

# 交流側のインピーダンスの大きい単相全波整流回路の重なり角

Overlap Angle in Single-Phase Full Wave Rectifying Circuit  
with Large Impedance in AC Line

岩 田 幸 二\*  
Kōji Iwata

## 内 容 梗 概

模擬回路による実験結果を基礎とせる単相全波整流回路の解析において、重なり角  $u$  から整流器変圧器の入力端子における力率をきめ、この力率をもった交流負荷と等価と考えて交流理論に従って計算できることを前報<sup>(1)</sup>において報告した。

本報はその続きであり、重なり角  $u$  の決定に関して述べる。回路抵抗がない場合の重なり角は直流電流の最小値  $I_d \min$  を転流に寄与する電流と考えて普通の計算法における直流電流  $I_d$  のかわりに  $I_d \min$  を用いて計算してほぼ正確に求めることができる。この抵抗 = 0 における重なり角、またはこれに対応する転流リアクタンス降下に対し、抵抗、直列コンデンサ、制御角、ACF などの及ぼす影響を補正係数として実験式などで与えた。この方法により、直流電流の脈動、直列コンデンサ、ACF、回路の抵抗など、すべてを考慮した場合の重なり角が計算可能となり、前報<sup>(1)</sup>とともに、一般に算定が困難であったこの種の整流器回路の解析が可能となった。

## 1. 結 言

交流電気機関車を対象とした単相整流器回路においては、交流側に架線のインピーダンスなど大きなインピーダンスがあり、さらに電圧変動補償のため直列コンデンサをそう入している。また直流電流は一般に完全平滑ではなく、20~30%の脈動率をもっている。これらの理由により、従来の整流器理論をそのまま適用することはできない。普通の場合、交流側のリアクタンスは考えず、直流電流は完全平滑であり、整流回路の抵抗分は無視して計算する。特別の場合の整流器理論を扱った例もあるが、上記のすべてのパラメータを考慮して計算を進めることは非常に複雑になり、数学的解法による一般解をうることはかなりめんどりのようである。

そこで、この種の回路の解析を行うためには模擬回路によるのが最も得策であると考え、これを試作し、この整流回路の研究を進めてきた。

そのうち前報<sup>(1)</sup>において

(1) 模擬回路の結果と現地実験(東北本線黒磯-福島間)の結果とがよく一致し、十分等価性のあることを確かめた。

(2) 重なり角  $u$ 、制御角  $\alpha$  から求めた相差率  $\cos \varphi$  を交流側からみた力率と考え、整流器と直流負荷を含めて  $Z_{1<\varphi}$  の交流負荷と考え、交流理論に従って計算することができる。

点について述べた。

ここで問題になる  $u$  の決定については、直流電流の最小値を転流に寄与する電流であると考えて、転流リアクタンス降下を求める方が望ましいこと、2, 3の実験結果から回路条件によって定まる補正係数を用いて重なり角  $u$  を計算しうる点について報告した。

その後引き続き模擬回路により解析した結果、重なり角  $u$  の一般的計算法を実験結果から帰納的に確立した。

本計算法の確立は既設の路線に対する計算のみならず、一般に交流電化区間の計画にあたって問題となる諸点、たとえば変電所間隔の選定、車輛用変圧器、整流器の決定などにおいて簡便に使用できるという点を目的としたので、いささか理論的裏付の不足する面もあるが、ここにその計算法のうち、前報で述べなかった重なり角  $u$  の計算法について報告する。

なお、前報とは密接な関係があり、記号などは前報と同様第1表のとおりである。また前報に述べた点は記述を省略する場合が多

\* 日立製作所日立研究所

第1表 本報中で使用する符号

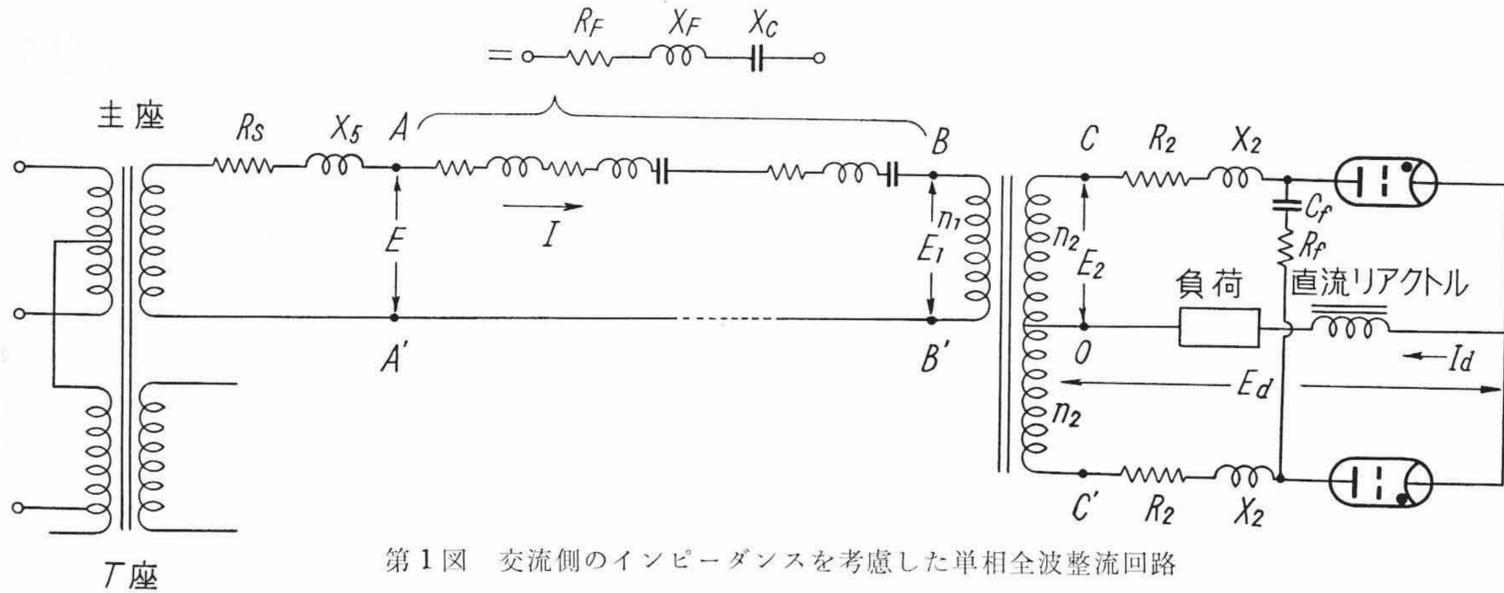
|                    |  |
|--------------------|--|
| $\alpha$ :         | 格子制御角  |
| $C_f$ :            | 交流フィルタ (ACF) のコンデンサ容量  |
| $E$ :              | 架線を含めた整流器回路の入力電圧、送電端電圧と記し、第1図の AA' 端子の電圧                       |
| $E_1$ :            | 整流器変圧器の入力電圧、第1図の BB' 端子の電圧                                     |
| $E_d$ :            | 直流出力電圧   |
| $E_2$ :            | 整流器変圧器の直流巻線電圧、第3図 OC 端の電圧                                      |
| $E_{20}$ :         | 無負荷のときの $E_2$  |
| $E_{d0}$ :         | 無負荷のときの $E_d$  |
| $E_{ZF}$ :         | 架線の電圧降下 (直列コンデンサを除く)   |
| $e_x$ :            | 転流リアクタンス降下   |
| $\bar{e}_x$ :      | $e_x$ の計算値 (7)式  |
| $e_{x0}$ :         | 制御角 $\alpha=0$ における $e_x$                                      |
| $(e_{x0})_{00}$ :  | (0, 0) 条件における $e_{x0}$ ( ) 外のサフィクスは条件を示す                       |
| $e_{x\alpha}$ :    | 制御角 $\alpha$ における $e_{x0}$                                     |
| $e_x^*$ :          | 回路抵抗=0のときの $e_x$   |
| $I_d$ :            | 直流電流   |
| $I_{d\min}$ :      | 脈動ある直流電流の最小値   |
| $I_{ex}$ :         | 変圧器の励磁電流   |
| $I_1$ :            | $I_{ex}$ を考へないときの変圧器交流 (一次) 巻線電流                               |
| $n_1$ :            | 変圧器の一次 (交流) 巻線の巻回数 (第1図 BB')                                   |
| $n_2$ :            | 変圧器の二次 (直流) 巻線の巻回数 (第1図 OC)                                    |
| $p$ :              | 直流電流の脈動率   |
| $R$ :              | 整流器回路の総合抵抗   |
| $R_c$ :            | 転流に関する回路抵抗   |
| $R_s$ :            | 電源の抵抗 (第3図)  |
| $R_F$ :            | 架線の抵抗  |
| $R_2$ :            | 変圧器の二次 (直流) 巻線の抵抗 (第1図 OC)                                     |
| $t$ :              | 時間   |
| $\tau$ :           | L-R 回路の時定数 (第16図参照)  |
| $u$ :              | 重なり角   |
| $u^*$ :            | 回路抵抗0のときの重なり角  |
| $X$ :              | 整流器回路の総合転流リアクタンス   |
| $X_s$ :            | 電源のリアクタンス  |
| $X_F$ :            | 架線のリアクタンス  |
| $X_2$ :            | 整流器変圧器の転流リアクタンス  |
| $X_c$ :            | 直列コンデンサのリアクタンス   |
| $\xi$ :            | $X_L/X_c'$ $X_L=2X$ $X_c'=\left(\frac{2n_2}{n_1}\right)^2 X_c$ |
| $\cos \varphi_1$ : | 第1図 BB' 端子における相差率  |

い。適宜前報を参照されたい。

## 2. 重なり角と回路抵抗および直流電流の脈流の関係

第1図はこの解析の対象とした回路の概要を示すものであり、前報で述べたように、多少検討事項を残しているが、相当広い範囲にわたり、 $\alpha$ 、 $u$  から相差率  $\cos \varphi$  を求め、それ以後は正弦波の定常解を取扱う交流理論によって電流、電圧、力率などを算定できることが明らかになった。しかし、重なり角がいかなる値になるかが問題である。

完全な平滑直流電流が流れ、また回路の抵抗が無視できれば、普



第1図 交流側のインピーダンスを考慮した単相全波整流回路

通の整流器回路に従い、制御角  $\alpha$ 、重なり角  $u$ 、転流リアクタンス  $X$ 、直流電流  $I_d$ 、交流電圧  $E_2$  の間には次の関係がある。

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + u) = 2e_x / E_{d0} \dots\dots\dots (1)$$

単相全波整流回路では

$$e_x = \frac{1}{\pi} I_d X \dots\dots\dots (2)$$

$$E_{d0} \doteq 0.9 E_{20} \dots\dots\dots (3)$$

ここで転流リアクタンス  $X$  は

$$X = \frac{1}{2} (X_s + X_f) \left( \frac{2n_2}{n_1} \right)^2 + X_2 \dots\dots\dots (4)$$

により求められる<sup>(1)</sup>。

また  $E_{20}$  は無負荷時の整流器変圧器直流巻線電圧である。

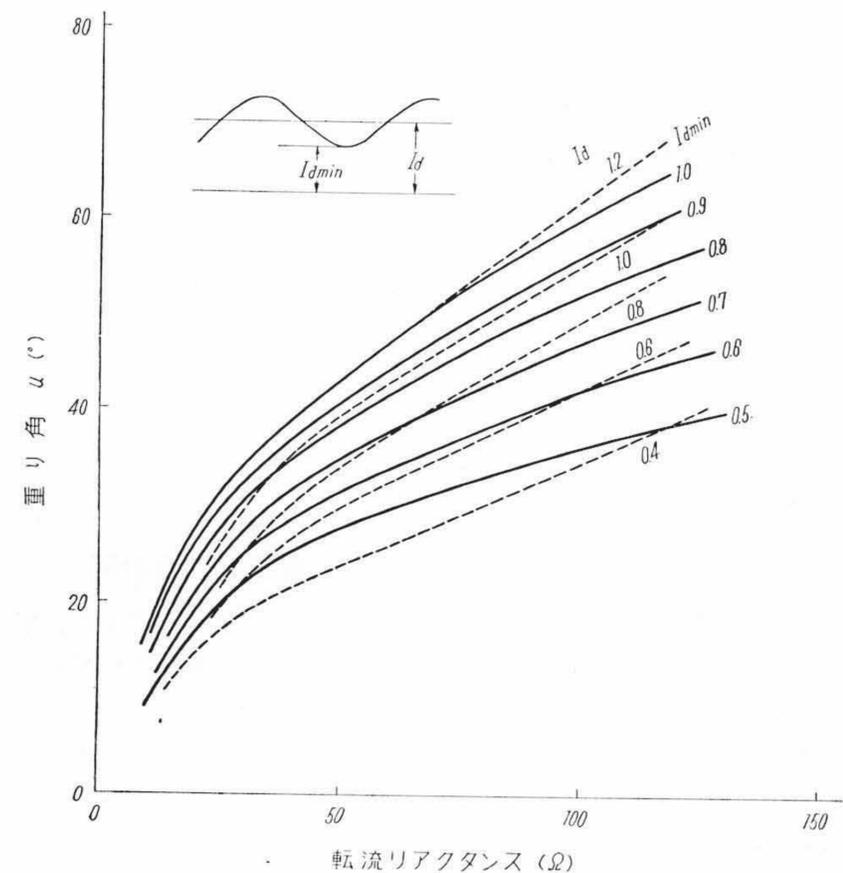
上記のような理想的な場合には(1)式に従うのであるが、一般に直流電流には脈動があり(脈動率  $p$ )、回路に抵抗がある。そのため重なり角  $u$  は

$$u = f(I_d, p, X, X_c, \alpha, R_c) \dots\dots\dots (5)$$

となり、さらに ACF のある場合は多少変化する。

2.1  $\alpha=0$  の場合

いま脈動率との関係を考えてみると、直流電流が平滑の場合に比し、転流開始時と終了時における電流値が違ふから、重なり角が相違していることは原理的に容易に考えられる。第2図は脈動のある



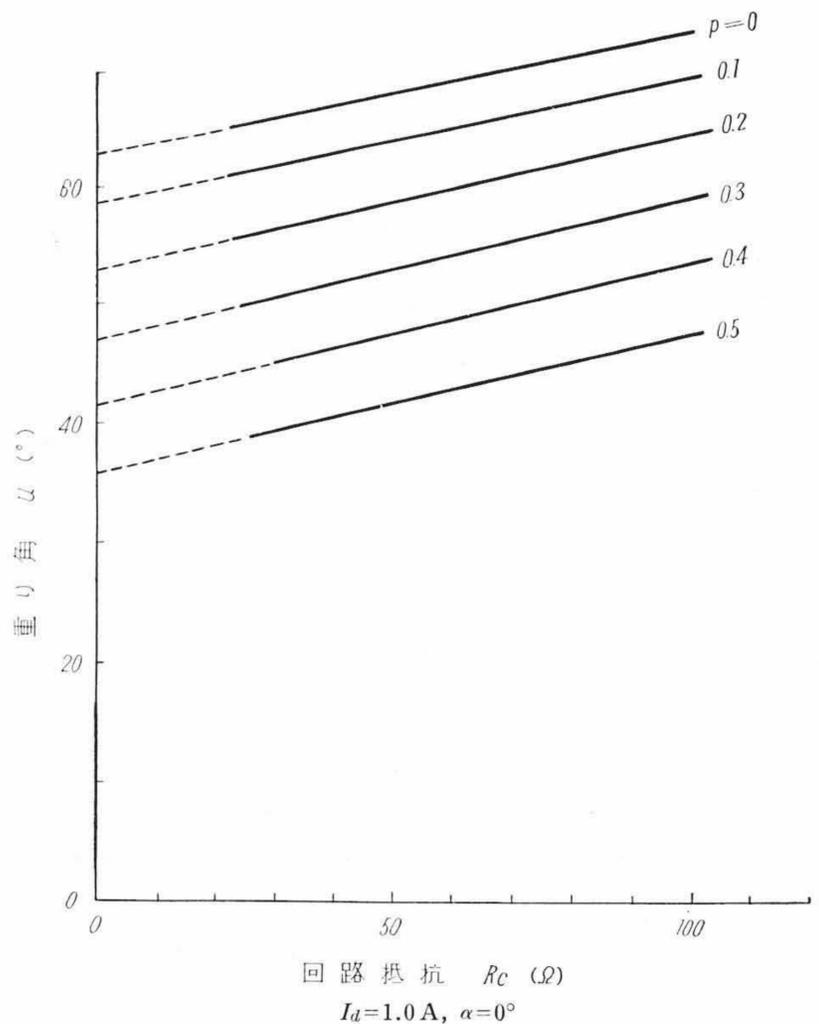
第2図 転流リアクタンスと重なり角の関係

直流電流が流れた場合の転流リアクタンスと重なり角の関係を直流電流の最小値  $I_{d \min}$  (第2図参照) をパラメータとして示した一例である。

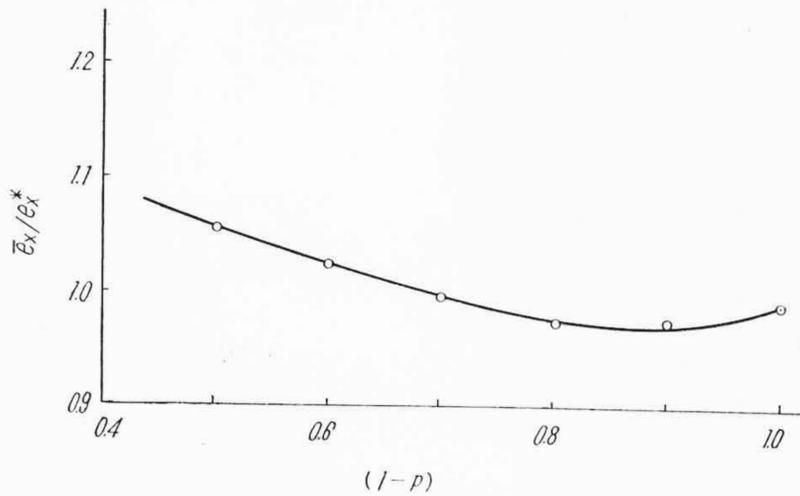
この図は直流電流 1 A (ED71 形交流機関車の場合に換算して定格直流電流 3,100 A の 110% になる) 入力電圧  $E$  = 一定、格子制御角  $\alpha=0$ 、直列コンデンサなし、ACF なしの条件において、直流側の回路定数を変化して脈動率を変え、重なり角を測定した結果を示すものである。同様の条件における平滑な直流電流が流れた場合の重なり角を(1)式にしたがって計算し、直流電流をパラメータとして図示すると図中の点線の曲線のようになる。

直流電流、直列コンデンサの有無、ACF の有無などを変えて実験した結果も第2図とほぼ同様の傾向にあった。この図からわかるように、重なり角に対する直流電流の寄与としては  $I_d$  そのものではなく、直流電流の最小値  $I_{d \min}$  が支配的要素になっていることを示している。

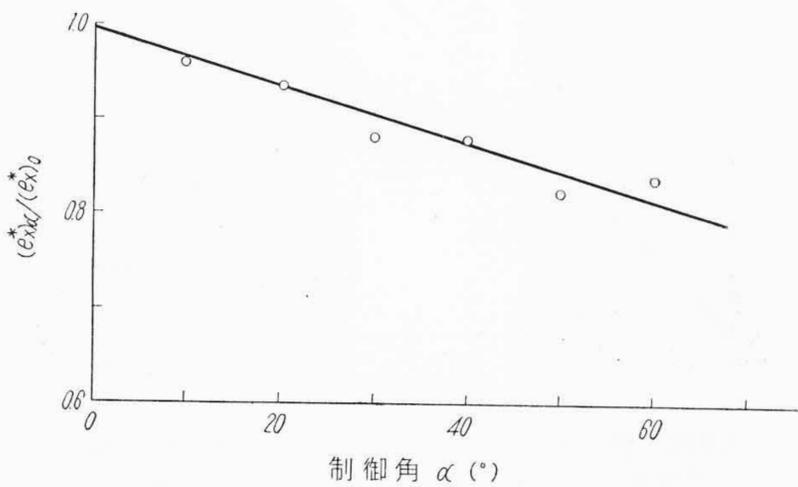
すなわち、近似的には  $I_{d \min}$  で転流が行われているものと考え、(2)式の  $I_d$  のかわりに  $I_{d \min}$  を用いて重なり角を算出しても大き



第3図 重なり角に対する回路抵抗  $R_c$  の影響



第4図  $\bar{e}_x/e_x^*$ の脈動率による相違



第5図  $e_x^*$  に対し制御角  $\alpha$  の及ぼす影響

な誤りをおかさないことがわかる。しかし、この図中  $I_{dmin}=1.0A$  の実線と  $I_d=1.0A$  の点線とが一致していないことから考えて、単に  $I_{dmin}$  を転流点電流と考え、(2)に  $I_{dmin}$  を用いるだけでは正しい重なり角は求められない。

そこで転流リアクタンス  $X=115.3 \Omega$  (実際の場合には福島変電所き電の場合の変電所から最も離れたき電線の末端におけるリアクタンスに相当する)、直流電流  $I_d=1.0A$ 、制御角  $\alpha=0$ 、直列コンデンサなし、ACFなし、の条件において、回路抵抗と直流電流のリップルを変えて重なり角を測定し、回路抵抗  $R_c$  と重なり角  $u$  の関係を直流電流の最小値をパラメータとして図示すると第3図のようになる。ここで  $R_c$  は転流に寄与する抵抗で(4)式と同様にして求めたものである。このように重なり角は回路抵抗の増加とともに大きくなる。いまこれらの測定点を  $R_c=0$  まで外そうして、回路抵抗がない場合の重なり角を求め、 $u_0^*$  とする。

ここで(1)式で  $\alpha=0$  として

$$\frac{(e_x^*)_0}{E_{d0}} = 1 - \cos u_0^* \dots\dots\dots (6)$$

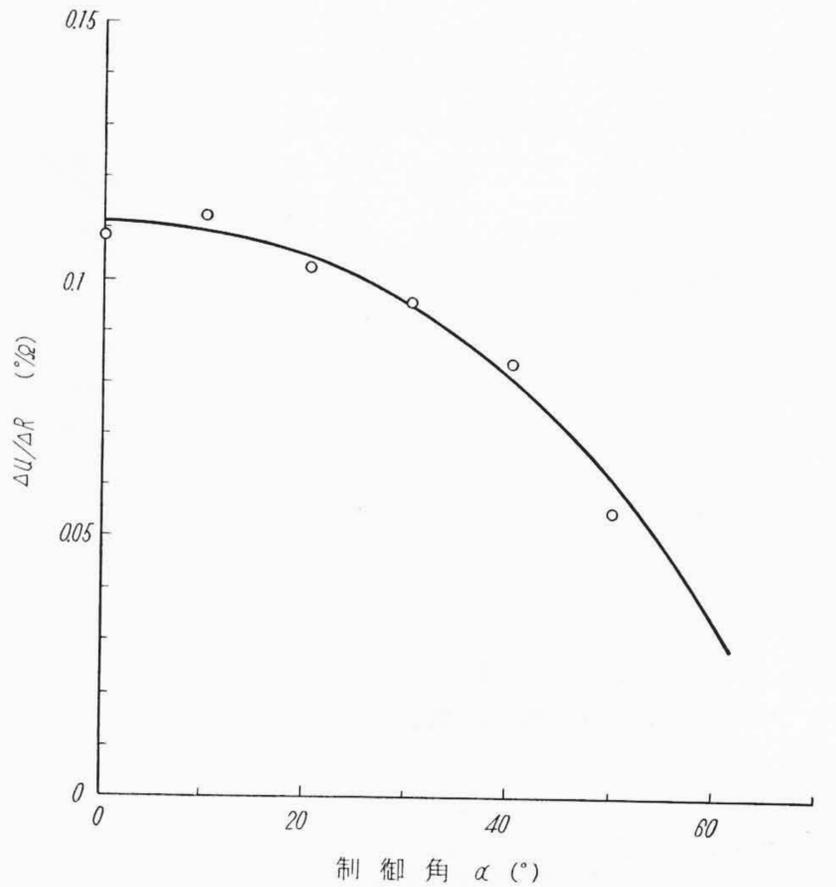
の関係を用いて、回路抵抗  $R_c=0$  のときの転流リアクタンス降下  $(e_x^*)_0$  を求める。

上述のごとく直流電流のかわりに直流電流の最小値  $I_{dmin}$  を(2)式に使用して計算した転流リアクタンス降下  $\bar{e}_x$ 、すなわち

$$\bar{e}_x = \frac{I_{dmin} X}{\pi} \dots\dots\dots (7)$$

を求める。

いま、いろいろ  $X$ 、 $I_d$  を変化して第3図と同様の関係を求め、測定点を外そうして、 $R_c=0$  の場合の重なり角  $u_0^*$  を求める。そして(6)式から  $(e_x^*)_0$  を、(7)式から  $\bar{e}_x$  を求め、 $\bar{e}_x/(e_x^*)_0$  を脈動率  $p$  の関数として表わすと第4図のようになり、脈動率が特に大きくないかぎり、 $\bar{e}_x/(e_x^*)_0 \approx 1$  と考えてさしつかえない。特に  $p=0$  の場合、すなわち電流が平滑の場合は  $\bar{e}_x/(e_x^*)_0 \equiv 1$  であり、(1)式は直流電流が平滑で、回路抵抗が0の場合には実験結果と一致すること



第6図 抵抗による重なり角の変化率  $\Delta u/\Delta R$  の制御角  $\alpha$  による変化

を示している。

そして脈動がある場合は転流リアクタンス降下を従来の計算式における  $I_d$  のかわりに  $I_{dmin}$  を用いて計算して  $\bar{e}_x$  を求め、正確を要したり、脈動率が大きい場合には第4図の補正係数を用いて  $(e_x^*)_0$ 、 $u_0$  を求めることができる。

### 2.2 制御角 $\alpha \neq 0$ の場合

$\alpha \neq 0$ 、 $R_c=0$  の場合の重なり角  $u_a^*$  を上記と同様に実験値の外そうにより求め、(1)式により、そのときの  $(e_x^*)_a$  を計算する。そして  $\alpha=0$  のときの転流リアクタンス降下  $(e_x^*)_0$  との比  $(e_x^*)_a/(e_x^*)_0$  を求めると第5図のようになる。

この関係は直流電流の脈動率0~50%範囲においては、脈動率や転流リアクタンスの大きさにはほとんど無関係である。したがって  $(e_x^*)_a/(e_x^*)_0$  は第5図のように  $\alpha$  のみによって定るものと考えてさしつかえない。

以上のようにして、 $R_c=0$  の場合の転流リアクタンス降下がわかり、したがって重なり角は求められる。

### 2.3 回路抵抗による重なり角の変化量

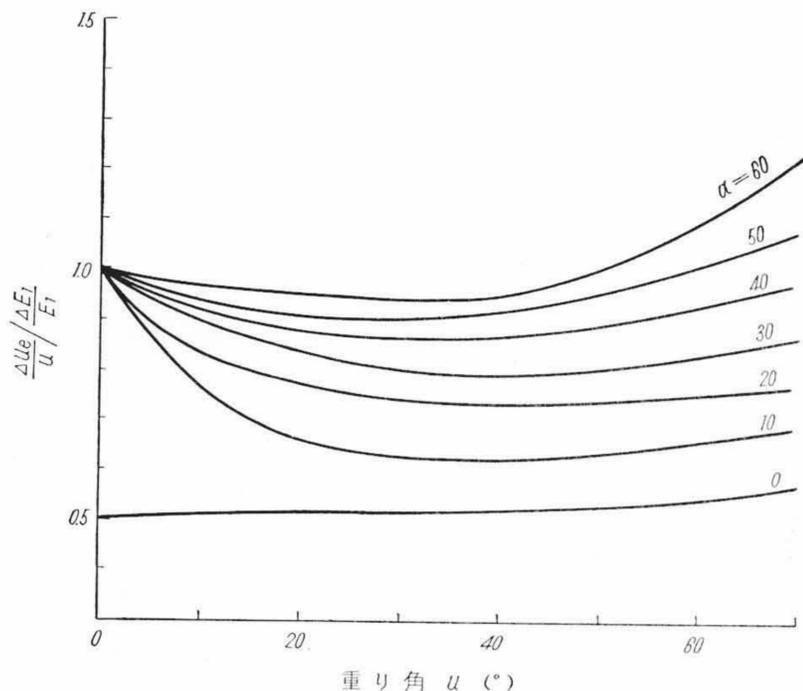
転流リアクタンス  $X$  =一定、のもとで回路抵抗  $R_c$  を変化して、重なり角を求めるも前述の第3図のとおりであり、この図のような関係を制御角  $\alpha$ 、転流リアクタンス  $X$ 、直流電流の脈動率  $p$  を変えて測定してみると第3図と同様の関係となり、図示のようにほぼ直線的になる。しかもこの直線の傾斜  $\Delta u/\Delta R_c$  は脈動率50%までぐらいは脈動率  $p$  に無関係であり、制御角  $\alpha$  によって変化する。実験結果を整理して、制御角  $\alpha$  と  $\Delta u/\Delta R_c$  の関係を求めると第6図のようになる。この関係から回路抵抗  $R_c$  が決れば  $\Delta u$  が決定され、この  $\Delta u$  と第2.1節および第2.2節で求めた  $R_c=0$  のときの重なり角  $u_0^*$  および  $u_a^*$  とにより

$$u_a = u_a^* + \Delta u \dots\dots\dots (8)$$

として求められる。

### 3. 重なり角に対する直列蓄電器の影響

直列蓄電器の影響はいろいろ考えられ、実際にこれを計算することは直流電流が平滑であり、しかも回路抵抗  $R_c=0$  の場合でも



第7図 (3.27)式の計算結果

$$\delta = \tan^{-1}$$

$$\frac{(\tau_1 - u)(\cos \frac{u}{\xi} - \cos u) - (1 + \cos \frac{u}{\xi}) \sin \frac{1}{\xi} + \xi(1 + \cos u) \sin \frac{u}{\xi}}{(\pi - u)(\sin \frac{1}{\xi} - \xi \sin \frac{u}{\xi}) - \xi \sin u \sin \frac{u}{\xi} + (2\xi^2 - \cos u - 1)(1 + \cos \frac{u}{\xi})}$$

$$\frac{I_d X}{E_2} = \sqrt{2} \frac{\xi (\sin \frac{u}{\xi} - \sin u) \sin \delta + (\cos \frac{u}{\xi} - \cos u) \cos \delta}{(1 + \cos \frac{u}{\xi}) (1 - \frac{X_c'}{X})}$$

ただし  $\xi^2 = X/X_c' \neq 1$  の場合

( $X_c'$ :  $X_c$  を直流側に換算した値)

$\delta$ : 直列コンデンサそう入による電源電圧に対するパンタ点電圧の進み角

となり、簡単ではない<sup>(2)</sup>。しかし、前記のパンタ点電圧  $E_1$  (整流器変圧器の入力電圧) を一定になるようにして、重なり角と転流リアクタンス  $X$  との関係直列蓄電器のある場合とない場合について測定してみると前報で述べたように、 $E_1$  が一定ならば直列蓄電器の有無は重なり角には無関係である。このことは直列蓄電器のリアクタンス  $X_c$  が特に大きくないかぎり、重なり角は  $X_c$  には無関係に転流時の電圧、電流と回路の誘導性リアクタンスによって決定されると考えられる。そこで平滑直流電流が流れ、回路抵抗  $R=0$  の場合の関係式(1)式から

$$-\frac{du}{u} = \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{u \sin(\alpha + u)} \cdot \frac{dE_{d0}}{E_{d0}} \dots (9)$$

いま簡単のために

$$\frac{dE_1}{E_1} = \frac{dE_{d0}}{E_{d0}} \dots (10)$$

が成立するものとすれば

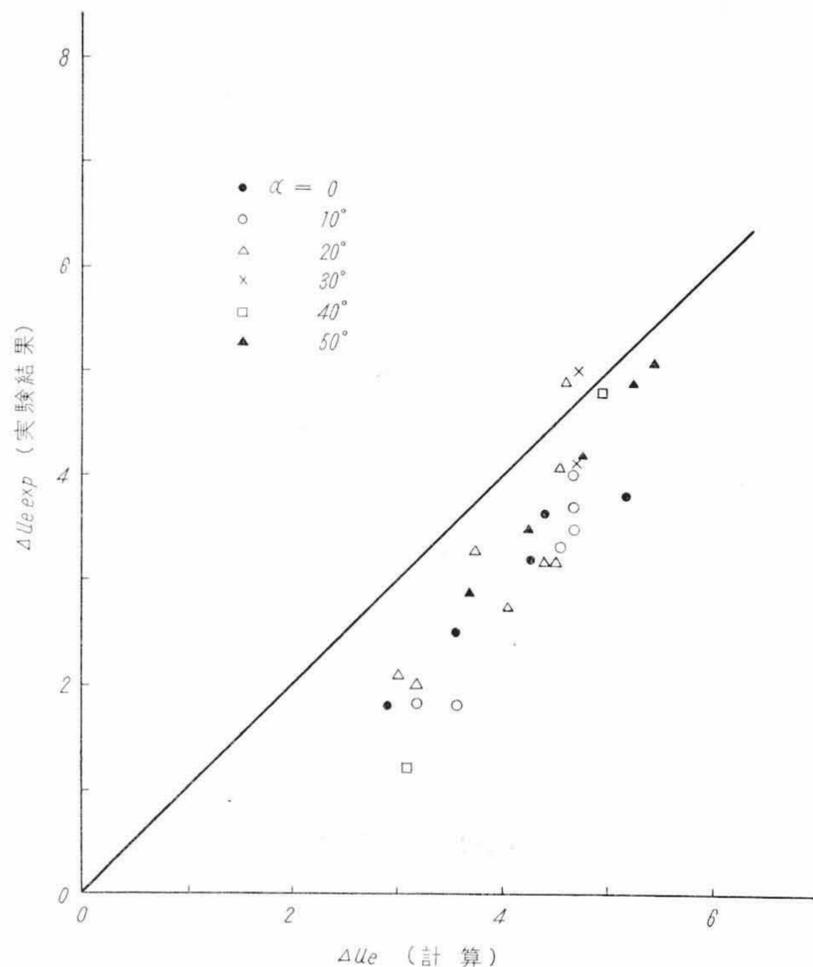
$$-\frac{du}{u} / \frac{dE_1}{E_1} = \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{u \sin(\alpha + u)} \dots (11)$$

$\alpha=0$  のときは

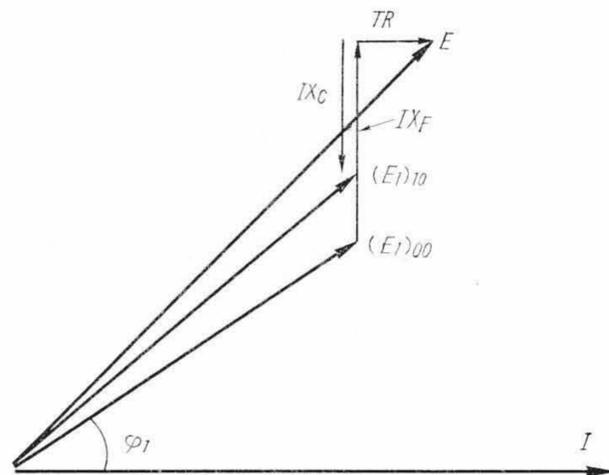
$$-\frac{du}{u} / \frac{dE_1}{E_1} = \frac{1}{u} \cdot \tan \frac{u}{2} \dots (12)$$

をうる。

(10)式は  $E_1$  の変化量が大きくなければ近似的には成立するであろう。(11)式の右辺を計算して図示すると第7図のようになる。ここで送電端電圧  $E$  =一定の条件で行った実験において直列蓄電器のある場合とない場合の整流器変圧器入力電圧  $E_1$  を測定し  $(E_1)_{00}$ ,  $(E_1)_{10}$  とする。このときの重なり角をそれぞれ  $(u)_{00}$ ,  $(u)_{10}$  とする



第8図 直列コンデンサによる重なり角の変化分  $\Delta u_e$  の実験値と電圧の上昇から計算した値との比較



第9図 直列コンデンサの有無による  $E_1$  の差を示すベクトル図

( ) 外の足字は00が直列蓄電器なし、10が直列蓄電器ありを示す。 $(u)_{00}$ , 制御角  $\alpha$  から第7図により  $\frac{du}{u} / \frac{dE_1}{E_1}$  を求め

$$(E_1)_{10} - (E_1)_{00} = \Delta E_1$$

として(11)により  $\Delta u_e / u$  を求める (前述の  $R_c$  による変化分と区別するため  $\Delta u_e$  とする)。この場合  $u$  は直列蓄電器のない場合の重なり角  $(u)_{00}$  を使用して  $\Delta u_e$  を求める。

そして直列蓄電器のある場合の重なり角  $(u)_{10}$  と蓄電器のない場合の重なり角  $(u)_{00}$  との差

$$(u)_{00} - (u)_{10} = (\Delta u_e)_{exp}$$

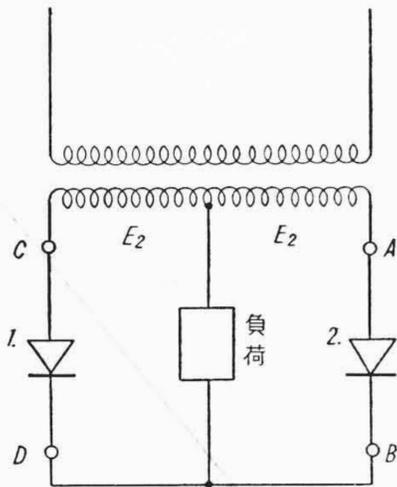
と上記のように直列蓄電器そう入による電圧の変化分から求めた重なり角の変化量  $\Delta u_e$  とを比較すると第8図のようである。図のように  $\Delta u_e \doteq (\Delta u_e)_{exp}$  はほぼ満足しているものと考えられる。

転流リアクタンス  $X$ , 回路抵抗  $R_c$  をいろいろ変化して同様の計算を行った場合、多少のばらつきは認められるが、 $1 \sim 1.5^\circ$  (電気角) 以上の差は認められない。したがって

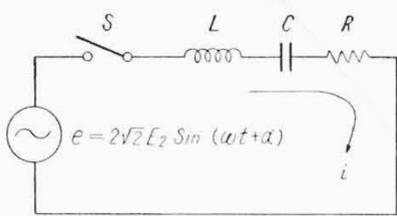
$$\Delta u_e \doteq (\Delta u_e)_{exp}$$

が成立する。

いま直列蓄電器によって整流器変圧器入力電圧  $E_1$  が上昇する場



第10図 単相全波整流回路



第11図 転流時の等価回路

合、その変化分を  $\Delta E_1$  として、簡単のため変圧器の励磁電流を考えないならば電圧、電流のベクトル図は第9図のようになる。

図において  $(E_1)_{00}$  が蓄電器のない場合  $(E_1)_{10}$  が蓄電器のある場合の入力電圧である。

$$|(\dot{E}_1)_{10}| - |(\dot{E}_1)_{00}| = \Delta E_1$$

を図を参照にして求めると

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_1 + \Delta E_1}{E_1} &\doteq \sqrt{1 + 2 \frac{X_c I}{E_1} \sin \varphi_1} \doteq 1 + \frac{X_c I}{E_1} \sin \varphi_1 \\ \therefore \Delta E_1 &\doteq I X_c \sin \varphi_1 \end{aligned} \right\} (13)$$

(11)式に代入して

$$-\Delta u_e = \frac{I X_c \sin \varphi_1}{E_1} \cdot \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)}{\sin(\alpha + u)} \dots (14)$$

として  $\Delta u_e$  が求められる。

ゆえに蓄電器のある場合の重なり角  $(u)_{10}$  は

$$(u)_{10} = (u)_{00} + \Delta u_e \dots (15)$$

#### 4. 重なり角に対する一考察

上記のように直列蓄電器が入り込むため重なり角の減少するのは変圧器への入力電圧が上昇するため、転流時における電圧の上昇のため、転流に寄与する電流の上昇度が大きいためと考えた。このことは蓄電器のリアクタンスが特に大きくなければ、蓄電器の有無が転流時の電流波形に大きな影響を与えないことを意味する。

いま第10図の単相全波整流回路において、転流時、すなわち整流器1が通電していて、整流器2を点弧したときを考えれば次のようである。

もし整流器2が点弧しなければ、整流器2の陽極-陰極間に印加される電圧(点弧時点を時間  $t$  の原点に選ぶ)は

$$e = 2\sqrt{2} E_2 \sin(\alpha + \omega t) \dots (16)$$

である。ここに  $\alpha$ : 格子制御角

$E_2$ : 変圧器直流巻線の電圧(実効値)

$t$ : 時間, 点弧時点を  $t = 0$  とする

$\omega$ : 角周波数

整流器2の点弧により、整流器1, 2を通じて短絡電流が流れ、2に流れる電流が整流器1に流れていた電流まで増大すれば転流が完了する。したがって、重なり角は整流器2に流れる電流が直流電流の値にまで上昇する時間と考えられる。第10図において、A

B端子から見たインピーダンスはCD間のインピーダンスが0であるとすればAC間から電源側をみたインピーダンスに等しい。これはさきに述べた整流器回路のインピーダンスにはほかならない。したがって  $t = 0$  において整流器2を導電状態にする場合、整流器2に流れる電流は第11図のLCR直列回路において、 $t = 0$  でスイッチSを接にしたときの電流と同一である。

この回路に流れる電流  $i$  は

$$R^2 - 4 \frac{L}{C} < 0$$

の場合(一般の整流器回路では抵抗  $R$  はそれほど大きくないからこれが満足される)について、 $t = 0$  で  $i = 0$ ,  $q = q_0$  とすれば

$$\begin{aligned} \frac{i}{I_m} &= \frac{2\sqrt{\frac{L}{C}}}{\sqrt{4\frac{L}{C} - R^2}} \varepsilon^{-at} \sin(\alpha + \varphi_0) \sin(bt - \phi) \\ &\quad - \frac{2\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{4\frac{L}{C} - R^2}} \varepsilon^{-at} \cos(\alpha - \varphi_0) \sin bt \\ &\quad + \sin(\omega t + \alpha - \varphi_0) + \frac{q_0}{I_m} \left\{ \cos bt(1-a) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin bt}{b}(1-a) \right\} \dots (17) \end{aligned}$$

ここで

$$\tan \phi = \frac{b}{a}, \quad I_m = \frac{2\sqrt{2} E_2}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L + \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$a = R/2L, \quad b = \sqrt{1/LC - (R/2L)^2} = \omega/\xi = \omega_0, \quad \xi^2 = \omega^2 LC$$

$$\tan \varphi_0 = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

となる。

この回路で  $L, C$  は今までの整流器回路においては

$$\omega L = X_L = 2X$$

$$\frac{1}{\omega C} = X_c'$$

ここに  $X$ : 転流リアクタンス

$X_c'$ : 直列蓄電器のリアクタンス  $X_c$  を変圧器の直流巻線側に換算したものである。

$t = 0$  の前、すなわち転流開始以前の電流  $i$  は前報の考察から

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \alpha - \varphi_1) \dots (18)$$

$$q = -\frac{\sqrt{2} I}{\omega} \cos(\omega t + \alpha - \varphi_1) \dots (19)$$

ここで、 $\varphi_1$  は前報で述べた相角である。また変圧器の励磁電流を考えなければ

$$I \doteq I_d$$

$\therefore t = 0$  において

$$q_0 = -\frac{I_d}{\omega} \cos(\alpha - \varphi_1) \dots (20)$$

一般の回路では

$$a = R/2L \gg 1$$

$$\therefore 1 \pm a \doteq \pm a \dots (21)$$

(20), (21)式を用いれば(17)式の第4項は

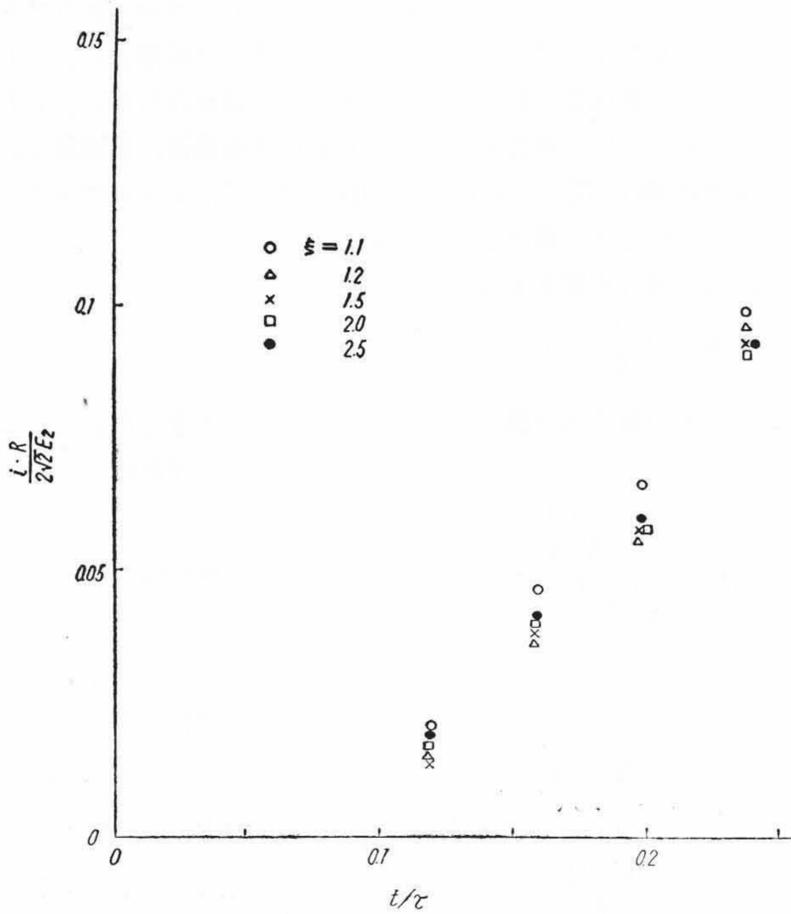
$$\frac{\sqrt{2} I_d}{I_m} \cdot \frac{a}{\omega} \cdot \frac{\sin(bt + \phi')}{\sin \phi'} \cos(\alpha + \varphi_1)$$

ただし  $\phi' = \tan^{-1} b$

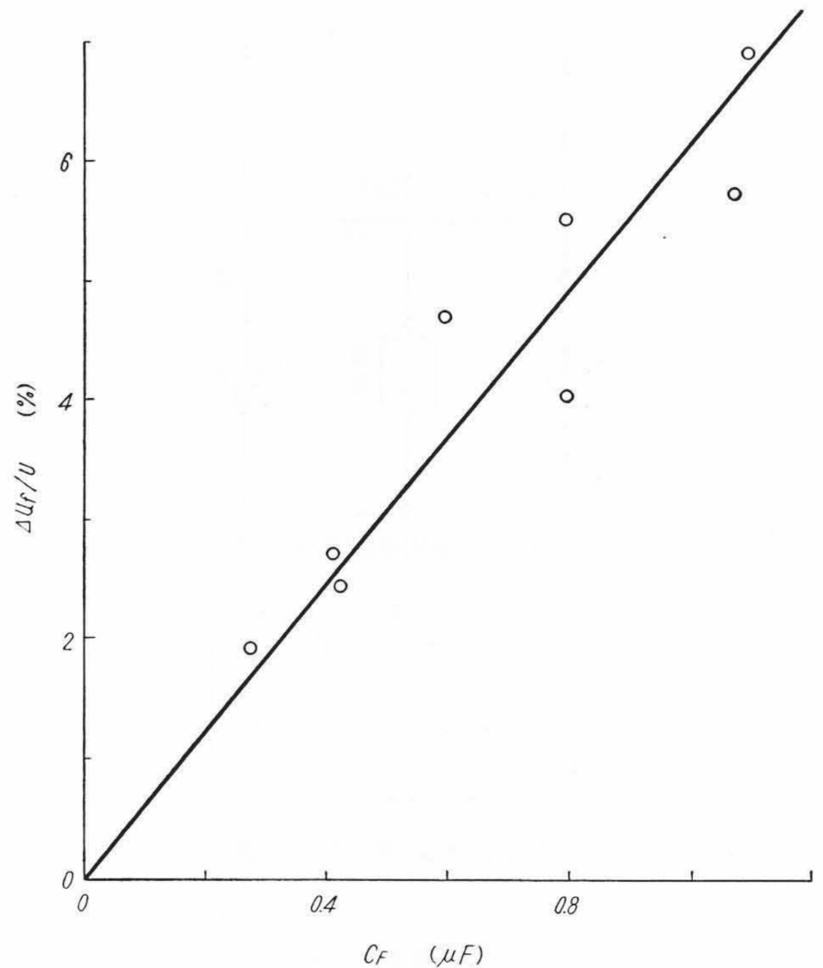
ここで通常の回路においては

$$X_L/R = 2 \sim 5$$

$$X_L/X_c = \xi = 1 \sim 5$$



第12図 (22)式の  $\tau=15.10^{-3}$ s としたとき  $\xi$  をパラメータとして計算した結果



ACFの時定数  $C_F R_F = 270.10^{-6}$ s 一定の条件で  $C_F$  を変化した場合  
第14図 交流フィルタ(ACF)の重なり角に及ぼす影響

第12図のようになる。

図において横軸は  $t/\tau$  で示しており、 $t/\tau=0.2$  はこの場合 3ms になり、50 サイクルのとき 54度である。このように相当の広範囲にわたって  $i/2\sqrt{2}E_2/R$  が一定値にまで上昇する時間は  $\xi$  の値には無関係であることがわかる。したがって  $E_2$  が一定ならば  $X_c$  によって重なり角はほとんど変化しないことがわかる。

### 5. ACF の影響

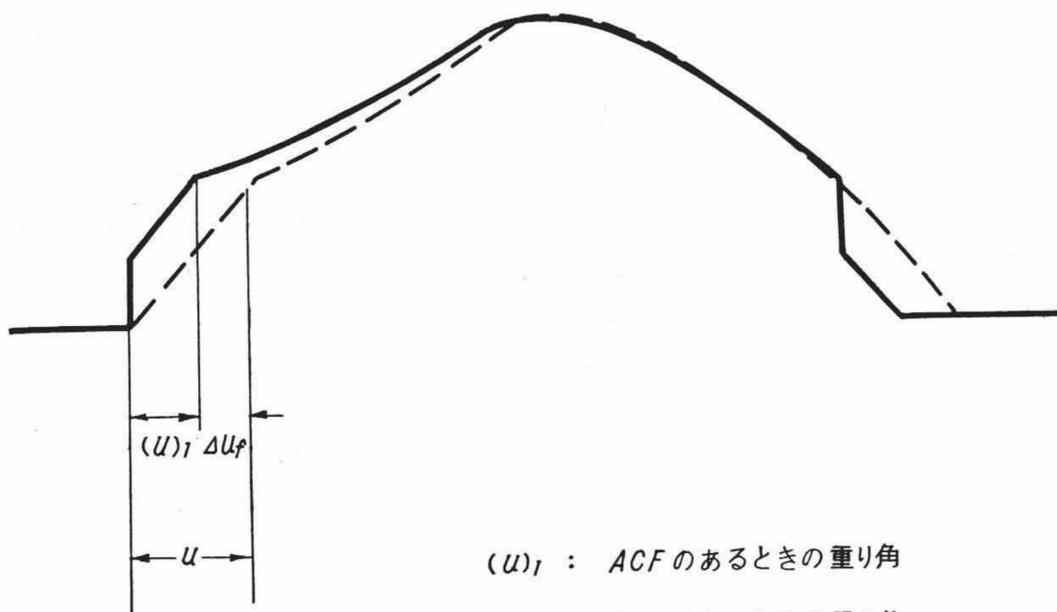
ACF がある場合の整流器の電流波形を観測すると第13図のとおりであり、点線が ACF のない場合の波形である。ACF の蓄電器の放電のため、電流の立上がりが一歩急しゅんになり、図に示す  $\Delta u_f$  だけ重なり角が減少する効果がある。

いま ACF を  $0.135 \mu F + 2,000 \Omega$  (現車換算  $80 \mu F + 3.37 \Omega$ ) および時定数を同一にして  $C$  を  $0.135 \sim 1.085 \mu F$  まで変化して ACF の

有無による重なり角の変化を求めると、 $C$  が大きくなるほど重なり角  $u$  の減少分は大きくなっており、測定の都合上 (重なり角  $u$  はオシロスコープの波形から測定し、その掃引は 100 kc のパルス発振器でときどき更正しているのであるが、 $u$  の正確な測定は困難である) 相当のばらつきはあるが、多くの実験結果の平均値をとると第14図のとおりである。

また  $C=0.59 \mu F$  一定の条件で抵抗  $R$  のみ  $500 \sim 2,000 \Omega$  に変化したが、転流リアクタンス、直列蓄電器の種々の値に対して重なり角は抵抗の変化には影響されないことがわかった。

脈動率も  $p=0 \sim 50\%$  の範囲ではあまり影響はなく、第14図を適用してさしつかえないようである。結局 ACF の時定数、直流電流の脈動、直列蓄電器の有無にかかわらず ACF の重なり角に対する影響は第14図で考えればよい。



$(u)_f$  : ACF のあるときの重なり角  
 $u$  : ACF のないときの重なり角

$\Delta u_f$  だけほぼ同一電流の場合の重なり角が減少する

第13図 重なり角に対する ACF の影響を示す陽極電流波形 (実線は ACF のあるとき、点線はないときの波形)

の程度である。これらを用いると

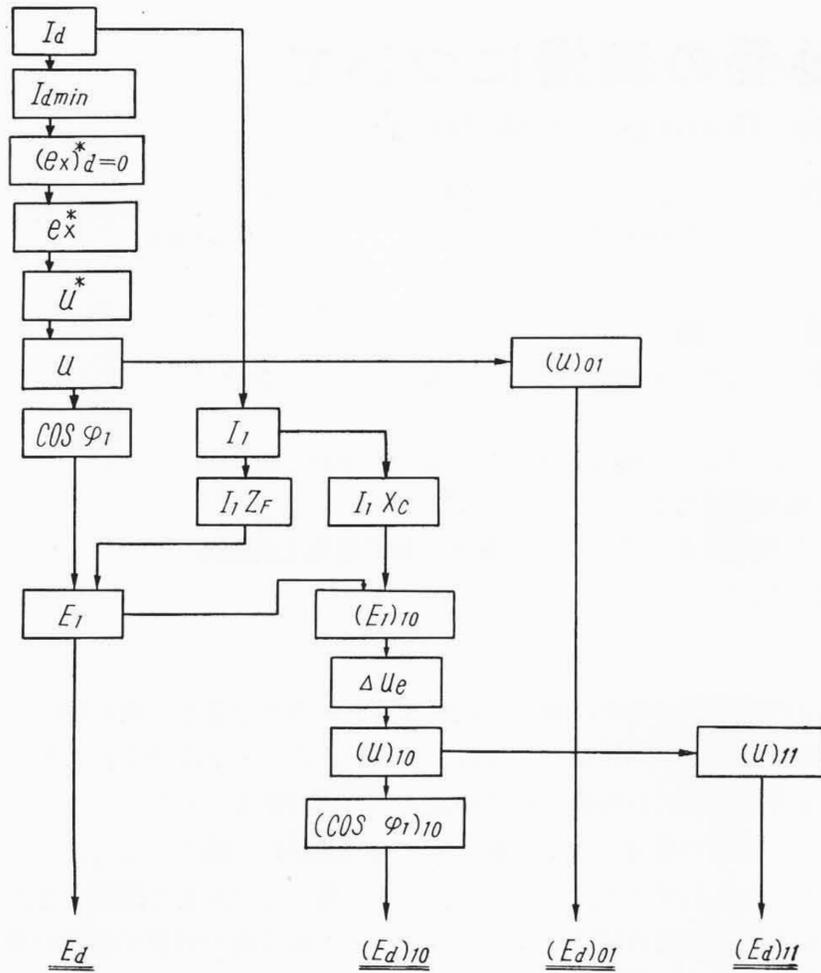
$$\phi' \doteq \frac{\pi}{2}$$

また  $I_m$  は第10図の短絡電流の波高値であるから  $\sqrt{2}I_d/I_m$  は  $1/10$  の程度である。

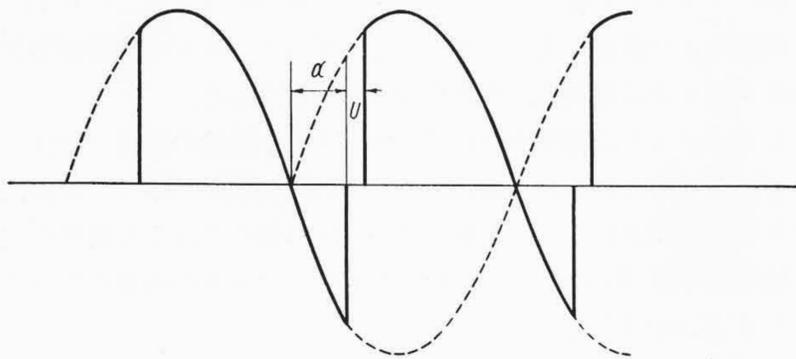
このような考察をすると (17) 式の第4項は小さいので省略する。そして (17) 式を変形すると

$$\frac{i}{2\sqrt{2}E_2/R} = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\varphi_0}} \left[ \varepsilon^{-at} \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{1}{2\tau\omega_0}\right)^2}} \left\{ \sin(\alpha-\varphi_0) \sin(\omega_0 t - \phi) - \frac{1}{\xi} \cos(\alpha-\varphi_0) \sin \omega_0 t \right\} + \sin(\omega t + \alpha - \varphi_0) \right] \dots\dots\dots (22)$$

(22) 式を  $\tau=15.10^{-3}$ (s)、 $\alpha=0$  の場合について数値計算をすると



第15図 直流電流計算法フローチャート



第16図 整流器出力端子の電圧

6. 総括

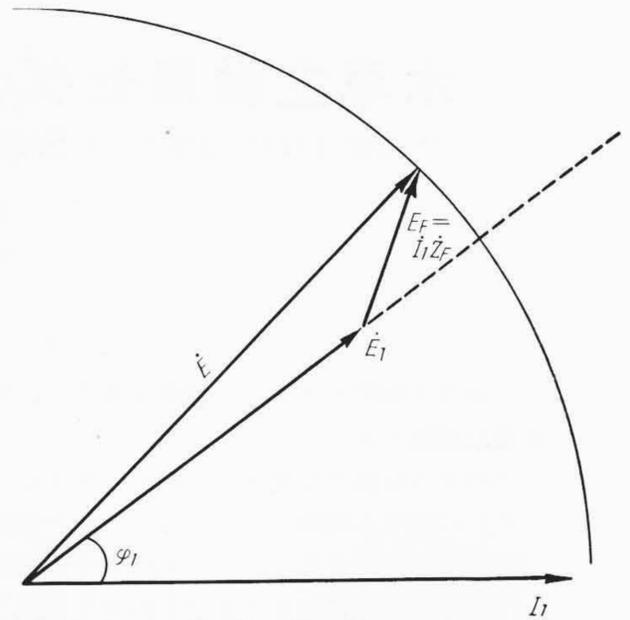
以上のようにして重なり角  $u$  を求め、 $u$  から交流回路の相差率  $\cos \varphi_1$  を求めて計算することができることがわかったのであるが、いま以上の結果と前報の結果とをとりまとめ計算法を Flow Chart 式に示すと第15図のようになる。

ここで直流電流の脈動率  $p$  は次式により求められる。簡単にするため脈動電流の基本波（電源周波数の2倍の周波数）のみを考えると

$$p = \frac{I_{2f}}{I_d} = \frac{E_{2f}}{X_{2f} \cdot I_d} \dots \dots \dots (23)$$

ここに  $X_{2f}$ : 直流回路の周波数  $2f$  のときのリアクタンス  
 $f$ : 電源周波数

$E_{2f}$ : 第16図のような周波数  $f$  の正弦波の全波整流波形を  $\alpha + u'$  で裁断した波形の基本波の振幅となる。 $E_{2f}$  は第16図フーリエ展開により求めることができる。ここで、 $u'$  は第1近似として適当なリップルを仮定して計算するか脈動率0として重なり角  $u'$  を求めるか、いずれにしても正確を要すれば繰返しの計算が必要である。



第17図  $E, E_1, I_1, E_F$  のベクトル図

また、 $\cos \varphi_1$ , 送電端電圧  $E$ , 架線の電圧降下  $\dot{I}_1 \dot{Z}_{F1}$  から機関車入力電圧  $E_1$  を求めるのは第17図のベクトル図を参照すれば容易に求められる。すなわち図において  $E$  は原点を中心とし、半径  $|\dot{E}|$  の円周上にあり  $\angle \varphi_1, \angle \varphi_F, |\dot{I}_1 \dot{Z}_F|$  がわかれば  $E_1$  は求められる。

7. 結 言

模擬回路を用いた実験によって重なり角  $u$  と回路定数の関係を調べ、その実験結果から重なり角を求めるに必要な諸関係を明確にした。これらの実験式または図表を用いることにより、整流回路の抵抗、直流電流の脈動、交流側のリアクタンス、直列コンデンサ、交流フィルタの影響などすべてを考慮した場合の重なり角を相当良好な角度で求めることができるようになった。したがって、前報<sup>(1)</sup>で述べた電流電圧の計算法と本報で述べた重なり角の計算法とによって、単相整流回路の計算を行うことができる。本計算法は交流車両の電圧、電流の算定を目的として計算したものであるが、このような考え方は順変換時のみならず逆変換の場合や、多相整流器回路理論においても導入することが有用であろうと考えられる。

本報における結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 制御角0, 整流回路の抵抗が0, 直列コンデンサなし, ACFなしの場合は直流電流の最小値  $I_{dmin}$  を転流電流と考えて、(1)式に従って転流リアクタンスを求めれば脈動率が50%程度までは大きな誤差はない。
- (2) 回路抵抗による重なり角の変化は第3図のようである。
- (3) 直列コンデンサの影響は、整流器変圧器端子の入力電圧が一定であれば考慮する必要がない。この点は第4章の考察結果と一致する。
- そして直列コンデンサによる電圧の上昇分に相当する重なり角の変化量  $\Delta u_e$  は(14)式により求められる。
- (4) ACFの影響はほぼ第14図のようである。
- (5) 総合した計算の手順をチャートに示すと第15図のようである。

終りにのぞみ、種々ご指導やご討論を賜った東京大学山田教授、日本国有鉄道入江技師、日立製作所日立工場毛利部長、浅野課長、日立研究所三浦所長、木村部長はじめ関係者各位に深甚な謝意を表す。

参 考 文 献

(1) 岩田: 日立評論 42, 9 (1960)  
 (2) L. J. Hibbard: AIEE Trans. II, 79, 75 (1960)