

並列直流電源しゃ断時の交流発電機電流

Calculation of AC Generator Current for Parallel DC Power Source Interruption

磯野 昭* 玉造 貞**
Akira Isono Teiichi Tamatsukuri

要 旨

交流発電機の負荷が整流負荷であり、その負荷の並列電源がしゃ断されたときの発電機電流と直流回路電流の時間的な変化をデジタル計算機で求めた。整流回路に対してはグレッツ結線において交流電流と直流電流の大きさの比から決まる各種の整流状態、すなわち直流電流が交流電流波高値より大きい範囲から最もよくみられる整流状態である2アームまたは3アーム(転流期間)の流通までを考慮している。

1. 緒 言

最近の整流素子の進歩に伴い直流負荷に対して直流発電機の代わりに交流発電機を用いて整流回路を介して負荷と接続するほうが経済的に有利な場合が出てきている。負荷には発電機よりはるかに大きな並列直流電源が接続されていることが多く、また直流電源は通常大きなインダクタンスを持つため並列直流電源がしゃ断されれば過渡的に大きな電流が発電機および発電機側の整流回路に流れる。この場合下記の二つの点に問題がある。

- (1) 整流素子であるシリコン整流器は熱容量が小さいため過電流に対する許容時間が短い。
- (2) 発電機にとっては三相短絡またはそれに近い状態が継続する。

それらの現象に対して高い信頼性を確保し、かつ経済的な設計を行なうには、この電流の変化を数値的に把握(はあく)する必要がある。本論文では発電機電流と整流回路電流の関係を考慮しながら、それらの時間的変動を求める計算法とその計算例について述べる。

2. 対 象 回 路

計算対象回路は図1に示すような二電源から成り、負荷は抵抗、インダクタンス、逆起電力より成っているもので近似される。

並列直流電源のしゃ断は多くは交流電源側で生じ、図1のように直流側で起こることは少ないであろうが、対象とする発電機および整流装置に対し過酷な条件となり、また計算も容易である図1のような条件を考える。

3. 計 算 法

3.1 計算方針

求める電圧、電流はある計算時間における平均値(直流側)、または実効値(交流側)であって、瞬時値はアーム電流を算定する場合のみ考慮する。

直流回路電流が発電機電流基本波波高値より大きい範囲は発電機に三相短絡が起こったとして計算し、直流回路は図1の整流回路端子電圧 E_a がゼロであるとして両者を独立に計算する。

直流回路電流が発電機電流の実効値 $\times \sqrt{2}$ より小さい範囲は転流リアクタンスと直流回路抵抗から決まる三つの整流モードに応じて直流回路の電圧、電流を求める。この場合、直流回路は図1に示すように逆起電力 E_{cd} を持ち、かつ直流電圧、電流とも時間的に変化しているので直流回路の抵抗としては整流器端子のある短い時間における平均の(電圧/電流)より得られる等価抵抗を用いる。

交流側の値は整流器端子の交直両方の電圧、電流の比から発電機

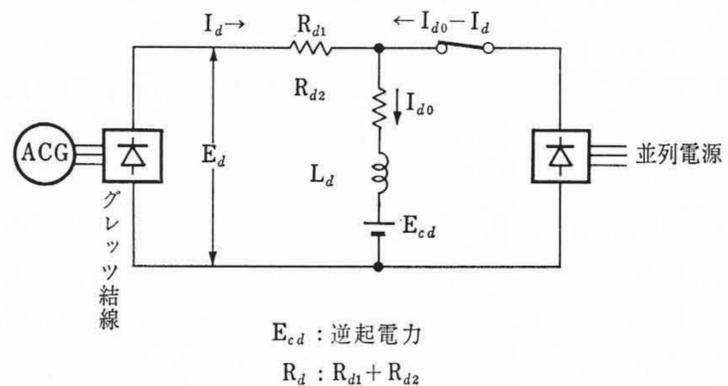


図1 対象回路

端子からみた整流器負荷をある等価なインピーダンスと置き換えて計算する。これらを微小時間に分割した各時間ごとに求める。

さらに以上の計算だけでは各整流モードに応じた交直の電流比が満足されないため、交直電流の比を導入し、同一時間において、直流側および交流側の計算を交直電流の比が満足されるまで繰り返し修正計算を行なう。

なお、各種整流モードを考慮する計算においては発電機の初期過渡リアクタンス x_d'' , x_q'' は無視するが、直流回路電流が交流電流波高値より大きい範囲、すなわち交直流側がそれぞれ独立に計算できる範囲に対しては別に x_d'' , x_q'' を考慮した計算も行なう。

3.2 計算仮定

- (1) 発電機の飽和は考慮しない。
- (2) 発電機の抵抗は無視する。
- (3) 界磁電圧は一定とする。
- (4) x_d'' , x_q'' の影響は無視する。
- (5) 転流リアクタンスは x_d'' であるとする(転流リアクタンスとしてだけ x_d'' を使用する。したがって入力データの入れ方により転流リアクタンスとして、たとえば逆相リアクタンス $x_2 = (x_d'' + x_q'')/2$ を用いることもできる)。
- (6) 電機子反作用は実効値が作用するものとする。
- (7) 発電機の直流分は無視する(後述のアーム電流を算定する場合は考慮する)。
- (8) 整流器の電圧降下は無視する。
- (9) 直流負荷の逆起電力は直流電流に無関係に一定とする。

3.3 計算手順

- (1) 転流リアクタンスは x_d'' 、電機子反作用は実効値が作用するとして故障前の電圧、電流を求め、並列直流電源しゃ断瞬時において界磁鎖交数に相当する電圧 e_q' が不変であるとする。
- (2) 発電機の三相短絡電流を求め、その波高値が直流電流より小さい範囲は時間を進めて交流側と直流側を独立に計算す

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立工場

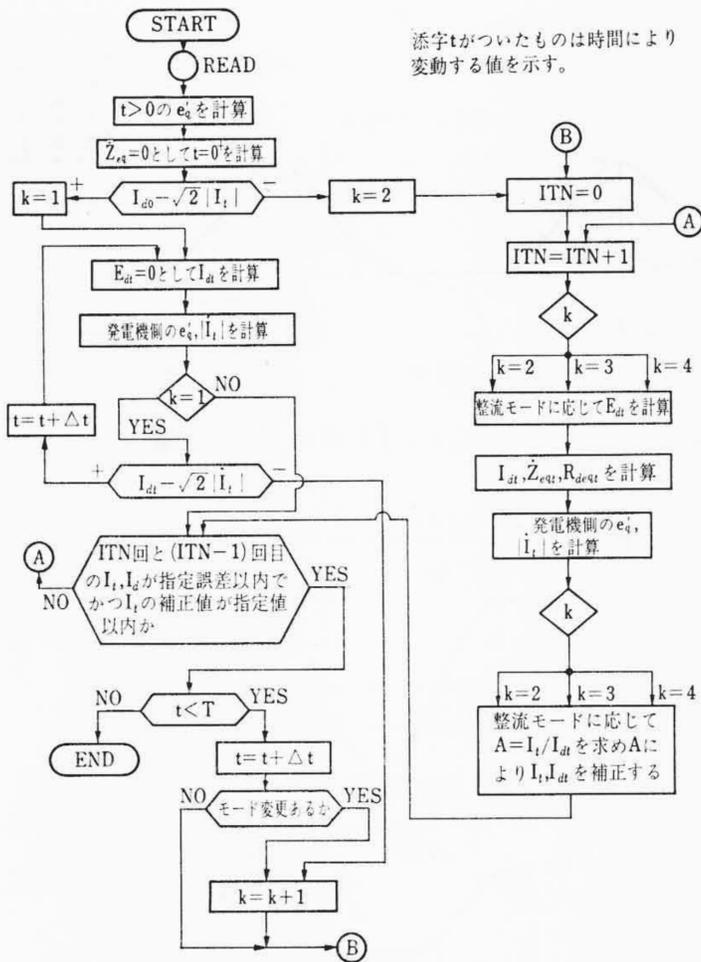


図2 フロー・チャート

る。

- (3) 直流電流 $I_d \leq$ 発電機電流 I 実効値 $\times \sqrt{2}$ になれば三つの整流モード (モード1: 2アームまたは3アームに流通, モード2: 常に3アームに流通, モード3: 3アームまたは4アームに流通) に応じて x_d'' の背後電圧 e'' と I_d から直流電圧の平均 E_d を計算する。
- (4) 時間 t における I_d は計算時間間隔 Δt 前の E_d が Δt 間不変であるとして計算する。発電機端子からみた整流器負荷の等価インピーダンス z_{eq} は x_d'' の背後点の皮相電力 $3e'' \cdot I$, 有効電力 $E_d \cdot I_d$ から(1)式のように求める。

$$z_{eq} = \frac{E_d I_d + j \sqrt{(3e'' \cdot |I|)^2 - (E_d I_d)^2}}{3|I|^2} - jx_d'' \dots (1)$$

整流回路の等価抵抗 $R_{aeq} = E_d / I_d$ を求める。

- (5) 交流側の値 I, e'', e_q' などを同期機のベクトル図から計算する。
- (6) 時間 t において以上の計算から求まる I/I_d を整流理論から求まる I/I_d の関係を用いて修正しその差が許容精度誤差以下になるまで(3)~(5)を繰り返す。
- (7) Δt 進めて(3)~(6)の計算を繰り返す。同時に x_d'' / R_{aeq} より整流モードを求めて、必要に応じて整流モードを変更する。

フロー・チャートを図2に、また主要な計算式を付録に示した。

4. 計算例

図3および図4は直流電流 I_d と発電機電流の実効値 I の計算例を示したものである。図3には別に初期過渡リアクタンスを考慮して $I_d > \sqrt{2}I$ の範囲を計算したときの発電機電流の基本波の実効値 I' (2倍周波分は無視) と直流分の最大値 I_{adc} (最大の直流分が発生する位相で並列電源がしゃ断されたときの値) を併記した⁽¹⁾。

図3に示す直流分電流の最大値 I_{adc} は $I_d < \sqrt{2}I$ になれば発電機電機子回路の等価の抵抗が大きくなるため急激に減衰する。実際には I_{adc} は $I_d = \sqrt{2}I$ の点から急減するのではなく、次章で述べる理由から $I_d = I_{adc} + \sqrt{2}I$ の点から減少し始め、 $I_d = \sqrt{2}I$ の点ではほ

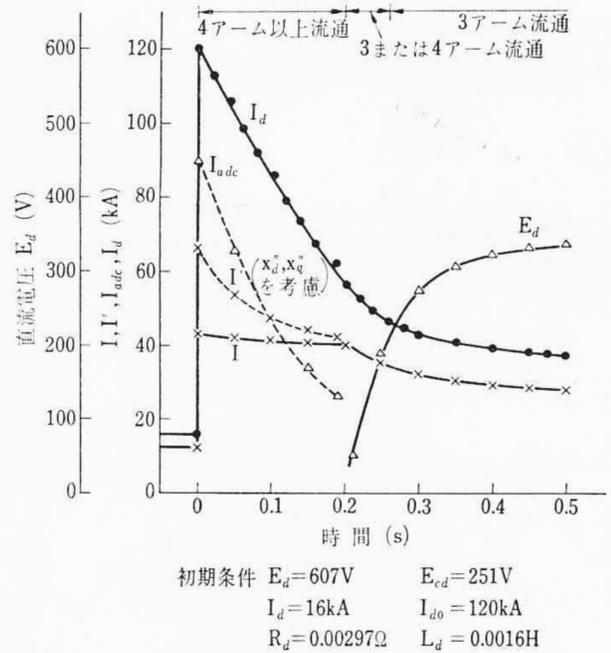


図3 直流電流 I_d , 発電機電流実効値 $I, (I')$ 直流分の最大値 I_{adc} の計算例

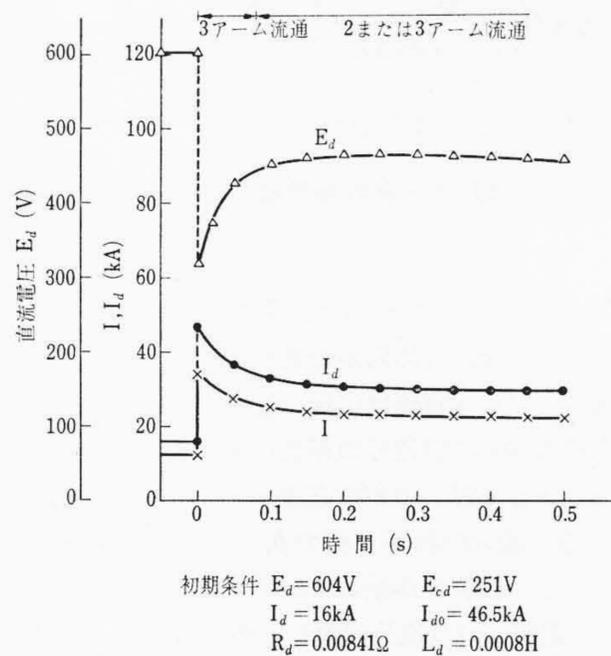


図4 直流電流 I_d , 発電機電流実効値 I の計算例2

とんど存在しないと考えるよい。

なお計算例に用いた発電機の定数は次のとおりである。

$x_a = 0.0168 \Omega$	界磁開路時定数 = 3.74 s
$x_q = 0.0100 \Omega$	界磁閉路時定数 = 1.37 s
$x_d' = 0.0070 \Omega$	電機子時定数 = 0.153 s
$x_d'' = 0.0044 \Omega$	直軸ダンパ時定数 = 0.08 s
$x_q'' = 0.0040 \Omega$	横軸ダンパ時定数 = 0.065 s

5. アーム電流の算定

整流モード1および2, すなわち2または3アーム流通時, および常に3アーム流通時には整流器の各アームの電流は発電機電流の半波であって転流期間から容易にその波形を求めることができる。またそれらの期間は軽負荷時の整流モード1を除き(発電機電流実効値 I / 直流電流 I_d) は 0.75 で近似できる。図5は整流モードと I/I_d の比および図3, 4の計算例の数値の関係を示したものである。

整流モード3, すなわち3または4アーム流通時および $I_d > \sqrt{2}I$ の範囲では同相の2アームを環流する電流が存在し発電機電流とアーム電流は異なる。図6は $I_d = \sqrt{2}I$ の場合の発電機電流とアーム電流の関係を示したものである。

直流電流 I_d が発電機電流波高値 $\sqrt{2}I$ より大きいとき, 各アームの整流素子の特性が同じであればアーム電流は図6のアーム電流に

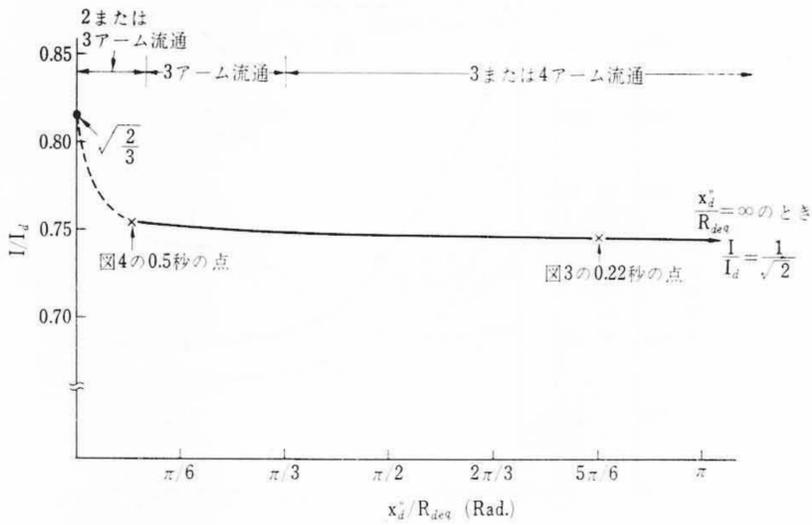


図5 各整流モードにおける I/I_d

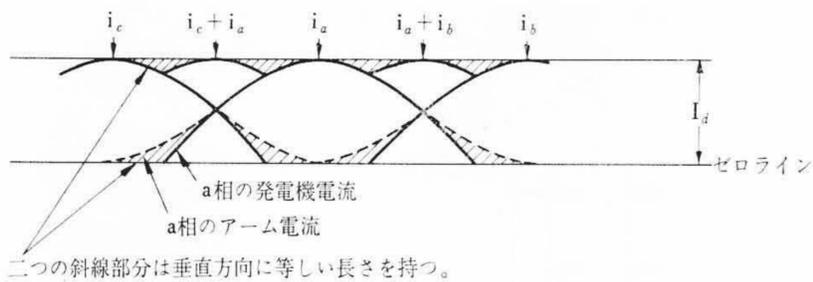


図6 $I_d = \sqrt{2}I$ のときの発電機電流とアーム電流の関係

$(I_d - \sqrt{2}I)/3$ のバイアスをつけた図7の実線と考える。実際には電流は点線のような、なめらかな波形となろうが実線と点線の差はわずかであり、アーム電流は実線で近似してよいであろう。

さらに発電機電流に直流分の存在を考える。このとき最も電流の大きいのは直流分が最大の相の直流分に対し順方向にあるアームである。直流分の最大の相がa相でb, c相にはa相と逆方向にその和がa相と等しい直流分が乗っているとしたときの発電機a相の電流 I_a , アーム電流 i_{a1} (直流分に対して順方向), i_{a2} (直流分に対し逆方向)の電流を示したのが図8である。直流電流 I_d が発電機電流の交流分基本波の波高値 $\sqrt{2}I$ と直流分 I_{adc} の和より大きければ図8の(b)のようになり、小さければ $I_d = \sqrt{2}I + I_{adc}$ となるまで I_{adc} が小さくなり、図8の(c)のようになろう。直流分が $I_d = \sqrt{2}I + I_{adc}$ まで減少するのは、もし減少しないとすれば整流回路端子に電圧が生じて有効電力が発生し、等価的に発電機交流側の抵抗が大きくなり結局直流分を減衰させるためである。実験的にも直流分によっては測定可能な整流回路電圧が発生しないことが確かめられている。図8の場合もアーム電流は図6の電流にそれぞれのバイアスをつけた実線で近似され、実際の値はその近くを点線で結んだものとなる。

6. 結 言

直流負荷に整流回路を介して交流発電機が接続されている回路について、その直流負荷の並列電源がしゃ断された場合の発電機電流、直流回路電流および各アーム電流がどのようになるかを検討し、信頼性の確保と経済設計への資料とした。

本計算法により実用上は支障ない程度の電流値の把握ができると思うが、詳細にみた場合には計算の前提条件に改善の余地が多々あろう。関係者のご批判をお願いしたい。

終わりに臨み、種々ご助言いただいた日立製作所日立工場西副工場長、谷越主任技師および日立研究所奥田主管研究員に対し厚く御礼申し上げる。

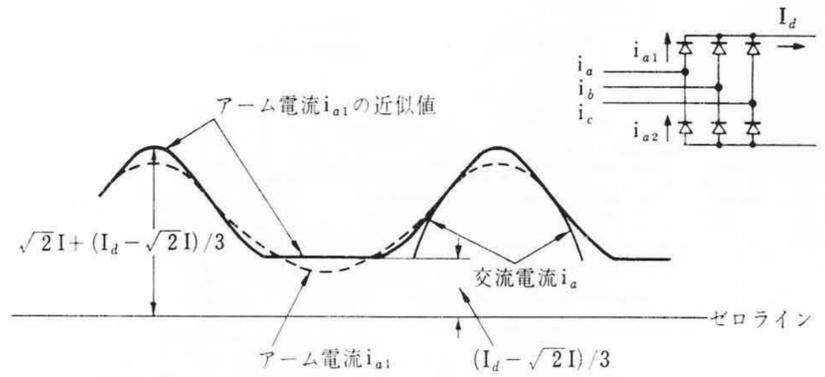
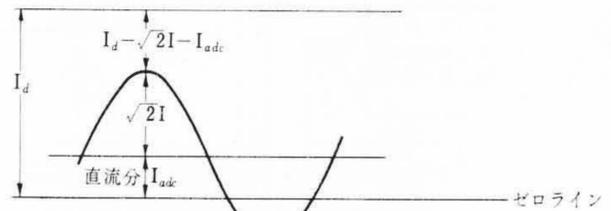
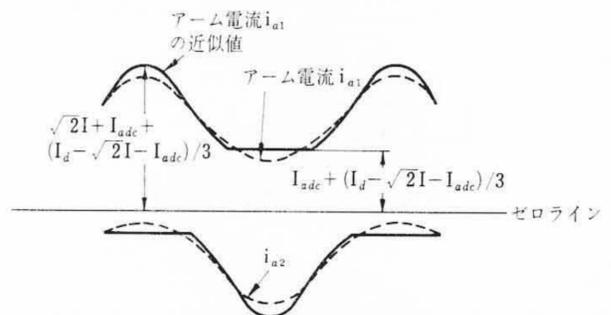


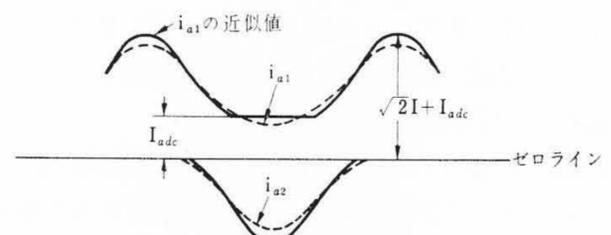
図7 $I_d > \sqrt{2}I$ 時のアーム電流



(a) 交流電流 i_a



(b) アーム電流 ($I_d > \sqrt{2}I + I_{adc}$)



(c) アーム電流 ($I_d = \sqrt{2}I + I_{adc}$)

図8 直流分があるときのアーム電流

7. 付 録

3. で用いたおもな計算式は下記のとおりである。

記号の説明

添字 t は時間的に変化する値、また $t-1$ は計算時間間隔 Δt 前の値であることを示している。[] のあるのはベクトル量である。

- e'' : x_d'' 背後電圧
- x_d'' : 直軸過渡リアクタンス
- E_a : 整流回路端子電圧の平均値
- I_a : 整流回路の電流
- u : 重なり角
- θ : 相差率角
- ϕ : (付4)式で定義される I と I_d 関係を表わす定数
- \dot{I} : 発電機電流の実効値
- I_{a0} : 並列電源しゃ断前の整流器負荷電流
- E_{ca} : 整流器負荷の逆起電力
- R_d : 整流負荷の抵抗
- L_d : 整流負荷のインダクタンス
- A : 整流理論から得られる I/I_d の比
- u_1 : (付9)式で定義される値、転流リアクタンス背後電圧が最大になってから交流電流が直流電流 I_d になるまでの位相角 (整流モード3に使用)

$R_{deq} : E_d/I_d$

ϕ : 付(11)式で定義される値, 上記 u_1 と同じ物理的意味を持つ(整流モード2に使用)

並列電源しや断前は整流モード1であるから⁽²⁾

$$e'' = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} E_d + \frac{1}{\sqrt{6}} x_d'' I_d \dots\dots\dots (付 1)$$

$$\cos u = 1 - \frac{\sqrt{2} x_d'' I_d}{\sqrt{3} e''} \dots\dots\dots (付 2)$$

$$\cos \theta = \frac{3}{\pi} \left(\frac{\cos \frac{u}{2}}{\sqrt{1-3\phi}} \right)^2 \dots\dots\dots (付 3)$$

$$\phi = \frac{\sin u (2 + \cos u) - u (1 + 2 \cos u)}{2\pi (1 - \cos u)^2} \dots\dots\dots (付 4)$$

$$\dot{I} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \cdot \sqrt{1-3\phi} (\cos \theta + j \sin \theta) \dots\dots\dots (付 5)$$

ただし e'' を基準ベクトルとする。

並列電源しや断後の値は

$$I_{dt} = \left(I_{d0} + \frac{E_{cd}}{R_d} \right) \varepsilon^{-\frac{R_d}{L_d} t} - \frac{E_{cd}}{R_d}, \quad (I_{dt} > \sqrt{2} I_t \text{ のとき}) \dots\dots\dots (付 6)$$

$$I_{dt} = \left(I_{dt-1} + \frac{E_{cd} - E_{dt-1}}{R_d} \right) \varepsilon^{-\frac{R_d}{L_d} \Delta t} - \frac{E_{cd} - E_{dt-1}}{R_d}, \quad (I_{dt} < \sqrt{2} I_t \text{ のとき}) \dots\dots\dots (付 7)$$

$$A = \sqrt{\frac{\{\pi(7/2 - \sin u_1 - \cos 2u_1 + 3u_1(1 - 2 \sin u_1)) + 3/2 \sin 2u_1 - 6 \cos u_1\}}{\pi(1 + \sin u_1)}}, \quad \left(\text{整流モード3, } \infty \geq \frac{x_d''}{R_{deq}} \geq \frac{\pi}{3} \text{ の範囲} \right) \dots\dots\dots (付 8)$$

$$u_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{x_d''}{R_{deq}} - \frac{\pi}{9}}{\frac{x_d''}{R_{deq}} + \frac{\pi}{9}} \right) \dots\dots\dots (付 9)$$

$$A = \sqrt{\frac{5}{6} - \left(\sqrt{3} - \frac{3}{4} \sin 2\phi + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\phi \right) / \pi \cdot \sin \left(\phi + \frac{\pi}{6} \right)}, \quad \left(\text{整流モード2, } \frac{\pi}{3} \geq \frac{x_d''}{R_{deq}} \geq \frac{\pi}{9} \text{ の範囲} \right) \dots\dots\dots (付 10)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{x_d''}{R_{deq}} \right) - \frac{\pi}{6} \dots\dots\dots (付 11)$$

$$A = \sqrt{\frac{2}{3} - \{ \sin u (2 + \cos u) - u (1 + 2 \cos u) \} / \pi (1 - \cos u)^2}, \quad \left(\text{整流モード1, } \frac{x_d''}{R_{deq}} < \frac{\pi}{9} \text{ の範囲} \right) \dots\dots\dots (付 12)$$

$$u = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{\pi}{3} - \frac{x_d''}{R_{deq}}}{\frac{\pi}{3} + \frac{x_d''}{R_{deq}}} \right) \dots\dots\dots (付 13)$$

$$E_{dt} = \frac{9}{\pi} (\sqrt{2} e_t'' - x_d'' \cdot I_{dt}), \quad (\text{整流モード3の範囲}) \dots\dots\dots (付 14)$$

$$E_{dt} = \frac{9}{2\pi} \sqrt{2e_t''^2 - \frac{4}{3} (x_d'' \cdot I_{dt})^2}, \quad (\text{整流モード2の範囲}) \dots\dots\dots (付 15)$$

$$E_{dt} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot e_t'' - \frac{3}{\pi} x_d'' \cdot I_{dt}, \quad (\text{整流モード1の範囲}) \dots\dots\dots (付 16)$$

時間 t における I_t, I_{dt} が整流理論から求まる I_t/I_{dt} と一致するよう行なう修正計算は(付17), (付18)式の $I_{t(new)}, I_{d(new)}$ を新しい I_t, I_d とすることによって行なわれる。ただし $I_{t(old)}$ は(付7)式から得られる値, $I_{t(old)}$ は E_{dt}, I_{dt} から同期機のベクトル関係を用いて⁽³⁾計算した発電機電流の実効値である。

$$I_{t(new)} = I_{t(old)} (1 + A) / 2 \dots\dots\dots (付 17)$$

$$I_{d(new)} = I_{d(old)} (1 + 1/A) / 2 \dots\dots\dots (付 18)$$

参 献 文 献

- (1) C. Concordia: Synchronous Machines, 54 (1951)
- (2) たとえば電気学会編: 水銀整流器, 124 (昭27)
- (3) S. B. Cray: Power System Stability II, 129 (1947)

Vol. 53 日 立 評 論 No. 6

目 次

■論 文

- ・90kG 超電導マグネット
- ・エレベータサービス評価指標とその測定装置
- ・原子力タービンの制御系統の特長
- ・分塊圧延工場の計算制御システム
- ・関西電力株式会社喜撰山発電所納相分離形密閉母線
- ・汎用電子回路解析プログラム HICAS 1
- ・HU-12形高性能電子顕微鏡の諸特性
- ・公害
- ・2扉ホワイトフリーザー形冷凍冷蔵庫の開発

・66kV OF用簡易形接続箱の開発 ■住宅設備機器特集

- ・総括
- ・ガスファーンエスの開発とその特性
- ・住宅向小形チラーユニットの性能
- ・RD-1000形除湿機の実用特性
- ・中高層住宅用換気扇の開発
- ・住宅用照明器具の工事省力化機構
- ・わが国におけるバスルームユニット化の動向

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 郵便番号 100
 取次店 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 郵便番号 101
 振替口座 東京 20018番