

シリコン整流素子の損失の評価について

On the Evaluation of Losses of Silicon Rectifying Elements

小 斯 波 脩*
Osamu Koshiba

内 容 梗 概

電力用シリコン整流素子の電流定格を決定するに際し、その損失電力を算定する必要がある。素子の特性を折線近似として解析し、損失測定の実験を行なった結果、単相半波通電では電流平均値と順電圧降下波高値の積をもって損失電力を評価できることがわかった。また実用の単相および三相整流回路における素子の損失は折線近似の特性定数が与えられれば計算することができる。

1. 緒 言

一般に半導体素子の電気的特性は温度に敏感であり、使用する電流容量は、その半導体結晶または接合が耐えうる最高温度に左右される。このため接合において発生する損失による熱を、すみやかに効果的に放散させなければならない。整流素子の電流定格を決定するには、通電中の接合温度を知るため、接合からスタッド（またはケース）までの熱放散経路に対する熱抵抗を測定する必要がある、これに基づいて適当な冷却片と冷却法を設計する訳である。この場合、接合に発生する損失を正確に算定しなければならない。

整流素子の損失電力は、順方向損失と逆方向損失とから成るが、シリコン整流素子では後者は普通無視される。順方向損失電力を、直接電力計で正確に測定することはかなり困難である。それは電流および順電圧降下がいずれもひずみ波形であるため、波形誤差の少ないものが必要であり、低圧大電流の計器でなければならない。また電流および順電圧降下を同時にオシログラフで記録し、図式的に算定するのは手数のかかる方法である。熱量計を用いて測定する方法もあるが実用的ではない。最近ホール発電器を利用して測定する方法が試みられているが、これもまだ一般的ではない。電流平均値と、順電圧降下の測定から計算する方法は、実用的近似法として簡単であるが、この場合順電圧降下としてその実効値、平均値、波高値いずれをとるのが良いかが問題である。

本文は、整流素子の電圧-電流特性を簡単な折線で近似しうるとの仮定に基づき、単相半波整流回路における素子の順方向損失電力の電流通流角による影響を解析的に考察し、電力用シリコン整流素子について損失測定の実験を行なった結果について述べ、代表的な二、三の単相および三相整流回路における素子の損失電力を表わす算式を述べる^{(1)~(4)}。

2. 単相半波回路の解析

整流素子の順方向損失電力を考えるに当たり、基本的仮定として素子の整流特性を第1図に示すように

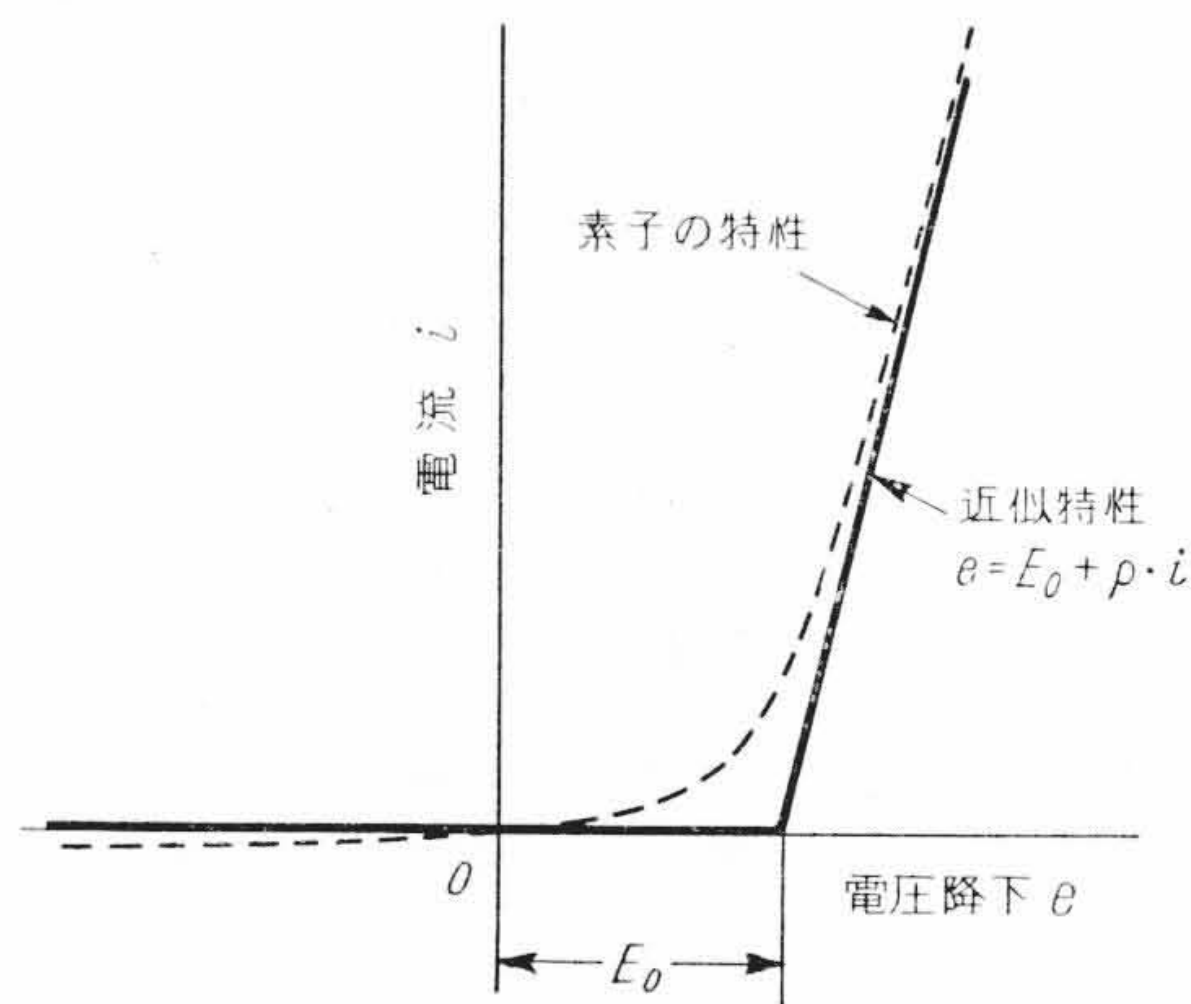
$$e = E_0 + \rho \cdot i \dots\dots\dots (1)$$

と考える。ここに E_0 は“threshold voltage”， ρ は“slope resistance”で、いずれも特性定数である。

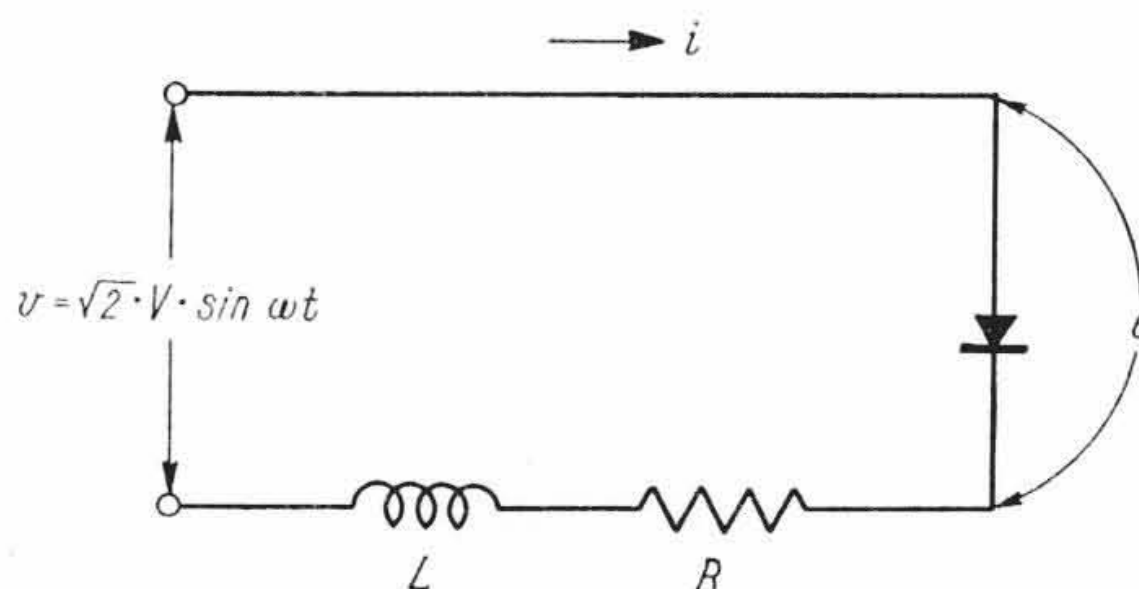
2.1 電源電圧正弦波の場合

単相半波による素子の損失測定回路としては、低インピーダンスで、定格順電流を流すに足りる程度の低電圧回路であることが多い。いま第2図に示すように、電源変圧器のリアクタンスも含めた意味で一般的にインダクタンス L と抵抗 R を考慮して電圧正弦波の回路を考える。電圧平衡式は

$$\sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t = E_0 + \rho \cdot i + L \frac{di}{dt} + R \cdot i \dots\dots\dots (2)$$



第1図 整流素子の特性の仮定



第2図 半波整流回路

したがって電流 i の一般解は

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\omega t - \varphi) - \frac{E_0}{R+\rho} \\ &\quad + C \cdot \exp\left(-\frac{R+\rho}{L} \cdot t\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R+\rho}$$

積分定数 C の決定には、素子の特性電圧 E_0 と電源電圧 V の値により定まる位相角、すなわち

$$\sin \theta_0 = \frac{E_0}{\sqrt{2} \cdot V} \dots\dots\dots (4)$$

を満足する $\omega t = \theta_0$ において $i = 0$ とおき

$$\left. \begin{aligned} C &= \left[\frac{E_0}{R+\rho} - \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\theta_0 - \varphi) \right] \\ &\quad \cdot \exp\left(\frac{R+\rho}{\omega L} \cdot \theta_0\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

これを(3)式に代入して

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ &\quad - \left[\frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\theta_0 - \varphi) - \frac{E_0}{R+\rho} \right] \\ &\quad \cdot \exp\left\{-\frac{R+\rho}{\omega L} (\omega t - \theta_0)\right\} - \frac{E_0}{R+\rho} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

* 日立製作所日立研究所

また、 $\omega t = \theta_0 + \theta_1$ において $i = 0$ となり

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\theta_0 + \theta_1 - \varphi) - \sin(\theta_0 - \varphi) \right] \\ & \cdot \exp\left(-\frac{R+\rho}{\omega L} \cdot \theta_1\right) - \frac{E_0}{R+\rho} \\ & \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{R+\rho}{\omega L} \theta_1\right) \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

これから電流通流角 θ_1 が定まる。したがって電流および順電圧降下の波形は第3図のようになる。回路の L が大きいときは、 $\theta_0 + \theta_1 \geq \pi$ となるので順電圧降下の波形は $\omega t = \theta_0 + \theta_1$ で $+E_0$ から瞬時に逆電圧に変わる。

(6)式から電流平均値を求めると

$$\begin{aligned} I_d = \frac{1}{2\pi} & \left[\frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \left[\cos(\theta_0 - \varphi) \right. \right. \\ & - \cos(\theta_0 + \theta_1 - \varphi) - \frac{\omega L}{R+\rho} \sin(\theta_0 - \varphi) \\ & \cdot \left. \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R+\rho}{\omega L} \theta_1\right) \right\} \right] \\ & - \frac{E_0}{R+\rho} \left[\theta_1 - \frac{\omega L}{R+\rho} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R+\rho}{\omega L} \theta_0\right) \right\} \right] \right] \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

また順電圧降下は、図に示されるように

$\omega t = 0 \sim \theta_0$ で

$$e = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t$$

$\omega t = \theta_0 \sim \theta_0 + \theta_1$ で

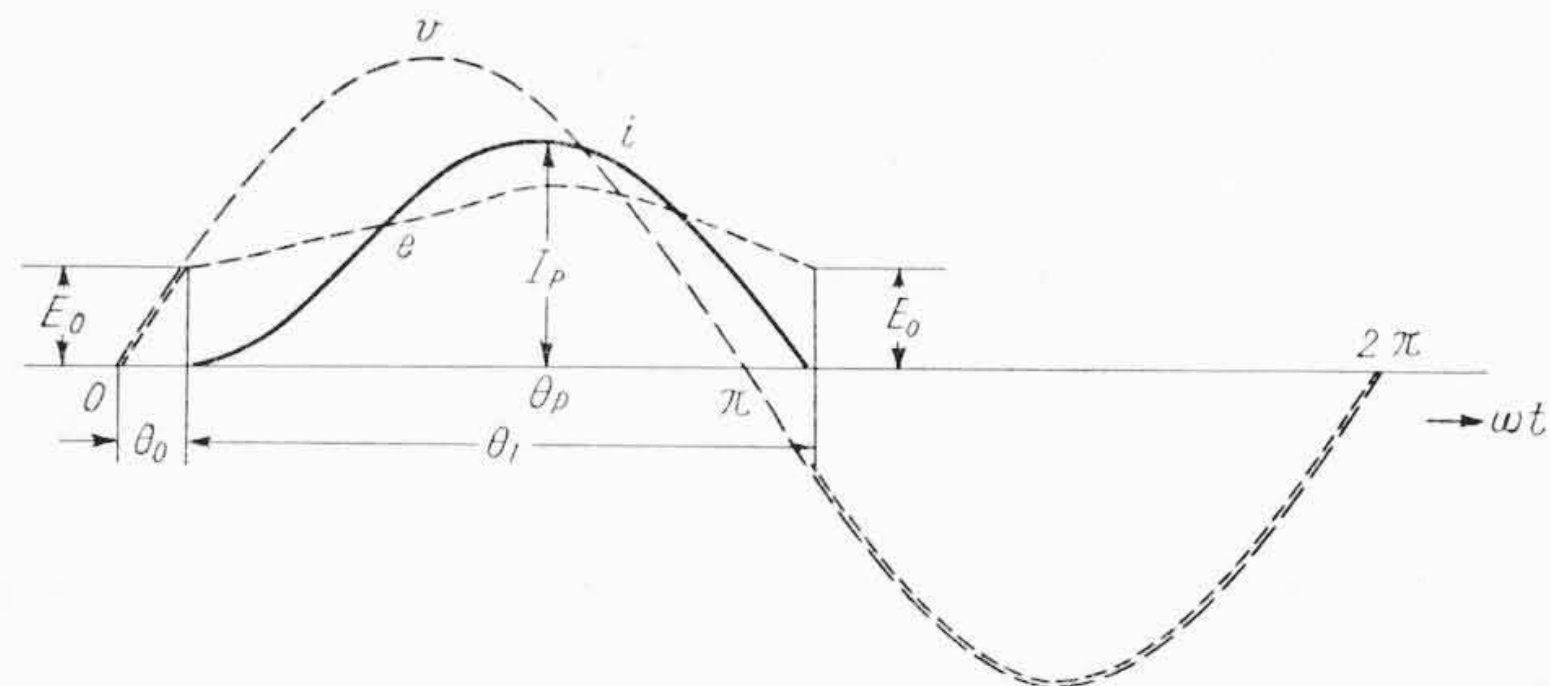
$$e = E_0 + \rho \cdot i$$

$$\begin{aligned} & = E_0 + \frac{\rho \cdot \sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) \right. \\ & - \sin(\theta_0 - \varphi) \cdot \exp\left\{-\frac{R+\rho}{\omega L} (\omega t - \theta_0)\right\} \Big] \\ & - \frac{\rho \cdot E_0}{R+\rho} \left[1 - \exp\left\{-\frac{R+\rho}{\omega L} (\omega t - \theta_0)\right\} \right] \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

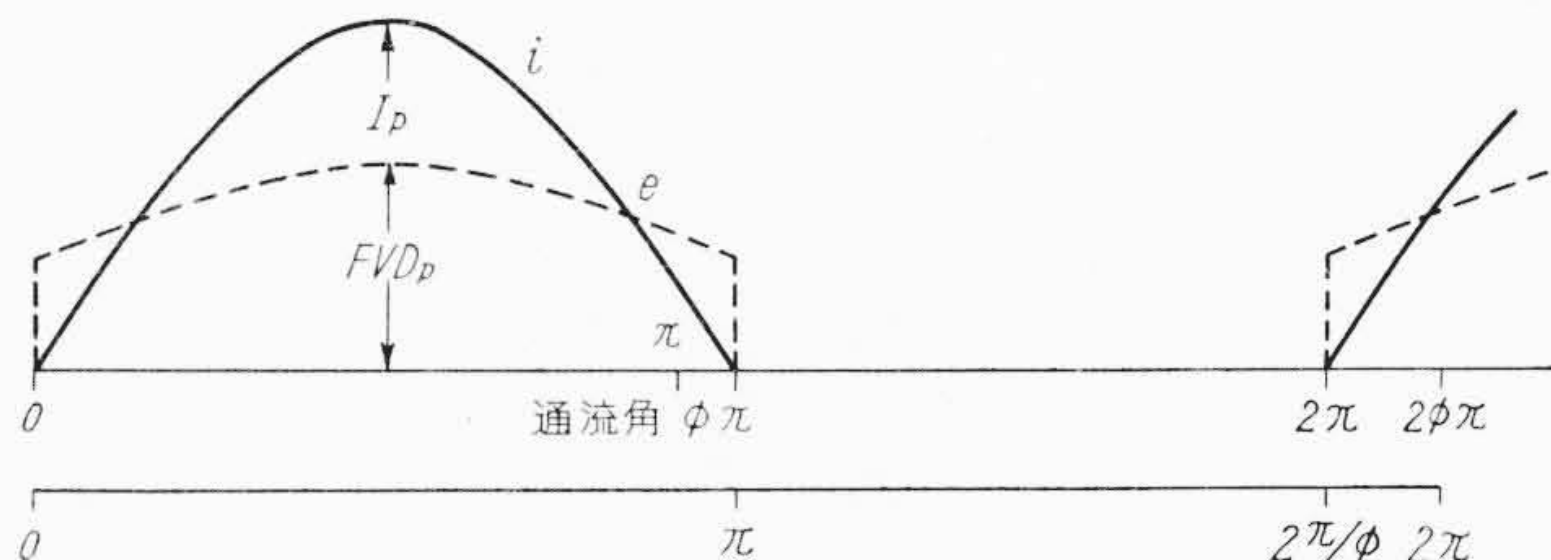
したがって損失電力の平均値は(6)，(9)両式より

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \theta_1} e \cdot i \cdot d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{E_0 \cdot \sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \cdot \frac{R-\rho}{R+\rho} \{ \cos(\theta_0 - \varphi) \right. \\ & - \cos(\theta_0 + \theta_1 - \varphi) \} + \frac{\omega L \cdot \sqrt{2} \cdot V}{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2} \\ & \cdot \left\{ \frac{2\rho \cdot \sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \sin(\theta_0 - \varphi) - \frac{2\rho}{R+\rho} E_0 \right\} \\ & \cdot \left\{ \sin \theta_0 - \exp\left(-\frac{R+\rho}{\omega L} \theta_1\right) \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1) \right\} \\ & + \frac{\rho \cdot V^2}{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2} \left\{ \theta_1 - \frac{1}{2} \sin 2(\theta_0 + \theta_1 - \varphi) \right. \\ & + \frac{1}{2} \sin 2(\theta_0 - \varphi) \Big\} - E_0 \cdot \frac{(R-\rho) \cdot \omega L}{(R+\rho)^2} \\ & \cdot \left\{ \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \sin(\theta_0 - \varphi) - \frac{E_0}{R+\rho} \right\} \\ & \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R+\rho}{\omega L} \theta_1\right) \right\} \\ & + \frac{\rho \cdot \omega L}{2(R+\rho)} \left\{ \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(R+\rho)^2 + (\omega L)^2}} \sin(\theta_0 - \varphi) \right. \\ & - \frac{E_0}{R+\rho} \Big\}^2 \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-2 \cdot \frac{R+\rho}{\omega L} \theta_1\right) \right\} \\ & - \frac{R \cdot E_0^2}{(R+\rho)^2} \theta_1 \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

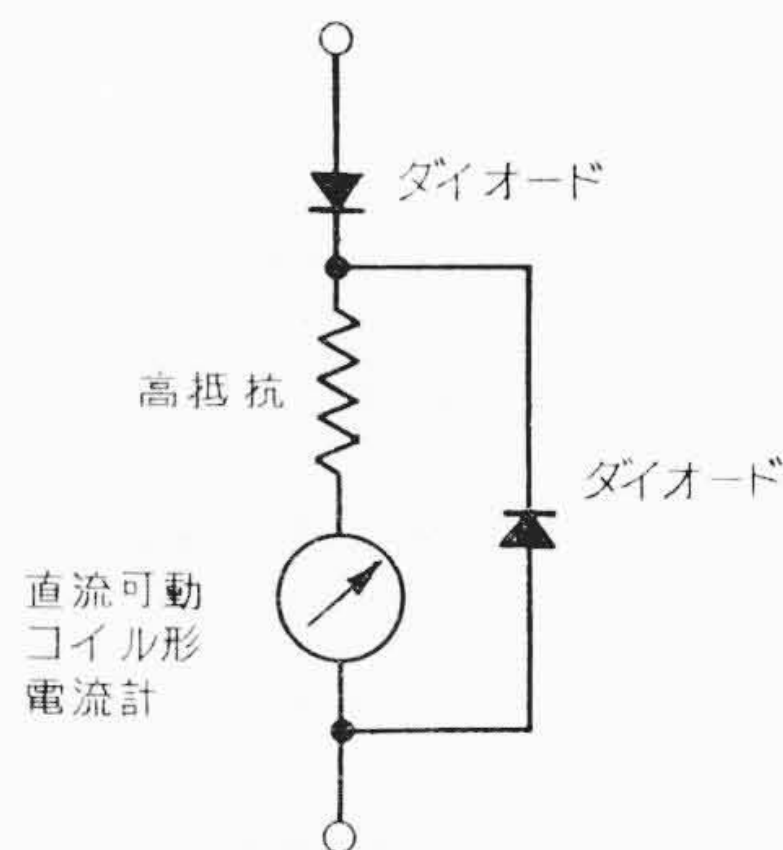
で表わされる。以上の結果からは簡単に電流通流角 θ_1 の影響を吟味することができないので、近似的に電流を正弦波として考えてみる。



第3図 半波整流回路の電流，電圧の波形



第4図 正弦波電流(通流角 $\phi\pi$) の仮定



第5図 順電圧降下測定器

2.2 電流正弦波の場合

素子の“slope resistance” ρ および回路の誘導リアクタンスに比べて、十分大きな抵抗 R の場合は、電流は通流角 π の正弦波になる訳であるが、便宜的に電流を第4図に示すように通流角 $\phi\pi$ の正弦波形と仮定する。

位相角 $0 \sim \phi\pi$ 間で、電流および順電圧降下は

$$\begin{aligned} i &= I_p \cdot \sin \theta \\ e &= E_0 + \rho \cdot I_p \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

と考える。電流の平均値は

$$I_d = \frac{\phi}{2\pi} \int_0^\pi I_p \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{\phi}{\pi} I_p \quad \dots\dots\dots (12)$$

したがって損失電力の平均値は

$$\begin{aligned} P &= \frac{\phi}{2\pi} \int_0^\pi e \cdot i \cdot d\theta = \phi \left[\frac{1}{\pi} E_0 \cdot I_p + \frac{1}{4} \rho \cdot I_p^2 \right] \\ &= E_0 \cdot I_d + \frac{\pi^2}{4\phi} \rho \cdot I_d^2 \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

順電圧降下の測定として、第5図のような接続によりひずみ波形の順電圧降下 e の平均値を、正弦波実効値で目盛更正した値をとることが従来行なわれている。これはこの計器に用いるダイオードが理想的整流器であるとすれば、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} FVD &= 2 K_f \cdot \frac{\phi}{2\pi} \int_0^\pi (E_0 + \rho \cdot I_p \cdot \sin \theta) d\theta \\ &= \phi \left[\frac{\pi}{2\sqrt{2}} E_0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \rho \cdot I_p \right] \\ &= \phi \left[\frac{\pi}{2\sqrt{2}} E_0 + \frac{\pi}{\sqrt{2}\phi} \rho \cdot I_d \right] \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ここに $K_f = \pi/2\sqrt{2} = 1.11$ ，正弦波の波形率である。

素子の損失電力として、(12)式の電流平均値 I_d とこの FVD の積をとり

$$\begin{aligned} FVD \times I_d &= \phi^2 \left[\frac{1}{2\sqrt{2}} E_0 \cdot I_p + \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \rho \cdot I_p^2 \right] \\ &= \phi \left[\frac{\pi}{2\sqrt{2}} E_0 \cdot I_d + \frac{\pi}{\sqrt{2}\phi} \rho \cdot I_d^2 \right] \dots\dots (15) \end{aligned}$$

を算出して近似させる方法がある。これは上式から明らかに電流平均値 I_d が一定でも、その通流角の影響が顕著であることを示している。

また順電圧降下の実効値を考えてみると

$$\begin{aligned} FVD_{\text{eff}} &= \sqrt{\frac{\phi}{2\pi} \int_0^\pi (E_0 + \rho \cdot I_p \cdot \sin \theta) d\theta} \\ &= \sqrt{\phi \left[\frac{1}{\sqrt{2}} E_0 + \frac{1}{2} \rho \cdot I_p \right]} \\ &= \sqrt{\phi \left[\frac{1}{\sqrt{2}} E_0 + \frac{\pi}{2\phi} \cdot \rho \cdot I_d \right]} \dots\dots (16) \end{aligned}$$

であり、やはり P/I_d と比較して考えると、通流角の影響が異なることを示している。

いま順電圧降下の波高値を考えてみると

$$FVD_p = E_0 + \rho \cdot I_p = E_0 + \frac{\pi}{\phi} \rho \cdot I_d \dots\dots (17)$$

これと電流平均値 I_d の積をとれば

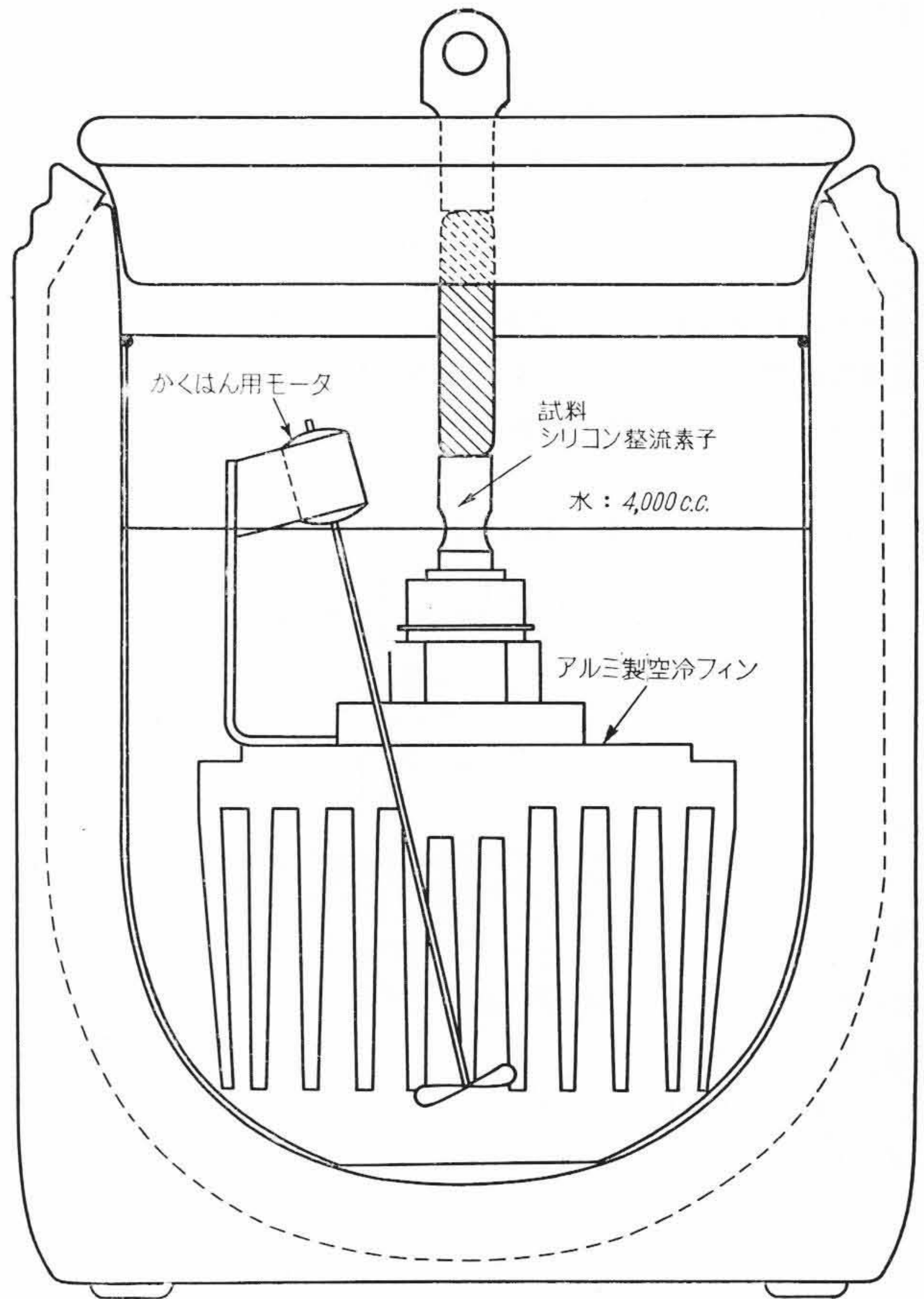
$$\begin{aligned} FVD_p \times I_d &= \phi \left[\frac{1}{\pi} E_0 \cdot I_p + \frac{1}{\pi} \rho \cdot I_p^2 \right] \\ &= E_0 \cdot I_d + \frac{\pi}{\phi} \cdot \rho \cdot I_d^2 \dots\dots (18) \end{aligned}$$

すなわち(13)式と比較して通流角の影響が同様の傾向である。したがって損失電力の近似計算には電流平均値と順電圧降下の波高値の積をとるのが良いと考えられる。

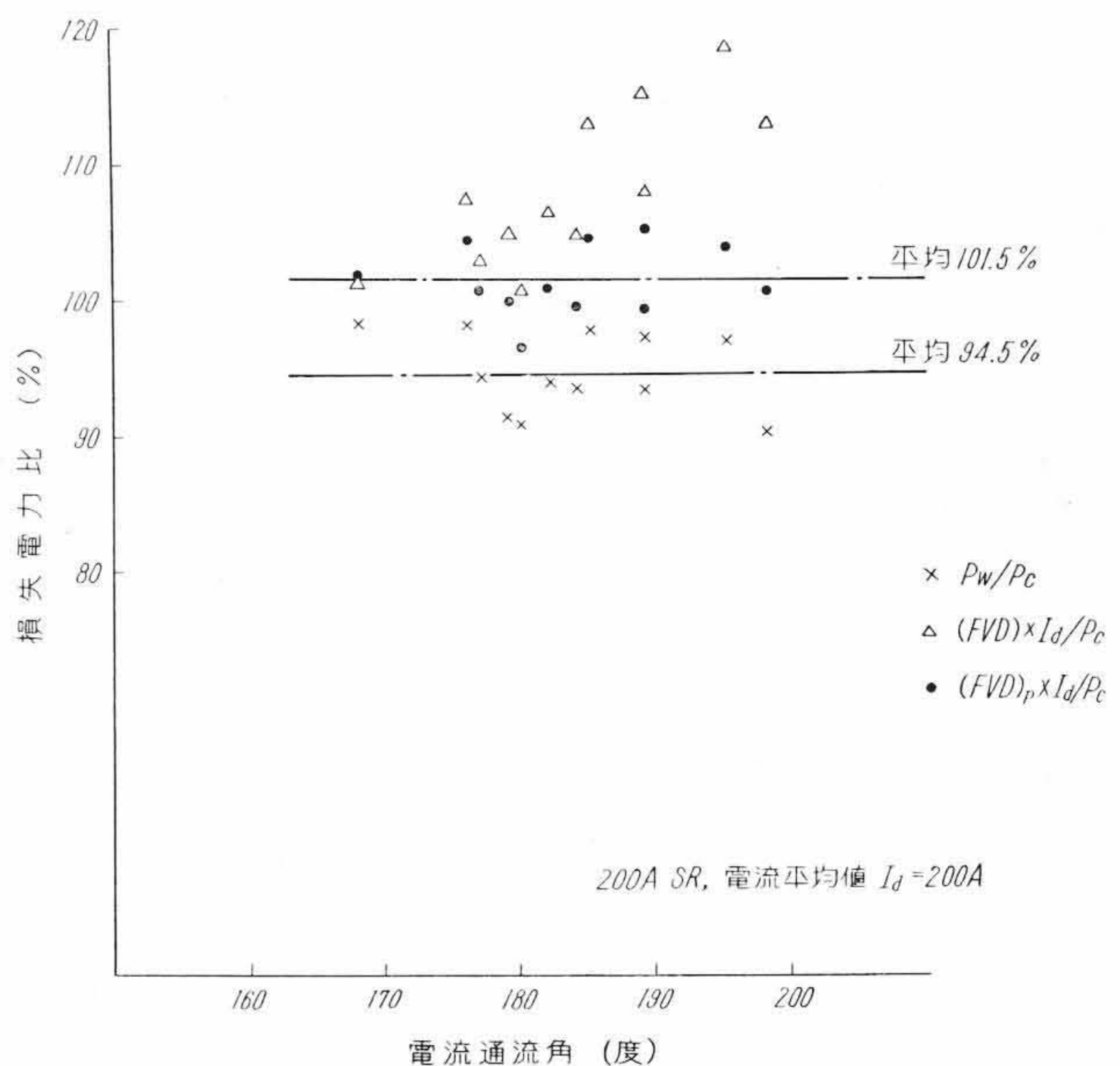
3. 損失測定の実験

単相半波回路で、回路の L および R を変え、電流平均値を一定としてその通流角を広範囲に変化し、200A シリコン整流素子について熱量計法、および熱電形電力計（確度±3%）により損失測定を行った。熱量計容器は第6図のように大形の魔法びんを用い、アルミニウム製空冷フィンに取り付けた試料素子を入れ、一定量の水を入れてその温度上昇から、あらかじめ小さなニクロム線ヒータを用い直流電力で更正した曲線に比較して損失電力を求めた。この測定結果は、温度計の確度などにより電流平均値 200A の場合に数%のばらつきがあるが、通流角の変化に対し(13)式の傾向がみられるので一応正しいものとする。第7図は熱量計法による測定値 P_c を基準として、電力計の指示 P_w および計算値、 $FVD \times I_d$ 、 $FVD_p \times I_d$ との比を電流通流角に対してプロットしたものである。これを見ると $FVD \times I_d$ と P_c の比は通流角の増加により比例的に増加している。これに対し $FVD_p \times I_d$ と P_c の比は、ほぼ一定であり、その平均値は 101.5% である。これは前節の解析結果で定性的に推量されることであり、単相半波通電の場合には、損失電力は電流平均値と順電圧降下の波高値の積をとれば近似できることを示している。電流が定格値よりもかなり小さいときは、素子特性の仮定における特性定数を変更する必要がある。また過電流領域でも定数の変更が必要であろう。

整流素子の特性曲線を、前節の仮定のように折線近似するためには電流および順電圧降下のそれぞれ瞬時値または波高値で画いた曲線が必要である。シリコン整流素子、定格 200A の場合には $E_0 = 0.8 \sim 1.0V$ ぐらい、 $\rho = 0.0003 \sim 0.0008 \Omega$ ぐらいである。



第6図 熱量計法による損失測定容器の構造



第7図 損失電力比の通流角による変化

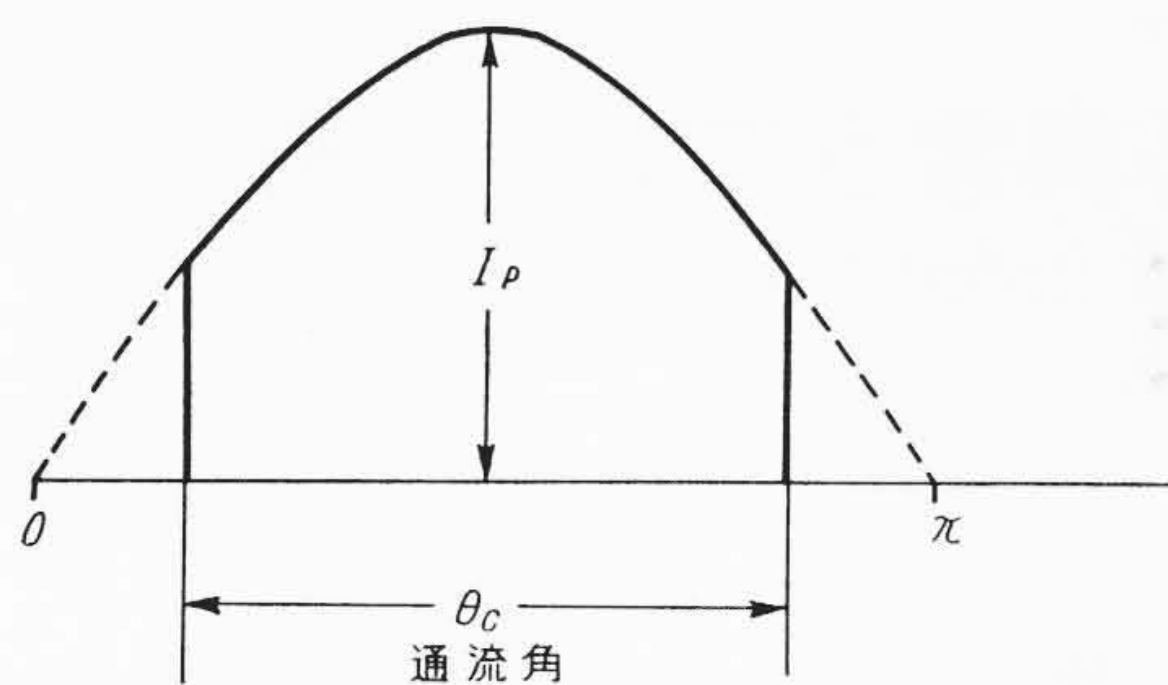
4. 整流回路方式と素子の損失電力

素子の特性を、折線近似 $e = E_0 + \rho \cdot i$ と仮定すれば、正弦波電圧の電源で、負荷抵抗の十分大きい実際の整流回路について、素子を通流する電流の波高値または平均値が与えられれば、順方向損失電力の近似値を計算することができる。

電流波形を第8図のように仮定すれば、電流平均値は

$$I_d = \frac{I_p}{\pi} \sin \frac{\theta_c}{2} \dots\dots (19)$$

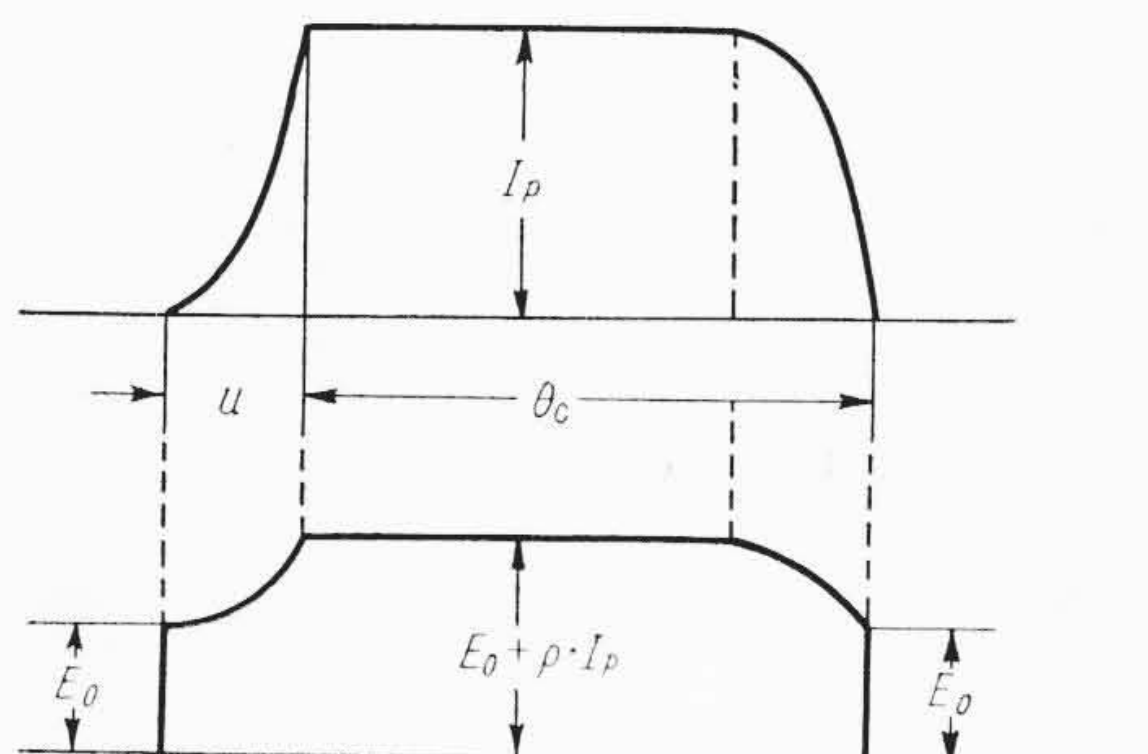
損失電力の平均値は



三相半波: $\theta_c = \frac{2\pi}{3}$, 三相ダブルスター: $\theta_c = \frac{\pi}{3}$

三相ブリッジ: $\theta_c = \frac{\pi}{3} \times 2$

第8図 整流電流波形 (抵抗負荷)



θ_c : 単相ブリッジ π
三相ブリッジ $\frac{2\pi}{3}$

第9図 重なり角を有する整流電流波形
(リアクタンス負荷)

$$P = \frac{1}{\pi} \sin \frac{\theta_c}{2} \cdot E_0 \cdot I_p + \frac{1}{4\pi} [\theta_c + \sin \theta_c] \cdot \rho \cdot I_p^2$$

$$= E_0 \cdot I_d + \frac{\pi(\theta_c + \sin \theta_c)}{4 \sin^2 \frac{\theta_c}{2}} \rho \cdot I_d^2 \dots \dots \dots (20)$$

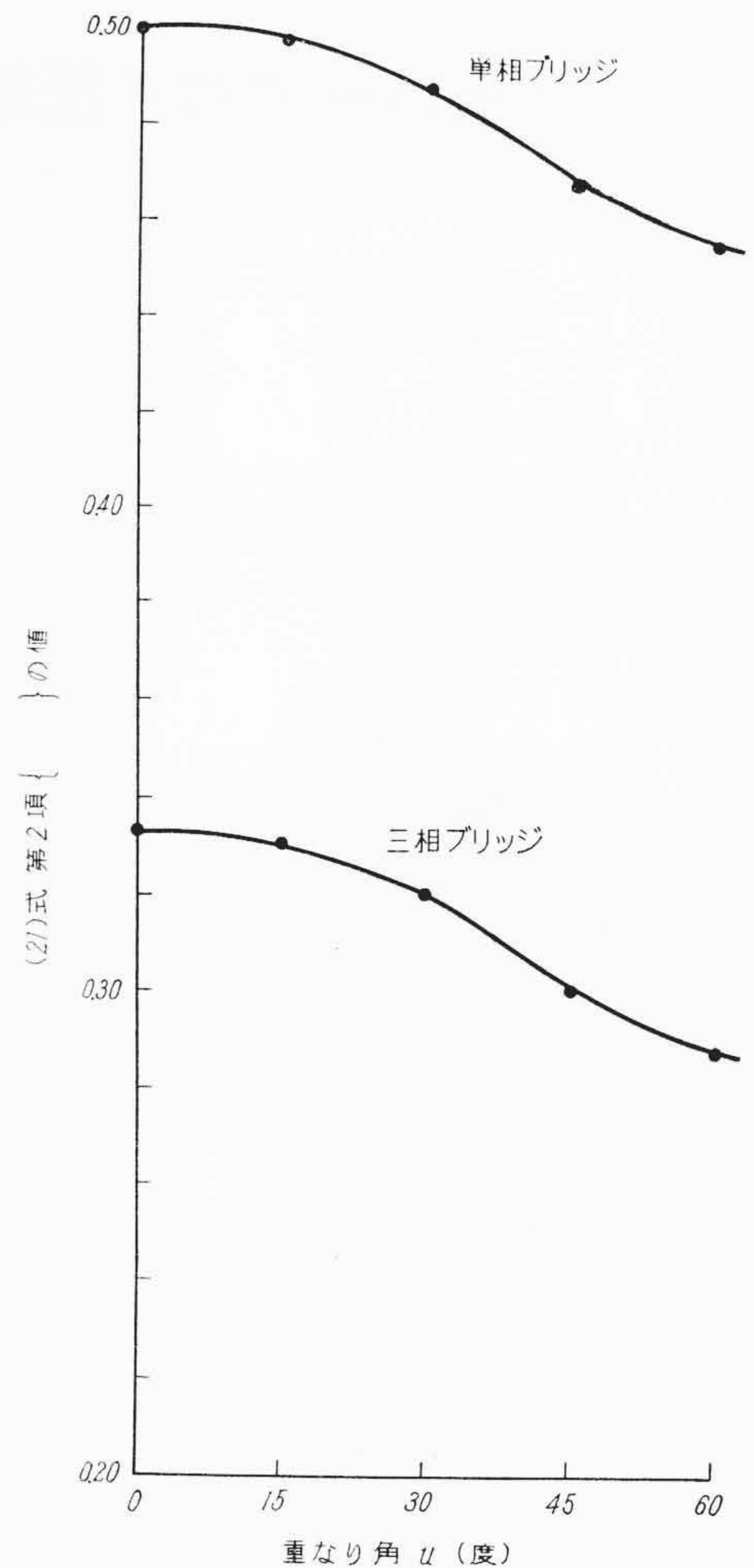
となるので、第1表のようになる。負荷のリアクタンスが非常に大きい場合は方形波と考えると近似させる。第9図のように重なり角を有する波形と考えると

$$P = \frac{\theta_c}{2\pi} E_0 \cdot I_p + \left\{ \frac{\theta_c}{2\pi} + \frac{(3u - 4 \sin u + \frac{1}{2} \sin 2u)}{2\pi(1 - \cos u)^2} - \frac{(u - \sin u)}{\pi(1 - \cos u)} \right\} \rho \cdot I_p^2 \dots \dots \dots (21)$$

となり、重なり角 u が増加すれば損失電力は減少する。しかしその減少はさほど大きくはない。第10図に上式の第2項 { } の値と重なり角 u の関係を示す。

5. 結 言

電力用シリコン整流素子の順方向損失電力を、電流と順電圧降下の積の形で計算して実用的に近似させる場合には、単相半波通電では電流平均値と順電圧降下の波高値との積をとるのがよい。従来行なわれていた順電圧降下の平均値を正弦波実効値で目盛更正した値を示す計器の読みを順電圧降下としてとるのは、電流通流角の影響からみて好ましくない。実用の単相および三相整流回路における場合には、整流素子の特性を $e = E_0 + \rho \cdot i$ と仮定することのできるような特性定数 E_0 および ρ が与えられれば、第1表の算式で求めることができる。



第10図 (21)式第2項 { } の値と重なり角 u の関係

第1表 回路方式と素子の損失電力

整流素子の特性 $e = E_0 + \rho \cdot i$		
回 路 方 式	素子当りの順方向損失電力	
	素子電流波高値 I_p	素子電流平均値 I_d
単 相	半 波	$0.318 \cdot E_0 \cdot I_p + 0.250 \cdot \rho \cdot I_p^2$ $E_0 \cdot I_d + 2.468 \cdot \rho \cdot I_d^2$
	全 波	
三 相	半 波	$0.276 \cdot E_0 \cdot I_p + 0.236 \cdot \rho \cdot I_p^2$ $E_0 \cdot I_d + 3.100 \cdot \rho \cdot I_d^2$
	ダブルスター	
	ブリッジ	
方 形 波 合	単相ブリッジ	$0.500 \cdot E_0 \cdot I_p + 0.500 \cdot \rho \cdot I_p^2$ $E_0 \cdot I_d + 2.000 \cdot \rho \cdot I_d^2$
	三相ブリッジ	

終わりにご指導とご支援を賜った日立製作所日立工場毛利部長、浅野課長および日立研究所木村部長に対し衷心より謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 小斯波: 昭36年電気学会東京支部大会 184
- (2) D. R. Coleman: Electronic Engineering, 98-102 (Feb. 1960)
- (3) J. I. Missen: Direct Current, 134-150 (Aug. 1961)
- (4) A. J. Blundell ほか: Proc. I. E. E., 108A, 273-294 (Aug. 1961)