超速応型超電導発電機の等価回路モデリング

正員 天野 博之 (電力中央研究所) 正員 亀田 秀之 (電力中央研究所)
 正員 熊野 照久 (電力中央研究所) 正員 谷口 治人 (電力中央研究所)
 正員 中村 英之 (株式会社 東芝) 正員 今井 義博 (Super-GM)

Equivalent Circuit Modelling of a Quick-Response Type Superconducting Generator

Hiroyuki Amano, Member, Hideyuki Kameda, Member, Teruhisa Kumano, Member, Haruhito Taniguchi, Member (CRIEPI), Hideyuki Nakamura, Member (Toshiba Corp.), Yoshihiro Imai, Member (Super-GM)

This paper describes equivalent circuit modelling of a quick-response type superconducting generator considering accuracy for variations of field current and armature current. Comparison with testing results shows that the proposed equivalent circuit model has high accuracy. This model enables us to analyze accurately stability enhancement by introducing superconducting generators.

キーワード：超速応型超電導発電機，等価回路，定数算定法，ダンパ試験，三相突発短絡試験

keyword: quick-response type superconducting generator, equivalent circuit, parameter identification method, damper test, 3-phase sudden short circuit test

1. はじめに

超電導発電機（以下、超電導機）は、機器性能の向上、効率向上、小型軽量化、大容量化などの特長があり、系統への導入により系統全体としてのコスト低減、安定度の向上などの効果が期待されている。

超電導機への実用化に向けて、安定度向上効果、系統事故時に受けるストレスなどを精度良く解析できる超電導機モデルを開発することは重要である。現用機に対しては Park の式をもとにした等価回路モデルがあり、その定数は比較的少ないデータから同定を行うことができ、精度の良い電力系統の解析が可能である。

しかし、超電導機の回転子は、界磁巻線に超電導体が用いられ、その外側を輻射シールドと磁気シールドの機能を兼ね備えたダンパで包み込んだ多重円筒構造となっている点等で現用機と異なっており、モデル化の際にはこれに起因する磁束の関係を考慮する必要がある。

また超電導機のモデルとしては、超電導界磁巻線の安定性解析および安定度向上効果の詳細な検討のために、電機子側に加えて界磁側に関しても十分な精度が要求されるが、通常現用機で用いられることの多い等価回路（主磁束+個々の巻線の漏れ磁束という形態）および定数算定法は電機子側の模擬を主眼としており、界磁側の精度は十分とは言えない⁽¹⁾。

以上の理由から、現用機の等価回路モデルをそのまま超

電導機に適用することはできず、電機子、界磁の双方を精度良く模擬できる超電導機等価回路モデルおよび定数算定法の開発が望まれる。

現在実用化が検討されている超電導発電機としては、大別して低速応型と超速応型の2種類がある⁽²⁾。

低速応機は主に都市周辺の中容量機あるいは都市近郊の小容量機への導入をねらったものであり、高い無効電力調整能力（電圧維持能力）と超電導機の特長である低リアクタンス化による安定度向上効果を期待するものである。

一方、超速応機は遠隔地大容量機への導入を期待するものであり、系統安定度に関しては低リアクタンス化による向上効果に加え、超速応励磁により積極的に改善を計ろうというものである。

両者には以下の点で相違が見られる。すなわち、低速応機では外部から界磁巻線への変動磁界の侵入をできる限り遮蔽するため、2つの磁気シールドが設けられ、低温ダンパにより系統動揺周波数程度、常温ダンパにより倍周波数程度の変動磁界を遮蔽する。それに対して、超速応機では系統動揺抑制のために励磁制御の影響を電機子側に伝わりやすくするため、低温ダンパには磁気遮蔽効果は持たせない。

低速応機に関しては、既に等価回路および定数算定法を開発し、Super-GMにおいて開発および実証試験が行われた7万kW級の低速応機^{(3)~(5)}に対してこれを適用し、良好な結果を得た⁽⁶⁾。

本論文では、超速応機に対する等価回路モデリング法を

提案し、Super-GM において開発および実証試験が行われた 7 万 kW 級の超速応機（以下、超速応 C 機）に対してこれを適用し、その模擬精度を検証する。まず 2 章では、超速応 C 機では低励磁領域においてある種の飽和が見られたが、界磁電流を補正することにより等価回路による解析が可能であることを示す。次に 3 章で超速応機等価回路を提案し、4 章で定数の算定を行う。定数算定は低速応機とはほぼ同様であるが、前述の飽和のため一部低速応機とは異なる方法を用いる。5 章において実証試験の実測結果との対比から模擬精度の検証を行う。

2. 低励磁領域での飽和の取り扱い

超速応 C 機の無負荷飽和特性、三相短絡特性試験結果では、図 1 のように巻線取付軸のインコネル材の極低温時の磁化特性に起因すると考えられる飽和が観測された⁽²⁾。これは励磁が比較的小さい領域（200A 程度以下）で見られ、励磁が大きい通常の運転領域では一定値が上乘せされた直線となった。

これを考慮するためには、Park の磁束の式中で次のように定数項を導入すれば良いと考えられる。

図 1 低励磁での無負荷飽和特性、三相短絡特性
Fig. 1. Open-circuit and short-circuit characteristics under low excitation.

図 2 飽和による界磁電流の補正
Fig. 2. Compensation for saturation of field current.

$$\phi_d = -X_d i_d + [X_{ar}][i_r] + \phi_{d0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$[\phi_r] = -[X_{ar}] i_d + [X_r][i_r] + [\phi_{r0}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$[i_r] = [i_f, i_{kd1}, \dots]^T$$

（ i_f は界磁電流、 i_{kdi} は各ダンパ電流）

ただし、 $[\]$ は行列またはベクトル、添字の d は電機子（ d 軸）に関する諸量、 r はロータ側の諸量を表すものとする。 $[X_{ar}]$ は電機子（ d 軸）とロータ側の相互リアクタンス、 $[X_r]$ はロータ側の自己リアクタンスおよびロータ各部間の相互リアクタンスを表すものとする。また、 ϕ_{d0} は定数、 $[\phi_{r0}]$ は定数ベクトルである。

ここで、 $i'_f = i_f + \Delta i_f$ 、 $X_{mfd} \Delta i_f = \phi_{d0}$ （ X_{mfd} は励磁リアクタンス）とし、(1) 式中の定数項 ϕ_{d0} を消すと、以下ようになる。

$$\phi_d = -X_d i_d + [X_{ar}][i'_r] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$[\phi_r] = -[X_{ar}] i_d + [X_r][i'_r] + [\phi'_{r0}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$[i'_r] = [i'_f, i_{kd1}, \dots]^T$$

ただし、 $[X_r] \Delta i_f + [\phi'_{r0}] = [\phi_{r0}]$ であり、 $[\phi'_{r0}]$ は定数ベクトル。電圧に関する式の中では、 $[\phi_r]$ 中の定数項 $[\phi'_{r0}]$ は微分により消えるため、電圧の式は従来の Park の式と同じ形となる。 $[\phi'_{r0}]$ は鎖交磁束の初期値のみに影響する。

したがって、下記の注意点に留意すれば、超速応 C 機に対しても飽和領域にあたる通常の運転範囲では従来の Park の式すなわち等価回路による解析が可能である。

(1) X_d については、JEC-114(1979)⁽⁷⁾ に定められた「電機子端子三相短絡時の電機子定格電流を流すに要する界磁電流と無負荷電機子定格電圧を誘導するのに要する界磁電流の比」ではなく、「飽和領域での無負荷飽和特性と三相短絡特性の傾きの比」から算出する。

(2) 界磁電流については飽和の影響を考慮し、Park の式を解くことにより得られる界磁電流値を、以下のように修正する：

無負荷飽和試験での界磁電流の実測値を i_f [A] とする。また、無負荷飽和特性を、傾きは実測の飽和領域での傾きと同じで、原点を通るような直線と考えた場合の同じ端子電圧を発生させる界磁電流を i'_f [A] とする。 i_f と i'_f の関係は、飽和領域では $i_f = i'_f - \Delta i_f$ [A] となるので（図 2）、Park の式から得られる界磁電流値から Δi_f を引いた値を真の界磁電流値とする。

なお、Park の式中のリアクタンス（すなわち等価回路定数）および Δi_f に関しては、飽和領域での無負荷飽和特性を完全に線形で近似することはできないため、運転状態によって若干値を調整する必要があると考えられる。

3. 提案する超速応機等価回路

電機子側に加えて、界磁側についても良好な模擬精度を得るためには、超電導発電機特有の良好なダンパシールド

特性を考慮する必要がある。そこで、低速応機と同じような考え方⁽⁶⁾から、ダンパシールド特性に基づき等価回路の形を決定した。

ダンパ試験では、界磁回路を短絡または開放し、いろいろな周波数の電機子電流を流したときに、短絡界磁回路に流れる電流あるいは開放界磁端子に生じる電圧を測定した。この結果は図3のようになり、基本周波数60Hzから倍周波数120Hzあたりでは、界磁回路開放時に誘導される界磁電圧は1次の減衰特性、界磁回路短絡時に誘導される界磁電流は2次の減衰特性を持つ。

この減衰特性に対応して、超速応機の等価回路として図4を提案する。なお、超速応機では、低温ダンパの代わりに磁気遮蔽効果を持たない輻射シールドを用いているため、低速応機等価回路に比べて枝が1本少なく、常温ダンパ(R_{kd1} の枝)、ベッセル・巻線取付軸(R_{kd2} の枝)の渦電流を考慮するものとなっている。

ベッセル・巻線取付軸の部分は、電機子側から見た $X_d(s)$ には影響せず、ダンパシールド特性にのみ影響する(付録1参照)。このため、これを考慮することにより、ダンパシールド特性の模擬精度を改善でき、ひいては界磁電流の

模擬精度を改善できる。

なお、ロータの多重円筒構造に由来した鎖交磁束の関係について、提案する等価回路の意味するところは次の2点である。

- ステータとは鎖交せず、ロータ各部相互のみに鎖交する漏れ磁束が存在する(X_{ld1}, X_{ld2} に対応)。
- ダンパおよびベッセル・巻線取付軸については、それ自身のみに鎖交する漏れ磁束は無視できる(R_{kd1}, R_{kd2} に直列に入るリアクタンスは無視できる)。

提案した等価回路と機器定数および各伝達関数の間の関係は付録1に示す。

4. 超速応C機の等価回路定数算定

超速応機の等価回路は、低速応機の等価回路と比べて低温ダンパに対応する枝が1本少ないだけであり、低速応機に対して提案した定数算定法⁽⁶⁾と同様の定数算定により、電機子、界磁の双方を精度良く模擬できると考えられる。

低速応機の定数算定法は以下のようなものである。

STEP1: 電機子電流に着目し、三相突発短絡試験結果からJECに定められた方法により機器定数を算出する。

STEP2: 界磁電流直流分に着目し、三相突発短絡試験時の界磁電流波形から X'_d, T'_d を修正する。

STEP3: 界磁電流交流分に着目し、ダンパ試験結果をもとにダンパシールド特性を良好に模擬できるように、ベッセル・巻線取付軸部の機器定数を算出する。

超速応C機に対しても、STEP1, 2に関しては同様に行うことができる(付録2参照)。超速応C機の定格容量、電圧、電流は、それぞれ73MVA, 10kV, 4215Aである。しかし、超速応C機のダンパ試験は前述の低励磁の不飽和領域で行われたものであり、不飽和領域で行われたダンパ試験の結果を飽和領域における等価回路定数の算出に用いることはできない。

そこで、STEP3に関しては低速応機とは異なる以下の方法で定数算定を行った。超速応C機に対して行った定数算定のフローを図5に示す。なお、超速応C機は円筒機であるため、q軸の等価回路定数はd軸と同じであるとした。

〈4・1〉界磁電流交流分の模擬精度改善 STEP3では、界磁電流交流分に着目し、三相突発短絡試験での電機子電流波形をdq変換し⁽⁸⁾、このときのd軸電流交流分によって誘導される界磁電流交流分の関係を用いた。これは、基本周波数(60Hz)での界磁短絡時のダンパシールド特性に対応するものである。また、未知数は R_{kd2}, X_{ld2} の2つであり、これだけでは等価回路定数を決定できないため、ある周波数(50Hz)における界磁から見たインダクタンスの実測値を用いることにより、ベッセル・巻線取付軸部の等価回路定数を算出した。

横軸にd軸電流交流分の振幅、縦軸に界磁電流交流分の振幅をとったものを図6に実線で示す。 $f(x)$ は実測結果を最小自乗法で直線近似したものである。これより、 $\alpha = 0.0030$ となる(α については付録1参照)。

図3 ダンパ試験結果
Fig. 3. Damper test result.

図4 提案する超速応機等価回路
Fig. 4. Proposed equivalent circuit.

図5 超速応C機の定数算定フロー

Fig. 5. Flow chart of identification method of parameters for quick-response type machine C.

図6 d軸電流交流分と界磁電流交流分の関係

Fig. 6. Relation between AC component of d-axis current and that of field current.

また、実測結果によれば界磁から見たインダクタンスは50Hzにおいて0.053Hであった。等価回路で界磁から見たリアクタンスは、 $1/(2\pi\alpha)=53.05[\text{Hz}]$ 以上ではほぼ X_f となる。したがって、 $X_f=0.053 \times 2\pi \times 60 [\Omega]$ とすると、 $X_f = 0.0954 [\text{pu}]$ となる。

以上により等価回路定数を算出すると、表1のようになった(単位はpu)。ただし、 R_a は工場試験結果の0.005592 Ω を用いて0.00408 puとした。

(4・2) 等価回路および定数算定の妥当性の確認 等価回路および定数算定の妥当性の確認のために、提案した等価回路を用いて15%三相突発短絡試験のシミュレーションを

表1 等価回路定数(三相突発短絡試験で合致が良い定数)

Table 1. Circuit parameters fit for 3-phase sudden short circuit test.

X_{mfd}	0.251	X_{mfq}	0.251
X_{ld1}	0.044779	X_{lq1}	0.044779
X_{ld2}	0.3588	X_{lq2}	0.3588
X_f	0.0954	X_l	0.12
R_{kd1}	0.005232	R_{kq1}	0.005232
R_{kd2}	0.0666	R_{kq2}	0.0666
R_f	0.000203	R_a	0.00408

Testing condition: armature voltage 1,500 V (15% of rating)

図7 三相突発短絡試験

Fig. 7. 3-phase sudden short circuit test.

行った結果を図7に示す。

STEP1, 2, 3でそれぞれ電機子電流, 界磁電流直流分, 界磁電流交流分に着目して定数算定を行っているために、これらに関する精度は良好である。

特に、界磁電流交流分の位相関係の合致(すなわち、d軸電流に対して界磁電流がほぼ180度遅れている)は、界磁短絡時にはダンパシールド特性として2次の減衰特性を持つ必要があることを意味し、ベッセル・巻線取付軸部を考慮した等価回路の妥当性を裏付ける。

また、界磁電流交流分振幅の合致から、STEP3でのベッセル・巻線取付軸部の定数算定が有効であることがわかる。

5. 等価回路モデルの模擬精度の検証

実証試験の実測結果との対比から提案した等価回路モデルの模擬精度の検証を行った。

〈5・1〉 異位相投入試験による検証 表1の等価回路定数を用いて異位相投入試験[†]のシミュレーションを行った結果を図8に示す。図8からわかるように、異位相投入試験シミュレーション結果の合致はあまり良くない。これはシミュレーションでは前述の非線形性の影響を考慮せず、リアクタンスの値を運転状態によらず一定としているためと考えられる。異位相投入試験時は、三相突発短絡試験時に比べ界磁電流の値が大きく、定性的にリアクタンスの値は小さめになっていると考えられる。このため、ここでは X_{ld2} の値を小さくして $X_{ld2} = 0.3088$ [pu]とし(X'_d は 0.281 [pu]となる)、その他の等価回路定数は変えないようにすると表2のようになった。

表2の等価回路定数を用いてシミュレーションを行った結果を図8に示す。異位相投入時の合致度が改善された分、三相突発短絡時の模擬精度は低下するが、リアクタンスの値を調整することにより、界磁電流値が大きく異なる運転状態に対しても、模擬精度を改善できる。

〈5・2〉 励磁速度試験による検証 提案した等価回路に対して、励磁速度試験シミュレーションを行うことにより、安定度向上効果を検討する際に重要となる励磁速度性に関する模擬精度を検証した。

励磁速度試験での界磁電流値は定格の値に近い値、異位相投入のシミュレーションで合致の良い表2の等価回路定数を使うものとした。なお、シミュレーション方法は実測結果と同じ界磁電圧を与え、界磁電流変化、端子電圧変化を調べた。また、界磁抵抗の値は、励磁速度試験時

[†]実証試験で界磁巻線の耐力の検証のために実施された過酷試験の一つ。M-G方式で機械的につながった超電導機と負荷用同期機を電気的にはほぼ逆位相(180度)で投入する試験⁽⁹⁾。

Testing condition: armature voltage of SCG 12,000 V, armature voltage of synchronous motor 6,000 V coupling angle 180 degree

図8 異位相投入試験

Fig. 8. 180 degree off-phase switching test.

表2 等価回路定数 (異位相投入試験で合致が良い定数)

Table 2. Circuit parameters fit for 180 degree off-phase switching test.

X_{mfd}	0.251	X_{mfq}	0.251
X_{ld1}	0.044779	X_{ld2}	0.044779
X_{ld2}	0.3088	X_{ld2}	0.3088
X_f	0.0954	X_l	0.12
R_{kd1}	0.005232	R_{kd2}	0.005232
R_{kd2}	0.0666	R_{kd2}	0.0666
R_f	0.000203	R_o	0.00408

Testing condition: electrical output power 0 MW (lag load), armature voltage 8,000 V, armature current 1,960 A

図9 励磁速度試験

Fig. 9. Excitation response test.

には、電源抵抗、素子ドロップ抵抗などは含まれず、ほぼブラシ抵抗のみとなるので、これを考慮してここでは表2の値の1/50とした。

遅相負荷時の結果を図9に示す。界磁電流の変化の合致度は、界磁のインダクタンスの周波数特性の合致度に対応するが、界磁電流の変化は非常に精度良く模擬されている。また、電機子電圧に関しても、界磁電流の変化に対する電機子電圧の遅れは良好に模擬できていることがわかる。無負荷時、定格負荷時についても良好な結果が得られている。したがって、提案した等価回路を用いることにより、励磁速応性に関しても良好に模擬することができる。

6. おわりに

超速応型超電導発電機に対して、低速応機と同様な考え方にに基づき、電機子、界磁の双方で良好な模擬精度が得られるような等価回路モデリングを提案した。

Super-GMで開発された超速応C機に対して提案モデリング手法を適用し、異位相投入試験、励磁速応度試験結果からその模擬精度を検証した結果、電機子側、界磁側いずれに対しても良好な結果を得た。

その中で、超速応C機で見られた低励磁における飽和に関しては、飽和領域では従来のParkの磁束の式で新たに定数項を導入することにより等価回路による解析が可能であることを示した。

また、超速応C機は巻線取付軸の磁化特性に起因する低励磁における非線形性を持ち、三相突発短絡試験結果をもとに算出した等価回路定数で、三相突発短絡試験時とは界磁電流値が大きく異なる異位相投入試験、励磁速応度試験時などの運転状態を模擬することは困難である。しかし、非線形性を考慮してリアクタンスの値を調整することにより、これらの運転状態に対する模擬精度を改善できることを示した。

この等価回路モデルを用いることにより、超速応型超電導発電機が系統に導入された場合の安定度向上効果、事故時に加わるストレス等を適正に解析できると考えられる。

なお、本研究は、通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画「超電導電力技術応用開発」の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託により実施したものである。

(平成13年1月16日受付、同13年3月15日再受付)

文 献

- (1) I. M. Canay, "Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagrams of the Synchronous Machine", IEEE Trans. PAS-88, no. 7 (1969)
- (2) 「Super-GM Review 総括版」, 超電導発電機関連機器・材料技術研究組合 1999 9 月
- (3) 今井, 草深, 島田, 渋谷他: 「7万kW級低速応型超電導発電機の開発」, 電学論B, 120, no. 3 (2000)
- (4) 佐藤, 高橋, 井出他: 「70MW級超電導発電機の特徴と電磁気特性」, 電学論B, 119, no. 11 (1999)
- (5) 前田, 増永, 鈴木, 上田他: 「70MW級低速応型超電導発電機の電気特性」, 電学論B, 119, no. 11 (1999)
- (6) 天野, 亀田, 谷口, 前田, 熊野, 今井: 「低速応型超電導発電機の等価回路モデリング」, 電学論B, 120, no. 11 (2000)
- (7) 電気学会規格調査会標準規格「同期機」, JEC-114, 電気書院(1979)

- (8) 仁田, 白井, 大毅, 岡田, 田中: 「超電導発電機機器定数導出のための一考察について」, 平成3年電気学会全国大会 972
- (9) 谷口, 北内, 熊野, 有賀: 「超電導発電機のMG方式での運転特性と試験法」, 電学論B, 116, no. 7 (1996)
- (10) 植田, 清水, 牧, 上田, 伊藤: 「70MW級超電導発電機の基本設計」, 電学論B, 111, no. 9 (1991)

付 録

1. 等価回路定数と機器定数および各伝達関数の関係

提案した等価回路と機器定数および各伝達関数の間の関係は以下のとおりである。

超電導機では、界磁巻線を超電導化しているため、界磁巻線抵抗(コレクタリング間の抵抗)は非常に小さくなる。常温ダンパは高周波(商用周波数帯域以上)の磁気遮蔽効果を持つように設計され⁽¹⁰⁾、ベッセル・巻線取付軸については積極的に磁気遮蔽効果をねらった設計はされていない。このことから、次の仮定をする(α, β, γ については後述)。

$$\begin{aligned} R_f &\ll R_{kd1}, R_{kd1} \ll R_{kd2} \\ T_d' &\gg T_d'', T_{d0}' \gg T_{d0}'', T_{d0}' \gg \alpha, \gamma \gg \beta \quad \cdots (\text{付1}) \end{aligned}$$

定常領域およびロータ側の回路として界磁回路のみを考慮した過渡領域では、以下の関係が成り立つ。ただし、//はインピーダンスの並列結合を表すものとする。

$$X_d = X_l + X_{mfd} \quad \cdots (\text{付2})$$

$$X_d' = X_l + X_{mfd} // (X_{ld1} + X_{ld2} + X_f) \quad \cdots (\text{付3})$$

$$T_{d0}' = \frac{1}{2\pi f_0 R_f} (X_{mfd} + X_{ld1} + X_{ld2} + X_f) \quad \cdots (\text{付4})$$

$$T_d' = T_{d0}' \frac{X_d'}{X_d} \quad \cdots (\text{付5})$$

ここで、 f_0 は基本周波数(60Hz)である。

ロータ側の回路としてさらに常温ダンパ(R_{kd1} の枝に対応)を考慮した次過渡領域では、以下の関係が成り立つ。

$$X_d'' = X_l + X_{mfd} // X_{ld1} \quad \cdots (\text{付6})$$

$$T_{d0}'' = \frac{1}{2\pi f_0 R_{kd1}} (X_{mfd} + X_{ld1}) // (X_{ld2} + X_f) \quad \cdots (\text{付7})$$

$$T_d'' = T_{d0}'' \frac{X_d''}{X_d'} \quad \cdots (\text{付8})$$

次過渡領域においてベッセル・巻線取付軸を考慮しても、ベッセル・巻線取付軸は常温ダンパよりも内側にあるので(付6)~(付8)式中には直接現れず、 X_{ld2} , R_{kd2} は電機子側から見た特性には影響を与えない。

q軸回路についても、界磁回路はない(過渡領域はない)ことを除けば、(付2)~(付8)式と同様のことが成り立つ。電機子時定数 T_a については、次式が成り立つ。

$$T_a = \frac{1}{2\pi f_0 R_a} \frac{X_d''' + X_q'''}{2} \quad \cdots (\text{付9})$$

次に、等価回路上で各伝達関数を計算した結果を述べる。(付1)式の仮定のもとで、オペレーショナルインピーダンス $X_d(s)$ を計算すると、以下のように表すことができる。

$$X_d(s) = X_d \frac{(1 + T'_d s)(1 + T''_d s)}{(1 + T'_{d0} s)(1 + T''_{d0} s)} \dots\dots\dots (付10)$$

また、d 軸電機子電流から界磁電圧、界磁電流への伝達関数（周波数特性）は、以下のように表すことができる。

$$\frac{\Delta E_f(s)}{\Delta I_d(s)} = \frac{X_{mfd} s}{2\pi f_0(1 + \beta s)(1 + \gamma s)} \dots\dots\dots (付11)$$

$$\frac{\Delta I_f(s)}{\Delta I_d(s)} = \frac{X_{mfd} s}{2\pi f_0 R_f(1 + T'_{d0} s)(1 + T''_{d0} s)(1 + \alpha s)} \dots\dots\dots (付12)$$

$$\alpha = \frac{X_{ld2} // X_f}{2\pi f_0 R_{kd2}}, \beta = \frac{X_{ld2}}{2\pi f_0 R_{kd2}}, \gamma = \frac{X_{mfd} + X_{ld1}}{2\pi f_0 R_{kd1}} \dots\dots\dots (付13)$$

(付10)、(付13) 式より、ベッセル・巻線取付軸に対応する定数は、電機子側から見た特性には影響しないが、界磁側から見た特性には直接影響する。

2. 超速応 C 機の等価回路定数算定 (STEP1, 2)

〈2・1〉 STEP1: JEC-114 による方法 まず、三相突発短絡試験での電機子電流波形に対して、JEC-114(1972)の方法から機器定数を算出すると、付表1のようになった（単位は pu, 秒）。ただし、 X_d は JEC に定められた方法ではなく、「飽和領域での無負荷特性と三相短絡特性の傾きの比」から算出したものであり、 X_l は設計値である。

〈2・2〉 STEP2: 界磁電流直流分の模擬精度改善 次に、低速応機と同様に、三相突発短絡試験時の界磁電流波形を利用することを考える。三相突発短絡試験では、q 軸電圧が初期電圧からステップ状に零へと変化するため、界磁電流変化は q 軸電圧から界磁電流への伝達関数 $H(s)$ のステップ応答となる。したがって、ステップ応答である界磁電流変化が実測結果と合致するように伝達関数中の定数 (X'_d, T''_d) を修正すれば、界磁電流の模擬精度を改善できる（詳細は文献 [6] 参照）。

この方法により、 $X_d=0.353$ [pu]（付表1 参照）として X'_d, T''_d を修正すると $X'_d=0.273$ [pu], $T''_d=0.050$ [sec] となるが、 X'_d は JEC の方法から求めた値 0.305 pu から 10%程度修正しなければならない。 $X_d=0.353$ [pu] は、「飽和領域での無負荷飽和特性と三相短絡特性の傾きの比」から算出したものであるが、前述の非線形性の影響のために飽和領域における無負荷飽和特性、三相短絡特性も完全に直線の上には乗らないため、 X_d に関しても若干修正する必要があると考えられる。そこで、 X_d, X'_d の両方をともに 5%程度修正して $X_d=0.371$ [pu], $X'_d=0.287$ [pu], $T''_d=0.050$ [sec] とすることとした。

なお、ベッセル・巻線取付軸部の機器定数は、オペレーショナルインピーダンス $X_d(s)$ には関係しないため、三相突発短絡試験から同定することはできず、〈4・1〉節の STEP3 により求める。

付表1 JEC の方法から得られる機器定数

app. Table 1. Machine parameters measured by JEC-114.

X_d	X'_d	X''_d	X_l	T'_d	T''_d	T_a
0.353	0.305	0.158	0.12	7.6	0.06	0.12

天 野 博 之 (正員) 1973 年 6 月 8 日生まれ。96 年 3 月 京都大学工学部電気工学科卒業。98 年 3 月 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所。主に、電力系統における非線形現象、超電導発電機に関する研究に従事。

電 田 秀 之 (正員) 1954 年 7 月 31 日生まれ。昭和 56 年 3 月 成蹊大学大学院前期博士過程電気工学専攻修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所。平成 8 年 8 月～平成 9 年 8 月アメリカ・テキサス大学アーリントン校客員研究員。電力系統および超電導機器の保護・制御に関する研究に従事。

熊 野 照 久 (正員) 1963 年 2 月 4 日生まれ。90 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。工学博士。同年 (財) 電力中央研究所入所。94 年 7 月より 95 年 8 月テキサス大学アーリントン校客員研究員。98 年 7 月より 2000 年 3 月超電導発電機・材料技術研究組合出向。主として電力系統の過渡状態解析および同期機解析に関する研究に従事。IEEE 会員。

谷 口 治 人 (正員) 1950 年 8 月 23 日生まれ。75 年 京都大学大学院工学研究科電気工学修士課程修了。同年 (財) 電力中央研究所入所。80 年～81 年米国テキサス大学アーリントン校客員研究員。90 年系統制御研究室長。96 年より電力システム部長。電力系統の計画・運用・制御、新技術開発に関する研究に従事。CIGRE 会員。工学博士。

中 村 英 之 (正員) 1964 年 12 月 5 日生まれ。1988 年 東京大学工学部電気工学科卒業。同年株式会社東芝に入社。京浜事業所に勤務。主として、タービン発電機、超電導発電機の設計・開発業務に従事。

今 井 義 博 (正員) 1953 年 7 月 11 日生まれ。78 年名古屋工業大学大学院電気工学修士課程修了。同年関西電力(株)入社。92 年同社総合技術研究所に勤務。主に超電導発電機の研究に従事。96 年 12 月より 2000 年 3 月超電導発電機・材料技術研究組合に出向。低温工学会会員。