U. D. C. 621.315.592 : 546.28
621.382 : 621.314.63

2,500V-400A CH03形サイリスタの電流容量についての考察

Current Capability of Type CH03 (2,500 V-400 A) Unit Cell Thyristor

和島幸一* 小島 勲*
Kôichi Wajima Isao Kojima

要旨

大容量圧延機用直流電動機にサイリスタ変換器も大容量化してきた。これに伴いサイリスタ素子もユニットセル形構造が採用され，大容量化が進んでいる。日立製作所のユニットセル形構造素子はダイオードではF01，C01形整流素子が，またサイリスタでは2,500V-400A CH03形サイリスタが完成し，電力用半導体装置の主整流素子として採用されている。ユニットセル形構造は，その特長である低熱抵抗が大容量素子の必要条件を満たすもので，今後さらに多く出現することが推測される。

従来多く採用されているスタッド構造素子では，実効電流一定で制約されていたのに対し，その構造上の特長により接合最高温度と負荷電流によるくり返し温度差のみで制約されるという違いが出てきた。本稿ではCH03形サイリスタにつきユニットセル形構造素子の瞬時過電流耐量 (Surge) およびターンオン過渡時の現象に関連しない定常負荷について考察する。

1. 緒言

分塊，厚板，ホットストリップ，コールドストリップなどの大容量圧延機にサイリスタ変換器が全面的に採用されるようになり，サイリスタ素子の大容量化が要求されるようになってきた。通例サイリスタ接合にとって，高耐圧化と大電流化とでは設計，製作上の処方が対立しており，高耐圧接合は順損失増大をまねき，それだけ順電流容量が低下することを避けがたいものとする。ここに高損失を処理できる低熱抵抗構造が高耐圧大電流素子の製作を可能にする一つの方法として必要となる。

図1はスタッド形構造の一例で，発生損失熱が一方向に放散する単方向熱放散であるのに対し，ユニットセル形構造では図2に示したように両方向二重熱放散方式をとっているので，実効的に熱抵抗は著しく低減される。

負荷電流は素子が想定寿命内で信頼度を確保し長期運転に耐え，また規定された定格条項が保証された値を保つように，その許容量が設定される。この意味で負荷電流はおもに

(a) 最高接合温度
(b) 接合温度差 (Soldering Typeの場合ベース温度差も含む)
(c) 構成材料の電流容量

で規定される。これらは絶対最大定格を規定する要素として考える場合，律則過程をとる事項により制限をうけることになる。ユニットセル形構造ではリード線などの構成がないので，素子自体の立場からみると(a)と(b)項で決まることが多いのである。このことはスタッド構造と異なり，冷却条件により許容電流は変わり，使用条件を考慮して負荷電流の設定が自由であることを意味すると同時に，使用するにあたり最高接合温度および接合温度差が素子の信頼度，特性にどのように影響するかを認識せねばならない。これらの要素は，それぞれ異なったモードで素子の信頼性，特性に影響するものである。半導体装置の信頼性，経済性は設計の重要な指針であると考える。本稿ではCH03形ユニットセル形構造サイリスタを例として，これらより決まる電流容量の設定法を検討する。なお前述のように瞬時非くり返し過電流およびスイッチング損失に関連する領域については別途報告する商用周波数近傍の定常電流について論ずることにする。

CH03形サイリスタの一般的定格，特性については表1にかかげた。これらはCH03形サイリスタの標準仕様である。図3はその外形寸法である。

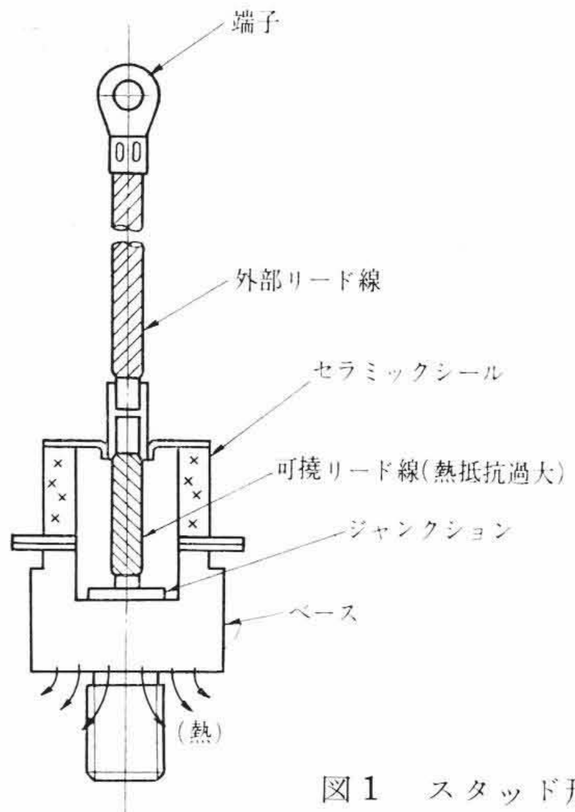

図1 スタッド形構造

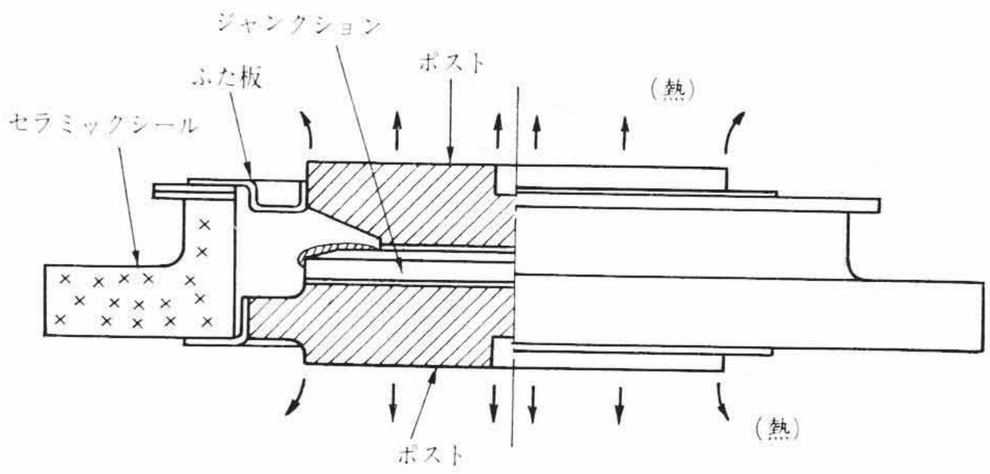

図2 ユニットセル形構造

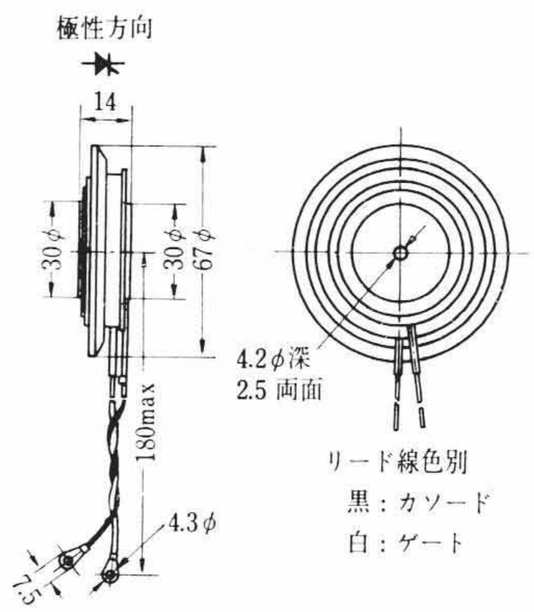

図3 CH03形 外形寸法

* 日立製作所日立工場

表1　CH 03 定格および特性

形式		CH 03 R	CH03CA	CH03CD	CH03CF
定格条項	CES形名				
定格せん頭逆耐電圧 (V) peak		1,800	2,000	2,300	2,500
定格せん頭過渡逆耐電圧 (V) peak		1,950	2,200	2,550	2,750
定格せん頭順阻止電圧 (V) peak		1,800	2,000	2,300	2,500
定格平均順電流 (A) ave		400 (単相半波 180° 通流 TB: −40～+75℃, 抵抗負荷)			
定格瞬時過電流 (A) peak		7,000 (10 ms 通流, 正弦半波1サイクル)			
最大順電圧降下 (V) peak		2.3 (単相半波せん頭値 1,000A, 通流角 180°)			
定格せん頭ゲート入力 (W) peak		20			
定格平均ゲート入力 (W) ave		4			
定格せん頭ゲート電圧 (V) peak		順方向: 20, 逆方向: 5			
定格せん頭ゲート電流 (A) peak		4			
最小ゲートトリガ電圧 (V) DC		4 (T_j: 25℃, AK間順電圧6 V DC)			
最大ゲート非トリガ電圧 (V) DC		0.1 (T_j: −40～+125℃, AK間順電圧6 V DC)			
最小ゲートトリガ電流 (mA) DC		300 (T_j: 25℃, AK間順電圧6 V DC)			
最大ゲート非トリガ電流 (mA) DC		1.5 (T_j: −40～+125℃, AK間順電圧6 V DC)			
動作接合温度 (℃)		−40～+125			
保管温度 (℃)		−40～+125			
接合冷却体間熱抵抗 (℃/W)		0.05			
最大加圧荷重 (kg)		1,000			
重量 (g)		230			

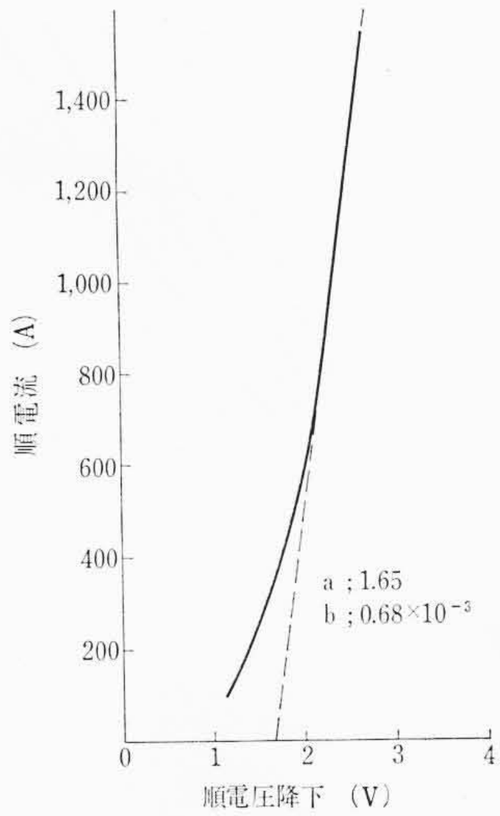

図4　順電圧降下特性

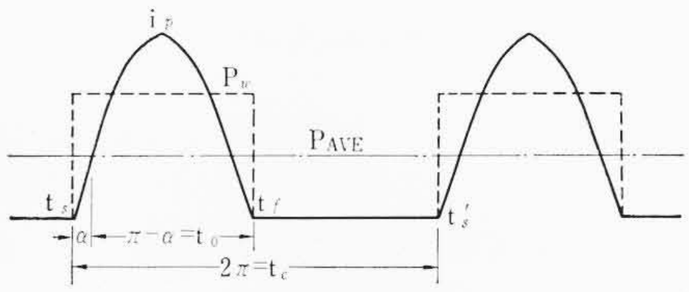

図5　正弦波波形

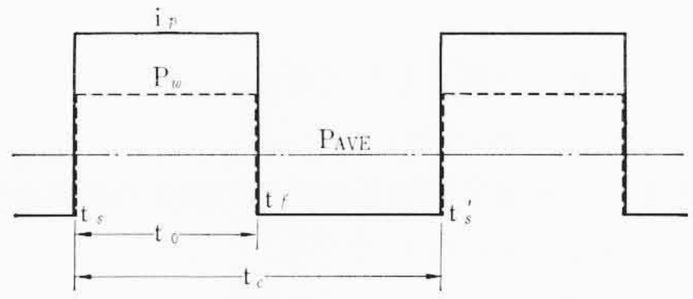

図6　方形波波形

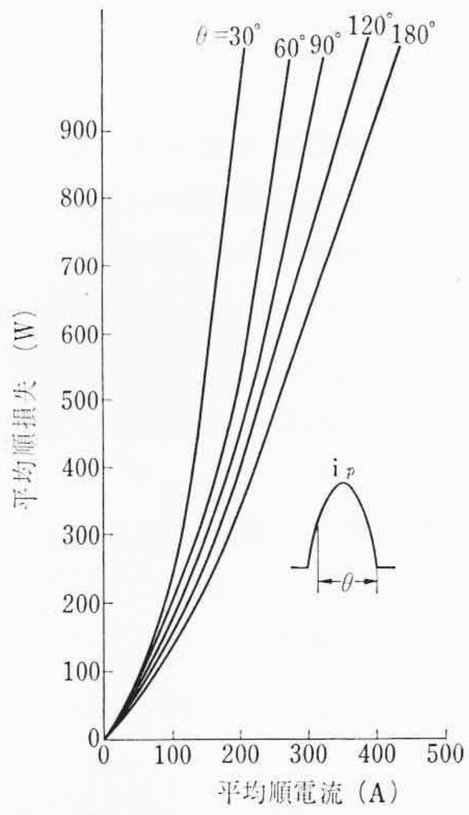

図7　正弦波損失特性

2. 記　　号

A, K_1, K_2: 接合の常数
a, b: 計算の常数
$FVD, FVD(i)$: 順電圧降下
P, P_{AVE}, P_w: 損失
$i, i_p\, i_d$: 電流
$\theta, \alpha, \Delta\theta$: 電気角
$\boldsymbol{\theta}_\infty$: 飽和した接合の熱抵抗
$\boldsymbol{\theta}$: 熱抵抗
$t, t_{ON}, t_{CY}, \Delta t, t_f, t_s, t_s'$: 時間
T_j, T_{AMB}, T: 温度
ΔT_j: 温度差
k: ボルツマン常数

3. 接合温度

負荷電流を規制するのはいずれのパターンであっても接合温度で決まる。特に負荷電流についてはまず接合温度上昇を考えるのが出発点である。接合温度上昇は発生損失と熱抵抗の要素で決まる。これらの要素はともに時間の関数であるので，接合温度上昇もまた時間を変数とする関数となる。定常負荷電流であっても時間を考慮のうちに入れて検討しなければならない。

3.1　順電圧降下と損失

順電流 i による順電圧降下は次のように与えられる。

$$FVD(i)=A+\frac{1}{kT}\ln i+K_1\sqrt{i}+K_2 i \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで，A, K_1, K_2 は素子の決定する常数であり，k は物理常数，T は温度である。(1)式で与えられた式の実験値を図4で示した。これはCH03の FVD-i 特性の実測値である。(1)式はまた，図4より実験式で

$$FVD(i)=a+bi \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

と近似的に変えても計算する電流領域では誤差は小さい。

順電流を図5のように i_p をせん頭値とした正弦波として損失を求めると，

$$i=i_p\sin\theta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

この値を導入して(2)式で損失を求めると

$$p=i\cdot FVD(i)=i_p\sin\theta\cdot(a+bi_p\sin\theta) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

となる。通流期間の平均損失 P_w は

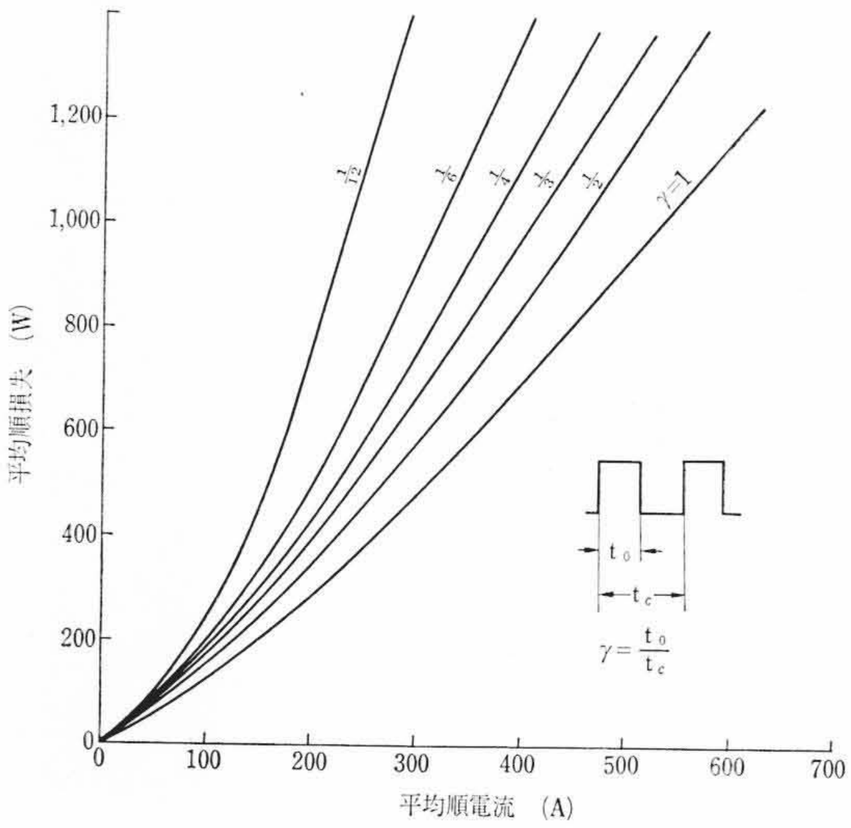

図8　方形波損失特性

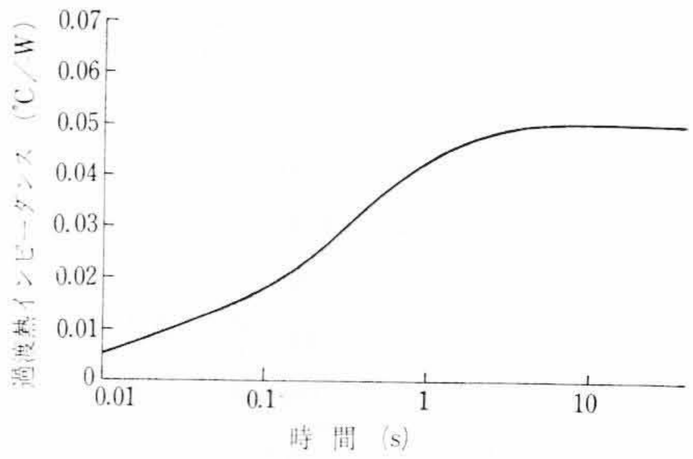

図9　過渡熱インピーダンス

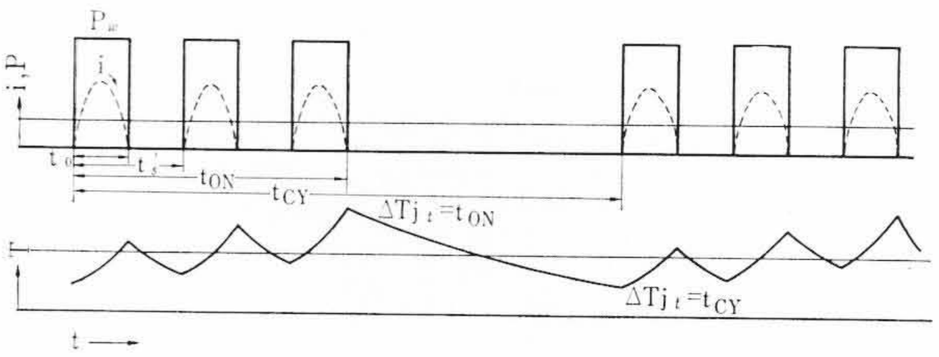

図10　間欠負荷波形

$$P_w=\frac{1}{\pi-\alpha}\int_\alpha^\pi i_p\sin\theta(a+bi_p\sin\theta)\,d\theta$$

$$=\frac{1}{\pi-\alpha}\left\{ai_p(1+\cos\alpha)+\frac{bi_p^2}{2}\left\{(\pi-\alpha)+\frac{\sin 2\alpha}{2}\right\}\right\}\quad\cdots(5)$$

である。(1)式についての損失は付録I.に記載したとおりである。なお全域平均損失は

$$\left.\begin{aligned}P_{AVE}&=\gamma\cdot P_w\\ \gamma&=\frac{t_0}{t_c}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(6)$$

である。方形波の損失は図6として考えると

$$P_w=i_p\cdot FVD(i_p)=ai_p+bi_p^2\quad\cdots\cdots(7)$$

である。図7,8は順電流平均値と全域平均損失の関係を示したものである。なお，順電流平均値 i_d は

$$\left.\begin{aligned}&\text{正弦波}\quad i_d=\frac{1}{2\pi}\int_\alpha^\pi i_p\sin\theta\,d\theta=\frac{1+\cos\alpha}{2\pi}i_p\\ &\text{方形波}\quad i_d=\gamma\cdot i_p\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(8)$$

により算出された。

3.2 熱　抵　抗

接合を損失発生源とし熱抵抗を求めるとCH03形サイリスタの場合図9のようになる。熱抵抗は構成材料の物理常数と寸法により決まるもので，おのおのの構成材料の熱時定数と時間関数の重合した形で示され，これらのパラメータで決まる飽和点以上で一定となる。ユニットセル構造の熱抵抗の論述はここでは行なわない。図8は実験と理論計算の修正で得られたものである。

3.3 接合温度上昇の計算

接合温度上昇の計算方法は各種提案されているが，直観的に考察しやすい重合法で考えることにした。

順電流に対応する温度上昇は

$$\Delta T_{j(t=t_f)}=P_{AVE}\{\boldsymbol{\theta}_\infty-\boldsymbol{\theta}(t_f)\}+P_w\cdot\boldsymbol{\theta}(t_f)$$

$$=P_{AVE}\cdot\left\{\boldsymbol{\theta}_\infty+\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)\boldsymbol{\theta}(t_f)\right\}\quad\cdots\cdots(9)$$

で求まる。しかし正弦波電流のように時間変位のある負荷では $t=t_f$ で最高温度になるとはかぎらない。正弦波電流の場合(付録II.)は次の式で求められる。

$$\Delta T_{j\max}=P_{AV}\{\boldsymbol{\theta}_\infty-\boldsymbol{\theta}(n\cdot\Delta t)\}+\frac{1}{\Delta\theta}\left\{\boldsymbol{\theta}(t_f)\cdot\int_{\theta_0}^{\theta_1}FVD(i)\,i\,d\theta\right.$$

$$\left.+\sum_{n=1}^{r}\boldsymbol{\theta}\{t_f-(n-1)\Delta t\}\cdot\int_{\theta_{n-2}}^{\theta_n}FVD(i)\,i\,d\theta\right.$$

$$\left.+\boldsymbol{\theta}(t_f-n\Delta t)\int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n}FVD(i)\,i\,d\theta\right\}\cdots\cdots(10)$$

順電流休止期間の最終点 $t=t_s'$ の温度上昇は

$$\Delta T_{j(t=t_s')}=P_{AVE}\{\boldsymbol{\theta}_\infty-\boldsymbol{\theta}(t_s')\}+P_w\boldsymbol{\theta}(t_s')\}-P_w\boldsymbol{\theta}(t_s'-t_f)$$

$$\cdots\cdots(11)$$

で与えられる。ある周波数の1サイクルの接合温度差は

$$\Delta T_{jEXC}=\Delta T_{j\max}-\Delta T_{j(t=t_s')}\quad\cdots\cdots(12)$$

で求められる。

3.4 接　合　温　度

接合温度 T_j は周囲温度 T_{AMB} とフィン温度上昇 ΔT_{FIN} および接合温度上昇で求められる。

$$T_j=\Delta T_{j\max}+\Delta T_{FIN}+T_{AMB}\quad\cdots\cdots(13)$$

ここで ΔT_{FIN} は

$$\Delta T_{FIN}=P_{AVE}\cdot\boldsymbol{\theta}_{F-A}\quad\cdots\cdots(14)$$

で表わされ $\boldsymbol{\theta}_{FA}$ はフィンと冷却媒体間の熱抵抗である。なお，ΔT_j の中にユニットセルのポストとフィンの接触熱抵抗を含ませておいた。接合温度 T_j は前述のように素子の信頼度，保証定格および特性より決定されるので，その素子自体で決まる値である。CH03の場合は125℃である。

接合温度に着目すると(9),(13),(14)式より

$$P_{AVE}=\frac{T_j-T_{AMB}}{\boldsymbol{\theta}_\infty+\left(\frac{1}{\gamma}-1\right)\boldsymbol{\theta}(t_f)+\boldsymbol{\theta}_{F-A}}\quad\cdots\cdots(15)$$

で最大許容損失が T_{AMB}, $\boldsymbol{\theta}_{F-A}$ を決めることで求まる(付録III.)。(5),(6),(7)式から許容せん頭電流，また(8)式より平均順電流が求められる。

4. 短時間過負荷耐量

最高接合温度および接合温度差を規定内に押えているかぎり，熱抵抗の過渡特性を利用し，短時間くり返し過電流を通流することができる。図10の間欠負荷電流に対して接合温度を算出すると(16),(17),(18)式となる。

$$\Delta T_{jt=t_{ON}}=\left[\frac{t_{ON}}{2t_{CY}}\{\boldsymbol{\theta}_\infty+\boldsymbol{\theta}_{F-A}-\boldsymbol{\theta}(t_{ON})\}\right.$$

$$\left.+\frac{1}{2}\{\boldsymbol{\theta}(t_{ON})-\boldsymbol{\theta}(t_0+t_s')\}+\boldsymbol{\theta}(t_0)-\boldsymbol{\theta}(t_s')\right]\cdot P_w\quad\cdots\cdots(16)$$

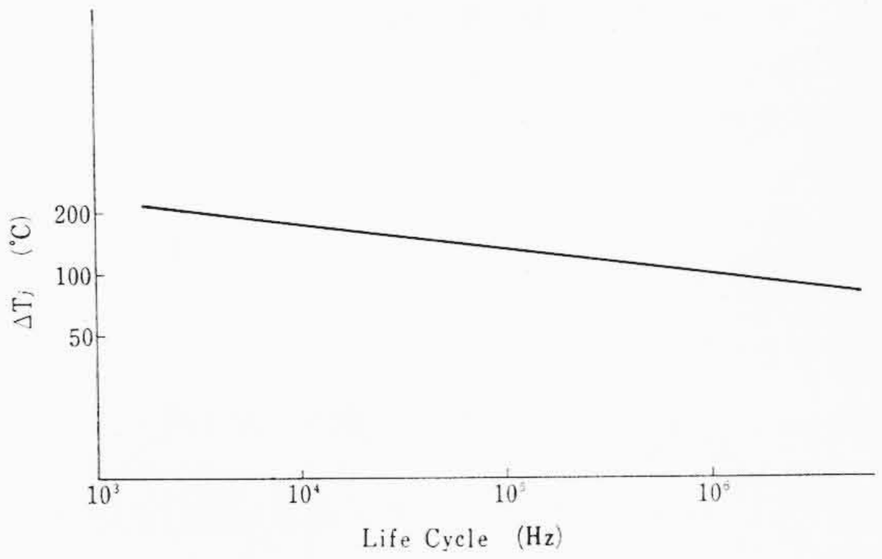

図 11 ΔT_j と Life Cycle

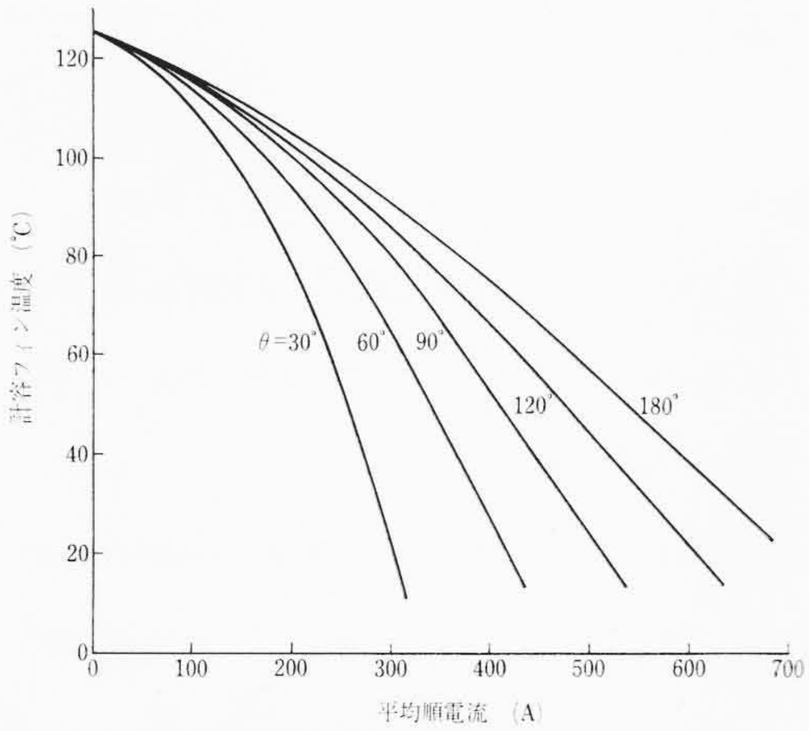

図 12 正弦波温度計算

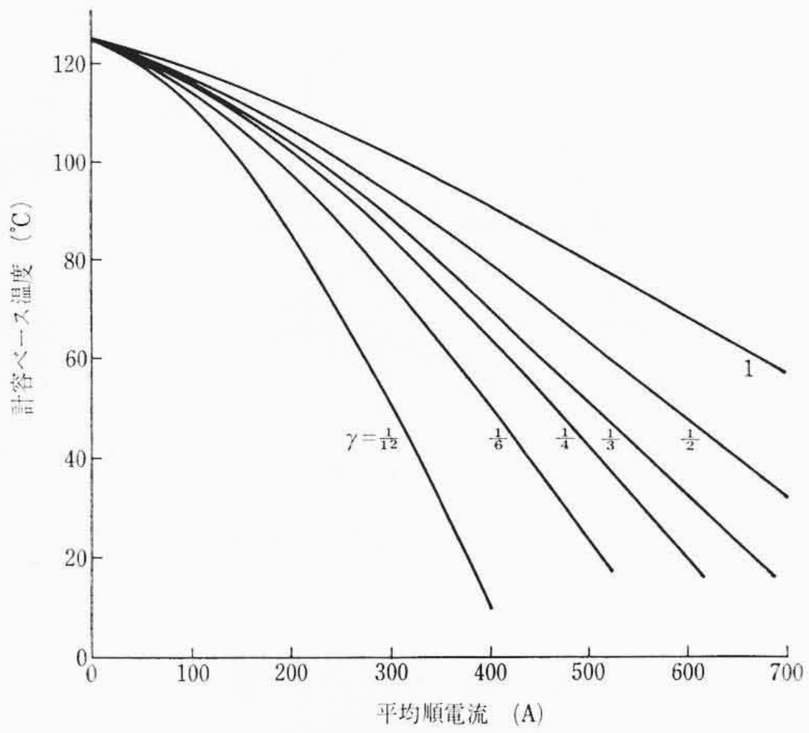

図 13 方形波温度計算

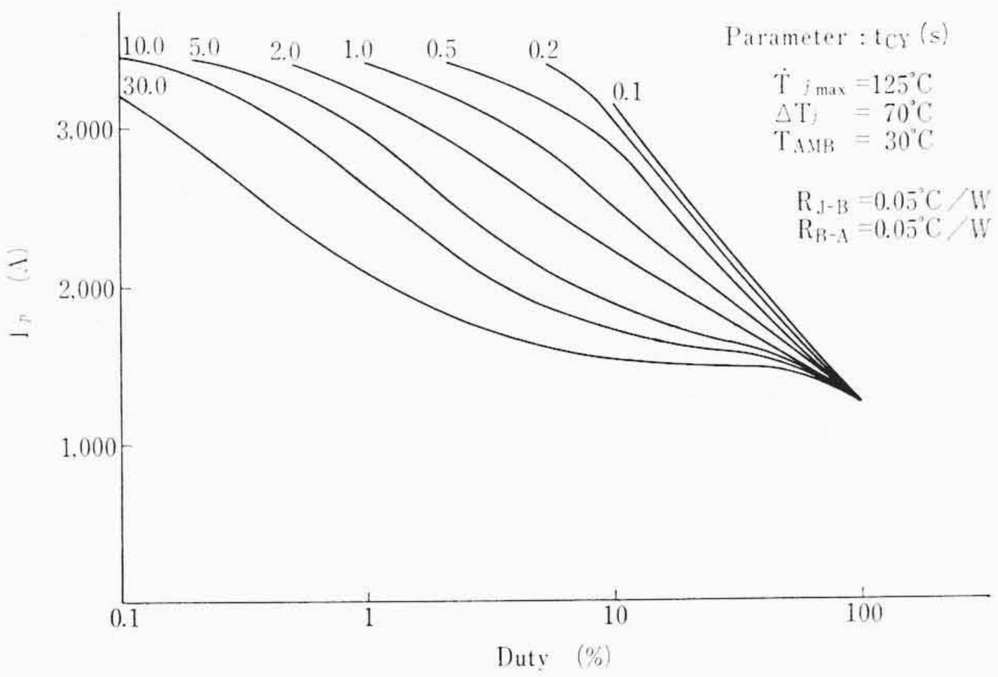

図 14 CH03 時間負荷電流特性の一例

$$\Delta T_{tj=t_{CY}}=\left[\frac{t_{ON}}{2t_{CY}}\{\boldsymbol{\theta}_{\infty}+\boldsymbol{\theta}_{F-A}-\boldsymbol{\theta}(t_{CY})\}+\frac{1}{2}\{\boldsymbol{\theta}(t_{CY})-\boldsymbol{\theta}(t_{CY}-t_{ON})\}\right]\cdot P_w \quad \cdots\cdots(17)$$

$$\Delta T_{jEXC}=\Delta T_{jt=t_{ON}}-\Delta T_{jt=t_{CY}} \quad \cdots\cdots(18)$$

この場合

$$T_j=\Delta T_{jt=t_{ON}}+T_{AMB} \quad \cdots\cdots(19)$$

の接合温度を保つことが必要条件であると同時に ΔT_{jEXC} についても考慮する必要がある。ΔT_{jEXC} については，これが機械的エネルギーに変換され交播ひずみとして接合に影響するから，ΔT_{jEXC} の耐量も信頼度設計上重要な要素となる。CH03 形サイリスタの ΔT_{jEXC} とくり返し耐量を示したのが図 11 である。この特性を考慮し，適用する装置の耐久期間と信頼性を設定して負荷条件を選定することが装置の経済設計上必要となろう。この場合(12)式で与えられた1サイリクル内の ΔT_{jEXC} の値も一応は検討しておき (18) 式の T_{jEXC} とどちらで決定されるかも比較しておく。(16), (17), (18), (19) 式を用いて決まった ΔT_{jEXC} より負荷電流の許容値を逆算することができる。

5. CH 03 形サイリスタの電流容量

電流容量を決定する条件について述べてきた。また電流容量として連続通電の容量と短時間間欠過負荷容量の設定法についても検討した。ここでは CH03 形サイリスタにつき具体的な計算を行ない検討してみる。

5.1 連続電流(定常時)容量

連続定常負荷電流でも装置の運転稼働と休止では (9), (10) 式の ΔT_j がそのまま接合温度差となるので，稼働サイクルの多い使用条件では間欠負荷使用の状態にはいる。ここでは稼働サイクルが無視できる程度で，稼働サイクルによる温度差も影響しない程度の状態として考え温度差は(12)式の使用周波数の1サイクル温度差のみを考える。このような条件では T_j は定格内に，またフィンの熱抵抗，周囲温度によってきまる(13)式から求められる(図 12, 13)。CH03 形サイリスタの定格 400 A とあるのは上記した温度差を考慮に入れ接合温度上昇 50℃ と設定したものである。フィンの熱抵抗周囲温度，信頼性を考慮し(15)式より負荷電流を設定していくのが装置の経済性設計となる。

5.2 短時間(間欠)過負荷特性

半導体装置の使用において，ある程度のひん度で短時間過負荷電流が流れることが予測されるケースが多い。この場合信頼度を保つため，短時間過負荷電流を素子の定常電流に合わせて設計することは，装置の経済性上不利となる場合がある。また溶接機などの短時間大電流の負荷を想定する場合など短時間過負荷特性がわかれば有効な利用ができる。冷却条件など多くの要因がはいってくるので，個々には 3. の計算式により求めるしかないが，一例として CH03 形サイリスタの計算結果を図 14 にかかげた。装置の設計にあたっては，図 10, 11 を検討し装置の耐久性および使用条件を考慮して負荷電流を設定すればよい。負荷電流は冷却条件などで考慮しなければならないことはもちろん素子および装置の耐久性，信頼性を検討して決められる。

以上電流容量につき述べたが，ユニットセル形構造の電流容量はスタッド形に実効規制があるのに対して素子の信頼性を設定して，それより負荷電流を規制する形で求められる。ここに装置の信頼性，経済性より規制される電流容量となり，素子からの規制は接合温度と図 10 の信頼度パターンがあるだけとなる。

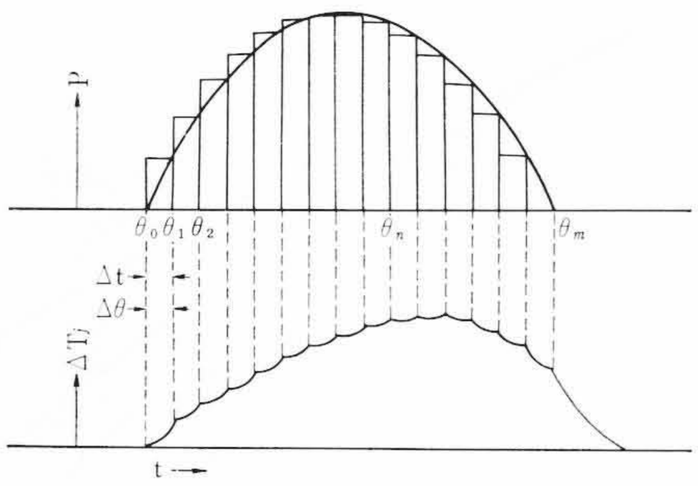

図15　サブサイクルの温度上昇

6. 結　　言

ユニットセル形構造の素子は低熱抵抗であるので，定常時の電流容量が大きくとれることになる。またスタッド形構造に比べ外条件に順応性がよくなっている。それだけに素子の性格をよく検討し電流容量を決める必要がある。

ユニットセル形構造は，上記のように定常時の電流を増大することは容易であり，さらに大容量化が進むと考えられるが一方，本報告では触れなかったが瞬時過電流耐量は必ずしも定常電流容量に比例して増加しないので，装置の保護上に問題がある。定常電流値よりもこのサージ電流耐量による制限がこのユニットセル形構造素子の限界を規制する可能性がある。このことは将来サイリスタ素子の大容量化に大きな問題をなげかけると考えられるが，これについては別途報告する予定である。

本稿を終わるにあたり，本素子開発について終始ご指導賜わった日立製作所日立工場整流器部浅野部長，守田主任技師，曽根田課長はじめ関係各位にお礼申し上げる。

参　考　文　献

(1)　浅野：オーム　昭和41年10月号　p. 18～25
(2)　佐々木，和島：日立評論　**49**, 1096 (昭42-11)
(3)　和島，天野：日立評論　**49**, 332 (昭42-3)
(4)　G. E.: SCR Manual 3rd.　1964年版，p. 21～30

付録 I.　低電流域を含めた損失

(1)　正弦波電流

$$i=i_p\sin\theta \quad \cdots\cdots (\mathrm{I}\text{-}1)$$

$$FVD(i)=A+\frac{1}{kT}\ln i+K_1\sqrt{i}+K_2 i \quad \cdots\cdots (\mathrm{I}\text{-}2)$$

$$P(i)=i\cdot FVD(i)=i_p\sin\theta\left\{A+\frac{1}{kT}\ln i_p\sin\theta+K_1\sqrt{i_p\sin\theta}+K_2 i_p\sin\theta\right\} \quad \cdots\cdots (\mathrm{I}\text{-}3)$$

通流期間の平均損失

$$P_w=\frac{1}{\pi-\alpha}\int_\alpha^\pi i_p\sin\theta\left\{A+\frac{1}{kT}\ln i_p\sin\theta+K_2\sqrt{i_p\sin\theta}+K_2 i_p\sin\theta\right\}d\theta \quad \cdots\cdots (\mathrm{I}\text{-}4)$$

$$=\frac{i_p}{\pi-\alpha}\left\{\left(A+\frac{1}{kT}\ln i_p\right)(1+\cos\alpha)+\left[\cos\alpha(\ln\sin\alpha-1)-0.3-\ln\left|\tan\frac{\alpha}{2}\right|\right]\cdot\frac{1}{kT}+\frac{K_2 i_p}{2}\left\{(\pi-\alpha)+\frac{\sin 2\alpha}{2}\right\}+K_1\sqrt{i_p}\cdot\int_\alpha^\pi\sin^{1.5}\theta\,d\theta\right\} \quad \cdots\cdots (\mathrm{I}\text{-}5)$$

$\alpha=0$ の場合は

$$P_w=\frac{i_p}{\pi}\left\{2\left(A+\frac{1}{kT}\ln i_p\right)+\frac{0.63}{kT}+\frac{\pi K_2}{2}i_p+1.78K_1\sqrt{i_p}\right\} \quad \cdots\cdots (\mathrm{I}\text{-}6)$$

で近似される。方形波の場合(I-3)で求まる。

付録 II.　サブサイクル内の温度上昇

図15で示したように負荷電流のサブサイクルの時間を m 分割して近似的に求める。

$$\Delta t=\frac{t_0}{m} \quad \cdots\cdots (\mathrm{II}\text{-}1)$$

$$\Delta\theta=\frac{\pi-\alpha}{m} \quad \cdots\cdots (\mathrm{II}\text{-}2)$$

として n 番目の温度上昇を求めると

$$\Delta T_{j\,\mathrm{SUB}}=\frac{1}{\Delta\theta}\int_{\theta_0}^{\theta_1} iFVD(i)\{\boldsymbol{\theta}(t_f)-\boldsymbol{\theta}(t_f-\Delta t)\}d\theta+\frac{1}{\Delta\theta}\int_{\theta_1}^{\theta_2} iFVD(i)d\theta\{\boldsymbol{\theta}(t_f-\Delta t)-\boldsymbol{\theta}(t_f-2\Delta t)\}+\cdots\cdots+\frac{1}{\Delta\theta}\int_{\theta_{n-2}}^{\theta_{n-1}} iFVD(i)[\boldsymbol{\theta}\{t_f-(n-2)\Delta t\}-\boldsymbol{\theta}\{t_f-(n-1)\Delta t\}]d\theta+\frac{1}{\Delta\theta}\int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} FVD(i)i\,d\theta[\boldsymbol{\theta}\{t_f-(n-1)\Delta t\}-\boldsymbol{\theta}\{t_f-n\Delta t\}] \quad \cdots\cdots (\mathrm{II}\text{-}3)$$

となる。これを分解整理すると

$$\Delta T_{j\,\mathrm{SUB}}=\frac{1}{\Delta\theta}\left\{\boldsymbol{\theta}(t_f)\cdot\int_{\theta_0}^{\theta_1}FVD(i)i\,d\theta+\boldsymbol{\theta}(t_f-\Delta t)\cdot\int_{\theta_0}^{\theta_2}FVD(i)i\,d\theta+\boldsymbol{\theta}(t_f-2\Delta t)\cdot\int_{\theta_1}^{\theta_3}FVD(i)i\,d\theta+\cdots\cdots+\boldsymbol{\theta}[t_f-(n-1)\Delta t]\cdot\int_{\theta_{n-2}}^{\theta_n}FVD(i)i\,d\theta+\boldsymbol{\theta}(t_f-n\cdot\Delta t)\cdot\int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n}FVD(i)i\,d\theta\right. \quad \cdots\cdots (\mathrm{II}\text{-}4)$$

$$=\frac{1}{\Delta\theta}\left\{\boldsymbol{\theta}(t_f)\cdot\int_{\theta_0}^{\theta_1}FVD(i)i\,d\theta+\sum_{n=1}^{r}\boldsymbol{\theta}\{t_f-(n-1)\cdot\Delta t\}\cdot\int_{\theta_{n-2}}^{\theta_n}FVD(i)i\,d\theta+\boldsymbol{\theta}(t_f-n\Delta t)\cdot\int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n}FVD(i)i\,d\theta\right\} \quad \cdots\cdots (\mathrm{II}\text{-}5)$$

がサブサイクルの温度上昇である。このサブサイクル負荷以前に十分な時間負荷があったとしたら $T_{j\,\max}$ は

$$\Delta_{j\,\max}=P_{\mathrm{AVE}}\{\boldsymbol{\theta}_\infty-\boldsymbol{\theta}(n\cdot\Delta t)\}+\frac{1}{\Delta\theta}\left\{\boldsymbol{\theta}(t_f)\cdot\int_{\theta_0}^{\theta_1}FVD(i)i\,d\theta+\sum_{n=1}^{r}\boldsymbol{\theta}\{t_f-(n-1)\Delta t\}\cdot\int_{\theta_{n-2}}^{\theta_n}FVD(i)i\,d\theta+\boldsymbol{\theta}(t_f-n\Delta t)\cdot\int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n}FVD(i)i\,d\theta\right\} \quad \cdots\cdots (\mathrm{II}\text{-}6)$$

となる。

付録 III.　損失より電流を求める

許容損失 P は

$$P=\frac{T_j-T_{\mathrm{AMB}}}{\boldsymbol{\theta}} \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}1)$$

で与えられる場合（本文(15)式）は順電流は損失特性より図解できる。ここで FVD を次の式で表わすと計算により求まる。

$$FVD(i)=a+bi \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}2)$$

とすれば損失 P_w は

$$P_w(i)=a'i_p+b'i_p^2 \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}3)$$

で求まる。ここで a', b' は正弦波の場合

$$a'=\frac{1+\cos\alpha}{\pi-\alpha}a,\quad b'=\frac{b}{2}+\frac{\sin 2\alpha}{2(\pi-\alpha)} \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}4)$$

であり方形波では

$$a'=a,\quad b'=b \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}5)$$

である。(III-1), (III-3)式より $P\equiv P_w(i)$ とすれば

$$P=a'i_p+bi_p^2 \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}6)$$

を解けばよい。根を求めて負根を除くと

$$i_p=\sqrt{\frac{P}{b'}+\frac{a'^2}{2b'^2}}-\frac{a'}{2b'} \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}7)$$

でせん頭値が求まる。平均値 i_d は

$$i_d=\frac{1}{2\pi}\int_\alpha^\pi i_p\sin\theta\,d\theta=\frac{1+\cos\alpha}{2\pi}i_p \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}8)$$

または

$$i_d=\gamma\cdot i_p \quad \cdots\cdots (\mathrm{III}\text{-}9)$$

である。