相座標同期機モデルによる電力系統過渡解析の 数値安定性の向上

正員 曹 祥麟 (東電ソフトウェア) 正員 三ツ間 均 (東京電力)

正員 栗田 篤 (東電ソフトウェア) 正員 多田 泰之 (東京電力)

正員 岡本 浩 (東京電力)

Improvement of Numerical Stability of Electro-Magnetic Transients Simulation by Use of Phase-Domain Synchronous Machine Model

Xianglin Cao, Member, Atsushi Kurita, Member (Toden Software Inc.)

Hitoshi Mitsuma, Member, Yasuyuki Tada, Member, Hiroshi Okamoto, Member (Tokyo Electric Power Co.)

The present paper proposes the use of phase-domain (abc frame) generator model in the electro-magnetic transient analysis instead of conventional dq0-domain generator model in order to improve numerical stability.

The drawback of the conventional dq0-domain machine model is that the prediction of a number of electrical variables as well as machine speed is needed in order to interface the circuit of a machine model with the rest of the power system network and the prediction of these variables leads to numerical instability. In contrast, the prediction of electrical variables is not needed in the proposed phase-domain model.

In the paper, the phase-domain machine model is developed. The proposed model is validated by comparisons with an existing EMTP type-59 machine model. The paper makes it clear that the numerically stable solutions are obtained by using the proposed model even in the cases where numerical instabilities occur when the existing type-59 model is used.

キーワード：同期機モデル，dq0座標系，相座標系，EMTP，過渡解析

1. まえがき

電力系統の過渡解析には、サージ解析、安定度解析、低周波共振 (SSR) 解析、交直連系統の動特性解析など多方面の分野があり、電力系統の大規模・複雑化にともない、信頼性の高い解析手法へのニーズがますます高まっている。EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) はこの分野の代表的なソフトウェアであり、世界各国で広範に利用されているものである。

電力系統には、多数の要素が含まれているが、その過渡特性を支配する最も大きな要素は同期機であり、精度の高い過渡解析のためには、同期機の適切なモデル化が重要である。よく知られているように、同期機を相座標 (abc座標) によってモデル化すると、インダクタンス行列が回転子位置によって変化することになるので、取扱がかなり複雑になる。そこで、EMTPも含め、既存の多くの過渡解析プログラムでは、電圧・電流等の諸量のdq0座標への変換を行ったモデル (いわゆるParkモデル) を利用している。しかし、EMTP等の瞬時値レベルの過渡解析プログラムでは、同期機以外の系統モデル (送電線、変圧器等) について相座標による計算を行っているため、相座

標のネットワークにdq0座標の発電機を結合するための変換が必要になる。

そこで、現在のEMTPでは、abc座標のネットワークにdq0座標の同期機を結合するために2つの方法が用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。一つはネットワークをテブナン等価回路により表現してdq0座標に変換する方法 (補償法: Compensation Method) である。この方法は2章でも述べるように精度が高いが、同一のサブネットワークに当該同期機以外の非線形要素があつてはならないという使用上の大きな制限があり、現在ではユニバーサルマシン (UM) モデルでしか利用されていない。

もう一つの方法は同期機をテブナン等価回路によって表現して相座標に変換し、ネットワークに結合する方法 (予測法: Prediction Method) である。この方法では、補償法のような制限がないため、一般的な系統の解析を行う際に有用であり、TYPE-59同期機モデルとしてEMTPに組み込まれている。この同期機モデルは長年に亘って改良されており、多くの場合にはこのモデルを使って、信頼できる解析結果を得ることが出来る⁽³⁾。しかし、この方法では、同期機の相座標系のテブナン等価回路を作るために、回転子角速度の他に、電機子に生じる速度電圧や電流

等の値を予測する必要がある、この予測誤差によって数値不安定が発生するケースも報告されている⁽⁴⁾。

一方、同期機を相座標で定式化する場合には、回転子角速度のみの予測による結合が可能となり、これよりも速く変化する電圧、電流等の電気系の変数の予測が不要となる。したがって、予測誤差が減少し、数値安定性を向上させることが期待できる。そこで筆者らは、この予測誤差による数値不安定性の問題を解決するために、相座標形式の同期機モデルの利用を提案してきた⁽⁴⁾。また、最近になって、相座標同期機モデルを使うことにより、飽和の取扱いを容易にする試みが報告されている⁽⁵⁾。ものの、数値安定性の観点からの相座標系の同期機モデルについての議論は従来行われてこなかったものである。

本稿では、まず現在のEMTPで用いられているdq0座標の同期機モデルの計算アルゴリズムを示し、その問題点を整理する。次に、提案する相座標同期機モデルの定式化を行う。また数値例を通して、従来のTYPE-59同期機モデルでは数値不安定が発生していた幾つかのケースについて、提案手法で正しく計算が行われていることを示す。

2. 従来のdq0座標同期機モデルの問題点

dq0座標系による同期機の電気系の基本式は(1)式に示される。ここでは、同期機の電気系がd、q、0巻線、励磁巻線、d軸ダンパー巻線、q軸渦電流巻線とq軸ダンパー巻線からなると考える。

$$[v_{dq0}] = -[R][i_{dq0}] - [L_{dq0}] \frac{d}{dt} [i_{dq0}] + [u_{dq0}] \dots (1)$$

ここに、 $[v_{dq0}]$ 、 $[i_{dq0}]$ は巻線の電圧、電流ベクトル、 $[R]$ は巻線の抵抗からなる 7×7 対角行列、 $[L_{dq0}]$ は巻線のインダクタンスからなる 7×7 定数行列である。また、 $[u_{dq0}] = [-\omega \lambda_d \ \omega \lambda_q \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ は速度電圧ベクトル、 λ_d 、 λ_q はd巻線、q巻線の磁束鎖交数である。

同期機の機械系の基本式は(2)式に示される。ここでは、同期機の機械系がタービン、同期機、励磁機と、それらをつなげる軸からなると考える。

$$[J] \frac{d^2}{dt^2} [\theta] + [D] \frac{d}{dt} [\theta] + [K] [\theta] = [T_{turb}] - [T_{gen/exc}] \dots (2)$$

ここに、 $[\theta]$ は質点の角度ベクトル、 $[J]$ は質点の慣性モーメントからなる対角行列、 $[D]$ は質点のダンピング係数からなる3重対角行列、 $[K]$ は軸スプリング係数からなる3重対角行列である。 T_{turb} はタービンの入力トルク、 $T_{gen/exc}$ は同期機・励磁機の電磁トルクである。

dq0座標系の同期機の電磁トルクの計算式は次式に示される。

$$T_{gen} = N_p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \dots (3)$$

ここに、 N_p は同期機の極対数である。

補償法のdq0座標同期機モデルのフローチャートが図1に示される。同図からわかるように、補償法のdq0座標同期機モデルは予測変数が回転子の角速度しかないだけでなく、その予測値に対する繰り返し計算が同期機側に限られるので、シミュレーションの精度と安定性から見て一番望ましいと言える。しかし、同期機がdq0座標で表現されるので、同期機以外のネットワークをテブナン等価回路で表現し、dq0座標系に変換する必要がある。その解の一義性のために、同一のサブネットワークに当同期機以外の非線形要素があってはいけない。

図1 補償法のフローチャート

Fig.1. Flowchart of dq0-domain SM model with compensation method

一方、予測法では、同期機をテブナン等価回路によって表現するために、まず(1)式に台形法を施す。

$$[v_{dq0}(t)] = -[R] + \frac{2}{\Delta t} [L_{dq0}] [i_{dq0}(t)] + [u_{dq0}(t)] + [hist_{dq0}(t-\Delta t)] \dots (4)$$

ここに、

$$[hist_{dq0}(t-\Delta t)] = [-[R] + \frac{2}{\Delta t} [L_{dq0}]] [i(t-\Delta t)] - [v_{dq0}(t-\Delta t)] + [u_{dq0}(t-\Delta t)]$$

そして、(4)式より回転子の各変数を消去し、d、q、0軸等価回路の方程式を求める。

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_d & & \\ & R_q & \\ & & R_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_o(t) \end{bmatrix} \dots (5)$$

ここに、 e_d 、 e_q 、 e_o は等価電圧源、 R_d 、 R_q 、 R_o は等価抵抗である。

等価電圧源 e_d 、 e_q に速度電圧 u_d 、 u_q が含まれている。速度電圧 u_d 、 u_q を予測すれば、d、q、0軸の各々の等価回路が得られる。

ところが、凸極機では、 R_d と R_q が等しくないの、(5)

式に示される d, q, 0 軸等価方程式をそのまま相座標に変換すると、非対称の時変数行列が得られる。これを避けるために、EMTP の TYPE-59 同期機モデルは図 2 のように、d, q 軸等価回路について平均抵抗 R_{av} を使い、 i_d , i_q を予測し、等価電圧源を補正するという方法を使っている。

$$R_{av} = \frac{R_d + R_q}{2}$$

図 2 変形後の d, q 軸等価回路
Fig.2. Modified equivalent circuit for direct and quadrature axis

平均抵抗 R_{av} を使えば、d, q, 0 軸等価回路方程式が (6) 式に変わる。

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{d.m} \\ e_{q.m} \\ e_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{av} & 0 \\ 0 & R_{av} \\ 0 & R_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_o(t) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (6)$$

ここに、

$$e_{d.m} = e_d - \frac{R_d - R_q}{2} i_q(t)$$

$$e_{q.m} = e_q + \frac{R_d - R_q}{2} i_d(t)$$

そして、回転子の角速度 ω を予測し、回転子の電気角度 β を決めれば、(6) 式の dq0 軸等価回路方程式を相座標に変換して、相座標の同期機等価回路方程式が得られる。

EMTP では、角速度 ω の予測に (7) 式、速度電圧 u_d , u_q と電流 i_d , i_q の予測に (8) 式を用いている。

$$\omega(t) = 2\omega(t - \Delta t) - \omega(t - 2\Delta t) \quad \dots\dots (7)$$

$$x(t) = \frac{5}{4} x(t - \Delta t) + \frac{1}{2} x(t - 2\Delta t) - \frac{3}{4} x(t - 3\Delta t) \quad \dots\dots (8)$$

予測法の dq0 座標同期機モデルのフローチャートが図 3 に示されている。図 3 からわかるように、回転子の角速度 ω のほかに速度電圧 u_d , u_q と電流 i_d , i_q も予測されているにもかかわらず、回転子の角速度のみに繰り返し計算が行われる。それは系統の状態変化に際して、 u_d , u_q , i_d , i_q が変化直後の時点では前の状態の延長線にある、つまり一種の遅れが存在することを意味する。これがこのモデルの数値不安定の原因と推定される。

以上の検討から、dq0 座標同期機モデルの問題点は同期機とそれ以外のネットワークとの座標系の相違から生じるものであると推察される。これが本論文の提案する相座標同期機モデルの導入の背景である。

3. 提案する相座標同期機モデル

図 3 予測法のフローチャート
Fig.3. Flowchart of dq0-domain SM model with prediction method

(3.1) 基本式の提示

相座標同期機モデルの電気系の基本式は (9) 式に示される。ただし、ここでは仮想的な d, q, 0 巻線のかわりに物理的な a, b, c 相巻線を用い、そして、7 つの巻線を添字 a, b, c, f, D, g, Q で区別する。また、相座標系では、 $[L(t)]$ が時変数行列である。

$$[v(t)] = -[R][i(t)] - \frac{d}{dt} \{ [L(t)][i(t)] \} \quad \dots\dots (9)$$

同期機の機械系の基本式は (2) 式をそのまま用いるが、相座標同期機の電磁トルクの計算式は次式に示される。

$$T_{em} = -\frac{1}{2} [i(t)]^T \left\{ \frac{d}{d\beta} [L(\beta)] \right\} [i(t)] \quad \dots\dots (10)$$

ここに、 β は同期機の回転子電気角度 ($\beta = N_p \theta_{r.m}$) である。

(3.2) 離散時間系の表現

(9) 式を台形積分法によって離散化すると、(11) 式が得られる。

$$[v(t)] = -\left\{ [R] + \frac{2}{\Delta t} [L(t)] \right\} [i(t)] + [\text{hist}(t - \Delta t)] \quad \dots\dots (11)$$

ここに、

$$[\text{hist}(t - \Delta t)] = \left\{ -[R] + \frac{2}{\Delta t} [L(t - \Delta t)] \right\} [i(t - \Delta t)] - [v(t - \Delta t)]$$

さらに、

$$[v_i(t)] = [v_a(t) \ v_b(t) \ v_c(t)]^T,$$

$$\begin{aligned}
 [v_2(t)] &= [v_1(t) \ 0 \ 0 \ 0]^T, \\
 [i_1(t)] &= [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T, \\
 [i_2(t)] &= [i_1(t) \ i_D(t) \ i_q(t) \ i_0(t)]^T, \\
 [\text{hist}_1(t-\Delta t)] &= \\
 &[\text{hist}_a(t-\Delta t) \ \text{hist}_b(t-\Delta t) \ \text{hist}_c(t-\Delta t)]^T, \\
 [\text{hist}_2(t-\Delta t)] &= [\text{hist}_1(t-\Delta t) \ \text{hist}_D(t-\Delta t) \\
 &\text{hist}_q(t-\Delta t) \ \text{hist}_0(t-\Delta t)]^T, \\
 [r_{11}(t)] &= \begin{bmatrix} R_a & & \\ & R_b & \\ & & R_c \end{bmatrix} + \frac{2}{\Delta t} \begin{bmatrix} L_{aa}(t) & L_{ab}(t) & L_{ac}(t) \\ L_{ba}(t) & L_{bb}(t) & L_{bc}(t) \\ L_{ca}(t) & L_{cb}(t) & L_{cc}(t) \end{bmatrix}, \\
 [r_{12}(t)] &= \frac{2}{\Delta t} \begin{bmatrix} L_{a1}(t) & L_{aD}(t) & L_{a2}(t) & L_{a0}(t) \\ L_{b1}(t) & L_{bD}(t) & L_{b2}(t) & L_{b0}(t) \\ L_{c1}(t) & L_{cD}(t) & L_{c2}(t) & L_{c0}(t) \end{bmatrix}, \\
 [r_{21}(t)] &= [r_{12}(t)]^T, \\
 [r_{22}(t)] &= \begin{bmatrix} R_1 & & & \\ & R_D & & \\ & & R_2 & \\ & & & R_0 \end{bmatrix} + \frac{2}{\Delta t} \begin{bmatrix} L_{11} & M_{1D} & 0 & 0 \\ M_{D1} & L_{DD} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{22} & M_{20} \\ 0 & 0 & M_{02} & L_{00} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

とすれば、(11)式は(12)式のように書き直せる。

$$\begin{bmatrix} [v_1(t)] \\ [v_2(t)] \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [r_{11}(t)] & [r_{12}(t)] \\ [r_{21}(t)] & [r_{22}(t)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_1(t)] \\ [i_2(t)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\text{hist}_1(t-\Delta t)] \\ [\text{hist}_2(t-\Delta t)] \end{bmatrix} \quad \dots\dots (12)$$

(12)式より回転子巻線の各変数を消去すると、同期機の相座標等価方程式が得られる。

$$[v_1(t)] = [e_{\text{qu}}(t)] - [R_{\text{qu}}(t)][i_1(t)] \quad \dots\dots (13)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 [e_{\text{qu}}(t)] &= [\text{hist}_1(t-\Delta t)] \\
 &- [r_{12}(t)][r_{22}]^{-1} \{ [\text{hist}_2(t-\Delta t)] - [v_2(t)] \} \\
 [R_{\text{qu}}(t)] &= [r_{11}(t)] - [r_{12}(t)][r_{22}]^{-1}[r_{21}(t)]
 \end{aligned}$$

また、回転子巻線の電流は次式により計算できる。

$$\begin{aligned}
 [i_2(t)] &= [r_{22}]^{-1} \{ [\text{hist}_2(t-\Delta t)] - [v_2(t)] \} \\
 &- [r_{22}]^{-1}[r_{21}(t)][i_1(t)] \quad \dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

(13)式のように、同期機は等価抵抗行列 $[R_{\text{qu}}(t)]$ とその背後の3相電圧源 $[e_{\text{qu}}(t)]$ により表現される(図4を参照)。この等価抵抗行列は時変数行列であるが、対称行列なので、そのまま同期機以外のネットワーク方程式に組み込むことができる。

図4 同期機の等価回路

Fig.4. Equivalent circuit of synchronous machine

(3.3) フローチャート

相座標同期機モデルのフローチャートを図5に示す。

図5からわかるように、相座標同期機モデルでは、変数の予測は回転子の角速度 ω のみで済む。なお、回転子の角速度 ω に対する繰り返し計算が不十分であるが、機械系の変数は電気系の変数より時間変化がはるかに緩い⁽¹⁾⁽⁶⁾なので、その予測は十分信頼できる。また、本モデルでは従来の予測法と同じように、同一のサブネットワークに当該同期機以外の非線形要素(他の同期機なども含む)があってもよい。この点が本手法の大きな特長である(前述の通り、補償法では同一のサブネットワークに当該同期機以外の非線形要素があってはならない)。

図5 相座標同期機モデルのフローチャート

Fig.5. Flowchart of phase-domain SM model

4. シミュレーションによる検証結果

本章では、3章で導出した相座標同期機モデルを、実際にEMTPに組み込んで利用した場合のシミュレーションの数値安定性向上の効果について、二つのケースに分けて整理検討する。

(4.1) 不平衡送電線に接続される場合

図6のように送電線モデルを不平衡モデルとした1機無限大母線モデルのシミュレーションを考える。なお、図6の同期機定数は付録1、送電線定数は付録2に示す。また、簡単のために故障などの擾乱は考慮しないが、現在EMTPの同期機モデルは初期値計算が不平衡電力系統に正確に対応できないので、過渡計算へ移行する時に振動が起こる。

予測法のdq0座標同期機モデル(TYPE-59モデル)でのシミュレーションでは、図7に同期機の電磁トルクの波形のようにシミュレーション開始後、積分刻み時間毎に振動する数値振動が段々拡大してゆく。しかし、2章で示したように、予測法のdq0同期機座標モデルよりも予測変数の数の少ない補償法のdq0座標同期機モデル

(UMモデル)で計算すると、電磁トルクの波形は図8のようになり定常状態をシミュレートすることができている。

図6 不平衡線路でつながる1機対無限大母線モデル系統
Fig.6. One machine to infinite busbar model system
with unbalanced line

図7 TYPE-59モデルのシミュレーション結果($\Delta t=100\mu s$)
Fig.7. Torque simulation with the EMTP
Type-59 SM model($\Delta t=100\mu s$)

図8 UMモデルのシミュレーション結果($\Delta t=100\mu s$)
Fig.8. Torque simulation with the EMTP
UM model($\Delta t=100\mu s$)

図9 相座標同期機モデルのシミュレーション結果
($\Delta t=100\mu s$)
Fig.9. Torque simulation with the phase-domain
SM model($\Delta t=100\mu s$)

さらに、本論文で提案した相座標同期機モデルでシミュ

レーションした結果を図9に示す。

図8や図9のように予測変数が回転子の角速度だけである補償法のd q 0座標同期機モデルと今回提案した相座標同期機モデルでは、シミュレーション結果を見ると、線路の不平衡によって流れる逆相電流に起因する商用周波数の2倍の周波数(120Hz)でのトルクの脈動が安定に現れており、物理的に見ても妥当な結果となっていることがわかる。

また、積分刻み時間の計算結果に対する影響も調べた。補償法モデルと相座標モデルは積分刻み時間を変えても計算結果が変わらないが、予測法モデルは積分刻み時間を小さくすれば逆に発散が早くなることがある。

(4.2) TACSを含む場合

TACS (Transient Analysis of Control Systems) はEMTPの制御系モデルであり、TACSとEMTPのインターフェイスに1ステップの計算遅れが存在するため、計算ステップ毎に値が振動発散する数値不安定現象が発生することがあり、これを文献[7]では、TACSとEMTPの間に一種のローパスフィルターを挿入することで、回避する手段を報告した⁽¹⁾。

(a) 主回路
(a) Main circuit

(b) SVCブロック
(b) SVC block

図10 SVCを含むモデル系統
Fig.10. model system with SVC

文献[7]で利用したモデル系統を図10に示し、その同期機の定数は図6の同期機と同じ定数を持つとする。モデル系統はSVCがTACSにより電流源として模擬されており、予測法のd q 0座標同期機モデル(TYPE-59モデル)では、図11(a)のような数値振動が発生する。この数値振動の発生原因は、非線形なモデルも含まれるので、正確に表現することは難しいが、TACS-EMTPインターフェイスの遅れと、2章で述べた予測法のd q 0座標同期機モデルの多変数の予測による遅れとの相乗効果

であると考えられる。文献[7]では、TACS-EMTPインターフェイスの遅れに着目して、この数値不安定の問題を解決したが、ここでは今回提案した相座標同期機モデルでこの問題の解決を試みた。結果を図11(b)に示す。この図から分かるように、予測法のd q 0座標同期機モデルでは数値振動を発生していたデータと全く同じ状態でも、相座標同期機モデルでは数値振動の発生が抑制され、文献[7]とほぼ同一の結果を得た。

(a) TYPE-59モデルのシミュレーション結果 ($\Delta t=100\mu s$)

(a)With the EMTP Type-59 SM model($\Delta t=100\mu s$)

(b)相座標同期機モデルのシミュレーション結果

($\Delta t=100\mu s$)

(b)With the phase-domain SM model($\Delta t=100\mu s$)

図11 SVCの電流出力

Fig.11. Output current of SVC

図6のケースでは、補償法のd q 0座標同期機モデルでも、相座標同期機モデルと同じように安定性の高い計算を行うことが可能になることを示したが、2章でも述べたように、補償法のd q 0座標同期機モデルは、電力系統を分布定数線路で分離しなければ当該同期機以外の非線形要素を含むことができないので、SVCを含む図10のケースでは、補償法のd q 0座標同期機モデルの適用ができなくなった。また、積分刻み時間との関係から考えると、シミュレーションするシステムを分布定数線路で分離することは不可能である場合が多い(長さがL[m]の架空送電線を分布定数線路で表現した場合、理論的に積分刻み時間は $L/C[s]$ 以下にする必要がある。Cは光速)。

(4.3) 計算時間の比較

補償法のd q 0座標同期機モデルは系統側をテブナン等価回路に置き換える必要があるために、計算時間が大きくなる欠点を有する。図10の例題(解析時間は1秒で)においても、補償法のd q 0座標同期機モデルの計算時間が4.202秒であり、相座標同期機モデルの計算時間の3.656秒を上回った。

一方、予測法のd q 0座標同期機モデルは時不変の等価回路抵抗行列を持つに対して、本提案の相座標同期機モデルは時変数の等価回路抵抗行列を持つので、各時間ステップで系統全体のコンダクタンス行列の再三角化が必要となり、計算時間が増加することになる。図6の例題(解析時間は100msで)においても、相座標同期機モデルの計算時間が0.665秒であり、予測法のd q 0座標同期機モデルの計算時間の0.411秒を上回った。また、この計算時間の増加は系統規模が大きいほど著しくなると考えられる。ここは、系統規模が変わった場合の計算時間について、表1に以下の数値を掲載する。

表1 予測法と相座標法との計算時間の比較

Table 1.Comparison between calculation times with the Type-59 model and the phase-domain model

系 統 規 模	C a s e 1		C a s e 2	
ノード数	34		190	
ブランチ数	30		270	
非線形要素数	0		6	
同期機数	1		3	
比 較	予測法	相座標法	予測法	相座標法
計算時間(秒)	26.8	44.4	70.1	308.3
三角化回数	11	50001	1580	50001

(1)いずれのケースも積分刻み時間は $100\mu s$ 、解析時間は5秒

(2)両ケースも同期機の飽和は考慮せず。また、Case2のみ系統内の変圧器の飽和を考慮

5. あとがき

本論文はシミュレーションの数値安定性の向上を目的に、従来EMTPで標準的に使われるd q 0座標同期機モデルの問題点を検討した上、相座標同期機モデルを提案した。更に、EMTPに実際に当モデルを組み込んだシミュレーションを実施して、当モデルの有効性を実証した。

提案した相座標同期機モデルは計算時間が予測法のd q 0座標同期機モデルよりも大きくなるものの、補償法のd q 0座標同期機モデルと同等の数値安定性を備えており、さらに、同一のサブネットワークに当該同期機以外の非線形要素があってもならないという補償法の使用上の制限を取り除いたので、今後電力系統解析にその利用が期待できる。

なお、今後の課題として、下記のものがあり、引き続き検討する予定である。

(1)提案した相座標同期機モデルにおいて時変数インダクタンス行列による計算時間の増加の対策(再三角化についての計算時間は同期機ノードを一番最後に持ってくるよ

- うなオーダリングをすることで高速化できると考えている),
 (2)相座標同期機モデルへの飽和の影響の組み込み,
 さらに,
 (3)系統不平衡時の同期機の初期値計算の改善。
 (平成8年7月25日受付, 同8年11月25日再受付)

文 献

- (1) H.W.Dommel, EMTP Theory Book, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1986
- (2) H.K.Lauw, "Interfacing for universal multi-machine modelling in an electromagnetic transients program", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, pp. 2367-2373, Sept. 1985.
- (3) V.Brandwajn, "Investigation and improvement of long term stability for the TYPE-59 synchronous machine model", EMT P Newsletter, vol.4, no.2, pp.54-57, Nov. 1983.
- (4) 曹祥麟・栗田篤・多田泰之・武井明久・三ツ間均, "EMTPにおける高精度発電機モデルの開発", 平成7年電力技術研究会, PE-95-132
- (5) J.R.Marti, K.W.Louie, "A Phase-Domain Synchronous Generator Model Including Saturation Effects", IEEE PES 96 WM 269-1 PWRS
- (6) 関根泰次, "電力系統過渡解析論", オーム社, 昭和59年
- (7) X.Cao, A.Kurita, T.Yamanaka, Y.Tada, H.Mitsuma, "Suppression of Numerical Oscillation Caused by the EMTP-TACS Interface Using Filter Interposition", IEEE PES 96 WM 094-3 PW RD

付録1 同期発電機定数

定格容量: 1000.0 (MVA)
 無負荷励磁電流: 800.0 (A) (磁気飽和無視)
 周波数: 60Hz
 $L_d = 1.0$ (pu), $L_{d1} = 1.097$ (pu), $L_{d0} = 1.007$ (pu)
 $M_{d1} = M_{d0} = M_{f1} = 0.847$ (pu)
 $L_q = 0.66$ (pu), $M_{q1} = 0.507$ (pu), $L_{q0} = 0.767$ (pu)
 $R_a = 0.005$ (pu), $R_f = 0.000392$ (pu)
 $R_D = 0.027$ (pu), $R_s = 0.034$ (pu)
 極対数: 5, 質点数: 2
 タービンの慣性定数: 436.9×10^3 (kg·m²)
 発電機の慣性定数: 728.2×10^3 (kg·m²)
 スプリング係数: 1493.5×10^6 (N·m/rad)

付録2 送電線定数 (3相π型回路表示)

	a 相			b 相			c 相		
	R (Ω)	L (mH)	C (μF)	R (Ω)	L (mH)	C (μF)	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
a 相	.436	988	.165						
b 相	.285	326	-.003	.430	984	.169			
c 相	.274	236	-.009	.285	326	-.003	.436	988	.165

曹 祥 麟

(正員) 1943年5月27日生。1965年7月中国武漢水利電力大学電気工学科卒業。同年8月中国西南電力設計院入社。1981-83年横浜国立大学電気工学科芹澤研究室研究生。1996年3月東電ソフトウェア(株)入社。現在, 同社応用技術部課長。電力系統の解析を担当。IEEE会員

栗 田 篤

(正員) 昭和30年8月8日生。56年3月静岡大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月, 東京電力(株)入社。現在, 東電ソフトウェア(株)に出向, 同社応用技術部次長。主として, 電力系統の解析および制御に関する研究に従事。平成2年, 平成8年電気学会論文賞受賞。IEEE会員

三ツ 間 均

(正員) 昭和32年生。55年3月東京電機大学電気工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。現在, 同社電力技術研究所系統研究室主任研究員。主として, 電力系統の解析および制御に関する研究に従事。

多 田 泰 之

(正員) 昭和38年3月20日生。56年3月埼玉県立川越工業高等学校電気科卒業。同年4月, 東京電力(株)入社。63年東電学園大学部卒業。平成元年4月より, 同社電力技術研究所系統研究室で, 電力系統の研究, 解析業務に従事。平成8年電気学会論文賞受賞。この間, 平成元年4月より1年間東京大学工学部電気工学科受託研究員。IEEE会員

岡 本 浩

(正員) 昭和40年12月9日生。平成5年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月, 東京電力(株)入社。現在, 同社電力技術研究所系統研究室にて, 電力系統の解析および制御に関する研究に従事。平成8年電気学会論文賞受賞。博士(工学)。IEEEおよび計測自動制御学会の会員