界磁相互漏れリアクタンスを考慮した発電機モデルによる過渡現象の検討（位相差条件における同期投入の考察）

正員 平松 大典* 正員 上村 洋市*
 正員 小柳 薫** 正員 平山開一郎*
 正員 垣内 幹雄* 非会員 佐藤 利幸***
 正員 荒 隆裕****

Study on Transient Phenomena using Generator Model with Field Mutual Leakage Reactance —— Out-of-phase Synchronization ——

Daisuke Hiramatsu*, Member, Yoichi Uemura*, Member, Kaoru Koyanagi**, Member, Kaiichirou Hirayama*, Member, Mikio Kakiuchi*, Member, Toshiyuki Satoh***, Non-member, Takahiro Ara****, Member

This paper describes the effect of mutual leakage reactance in rotor circuit (Canay reactance) on analysis of generator transient characteristics. The authors derived a detailed equivalent circuit model for synchronous generator, and analyzed out-of-phase synchronizing phenomena (synchronizing with phase difference) of the generator by simulations using the electromagnetic transients program (ATP-EMTP), and compared the results with the experimental data.

キーワード：発電機，突発短絡，非同期投入，界磁相互漏れリアクタンス，EMTP

Keywords: generator, sudden short circuit, out-of-phase synchronization, field mutual leakage reactance, EMTP

1. まえがき

従来，過渡現象（突発短絡，非同期投入，負荷遮断等）を扱う同期機の等価回路モデルとして，図1に示したParkモデル(a)を採用することが一般的であった⁽¹⁾。本モデルは物理現象の把握，解析を行う際の簡便性等多くの利点があ

るが，次の様な点を考慮した方が望ましいとされている⁽²⁾。

① d 軸に対して3個の巻線（電機子巻線・界磁巻線・制動巻線）全てに鎖交する主磁束と各巻線の漏れ磁束をベースにしているが，界磁巻線・制動巻線のみを取り囲む磁束

図1 Parkモデル(a)

Fig. 1. Park Model (a).

図2 界磁相互漏れリアクタンスを考慮したモデル

Fig. 2. Model with rotor mutual leakage reactance.

* (株) 東芝京浜事業所
 (筆頭者) 〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4
 Toshiba Corporation
 2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

** (株) テプコシステムズ
 〒135-0034 東京都江東区永代 2-37-28
 Tepco Systems Corporation
 2-37-28, Eitai, Koto-ku, Tokyo 135-0034

*** 北芝電機(株)
 〒960-1292 福島市松川町字天王原 9
 Kitashiba Electric Corporation
 9, Matsukawa-cho, Aza Tennoubara, Fukushima 960-1292

**** 職業能力開発総合大学校
 〒229-1196 相模原市橋本台 4-1-1
 Employment and Human Resources Development
 Organization of Japan, Polytechnic University
 4-1-1, Hashimoto-dai, Sagami-hara 229-1196

があり、この漏れ磁束に対応する界磁相互漏れリアクタンス (x_{rc} : Canay リアクタンスと呼ばれる: 図 2 参照) を考慮する。②全てのリアクタンスを一定としているが飽和を考慮する。

①については、実測結果をもとにしたリアクタンス値を与える事により、三相突発短絡時の界磁電流波形の実測値と解析値がよく一致する事はすでに報告されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。②については制動巻線電流により制動巻線漏れリアクタンスが変化する事、および主磁束の飽和による電機子反作用リアクタンスが変化する事が知られている。

発電機を系統に併列 (同期投入) する際の過渡現象の中で、異電圧投入時の界磁電流の挙動に対する、界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} の影響について筆者等は考察してきた⁽⁶⁾。今回、さらにその研究を進展させ、非同期投入の中で最も発生頻度が高い位相差投入に対する、 x_{rc} を考慮した解析と実測の比較、筆者等の提案する図式解法、および制動巻線漏れリアクタンス、電機子反作用リアクタンスの飽和の影響について検討した結果を報告する。

2. 解析モデルと等価回路への界磁相互漏れリアクタンスの導入

2.1 1 機対無限大母線解析モデル 今回の解析で採用した同期機モデルの界磁回路部分を図 3 に示す。発電機は、無限大母線に接続されている系統モデルとし、線路インピーダンスは、ほぼゼロ ($10^{-6} \Omega$) とした。

以下、解析モデルとして界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} が明らかになっている 48P-15750 kVA (突極形発電機 $x_{rc} = -0.112$)、6P-400 kVA (突極形発電機 $x_{rc} = -0.0827$)、2P-37500 kVA (円筒形発電機 $x_{rc} = 0.00408$)⁽⁷⁾ を採用した。主として解析モデルとした 48P-15750 kVA の定格および等価回路のリアクタンス、抵抗値を付録に示す。

2.2 等価回路の計算方法 ここで界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} を考慮する方法として以下がある。各々の特徴および 3 つの手法による三相突発短絡時の界磁電流特性を比較し、いずれの手法によっても界磁電流の挙動に関する解析には問題ないことは、すでに報告済みであり⁽⁶⁾ 以下簡単にのべる。

解析手法 (I) x_{rc} を含んだ図 2 の等価回路によりシミュレーション 解析する方法。

解析手法 (II) x_{rc} を (1) 式により換算し図 1 Park モデル (a) の d 軸電機子漏れリアクタンス x_l と等価的に置き換えて解析する方法。

図 3 解析モデル

Fig. 3. Field Circuit of the Generator Model.

$$x_c = x_l + \frac{1}{\frac{1}{x_d - x_l} + \frac{1}{x_{rc}}} \dots\dots\dots (1)$$

解析手法 (III) d 軸ダンパー回路時定数 T_{kd} に反映する方法。

x_{rc} を含む、図 2 の等価回路の各リアクタンス・抵抗分から (2) 式により T_{kd} を求め、これを従来の解析式に適用する。

$$T_{kd} = \frac{x_{kd}}{2\pi f r_{kd}} \dots\dots\dots (2)$$

この方法は x_{rc} を考慮していない従来の理論展開を活用できる長所がある。

3. 位相差投入時の界磁相互漏れリアクタンスの影響および実測値との比較例

一般的に発電機を系統に併列する場合、系統側と発電機側で①周波数②電圧③位相が一致していることが必要条件となる。近年、自動同期投入装置、及び位相を確認する装置が普及しているが、中小容量発電機等では、手動で投入を行う場合があり、図 3 の様なブラシレス回路で界磁電流が負となると整流素子でブロックされ、過電圧を発生する。以下、位相差投入条件における界磁特性に対する界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} の影響について検討を行うが、手法として (I) に相当する EMTP に加え、(III) を適用する。

3.1 位相差投入時の界磁相互漏れリアクタンスの影響 図 4、図 5 に 6P-400 kVA 発電機を用い、同電圧 30

図 4 30 度位相差投入時界磁電流

Fig. 4. Field Current in case of synchronization under 30 degrees difference.

図 5 30 度位相差投入時界磁誘起電圧

Fig. 5. Induced field voltage in case of synchronization under 30 degrees difference.

図 6 34.2 度位相差投入時界磁電流

Fig. 6. Field Current in case of synchronization under 34.2 degrees phase difference.

図 7 34.2 度位相差投入時電機子電流

Fig. 7. Armature Current in case of synchronization under 34.2 degrees phase difference.

図 8 34.2 度位相差投入時回転速度

Fig. 8. Speed characteristic in case of synchronization under 34.2 degrees phase difference.

度位相差投入時の界磁電流特性について、 x_{rc} 考慮有無の影響を EMTP により比較した結果を示す。

x_{rc} を考慮した場合：界磁電流が負となり過電圧発生
 x_{rc} を考慮しない場合：界磁電流が負とならず過電圧は発生しない

以上より位相差投入時、界磁側の過電圧発生は x_{rc} の影響を受ける事がわかる。

3.2 位相差投入時の実測と解析との比較例 非同期投入時の界磁電流等の特性を実測した例は少ない。今回 4P-10kVA (突極形発電機) に対し 34.2 度位相差投入時の特性を実測した。図 6～図 8 に界磁電流、電機子電流、回転速度の実測値と界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} を考慮したモデル (図 2) による EMTP 解析結果を示す。 x_{rc} を考慮した場合、十分な精度と考えられる (なお本機の界磁回路は整流素子を使用していないため、界磁電流が負となつ

ても、過大な電圧は発生しない)。

4. 位相差投入時発生過電圧に対する界磁相互漏れリアクタンスの影響

4.1 位相差投入時の界磁電流 次に位相差投入時、界磁電流が負となり、過電圧発生に対する界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} の影響について考えてみる。図 2 に対する Park モデル基本式における d 軸分の電流・磁束は x_{rc} を考慮した場合、次の (3)～(9) 式となる (d 軸分以外は x_{rc} 考慮の有無によらず、従来の式と同じである)。

$$e_d = \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega \varphi_q - R_a i_d \dots\dots\dots (3)$$

$$e_{fd} = \frac{d}{dt} \varphi_{fd} + R_{fa} i_{fd} \dots\dots\dots (4)$$

$$0 = \frac{d}{dt} \varphi_{kd} + R_{kd} i_{kd} \dots\dots\dots (5)$$

$$e_q = \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega \varphi_d - R_a i_q \dots\dots\dots (6)$$

$$\varphi_d = x_{ad} i_{fd} + x_{ad} i_{kd} - (x_l + x_{ad}) i_d \dots\dots\dots (7)$$

$$\varphi_{fd} = (x_{ad} + x_{fd} + x_{rc}) i_{fd} + (x_{ad} + x_{rc}) i_{kd} - x_{ad} i_d \dots\dots\dots (8)$$

$$\varphi_{kd} = (x_{ad} + x_{rc}) i_{fd} + (x_{ad} + x_{kd} + x_{rc}) i_{kd} - x_{ad} i_d \dots\dots\dots (9)$$

一機無限大の系における位相差投入時の界磁電流は (3)～(9) 式に対し、解析手法 (III) を適用することにより、(10) 式が得られる (式の導出については付録に示した)。

$$i_f = i_{fdo} \left[1 - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \left\{ \frac{\Delta e_q}{e_t} e^{-t/T'_d} - \left(1 - \frac{T_{kd}}{T''_d} \right) \frac{\Delta e_q}{e_t} e^{-t/T''_d} - \frac{T_{kd}}{T''_d} \sqrt{\left(\frac{\Delta e_q}{e_t} \right)^2 + \left(\frac{\Delta e_d}{e_t} \right)^2} e^{-t/T_a} \cos 2\pi f t \right\} \right] \dots\dots\dots (10)$$

e_t : 発電機端子電圧 i_{fdo} : 投入直前の界磁電流

Δe_d : d 軸分電圧差 Δe_q : q 軸分電圧差

4.2 同電圧位相差投入時の過電圧発生について 同電圧・位相差投入を行った際の界磁電流が負すなわち過電圧が発生する限界について、筆者等の提案する解析式および図式解法により検討する。(10) 式が正となる条件から、整理すると (11) 式が得られる。

$$\left[\frac{\Delta e_q}{e_t} - \frac{1}{\left(1 - (T_{kd}/T''_d)^2 \right) (x_d/x'_d - 1)} \right]^2 \geq \left[\frac{T_{kd}}{T''_d \left(1 - (T_{kd}/T''_d)^2 \right) (x_d/x'_d - 1)} \right]^2$$

$$\frac{(\Delta e_d/e_t)^2}{\left[\frac{1}{(x_d/x'_d - 1) \sqrt{1 - (T_{kd}/T'_d)^2}} \right]^2} < 1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで位相差を θ とおくと同電圧位相差では

$$\Delta e_d/e_t = \sin \theta \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\Delta e_q/e_t = \cos \theta - 1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

図 9 6P-400 kVA 同期投入時界磁過電圧発生限界 (過電圧発生領域: 双曲線上側)

Fig.9. Limit of induced abnormal voltage at 6P-400 kVA synchronization (abnormal voltage occurred out range of hyperbola).

図 10 48P-15750 kVA 同期投入時界磁過電圧発生限界 (過電圧発生領域: 双曲線上側)

Fig.10. Limit of induced abnormal voltage at 48P-15750 kVA synchronization (abnormal voltage occurred out range of hyperbola).

図 11 2P-37500 kVA 同期投入時界磁過電圧発生限界 (過電圧発生領域: 双曲線上側)

Fig.11. Limit of induced abnormal voltage at 2P-37500 kVA synchronization (abnormal voltage occurred out range of hyperbola).

となり $(\Delta e_d/e_t)$, $(\Delta e_q/e_t)$ の軌跡は円となる。

(11) ~ (13) 式をモデル機に適用すると図 9 ~ 図 11 の様になる。双曲線の上側が界磁電流負, すなわち界磁に過電圧が発生する領域であり, 円が運転範囲で有る事から次の様になる。

- 図 9 より, x_{rc} を考慮しない場合, 過電圧は発生しないが, x_{rc} を考慮した場合, 過電圧が発生する (図 4, 図 5 に相当する)。
- 図 10, 図 11 から x_{rc} を考慮した場合
 $x_{rc} < 0$ の場合: 界磁過電圧発生範囲が広がる。
 $x_{rc} > 0$ の場合: 界磁過電圧発生範囲がせまくなる。
しかし, 円と双曲線が交点をもたない事から, 過電圧は発生しない。すなわち x_{rc} の正負および機械により発生限界が異なる。

5. 飽和による影響

以上, 位相差投入に対する界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} の影響について線形モデルにより検討を行ってきた。次に①過渡時の制動巻線電流による x_{kd} , x_{kq} の飽和および②主磁束飽和による x_{ad} , x_{aq} の変化の影響について考察する。

5.1 制動巻線電流による x_{kd} , x_{kq} の変化

過渡現象において, 制動巻線に過大な電流が流れた場合, 制動巻線周囲の鉄心部磁束が飽和し x_{kd} , x_{kq} が変化することが知られている。筆者等は同期電動機の始動特性を中心に, この飽和現象について検討を行ってきた⁽¹¹⁾。モデル機 48P-15750 kVA の制動巻線に対して有限要素法を用い, 制動巻線電流によるリアクタンス飽和を検討した結果を図 12 に示す。図 12 は $x_{rc} = 0$ の場合を示しているが, x_{rc} を考慮した場合も同様な特性を示す。

この特性を加味し x_{rc} と x_{kd} , x_{kq} 飽和について, 各々の影響を検討した。

Case (I): 飽和の有無による比較

図 1 において

- x_{kd} , x_{kq} の飽和を考慮しない場合
- x_{kd} , x_{kq} の飽和を考慮した場合

Case (II): 界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} の影響

x_{kd} , x_{kq} の飽和を考慮したモデルにおいて

- $x_{rc} = 0$ の場合
- x_{rc} を考慮した場合

解析条件として同電圧で位相差を増加させ解析を行った。

図 12 制動巻線リアクタンスの変化

Fig.12. Damper Reactance vs. damper current.

図 13 30 度位相差投入時界磁電流解析値 (Case (I))

Fig. 13. Field Current in case of synchronization under 30 degrees difference (Case (I)).

図 14 30 度位相差投入時界磁電流解析値 (Case (II))

Fig. 14. Field Current in case of synchronization under 30 degrees difference (Case (II)).

図 15 120 度位相差投入時界磁電流解析値 (Case (I))

Fig. 15. Field Current in case of synchronization under 120 degrees difference (Case (I)).

図 16 120 度位相差投入時界磁電流解析値 (Case (II))

Fig. 16. Field Current in case of synchronization under 120 degrees difference (Case (II)).

図 13～図 16 に同電圧 30 度位相差投入, および一般的には発生確率は低いと考えられる同電圧 120 度位相差投入のシミュレーション結果を示す。

ここで界磁巻線と制動巻線に流れる電流で, 界磁巻線側に分流する割合を分流比 α として (14) 式で定義する。モデル機の場合, 界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} を考慮しない場合 $\alpha = 0.416$ 考慮した場合 $\alpha = 0.605$ と界磁電流増加の方向である。また制動巻線リアクタンスが飽和し小さくなると界磁電流は減少の方向である。

図 17 磁束飽和を考慮した Park モデル (b)

Fig. 17. Park Model (b) with flux saturation considered.

図 18 120 度位相差投入時界磁電流解析値 (Case (III))

Fig. 18. Field Current in case of synchronization under 120 degree difference (Case (III)).

$$\alpha = x_{kd} / (x_{fd} + x_{kd}) \dots \dots \dots (14)$$

30 度位相差投入時は制動巻線電流が少ないため制動巻線リアクタンス飽和の影響は少なく, x_{rc} の影響が現れている。120 度位相差投入の場合は, 制動巻線リアクタンス飽和および x_{rc} 両者の影響が顕著に現れていると理解できる。

5.2 主磁束飽和による x_{ad} , x_{aq} の変化 d 軸 x_{ad} と q 軸 x_{aq} が磁束飽和により変化することを考慮した Park モデル (b) (図 17) を活用し磁気飽和現象を近似的に取り扱う手法は, 負荷遮断特性を精度良く推定する際に有用であることが知られている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。図 17 における k は主磁束の大きさで決まる飽和係数であり次式で表現される。

$$k = f(\phi), \quad \phi = \sqrt{\phi_{ad}^2 + \phi_{aq}^2} \dots \dots \dots (15)$$

ϕ_{ad} , ϕ_{aq} : 無負荷飽和曲線より求めた d 軸・q 軸の磁束, ただし $f(\phi)$ は飽和部分 (本モデル機では端子電圧 0.8 pu 以上の領域) を近似する 2 次関数

筆者等はモデル機 48P-15750 kVA に対して前節と同様に同電圧で位相差を広げ解析を行った。

Case (III): 飽和の有無による比較

- 主磁束の飽和を考慮しない場合 (Park モデル (a))
- 主磁束の飽和を考慮した場合 (Park モデル (b)) ただし $x_{rc} = 0$

Case (IV): 界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} の影響

主磁束の飽和を考慮した Case (Park モデル (b)) において

- $x_{rc} = 0$ の場合
- x_{rc} を考慮した場合

120 度位相差投入シミュレーションの解析結果を図 18, 図 19 に示す (位相差の小さい条件でも同様な結果で有る)。

位相差投入時における界磁電流の挙動については, 制動巻線リアクタンスの飽和と異なり, 主磁束飽和の影響よりも界磁相互漏れリアクタンスの影響が大きいと考えられる。

図 19 120 度位相差投入時界磁電流解析値 (Case (IV))

Fig.19. Field Current in case of synchronization under 120 degree difference (Case (IV)).

6. ま と め

非同期投入の中で、発生頻度の高い位相差投入について界磁相互漏れリアクタンスを中心に検討を行い次の点が明らかになった。

(1) 位相差投入時、界磁電流の動きを考える場合、界磁巻線・制動巻線のみを取り囲む磁束に対応する界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} 考慮の有無により差を生じている。モデル機による解析結果から、 x_{rc} を考慮する事が望ましく、考慮した解析の妥当性を実測データから確認できた。

(2) 位相差投入の場合、界磁側に過大電圧が発生する限界を筆者等が提案する解析および図式解法により明確にすることができた。この場合 x_{rc} の正負および機械により発生限界が異なることが明らかになった。

(3) 位相差投入時の制動巻線の飽和と界磁相互漏れリアクタンス x_{rc} は投入位相差により影響が異なっている。これに対し、主磁束飽和による影響は x_{rc} による影響に比べて少ない。

なお実際にはブラシレス同期機では界磁側に放電抵抗、バリスタ等の電圧抑制要素を設置したり、逆耐圧の高い整流素子を使用する等の配慮がなされているが、これらは望ましい傾向であり、それらの設計に際して本論文で得た過電圧発生に関する知見が役立てば幸いである。また今回の解析は理論的な考察の展開が目的であるため、一機無限大の系として、線路・トランス等のインピーダンスをゼロとした発電機過渡現象としては、最も厳しい条件を考えている。実際にはこれらの影響により過電圧発生は緩和される方向で有る事を付記させていただきたい。

今後、さらに界磁喪失等の発電機過渡現象時における、界磁相互漏れリアクタンスおよびリアクタンスの飽和等、等価回路モデルが界磁特性へ及ぼす影響について検討を行う予定である。

(平成 16 年 2 月 21 日受付, 平成 16 年 6 月 9 日再受付)

文 献

- (1) R.H. Park: "Two Reaction Theory of Synchronous Machines", *Trans. AIEE*, Vol.48, p.716 (1929)
- (2) "Application technology of synchronous machine constants", IEE Japan Technical Report, No.798 (2000) (in Japanese) 「同期機諸定数の適用技術」, 電気学会技術報告, No.798 (2000)

- (3) I.M. Canay: "Causes of Discrepancies on Calculation of Rotor Quantities and Exact Equivalent Diagrams of The Synchronous Machine", *IEEE Trans.*, Vol.PAS-88, No.7, p.1114 (1969)
- (4) D. Hiramatsu, K. Hirayama, Y. Uemura, T. Tokumasu, M. Takabatake, and T. Itoh: "Analysis of Generator Field Voltage on Transient Condition", *Proc. of 13th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, A-42 (2002-8) (in Japanese)
平松大典・平山開一郎・上村洋市・徳増 正・高島幹生・伊藤 整: 「発電機過渡現象時における界磁特性の検討 (突発短絡・非同期投入に対する考察)」, 平 14 電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文 I, No.1006 (2002-8)
- (5) D. Hiramatsu, K. Hirayama, Y. Uemura, T. Tokumasu, M. Takabatake, and R. Nagura: "Study of Generator Field Voltage at Loss-of-Excitation", *The Papers of Technical Meeting on Joint Seminar PE/PSE, IEE Japan* PE-02-2/PSE-02-12 (2002-9) (in Japanese)
平松大典・平山開一郎・上村洋市・徳増 正・高島幹生・名倉良馬: 「発電機界磁喪失時の界磁過渡電圧について」, 電気学会電力技術・電力系統技術研究, PE-02-2/PSE-02-12 (2002-9)
- (6) D. Hiramatsu, K. Koyanagi, K. Hirayama, Y. Uemura, M. Kakiuchi, T. Satoh, and T. Ara, "Study of Asynchronizing Phenomena using Generator Model with Field Mutual Leakage Reactance", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.6, p.835 (2004-6) (in Japanese)
平松大典・小柳 薫・平山開一郎・上村洋市・垣内幹雄・佐藤利幸・荒 隆裕: 「界磁相互漏れリアクタンスを考慮した発電機モデルによる非同期投入の検討」, 電学論 B, 124, 6, p.835 (2004-6)
- (7) Y. Takeda and B. Adkins: "Determination of synchronous machine parameters allowing for unequal mutual inductance", *Proc. IEE*, Vol.121, No.12 (1974-12)
- (8) M. Udo, M. Kunugi, and J. Kobayashi: "Excitation of Synchronous Machines by Rectifiers", *Toshiba Review* (1961) (in Japanese)
有働幸幸・功力正彦・小林 恂: 「整流器による同期機の励磁」, 東芝レビュー (1961)
- (9) K. Hirayama: "Practical Detailed Model for Generators", *IEEE Trans.*, Vol.EC-10, No.2, p.218 (1996)
- (10) S. Nohara and K. Hirayama: "Digital Simulation of a Voltage Rise at Load Rejection of a Generator", 1973 National Convention Record IEE Japan, p.626 (1973) (in Japanese)
野原真一・平山開一郎: 「発電機負荷しゃだん時の電圧上昇についてのデジタルシミュレーション」, 昭 48 電気学会全国大会, p.626 (1973)
- (11) D. Hiramatsu, K. Hirayama, T. Tokumasu, Y. Uemura, Y. Ishikawa, and A. Iwai: "Analysis of Damper Saturated Characteristic on Synchronous Machine Transient Condition", *IEEJ Trans. PE*, Vol.123, No.5, p.624 (2003-5) (in Japanese)
平松大典・平山開一郎・徳増 正・上村洋市・石川芳博・岩井明信: 「同期機過渡現象時の制動巻線回路飽和特性 (負荷遮断および始動について)」, 電学論 B, 123, 5, p.624 (2003-5)

付 録

1. モデル機定格とリアクタンス・時定数

定格: 48P-15750 kVA-125 min⁻¹-11000 V-50 Hz

付表 1 モデル機 d 軸リアクタンス・時定数

app. Table 1. d-axis reactance time constant of model machine.

	Xrc=0	Xrc considered		Xrc=0	Xrc considered
Xd	0.903	←	Xrc	0	-0.112
Xd'	0.378	←	Xad	0.701	0.701
Xd''	0.288	←	Xfd	0.235	0.348
Td'	1.675	←	Rfd	0.000745	0.000746
Td''	0.057	←	Xkd	0.168	0.533
Ra	0.00624	←	Rkd	0.01461	0.03190
Xq	0.640	←	Tkd	0.0365	0.0531
Xq''	0.307	←	Xaq	0.438	←
Tq''	0.055	←	Xkq	0.1381	←
Xl	0.202	←	Rkq	0.01595	←

Reactance:(pu) Time constant:(sec)

2. 式の導出

(10) 式の導出に関しては文献 (6) に述べたがさらに追記すると下記の通りで有る。

(4), (5), (8), (9) 式, (付 1) 式および下記の置換えを行う。

$$\varphi_q = x_{aq} i_{kq} - (x_l + x_{aq}) i_q \cdots \cdots \cdots \text{(付 1)}$$

$$p = d/dt$$

$$x_d = x_{ad} + x_l, \quad x_{fd} = x_{ad} + x_{rc}$$

$$x_{ffd} = x_{ad} + x_{fd} + x_{rc}, \quad x_{kdd} = x_{ad} + x_{kd} + x_{rc}$$

これから $I_{fd} I_{kd}$ を消去し, dq 軸のオペレーショナルインピーダスを $x_d(p)x_q(p)$ とし e_d, e_q について解くと i_d の変化分 Δi_d が求められる

$$\Delta i_d = \frac{-[px_q(p) + r] \Delta e_d - \omega x_q(p) \Delta e_q}{[px_d(p) + r][px_q(p) + r] + \omega^2 x_d(p)x_q(p)} \cdots \cdots \cdots \text{(付 2)}$$

$$\Delta I_{fd} = \frac{(1 + T_{kd}p)px_{ad}}{(1 + T'_{do}p)(1 + T''_{do}p)R_{fd}} \Delta i_d \cdots \cdots \cdots \text{(付 3)}$$

(付 2) 式を (付 3) 式に代入し微小な項を省略する事によりラプラス変換の形で (付 4) 式が得られる。

$$\Delta I_{fd}(s) = \frac{-(s\Delta e_d + \omega\Delta e_q)(1 + T_{kd}s)x_{ad}}{(1 + T'_d s)(1 + T''_d s)[s^2 + 2s/T_a + \omega^2]x_d R_{fd}} \cdots \cdots \cdots \text{(付 4)}$$

(付 4) 式を逆ラプラス変換し整理する事により

$$\Delta I_{fd}(t) = \frac{x_d - x'_d}{\omega x_{ad} x'_d} \left[-\Delta e_q^{-t/T'_d} + \left(1 - \frac{T_{kd}}{T''_d} \right) \Delta e_q^{-t/T''_d} + \frac{T_{kd}}{T''_d} \sqrt{\Delta e_q^2 + \Delta e_d^2} e^{-t/T_a} \cos 2\pi f t \right] \cdots \cdots \cdots \text{(付 5)}$$

ここで投入前の界磁電流を I_{fd0} とすると

$$I_{fd0} = I_{fd0} + \Delta I_{fd} \cdots \cdots \cdots \text{(付 6)}$$

および

$$I_{fd0} = e_t / \omega x_{ad} \cdots \cdots \cdots \text{(付 7)}$$

から (10) 式が得られる。(10) 式の第 2 項は減衰が速い事を考慮し, また (10) 式が正となる条件から, 整理すると (11) 式が得られる。

平 松 大 典 (正員) 1980 年 3 月慶応義塾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 (株) 東芝入社。主として同期発電機, 同期電動機の設計に従事。現在, 発電機部参事。技術士 (電気電子部門・総合技術監理部門)。

上 村 洋 市 (正員) 1977 年 3 月北海道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 (株) 東芝入社。重電技術研究所にて主として電力システムの解析に従事。現在, 火力水力事業部にて電機系解析に従事。

小 柳 薫 (正員) 1971 年, 東京教育大学理学部応用物理学科卒。2000 年, 東京都立大学工学研究科電気工学専攻 (博士課程) 卒。工学博士。英国技術士。1971 年 4 月から 1996 年 3 月まで (株) 東芝にて電力システム解析に従事。現在, (株) テプコシステムズにて電力系統分野のソフトウェア開発に従事。1995 年電気学会論文賞受賞。IEE 及び IEEE 会員。

平 山 開一郎 (正員) 1970 年 3 月北海道大学電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。主として発電制御システムの開発, 設計に従事。現在, 府中電力システム工場技監。1994 年計測自動制御学会より技術賞受賞。工学博士 (北海道大学)。

垣 内 幹 雄 (正員) 1993 年 3 月東京大学電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。発電機部にて主としてタービン発電機の設計に従事。現在発電機部主務。

佐 藤 利 幸 (非会員) 1982 年 3 月宮城工業高等専門学校電気工学科卒業。同年 4 月北芝電機 (株) 入社。主として発電機の設計に従事。現在, 回転器部参事。

荒 隆 裕 (正員) 1977 年 3 月職業訓練大学校電気工学科卒業。同年 4 月雇用促進事業団 (現: 雇用能力開発機構) に入る。1980 年 4 月職業訓練大学校 (現: 職業能力開発総合大学校) 助手。主として電気機械の解析と制御に関する研究に従事。現在, 教授。工学博士。日本産業技術教育学会会員。IEEE 会員。