多機電力系統における同期機 逆動揺現象の一解析法

正員 三谷 康範 (大阪大)

正員 辻 毅一郎 (大阪大)

A Method for Analysis of Back Swing Phenomena of Synchronous Machine in Multi-Machine Power Systems

Yasunori Mitani, Member, Kiichiro Tsuji, Member (Osaka University)

This paper describes a new approach to the analysis of the back swing phenomena in multi-machine power systems. When a short circuit fault occurs in a power system, some generators decelerate in a short period right after the fault in some cases. The phenomenon called back swing is caused by the transient responses in armature winding of synchronous machines and in transmission lines. To represent the back swing in detail by a mathematical model, these transient behaviors have to be described by sets of differential equations. Then not only the order of differential equations increases, but the convenient expression of transmission system by a set of node equations becomes useless.

In this paper an equivalent model of power system for the simple representation of the back swing, has been proposed. First, an impedance for each machine that represents the transient of transmission system, has been introduced. It is assembled into the differential equations associated with armature winding response. Then the transmission system is represented by a constant impedance matrix. This model makes it possible to calculate the transient behavior of armature flux in multi-machine power systems. The transient torque brought to the rotor shaft by the flux, is directly calculated and it represents the back swing phenomena effectively.

キーワード：電力系統，安定度，逆動揺現象，系統解析，同期機

1. はじめに

近年の電力系統は，電源の遠隔化，大規模化および負荷の大都市集中に伴い送電系統が長距離大容量化し，系統の大規模複雑化が進展している。こうしたなかで，電力系統の信頼性を確保するために，種々の面から系統解析が行われている。特に，過渡安定度や動態安定度といった安定度解析は重要な検討課題の一つとなっている。電力系統の大規模複雑化は今後も続くものと考えられ，系統全体として安定度をいかに維持するかが非常に重要な検討課題である。最近では，計算機の能力が飛躍的に向上していることもあり，多数

の発電機を含む系統全体を対象とした詳細なシミュレーションが行われるようになってきている。特に，系統設備の有効利用の観点から，系統の安定度マージンを適切に把握する必要性が生じており，そのためにも，系統内の種々の現象を正確に解析しようという動きが強まっている。

従来の電力系統のシミュレーションにおいては，一般に，同期機ならびに送電線の過渡現象を無視した解析が行われてきた。これに対して，同期機電機子巻線の過渡現象により，系統事故直後において発電機がいったん減速する，いわゆる逆動揺現象が発生する場合があることが指摘されている⁽¹⁾⁽²⁾。この現象によつ

て、揚水運転中の同期機は系統短絡事故時に減速がより大きくなることも確認されている。そこで、この現象を詳細に考慮しようとする、同期機電機子巻線のみならず送電系統の電気的特性もすべて微分方程式で記述する必要が生ずる。このとき、単に系統を記述する微分方程式の数が増えるだけでなく、ノード方程式を用いた簡便な系統記述ができなくなる。従って、解析を行いたい系統ごとに微分方程式を組直す必要が生じ、多機系統や構成の複雑な系統を対象とした解析は非常に困難なものとなるものと考えられる。

一方、この問題を解決する一つの手法として、短絡事故直後に事故電流の不連続変化を打ち消すように電機子巻線を流れる直流電流を仮定して、電機子過渡応答を無視した同期機モデルにおいて近似的なトルクを与える方法が提案されている⁽⁹⁾。この方法では、一機無限大母線系統を対象とした一例により、同期機の逆動揺現象を表現できることが示されているが、制動巻線電流および界磁巻線電流が電機子巻線につくる磁束が正確には考慮されていないので、仮定した直流電流の減衰時定数の与え方も必ずしも明確ではない。

これに対して、本論文で提案する手法においては、電機子巻線の過渡応答を考慮した詳細な同期機モデルとノード方程式で表現した送電系統モデルを用いる。このとき、事故電流による送電系統側の過渡現象は同期機モデルに等価なリアクタンスを組み込むことより表現する。過渡項が発電機モデルに組み込まれた結果、送電系統は定インピーダンス行列を用いたノード方程式を用いて表現され⁽⁴⁾、多機系統における逆動揺現象の解析を容易に行うことができる。

本論文ではこのほかに、シミュレーションに要する計算時間を短縮するために、計算途中において同期機モデルと積分刻み幅を変更する手法を提案している。その結果、多機系統において逆動揺を考慮した系統の安定度解析を高速に行えるようになった。以下では、提案手法の詳細を述べ、モデル系統を用いた数値計算結果により、その有効性を明らかにする。

2. 逆動揺の解析のための同期機モデル

同期機の逆動揺現象は電機子巻線の過渡応答が主因となって発生することが知られている。この電機子巻線の応答を含み、制動巻線、界磁巻線の各応答および動揺方程式を考慮した Park のモデルは以下のように表現できる。なお、制動巻線は、等価ダンパー回路を d 、 q 軸それぞれに 1 巻線および 2 巻線想定している。

$$\begin{cases} p\Psi_d/\omega_r = \omega\Psi_q + r_a i_d + v_d \\ p\Psi_q/\omega_r = -\omega\Psi_d + r_a i_q + v_q \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{cases} p e_q' = (E_{fd} - e_{q1})/T_{d0}' \\ p e_d' = -e_{d1}/T_{q0}' \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{cases} p e_q'' = -\{(x_d' - x_d'')/(x_d - x_d'')\} e_{q2}/T_{d0}'' \\ p e_d'' = -\{(x_q' - x_q'')/(x_q - x_q'')\} e_{d2}/T_{q0}'' \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{cases} M p \omega = -D(\omega - 1) + (P_m/\omega) - (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \\ p \theta/\omega_r = \omega - 1 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{cases} \Psi_d = -x_d i_d + e_{q1} + e_{q2} \\ \Psi_q = -x_q i_q - e_{d1} - e_{d2} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{cases} e_q' = -(x_d - x_d') i_d + e_{q1} \\ \quad + (x_d - x_d')/(x_d - x_d'') e_{q2} \\ e_d' = (x_q - x_q') i_q + e_{d1} \\ \quad + (x_q - x_q')/(x_q - x_q'') e_{d2} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{cases} e_q'' = -(x_d - x_d'') i_d + e_{q1} + e_{q2} \\ e_d'' = (x_q - x_q'') i_q + e_{d1} + e_{d2} \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 p は時間微分 d/dt 、 ω_r (rad/s) は系統の基準角周波数を表している。その他の記号の意味は文献(2)あるいは(3)を参照されたい。

本論文では、微分方程式の数により、以上を八次モデルと呼ぶことにする。

(1)式において v_d 、 v_q は発電機端電圧であり、八次モデルはこれらを介して送電系統モデルと結合される。このとき、逆動揺現象の解析のためには、同期機の電機子同様、送電系統の電気的振舞いも微分方程式で表現してその過渡応答分を考慮する必要がある。その結果、定インピーダンス行列（あるいは定アドミタンス行列）を用いた簡単な系統の表現ができなくなる。これが、多機系統での逆動揺現象の解析を困難にしている原因である。以下では、送電系統の過渡応答を考慮して同期機モデルを改良することにより、この問題の解決を図る。

3. 一機系統におけるモデルの改良

ここでは、発電機一機のみを対象として、詳しく検討を行い、定インピーダンスで表現された系統と接続して逆動揺を解析することができる改良された同期機モデルを導出する。

いま、図1に示すように発電機端から抵抗 r_f 、リアクタンス x_f を介した地点で短絡故障が発生した場合

図 1 一機系統における短絡事故
Fig. 1. A short circuit fault in a single machine power system.

合を考える。このとき、送電線の電氣的振舞いは、発電機の d, q 軸基準で表現すると以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} v_d &= x_f p i_d / \omega_r + r_f i_d - \omega x_f i_q + e_d \\ v_q &= \omega x_f i_d + x_f p i_q / \omega_r + r_f i_q + e_q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 e_d, e_q は事故点の電圧である。系統に短絡事故が生じれば、 e_d および e_q がステップ状に低下する。また、事故除去直後には再び元の値近くまでステップ状に変化する。

(8)式を(1)式と結合すると

$$\left. \begin{aligned} p \Psi_d / \omega_r &= \omega \Psi_q + r_a i_d + x_f p i_d / \omega_r \\ &\quad + r_f i_d - \omega x_f i_q + e_d \\ p \Psi_q / \omega_r &= -\omega \Psi_d + r_a i_q + \omega x_f i_d \\ &\quad + x_f p i_q / \omega_r + r_f i_q + e_q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、新しい変数を導入して

$$\Psi_d' = \Psi_d - x_f i_d, \quad \Psi_q' = \Psi_q - x_f i_q \quad \dots\dots\dots (10)$$

と定義すれば、(9)式は

$$\left. \begin{aligned} p \Psi_d' / \omega_r &= \omega \Psi_q' + \omega x_f i_q + r_a i_d + v_d' \\ p \Psi_q' / \omega_r &= -\omega \Psi_d' - \omega x_f i_d + r_a i_q + v_q' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} v_d' &= r_f i_d - \omega x_f i_q + e_d \\ v_q' &= \omega x_f i_d + r_f i_q + e_q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

となる。更に、(5)式の Ψ_d および Ψ_q を Ψ_d' および Ψ_q' を用いて表現し直せば以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d' &= -(x_d + x_f) i_d + e_{q1} + e_{q2} \\ \Psi_q' &= -(x_q + x_f) i_q - e_{d1} - e_{d2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

(12)式において、 $\omega \approx 1$ と考えると、この式は発電機端と事故点から見た一定のインピーダンス $r_f + jx_f$ を用いて系統方程式を表現したものである。従って、 x_f (短絡リアクタンスと呼ぶ) を導入して、同期機モデルの電機子の応答を(11)式および(13)式によって構成し直せば、系統を(12)式のように定インピーダンスで表現できる。

以下では、(11)式および(2)～(4)式の微分方程式と、(13)式および(6)、(7)式の代数方程式で表現した同期機モデルを改良八次モデルと呼ぶことにする。

4. 多機系統における解析手法

〈4・1〉 多機系統への適用時の問題点 改良八次モデルは八次モデルに短絡リアクタンス x_f を新たなパラメータとして導入すればよい。一機無限大母線系統のような簡単な系統では前述のように x_f は直ちに決定される。しかし、多機系統において値を求めるのは困難である。

また、改良八次モデルは、速い応答となる電機子巻線に関する微分方程式を含んでいるために、シミュレーションを行う際の積分刻み時間を小さく設定する必要がある。その結果、多機系統を扱った場合にはかなり膨大な計算時間がかかる恐れがある。

以下では、これらの問題解決法について詳しい議論を行う。

〈4・2〉 短絡リアクタンスの求解 電力系統において発電機は電圧源として働く。このため、系統内で短絡事故が発生すると発電機から事故点に向かって短絡電流が流れる。いま、発電機を付録に示した六次のモデル⁽⁵⁾で表し、(付4)式において e_d'' , e_q'' を事故直後不変と考えれば、発電機を次過渡リアクタンス背後に接続された一定の電圧源とみなすことができる(図2参照)。こうすることにより、事故中の系統のインピーダンス行列を用いて系統内の電流電圧分布を計算できる。文献(3)では、このとき求められる事故電流変化から電機子磁束変化を近似的に定めている。

いま、この計算結果から、事故中の各発電機の端子電圧 v_f と出力電流 i_f が求められたとする。このときの発電機電流 i_f は短絡電流のほかに負荷に流れる電流成分などを含むが、事故継続中は短絡電流のほうが十分大きいものと考えられる。逆に、短絡電流が小さい場合には後述するように逆動揺現象も小さくなる。

ここで、送電線のリアクタンス分を抵抗分より十分大きいと考えると、 v_f と i_f の値から

$$x_f = v_f / i_f \quad \dots\dots\dots (14)$$

として各発電機の短絡リアクタンスを等価的に求めることができる。この様子を図3に示す。

〈4・3〉 モデル切換えによる計算時間の短縮

改良八次モデルの電機子巻線の応答は電源周波数程度の周波数をもった減衰振動である。短絡事故中の同期機逆動揺現象の解析にはこの振動を無視できないが、これが十分収束した後は、速い振動成分を計算する必要がなくなる。従って、その時点で同期機モデルを改良八次モデルから何らかの簡略化されたモデルに切り換えれば、それ以降は積分刻み時間を大きくして

高速に計算を進めることができる。以上の考え方に基
づき、本論文では、切換え後のモデルとして短絡リア
クタンスの求解においても用いた同期機モデル（付録
参照、六次モデルと呼ぶ）を用いることとした。六次
モデルは制動巻線と界磁巻線の応答および動揺方程式
を考慮した同期機モデルで改良八次モデルとは以下に
示す数学的関係がある。

改良八次モデルにおいて、電機子巻線の磁束 Ψ_d' 、
 Ψ_q' の応答は他の変数の応答（例えば、制動巻線の応
答や電力動揺）に比べて十分速い。このように、同一
のシステム中に極端に応答速度の異なるモードが混在
するシステムは特異振動システムと呼ばれ、特異振動法
を利用すれば、システムの簡略化を行うことができ
る⁽⁶⁾。これについて以下に説明する。

Ψ_d' 、 Ψ_q' の応答が十分速いとき特異振動法を適用
すれば(11)式の微分方程式は代数方程式

$$\left. \begin{aligned} \omega \Psi_q' + \omega x_f i_q + r_a i_d + v_d' &= 0 \\ -\omega \Psi_d' - \omega x_f i_d + r_a i_q + v_q' &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

に置き換えられる。(15)式と(13)式から

$$\left. \begin{aligned} \omega(-x_d i_d + e_{q1} + e_{q2}) + r_a i_d + v_d' &= 0 \\ -\omega(-x_d i_d + e_{q1} + e_{q2}) + r_a i_q + v_q' &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

図 2 短絡事故と短絡電流

Fig. 2. Short circuit current at short circuit fault.

図 3 等価短絡リアクタンスの概念

Fig. 3. A schematic image of equivalent short circuit reactance.

更に、(7)式を用いると

$$\left. \begin{aligned} v_d' &= -r_a i_d + x_q'' i_q + e_d'' \\ v_q' &= -x_d'' i_d - r_a i_q + e_q'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

となる。ただし、 $\omega \approx 1$ とした。

(17)式は初期過渡リアクタンス x_d'' 、 x_q'' の背後に
電圧 e_d'' 、 e_q'' があることを示している。以上をまと
めると付録に示した六次の同期機モデルが得られる。

以上のように、六次モデルは改良八次モデルの速い
応答成分である電機子巻線の応答のみを簡略化したも
のである。従って、電機子磁束の振動が十分収束すれ
ば改良八次モデルは六次モデルと等価になる。また、
 Ψ_d' 、 Ψ_q' 以外の変数は両者で共通であるので、モデル
切換えの際、切換え後のモデルの初期値を新たに求
める必要がない。

以上により、事故直後の系統動揺は逆動揺を含めて
詳しく解析し、その後の動揺（発電機回転子の動揺な
ど）は六次モデルを用いて高速に解析できる。

なお、各モデルを用いた系統シミュレーションの方
法ならびに同期機モデルの切換えの手法については文
献(6)の方法を用いた。

＜4・4＞ 多機系統における解析手順 本章をまと
めて、多機系統における提案手法の手順を以下に示
す。

〔ステップ1〕 系統の初期潮流計算を行い、八次
モデルの初期値を計算する。

〔ステップ2〕 六次モデルと短絡中の系統のイン
ピーダンス行列を用いて、各発電機の短絡リアクタ
ンス x_f を計算する。また、 x_f を用いて改良八次モデル
の Ψ_d' 、 Ψ_q' の初期値を計算する。

〔ステップ3〕 事故の発生、除去、回線再開路に
合わせて系統のインピーダンス行列を切り換える。

〔ステップ4〕 Ψ_d' 、 Ψ_q' の振動波形が十分収束し
ていれば改良八次モデルから六次モデルに変更し、積
分刻み時間の大きさを変える。

〔ステップ5〕 積分計算を行い、刻み時間後の各
変数の値を求める。

〔ステップ6〕 積分終了時刻まで〔ステップ3、4、
5〕を繰り返す。

5. モデル系統を用いた数値解析

＜5・1＞ 短絡リアクタンスの定性的考察 同期機
の至近端三相突発短絡時の空けき磁束の挙動につい
ては、古くから詳しい議論がなされてきた⁽⁷⁾。また、逆
動揺現象の様子についても文献(1)で詳しく解析が行
われている。これに対して、ここでは本論文で導入し

た短絡リアクタンスと逆動揺の関係について基礎的な検討を行う。

図4の一機無限大母線系統を用いて数値的な解析を行った。系統の定数は表1に示すとおりである。

三相短絡を想定し、事故点を変圧器の発電機側(A点)、変圧器の送電側(B点)、送電線の真ん中(C点)、送電線の無限大母線側端点(D点)と変え、短絡事故中の発電機の挙動を計算した。また、事故点と発電機の間に負荷がある例として、発電機端に0.6 puの抵抗負荷(発電機出力は1.2 pu)を接続し、D点で短絡事故が起こった場合も計算した。以上のように、事故点を変えることは、図1で見ると発電機から短絡点までの距離に相当する x_f および x_r の値を変えることを意味する。また、三相短絡の発生により事故母線の電圧は零になるが、これは図1においては、 e_d および e_q の値が零になることに相当する。

まず、各短絡場所について短絡リアクタンスを計算した結果は、それぞれA点:0.00, B点:0.150, C点:0.250, D点:0.350で送電系統のリアクタンス分と一致した結果を得た。また、発電機端に負荷がありD点で短絡が起こった場合でも、短絡中に負荷へ流れる電流よりも事故電流のほうが十分大きく、短絡リアクタンスを計算した結果、その値は0.342であった。

次に、短絡中の電機子磁束と発電機位相を求めた結果を図5に示す。

発電機至近端での短絡時には、電機子過渡応答の減衰時定数は電機子時定数(0.18 s)程度で、B点での

図4 一機無限大母線モデル系統
Fig. 4. A one machine to infinite bus model system.

表1 同期機の機器定数
Table 1. Machine constants.

容量 1,340 MVA, 系統基準周波数 60 Hz		
$x_d = 1.693$ pu	$x_q = 1.636$ pu	$x_d' = 0.346$ pu
$x_d'' = 0.900$ pu	$x_d''' = 0.281$ pu	$x_q' = 0.281$ pu
$x_f = 0.228$ pu	$r_a = 0.0041$ pu	
$T_{d0}' = 6.580$ s	$T_{d0}'' = 1.500$ s	$T_{d0}''' = 0.043$ s
$T_{d0}'' = 0.124$ s	$M = 7.8$ s	$D = 2.0$ pu
系統 1,000 MVA ベース		
$x_f = 0.150$ pu	$x_s = 0.100$ pu	
$r = 0.012$ pu	$x = 0.200$ pu	
ただし、送電線は 275 kV, 100 km, 2 回線当たり		

短絡時には減衰時定数は大きくなる。送電線上での事故時は送電線の抵抗により過渡応答の減衰が速くなり、負荷があれば一段と減衰が速くなる。また、事故点が遠い(すなわち x_f が大きい)と、短絡による過渡振動の振幅は小さくなる。

以上のように、短絡リアクタンスによって短絡事故後の電機子磁束の振動の大きさおよび減衰速度は大きく変わり、逆動揺の発生の仕方も異なる。この例で

(a) A点での短絡

(b) B点での短絡

(c) C点での短絡

(d) D点での短絡

(e) 発電機に負荷がある場合

図5 x_f と発電機過渡応答の関係
Fig. 5. Effect of x_f on the transient behavior of generator.

は、短絡リアクタンスが小さい、すなわち短絡点が発電機端に近いほど逆動揺が大きくなっている。以下では、これについて定性的な考察を行う。

いま、(5)式において、制動巻線および界磁巻線を無視して電機子巻線のみについて考え、

$$\Psi_d = -x_d i_d, \quad \Psi_q = -x_q i_q \cdots \cdots (18)$$

として、電機子巻線と送電系統との相互作用を考える。このとき、(18)式と(9)式を用いると、

$$\begin{cases} p\Psi_d = -(\omega_r X/X)\Psi_d + \omega_r \Psi_q + (\omega_r x/X)e_d \\ p\Psi_q = -\omega_r \Psi_d - (\omega_r R/X)\Psi_q + (\omega_r x/X)e_q \end{cases} \cdots \cdots (19)$$

となる。ただし、簡単のため $x_d = x_q = x$, $\omega = 1$ とし、

$$X = x + x_f, \quad R = r_a + r_f$$

と置いた。

(19)式のシステムは減衰時定数が $X/(R\omega_r)$ で角周波数 ω_r (電源周波数) の減衰振動系である。

電力系統におけるリアクタンスと抵抗の比を考えると、一般に、発電機や変圧器は送電線と比べて抵抗の割合が小さい。また、系統内には負荷が分布している

ので抵抗の割合はいつそう大きくなる。従って、短絡事故点が発電機から遠ざかるにつれて X/R が小さくなり電機子磁束の過渡振動分の減衰は速くなる。また、事故点が遠いほど x/X が小さくなるので事故 (e_d と e_q のステップ状の変化) による電機子磁束への影響は次第に小さくなる。

〈5・2〉 多機系統における計算例 文献(1)で用いられている系統(図6)を用いて、母線5の至近端での三相地絡を想定しシミュレーションを行った。AVRと調速機も文献(1)と同じ一次遅れ特性で表現した。

まず、想定した短絡事故に対する短絡リアクタンスを計算した。結果は $x_{f1} = 0.206$ pu (発電機1), $x_{f2} = 0.265$ pu (発電機2), $x_{f3} = 0.399$ pu (発電機3)であった。これらの値を改良八次モデルに組み込みシミュレーションを行った。比較のために、六次モデルを用いた場合、 x_f をすべて零にした場合の計算も行った。結果を図7に示す。提案法による結果は文献(1)の結果ともよく一致し、この方法により発電機の逆動揺現象が良好に表現されている。なお、文献(1)の結果と比較すると、各発電機の位相角の大きさについて小数点以下の数字が少し異なるが、これは初期潮流計算の誤差と考えられる。

〈5・3〉 モデル切換えの効果 図6の3機系統を用い、母線7で三相短絡が発生し、5 cycle後に母線7-5間の線路において2回線中1回線が開放され故障が除去されたものとして解析を行った。この場合の短絡リアクタンスは $x_{f1} = 0.286$ pu, $x_{f2} = 0.0625$ pu, $x_{f3} = 0.234$ puであった。図8(a)は改良八次モデルのみを用いた結果で、(b)図は0.2秒後に改良八次モデルを六次モデルに切り換えた場合の結果である。いずれも、事故点に最も近い発電機2の電気的出力トルクを示している。改良八次モデルを用いている場合の刻み時間は0.1 msで、六次モデルの場合は10 msで

図6 三機モデル系統
Fig. 6. A three machine model system.

図7 シミュレーションの結果
Fig. 7. Simulated results.

(a) モデル切換えを行わなかった場合

(b) モデル切換えを行った場合

図 8 モデル切換え時のシミュレーション

Fig. 8. Effect of the exchange of the generator model type.

ある。

両者の結果はほぼ一致しており、モデル切換えが良好に行われていることがわかる。なお、シミュレーションに要した計算時間はモデル切換えを行わない場合が 150.4 s で、行った場合が 12.1 s であった。

本論文で行った計算は、いずれも SUN ワークステーション Sparc Station 2 を用いた。

本手法において、3 機モデルシステムの解析に用いた微分方程式の数を考えると、発電機が八次、AVR が一次、調速機が一次であり、3 機システムの合計は 30 次である。これに対して、文献(1)の詳細法では、送電システムに対しても微分方程式表現が必要なため、同じモデルシステムに対して合計 56 次の連立微分方程式が必要となる。従って、本手法では、送電システム表現の分だけ計算時間ならびにメモリー容量が縮小され、この効果はシステム規模が大きくなると更に顕著になると考えられる。また、本手法では、計算途中での発電機モデルの切換えを簡単に行えるため、その結果、計算時間は更に飛躍的に短縮される。

6. 結 論

本論文では、系統短絡故障直後に同期機がいったん減速する逆動揺現象について、これを多機系統におい

て解析するための有効な一手法を提案した。得られた結果を以下に要約する。

(1) 一機系統を対象に短絡リアクタンスを定義し、これにより、送電システムの過渡現象を発電機の微分方程式に組み込んだ定式化を行った。

(2) 多機系統において短絡電流を計算することにより、等価的に短絡リアクタンスを求めた。

(3) 計算時間の短縮のために、過渡現象収束後に同期機モデルを切り換える方式を提案した。

(4) 一機系統ならびに多機システムモデルについて数値計算を行った結果、期待どおりの良好な結果を得た。

本論文で提案した手法は、三相が平衡した故障に対する解析法である。文献(1)に述べられているように、同期機逆動揺現象は一線地絡や二相短絡のような非対称故障時にも発生することが知られている。非対称故障時における提案手法の適用は今後の課題である。

(平成 4 年 10 月 1 日受付, 同 4 年 12 月 14 日再受付)

文 献

- (1) 熊野, 他:「同期機の逆動揺現象の過渡安定度への影響」, 電学論 B, 109, 403 (平元-9)
- (2) 関根: 電力系統過渡解析論 (昭 58) オーム社
- (3) 田村, 他:「安定度解析における電機子過渡現象の近似評価に関する提案」, 電学論 B, 110, 366 (平 2-4)
- (4) 三谷, 他:「母線への注入電流に着目した電力システムの安定度解析手法の開発」, 平 4 電気学会電力・エネルギー部門大会
- (5) Y. Yao-nan: Electric Power System Dynamics (1983) Academic Press inc., New York
- (6) J.H. Chow, et al.: "A Decomposition of Near-Optimal Regulators for Systems with Slow and Fast Modes", IEEE Trans. Automatic Control, AC-21, 701 (1976)
- (7) 電気学会通信教育会: 電気機器工学 II (昭 40)

付 録

六次の同期機モデル

制動巻線と界磁巻線の応答および動揺方程式を考慮した同期機モデルは以下のように表現される。

$$\left. \begin{aligned} p e_q' &= (E_{fd} - e_{q1})/T_{d0}' \\ p e_d' &= -e_{d1}/T_{q0}' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付 1)$$

$$\left. \begin{aligned} p e_q'' &= -\{(x_d' - x_d'')/(x_d - x_d'')\} e_{q2}/T_{d0}'' \\ p e_d'' &= -\{(x_q' - x_q'')/(x_q - x_q'')\} e_{d2}/T_{q0}'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付 2)$$

$$\left. \begin{aligned} M p \omega &= -D(\omega - 1) + (P_m/\omega) \\ &\quad - \{e_d'' i_d + e_q'' i_q + (x_q'' - x_d'') i_d i_q\} \\ p \theta/\omega_r &= \omega - 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付 3)$$

$$\left. \begin{aligned} v_d &= -r_a i_d + x_q'' i_q + e_d'' \\ v_q &= -x_d'' i_d - r_a i_q + e_q'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(\text{付 } 4)$$

$$\left. \begin{aligned} e_q' &= -(x_d - x_d') i_d + e_{q1} \\ &\quad + (x_d - x_d') / (x_d - x_d'') e_{q2} \\ e_d' &= (x_q - x_q') i_q + e_{d1} \\ &\quad + (x_q - x_q') / (x_q - x_q'') e_{d2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(\text{付 } 5)$$

$$\left. \begin{aligned} e_q'' &= -(x_d - x_d'') i_d + e_{q1} + e_{q2} \\ e_d'' &= (x_q - x_q'') i_q + e_{d1} + e_{d2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(\text{付 } 6)$$

三 谷 康 範 (正員)

昭和34年1月5日生。61年3月大阪大学大学院電気工学専攻博士課程修了。63年5月同大学低温センター助手、現在、同工学部電気工学科講師。電力系統の動特性解析に従事。工学博士。システム制御情報学会、IEEE 会員。

辻 毅 一郎 (正員)

昭和18年9月18日生。43年3月大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。48年6月ケース工科大学大学院システム工学専攻博士課程修了。同年8月大阪大学工学部電気工学科助手、同講師、同助教授を経て、63年12月同教授。この間、一時国際応用システム分析研究所(IIASA)研究員。Ph. D.。応用システム分析に従事。エネルギー・資源研究会、IEEE 会員。