

サイリスタモジュール

Thyristor Modules

小針克夫* Katsuo Kohari・広田俊男** Toshio Hirota・斎藤安正*** Yasumasa Saitô・中田勝栄**** Katsuei Nakata
矢島維豊*** Tadatoyo Yajima

I. まえがき

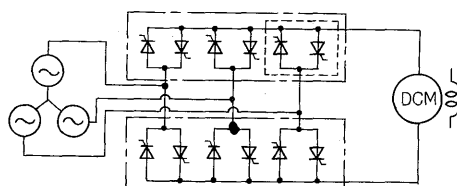
昭和48年と54年の二度にわたる石油ショックを経験した少資源の我が国における最大の課題は、省資源、省エネルギーであり、それぞれの業界で真剣に対策に取り組んでいる。工作機械の例でみると、高精度化を追求した効率の高い機械が要求されており、NC工作機の比重が年々増加している。このような装置では、機械駆動装置の静止電力変換装置による可変速化及び装置の小形化が急速に進展しているが、これらに対応するために複合半導体製品を用いて、装置取付工数や占有面積の減少を図る傾向が強い。この市場要求に対応するために富士電機では、数年前から2個組サイリスタモジュールを開発し、製品化を進めてきた。また、その成果を踏まえて富士通ファナック(株)と複合化製品の共同開発を進め、業界に先がけてサイリスタ6個入りモジュールを開発し、適用が開始されている。

本稿ではこれら富士電機独自の製品と合わせて、西独シーメンス社との合弁会社富士エレクトロニックコンポーネンツ(株)で販売することになったシーメンス製サイリスタモジュールも紹介する

II. サイリスタモジュールの特徴

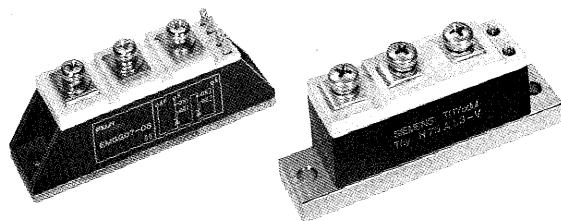
第1図はサイリスタを12個用いた三相整流回路の例である。従来方法では、単体のサイリスタを個別に冷却体に取り付け、各単体の絶縁をしながら、アノード、カソード及びゲート端子の接続を行っていた。しかし、第1図に破線で示したような2個のサイリスタ、あるいは一点鎖線で示した6個のサイリスタを一つのパッケージに納めた複合製品(サイリスタモジュール)を使用すれば、装置全体が小形化され、実装及び保守も容易になる。このようなサイリスタモジュールの特徴は次のとおりである。

- (1) サイリスタ素子と取付基板とが絶縁されているので、共通の冷却体に取り付け、装置全体が小形化される。
- (2) 2個ないし6個のサイリスタ素子が内蔵され、かつ接続リードを備えているので、実装及び保守、点検が容易である。

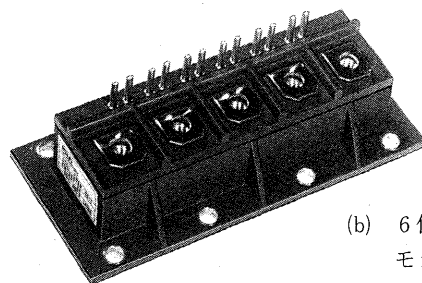


第1図 サイリスタを用いた三相整流回路

Fig. 1. Three-phase rectification circuit with thyristors



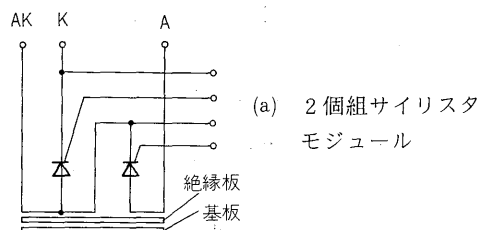
(a) 2個組サイリスタモジュール



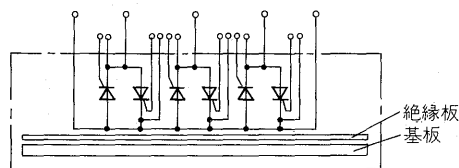
(b) 6個組サイリスタモジュール

第2図 サイリスタモジュールの外観図

Fig. 2. Exterior view of thyristor module



(a) 2個組サイリスタモジュール



(b) 6個組サイリスタモジュール

第3図 サイリスタモジュールの構成

Fig. 3. Structure of thyristor module

* 富士通ファナック(株)自動化研究所 ** 富士エレクトロニックコンポーネンツ(株)業務本部 *** 松本工場 第二製造部
**** 松本工場 品質保証部

(3) モールド形ではあるが、ガラスパッシベーションチップと低吸水性樹脂の採用により、耐湿性に優れている。

第 2 図に各種サイリスタモジュールの外観を示す。第 3 図は 2 個組及び 6 個組サイリスタモジュールの構成を示す。

III. サイリスタモジュールの製造技術

複合素子の開発にあたっては、低コスト、小形化、端子間の絶縁、素子と取付基板の絶縁、低熱抵抗などの要求を満たす必要がある。これらをすべて満足するためには、樹脂ケース、樹脂モールド構造が最適である。この構造の採用にあたっての主要検討点について述べる。

1. ガラスパッシベーションチップの採用

半導体素子の信頼性を左右する要因の中で重要なものの一つとして、表面安定化技術があげられる。これは半導体の表面が外部雰囲気に対して敏感であり、イオンの吸着や化学反応によって半導体表面が変化し、素子の劣化が起こるからである。表面不活性化技術は現在も改良検討が進められているが、今回のサイリスタモジュールでは、チップを樹脂モールドする点を考慮して、ガラスパッシベーションチップを採用した。この理由はガラスが安定な無機質膜であり、樹脂の影響を受けにくいこと、ガラスの耐熱性が高く高温はんだ付け作業に耐え得ることなどによる。

2. 組立構造

複合素子において、内蔵された素子間の絶縁及び配線方法は、その製品のコスト及び信頼性に大いに関係してくる。サイリスタモジュールでは、アノード、カソード、ゲート端子をすべて同一方向にそろえた単体サイリスタチップを用い、モジュール基板にセラミック板を介してサイリスタチップをはんだ付けし、各素子間の良好な絶縁を図った。各素子間の配線及び主端子の引出しは、一連の端子フレームにより結線をしているため、はんだ付け箇所が少なく、高信頼度を確保している。

3. 注形樹脂の検討

注形樹脂としては、電気的絶縁性、接着性、耐環境性などでバランスのとれているエポキシ樹脂について検討を進めた。樹脂の選定にあたっては、樹脂と硬化剤の熱膨張係数及び樹脂の硬化時の体積収縮により、応力がチップに加わる可能性があるため、この応力をできるだけ小さくする必要がある。このため、樹脂の膨張係数を小さくする目的で、樹脂の低粘度化と充てん剤の大量添加を行っている。

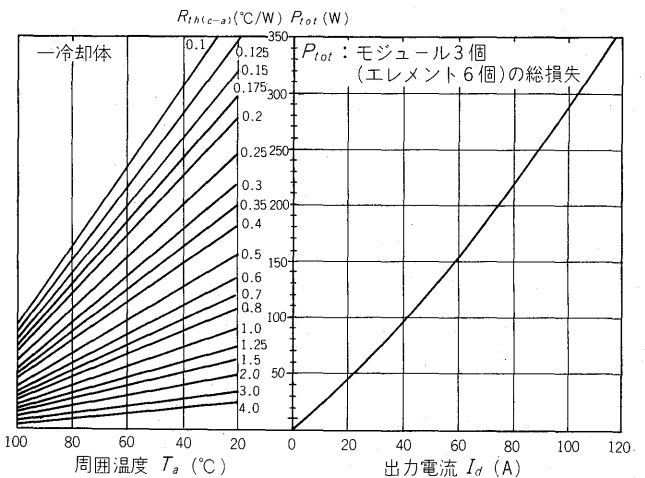
硬化条件については、硬化温度が高いほど膨張係数に対しては良好となるが、チップへの影響が大きくなるため、低温硬化に続き高温硬化を行う方法を採用した。

IV. サイリスタモジュールの定格特性

第 1 表に 2 個組サイリスタモジュールの系列を示す。この表でわかるように、交流 100 V ラインから 400 V ラインに適用できるサイリスタモジュールが電流容量 75 A まで用意されている。これらのモジュールの代表的な定格特性を第 2 表に示す。6 個組サイリスタモジュールについては、第 2 表の定格特性表に示すように、耐圧 400 V で交流入力電圧 100 V に適用できる電流容量 60 A 及び 120 A の系列がある。これらのサイリスタモジュールは、単体サイリスタと同様に許容電流は冷却体の大きさに依存する。第 4 図はこの関係について代表機種である EMGG 07 について示したものである。

第 1 表 2 個組サイリスタモジュールの系列
Table 1. Series of 2 elements type thyristor modules

電流 (A)	耐圧 (V)	~800 V	~1,600 V
20		EMGE 07-08	—
35		EMGG 07-08	—
45		Thy F 75A-53	Thy F 75A-110
60		Thy G 75A-53	Thy G 75A-110
75		Thy H 75A-53	Thy H 75A-110



第 4 図 三相ブリッジ回路での平均オン損失
Fig. 4. Average on-state loss at three-phase bridge circuit

V. サイリスタモジュールの適用

サイリスタモジュールには前に述べたような特徴があるが、実際の適用にあたって冷却構造、実装、接続、保守性などについて従来のスタッド形サイリスタを使用した場合と比較して極めて優れている。

1. 冷却

1 個のサイリスタモジュールは、2 個あるいは 6 個のサイリスタチップを内蔵しているが、三相純ブリッジ回路を 2 回路構成する場合は、6 個または 2 個のモジュール

第2表 サイリスタモジュールの定格と特性

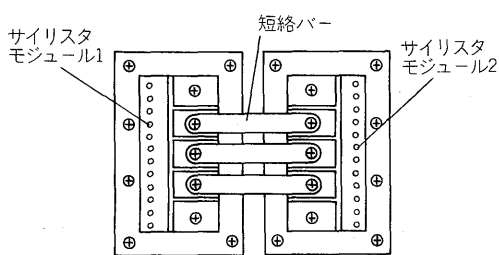
Table 2. Ratings and characteristics of thyristor modules

最大定格

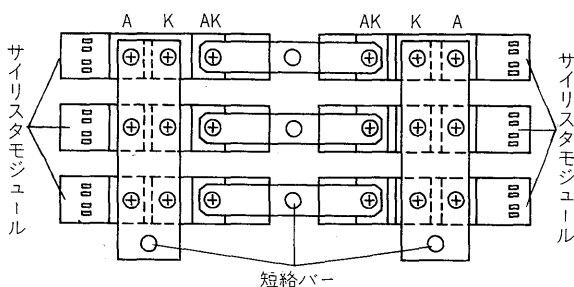
項目	記号	条件	EMGE 07-08	EMGG 07-08	Thy F 75A 110-V	Thy G 75A 110-V	Thy H 75A 110-V	EMTF 07-04	EMTG 07-04	単位
電圧	ピーク繰返し逆電圧 V_{RRM}		800		1,650			—		V
電圧	ピーク繰返しオフ電圧 V_{DRM}		800		1,650			400		V
電流	平均オン電流 $I_{T(AV)}$	正弦波 180° 導通 (EMT□07は方形波 120° 導通)	$2 \times 20 \left(\frac{T_C=}{68^\circ\text{C}} \right)$	$2 \times 35 \left(\frac{T_C=}{77^\circ\text{C}} \right)$	$2 \times 48 \left(\frac{T_C=}{75^\circ\text{C}} \right)$	$2 \times 65 \left(\frac{T_C=}{57^\circ\text{C}} \right)$	$2 \times 75 \left(\frac{T_C=}{69^\circ\text{C}} \right)$	$3 \times 20 \left(\frac{T_C=}{75^\circ\text{C}} \right)$	$3 \times 40 \left(\frac{T_C=}{75^\circ\text{C}} \right)$	A
電流	サージオン電流 I_{TSM}	50 Hz 正弦半波 1 サイクル 定格負荷状態から	300	600	650	825	1,380	450	1,000	A
電流	I^2t	定格負荷状態から	400	1,600	1,000	1,650	4,650	1,375	4,000	A ² s
電流	臨界オン電流上昇率 di/dt	$T_j = 125^\circ\text{C}$	100	100	100	100	100	100	100	A/ μs
ゲート	ピークゲート順電流 I_{FGM}	$t_{GV} \leq 100 \mu\text{s}$	2	3	10	10	10	2	2	A
ゲート	ピークゲート電力損失 P_{GM}	$t_{GV} \leq 100 \mu\text{s}$	5	5				5	10	W
ゲート	平均ゲート電力損失 $P_{G(AV)}$		0.5	0.75	20	20	20	0.5	1	W
ゲート	ピークゲート逆電圧 V_{RGM}		2	2	10	10	10	5	5	V
温度	接合温度 T_j		-40 ~ +125		-40 ~ +125			-40 ~ +125		°C
温度	保存温度 T_{stg}		-40 ~ +125		-40 ~ +150			-40 ~ +125		°C
重量	締付トルク		25		40			25		kg·cm
絶縁	絶縁耐圧		AC 1,500 V 1 分間			AC 2,500 V			AC 1,500 V 1 分間	

特性 (1 素子当たり)

項目	記号	条件	EMGE 07	EMGG 07	Thy F 75A	Thy G 75A	Thy H 75A	EMTF 07	EMTG 07	単位
オン電圧	V_{TM}	$T_j = 25^\circ\text{C}$	最大値 $1.55 \left(\frac{I_T=}{60 \text{ A}} \right)$	最大値 $1.55 \left(\frac{I_T=}{120 \text{ A}} \right)$	最大値 $1.75 \left(\frac{I_T=}{120 \text{ A}} \right)$	最大値 $1.75 \left(\frac{I_T=}{165 \text{ A}} \right)$	最大値 $1.45 \left(\frac{I_T=}{150 \text{ A}} \right)$	最大値 $1.55 \left(\frac{I_T=}{100 \text{ A}} \right)$	最大値 $1.55 \left(\frac{I_T=}{120 \text{ A}} \right)$	V
逆電流	I_{RRM}	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $V_R = V_{RRM}$	最大値 3	最大値 4	最大値 15	最大値 15	最大値 15	—	—	mA
オフ電流	I_{DRM}	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $V_D = V_{DRM}$	最大値 3	最大値 4	最大値 15	最大値 15	最大値 15	7	10	mA
保持電流	I_H	$T_j = 25^\circ\text{C}$	最大値 100	最大値 120	最大値 250	最大値 250	最大値 250	65	65	mA
ゲートトリガ電流	I_{GT}	$T_j = 25^\circ\text{C}$	最大値 30	最大値 40	最大値 200	最大値 200	最大値 200	30	40	mA
ゲートトリガ電圧	V_{GT}	$T_j = 25^\circ\text{C}$	最大値 2.5	最大値 2.5	最大値 1.5	最大値 1.5	最大値 1.5	2.5	2.5	V
ゲート非トリガ電流	I_{GD}	$T_j = 125^\circ\text{C}$	最小値			6		4	5	mA
ゲート非トリガ電圧	V_{GD}	$T_j = 125^\circ\text{C}$	最小値	0.2		0.25		0.3	0.3	V
臨界オフ電圧上昇率	dv/dt	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $V_D = 2/3 V_{DRM}$	最小値 100			500		100		V/ μs
ターンオン時間	t_{gt}	$T_j = 25^\circ\text{C}$	標準値 3	標準値 3	標準値 3	標準値 3	標準値 3	標準値 3	標準値 3	μs
ターンオフ時間	t_q	$T_j = 125^\circ\text{C}$	標準値 100	標準値 100	標準値 150	標準値 150	標準値 150	標準値 100	標準値 100	μs
熱抵抗(接合-ケース)	$R_{th(j-c)}$	(1 モジュール当たり)	最大値 0.9	最大値 0.45	最大値 0.3	最大値 0.3	最大値 0.25	最大値 0.64	最大値 0.28	°C/W
接触熱抵抗	$R_{th(c-d)}$	コンパウンド塗布	最大値 0.1	最大値 0.1	最大値 0.08	最大値 0.08	最大値 0.08	最大値 0.05	最大値 0.05	°C/W



(a) 6 個組モジュール



(b) 2 個組モジュール

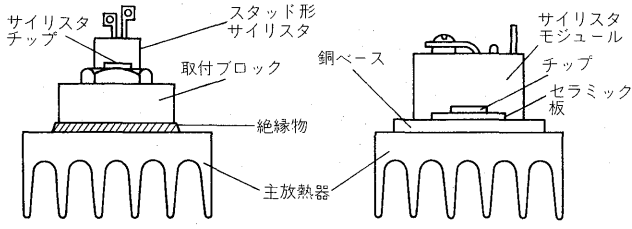
第5図 サイリスタモジュールの配置と接続

Fig. 5. Arrangement and connection of thyristor modules

ルを第5図のように結線する。

このサイリスタモジュールでは、第1図のような三相ブリッジを構成した場合、常にそれぞれのモジュールに平均に発熱量を分担させ、サイリスタチップの温度上昇が最小となるよう配慮してある。このことにより、実稼働中のサイリスタの接合部温度上昇は、従来の個別サイリスタを使用した場合に比べても、同等以下の放熱器により十分小さく抑えることが可能となっている。

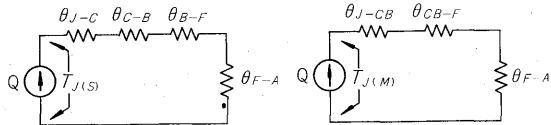
第6図は、従来のスタッド形サイリスタとサイリスタモジュールのそれぞれについての冷却構造例を示したものであり、第7図はその熱等価回路を示したものである。ここで、サイリスタモジュール内部のセラミックによる絶縁部分の熱抵抗 θ_{J-CB} と、スタッド形サイリスタの絶縁部の熱抵抗 θ_{B-F} と接合部-ケース間熱抵抗 θ_{J-C} の和 ($\theta_{B-F} + \theta_{J-C}$) がほぼ等しいとみなすと、接触面積の比較から容易にわかるように、 θ_{CB-F} は θ_{C-B} より小さいので、サイリスタモジュールの方が接合部温度上昇値 T_j が小さくなる。



(a) スタッドマウント形サイリスタの場合 (b) サイリスタモジュールの場合

第 6 図 サイリスタの冷却構造

Fig. 6. Cooling system for thyristors



Q: サイリスタ発熱
 θ_{J-C} : 接合部 - ケース間熱抵抗
 θ_{C-B} : ケース - 取付ブロック間熱抵抗
 θ_{B-F} : 取付ブロック - 主放熱器間熱抵抗
 θ_{F-A} : 主放熱器 - 外気間熱抵抗

(a) スタッドマウント形サイリスタの放熱等価回路

Q: サイリスタ発熱
 θ_{J-CB} : 接合部 - 銅ベース間熱抵抗
 θ_{CB-F} : 銅ベース - 主放熱器間熱抵抗
 (動作中のサイリスタ 1 個当たり)
 θ_{F-A} : 主放熱器 - 外気間熱抵抗

(b) サイリスタモジュールの放熱第個回路

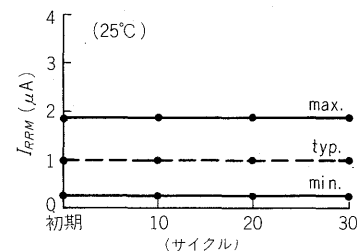
第 7 図 熱的等価回路

Fig. 7. Thermo-equivalent circuit

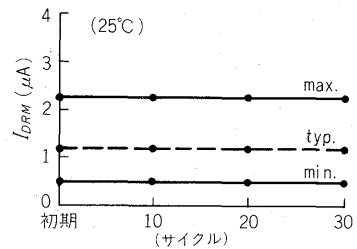
2. 取付及び接続

サイリスタモジュールの取付方法は、M5 ねじにより冷却体へ直接取り付けますが、これを従来のスタッド形サイリスタの場合と比較すると次のような利点がある。

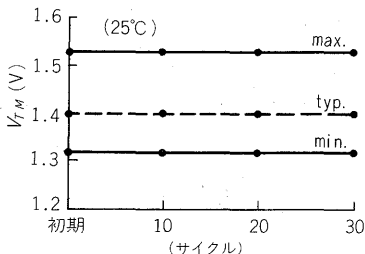
- (1) スタッド形サイリスタの場合、実装に際し素子ごとに電気的絶縁を行う必要があり、構造上煩雑である。しかし、サイリスタモジュールでは内部絶縁されているため、取付時に絶縁を考慮する必要がなく、極めて簡潔な実装が可能である。
- (2) スタッド形サイリスタの場合、取付時の締付トルクが大きすぎるとサイリスタチップに直接ストレスがかかり、サイリスタ故障の原因となることがあるため、締付トルクの厳密な管理が必要となる。しかし、サイリスタモジュールの場合、取付ねじの締め過ぎが直接チップへのストレスとはならない。
- (3) スタッド形サイリスタの場合取付後のカソード端子、ゲート端子の向きが一般には一定ではないため、配線接続時の作業性が悪くなり、また接続線による引張力が端子に好ましくない応力となることがある。しかし、サイリスタモジュールでは取付後の端子の位置が一定となるため接続線長が管理可能であり、接続作業性も良好である。
- (4) スタッド形サイリスタの取付穴加工では、不完全な



(a) 逆電流の変化

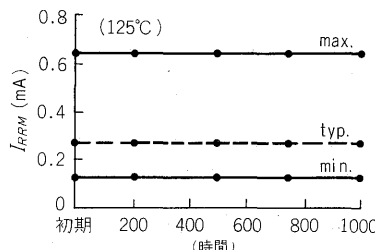


(b) オフ電流の変化

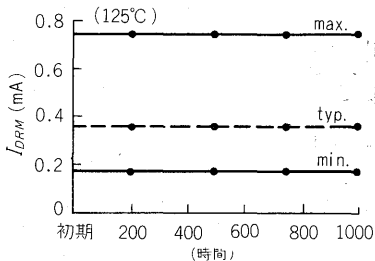


(c) オン電圧の変化

第 8 図 温度サイクル試験結果
 Fig. 8. Results of temperature cycling test

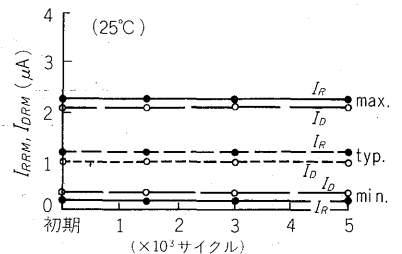


(a) 逆電流の変化

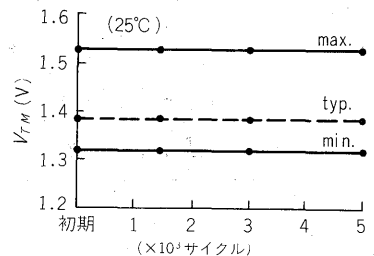


(b) オフ電流の変化

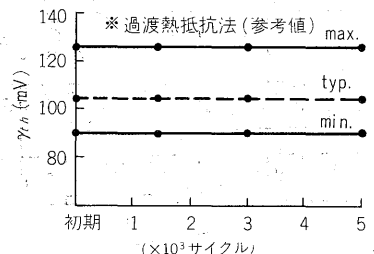
第 9 図 高温電圧印加試験結果
 Fig. 9. Results of AC blocking test at high temperature



(a) オフ電流・逆電流の変化



(b) オン電圧の変化



(c) 熱抵抗 * の変化

第 10 図 断続通電試験結果
 Fig. 10. Results of intermittent load test

じ部のにげのため一定深さの「ざぐり」が必要である。しかし、サイリスタモジュールの場合は通常のねじ穴でよい。

以上述べてきたように、サイリスタモジュールを用いて、三相純ブリッジ回路を構成する接続は極めて容易で、第5図に示すよう交流端子をそれぞれ短絡バーにて接続すればよい。また信号用カソード端子が主回路のカソード端子とは別に設けられているため、あらかじめゲート信号線を接続し、その他端にゲート回路へ接続するコネクタを取り付けておくことにより、組立時や保守交換時にはんだ付け作業なしで取付、交換を行うことも可能である。

VI. サイリスタモジュールの信頼性

信頼性については、2個あるいは6個のサイリスタチップが同一パッケージ内に納められているため、一つのチップの故障は2倍ないし6倍の故障率として評価される。したがって、従来以上の工程管理と慎重な信頼性評価が要求される。富士電機では下記のような各種信頼性試験を重ね、高信頼性を有するサイリスタモジュールを開発した。

信頼性試験項目

- (1) 温度サイクル試験：-40℃～25℃～125℃
- (2) 高温電圧印加試験：125℃ V_{DRM}
- (3) 断続通電試験： $\Delta T_C \geq 60$ deg
- (4) 高温高湿放置試験：80℃，95% RH
- (5) 低温放置試験：-40℃
- (6) プレッシュクッカ試験：121℃ 2気圧
- (7) その他

以上の試験項目のうち代表的試験である(1)～(3)項についてEMGG 07の試験結果を第8～10図に示す。

VII. あとがき

サイリスタモジュールの構造、応用及び信頼性について解説したが、ここで述べたように従来の単体素子に比較し、使いやすさが格段に向上したこのモジュール構造は、今後ますます単体素子にとってかわる勢いにあり、市場ニーズも混合モジュール化、高速化、大電流化などと多様化してきている。

富士電機としては今後ともこのような市場ニーズにこたえ、積極的に対応してゆく所存であり、各位の御指導、御鞭撻をお願いしたい。

最後にサイリスタモジュールの開発に当たり、適切な御指導と御助言を賜った関係各位に深謝する次第である。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。