

高耐圧大電流半導体素子とその応用

High Voltage Large Current Power Semiconductor Devices and Their Applications

直径60mmのシリコン単結晶を使用した超大形の電力用半導体素子(サイリスタ : 4,000V 800A 及び2,500V 1,000A, 整流素子: 2,500V 1,600A)の定格仕様並びに諸特性を紹介し, その応用例として電力系統における高圧直流送電用変換器, サイリスタ力率調整装置について論ずるとともに, 一般産業応用では圧延機駆動静止レオナード装置用サイリスタ変換器, 及び電気化学用直流電源の進歩とサイリスタモータについて述べる。更に交流車両への応用にあつては新たに開発した沸騰冷却方式とサイリスタの直接並列接続技術について論じ, これら新技術の組合せにより生まれた小形軽量化した電船用サイリスタ変換装置について紹介する。

和島幸一* *Kōichi Wajima*
 鈴木 豊* *Yutaka Suzuki*
 堀 孝正** *Takamasa Hori*
 山口晃一*** *Kōichi Yamaguchi*

1 緒 言

サイリスタや整流素子などの電力用シリコン半導体素子の応用は, 従来, 電鉄用直流変電所, 電気化学用直流電源, 圧延プラントモータ駆動用変換器, 電子計算機用安定化電源などに応用されてきたが, 近年更に高速鉄道車両や直流送電機器など電力系統にも応用され多岐にわたっている。現在, 日立製作所ではシステムの信頼性向上と経済性追求の見地より, 半導体素子の大容量化が進められ, 世界に先がけて直径60mm(以下60φという)級シリコン単結晶を用いた4,000V 800Aサイリスタ, 2,500V 1,600A整流素子などの大容量素子を開発し量産中である。本論文では, これら高耐圧・大容量素子とその応用技術を中心に, パワーエレクトロニクスの現状について述べる。

2 高耐圧大容量半導体素子

2.1 高耐圧大電流サイリスタ

1960年代のはじめ400V 50A級サイリスタを開発して以来, 1967年には40φ級のシリコン単結晶を使用して2,500V 400Aサイリスタの大量生産を開始した。このサイリスタを用いて鉄鋼圧延プラント用750V直流モータを直列枚数1個で駆動する新方式を確立したが, これがサイリスタの一般産業応用面での新しい時代の幕明けとなった。1972年には直流送電や高速鉄道電気車両用として, 更に大容量の電力用半導体素子を完成した。

こうしたサイリスタの高耐圧化と大電流化を同時に求めるとき, 半導体接合設計パラメータの点で多くの困難があるが, その解決法として大口径単結晶接合をとるのが唯一の方法と考えられる。図1は接合径とサイリスタの耐圧・電流容量を試算したものである。傾向的には, 指数 $P = \text{耐圧} \times \text{サージ電流} \times 10^{-6}$ とすると接合径40φ, 50φ, 60φでは, それぞれの指数 P は20, 30, 60の値となり, 単結晶口径を増大することにより高耐圧・大電流化へサイリスタの性能を拡張できることが知れるが, 実際には次の技術的制約が加わる。

- (a) 材料, プロセス技術
- (b) 動的性能……特に高耐圧化に伴う問題

材料については, 特にシリコン単結晶の均一性(欠陥・比抵抗)が最も重要な要素である。欠陥^(*)については, 我が国の単結晶メーカーを中心にディスロケーションフリー^(**)(無転位)大口径単結晶の製作技術が開発され, 現在60φ接合径が最

大である。

プロセス技術においては, プロセス中で欠陥を発生させない無欠陥プロセスの確立が必要である。

高耐圧化は, 必然的にシリコン単結晶の比抵抗^(*)と接合層の厚さを増大させる。これはサイリスタの動特性ターンオンタイム, ターンオフタイムに特に影響を及ぼし, 実際の応用上問題となる。ターンオンタイムについては, 耐圧2,500~4,000Vまではゲート構造のくふうなどで3~6μsの間ではほぼ同一に保持できる。ターンオンタイムについては, サイリスタ応用機器のシステムにより要求される水準は異なるが, 高耐圧サイリスタの主用途を直流送電変換器用に想定すると, システムの性能・経済性よりその限度が設定できる。この点より, 現在最大の単結晶接合径60φの条件ではサイリスタの耐圧4,000V程度が最も効果的な設定と考えられる。更に重要な動特性としてターンオンタイム期間が経過した後, 電流が接合全面に広がる過渡的な時間がある。この電流広がりには電流密度に比例し, 且つ接合層の厚さに逆比例するため,

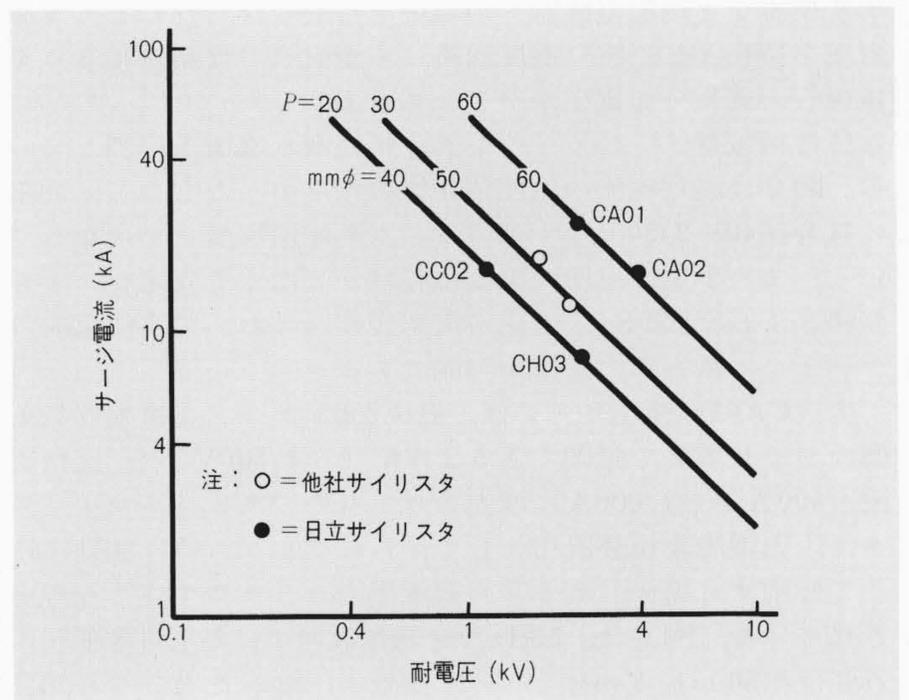


図1 サイリスタの容量 日立40φ接合のCC02(1,200V 800A), CH03(2,500V 400A)サイリスタと国外他社の開発品(50φ)の点を比較点として記入した。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 工学博士 *** 日立製作所機電第一事業本部

表1 大容量サイリスタ・ダイオード定格表 (CA01, CA02形サイリスタ, A01形ダイオード) 60φ級シリコン単結晶を使用した, 世界最大級の量産形サイリスタ及び整流素子である。

電力用半導体の種類	単位	サイリスタ		整流素子
形式		CA01	CA02	A01
定格せん頭逆耐圧	V(peak)	2,500	4,000	2,500
定格せん頭非繰返し過渡逆耐圧	V(peak)	2,750	4,000	2,750
定格せん頭順阻止電圧	V(peak)	2,500	4,000	—
定格平均順電流	A(ave)	1,000	800	1,600
定格瞬時過電流	A(peak)	23,000	16,000	35,000
最大順電圧上昇率	V/μs	200	2,000	—
最大順電流上昇率	A/μs	100	150	—
定格せん頭ゲート電圧 (順方向or逆方向)	V(peak)	20/5	20/5	—
定格せん頭ゲート電流	A(peak)	4	4	—
定格ゲート入力 (せん頭/平均)	W	20/4	20/4	—
動作接合温度	°C	-40~125	-10~125	-40~150
最大順電圧降下	V(peak)	2.0 (<i>i_f</i> =3,200A)	2.5 (<i>i_f</i> =2,500A)	1.5 (<i>i_f</i> =5,000A)
最小ゲートトリガ電圧	V(DC)	3.0	3.0	—
最小ゲートトリガ電流	mA	350	350	—
最大ゲート非トリガ電圧	V(DC)	0.1 (<i>V_f</i> =1,250V)	0.1 (<i>V_f</i> =2,000V)	—
最大ゲート非トリガ電流	mA(DC)	1.5 (<i>V_f</i> =1,250V)	1.5 (<i>V_f</i> =2,000V)	—
ターンオンタイム	μs	9	9	—
熱抵抗	(°C/W)	0.025	0.025	0.025

高耐圧接合では一般に広がり低下する。広がりが悪くなると低電流におけるサイリスタの特性の安定度が低下し、特に並列運転の場合の電流不平衡の原因となり支障をきたす。この点でもサイリスタの耐圧は、サイリスタ応用システムと協調をとり設定されなければならない。

日立製作所では、大電力用サイリスタとして60φ接合を採用した4,000V 800A CA02形高耐圧サイリスタ及び2,500V 1,000A CA01形大電流サイリスタを開発し実用化した。表1にその特性定格を示す。CA02形サイリスタは、直流送電用変換器など送配電機器への応用を目的に作られたもので高耐圧を特長とし、特に高圧回路に多重直列で使用される点を重視し、直列分担電圧がバランスするようターンオンタイム、残留蓄積電荷(*4)のマッチング、特に漏れ電流を抑制している。図2は漏れ電流の温度依存性の例を示したもので、従来の接合径40φ 2,500Vサイリスタの水準と同程度までになっている。この事実は耐圧の温度依存性が高温まで安定なことを意味しており(図3)、直流送電用変換器において事故電流のゲートシャ断方式の採用が可能である。

次にCA01形サイリスタは、直流750Vモータを直列枚数1個のサイリスタで制御できるよう耐圧を2,500Vとし、定格電流を400Aから1,000Aに増大させたものである。本サイリスタは、大電流変換装置用として作られており、特に並列接続して使用する場合、素子間の電流平衡がとりやすいよう考慮されている。例えば、50Hzの運転周波数で、2並列素子間の点弧位相50μs程度の差でゲート信号を印加した場合でも、0.5サイクルで十分追従し所定の電流平衡率を保持できる試験結果を得ている。

動特性の代表例として、ターンオフタイムの温度依存性を図4に示す。従来の2,500V 400A(40φ)級サイリスタに比べ約40%程度に低減されている。最近、このような大容量順

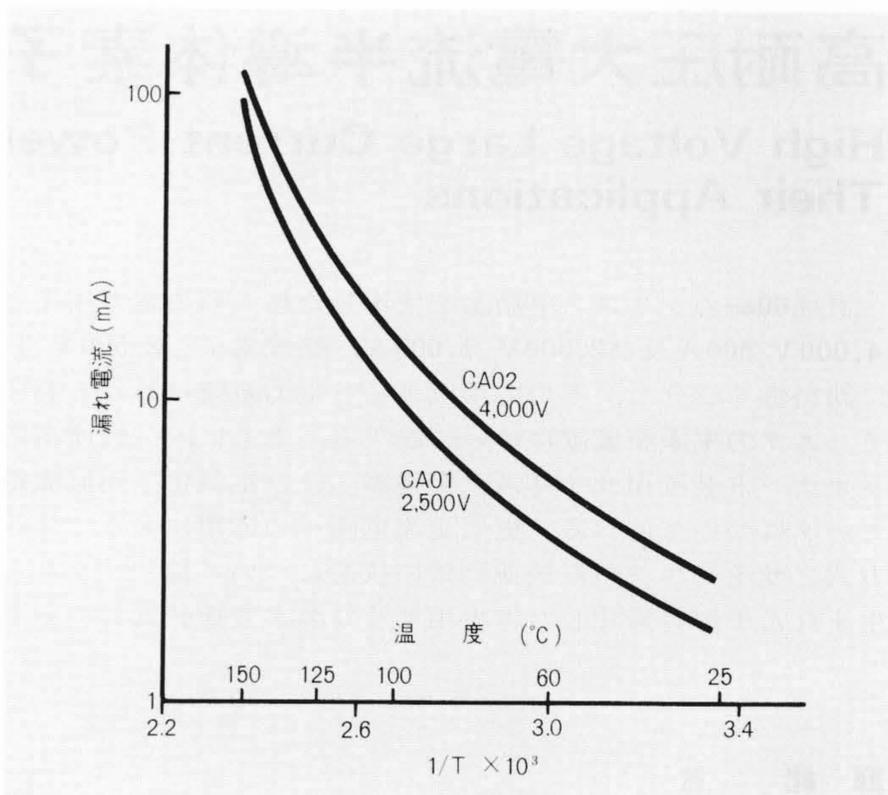


図2 大容量サイリスタの漏れ電流-温度特性 150°CではCA01, CA02とも100~120mA程度になる。耐圧はまだ保持できている。

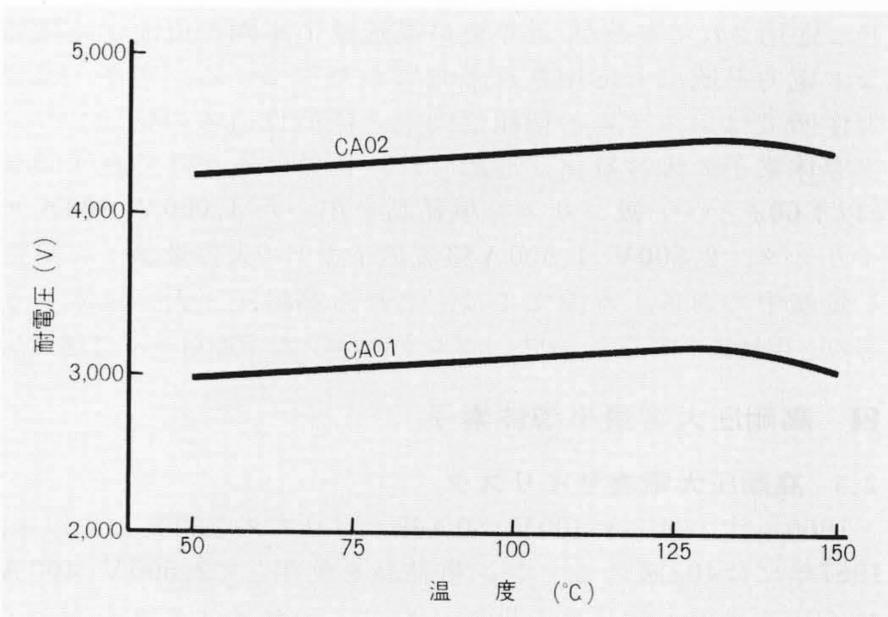


図3 大容量サイリスタの耐電圧-温度特性 CA01, CA02とも同一傾向の温度依存性を示す。(T_f=150°Cで漏れ電流100~120mA程度)

変換器においても効率面よりターンオフタイムが抑制される方向にあり、高耐圧・大電流サイリスタといえどもターンオフタイムの低減が強く望まれている。図5にCA01形サイリスタの外観(CA02形サイリスタも同一)を示す。

2.2 大電流整流素子

表1に大電流シリコン整流素子として2,500V 1,600A A01形ダイオードの定格特性を示す。これはトラクションモータ電源などの順変換用に設計されたもので、耐圧は2,500Vとし電流容量の増大を意図したものである。接合口径は、前記サイリスタと同じく60φ接合を採用し、外観寸法やハウジングまわりは、CA01形同02形サイリスタと同様である。

- (*1) 結晶を構成する原子配列の周期性の乱れを欠陥といい結晶の性質に大きな影響を与える。点、線、面の3種の欠陥がある。
- (*2) 無転位とは、結晶中の境界として現われる線欠陥の数の少ないことをいう。
- (*3) 結晶中の電流の流れやすさを示す定数であり、結晶中の不純物の量により支配される。
- (*4) 結晶中のP-N接合などから注入された過剰少数キャリアのこと。

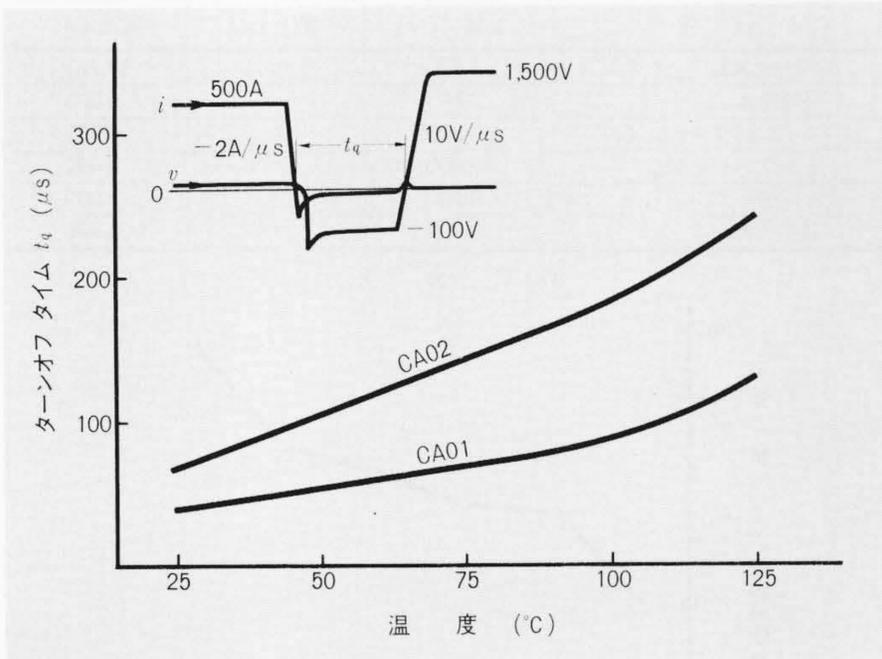


図4 大容量サイリスタのターンオフタイム-温度依存性
温度依存の傾向はCA02, CA01とも同じであるが、CA01は耐圧設定が小さいので t_q の値は小さい。



図5 CA01形サイリスタ 高耐圧サイリスタCA02も同じパッケージである。

3 電力系統への応用

3.1 高圧直流送電(HVDC)用変換器

1954年に、高圧直流送電が水銀整流器を用いて実用化されてから既に20余年経過した。その間に高圧水銀整流器は幾多の改良を加えながら、交・直両用変換器として使用されてきたものの1970年以後は、急激にサイリスタ変換器が実用化され始めた。これはサイリスタ変換器が水銀整流器に比較し、

- (1) 逆弧現象のような確率的に生ずる不都合な動作がない。
- (2) 冷却系の温度調整精度が比較的ラフでよい。
- (3) モジュール構成として、それらを組合せることにより任意の電圧・電流量の変換器を容易に製作できる。
- (4) 厳密な空調を施した建屋は不用で、屋外型も可能。

といった優れた特長を有するからである。このサイリスタ変換器は、サイリスタ単体容量が4,000V 800A, 2,500V 1,000A

(*5) サイリスタをオンさせたとき、ゲートトリガパルスの立上り10%の時点からサイリスタの陽極-陰極間電圧が、ターンオン前の90%に達するまでの時間をいう。

(*6) サイリスタの点弧初期において、一時的に順電圧降下が増大する。このピーク電圧をいう。

(*7) 高圧直流送電用変換器において、多数のサイリスタを直・並列に組み合わせ、あたかも1個の巨大サイリスタのように動作するようまとめた変換器エレメントをいう。

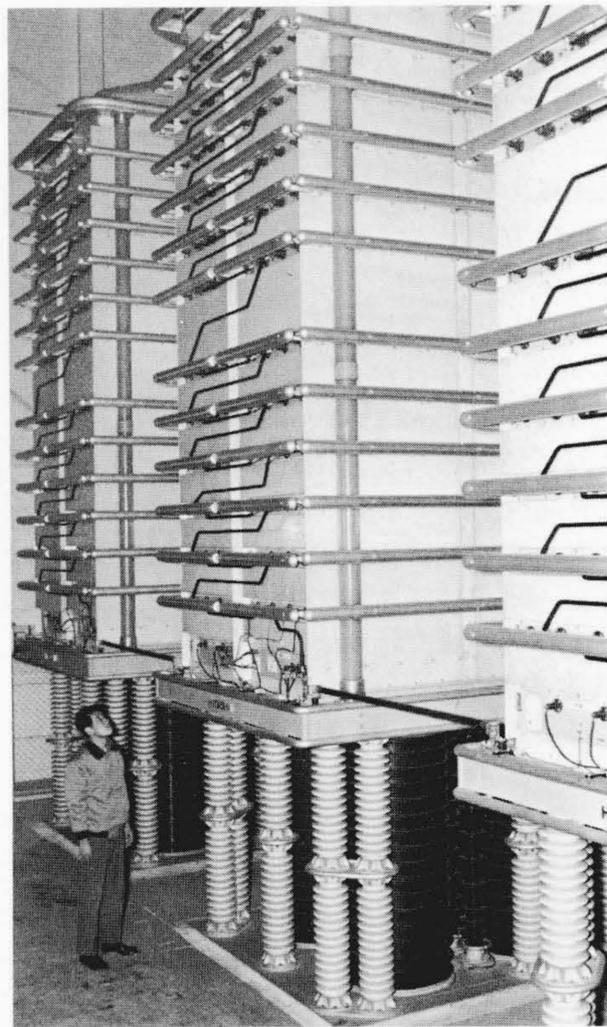


図6 風冷型サイリスタバルブ(125kV 300A)
2.5kV 400Aのサイリスタを直列数192, 並列数1を用いて、1変換アームを構成している。冷却は循環風冷式である。

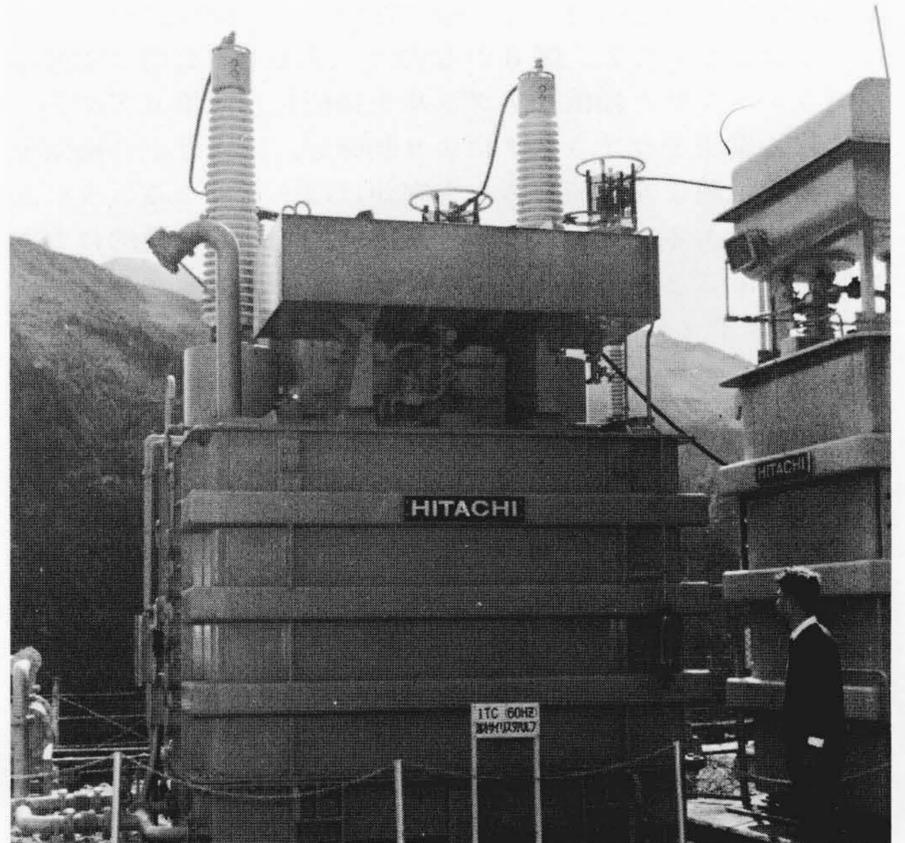


図7 油浸型サイリスタバルブ(125kV 1,200A) 4kV 800Aのサイリスタを直列数120, 並列数1を用いて、1変換アームを構成している。

といったものが多数直並列接続されて、あたかも、1個のサイリスタのように動作させる必要があるため、個々のサイリスタの特性とそのばらつき及び回路構成、回路定数を的確に選び、両者の協調をとって構成する。直列接続されるサイリスタは、特にターンオン特性、ターンオフ特性が重要で中でもディレイタイム(*5)、残留キャリアのばらつきが重視される。並列接続されるサイリスタは、ターンオン時の導通面積の広がりを表わす尺度となるフィンガー電圧(*6)や、オン状態電圧の協調が重視される。これらの諸特性は、サイリスタの電圧、電流、ゲート構造及び製造プロセスによって大幅に変わるので、最も経済的なサイリスタバルブ(*7)が製作でき

るように、サイリスタを選定する必要がある。

また、これら多数のサイリスタを同時に点弧させるゲート点弧回路は最も重要で、変換器コストのかなりの割合を占める。

変換器の形態としてはその絶縁方式により、

- (a) 屋内型、空気絶縁方式
- (b) 屋外型、油浸絶縁方式
- (c) 屋外型、ガス絶縁方式

などがあり、ゲート点弧方式、冷却方式も組み合わせると、更に細かく分類できる。

日立製作所においては、上記(a)、(b)の両変換器とも開発済みであり、これらについて電力会社、関連研究所など8社の協同研究体により電源開発株式会社佐久間サイリスタ変換装置試験所において、実系統における信頼度実施試験が行われ、好結果を得ている。図6は風冷型のサイリスタ変換器を、図7は、油浸型のそのの外観を示す。

3.2 サイリスタ力率調整装置

サイリスタ力率調整装置は、電力系統において定電力負荷の増大による力率悪化の防止、あるいはアーク炉のような急激な負荷変動に伴うフリッカの防止に使用される。図8において電圧降下 ΔV は、

$$\Delta V = I \cdot X_n (\sin \phi + R_n / X_n \cdot \cos \phi) \dots \dots \dots (1)$$

である。従って、負荷力率を良くするか、系統のリアクタンス X_n を小さくすれば電圧降下は少なくなる。またアーク炉のように負荷が急変し、負荷力率が大幅に変化する場合、その変化に応じて急速に力率を一定に保つように動作させればフリッカは少なくなる。図8の方式は、急変する負荷と並列に補償コンデンサと補償リアクトルを接続し、補償リアクトルに流れる電流をサイリスタにより制御し、見掛け上の補償率を変えて電源より負荷をみた力率がほぼ一定になるように制御する例である。本方式では、微細に、しかも連続的に力率を制御することができるので、従来の補償コンデンサをサイリスタスイッチによって、入、切する方式に比べると種々の利点を有している。

4 一般産業への応用

4.1 圧延機への応用

圧延機駆動静止レオナード装置用として、多数のサイリスタ変換器が使用されており、各種圧延機駆動用として製作されたサイリスタ変換器の代表例を図9に示す。

モータの電圧は容量に応じて一般に750V、440Vが採用されており、750Vモータ用としては2,500V定格、440Vモータ用としては1,400V定格のサイリスタを使用した変換器を標準

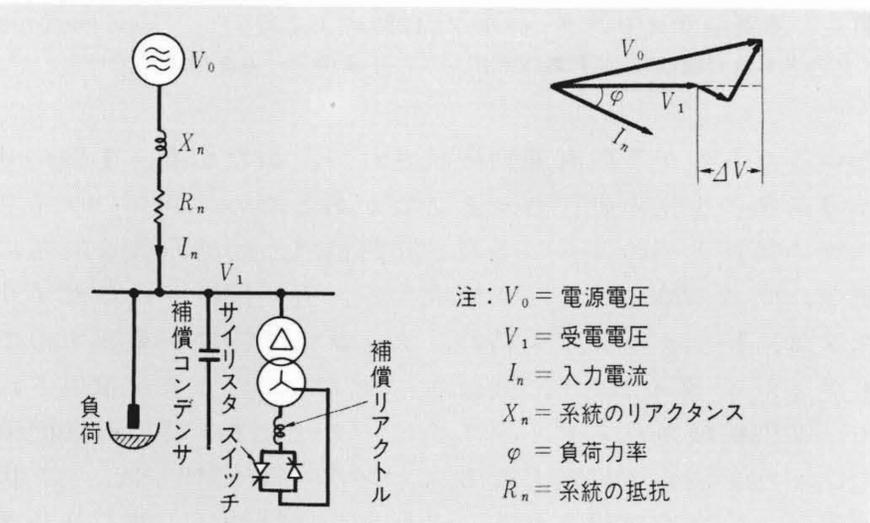
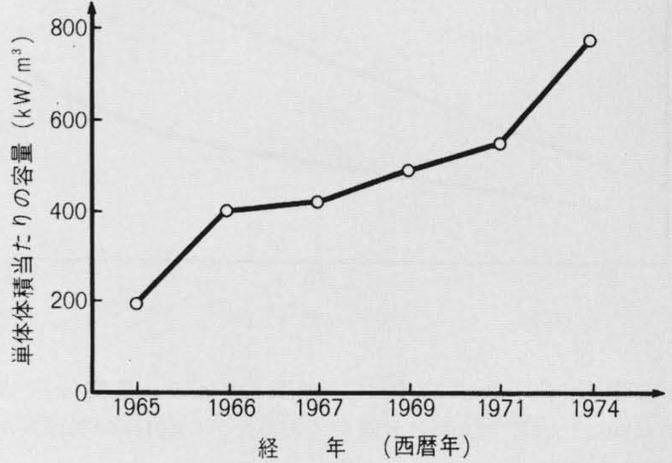


図8 電力系統の電圧降下 負荷力率の悪化と系統リアクタンスにより、受端の電圧変動が激しくなる。

用途	容量 (kW)	電圧 (V)	電流 (A)
ホット ストリップ ミル	8,800	750	11,733
分塊ミル	4,500	"	6,000
コールド タンデル ミル	5,800	"	7,733
センジマー ミル	3,000	"	4,000
ビレット ミル	4,500	"	6,000
線材ミル	1,330	"	1,773

(a) 代表例



(b) 寸法低減の推移(750V 直流電動機駆動用)

図9 圧延機用サイリスタ変換器の代表例と寸法低減の推移 サイリスタの大容量化と利用技術の進歩により、サイリスタ変換器の単位体積当たりの出力容量は10年間に4倍増している。

としている。サイリスタ素子の大容量化、及びその利用技術の進歩により静止レオナード装置用サイリスタ変換器の寸法は年々小形化されている。図9に寸法低減の推移を示す。

4.2 電気化学工業用直流電源への応用

電気化学工業では、大容量の直流電源を必要とし、1950年代後半より半導体を使用した直流電源が製作され、アルミニウム製錬、食塩電解、亜鉛、銅その他金属の電気精錬に数多く使用されている。最近の変換器は、整流器用変圧器と整流器部分が一体構造となったシリコフォーマ式(*8)が多く、据付面積の低減、変換効率の向上及び現地据付工事の簡易化に役立っている。シリコフォーマ式で単器容量100,000A以上の変換器が作られている。直流出力制御方式も、従来は、ダイオード整流器を負荷時電圧調整器及び可飽和リアクトルで制御する方式が主であったが、最近では制御性能、据付面積のうえで優れたサイリスタ制御方式が主流となりつつある。また、大電流整流器の局部過熱、素子電流不平衡の問題も特殊構造の採用により同時に解決されている。図10にアルミニウム製錬用サイリスタ式114.48MW 530V 216,000Aシリコフォーマ設備の一部を示す。

4.3 サイリスタ モータ

従来、可変速制御が要求される分野では主に直流機が使用されてきたが、整流子やブラシの保守点検が必要なことが欠点であった。このため、整流子とブラシのもつ機能をサイリスタスイッチで置き換えたサイリスタモータが開発され、保守低減による省力化が要請される分野で好んで使用されるようになった。一方、従来から交流機による一定速度運転が行なわれている分野においても、可変速運転による装置の性能・機能の向上、及び運転効率の向上を目的にサイリスタモータの採用が進められつつある。

(*8) 整流器用変圧器と整流器又はサイリスタキュービクルを機械的に一体構造にまとめたコンパクトタイプの変換器の日立製作所の商品名である。

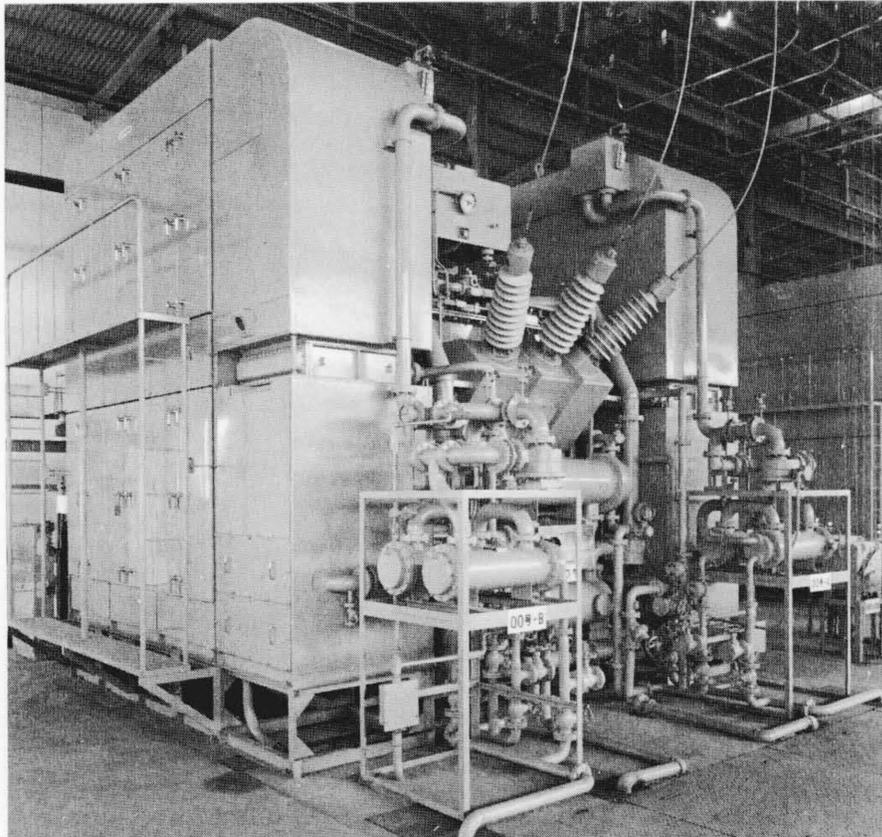


図10 アルミニウム製錬用114.48MW 216kAサイリスタ シリコフオーマ設備(28.62MW 530V 54kAユニット) サイリスタ応用の大規模アルミニウム製錬用電源として世界で初めて設置され、且つ最大の設備である。直流出力調整が従来の負荷時電圧調整器に替え、サイリスタのゲート制御(高速無接点電子制御)で行なわれるため、負荷製錬炉の非常時に対しても、有効である。

サイリスタ モータは、広義には「サイリスタと組み合わされた交流機」とみることができるが、ここでは狭義に、「サイリスタ周波数変換器から給電される交流機」とみればモータに流れる電流が方形波状となるように周波数変換器を制御する電流形と、正弦波状となるように制御する電圧形とに大別される。その特徴を表2に示す。電流形は周波数変換器内部に電流平滑リアクトル(DCL)をもつもので、モータ端子からみた電源側インピーダンスは高く、周波数変換器は電流源として動作する。一方、電圧形は、DCLをもたず電源側インピーダンスは低く、周波数変換器は電圧源として動作する。周波数変換器にはサイクロコンバータとインバータとがある。アシンクロ形サイリスタ モータとはサイクロコンバータによって誘導電動機を運転するものを意味し、シンクロ形サイリスタ モータとは、サイクロコンバータ、あるいはインバータによって同期機を運転するものを意味している。

電流形についてみれば、アシンクロ形ではモータの誘起起電力はサイリスタの転流を妨げるように作用するので、その電圧を上まわる電源電圧を加えて転流を行なう必要があり、電源力率は、モータ誘起起電力が転流を助けるシンクロ形の場合に比較して良くはならない。電圧形についてみれば、シンクロ形、アシンクロ形を問わず、転流は電源電圧によって行なわれるのであまり良くない。しかし、電源力率はコンデンサによって改善できるので実用上問題とはならない。転流を電源電圧で行なう場合、モータ周波数 f_M の実用上の上限は電源周波数 f より当然低くなるが、モータ電圧で行なう場合には $f_M > f$ も可能である。

周波数変換器を構成するサイリスタ素子として、一般産業分野で使用されるモータの定格周波数は、たかだか電源周波数程度で十分なので一般のサイリスタ素子が用いられるが、高速運転が必要な場合、あるいは電源周波数が高い場合などには特に、ターンオフ時間の短いサイリスタ素子を用いたほうが転流余裕時間が短くて済み、その分だけモータ力率、電源力率を改善でき可変速装置として小形化できる。

表2 サイリスタ モータの電流波形からみた特徴 サイリスタモータに流れる電流波形によって、特性、適用が異なることを示す。

項目	制御形式	電 流 形		電 圧 形	
	サイリスタモータ	アシンクロ	シンクロ	アシンクロ	シンクロ
モータ電流		[方形波状] (方形波状)		[正弦波状] (正弦波状)	
モータ周波数の実用上の上限 f_M/f f_M :モータ周波数 f :電源周波数		< 1/2 ~ 1/3	< 3~4 (電氣的制限なし)	< 1/2 ~ 1/3	
トルクの脈動		6 f_M 周波数の脈動あり		ほとんどなし	
サイリスタ周波数変換器	周波数変換器	サイクロコンバータ	サイクロコンバータインバータ	サイクロコンバータ	
		電流平滑リアクトルを内蔵		電流平滑リアクトルなし	
サイリスタの転流電圧		電源電圧	モータ電圧*	電源電圧	
電源力率**		やや悪い***	良い	やや悪い***	
電源高調波		直流電動機の静止レオナード制御と同等		左記とほとんど同じ(f_M に關係した低次調波あり)	
適 用	容 量	中・小容量	大~小容量	大・中容量	
	用 途	低速ポンプ、ファン	ポンプ、ファン、プロワ、高速機械、攪拌機、圧延機械、車両	圧延機械、低速回転機械(セメントミル、キルン)、高速列車推進	

注: * 低速度においてサイクロコンバータでは、電源電圧による転流、インバータでは転流時点ごとに直流電流を一度ゼロにして転流を行なう電流断続転流が行なわれる。
** 力率補償を行わない場合
*** コンデンサを電源に接続することにより、容易に補償可能。

定常運転時にサイリスタ素子に加わる電圧は、サイクロコンバータでは電流形の場合、モータ電圧と電源電圧の和であるが、電圧形の場合、電源電圧のみである。従って、高圧・大容量モータの制御には電圧形が有利となる場合もある。インバータではモータ電圧のみであり、小容量モータから大容量モータまでの適用が可能である。

サイリスタモータとして、現在低圧中・小容量機の採用が盛んであるが、高圧サイリスタ素子とその利用技術が進んだ結果、高圧・大容量サイリスタモータの製品化が可能となったので、今後、大容量ポンプ、ファン、圧延機主機、セメントギヤレスミルなど広い分野への適用が期待される。

5 交流車両への応用

電力用整流素子及び同サイリスタは、量産形交流車両の主整流器にそれぞれ1961年及び1966年より使用され、今日まで延べ約120,000個を超える交流車両フィールドの使用実績を有している。その間、主整流器の小形・軽量化のニーズと半導体技術の向上により電力用半導体素子の高耐圧・大電流化が進められてきた。図11は、交流車両用整流器における単位容量(100kW)当たりの素子数低減過程を経時的に図示したものである。1967年には400Aサイリスタ、800Aダイオードの量産により、また、1972年には1,000Aサイリスタ、1,600Aダイオードの量産により、当初に比べ単位容量当たりの素子数が1/2~1/3に低減され、装置の信頼向上もなされた。

一方、大容量素子の応用技術の面では、
(1) 素子能力をフルに発揮できる冷却方式の開発

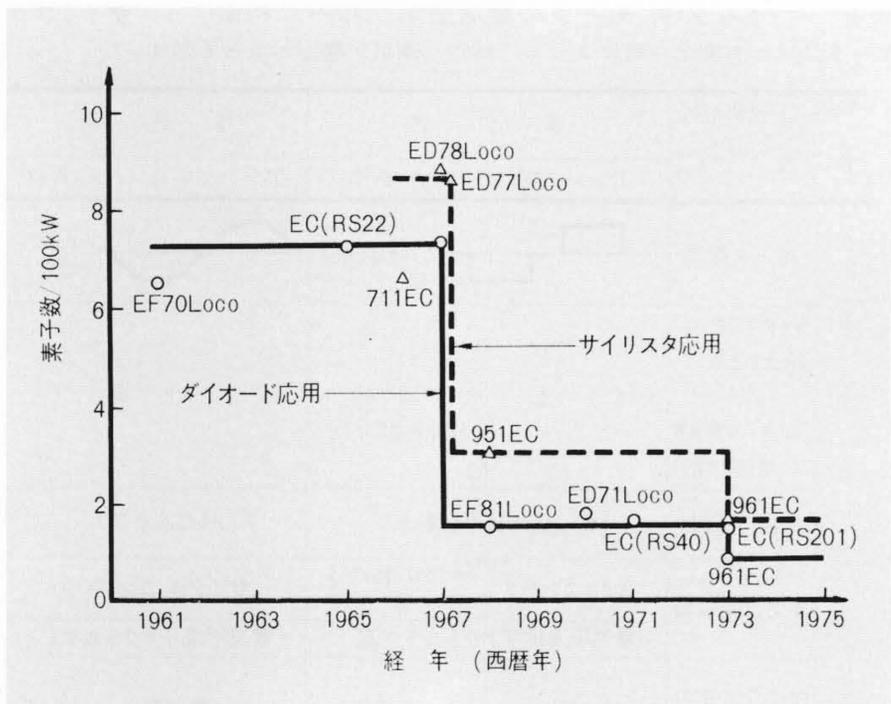


図11 交流車両用整流器における、単位容量当たりの半導体素子使用員数の推移 100kW当たりの使用素子数が経時的にどう低減されてきたかを示す。1967～1973年の間に半導体素子及びその応用技術の進歩により、使用員数は $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{3}$ に低減し、装置の小形・軽量化及び信頼性の向上に役立っている。

(2) 素子の新しい直接並列接続(ダイレクト パラ)技術の開発が素子開発と併行して進められてきた。

(1) 冷却の問題 大容量素子の性能をフルに生かす方法として、空冷に比べ2けた以上熱伝達率の良好な沸騰冷却方式が開発され、大電流1,000Aサイリスタ及び1,600A整流素子の冷却に適用された。図12に1,600A整流素子10個より構成された沸騰冷却式スタック(*9)を示す。沸騰冷却式の採用により、従来の空冷フィンに比べ同一熱抵抗換算で体積比で約 $\frac{1}{3}$ に低減、また油冷式フィンに比べては約 $\frac{1}{5}$ に低減され、素子の大容量化と相まって飛躍的な冷却方式が確立された。

沸騰冷却式では、従来のような対流又は輻射による熱交換ではなく、加熱面における冷媒の液相から気相に相変化する際の蒸発潜熱の授受によって熱伝達する原理であるため、冷媒を強制的に移動させるポンプは全く不要であり、その分の電力費、保守費も低減され、信頼性が向上して顧客ニーズにあった更に一步前進した整流器が実現されたと言えよう。冷媒には沸点47.6°CのフロンR-113が使用されている。

(2) サイリスタのダイレクト パラ(*10)の問題 サイリスタの電流容量が増大するにつれ、当然、整流器を構成する際のサイリスタ並列接続数(パラ枚数)が低減されてくる。しかし、従来のように並列素子間の電流平衡をとるために直列リアクトルを設けていたのでは、取付スペース、重量、損失、その冷却などに問題があり、直列リアクトルをなくする技術の確立が望まれていた。このニーズをサイリスタのダイレクト パラ技術により実現した。例えば1,000Aサイリスタ2個直接並列接続による各サイリスタの分担電流は、オン電圧がゼロ(移相制御角が0度)の場合、及びオン電圧が高い(移相制御角が90度)場合ともに規定値の20%以内の電流不平衡率に十分入

(*9) 電力用半導体素子の運転中に生ずる熱損失を、冷媒の蒸発潜熱を利用して熱交換を行なう構造の冷却体と素子の一体化したブロックをいう。

(*10) 大電流回路ではサイリスタを多数個並列接続して、あたかも単体サイリスタのように動作を一致して作動させるため、従来直列リアクトルなどの補償エレメントを回路に挿入していたが、この直列リアクトルなしに直接並列接続する方式をダイレクトパラという。

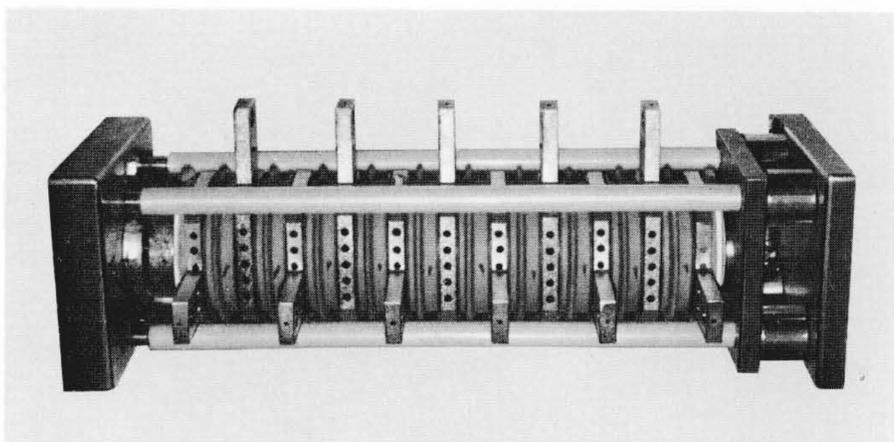


図12 沸騰冷却式スタック 1,600A整流素子10個により構成されたフロン冷却スタックを示す。

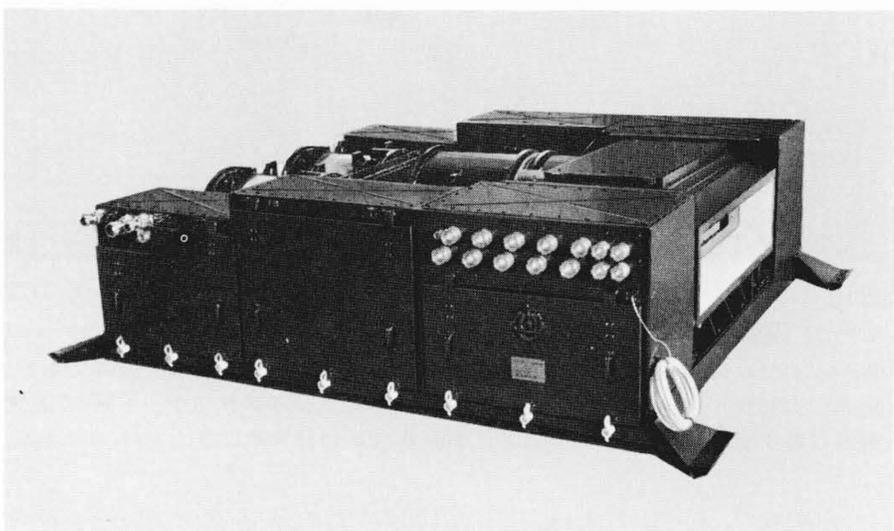


図13 交流電車用フロン冷却式サイリスタ変換装置(日本国有鉄道961系試作電車力行用 2,440kW 1,400V) 直接並列接続可能な大容量半導体素子と沸騰冷却方式の組み合わせにより、小形・軽量のコンパクトな設計になっている。使用素子は1,000Aサイリスタ20個、1,600A整流素子20個を用いている。

ることが確認されている。

サイリスタのダイレクト パラでは、素子のどの特性をどの程度マッチングさせるか、また素子の幾何学的配置をどう考慮するかが重要なポイントである。従来の並列接続では、主にターンオンタイム、順電圧降下特性のマッチングで十分であったが、ダイレクト パラでは更に確実なターンオンを期すため、フィンが電圧のマッチング、スイッチング耐量を分担させるため、素子接合通電面積広がり速度、素子ベース温度のマッチングなどの配慮が必要であり、素子設計と装置設計間の隙のない協調により実現された新技術である。

図13に、前述の(1)フロン沸騰冷却、(2)ダイレクト パラ技術を盛り込んだ日本国有鉄道961形試作電車用として開発された2,440kW主サイリスタ変換装置を示す。

6 結 言

以上、主として60φ級シリコン単結晶を用いた超大形電力用半導体素子と、電力、一般産業、電気鉄道各分野における応用技術の一端を紹介した。今後のパワーエレクトロニクスシステムの高度化・大形化は、能動素子である電力用半導体素子に更に多機能、高性能化を求め、これによるシステムの信頼性向上を図るものと考えられる。本論文で紹介した沸騰冷却形直接並列接続式サイリスタ装置のように、半導体素子そのものと、それを応用する回路・装置の技術とが協調し合い次の時代の新素子や新利用技術が生まれ、新しいパワーエレクトロニクスシステムの開発が進められるものと考えられる。