

# サイリスタインバータ技術の展望

## Review of Thyristor Inverter Technique

近年、設備のスタティック化、省力化、省エネルギー化、コンパクト化などの観点から脚光を浴びているパワーエレクトロニクスの一分野を占める定電圧定周波電源(CVCF)、及び省エネルギーの要請で最近クローズアップされてきた可変電圧可変周波電源(AVAF)として用いられる自励式サイリスタインバータについて、市場ニーズに対する技術的アプローチを歴史的かつ将来展望についてサイリスタ素子及び回路技術の両面より論じた。

地福 順人\* Jifuku Yorito  
天野 比佐雄\*\* Amano Hisao  
渡辺 一郎\*\*\* Watanabe Ichirō

### 1 緒言

1957年にサイリスタが登場して以来、サイリスタ素子の大容量化・高速化・多機能化・信頼性の向上と低価格化、並びに回路技術及び制御技術の進歩などにより、変換効率、動特性、信頼性、保守性、大きさ、据付の容易性などの点で、従来の回転機や水銀整流器を用いた電力変換器に比べ、格段に優れたサイリスタ変換器が製品化されるようになり、十数年後にはパワーエレクトロニクスの全盛時代を迎えるに至った。ここでは、そのうちのコンピュータなどの定電圧定周波電源〔以下、CVCF(Constant Voltage and Constant Frequency)と略す〕及び交流電動機の可変電圧可変周波電源〔以下、AVAF(Adjustable Voltage and Adjustable Frequency)と略す〕に用いられる自励式インバータ技術について述べる。

CVCFは、1960年ごろから、コンピュータ用、計装用、通信用、放送用、照明用、動力用などの電源として用いられ、コンピュータリゼーションのニーズを中心に、初期の小容量の鉄共振形インバータから最新の逆導通サイリスタを用いた純個別制御方式やゲートターンオフ(以下、GTOと略す)サイリスタを用いたものへと発達してきた。

AVAFは、従来金属圧延のテーブルや紡糸機などの駆動用交流電動機群の一括速度制御用に用いられていたが、近年では主として省エネルギーの観点から、風水力機械などを駆動する個々の交流電動機群の速度制御やソフトスタート用として普及しつつある。以下、本号の個別の特集論文に先立ち、日立製作所での自励式サイリスタインバータ技術を中心に、その現状と将来の展望について述べる。

### 2 市場ニーズの動向

サイリスタインバータの開発以前でのCVCF、AVAFニーズに対しては、専ら各種の回転機式や、サイラトロン又は水銀整流器を用いた静止形のものが用いられた。これらのうち、現在も用いられているものは回転機式CVCFにあっては、クレマ方式のものだけである。静止形インバータは、転流回路が負荷と直列に接続される直列インバータから、並列に接続される並列インバータ、並列接続にして更に鉄共振を用いた鉄共振形へと発達し、1961年マクマレー(W. McMurrey, 米国GE社)が並列インバータにダイオード帰還をかけて大幅な特性改善を行ない、現在のサイリスタインバータの基礎を作った。

サイリスタインバータが国産化されると、従来方式のCVCF

からサイリスタCVCFへの切換え需要が喚起された。続いて、日本国有鉄道の列車座席予約にコンピュータオンラインシステムが採用され、金融機関の窓口業務・航空機の座席予約・証券取引所・公営競馬場などへとオンライン化が普及するとともに、工業界も重化学工業時代に突入して各種の大形プラントが相次いで出現し、CVCF〔正確にはUPS(Uninterruptible Stable Power Supply System)と称すべきであるが〕に要求される責務は重大となった。この間、インバータ技術開発の面では、特性改善のためのパルス幅制御方式、信頼性向上のための直列冗長方式、商用待期冗長方式(商用電源との無瞬断切換え)及び並列冗長方式の開発、並びに制御回路のIC(集積回路)化(それ以前はトランジスタ)及び装置のコンパクト化を目的として、多重式、パルス転流方式、逆導通サイリスタが採用され現在に至っている。更に、他機種との並列運転を容易とするための純個別制御方式、装置のいっそうのコンパクト化を図る新素子GTOサイリスタ使用によるPWM(Pulse Width Modulation)式サイリスタインバータ技術が確立され、市場ニーズへの充足度を増しつつある。最近では、鉄道車両搭載の交流補機電源用インバータのサイリスタ化も行なわれている。

一方、AVAFのサイリスタ化は、当初は保守の省力化と据付の便をねらいとして紡糸機、圧延テーブル、各種プロセスラインなどの小容量の交流電動機群の共通電源として採用されたが、最近では主に省エネルギーの観点から、プロワ、ポンプなどの大容量風水力機械の交流電動機の個別制御用として用いられるようになった。以上、述べた市場ニーズ及び技術開発、製品化の推移を表1に示す。

サイリスタインバータへの将来ニーズは、採用される分野、量ともに拡大の傾向にあると考えられるが、基本的には、設備費、運転経費、信頼性、安全性などの総合的見地からみた他方式に対する優位性に大きく左右される。このため、メーカーとしては装置の付加価値の向上、適用範囲の拡大、信頼性の向上、標準化などの技術課題として当面下記の方角に向け努力を払っている。

- (1) ニーズの多様化に対し、標準ハードウェアとソフトウェアで対処する。
- (2) 故障診断機能の付加とトラブルシューティングの迅速化によるいっそうの信頼性向上
- (3) GTOなどの多機能素子の利用による装置のいっそうの

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所機電事業本部

表1 サイリスタインバータの市場ニーズ及び技術開発、製品化の推移年表 市場ニーズに対し、技術開発及び製品化がどのように対応してきているかを示す。

西歴	7	8	9	1960	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1970	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1980	
市場ニーズ							●コンピュータ用回転機式CVCFからサイリスタCVCFへの切換え始まる。 ●ミル電気品へのサイリスタ応用始まる。	●国鉄座席予約システムのオンライン化始まる。						●石油化学コンビナートの大規模化始まる(計装電源責務の重大化)。 ●証券取引所へのオンラインシステム導入始まる。 ●金融機関へのオンラインシステム導入。コンピュータの大形化始まる。 ●紡糸機用交流電動機のサイリスタAVAFによるグループ制御始まる。 ●鉄道車両搭載交流補機電源のサイリスタ化始まる。 ●各種処理ライン用交流電動機のサイリスタAVAFによるグループ制御始まる。 ●航空機座席予約用オンラインシステム導入始まる。 ●国鉄新幹線にコムトラック●競馬場などへのオンラインシステム導入始まる。										●風水力機械の省エネルギー用サイリスタAVAF採用ニーズ出始める。 ●山陽新幹線全線開通	
主な出来事	●人工衛星スプートニク第1号打上げ成功 ●東海原子力臨界に達す。						●ミルブーム始まる。 ●東海道新幹線開通 ●国鉄「みどりの窓口」開設 ●名神高速道路全面開通							●東名高速道路全面開通 ●人類初の月面着陸 ●日本万国博開幕 ●ドルショック(円変動相場制へ) ●PCB使用禁止											●300MW新信濃周波数変換所営業運転開始 ○300MW北海道~本州間直流送電開始予定
技術開発・製品化	●サイリスタ発表(GE社)			●サイリスタの国産化始まる。 ●マグマレーインバータの開発(GE社)			●HITAC 3010用 40kVA CVCF完成(鉄共振形) ●計装用 15kVA CVCF完成(パルス幅制御方式) ●高速度サイリスタの生産開始							●HITAC 8500用 150kVA CVCF完成(多重式,パルス転流方式) ●IBM360用 250kVA×3 CVCF完成(並列冗長回路方式) ●放送機器用 250kVA CVCF完成(制御回路のIC化) ●磁気テープライン用AVAF納入始まる。 ●IBM370用 150kVA×2 CVCF完成(逆導通サイリスタ採用) ●HIDIC 700用 50kVA CVCF完成(PWM方式) ●速心分離機交流電動機用 50kVA+90kVA AVAF完成(0~669Hz連続可変)									●直径60mm電力用サイリスタシリーズ完成 ●直径80mm電力用サイリスタ完成(4.0kV 1.5kA) ●集塵ブロワ用1,800kWモータソフトスタート用AVAF完成 ●攪拌槽用 270kW モータ速度制御用AVAF完成 ○水車試験用 2,250kVA AVAF完成予定 ●ミルテーブル群制御AVAF納入始まる。 ●GTO使用PWM方式CVCF試作完成 ●GTO使用PWM方式AVAF試作完成 ●純個別制御方式CVCF試作完成		

注：●は実施済み，○は実施予定を示す。

コンパクト化と信頼性の向上

- (4) 低リップルインバータによる交流機の可変速制御への応用範囲の拡大
- (5) 高効率化・高力率化による入力電源容量の低減
- (6) 高周波又は低周波による直結駆動(増減速ギヤの省略)

3 技術展望

サイリスタ(ここでいうサイリスタとは、現在一般に使用されているゲートではターンオフできない逆阻止三端子サイリスタを指す)による自励式インバータは、実用化後既に十年以上を経過し、市場的には新しい応用分野の拡大により需要増は大いに期待されるが、回路技術的にはほぼ完成の域に達したと考えられる。今後は、GTOサイリスタ、LSI(大規模集積回路)など主回路、制御回路とも新機能素子の出現による技術革新が進み、需要の拡大に拍車をかけるものと思われる。

以下、主回路素子の展望と回路技術の現状について述べる。

3.1 素子技術

最近、インバータの小形化、高性能化のため半導体素子の大容量化、高速化が進められている。一般のサイリスタでは、ターンオフさせるための転流回路が必要であり、その容量はターンオフタイムにほぼ比例するので、装置の小形化にはターンオフタイムの低減が必須である。実用化されている高速サイリスタには 500A, 1,200~1,400V 級で、ターンオフタイム30μs以下のものがある。

また、自己消弧機能をもった半導体素子の大容量化が進み、インバータに適用されるようになった<sup>1)~3)</sup>。普通のサイリスタでは前述したように、ターンオフさせるために転流回路が必要であるが、自己消弧形の素子ではそれが不要となり、回路の大幅な簡素化が図れる。代表的なものとしては、トランジ

スタとGTOサイリスタがあるが、電界効果を利用したスイッチ素子が開発されている。

GTOサイリスタ<sup>4)~6)</sup>はゲートターンオフ電流(アノード電流の $\frac{1}{3}$ 程度)を約10μs流してアノード電流をオフすることができるので、普通のサイリスタに比べてターンオフに要する電力は極めて少なく、変換効率を向上できる。しかし、ゲート回路は多少複雑になる。またGTOサイリスタはスイッチング速度が速いため、動作周波数を高め、パルス幅変調方式などの採用により、出力電圧の低次高調波分を低減させて波形改善用フィルタを小さくしたり、制御特性の改善が可能となる。一方、ターンオフを失敗すると破壊することがあるので、特に過電流時の保護には留意する必要がある。現在開発されている最大級のGTOサイリスタは順阻止電圧1000V以上、最大制御可能電流数百アンペアのものがある。

パワートランジスタ<sup>7)</sup>のスイッチング速度は、GTOサイリスタと同程度であり、コレクタ電流、耐圧が400A, 300V級のものが実用化されている。トランジスタではコレクタ電流を流すためにベース電流を流し続ける必要があること、ターンオフタイムを短くするため、ターンオフ時ベースに逆電流を流さなければならないため、ベース回路は複雑になる。また、過負荷に対しては飽和状態から二次降伏を起こして破壊に至ることもあり、GTOサイリスタや一般のサイリスタに比べ過電流耐量が小さい欠点がある。

電界効果を利用したサイリスタ<sup>8)</sup>は、ゲート電圧をゼロにするとオン状態となり、ゲート電圧を負にするとオフ状態になる。スイッチング速度が速い、オン電圧が低い、過電流耐量が大きいなど、多くの特長をもち注目されている。

これらの半導体素子を比較すると表2に示すようになる。またこれらの素子の適用範囲について、Cushmanは図1の

表2 各種スイッチ素子の比較 一般のサイリスタ, GTOサイリスタ, トランジスタ及び電界効果サイリスタについて, その構造, 特性を比較して示す。

	サイリスタ	GTOサイリスタ	トランジスタ	電界効果サイリスタ
素子構造				
V-I 特性 (▲ : オフ状態) (● : オン状態)				
スイッチング	ターンオン	ゲート電流 $I_G > 0$	ゲート電流 $I_G > 0$	グリッド電圧 $V_G \rightarrow 0$
	ターンオフ	外部回路によりアノード電流を零にする。	ゲート電流 $I_G < 0$ (アノード電流の約1/3)	グリッド電圧 $V_G < 0$ (アノード電圧の数分の一以下)
	ターンオフタイム	$10\mu\text{s} \sim$	$3\mu\text{s} \sim$	$5\mu\text{s} \sim$

ように示している<sup>9)</sup>。しかし, これからの半導体技術の進歩により多少変動すると思われる。例えば, Harnden はサイリスタとトランジスタの適用範囲を図2のように予想している<sup>10)</sup>。

### 3.2 回路技術

自励式インバータは, 電源転流又は負荷転流による他励式インバータに比べ, 回路方式の自由度が高く, 従来より経済性・信頼性の確保及び高効率などの特性改善を目的として種種の回路が提案され, 実用化されてきた。その結果, 上記回路素子の特性改善, 新機能素子の出現と相まって, 定電圧定周波電源及び可変電圧可変周波電源としての優位性を確保したといえる。

表3 にインバータ回路の代表例を示す。

補助パルス転流インバータは, 電圧形インバータの中で転流リアクトルに主回路電流を流さないことで, 逆変換効率が良いことと転流リアクトルの振動音がないことで, 現在最も優れた回路方式と考えられる。

電流形6アームインバータは, 電流形インバータのなかで回路素子数が少ないため, 経済性及び信頼性の点で優れている。

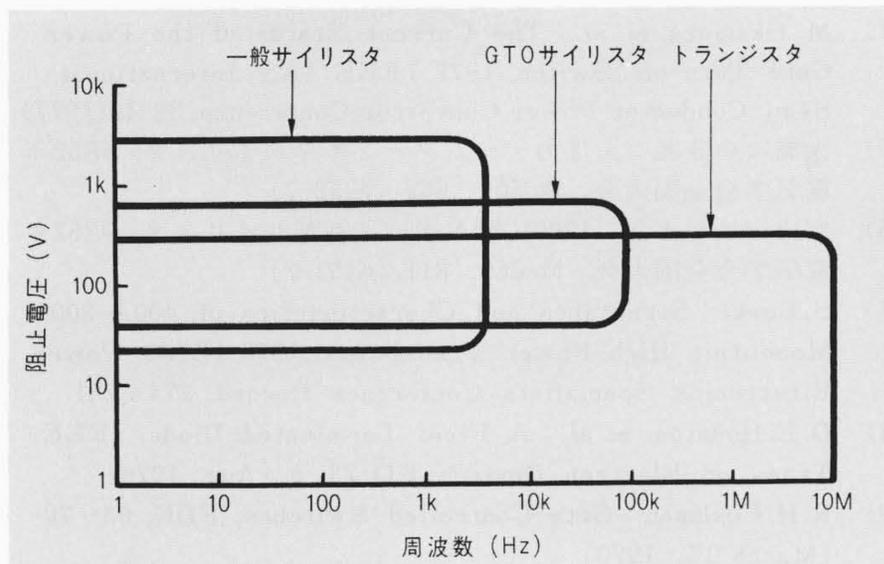


図1 半導体素子の適用領域 一般のサイリスタ, GTOサイリスタ及びトランジスタの周波数と阻止電圧について適用領域を示す。

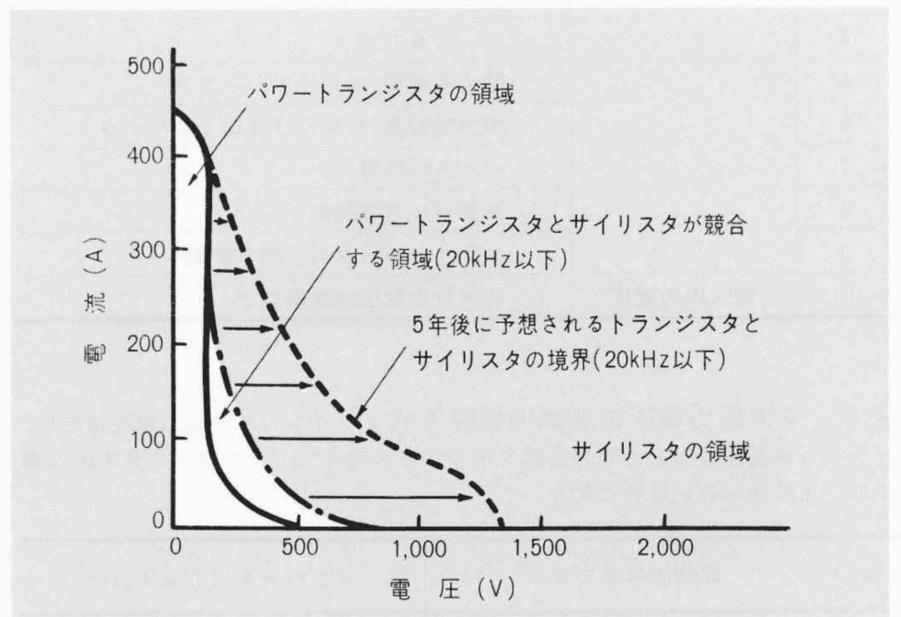


図2 サイリスタとトランジスタの適用領域 トランジスタとサイリスタの電圧, 電流についての適用領域を示す。

従来の逆阻止三端子サイリスタによるインバータは, 主回路の転流方式がポイントになっていたが, 今後は上述のGTOサイリスタや電界効果サイリスタが実用化されると, ゲート回路だけで主回路の点弧及び消弧が可能となるため, 主回路の転流回路は不要となり主回路の単純化による寸法の縮小, 及び転流損失がなくなることによる効率の向上が期待される。

表4 にインバータの出力電圧を制御する方式の分類について示す。

電力回生を必要とする場合を除いて, 商用電源はダイオードで整流し, 交流出力電圧制御はパルス幅制御方式などによりインバータ自体で行なうことにより, 電源力率の低下など電源への影響を極力避ける方式が今後とも要求されると考えられる。

表5 に交流出力の高調波低減方式を示す。

容量の大きい場合には多重インバータ方式を, 容量の小さい場合には多重パルス幅制御方式を用いることなどにより低次高調波を除去したのち, 交流フィルタによって高次高調波

表3 インバータ回路の代表例 日立製作所でのインバータの代表的な転流回路を示す。di/dt, dv/dt を抑制するアノードリアクトルは、回路図から省略してある。

インバータ名称 項目	CVTインバータ	旧マクマレーインバータ	補助パルス転流インバータ	電流形補助パルス転流インバータ	電流形6アームインバータ
回路					
採用時期	昭35~40	昭40~45	昭45~	昭50~	昭53~
主な用途	小容量CVCVFインバータ	CVCVFインバータ 電圧形AVAFインバータ	CVCVFインバータ 電圧形AVAFインバータ	電流形AVAFインバータ	電流形AVAFインバータ

表4 インバータの出力電圧調整方式 電圧制御方式の呼称については統一されていないので、ここでは慣用語を使用した。多重パルス幅制御については、表5に波形を示す。

No.	電圧調整箇所	電圧調整方式
1	交流入力電圧	誘導電圧調整器など
2	直 流 電 圧	電源整流器の位相制御
3		チョップ方式
4		ブースタ方式
5		転流角制御(並列インバータ)
6	インバータ	周波数制御(並列及び直列インバータ)
7		パルス幅制御
8		多重パルス幅制御
9		多重インバータの位相角制御
10	交流出力電圧	交流自動電圧調整器など。

表5 交流出力電圧の高調波低減方式 インバータ出力電圧波形は、インバータ変圧器出力の理想波形を示したものであり、交流フィルタの出力側では、正弦波に近い波形となる。

No.	高調波低減方式	インバータ出力電圧波形
1	多重インバータ方式+ 交流フィルタ	
2	タップ変圧器方式+ 交流フィルタ	
3	多重パルス幅制御方式+ 交流フィルタ	
4	交流フィルタだけ、又は 交流自動電圧調整方式	

を除去する方式が据付面積の縮小に効果的である。

自励式サイリスタインバータの信頼度は、MTBF(平均故障間隔)で既に数万時間の実績をもつと推定され、コンピュータの安定電源として使用されているが、重要システムの電源の場合には、インバータを複数台並列に接続し、1台が故

障しても電源の瞬断も生じない並列冗長システムがとられている。並列冗長システムの制御方式には、多重制御方式、個別制御方式などがあるが、周波数の基準発振器まで個別となったこの特集論文中の別稿で述べている「純個別制御方式静止形無停電定電圧定周波電源装置」は理想的に近い並列冗長システムの制御方式といえよう。

サイリスタインバータの制御回路は、トランジスタからICへと変遷してきたが、今後はシーケンス制御、故障診断回路を中心に、マイクロコンピュータの応用が進むと予想される。

#### 4 結 言

パワーエレクトロニクスの一翼を担っているサイリスタインバータ技術の展望について述べた。サイリスタ技術が世に出て以来既に満10年を経過し、実績的にもその信頼性が確立されつつある。

終わりに、この技術をここまで育成されたユーザー各位の御支援に対し深謝の意を表わすとともに、今後よりいっそうの御理解と御協力をお願いする次第である。

#### 参考文献

- 1) 恩田ほか4名：大容量GTOを使用したPWMインバーター，昭52年電気学会全国大会 No. 659, 827 (昭52-7)
- 2) 諸星ほか3名：電力用GTOを使用したVVVFインバーター，昭52年電気学会全国大会，No. 685, 861 (昭52-7)
- 3) 田中ほか3名：大容量採用の誘導電動機駆動用可変周波電源，昭52年電気学会全国大会，No. 751, 958 (昭52-7)
- 4) M. Okamura, et al.: The Current Status of the Power Gate Turn-off Switch, 1977 IEEE IAS International Semi-Conductor Power Converter Conference, 39-49(1977)
- 5) 大橋ほか3名：大電力ゲートターンオフサイリスタ，昭52年電気学会全国大会，No. 509, 637 (昭52-7)
- 6) 宇田川ほか4名：1200V 50A ゲート制御サイリスタ，昭52年電気学会全国大会，No. 649, 811 (昭52-7)
- 7) S. Saeki: Structures and Characteristics of 400A-300V Monolithic High Power Transistors, 1975 IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, 274~281
- 8) D.E. Houston, et al.: A Field Terminated Diode, IEEE Trans. on Electron Devices, ED-23, 8 (Aug. 1976)
- 9) R.H. Cushman: Gate-Controlled Switches, EDN, 63~70 (March 15, 1970)
- 10) J.D. Harnden: Power Semiconductors: looking ahead, IEEE Spectrum, 40~45 (Aug. 1977)