

SCRを用いた多相発振器

八 木 寛
村 井 忠 邦

Polyphase Oscillator with SCR

Hiroshi YAGI

Tadakuoi MURAI

In this report, we describe the circuit motion of polyphase Oscillator with SCR and the approximate calculation of the every phase period of it.

SCR has three terminals, and is a swithing device which is able to take withstanding voltage and allowable current largely. We are interested in the circuit utilized SCR because of its comparable simplicity.

1. 緒 言

多相発振回路としては、これまで、真空管やトランジスタ、エキサイオード、それに2端子のPNPNダイオードなどを用いた回路が、研究対象であったが、我々は、3端子で、コントロール素子を持ち、耐圧や許容電流も大きくとれる、SCRを用いた回路を開発した。SCRは、回路が簡単であるという点からも、興味あるものと思われる。今回は、多相発振回路の定性的な発振機構と、各相の周期の近似計算について報告する。

2. SCRの電圧電流特性

図-1の回路で測定した、SCRの静特性を、図-2に示す。電圧のピーク値は、発振の電圧波形と周期に、大きな影響を与えるので、ゲート電流をパラメータとして、なるべくピーク値のそろったSCRを使用した。

3. SCRを用いた発振器

図-2の静特性を持つ素子に対し、図-3に示すように、コンデンサを並列に、負荷Rを直列にして回路をつくる。このとき、図-4に示すように、その負荷線が、SCRの特性曲線の負性抵抗領域内の一点(Q)

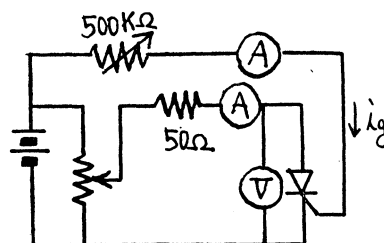


図 1 静特性測定回路

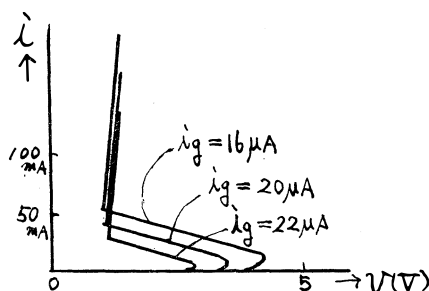


図 2 SCR静特性

で交わるようにすれば、持続振動が得られる。この発振機構は、よく知られているので省略するが、その周期は、コンデンサの充電及び放電の時間によって決定される。いま、SCRの特性は、導通状態では、ほ

とんど短絡になり、非導通のときは、ほとんど開放になるから、コンデンサーの放電時間は、充電に要する時間に比較して無視でき、さらに、ほぼ零から図-3に示した、SCRのブレイクオーバー電圧 V_p まで充電されるとして、周期 $T(1)$ は、(1)式で与えられる。

$$T(1) = CR \log \frac{E}{E - V_p} \dots\dots\dots(1)$$

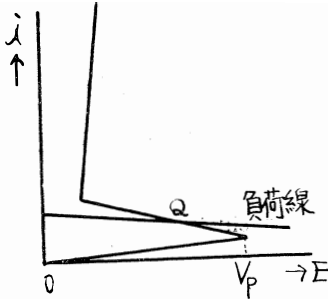


図 3 発振のための特性と負荷

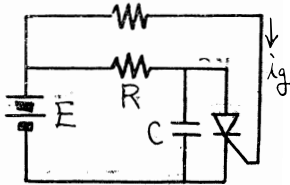


図 4 単相発振回路

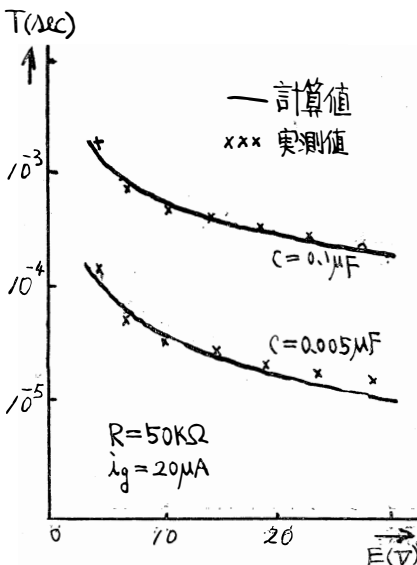


図 5 単相発振周期

この式で、 $V_p = 3V$ とした結果と、実験により求められた結果を図-5に、発振波形は図-6に示す。

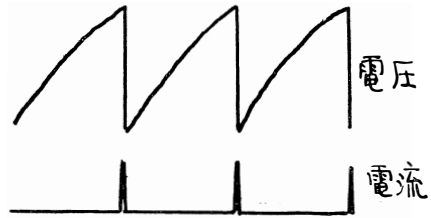


図 6 単相発振波形

4. 2 相 発 振 回 路

単相発振回路をループ連結したのが、2相発振回路の図-7である。振動は次のようにして起こる。まず、SCR1が、onで、SCR2がoffのとき、図-7の接続点Aを電流のsinkとしてコンデンサーCを充電する。充電が進みB点の電位が、SCR2のブレイクオーバー電圧に至ると、SCR2が、onで、SCR1がoffの状態になる。このあとは、B点をsinkとして、SCR1がonの時と逆向きに、コンデンサーを充電し、全く対称な動作を繰り返す。いま、SCR1がon、SCR2がoffの状態から、SCR2がon、SCR1がoffの状態に変わるとき、電圧の基準がA点からB点に移行するので、SCR2が導通後、コンデンサーCは、 $-V_p$ から充電を始める。したがって、2相発振周期の近似式 $T(2)$ は、CRの時定数で、 $-V_p$ から V_p まで充電するに要する時間の2倍となり、(2)式にて示される。

$$T(2) = 2CR \log \frac{E + V_p}{E - V_p} \dots\dots\dots(2)$$

2相発振の各陽極側電圧波形を図-8に、また、実験によって求めた周期と、(2)式で、 $V_p = 3V$ として求めた計算結果とを、図-9にて示す。

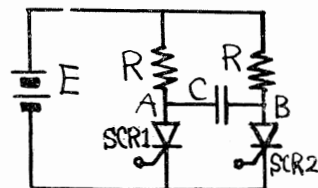


図 7 2相発振回路

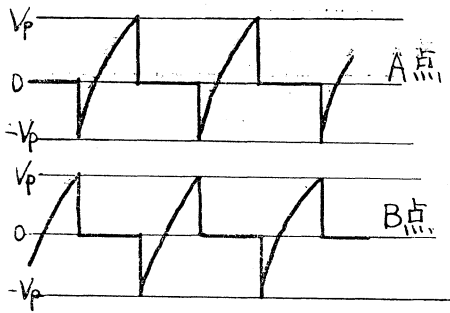


図 8 2相陽極電圧波形

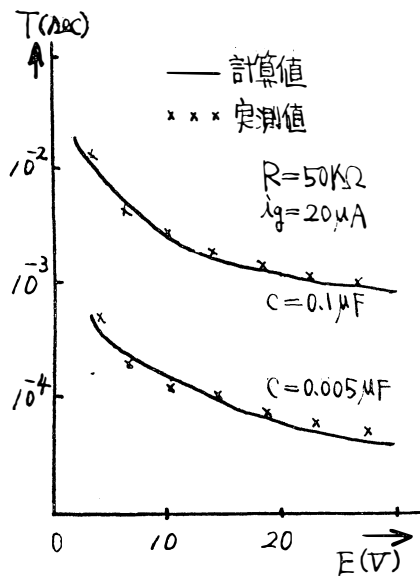


図 9 2相発振周期

5. 3 相 発 振 回 路

5. 1 3 相 発 振 の 概 要

2相発振回路に、更に、もう一個のSCRを加え、Cグループを作ると、図-10に示した3相発振回路となる。発振波形の概略は図-11である。

発振の定性的説明は、次のようになる。

- (1) まず、図-11において、①の状態にあったとする。SCR1だけが導通であるから、図-10のA点を電流のsinkとして、各々のコンデンサーを充電する。そしてB点の電位は、C点より高いから、図-10に示す矢印の方向に電流が流れる。
- (2) 充電が進み、B点の電位が V_p に至ると、SCR2が導通して、B点が電流のsinkとなり、電位は、ほとんど零になる。いま導通する微小時間前C点は、 V_x の電位にあったとする。ここで電位の基準が、

A点からB点に移行したため、A点の電位は、 $-V_p$ に、C点の電位は、 $V_x - V_p$ になる。

- (3) これ以後は、B点をsinkとして(1)と同様に各コンデンサーを充電して、充電が進めば、SCR3が導通となり、この現象を繰り返す。

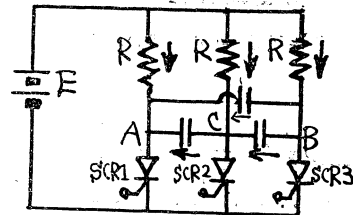


図 10 3相発振回路

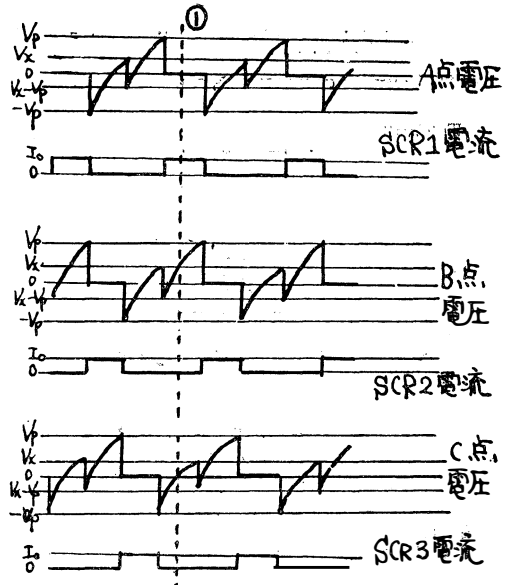


図 11 3相発振概略波形

5. 2 周 期 計 算

以上の現象の説明により、周期の近似解は次の手順により求められる。まずA点をsinkとした微分方程式をたて、B点が $V_x - V_p$ から V_p まで、C点が $-V_p$ から V_x まで変化するまでの時間を τ として3倍すればよい。図-10の回路を、A点を接地して書き直し、各アドミタンスを a, b, c, d, e とすると図-12のようになる。図-12において、 V_d と E との関係 V_d/E を求めると

$$\frac{V_d}{E} = \frac{a(b+c+d)+bc}{(a+b)(b+c)+c(a+b+d+e)} \dots(3)$$

この式において、 $a=b=1/R, c=d=e=PC$ とおくと

$$\frac{V_d}{E} = \frac{1}{CRP+1} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式は、CRの充電回路と同じであるから、B点が

$V_x - V_p$ から V_p まで、C点が $-V_p$ から V_x になる時間を τ とすれば、(5)、(6)式が得られる。

$$V_p = (E + V_p - V_x)[1 - \exp(-\tau/CR)] + V_x - V_p \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$V_x = (E + V_p)[1 - \exp(-\tau/CR)] - V_p \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、未知量 V_x を消去して、

$$(E + V_p)X^2 + V_p X - (E - V_p) = 0$$

$$X = \exp(-\tau/CR) \quad \dots\dots\dots(7)$$

これを解いて

$$x = \frac{-V_p \pm \sqrt{V_p^2 - 4(V_p^2 - E^2)}}{2(E + V_p)} \quad \dots\dots(8)$$

(8)式で、 $E = nV$ とおく、また、 $E > V_p$ 、 $x > 0$ であるから

$$X = \frac{-1 + \sqrt{4n^2 - 3}}{2(n+1)} \quad \dots\dots\dots(9)$$

全周期 $T(3)$ は、 τ の3倍であるから

$$T(3) = 3CR \log \frac{2(n+1)}{\sqrt{4n^2 - 3} - 1} \quad \dots\dots\dots(10)$$

が、求める周期となる。(8)式にて $V_p = 3V$ とした結果と実験結果とを図-13で示す。

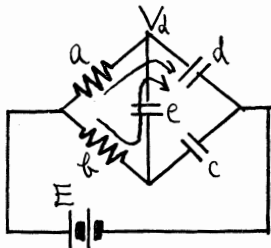


図 12 A点を接地した3相発振回路

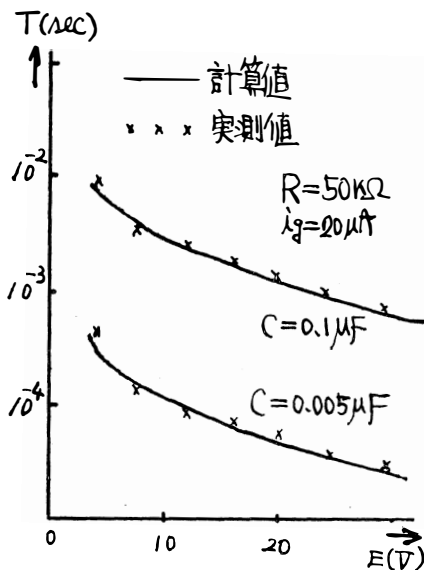


図 13 3相発振周期

5. 3 相 の 確 定

3相発振の場合、相回転の定まる要因は、発振開始時にあたるから、最初、初期条件を与えてやれば、相回転は定まる。すなわち、各々の負荷が等しく、各々コンデンサーが等しいとすると、振動の回転方向は、SCRのブレイクオーバー電圧 V_p の値の差によって決定する。

6. 4 相 発 振 回 路

3相発振回路に、更にもう一個のSCRを加え、Cでループを作ると図-14の4相発振回路となり、その発振電圧波形は、図-15に示す。

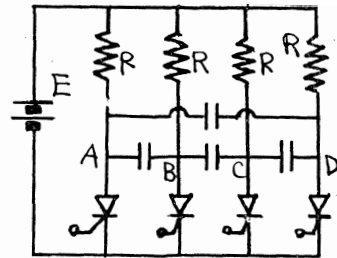


図 14 4相発振回路

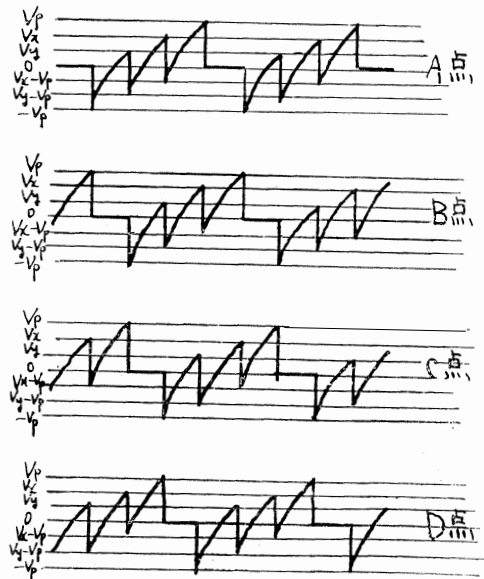


図 15 4相陽極電圧波形

4相の発振機構は、3相と同様に考えてよく、3相の場合と同様な手順を用いて周期計算が出来る。図-14でA点を接地した等価回路を図-16に示す。

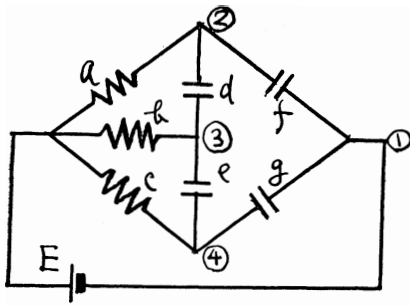


図 16

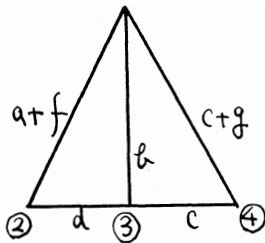


図 17

ここで、 a, b, c, d, e, f, g は、アドミタンスであり、この回路の②、③、④の電圧を定める伝達関数を求める。図-16の電圧電源を collapse した回路は図-17で、この全 tree は伝達関数の分母となる。

$$\begin{aligned} \text{分母} &= b[(a+f)+d][(c+g)+e] \\ &+ d[e(a+f+c+g)+(a+f)(c+g)] \\ &+ e(a+f)(c+g) \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

図-16で、③点の電圧 V_3 の伝達関数の分子は、

$$\begin{aligned} \text{分子} &= b(a+d+f)(c+e+g)+ce(a+d+f) \\ &+ ad(c+e+g) \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

②点の V_2 に関しては、

$$\begin{aligned} \text{分子} &= a[e(b+d+c+g)+(b+d)(c+g)] \\ &+ bd(c+e+g)+ced \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

上式において、 $a=b=1/R$ 、 $d=e=f=g=pC$ とおくと、(11)式より

$$\text{分母} = \left(\frac{1}{R} + 2pC \right) \left[\frac{1}{R^2} + \frac{4pC}{R} + 2(pC)^2 \right] \dots(14)$$

また、(12)式より

$$V_3 \text{ の分子} = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{R} + 2pC \right) \left(\frac{1}{R} + 4pC \right) \dots(15)$$

(13)式より

$$V_2 \text{ の分子} = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{R} + 3pC \right) \left(\frac{1}{R} + 2pC \right) \dots(16)$$

(16)式は、図-16が対称であり、 V_4 の点の場合も同じになる。よって、 V_3 の伝達数は、

$$\frac{V_3}{E} = \frac{4pCR + 1}{2(pCR)^2 + 4pCR + 1} \dots\dots\dots(17)$$

また、 V_2 、 V_4 については、

$$\frac{V_2}{E} = \frac{3pCR + 1}{2(pCR)^2 + 4pCR + 1} \dots\dots\dots(18)$$

(18)式の分母の根は

$$P = \left(-1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{1}{CR} \dots\dots\dots(19)$$

よって(18)式より②点の時間関数は、

$$\begin{aligned} V_2 &= AE \left[1 - \frac{2-\sqrt{2}}{4} \exp \left\{ \left(-1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{t}{CR} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2+\sqrt{2}}{4} \exp \left\{ \left(-1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{t}{CR} \right\} + B \right] \dots\dots(20) \end{aligned}$$

次に積分定数を求めると $t=0$ で、SCR1が導通したとすれば図-15より

$$V_2(0) = Vy - Vp$$

$$V_2(\infty) = E$$

であるから(20)式より

$$V_2 = (E - Vy + Vp)(1-y) + Vy - Vp \dots\dots\dots(21)$$

③の電位についても、 $t=0$ で $Vx - Vp$ とすれば同様に

$$V_3 = (E - Vx + Vp)(1-y) + Vx - Vp \dots\dots(22)$$

④の電位については、 $t=0$ で $-Vp$ とおいて、

$$V_4 = (E + Vp)(1-y) - Vp \dots\dots\dots(23)$$

但し

$$\begin{aligned} y &= \frac{2-\sqrt{2}}{4} \exp \left\{ - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{t}{CR} \right\} \\ &\quad + \frac{2+\sqrt{2}}{4} \exp \left\{ - \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{t}{CR} \right\} \dots\dots(24) \end{aligned}$$

4相の周期 $T(4)$ は、SCR1が導通してから $V_2 = Vp$ 、 $V_3 = Vy$ 、 $V_4 = Vx$ となるまでの時間 τ の4倍となるから、(21)~(23)式において、未知量 Vx 、 Vy を消去して τ を求めると、

$$(E + Vp)y^3 + Vpy^2 + Vpy - (E - Vp) = 0 \dots(25)$$

ここで、 $E = nVp$ とおくと、($n > 1$)

$$(n+1)y^3 + y^2 + y + 1 - n = 0 \dots\dots\dots(26)$$

(26)式を解くため

$$y = z - \frac{1}{3(n+1)} \dots\dots\dots(27)$$

とおくと

$$z^3 + 3pz + q = 0 \dots\dots\dots(28)$$

但し

$$p = \frac{3(n+2)}{9(n+1)^2}$$

$$q = \frac{27n^3 + 27n^2 - 18n - 20}{27(n+1)^3} \dots\dots\dots(29)$$

となり解は、

$$z = M + N$$

$$M = \left[-\frac{q}{2} + \frac{\sqrt{q^2 + 4p^3}}{2} \right]^{1/3}$$

$$N = \left[-\frac{q}{2} - \frac{\sqrt{q^2 + 4p^3}}{2} \right]^{1/3} \dots\dots\dots(30)$$

ここで τ/cR は超越関数であり簡単に求められないので、(24)式のグラフを描きこのグラフから逆に τ/cR を求めた。すなわち $n \rightarrow p \rightarrow q \rightarrow M \rightarrow N \rightarrow z \rightarrow y \rightarrow \tau/cR$ の順に求めればよい。以上の計算結果と、実験値とを図-18に示す。

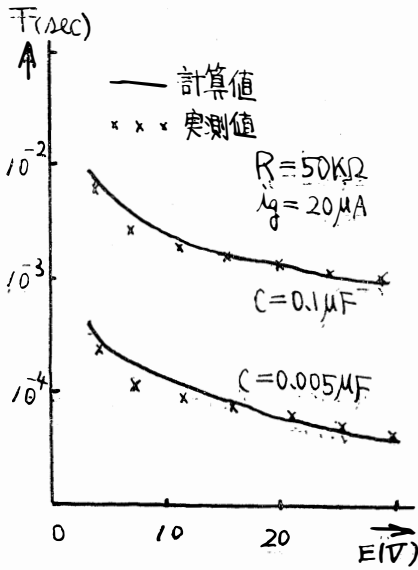


図 18 4相発振周期

7. 5相発振回路

図-19に示した5相発振回路の発振機構も3相と同様な手順で行えば良いと考えられる。図-20に5相の各陽電圧波形の概略を示しておく。

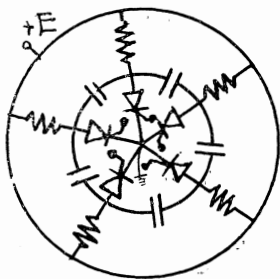


図 19 5相発振回路

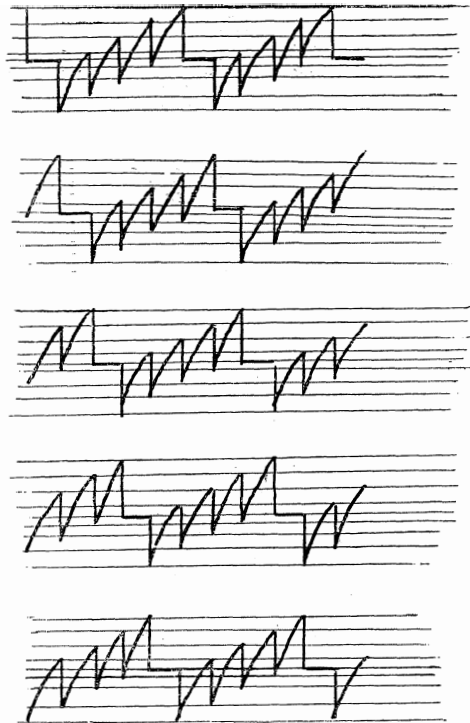


図 20 5相各陽極電圧波形

8. ゲート電流と振幅及び周期

SCRは、ゲート電流(I_g)の大小により、その特性が著しく変化するので、図-21、図-22に示したように、ゲート電流によって、発振の周期や振幅が著しく変化することが、認められた。以下3相の場合を示す。

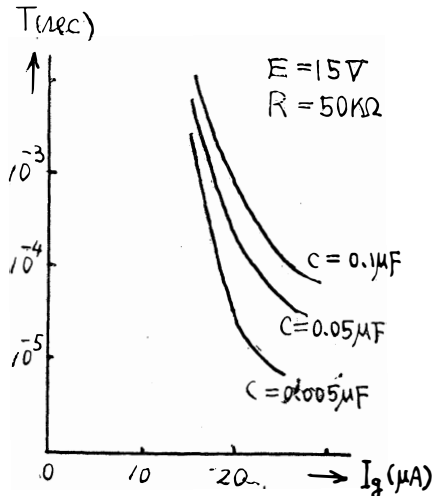


図 21 ゲート電流と周期

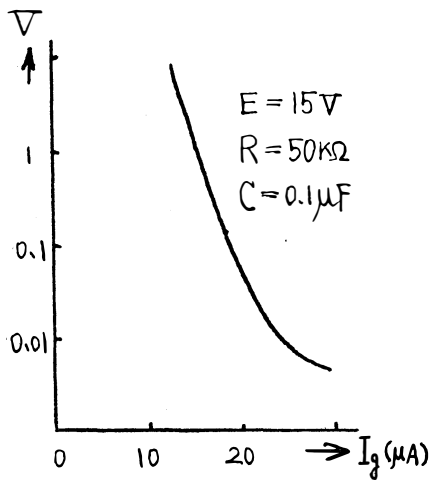


図 22 ゲート電流と振幅

9. 結 言

以上SCRを用いた多相発振器は、コントロール素子を持つこと、またエサキダイオードの n 相の多相発振の場合、 n 個の電源が必要である点に比較して電源は、一個でよいことなどの点が認められる一方、SCRそのものが、熱に対して、多少その特性が変化するるので、その安定化の問題。また、本実験において、耐圧、許容電流とも小さいSCRを用いたが、それでも発振周波数が、比較的、低いという点など改善の余地が残されている。最後に、本研究をすすめるにあたり、終始、御指導いただいた本学、四谷平治教授に、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 平山博・PNPNダイオードを用いた多相発振(信達大.昭38.380)
- (2) Guillemin, Introductory Circuit Theory
- (3) 八木, 村井. SCRを用いた多相発振器

電気4学会北陸支部連合大会昭43, 10, 16発表

(昭43.10.31受付)