三相不ぞろいしゃ断を考慮した系統操作時の過渡トルク

三菱電機株式会社

三菱電機株式会社

三菱電機株式会社

藤原良一

鈴木浩

上村勝彦

1. はじめに

長距離大容量を特徴とする近年の電力系統では、事故時の供給信頼度を保つために送電線高速再閉路が行なわれる。系統保護を目的とする高速再閉路が、タービン・発電機系にどのような影響を与えるかについての考察を行なうには、再閉路失敗時には二度繰り返される送電線事故からしゃ断に至る系統操作期間に、発電機エアギャップの過渡トルクがどのような波形となっているのかについて、厳密に知っておかねばならない。

発電機過渡トルクが、タービン・発電機系軸ねじれに与える影響は、しゃ断条件によって大きく異なる。従来仮定されてきた三相一括しゃ断による過渡トルクと、三相不ぞろいしゃ断によるトルクとでタービン・発電機系軸ねじれトルクに与えるショックの大きさを比較し、その違いを調べた。

本論文では発電機に最も苛酷となる条件を与えるとされる二回線送電線中一回線3相地絡事故と三相しゃ断を対象とし、系統を1機無限大とし発電機は背後電圧一定モデルに基づいて解析を行なう。過渡トルクは、ステップ分、系統周波数成分とその2倍周波数成分とから成っていることがわかるので、各成分ごとにその振幅と初期位相で考えることにする。なお、事故時しゃ断時に生じるアーク現象他非線形要素について

は一切考えないことにする。

2. 過渡トルク計算式

同期発電機が、 Δ - Y 変圧器により二回線送電線を介して無限大母線につながれている第1図のような回路を考える。発電機はリアクタンス X_g 、背後電圧一定でかつ背後の位相 δ は一連の状態変化に関し一定に保たれるとする。電機子抵抗や送電線抵抗はこれを無視し、かわりに減衰係数のみを考えることにする。このモデルはじょう乱後数サイクルまでの発電機特性を十分に近似しうるモデルである。

この時の回路図が第2図であり、各系統状態に対して成立つ系統方程式は、 a, b, c 相を用いて変圧器の Δ - Y 変換を行なった後(1)式のように表わされる。

第1図 系統構成モデル

Fig. 1. Configuration of power system.

第2図 系統の等価回路

Fig. 2. Equivalent circuit of power system.

Transient Torque under System Operations of 3 Phase Unbalanced Breaking. By Ryoichi Fujiwara, Member, Hiroshi Suzuki, Member & Katsuhiko Uemura, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

藤原良一: 正員, 三菱電機株式会社

鈴木 浩: 正員, 三菱電機株式会社

上村勝彦: 正員, 三菱電機株式会社

$$\frac{d}{dt} Z^j \dot{\mathbf{i}}^j = \mathbf{e} - C^j \mathbf{E} \quad (1)$$

$$Z^j = \begin{bmatrix} 2X_\theta + X_t + K_a^j X_e & -X_\theta & \\ -X_\theta & 2X_\theta + X_t + K_b^j X_e & \\ -X_\theta & -X_\theta & \\ * & -X_\theta & \\ & & 2X_\theta + X_t + K_c^j X_e \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{i}^j = (i_a^j, i_b^j, i_c^j)^t \quad t: \text{転置}$$

$$\mathbf{e} = (e_a, e_b, e_c)^t$$

$$\mathbf{E} = (E_a, E_b, E_c)^t$$

$$t: \text{時間 (rad.)}$$

X_θ : 発電機リアクタンス (p. u.) 通常は X_d''

X_t : 変圧器リアクタンス (p. u.)

X_e : 送電線リアクタンス (p. u.) 二回線当り

$$e_a = \sqrt{3} E \sin(t + \theta_0 + \delta + 1/6\pi)$$

$$e_b = \sqrt{3} E \sin(t + \theta_0 + \delta + 1/6\pi - 2/3\pi)$$

$$e_c = \sqrt{3} E \sin(t + \theta_0 + \delta + 1/6\pi + 2/3\pi)$$

$$E_a = E \sin(t + \theta_0)$$

$$E_b = E \sin(t + \theta_0 - 2/3\pi)$$

$$E_c = E \sin(t + \theta_0 + 2/3\pi)$$

E : 発電機背後電圧の大きさ

E_s : 無限大母線電圧の大きさ

$$C^j = \begin{pmatrix} C_a^j & 0 & 0 \\ 0 & C_b^j & 0 \\ 0 & 0 & C_c^j \end{pmatrix}$$

$K_a^j, K_b^j, K_c^j, C_a^j, C_b^j, C_c^j$ は系統の各状態 j に対応して第1表のような値をとる。送電線中間事故までを考える場合には、 K_a^j, K_b^j, K_c^j として距離により異なる値をわりふれば同様に扱うことができるので、本論文では触れないことにする。 θ_0 は初期位相である。

j 番目の回路状態における(1)式の解 $\mathbf{i}^j$ は、電流が連続となる条件を満たす構成変化では以下のように表わせる。時間 $t = T_j$ の時 $j-1$ 番目の回路状態での電流値を $\mathbf{i}_0^j$ とすると、これを初期値として

$$\mathbf{i}^j = \mathbf{I}^j(t) - A^j \{ \mathbf{I}^j(T_j) - \mathbf{i}_0^j \} \quad (2)$$

$$\mathbf{I}^j(t) = Y^j (\bar{\mathbf{e}} - C^j \bar{\mathbf{E}}) \quad (3)$$

$$A^j = \begin{pmatrix} \varepsilon^{-\gamma_a^j(t-T_j)} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon^{-\gamma_b^j(t-T_j)} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon^{-\gamma_c^j(t-T_j)} \end{pmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{e}} = (\bar{e}_a, \bar{e}_b, \bar{e}_c)^t$$

$$\bar{\mathbf{E}} = (\bar{E}_a, \bar{E}_b, \bar{E}_c)^t$$

$$\mathbf{I}^j(t) = (I_a^j(t), I_b^j(t), I_c^j(t))$$

$$\bar{e}_a = -\sqrt{3} E \cos(t + \theta_0 + \delta + 1/6\pi)$$

$$\bar{e}_b = -\sqrt{3} E \cos(t + \theta_0 + \delta + 1/6\pi - 2/3\pi)$$

$$\bar{e}_c = -\sqrt{3} E \cos(t + \theta_0 + \delta + 1/6\pi + 2/3\pi)$$

$$\bar{E}_a = -E \cos(t + \theta_0)$$

$$\bar{E}_b = -E \cos(t + \theta_0 - 2/3\pi)$$

$$\bar{E}_c = -E \cos(t + \theta_0 + 2/3\pi)$$

$$Y^j = \{y_{kl}^j\} = Z^{j-1}$$

ここで、 $\gamma_a^j, \gamma_b^j, \gamma_c^j$ は j 番目の系統状態における各相の減衰係数であり、 $\mathbf{I}^j(t)$ は電流定常解(交流分)である。

発電機エアギャップの過渡トルク $P^j(t)$ は

$$P^j(t) = 2/3 \mathbf{e}^t \cdot \mathbf{i}^j \quad (4)$$

で定義される。これに電流解を代入すると、

$$P^j(t) = 2/3 \{ \mathbf{e}^t \cdot \mathbf{I}^j(t) - \mathbf{e}^t \cdot A^j \{ \mathbf{I}^j(T_j) - \mathbf{i}_0^j \} \} \quad (5)$$

となる。このうち、電流の交流分 $\mathbf{I}^j(t)$ に対応するトルクはステップ分 P_u^j と2倍周波数成分 P_2^j の和として次のように表わされる(導出については付録参照)。

$$\begin{aligned} 2/3 \mathbf{e}^t \cdot \mathbf{I}^j(t) &= P_u^j + P_2^j \\ &= P_u^j + B_{2s}^j \sin 2t + B_{2c}^j \cos 2t \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、 $P_u^j, B_{2s}^j, B_{2c}^j$ については付録参照。

次に電流の直流分 $-A^j \{ \mathbf{I}^j(T_j) - \mathbf{i}_0^j \}$ に対応するトルク P_1^j について計算する。

$$\begin{aligned} P_1^j &= -2/3 \cdot \mathbf{e}^t A^j \{ \mathbf{I}^j(T_j) - \mathbf{i}_0^j \} \\ &= B_{1s}^j \sin t + B_{1c}^j \cos t \quad (7) \end{aligned}$$

ここで、 $B_{1s}^j \sin t + B_{1c}^j \cos t$ については付録参照

(6), (7)式より過渡トルクは、ステップ分 P_u^j と系統周波数成分 P_1^j と、その2倍周波数成分 P_2^j とから成っていることがわかる。

3. 系統構成変更時過渡トルク

本論文で対象とする系統構成の変化は大きくわけて次の二段階である。

(i) 二回線送電線のうち一回線での、発電所至近端における瞬時三相地絡事故。

(ii) 同事故を取り除くための一回線三相不ぞろい電流零点シャ断。

であり、各時刻に発生する過渡トルクを計算する。

第1表 パラメータ表

Table 1. Parameter table.

状態	パラメータ	K_a	K_b	K_c	C_a	C_b	C_c
正 常		1	1	1	1	1	1
至近端、三相地絡		0	0	0	0	0	0
c 相しゅ断		0	0	2	0	0	1
c, a 相しゅ断		2	0	2	1	0	1
三相しゅ断		2	2	2	1	1	1

(i) 三相地絡時 ($j=1, t=T_1$) 地絡現象は本質的に電流連続条件を満たしており、この場合の(1)式各係数は第1表より

$$K_a^1 = K_b^1 = K_c^1 = C_a^1 = C_b^1 = C_c^1 = 0$$

である。初期電流 i_0^1 は定常運転中の電流値の三相地絡発生時の瞬時値となる。過渡トルクは以下のようになる。

$$P_u^1 = 0$$

$$B_{2s}^1 = B_{2c}^1 = 0 \text{ より } P_s^1 = 0$$

すなわち、系統周波数成分のみが非零で、この振幅と初期位相は定常運転時の発電機の有効、無効電力のみによって決まる。この式については一般によく知られている⁽¹⁾⁽²⁾。

(ii) 三相しゃ断時 しゃ断現象は本質的に電磁束不滅法則に従う⁽³⁾。これを電流連続の仮定をおいて式を解いたり、あるいは電流を変数としたシミュレーションを行なうと、現実にはありえないような過渡トルクとなって表われる。ステップ分については誤りはないが、系統周波数成分については完全に誤りである。仮に事故しゃ断が三相一括同時に行なわれたとすると、電磁束が保たれて一切の過渡現象は発生しないことになる。

現実の電力系統におけるしゃ断現象は、理想的には三相の各電流値がそれぞれ零となった瞬間にしゃ断されるいわゆる三相不ぞろいしゃ断となる。この場合には第3図の等価回路図で説明されるように、発電機出力電流の連続条件が満足され、過渡現象は(2)式の考え方で解くことができる。いま、事故後4, 5サイクル目にしゃ断を行なうとし、その時間付近での各相の事故電流が第4図のようになっていたとすると、理想的しゃ断は c, b, a 相の順に行なわれる(第5図参照)。

(i) c 相しゃ断 ($j=2, t=T_2$) c 相の事故電流が零になった時しゃ断が行なわれ、各係数は

$$K_a^2 = K_b^2 = C_a^2 = C_b^2 = 0$$

$$K_c^2 = 2, C_c^2 = 1$$

と変化する。

過渡トルクのステップ成分は c 相の事故除去によって ΔP_s^c だけ変化する。一般に $\Delta P_s^c \doteq P_s/3$ であり、ここで P_s は定常時の電氣的トルクである。

次に系統周波数成分を調べると、 B_{1s}^1, B_{1c}^1 と B_{1s}^2, B_{1c}^2 の関係から事故中のトルク波形が僅んど連続しているものと考えられる。変圧器を Δ - Y 結線としてトルク変化を計算するのは各相間に相互電流作用があるため難しい。ここでは近似的に Y - Y 結線回路の場合について考えると以下のようになり理解しやすい。

第3図 しゃ断時電流モデル

Fig. 3. Model of currents at breaking.

第4図 電流波形

Fig. 4. Figure of currents.

第5図 時間順序

Fig. 5. Timing sequence.

c 相しゃ断時の系統周波数成分トルク増分 $\Delta P_1^2(t)$ は

$$\begin{aligned} \Delta P_1^2(t) = & -2/3 \frac{2X_e}{2X_e + X_0 + X_t} \\ & \times \varepsilon^{-\gamma c'(T_2 - T_1)} \varepsilon^{-\gamma c'(t - T_2)} \\ & \times \{I_c^1(T_1) - i_{c0}^1\} e_c' \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

となる (e_c' は Y - Y 結線時の発電機 c 相電圧)。ここでは、無限大母線側送電線の減衰係数は十分大きいとして計算した。この変化分の大きさは、 T_1, T_2 のタイミングによるが、事故時の系統周波数成分に比べて小さい。すなわち、事故時に発生した系統周波数成分トルクは振幅が多少変化するだけで、そのまま続いてゆくものと考えられる。振幅の変化分は、減衰がたとえ零としても、事故後トルク振幅に比べて $1/5$ 以下である [Δ - Y 結線時にも大差ないことは計算によって確かめられている。第6図(c)参照]。

第 6 図 三相不ぞろいしゃ断時過渡トルク

Fig. 6. Transient torque at three phase unbalanced breaking.

2 倍周波数成分は c 相しゃ断と同時に発生し、その大きさと初期位相は、しゃ断のタイミング T_2 によらず一意に決まり、それぞれ

$$\sqrt{(B_{2s}^2)^2 + (B_{2c}^2)^2}, \tan^{-1} \frac{B_{2c}^2}{B_{2s}^2}$$

となる。ここで大きさに関しては、 a, b, c 相いずれをしゃ断しても変わらないが、初期位相についてはしゃ断相によって変化することが、 B_{2s}^j, B_{2c}^j の関係よりわかる（前者は $\sin$ と $\cos$ の二乗和の効果、後者は比の効果による）。

(ロ) b 相しゃ断 ($j=3, t=T_3$) c 相しゃ断後電気角において $\pi/3$ 近くの所で b 相の事故電流が零となる（厳密には電流に直流分が重畳しているので $\pi/3$ にはならない）。このとき b 相の地絡が除去されたでしょう。過渡トルクのステップ分は $P_s^3 = \Delta P_s^c + \Delta P_s^b \approx 2/3 P_s$ となる。系統周波数成分の変化は、前節と同様 Y-Y 結線を仮定すれば (8) 式と同じように表わせ依然として事故後の波が連続するものと考えられる。また、2 倍周波数成分については、大きさ、初期位相共に、すでにしゃ断された相（この場合、 b, c 両相）により一意に定まる。

(ハ) a 相しゃ断 ($j=4, t=T_4$) 残りの a 相をしゃ断し、三相すべてがしゃ断され事故が取除かれた時、過渡トルクのステップ分 $P_s^4 = \Delta P_s^c + \Delta P_s^b + \Delta P_s^a$ はほぼ P_s に復帰する。厳密には変化前後を通じて位相 δ を一定としているので状態変化前後のリアクタンス変化分だけ小さい値に復帰する。系統周波数成分の変化は、(8) 式で与えられるように僅どなく 2 倍周波数成分は三相対称にもどるために消える。

4. 計算例

この一連の三相地絡、 c 相しゃ断、 b 相しゃ断、 a 相しゃ断の状態変化を起こした時の過渡トルクの計算例を第 6 図にプロットした。本例は第 2 表に示すよう

第 2 表 データ

Fig. 2. Data.

600 MW ベース			
X_θ	0.24 p. u.	M_1	200 p. u.
X_f	0.13 p. u.	M_2	400 p. u.
X_e	0.083 p. u.	K_1	12 p. u.
E	1.18 p. u.	γ (正常, しゃ断)	$1/100 \text{ ms}^{-1}$
E_s	1.0 p. u.	γ (地絡)	$1/200 \text{ ms}^{-1}$
θ_0	0.0 rad.		
δ	0.48 rad.		

第 7 図 厳密なステップ分トルク

Fig. 7. Exact unidirectional torque.

な典型的な大容量タービン発電機を対象としている。過渡トルクは、全体としてのトルク、ステップ分、系統周波数成分、2 倍周波数成分の順に示した。

このモデルでは、定常時発電機の出力トルク $P_s = 1.0 \text{ p. u.}$ としている。三相地絡発生時には、過渡トルクの系統周波数成分は、初期の振幅 2.58 p. u., 初期位相は正弦波で 23.0° となる。ステップ分は抵抗を考えていないのでゼロとなる。実際の系統では、同期機の電機子抵抗、制動巻線抵抗等があったり所内負荷などの影響でステップ分トルクは、 P_s から 0 p. u. へ階段状で落ちるのではなく、第 7 図に示すように、 P_s のうちの 1 部（同期機抵抗 + 送電線抵抗による分）は、電機子時定数程度の減衰をしながら、電機子抵抗の損失分トルクの値へと収束するような形をとる⁽⁴⁾。

本論文で用いたモデルではこの現象は現われない。

しゃ断時には、ステップ分は 0.338 p. u., 0.628 p. u., 0.927 p. u. と約 1/3 ずつ階段状に増加してゆくのが見られる。また系統周波数成分には僅ど新しい波が発生しないものと考えてよい。ちなみに、 c, b, a 相しゃ断による変化分の位相は連続でその大きさは 0.088 p. u., 0.045, 0.221 p. u. と小さい。この点は従来の三相一括で電流連続という誤った条件で解いて得られる波形に比べて全く異なる結果を与える。三相不ぞろいしゃ断により生じる新たな過渡トルク成分として 2 倍周波数成分があり、その大きさと初期位相は、第 6 図に見られるように、 c 相しゃ断時で振幅 0.699 p. u., 初期位相（正弦波で） 206.9° , b 相しゃ断時で 1.089 p. u., 236.3° である。

5. 軸ねじれトルクの最大値比較

前章までに得られた三相不ぞろいしゃ断時の過渡トルクと、三相一括しゃ断時のトルクとでタービン・発

第 8 図 タービン段系

Fig. 8. Turbine-generator system.

電機軸ねじれトルクの最大値がどの程度違ってくるかを調べる。ここでは簡単のため、しゃ断時に積重ねられる軸ねじれトルクを計算し比較する。

タービン・発電機系としては、第 8 図のタービン系一段のものを考える。軸ねじれトルク T_s と電氣的過渡トルク T_e との関係は次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$\frac{d^2}{dt^2} T_s(t) - \omega_0^2 T_s(t) = T_e(t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\omega_0^2 = K_1 \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2}$$

ここで、 M_1, M_2 : 発電機、タービン慣性定数 (p. u.), K_1 : 軸のばね定数 (p. u.), ω_0 : 軸ねじれ共振周波数 (p. u.)

三相一括しゃ断と三相不ぞろいしゃ断とによる、ステップ分過渡トルクの軸ねじれトルクへの効果を調べる。三相一括しゃ断では、正規化して

$$\frac{d^2}{dt^2} T_{su}^0(t) + \omega_0^2 T_{su}^0(t) = u(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

三相不ぞろいしゃ断では

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} T_{su}^u(t) + \omega_0^2 T_{su}^u(t) \\ = 1/3 \{u(t) + u(t - \Delta T) + u(t - 2\Delta T)\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで、 $u(t)$ はステップ関数、 ΔT は不ぞろいの時間間隔である。これを解くと

$$\begin{aligned} T_{su}^0(t) &= 1/\omega_0^2 (1 - \cos \omega_0 t) \\ T_{su}^u(t) &= 1/3 \omega_0^2 \{3 - \cos \omega_0 t \\ &\quad - \cos \omega_0(t - \Delta T) - \cos \omega_0(t - 2\Delta T)\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

この両者の大きさの比は

$$\begin{aligned} R_{0u}^u &= |\max T_{su}^u(t)| / |\max T_{su}^0(t)| \\ &= 1/3 \sqrt{1 + 4(\cos \omega_0 \Delta T + \cos^2 \omega_0 \Delta T)} \\ &\leq 1 \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

であり、本例題では R_{0u}^u は次の値となる。

$$R_{0u}^u = 0.968$$

次に系統周波数成分過渡トルクの軸ねじれトルクに与える効果を比較してみる。三相一括しゃ断時では正規化して

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} T_{s1}^0(t) + \omega_0^2 T_{s1}^0(t) \\ = \sin t - u(t - T) \sin t \\ + u(t - T) \alpha \sin(t - T + \beta) \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

α, β はしゃ断後に発生すると考えられる系統周波数成分の振幅初期位相である。三相不ぞろいしゃ断では

$$\frac{d^2}{dt^2} T_{s1}^u(t) + \omega_0^2 T_{s1}^u(t) = \sin t \quad \dots\dots\dots (15)$$

となり(系統周波数成分は連続)、これを計算すると

$$\begin{aligned} T_{s1}^0(t) &= \frac{1}{1 - \omega_0^2} \frac{1}{\omega_0} \{ \sin \omega_0 t - \omega_0 \sin t \\ &\quad + \sin \omega_0(t - T) - \omega_0 \sin(t - T) \\ &\quad + \alpha \sin \omega_0(t - T + \beta) - \alpha \omega_0 \sin(t - T \\ &\quad + \beta) + \alpha \omega_0 \cos \omega_0(t - T + \beta) \\ &\quad - \alpha \omega_0 \cos(t - T + \beta) \} \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$T_{s1}^u(t) = \frac{1}{1 - \omega_0^2} \frac{1}{\omega_0} (\sin \omega_0 t - \omega_0 \sin t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

である。この両者の振幅の比を

$$R_{0u}^1 = |\max T_{s1}^u(t)| / |\max T_{s1}^0(t)|$$

で定義すると、本例題では $\alpha = 0.97$, $\beta = -2.05 \text{ rad}$, $T = 2\pi - 0.386 \text{ rad}$ である(一括しゃ断を仮定して解いた)から

$$R_{0u}^1 = 4.8/14.7 = 0.33$$

である。

この計算例からもわかるように、しゃ断時における過渡トルクの計算法を、三相一括しゃ断という誤まった仮定を置いて解いた場合と、三相不ぞろい電流零点しゃ断として解いた場合とで軸ねじれトルクの応答が大きく違ってくる。この計算例では、ステップ分に対応する軸ねじれトルクについては $R_{0u}^u = 0.968$ より 3.2% 小さくなり、系統周波数成分に対応する軸ねじれトルクでは、 $R_{0u}^1 = 0.33$ より 67% も小さくなっていることがわかる。

なお、三相不ぞろいしゃ断の場合に発生する 2 倍周波数成分に対応する軸ねじれトルクは、

$$\frac{d^2}{dt^2} T_{s2}(t) + \omega_0^2 T_{s2}(t) = \sin 2t \quad \dots\dots\dots (18)$$

より

$$T_{s2}(t) = \frac{1}{4 - \omega_0^2} \frac{1}{\omega_0} (2 \sin \omega_0 t - \omega_0 \sin 2t) \quad \dots\dots\dots (19)$$

となり、系統周波数成分に対応する軸ねじれトルクの(17)式と比べてわかるように、最大値の比で $(1 - \omega_0)/(2 - \omega_0)$ と小さくなる。しかも過渡トルクの 2 倍周波

数成分の大きさは最大で 1.089 p. u. (*b* 相しゃ断時) であり系統周波数成分の大きさ 2.58 p. u. に比べて小さい。また、ステップ分に対応する軸ねじれトルクに比べても小さいことから、2 倍周波数成分に対応する軸ねじれトルクについては無視した。

5. 終わりに

二回線送電線中の一回線発電所至近端三相地絡事故の三相不ぞろい除去を行なった時に発生する過渡トルクを計算した。その結果、従来計算されていた三相一括しゃ断により得られている過渡トルクは誤りであり理想的電流零点しゃ断により新たに生じる過渡トルクは僅でないことがわかった。三相不ぞろいしゃ断の特徴は、過渡トルクのステップ分が 3 段の階段状に上って行く点と、系統周波数成分に生じる新たなショックがほとんどないという 2 点である。

本論文ではしゃ断時における過渡トルクについて電磁束連続の正しい仮定に基づいて計算し、得られたトルクパターンをタービン・発電機系軸ねじれトルク伝達関数に代入して簡単なモデルでその応答を計算した。その結果、しゃ断条件の違いが軸ねじれトルクの大きさに大いに影響があることが確かめられたので、今後の過渡トルク計算には三相不ぞろい電流零点しゃ断で解く必要があることがわかった。

(昭和 50 年 7 月 2 日受付, 同 51 年 3 月 4 日再受付)

文 献

- (1) H. S. Kirschbaum: Trans. Amer. Inst. Elect. Engr 64, 65 (Feb. 1945)
- (2) V. W. Ruskin: Trans. Amer. Inst. Elect. Engr 74, 618 (Aug. 1955)
- (3) 林: 交流理論と過渡現象 (昭 35) オーム社
- (4) D. B. Mehta & B. Adkins: Trans. Amer. Inst. Elect. Engr (1960 Feb.)
- (5) A. Hizume: ASME Conf. 75 DET-71 (Aug. 1975)

付 録

(6) 式の導出

$$\begin{aligned} e_a I_a^j(t) = & -3E^2 \sin(t + \theta_0 + \delta + \pi/6) \\ & \times \{y_{aa}^j \cos(t + \theta_0 + \delta + \pi/6) \\ & + y_{ab}^j \cos(t + \theta_0 + \delta + \pi/6 - 2/3\pi) \\ & + y_{ac}^j \cos(t + \theta_0 + \pi/6 + 2/3\pi)\} \\ & + \sqrt{3}EE_s \sin(t + \theta_0 + \delta + \pi/6) \\ & \times \{C_a^j y_{aa}^j \cos(t + \theta_0) + C_b^j y_{ab}^j \cos(t \\ & + \theta_0 - 2/3\pi) + C_c^j y_{ac}^j \cos(t + \theta_0 + 2/3\pi)\} \end{aligned} \quad \text{..... (付 1)}$$

b, c 相についても同様にして表わされる。

$$2/3 \mathbf{e}^t \cdot \mathbf{I}^j(t) = P_u^j + B_{2s}^j \sin 2t + B_{2c}^j \cos 2t \quad \text{..... (6)}$$

ここで

$$\begin{aligned} P_u^j = & 1/\sqrt{3}EE_s \{ (C_a^j y_{aa}^j + C_b^j y_{bb}^j \\ & + C_c^j y_{cc}^j) \sin(\delta + \pi/6) + (C_c^j y_{ac}^j \\ & + C_a^j y_{ba}^j + C_b^j y_{cb}^j) \sin(\delta + \pi/6 - 2/3\pi) \\ & + (C_b^j y_{ab}^j + C_c^j y_{bc}^j + C_a^j y_{ca}^j) \sin(\delta \\ & + \pi/6 + 2/3\pi) \} \quad \text{..... (付 2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{2s}^j = & -E^2 \{ (y_{aa}^j + y_{bc}^j + y_{cb}^j) \cos \{2(\theta_0 \\ & + \delta + \pi/6)\} + (y_{ab}^j + y_{ba}^j + y_{cc}^j) \cos \{2(\theta_0 \\ & + \delta + \pi/6) - 2/3\pi\} + (y_{ac}^j + y_{bb}^j + y_{ca}^j) \\ & \times \cos \{2(\theta_0 + \delta + \pi/6) + 2/3\pi\} \} \\ & + 1/\sqrt{3}EE_s \{ (C_a^j y_{aa}^j + C_c^j y_{bc}^j \\ & + C_b^j y_{cb}^j) \cos(2\theta_0 + \delta + \pi/6) + (C_b^j y_{ab}^j \\ & + C_a^j y_{ba}^j + C_c^j y_{cc}^j) \cos(2\theta_0 + \delta + \pi/6 \\ & - 2/3\pi) + (C_c^j y_{ac}^j + C_b^j y_{bb}^j \\ & + C_a^j y_{ca}^j) \cos(2\theta_0 + \delta + \pi/6 + 2/3\pi) \} \end{aligned} \quad \text{..... (付 3)}$$

$$\begin{aligned} B_{2c}^j = & -E^2 \{ (y_{aa}^j + y_{bc}^j + y_{cb}^j) \sin \{2(\theta_0 \\ & + \delta + \pi/6)\} + (y_{ab}^j + y_{ba}^j + y_{cc}^j) \sin \{2(\theta_0 \\ & + \delta + \pi/6) - 2/3\pi\} + (y_{ac}^j + y_{bb}^j + y_{ca}^j) \\ & \times \sin \{2\theta_0 + \delta + \pi/6 + 2/3\pi\} \} \\ & + 1/\sqrt{3}EE_s \{ (C_a^j y_{aa}^j + C_c^j y_{bc}^j \\ & + C_b^j y_{cb}^j) \sin(2\theta_0 + \delta + \pi/6) + (C_b^j y_{ab}^j \\ & + C_a^j y_{ba}^j + C_c^j y_{cc}^j) \sin(2\theta_0 + \delta + \pi/6 \\ & - 2/3\pi) + (C_c^j y_{ac}^j + C_b^j y_{bb}^j \\ & + C_a^j y_{ca}^j) \sin(2\theta_0 + \delta + \pi/6 + 2/3\pi) \} \end{aligned} \quad \text{..... (付 4)}$$

(7) 式の導出

$$\begin{aligned} -2/3 \mathbf{e}^t \cdot \mathbf{A}^j \{ \mathbf{I}^j(T_j) - \mathbf{i}_0^j \} \\ = B_{1s}^j \sin t + B_{1c}^j \cos t \quad \text{..... (7)} \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned} B_{1s}^j = & -2/\sqrt{3}E \{ \varepsilon^{-r_a^j(t-T_j)} \cos(\theta_0 + \delta \\ & + \pi/6) \{ I_a^j(T_j) - i_{a0}^j \} + \varepsilon^{-r_b^j(t-T_j)} \\ & \times \cos(\theta_0 + \delta + \pi/6 - 2/3\pi) \{ I_a^j(T_j) \\ & - i_{b0}^j \} + \varepsilon^{-r_c^j(t-T_j)} \cos(\theta_0 + \delta + \pi/6 \\ & + 2/3\pi) \{ I_c^j(T_j) - i_{c0}^j \} \} \quad \text{..... (付 5)} \\ B_{1c}^j = & -2/\sqrt{3}E \{ \varepsilon^{-r_a^j(t-T_j)} \sin \theta_0 \\ & + \delta + \pi/6 \} \{ I_a^j(T_j) - i_{a0}^j \} \\ & + \varepsilon^{-r_b^j(t-T_j)} \sin(\theta_0 + \delta + \pi/6 - 2/3\pi) \\ & \times \{ I_b^j(T_j) - i_{b0}^j \} + \varepsilon^{-r_c^j(t-T_j)} \sin(\theta_0 \\ & + \delta + \pi/6 + 2/3\pi) \{ I_c^j(T_j) - i_{c0}^j \} \} \end{aligned} \quad \text{..... (付 6)}$$