キーワード

パワーデバイス・パワーエレクトロニクス・他励変換・自動変換

今井孝二

豊田工業大学

1. はじめに

電力系統にもパワーエレクトロニクス応用装置が多用されるようになった。昭和52年以降50Hz-60Hzの連系ならびに北海道一本州の直流送電には逆阻止3端子サイリスタ(以下サイリスタと略記)バルブが適用され、最近では新型無効電力制御装置として、ゲートターンオフサイリスタ(GTO)を用いた自励式バルブの試験が実施されている。

近年のシリコン単結晶製造技術の著しい進歩によって、パワーデバイスに使用可能な高抵抗ウェーハは直径150mmまで大型化された。それを用いた最大容量のデバイスの定格電圧・電流は、光サイリスタ(LTT)の場合8kV-3500A, GTOでは6kV-6000Aに達している。図1に年度によるパワーデバイスの最大定格電力の変遷を示した。

図1 パワーデバイスの最大定格電力の変遷

2. パワーデバイスの技術の現状と課題

〈2.1〉 他励変換器用デバイス 他励変換器の転流は交流電源電圧によって行なわれ、電流オフの機能はデバイスには不要である。現状の電力分野での代表例は直流送電や周波数変換装置などである。これらの装置のハード構成

State of the art and Future in Power Electronics for Electric Power Fields.

"Present status and Future survey on Power Device Technology."

By Koji Imai, Member (Toyota Technological Institute).

単位をバルブと呼ぶ。一般にバルブではサイリスタの直列または直並列接続が用いられる。

高電圧サイリスタのゲートトリガを光直接方式にできたことは、サイリスタバルブの構成上画期的なことであった。図2、図3はサイリスタバルブの構成であるモジュールの写真である。

図2 北海道一本州連系サイリスタモジュール
4kV, 1500A サイリスタの4直列, 強制風冷式

図3 新信濃周波数変換サイリスタモジュール
6kV, 2500A サイリスタの7直列, 循環水冷却式

電気トリガサイリスタは対地とは完全に絶縁されているので、それらにアース電位にあるパルス発生器からゲートパルスを直接供給することは出来ない。すなわち絶縁された電気ゲートパルスが必要である。そのため光間接トリガ方式(光信号を高圧側のモジュールに送りそこで電気信号に変換、増幅してサイリスタに与える方式)が使用された。図2のモジュールでは、信号レベルの光がガラスファイバーを通じて(図中では省略)モジュールの中央に配置された制御装置に伝送され、その装置に内蔵されている多数の電子回路部品により電気ゲートパルスに変換される。この光一

電気変換には低圧電源が必要であり、その電圧はサイリスタの主回路電圧を分圧して得ている。この低圧電源電圧の確立がバルブの安全運転のための必須条件であるので、主回路オン後の瞬時起動は不可能であり、バイパスペア時間が制限されるなど運転上に制約を与えていた。

図3は光直接トリガ方式である。補助電源と光-電気変換回路は一切不要になり前述の運転上の制約は完全に解消された。外観上からもLTTが実にスマートに諸問題を解決したかが理解できるであろう。このモジュール中に含まれる部品の数は、図2の場合に比較して図3では僅か10分の1以下であり、信頼度の向上にも大きく寄与している。

また体積当たりモジュール出力を単純に比較すると、図2と図3はほぼ同じサイズであるが、図3の出力は図2の7倍である。冷却方式および使用したデバイス定格容量の相違も影響しているが、大幅に小型化されている。

前述のように直径が150mmの高抵抗ウェーハの適用によって、サイリスタは従前の諸特性をほぼ不変のままで高耐圧化が可能になり8kVが実用化された。しかしこのデバイスのオン電流定格/単結晶断面積(オン電流密度)は大幅に低下している。オン電流密度が大きいとサイリスタの残存キャリアは増えるので、転流ターンオフ時間(T_{off})は長くなる。実用化されているサイリスタの公表データ⁽¹⁾から、定格オフ電圧値(順電圧を阻止し得る値)とオン電流密度との関係を、ターンオフ時間をパラメータとして図4に示した。

図4 サイリスタの定格オフ電圧とオン電流密度の関係

図4によれば定格オフ電圧1.5kV以下では T_{off} が150 μs の場合でも、オン電流密度はかなり高い。しかし4kVを超えると T_{off} を400 μs と長くしてもオン電流密度は低下している。特に8kVにおいてはその傾向が著しい。

サイリスタの各種パラメータ間のトレードオフはデバイス設計上では不可欠であるが、Newellは1976年に多くの示唆に富む論文⁽²⁾を発表している。当時のデバイスの物理量から計算された同論文の T_{off} の図に、現状の8kV、3500Aデバイスの諸元を当てはめてみると、丁度1000 μs となるが現状の実値は400 μs である。約20年間でデバイスの T_{off} 短縮技術において、例えばプロトン照射によるライフタイム制御など、大きな進歩がみられる。

60Hzにおける他励インバータ運転で、転流リアクタン

スを20%として、 T_{off} が400 μs から仮に150 μs にできたとすると、変換装置の無効電力消費量はその有効電力出力の約10%相当分だけ減る。交流系統の過剰な進み無効電力は過電圧発生の要因であり、進相コンデンサの容量は極力少ないことが望ましいので、 T_{off} 短縮は大きな利点になる。高電圧サイリスタの T_{off} を、他の特性を損なわずに現状の1/2程度にできるかは課題の一つである。

サイリスタバルブの通電時の電圧(オン電圧)は運転効率に大きく影響する。かつて高圧変換機器として使用された水銀アークバルブは、125kV定格がほぼ標準であったがそのオン電圧は40~50Vであった(東芝小林淳男氏談)。同定格電圧のサイリスタバルブでは、6kVデバイス使用で100V、8kVでは80V程度であって未だ水銀バルブには及ばない。ウェーハ面積を徒らに増加させず、そのオン電圧を極力減少させるべき改良は他励サイリスタの第2の課題と考えられる。

〈2. 2〉 自動変換器用デバイス 自己ターンオフデバイスを用いて自励変換装置を構成し、その装置を適当なリアクタンスを介して交流電源に接続する。変換装置出力電圧と交流電源電圧との間の位相の進めまたは遅れ制御を行うと有効電力量が、電圧値の高低制御で遅れ・進み無効電力量がそれぞれ自由に制御できるシステムになる。またPWM制御によって変換装置の出力電圧に低次高調波が含まれないようにするのも容易である。即ち自励変換装置は静止化された交流発電機と等価と考えられる。

現時点で自励変換装置には、自己ターンオフデバイスとして、大容量用はGTO、中容量にはSIサイリスタおよびIGBTが適用される。GTOとIGBTの外観を図5に示す。GTOは最大直径120mm、IGBT Moduleはモールド型で横幅108mmである。

A) GTO (2.5kV, 2.7kA) B) IGBT Module (1.7kV, 360A)

図5 自己ターンオフデバイス外観

各デバイスのターンオフ時間は、GTOが約30 μs 、SIサイリスタとIGBTは約1 μs である。これらのターンオフデバイスは、バイポーラ型であるためデバイスの内部に残存したキャリアが完全に消滅するまで、通常数Aの電流がある時間流れる。この通電時間をテイル時間というが大電力のGTOでは100 μs 以上⁽³⁾にもなる。この期間中にはデバイス両端には、ほぼ主回路電圧が印加されるので、ターンオフ中のエネルギー損も含めると、例えばGTOでは数100mJ(5J/250A)の大きなエネルギー損になる。このエネルギー損に周波数を掛けた値が、スイッチング電力損になるので、現状の高圧GTOでは300Hz程度以上のPWM制御は困難である。そのため低次高調波抑制は変換回路の多重化で対

処するので、回路・制御とも複雑になっている。高電圧・大電流自己ターンオフデバイスのターンオフおよびテイル時間を短縮によるスイッチング損低減が大きな課題である。

サイリスタのゲートを MOS 構造として電圧制御可能とする試みが米国で 1984 年頃から研究されているが、解決すべき問題が多くその実用化は遅れ気味である。一方日本では GTO 並みの定格電圧・電流定格で、ゲート制御は IGBT 並みとするデバイスを目指した研究開発が進められている。その一例がシリコンウェーハの陰極側に表面ではなく厚みの方向に溝を掘り MOS 構造のゲートを形成した Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor(IEGT)^③と呼ばれるデバイスである。GTO に比してオン電圧、ターンオフ損が顕著に減少する例が発表されている^④。このようにゲート構造をトレンチ形(溝形)あるいは埋め込み形とするのは、SI デバイスでは 1970 年半ばに発表されており、多くの文献で紹介されているが^⑤、厚み方向を利用するデバイス構造は、今後の自己ターンオフデバイスの特性向上に有力な手法と考えられる。

なお自励変換器用の大電力デバイスには、スイッチング損以外にも後述のような大きな課題がある。

3. パワーデバイスの将来展望

他励変換器用デバイスでは、バルブの通電時電圧を水銀アークバルブ並みとするためのオン電圧の画期的な低減と、転流ターンオフ時間の短縮が望まれる。これらの両特性改良は矛盾するとされている。しかしデバイス中のキャリア挙動のシミュレーション技術等は著しく発展しており、これまでの延長ではないデバイスの実現を強く期待したい。

自励変換器用デバイスは他励の場合に比べて別の大きな課題がある。高周波スイッチング損の減少については既に述べたが、高圧の自励変換バルブと他励変換バルブとを比較したとき、外形、重量、部品数には極端な差がある。この差を詰める事が最重点課題であろう。600V、20A の SI サイリスタを光によってオンオフできたという報告^⑥に注目すべきではなからうか。他励変換バルブで、その有用性が実証された光直接制御を自励に適用する研究開発が最重要な課題と考えられる。

パワーデバイスについては、中期的にみてシリコンのみではなく、他の原材料にも目を向ける必要があると指摘されている。現在、炭化珪素(SiC)の結晶成長、単結晶生成の開発が活発に行われている^⑦。SiC パワーデバイスとシリコンパワーデバイスとの性能比較の研究も進められている。

SiC は古くから知られている材料で、アレスタ用非直線抵抗体に使用されていたが、近年高品質単結晶が得られる 6H-SiC (六方晶系シリコンカーバイド) が注目されている。シリコンと比較すると、そのバンドギャップエネルギーは約 2.6 倍、絶縁破壊強度はほぼ一桁高いので、単純にいえば同じ耐圧を持たせるべきデバイスの厚みが、SiC ではシリコンの 1/10 で良いことになる。薄型であれば抵抗値は低

くなり蓄積されるキャリア量が極減する。特に電界効果型トランジスタ(FET)には蓄積キャリアは存在しないから、超高速パワーデバイス実現の可能性が暗示される。

Bhatnagar 等は、既存の 4.5kVGTO と、6H-SiC による同電圧の MOSFET との比較で、100A/cm² のオン電流密度でのオン電圧が GTO で 3V、SiC で 1.95V と、SiC で大幅に改善されると発表している^⑧。もちろん 6H-SiC はシミュレーションの結果であるが、良好な SiC 単結晶が得られれば実現可能と思われる。また Baliga の論文^⑨では 600V クラスの SiC の FET でターンオフ時間を 10~50ns(ナノ秒)と想定している。これはパワーデバイスでは画期的な値で、この様な特性の光直接方式 FET が大容量化できれば、高圧自励変換器は飛躍的にその用途が拡大すると予想できる。

しかし経済性から考えて、すべての変換器を自励方式とするのは適当ではないと思われる。SiC の単結晶が実用段階になれば、SiC サイリスタは前述のシリコンのサイリスタの課題をほぼ完全に解決クリアしてくれると思われる、また SiC-MOSFET よりは当然安価になるであろう。

将来の電力システムの最適化の観点から、大容量基幹直流送電、多端子システム、系統連系、無効電力制御、多機能アクティブフィルタ、超電導コイルによるエネルギー蓄積装置等々、種々のニーズが予想される。一方パワーデバイスにはまだまだ多くの未知の可能性を秘めたシーズがあると思われる。これらのニーズとシーズとの整合によって、電力分野におけるパワーエレクトロニクスに一層の革新がもたらされることを期待したい。

(平成 9 年 4 月 7 日受付)

文 献

- (1) Toshiba: "Thyristors", '89 Semiconductor Data Book 他
- (2) W.E.Newell: "A Design Tradeoff Relationship Between Thyristor Ratings", IEEE Trans. Ind. App. Vol.IA-12, No.4 397-405,[1976]
- (3) M.Kitagawa, I.Omura, S.Hasegawa, T.Inoue, and A.Nakagawa: "A 4500V Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor (IEGT) Operating in a Mode similar to a Thyristor", IEDM 93, 679-682, [1993]
- (4) M.Kitagawa, A.Nakagawa, K.Matsushita, S.Hasegawa, T.Inoue, A.Yahata, and H.Takenaka: "4500V IEGTs having Switching Characteristics superior to GTO", Pro. 1995 Int. Symp. on Power Semiconductor Devices & Cs, 468-491, Yokohama, [1995]
- (5) 例えば電技報 (II 部) 第 162 号 64-65
- (6) 斉藤雅之、馬場見、勝又正明、山本慶三、松本琢夫: "光トリガクエンチ SI サイリスタ" 第 5 回 SI デバイスシンポジウム論文集, SID-91-(1)-5, 25-32, [1992]
- (7) 松波弘之: "半導体シリコンカーバイドの進展", 招待講演, 電研資 EDD-93, [1993-10-8]
- (8) M. Bhatnagar and B.J.Baliga: "Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for Power Devices", IEEE Trans. ED. VOL.40, NO.3, 645-655, [1993]
- (9) B.J.Baliga: "Power Semiconductor Devices for variable Frequency Drives", IEEE Pro. Vol.82, No.8, 1112-1122, (1994)

今井 孝二

(正員) 1928 年 12 月 17 日生。1952 年東京工業大学電気第一専攻(強電)卒業。同年(株)東芝入社。パワーエレクトロニクスの研究・開発に従事。1990 年豊田工業大学教授。工学博士。1979 年電気学会進歩賞、1994 年同業績賞受賞。IEEE Fellow。