の早い雷や開閉サージから応答速度の遅い電圧安定性や静的に近い電力潮流まで広範囲にわたっており、その検討対象により解析内容も異なってくる。このため、電気技術者は系統解析の目的とソフトウェアの種類を見極めてからシミュレーションを行うことが必要であり、

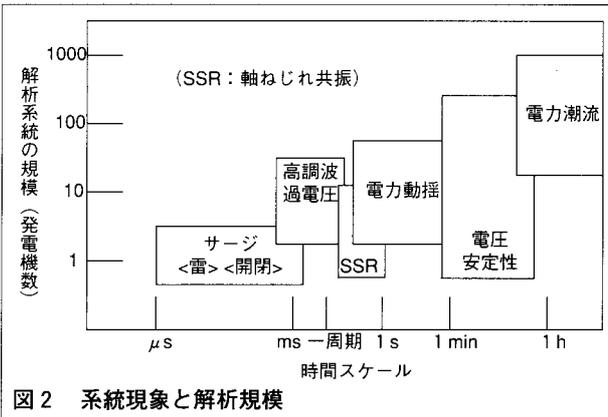


図2 系統現象と解析規模

表1 汎用系統解析ソフトウェア

名称	開発元
EMTP	米国政府エネルギー省ボンネビル庁
NETOMAC	ドイツ Siemens
PSS/E	米国 Power Technologies Inc.
Y法 ('83に改良Y法)	日本 財団法人電力中央研究所
EUROSTAG	フランス EDF + TRACTEBEL
PROMOD	米国 New Energy Associates
ESPRIT	日本 電源開発株式会社
ETAP PowerStation	米国 OTI (Operation Technology Inc.)
Power*Tools	米国 SKM Systems Analysis, Inc.
IPSA	イギリス IPSA Power Ltd.
EDSA	米国 EDSA Micro Corp.
CYME	カナダ CYME International Inc.
DlgSILENT PowerFactory	ドイツ DlgSILENT GmbH

高度な専門知識を必要とする。

解析用ツール選定の一助となるよう、図2に系統解析技術の種類を時間スケールと系統規模の視点で分類した対象範囲を、表1に汎用系統解析ソフトウェアを、表2にアナログ・デジタルシミュレータの例を示す<sup>(3)</sup>。

## 3. 電力系統の動特性モデル

### (1) 同期機の基礎と定式化

安定度解析には1章で述べたように、初期過渡リアクタンスなど多変数の微分方程式からなる同期機モデルが用いられている。このモデルはParkの式により定式化が行われており、その概要は以下のとおりである。

発電機の回転子は同期速度で回転しながら、絶えず微小な速度変化を起している。ストロボで回転(同期速度)に同期した光を照射することにより回転子は停止して見える。このとき何らかの変動があると、回転子はゆっくりと動き新たな点で停止する。このように同期速度の回転を取り除いてみれば何らかの変動により回転子は固定子との位置関係を変化させており、要因には系統の潮流の変動や電圧変動、発電機のガバナやAVR制御があり、変化は事故時ほど早く大きい。

回転子軸上には界磁巻線があり、発電を行う磁束が発生している。回転子の速度変化・相対位置変化により磁束の位置も変化することから鎖交磁束が変化し、リアクタンスや誘起電圧が変化する。計算にあつてはこうした変化を定式化する必要があるが、3相の電機子巻線を有する固定子側で定式化することは容易ではない。そこで回転子を固定して、界磁巻線上の直軸( $d$ 軸)、位相面で90度遅れた横軸( $q$ 軸)で考えることにより、固定子側よりは平易に定式化することができる。 $d$ 軸上の界磁巻線以外に、回転子の制動巻線および座標変換した仮想の固定子電機子巻線をおのおの $d$ 軸、 $q$ 軸に分割し表現する。表現に際しては、固定子座標系( $a-b-c$ 座標系)と回転子座標系( $d-q$ 零相座標系)の変換を行う必要がある。

表2 アナログ・デジタルシミュレータの例  
アナログシミュレータ

名称	開発元	解析範囲
交直シミュレータ	電力中央研究所	UHV/直流送電検証
APSA	関西電力、日立、富士電機	安定度、長時間動特性、直流送電検証
TNS	富士電機	安定度、長時間動特性、機器制御機能検証

### デジタルシミュレータ

名称	開発元	特徴
RTDS	マニトバHVDCリサーチセンタ	電力機器パーツが豊富
Flex RS	東電ソフトウェア	モデル結合にA/D変換使用
HYPERSIM	TEQSIM	EMTP、MATLAB互換
ARENE	EDF	CPUとI/Oを光ファイバ接続

図3は座標変換後の回転子および電機子巻線を表したものである。それぞれの巻線と巻線相互間の鎖交磁束の関係が同期機の各種リアクタンスであり、また、これらの関係を定式化したものがParkの式である。

図3の関係から図4に示すd軸、q軸それぞれの等価回路が得られる。

等価回路から同期、過渡および初期過渡、それぞれのリアクタンスと各種時定数を求めることができる。例えば、短絡計算に用いる直軸初期過渡リアクタンス $X_d''$ と直軸短絡過渡時定数 $T_d''$ は、それぞれ(1)、(2)式のように表すことができる。

$$X_d'' = X_a + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{Dd}} + \frac{1}{X_f}} \text{ [pu]} \quad (1)$$

$$T_d'' = \frac{1}{\omega_0 R_{Dd}} \left( X_{Dd} + \frac{1}{\frac{1}{X_a} + \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_f}} \right) \text{ [sec]} \quad (2)$$

以上、概要を述べたが、同期機の基礎やParkの式の詳細については各種文献を参照されたい<sup>(4)(5)</sup>。

(2) 発電機制御の組み込みと系統動特性方程式

電力系統全体の動特性を解析するためには、発電機本体モデルに、発電機制御系、系統および負荷機器のモデルなどを結合した総合的な動特性モデルを構築し、これに数値計算手法を適用して解を得る必要があることを前述した。発電機モデルおよび負荷モデルはそれぞれ、3章(1)および4章で述べており、ここでは残る発電機制御の組み込みと計算に用いられる動特性方程式について解説する。

a. AVR、ガバナ制御の組み込み

AVR、ガバナ制御の動特性を微分方程式で表し、運動方程式や内部過渡誘導電圧方程式などの微分方程式に組みこむ必要がある<sup>(1)</sup>。

簡単にするため、図5に示す一次遅れ伝達関数を用い説明する。図中 $V_{ref}$ は電圧設定値、 $\omega_0$ は基準角速度である。

制御の関係式は、

$$\Delta e_f = \frac{K_A}{T_A S + 1} \times (V_{ref} - V_t) \quad (3)$$

$$\Delta P_m = \frac{K_G}{T_G S + 1} \times \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (4)$$

$$V_t(t) = \sqrt{v_d^2(t) + v_q^2(t)} \quad (5)$$

と表される。

(5)式を代入して(3)、(4)式を逆ラプラス変換し微分方程式で表すと、次式となる。

$$\frac{de_f(t)}{dt} = -\frac{1}{T_A} \{ e_f(t) + K_A \sqrt{v_d^2(t) + v_q^2(t)} - (e_{f0} + K_A V_{f0}) \} \quad (6)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{1}{T_G} \{ P_m(t) + \frac{K_G}{\omega_0} \omega(t) - (P_{m0} + K_G) \} \quad (7)$$

ここで、 $P_{m0}$ 、 $V_{f0}$ は状態変動前の機械入力、発電機端子電圧である。解析にあつては、運動方程式や鎖交磁束変化を解く

際に(6)および(7)式を同時に考慮する。

b. 産業用電力系統の動特性方程式

動特性方程式は基本的に以下の2つの式で表せる。

$$\frac{dX}{dt} = f(X, V) \quad (8)$$

$$YV = I(X, V) \quad (9)$$

X: 発電機、制御系などの状態変数

V: 母線電圧

I: 母線注入電流

Y: アドミタンス行列

f: 産業用負荷モデルで、微分方程式の特性を表す

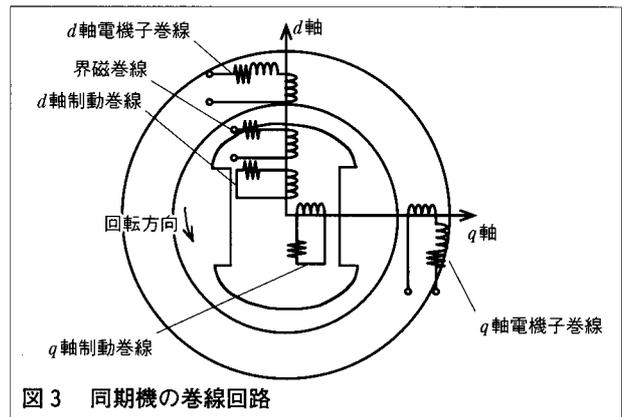
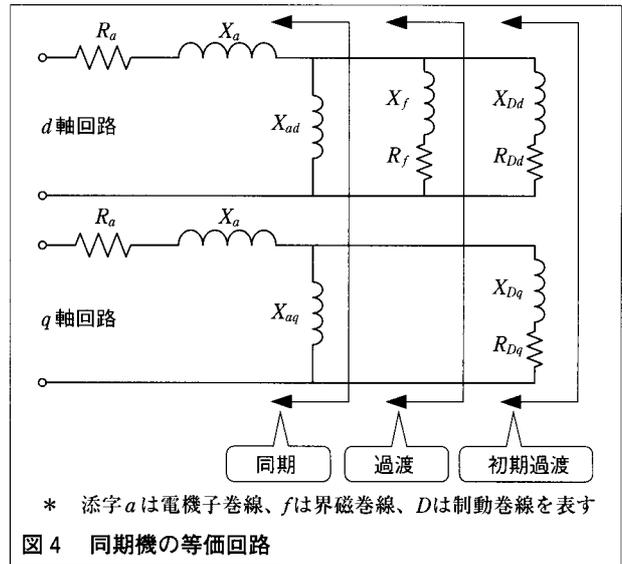


図3 同期機の巻線回路



\* 添字aは電機子巻線、fは界磁巻線、Dは制動巻線を表す  
図4 同期機の等価回路

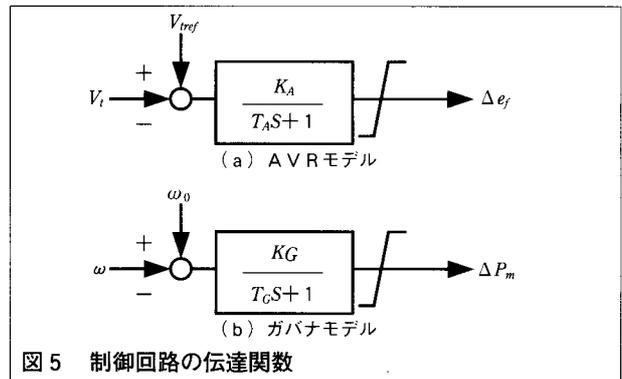


図5 制御回路の伝達関数

非線形関数

(8) 式は a. 項で紹介したように、運動方程式、鎖交磁束変化式、発電機制御の方程式等を示し、(9) 式は 1 章(2)③で紹介した各リアクタンスや発電機制御の変化を踏まえたアドミタンス行列である。これらの構成は図 1 に示したとおりであり、改めて参照いただきたい。

(3) 電力システムモデル上での必要技術

a. 同期機モデルの選定技術

システムの安定度に影響を与える同期機の因子にはさまざまなものがあるが、これらのすべてを精密にモデル化して解析を行うのはきわめて複雑になるので、その目的に応じて適宜簡略化を行う。各モデルの概要を以下に示す。

- ①  $X_d'$  モデル：内部誘起電圧  $E_g'$  を一定とし、電機子回路のリアクタンスを  $X_d'$  としたモデル (2 月号参照)
- ② 過渡モデル：Park の式を基に、界磁巻線の過渡現象を考慮したモデル。このモデルでは、制動巻線や電機子回路の過渡現象は考慮しない
- ③ 初期過渡モデル：Park の式を基に、制動巻線、界磁巻線の過渡現象を考慮したモデル。このモデルでは、電機子回路の過渡現象 (直流分) を無視する
- ④ 瞬時値モデル：Park の式を基に、制動巻線、界磁巻線および電機子回路の過渡現象を考慮したモデル

解析に際してどのモデルを用いるか判断する技術が必要となるが、専門技術者のノウハウに係る部分もあり、ここでは割愛する。自家用電気技術者が自ら選定する場合は、モデルを詳細に理解しておかねばならず、高度な専門知識が必要となる。参考のため、表 3 に同期機の各種モデルと特徴、表 4 に初期過渡モデルおよび瞬時値モデルの利点と欠点を示す。

一般に、過渡安定度解析ソフトウェア (実効値計算) には、

表 3 同期機の各種モデルと特徴

比較項目	モデル	$X_d'$	過渡	初期過渡	瞬時値
界磁巻線の過渡現象		無視	考慮	考慮	考慮
制動巻線の過渡現象		無視	無視	考慮	考慮
電機子回路の過渡現象		無視	無視	無視	考慮
突極性の考慮		不可	可	可	可
AVR の模擬		不可	可	可	可
ガバナの模擬		可	可	可	可
過渡安定度解析ソフトウェアへの採用		×	○	○	○

表 4 初期過渡モデルおよび瞬時値モデルの利点と欠点

	利点	欠点
初期過渡モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 長時間の過渡現象を解析可能</li> <li>• 大規模なシステムを効率よく解析可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 電機子回路の過渡現象が過渡安定性に反映されない</li> </ul>
瞬時値モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高調波、パワエレ素子の解析が可能</li> <li>• DC 分を含むので最大値解析可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 計算量が膨大 (大規模システムには不適)</li> </ul>

過渡モデルと初期過渡モデルの両者を選択できるように工夫されたものが多い。瞬時値モデルは EMT P などの瞬時値計算ソフトウェアで使用される。

なお、各種ソフトウェアは、これらモデルに主磁束飽和の影響を補正する工夫が加味されている。

b. AVR、ガバナのモデリング技術

3 章(2)の a. では簡単な制御モデルで説明した。基本的な考え方は同じとしても、実際の AVR、ガバナ回路は複雑であり、補助回路、リミッタなどその構成や定数および制御回路の切替の有無は、ガバナは駆動機の種別や構成と応答性、AVR は励磁方式の種別や容量と応答性により異なる。ほかにも系統解列時のロードセディング回路の有無など留意すべきことは多い。このため、モデリング技術が必要となる。

ここでは詳細は割愛するが、モデルの構築がユーザーに開放されたソフトウェアか、等価回路に変換するものか、標準モデルから選定するものかにより、要求される技術力は異なる。詳細にモデルを組むほど解析精度は向上するが、より深い理解力が要求される。標準モデルを選定するにしても、回路構成と定数等制御に対する理解が必要となる。

4. 負荷モデル

2 月号で述べたように、産業用電力システムは負荷に占める誘導電動機の比率が高いことが特徴である。誘導電動機は電圧変化に対して定電力の特性を有しているため、系統じょう乱時の電圧安定性に大きな影響を及ぼす<sup>(6)</sup>。

ここでは、誘導電動機のモデルについて解説するとともに、系統解析を行う上で負荷モデルを正しく表現することの重要性について述べる。

(1) 誘導電動機のモデル

誘導電動機の電気系モデルは、定常モデルと過渡モデルに区分され、汎用系統解析ソフトウェアには一般的に過渡モデルが使用される。

モデルを選択するうえで留意すべき点は、モデルの種類に加え、モデルがスベリ周波数変化と深溝効果による回転子定数の変化に対応したものであるか確認する点であり、解析の内容によっては、このために計算精度が変わる場合がある。

図 6 は T 形等価回路を変形したモデルの例であるが、回転子回路を 2 本として、スベリ周波数変化と深溝効果に対応するものである。また、回転子回路が 1 本であっても、その定

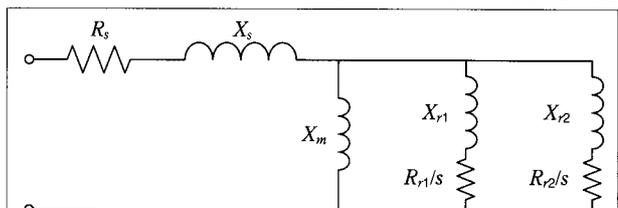


図 6 誘導電動機の電気系モデル例  
 $R_s, X_s$ : 固定子抵抗、リアクタンス  
 $X_m$ : 励磁リアクタンス  
 $R_r, X_r$ : 回転子抵抗、リアクタンス  
 $s$ : スベリ

図 6 誘導電動機の電気系モデル例

電力系統解析の必要性

数が、拘束状態から全負荷状態まで、スベリとともに直線的に変化するように工夫された汎用系統解析ソフトウェアも存在する。

機械系モデルは (10) 式の運動方程式で表される。

$$2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_l \quad (10)$$

$H$  : 誘導電動機+負荷の単位慣性定数

[kW・sec/kVA]

$H = (\text{回転体の持つエネルギー [J]}) /$   
(電動機容量 [VA])

$\omega$  : 回転数 (角速度) [pu]

$T_m$  : 電動機トルク [pu]

$T_l$  : 負荷トルク [pu]

$T_m, T_l$  は、ともに回転数 (スベリ) によって変化するが、負荷については、ポンプ、ファンなどの場合は2乗低減トルク特性を持つことが知られている。

(2) 負荷モデルの種類

前述した誘導電動機のモデルは動的なモデルであり電圧変化による有効電力と無効電力の変化がより忠実に表現される。

一方、一般の系統解析では負荷モデルを簡略化して (11) および (12) 式の表現を用いる例があり<sup>(7)</sup>、解析ソフトウェアを選択、応用する際には注意を要する。

$$P_L = P_i \left( \frac{V}{V_i} \right) \left( 1 + \Delta f \cdot \frac{\beta}{100} \right) \quad (11)$$

$$Q_L = Q_i \left( \frac{V}{V_i} \right)^2 \quad (12)$$

$P_L$  : 有効電力負荷

$Q_L$  : 無効電力負荷

$P_i, Q_i, V_i$  : 初期値

$\Delta f$  : 周波数変化

$\beta$  : 周波数特性指数

(11)、(12)式は、有効電力は電圧と周波数変化に比例すること、また、無効電力は電圧の2乗に比例することを表す簡略モデルであるが、誘導電動機負荷に対しては適切な表現ではない。

(3) 誘導電動機負荷の縮約 (集約) 技術

石油や化学、鉄鋼業界などでは、一事業所に数百から数千台の誘導電動機が設置されており、系統解析を行う場合に、これらを1台ずつ個別のモデルとして取り扱うことは、作業効率上もソフトウェアの能力上も現実的ではない。また、計算精度の点からもその必要はない。

そこで、誘導電動機群を等価な単機の機械と見なして (以下、「縮約」と呼ぶ) 解析する手法を用いることになる。以下にその法について述べる。

【手順1】

まず、同一電源 (変圧器バンクなど) ごとに、電動機群を次の①~③の組み合わせで数種類のグループに分類する。

① 容量 (大~小)。なお、大容量機は個別に取り扱うことが望ましい。

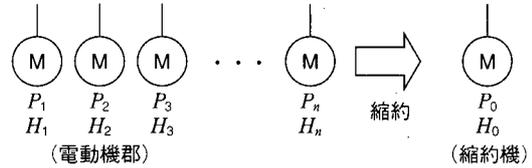
② 負荷の単位慣性定数が大きいもの (ファン、ブロワな

ど) と小さいもの (ポンプ、攪拌機など)、また、トルク特性の種類。(定トルク特性の負荷群を区分するなど)

③ 特殊機器の区分 (巻線形、ノンシールポンプなど)

【手順2】

手順1で分類したグループごとに次の方法で縮約機を算出する。



$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (13)$$

$$H_0 = \frac{H_1 P_1 + H_2 P_2 + H_3 P_3 + \dots + H_n P_n}{P_0} \quad (14)$$

ただし、

$P_1 \dots P_n$  : 電動機群それぞれの容量 [kVA]

$H_1 \dots H_n$  : 電動機群それぞれの単位慣性定数 [kW・sec/kVA]

$P_0$  : 縮約機の容量 [kVA]

$H_0$  : 縮約機の単位慣性定数 [kW・sec/kVA]

この縮約にあつては、実機を忠実にモデリングするほど、精度が向上する。このため、負荷調査を丁寧にを行い実態に近いモデルを作ることが、同期機のモデリングとともに重要となる。



本号では系統解析に直接関係する技術を紹介したが、系統解析を実務に取り込むためには、

- ① 電力系統の問題点の抽出技術
- ② トラブル原因の追求技術 (故障記録波形の分析技術など)
- ③ 保護システムの理解、改善技術
- ④ 制御性改善技術
- ⑤ 用役 (特に蒸気系) への影響抑制技術

などの電力系統に係るシステム技術が必要となる。これらの技術についてここでは割愛したが、ETAPユーザ会ではこうした技術にも取り組みつつある。電気技術者のさらなる研鑽の場として提供できれば幸甚である。

次号では、産業用電力系統トラブルの解析事例と実務への適用例を2か月にわたり紹介する。

◇参考資料◇

- (1) 関根泰次:「電力系統過渡解析論」、オーム社、昭和59年
- (2) 横山隆一:「電力自由化と技術開発」、東京電機大学出版局、平成13年
- (3) 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、平成8年3月
- (4) 電気学会技術報告:「同期機諸定数の適用技術」、第798号、平成12年7月
- (5) 猪狩武尚:「電気機械理論」、コロナ社、昭和52年
- (6) 電気協同研究:「電力系統安定運用技術」、第47巻第1号、平成3年4月
- (7) 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