

GTOサイリスタとその周辺デバイス

Gate Turn-Off Thyristors and Their Circumferential Devices

古賀健司* Kenji Koga

宮 寿一* Hisaichi Miya

省エネルギーの一環として、インバータによる電動機駆動方式が脚光を浴びている。従来、インバータのスイッチング素子としては、サイリスタ、パワートランジスタが用いられているが、GTOサイリスタは高速、高耐圧で転流回路が不要であるため、装置の小形化、高効率化に適しているという点で特に注目されているものである。日立GTOサイリスタは、アノードエミッタ短絡形の構造を採用することによって、大幅な特性の向上を図っており、中容量GTOサイリスタは400Vラインに適する耐圧1,200Vで、大容量GTOサイリスタは更に耐圧を上げシリーズ化している。

本論文では、GTOサイリスタの機能、サイリスタ、パワートランジスタとの比較、日立GTOサイリスタシリーズの紹介及びその周辺デバイスとして高速ダイオードの紹介を行なう。

1 緒 言

近年、電力制御用半導体素子としてGTO(ゲートターンオフ)サイリスタが注目されている。電力制御用半導体素子としては、従来から使用されているサイリスタや近年高耐圧化が進んできたトランジスタがあるが、GTOサイリスタは自己消弧機能による転流回路の省略化に加えて、高耐圧・大電流の素子の製作が比較的容易であることから、産業用素子として注目されている。

一方、半導体素子応用分野では昭和48年のオイルショック以来、省エネルギー、省資源化が進み、GTOサイリスタはインバータ用として、無停電電源装置¹⁾、電動機駆動用可変周波電源装置²⁾などに、その地位を築きつつある³⁾。

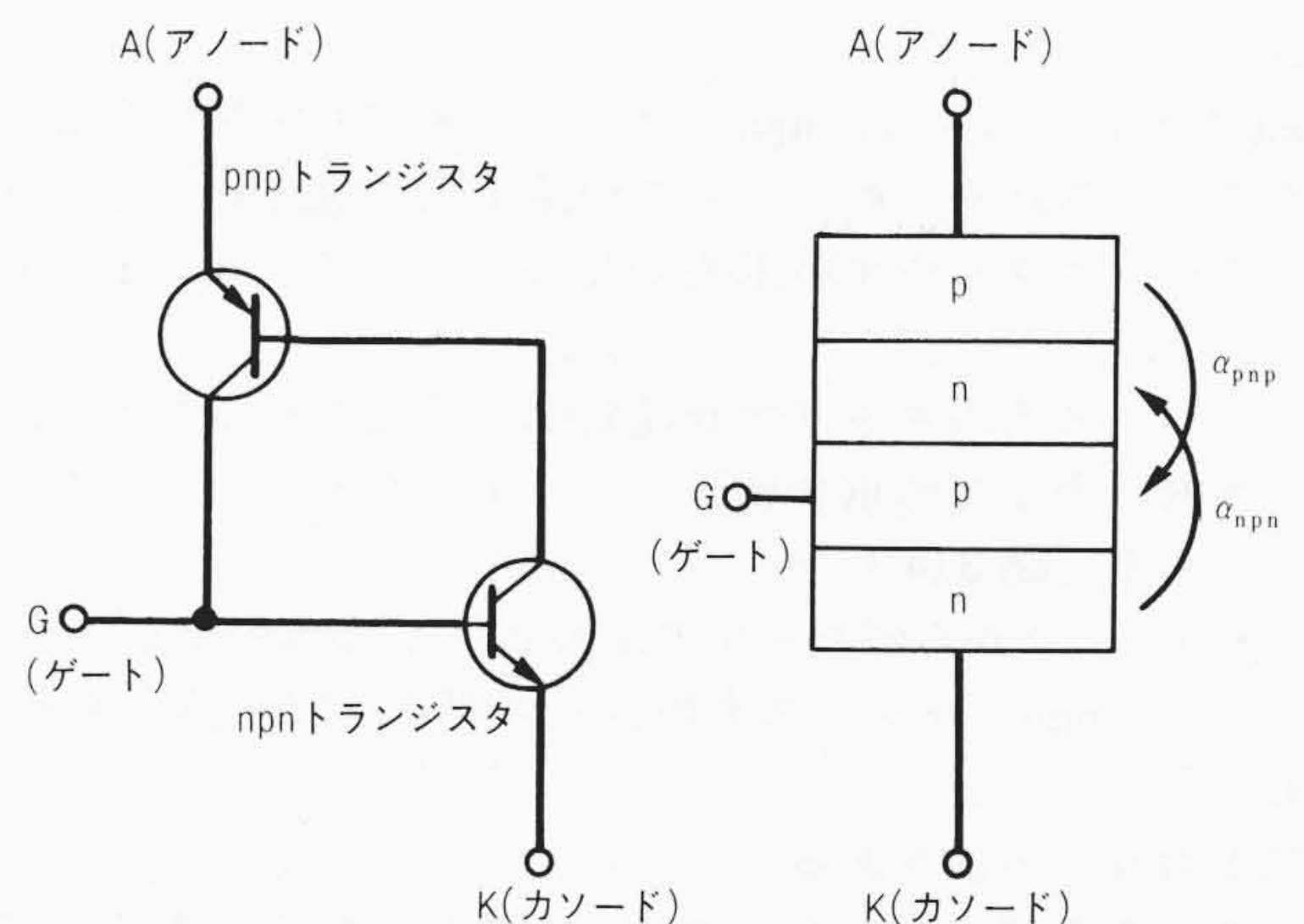
本稿では、GTOサイリスタの機能と特徴を述べ、日立GTOサイリスタシリーズについて紹介し、合わせてGTOサイリスタの周辺デバイスとして、日立の高速ダイオードについても紹介する。

2 GTOサイリスタの機能と特徴

2.1 GTOサイリスタ

一般のサイリスタは、基本的に図1に示すようにpnnp 4層から成る素子で⁴⁾、pnpトランジスタ、nnpトランジスタに分けて考えることができる。二つのトランジスタのコレクタ電流は、他のトランジスタのベース電流となっており、トランジスタのベース接地電流増幅率 α_{pnp} 、 α_{npn} の和が1以上になるとゲート電流を取り去っても、オン状態を維持する。

次に、ゲート電流をカソードからゲートへ流し、nnpトランジスタ、pnpトランジスタをターンオフさせる。したがって、サイリスタもターンオフされることになる。ところが一般のサイリスタは、ゲート電流によりターンオフすることはできない。これは図2(a)に示すように、一般のサイリスタはゲートがカソード面全体に配置されていないため、ゲート近傍しかターンオフすることができず、ゲートから遠い場所のカソードはターンオフできない。これに対しGTOサイリスタは、同図(b)に示すように、幅の狭いカソード面の周りにゲートが配置され



注：略語説明 α_{pnp} (pnpトランジスタの電流増幅率)
 α_{npn} (nnpトランジスタの電流増幅率)

図1 サイリスタの構造 サイリスタはpnpトランジスタ、nnpトランジスタの接続で考えることができる。

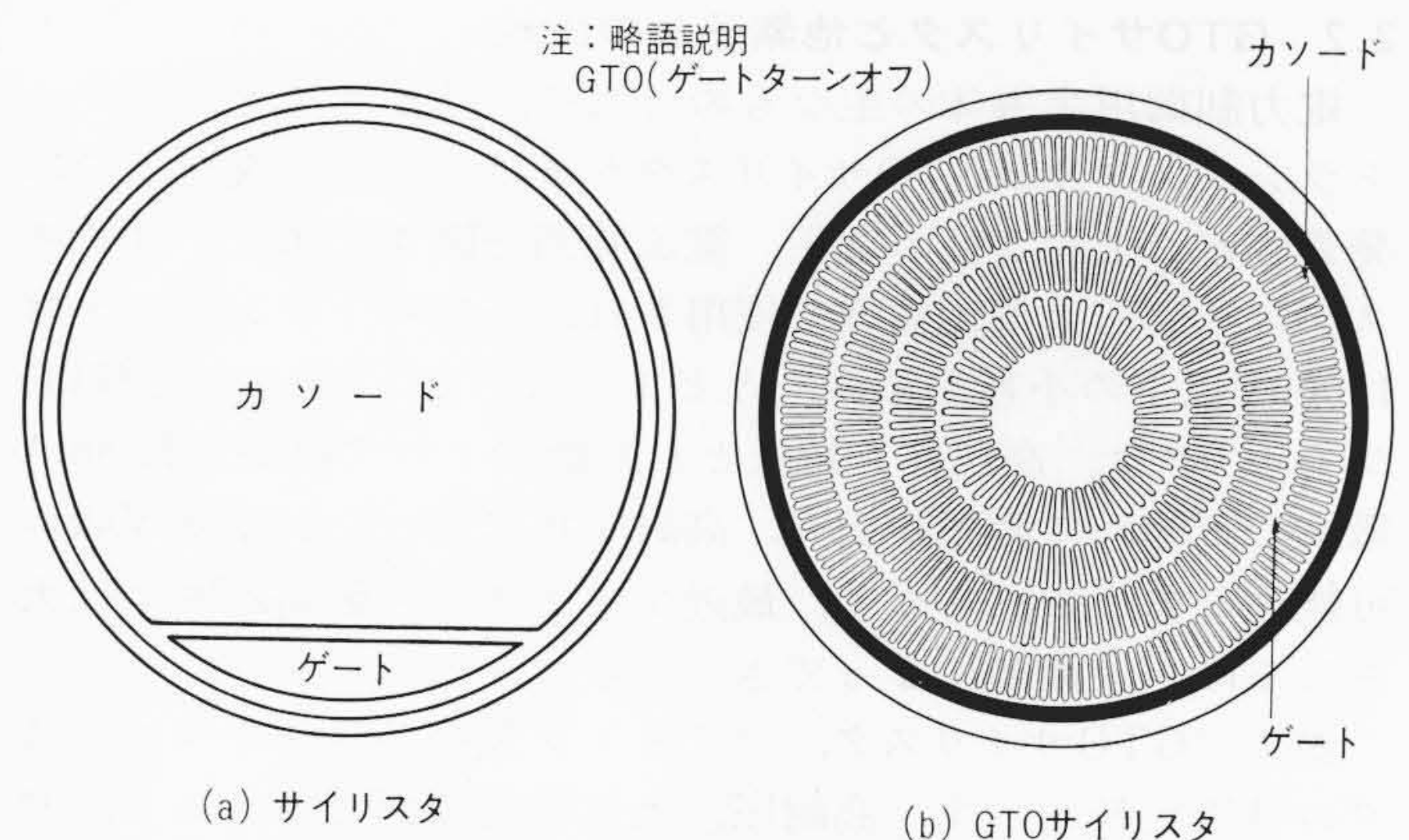


図2 サイリスタ、GTOサイリスタカソードパターン GTOサイリスタはカソードの周りにゲートを配置し、ゲート電流で遮断できるように工夫されている。

* 日立製作所日立工場

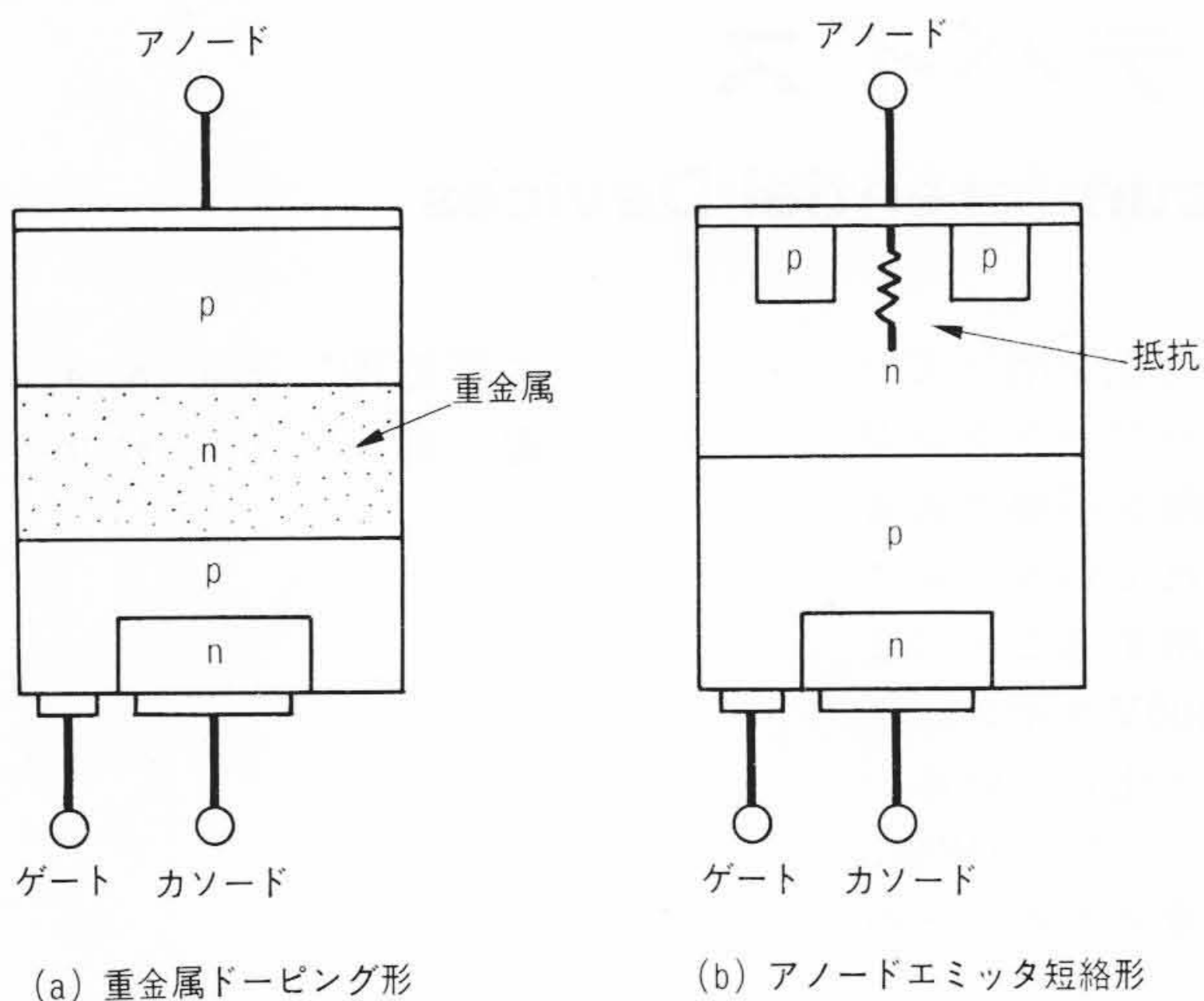


図3 2種類のGTOサイリスタ アノードエミッタ短絡形は、重金属を使用せずにGTOサイリスタを実現している。

ており、ゲート電流によりターンオフできるように工夫してある。

pnpトランジスタは、npnトランジスタがオフされた後、従属的にオフされるため、ベース接地電流増幅率 α_{pnp} を小さくし、ターンオフしやすい工夫が施されている。 α_{pnp} を小さくするには、

- (1) nベース内のキャリア到達効率を低減させるために、nベース内に金などの重金属によるライフタイムキラーをドーピングする〔図3(a)〕。
- (2) pエミッタからのキャリア注入効率を低減させるために、アノードとpnpトランジスタのベース間に抵抗を挿入する〔同図(b)〕。

の二とおりの方法がある。

前者の重金属をドーピングする方法は、従来行なわれてきた方法で、(1)オン電圧が高くなる、(2)漏れ電流が増加する、(3)重金属の不均一のため歩留まりが低い、などの欠点があった。このため日立製作所は、重金属を使用しない後者のアノードエミッタ短絡形を採用⁵⁾することによって、前述のいずれの欠点をも解決した高速・低損失仕様の画期的なデバイスを完成することができた。

2.2 GTOサイリスタと他素子との比較

電力制御用半導体の主なものとして、サイリスタ、パワートランジスタ及びGTOサイリスタが挙げられる。現在までに発表された上記3種の電圧、電流範囲を図4に示す。サイリスタは、高圧大電流領域で使用され、パワートランジスタは1,000V以下の小容量領域にとどまっている。これに対しGTOサイリスタは、高速性を特長とした数アンペア級から1,000A級までと極めて範囲が広く、高耐圧化についても4,500V級の可能性が実証されるなど、最近ますますその製品範囲は拡大される傾向が顕著になってきている。

表1にGTOサイリスタ、サイリスタ及びパワートランジスタの特徴比較を示す。高耐圧、大電流化の面で考えると、サイリスタ、GTOサイリスタ、パワートランジスタの順に有利であり、制御面で考えると、GTOサイリスタ、パワートランジスタがサイリスタより転流回路が不要なため有利である。また、保護方式はサイリスタがヒューズ、パワートランジスタが自己遮断で行なうが、GTOサイリスタは大容量はヒューズ又は自己遮断、中容量は自己遮断で行なう点が特徴である。

スイッチングスピードは、GTOサイリスタが速く、次いでパワートランジスタ、サイリスタの順になる。

以上の点から、中・小容量応用にはGTOサイリスタ、パワートランジスタが、大容量応用にはGTOサイリスタ及びサイリスタが適していると言える。

3 日立GTOサイリスタ

図5にGTOサイリスタの開発経緯を示す。当初は電流容量が少ないことから、スイッチングレギュレータ、テレビジョン電源回路用の高速スイッチング素子として使われていたが、

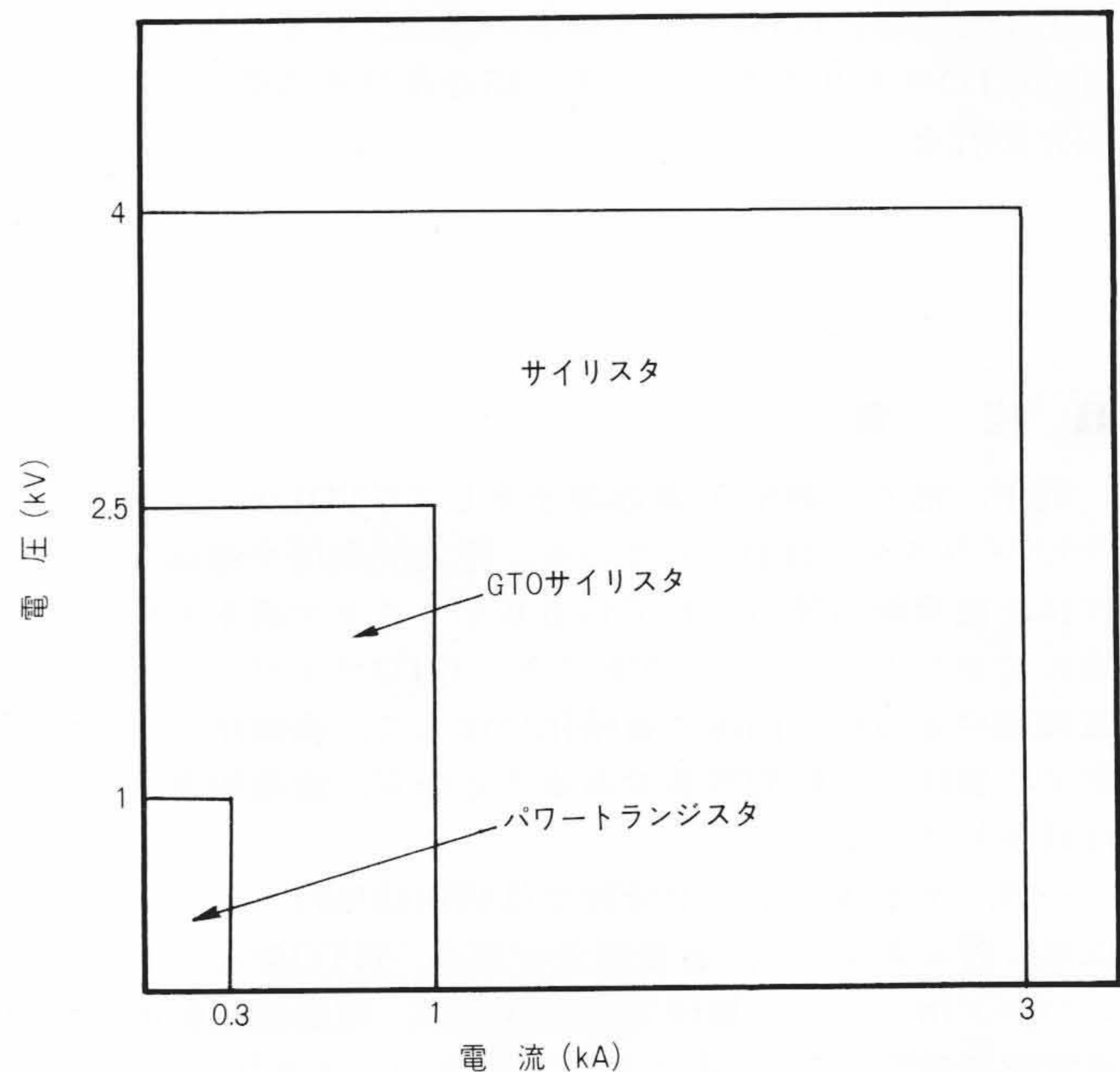
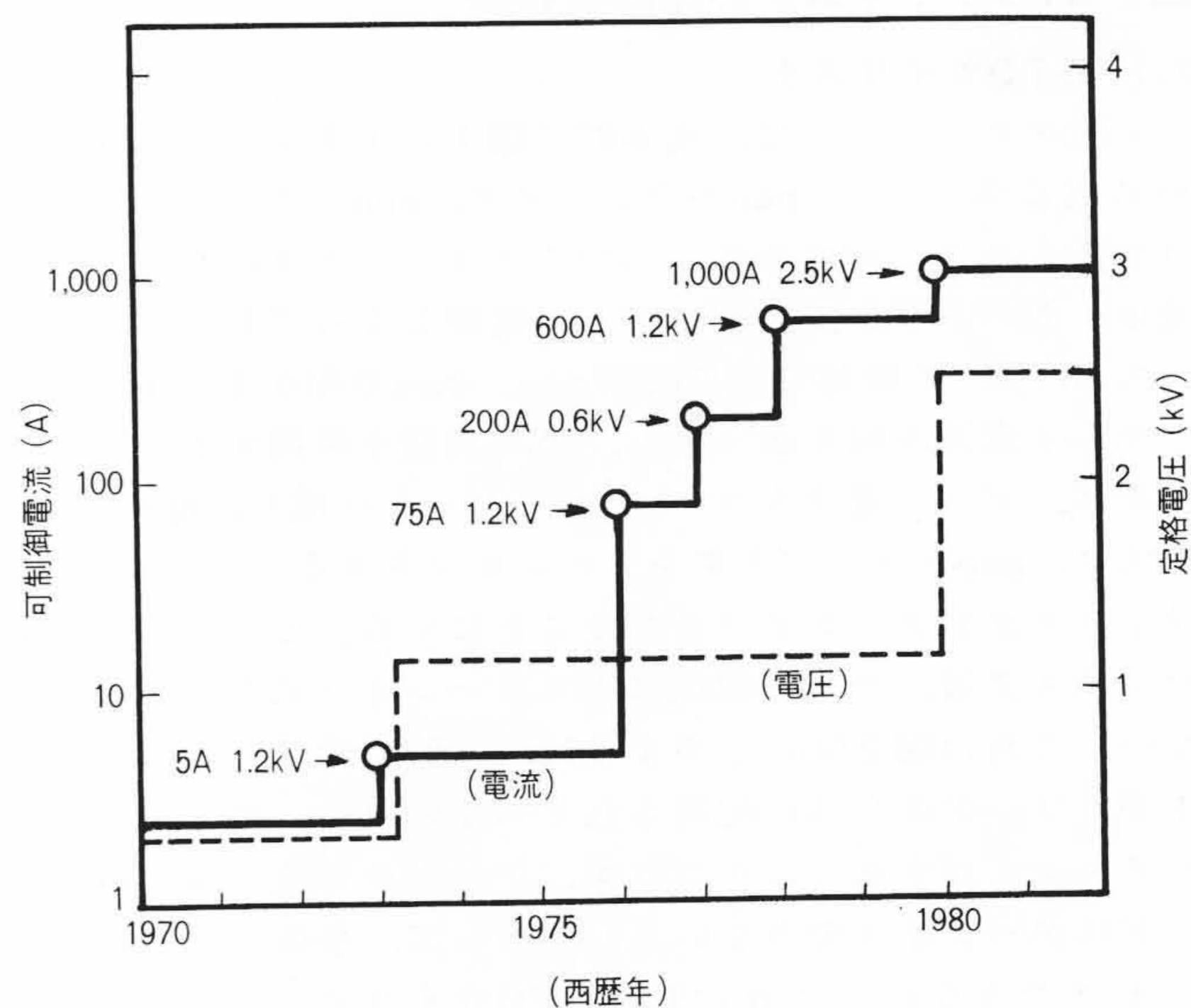


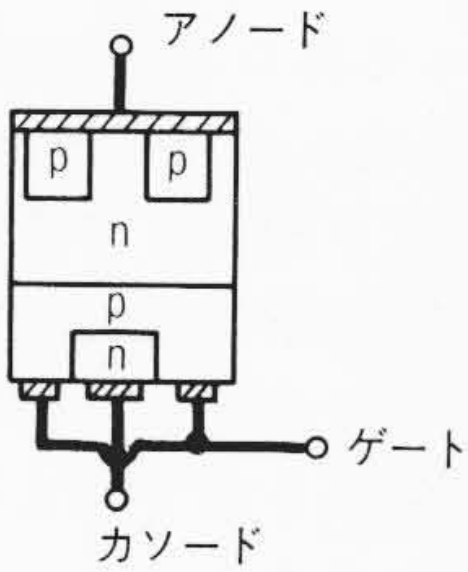
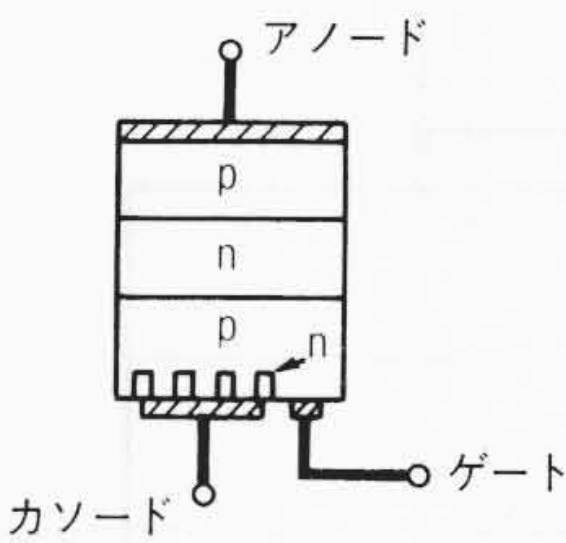
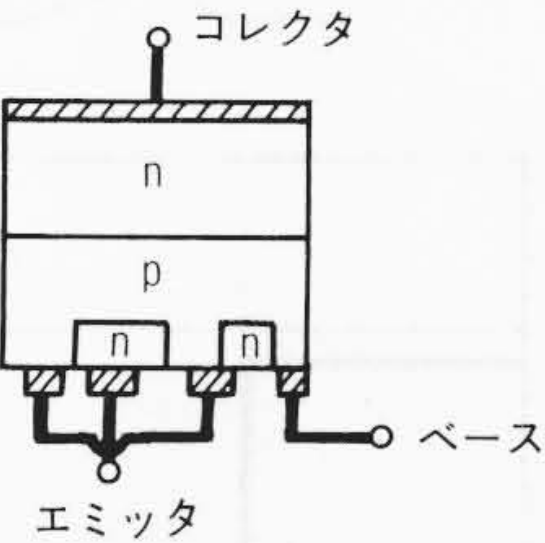
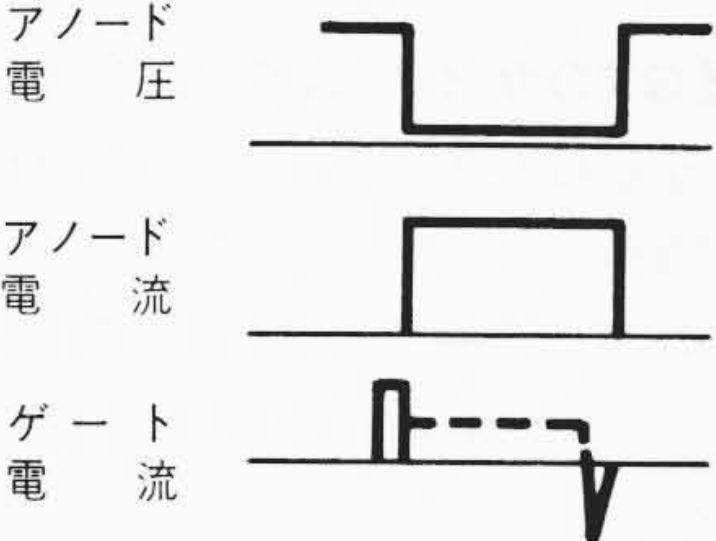
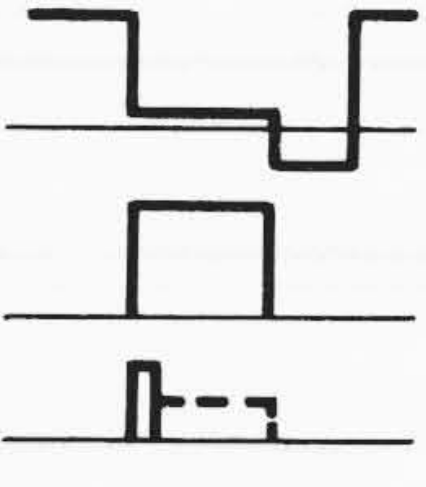
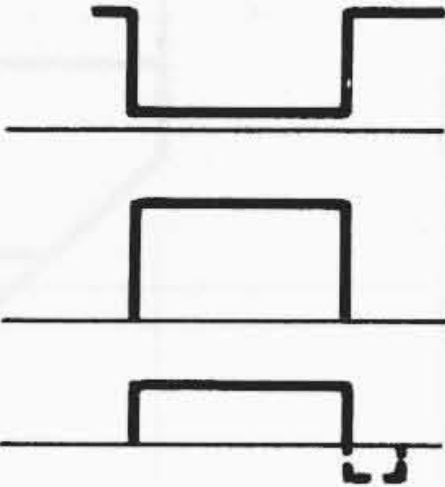
図4 サイリスタ、GTOサイリスタ、パワートランジスタの電圧、電流範囲 GTOサイリスタはサイリスタ、パワートランジスタの中間に位置している。



注：— は電流の、--- は電圧の各推移を示す。

図5 GTOサイリスタの可制御電流、定格電圧の推移(国内) 省電力を指向したインバータ用として大電流、高耐圧GTOサイリスタが注目されている。

表1 GTOサイリスタ、サイリスタ及びパワートランジスタの特徴比較 GTOサイリスタは、パワートランジスタの機能とサイリスタの容量を兼ね備えている。

項目		G T O サ イ リ ス タ (アノードエミッタ短絡形)	サ イ リ ス タ (高 速 形)	パ ワ ー ト ラ ン ジ ス タ (ダーリントン形)
素 子 構 造				
電 圧 , 電 流 波 形				
ス イ ッ チ ン グ 操 作	タ ー ン オ ン	ゲートにトリガ電流を流す。	ゲートにトリガ電流を流す。	ベース電流を流す。
	オ ン の 維 持	アノード電流が保持電流以上あればゲート電流不要。	アノード電流が保持電流以上あればゲート電流不要。	ベース電流を流し続ける。
	タ ー ン オ フ	ゲートに逆電流を流す。	アノード電流を外部で切るか、強制転流回路による逆電圧印加。	ベース電流を零にする。
タ ー ン オ フ 時 間		5~10μs	15~50μs	10~20μs
オ ン 電 圧		2~3.8V	1.5~2.5V	2~3V
過 電 流 保 護		可制御電流内でゲート逆バイアス遮断又はヒューズによる保護協調	ヒューズによる保護協調	ASO領域内でベース電流遮断
特 徴		1. ゲート電流の極性によりオン、オフできる。 2. 高速スイッチング 3. 高耐圧、大電流化は比較的容易。	1. 高耐圧、大電流化容易。 2. 中速スイッチング 3. 自己遮断能力なし。	1. ベース電流の制御によりオン、オフできる。 2. 高速スイッチング 3. 高耐圧、大電流化困難。

注：略語説明 ASO(安全動作領域)

表2 中容量GTOサイリスタの定格, 特性 400Vラインに適用できるように、すべて耐圧1,200Vでシリーズ化している。

項 目		記 号	単 位	形 式				
				GFT20B12	GFT50B12	GFF90B12	GFF200E12	GFF300E12
最 大 定 格	ピーク繰返しオフ電圧	V_{DRXM}	V	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
	繰返し可制御オン電流	I_{TCM}	A	20	50	90	200	300
	実 効 オ ン 電 流	$I_{T(RMS)}$	A	7	18	30	70	100
	サージオン電流	I_{TSM}	A	65	180	400	500	700
	ピークゲート逆電圧	V_{GRM}	V	13	13	13	13	15
	接 合 温 度	T_j	℃	-40~+125	-40~+125	-40~+125	-40~+125	-40~+125
電 気 的 特 性	最 大 オ ン 電 圧	V_{TM}	V	3.0	3.1	2.8	3.8	3.2
	直流ゲートトリガ電流	I_{GT}	mA	150	300	400	600	800
	ターンオン時間	t_{gt}	μS	4	4	4	4	6
	ターンオフ時間	t_{gq}	μS	6	6	6	6	12
	熱 抵 抗	$R_{th(j-c)}$	℃/W	2.0	1.0	0.6	0.35	0.3
パ ッ ケ ー ジ				TO-66	TO-3	TO-3フラットベース	大形TO-3フラットベース	大形TO-3フラットベース

近年は大電流、高耐圧化に伴い、省電力を指向したインバータ用として注目されている。以下に日立製作所のGTOサイリスタについて紹介する。

3.1 中容量GTOサイリスタ シリーズ

表2に中容量GTOサイリスタの定格, 特性を示す。このクラスの主な特長は、

- (1) カソード面にモート(溝部)を形成し、これにガラスを入れ、シリコン-ガラス界面の最大電界強度低減による高耐圧化の実現
- (2) 適切なアノードエミッタ短絡抵抗の実現である。
- 耐圧は交流400Vラインまで使用できるように、すべて1,200V

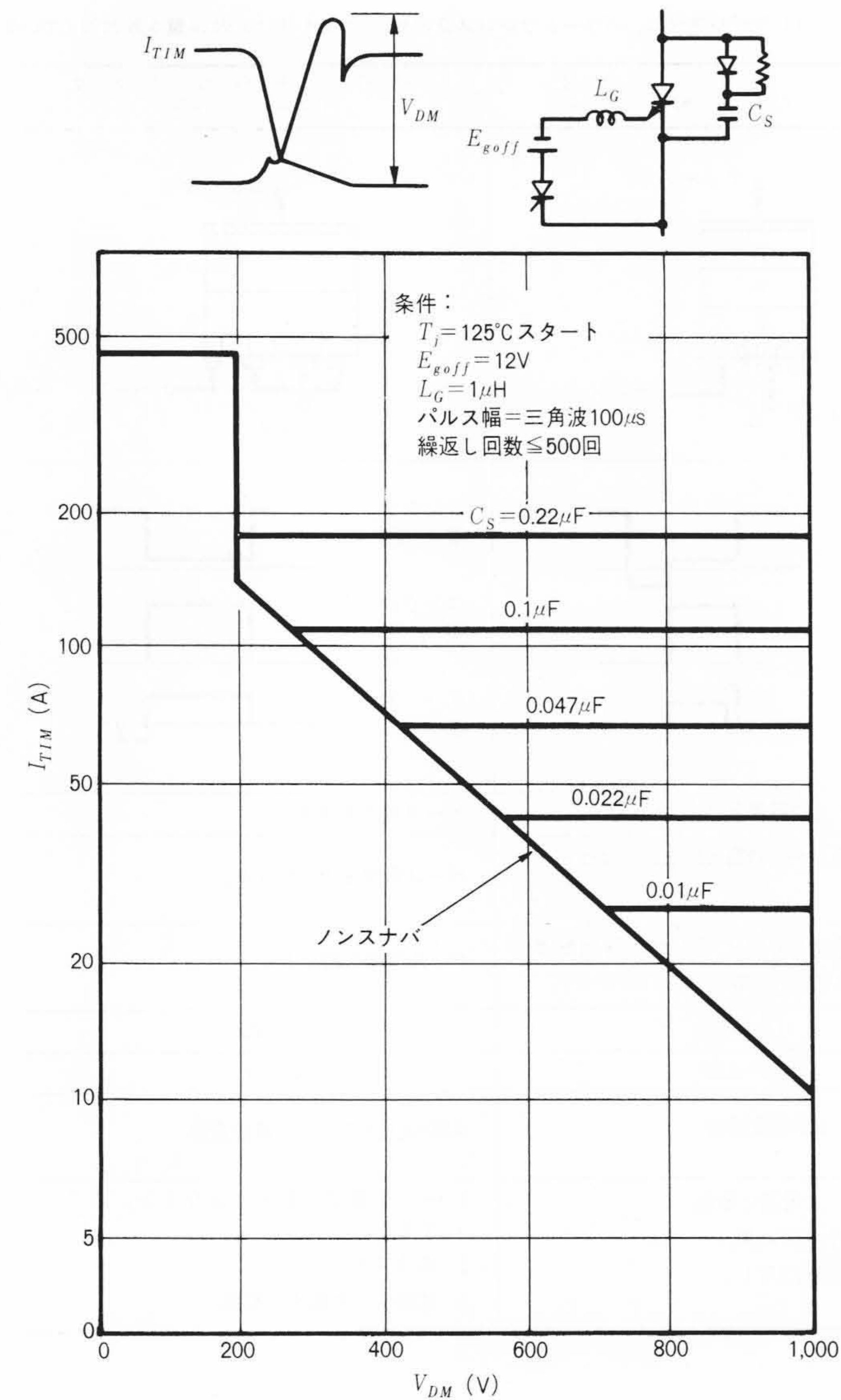


図6 GTOサイリスタの非繰返し可制御電流(GFF90B12) スナバコンデンサを選ぶことにより、過電流保護に使用することができる。

表3 大容量GTOサイリスタの定格、特性 可制御電流及び耐圧を上げている。

項 目		記 号	単位	形 式		
				GFP 600B12	GFP 600C16	GFP 1000B25
最大 定格	ピーク繰返しオフ電圧	V_{DRXM}	V	1,200	1,600	2,500
	繰返し可制御オン電流	I_{TCM}	A	600	600	1,000
	実 効 オ ン 電 流	$I_{T(RMS)}$	A	220	270	400
	サージオン電流	I_{TSM}	A	4,500	6,000	7,000
	ピークゲート逆電圧	V_{GRM}	V	13	16	16
	接 合 温 度	T_j	℃	-40～ +125	-40～ +125	-40～ +125
電気的 特性	最 大 オ ン 電 圧	V_{TM}	V	2.1	2.3	2.3
	直流ゲートトリガ電流	I_{GT}	A	3.0	1.0	1.5
	ターンオン時間	t_{gt}	μS	8	10	10
	ターンオフ時間	t_{gq}	μS	20	20	30
	熱 抵 抗	$R_{th(j-f)}$	℃/W	0.121	0.083	0.049
パ ッ ケ ー ジ				平 形	平 形	平 形

としている。過電流に対する保護はGTOサイリスタの特性を生かし、ヒューズ協調よりも可制御電流以内でGTOサイリスタを遮断する方法が推奨される。

また、回数に制限があるが非繰返しで可制御電流の約2倍(形式によって異なる。)の電流を遮断することができるので(これを非繰返し遮断電流と言う。)、過電流保護には非繰返し可制御電流を利用して自己遮断を行なうほうがよい。図6に非繰返し可制御電流の規定例を示す。これは、スナバコンデンサをパラメータに、使用できる遮断電流と遮断時のピーク電圧との関係を示したものである。スナバコンデンサの容量は大きく取ることによって、大きな電流まで遮断することができる。

3.2 大容量GTOサイリスタ シリーズ

表3に大容量GTOサイリスタの定格、特性を示す。このクラスの主な特長は、

- (1) 平形構造とし、サージ電流、熱抵抗の特性向上を図った。
 - (2) 可制御電流及び耐圧の増大を図った。
- ことである。

一般に可制御電流が大きくなると、素子耐圧を増大する必要がある。これは、ターンオフ時の電圧のはね上がり、遮断電流に比例して増大するからである(図7参照)。

4 GTOサイリスタの周辺回路、周辺デバイス

GTOサイリスタの代表的な応用回路を図8に示す。GTOサイリスタのアノード〜カソード間に並列に取り付けてあるコンデンサ、抵抗及びダイオードは、スナバ回路と呼ばれているものである。また、GTOサイリスタと逆並列に接続されているダイオードは、フリーホイーリングダイオードと呼ばれ、インバータなどによく用いられる素子である。スナバ回路の役割はターンオフ時の再印加電圧上昇率を抑え、ASO(安全動作領域)内でターンオフさせるものである。またフリーホイーリングダイオードは、負荷電流の環流及び電源回生時に使用される。これらスナバダイオード、フリーホイーリングダイオードとも、高速性能が要求される。これは次の理由による。

- (1) スナバダイオード

図9はGTOサイリスタのターンオフ時の各部の波形代表例である。スナバダイオードに流れる期間は数〜数十マイクロ秒と短く、スイッチング損失がオン状態損失に比べ大部分を占める。このため、順回復特性、逆回復特性の速い素子とする必要がある。

- (2) フリーホイーリングダイオード

フリーホイーリングダイオードに電流が流れているとき、対アームのGTOサイリスタがターンオンすると、フリーホイー

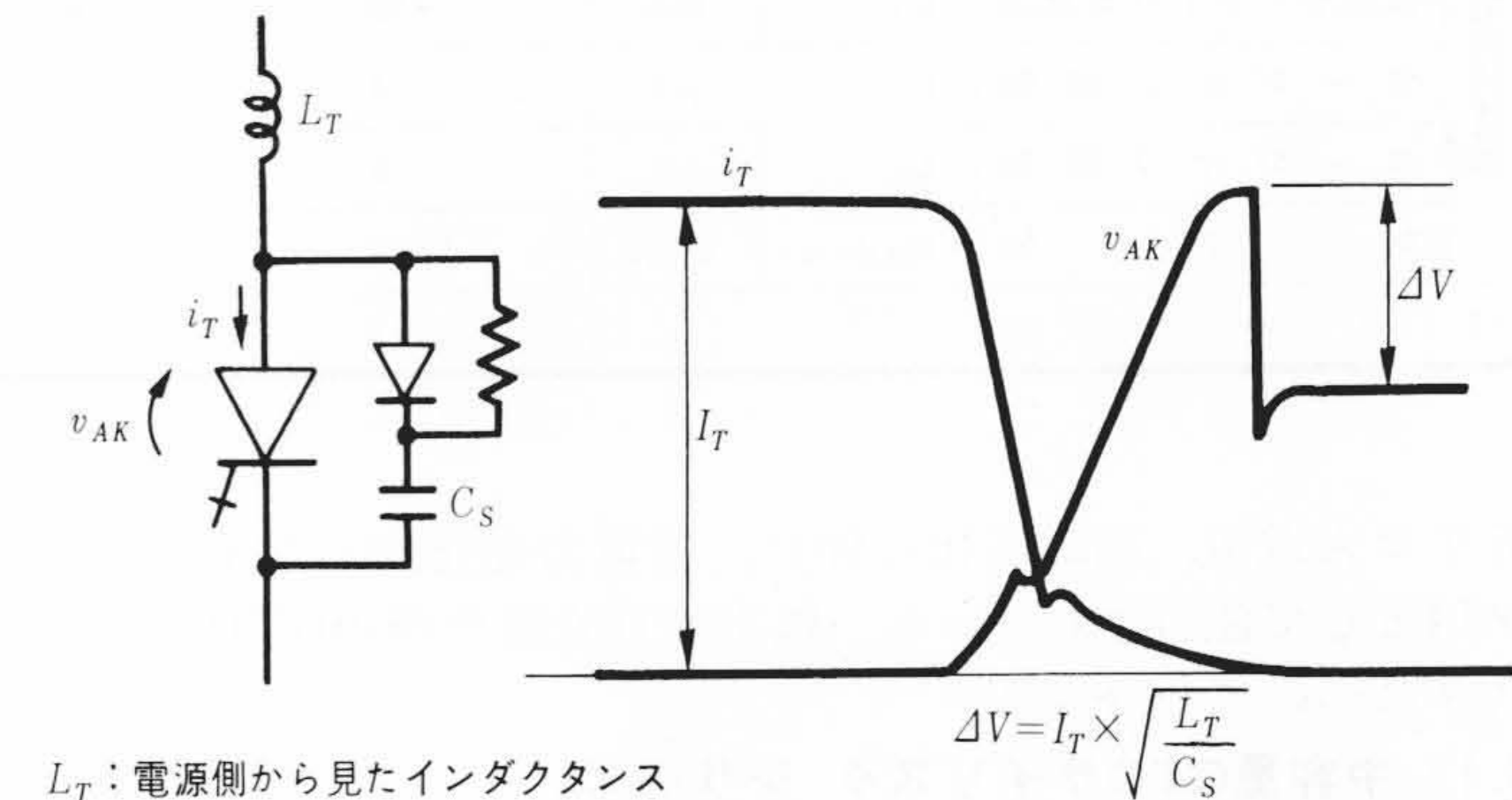


図7 GTOサイリスタのターンオフ時の波形 遮断するアノード電流が大きくなると電圧のはね上がりも増える。

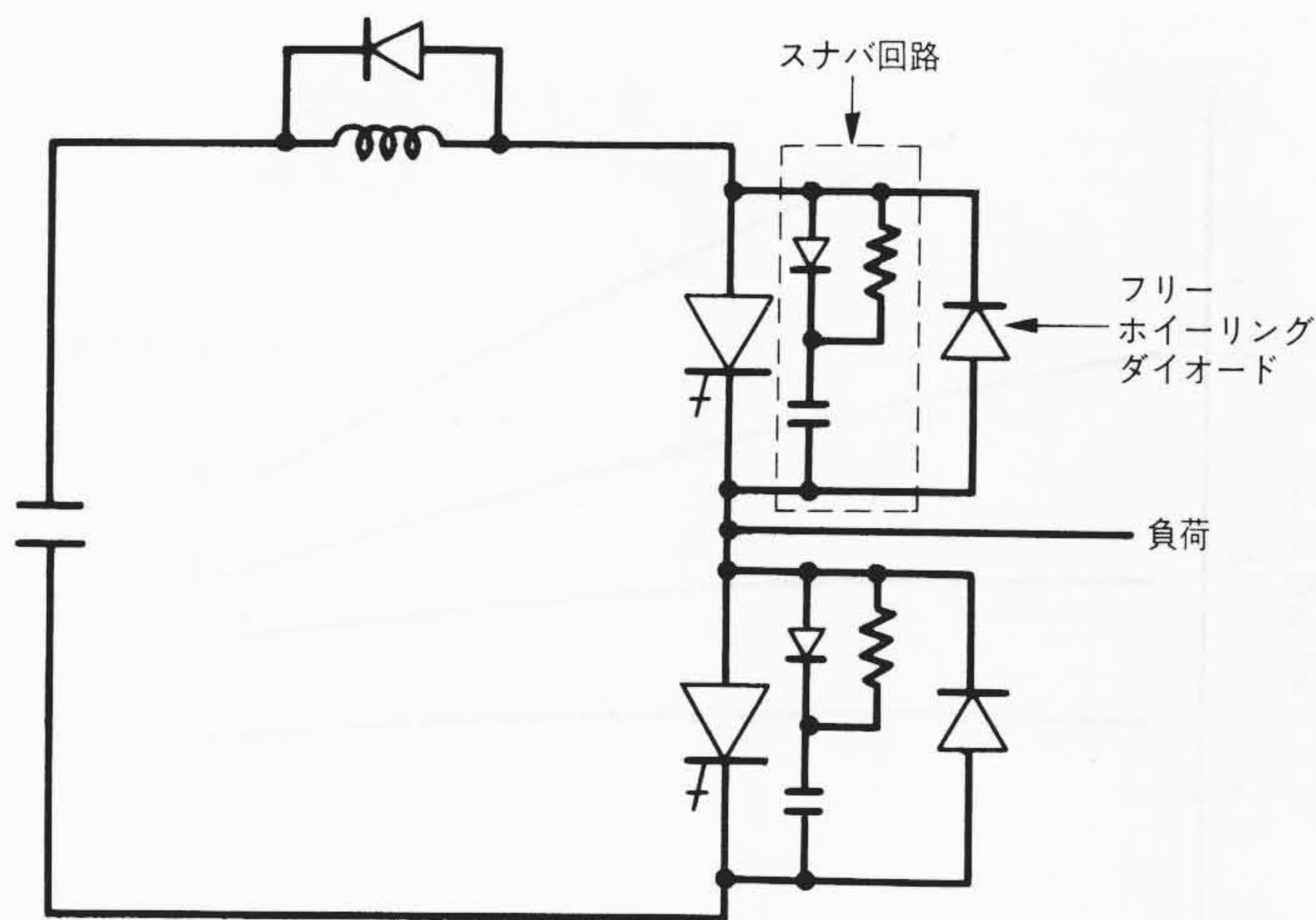


図8 GTOサイリスタの応用回路例 GTOサイリスタには通常スナバ回路を取り付け、フリーホイーリングダイオードが使用される。

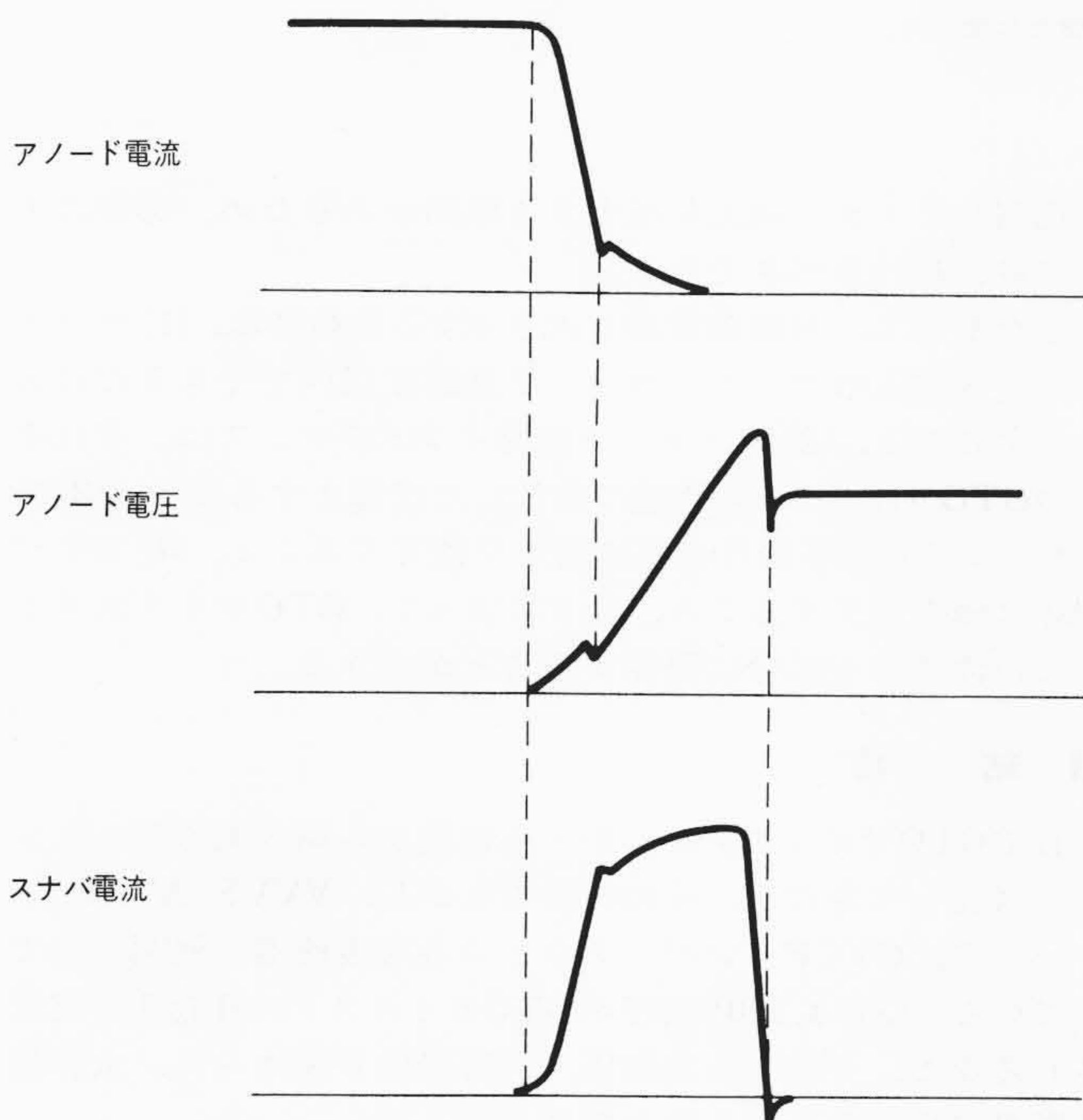


図9 GTOサイリスタターンオフ時のスナバ電流波形 スナバ電流は短時間に電流が流れるので、スイッチング損失の少ない高速ダイオードを用いる必要がある。

ーリングダイオードが逆回復するまで、上下アームが短絡状態になり、大きな電流が流れる。このため、装置の誤動作の原因になり、また損失も大である。この電流を少なくするためには、逆回復時間の速い素子とする必要がある。

日立製作所の高速ダイオードの主な仕様を表4に示す。

5 GTOサイリスタ使用上の留意点

GTOサイリスタは、スイッチング速度が速い、電流を自己遮断できる、という特長により一般のサイリスタに比べ高周波用途のスイッチング素子として使用される場合が多い。この場合の使用上の留意点について下記に述べる。

5.1 ターンオン時

GTOサイリスタをターンオンする場合、ゲート電流とスイッチング周波数の関係に留意する必要がある。その一例としてアノード電流の立上り $200\text{A}/\mu\text{s}$ 、アノード電流ピーク値 120A の場合のゲート電流とスイッチング周波数の関係を図10に示す。一般にスイッチング周波数が低い場合は、ゲート電流の値は小さくてよいが、スイッチング周波数が高くなるとアノード電流が素子全面に広がらないうちに再びスイッチングされ、狭い面積に電流が集中し熱逸走を起こすことが懸念されるが、同図に見られるようにゲート電流を大きくするかゲート電流の立上りを速くすることによってこの問題は解決され、適用周波数帯域の向上を図ることができる。

5.2 ターンオフ時

GTOサイリスタのスイッチング特性は、今までにも調査、報告されており^{6),7)}、GTOの可制御電流はGTO周りの条件によって大幅に変化することが知られている。ここでは、可制御電流がどのような条件で変化するかを示し、ターンオフ時の現象について考察する。

(1) 図11は90A級の中容量GTOサイリスタのオフゲート回路インダクタンスと可制御電流の関係を示すものであるが、オフゲート電源電圧が高くなると、またオフゲート回路インダクタンスが大きくなると可制御電流は大きくなる傾向がある。これは、フォール期間中にゲート～カソード間がアバランシェを起こし、ゲート電流を流し続けることによる。ただし、ターンオフ後のオフゲート電源電圧はゲート～カソード間に逆バイアスとして印加されるので、ゲート・カソード逆耐圧以上のオフゲート電源電圧は避けなければならない。また、オフゲート回路インダクタンスを必要以上に大きくすることは、ターンオフ時間が延びるため実用上好ましくない。なお、大容量GTOサイリスタについては、オフゲート電流の立上り

表4 日立高速ダイオードの定格、特性 高耐圧、高速のためフリーホイーリングダイオードに適している。

項 目		記 号	単 位	形 式			
				DFF20B12	DFF50B12	DFS80B17	DFP500A25
最大 定格	ピーク繰返し逆電圧	V_{RRM}	V	1,200	1,200	1,700	2,500
	平 均 順 電 流	$I_{F(AV)}$	A	20	50	80	500
	サージ順電流	I_{FSM}	A	200	500	850	5,500
	I^2t 限 界 値	I^2t	A ² S	160	1,000	1,300	150,000
	接 合 温 度	T_j	℃	-40～+125	-40～+125	-40～+125	-40～+125
電 氣 的 特性	最 大 逆 電 流	I_{RRM}	mA	0.1	0.1	20	50
	最大順電圧降下	V_{FM}	V	2.0	1.8	2.2	1.6
	逆 回 復 時 間	t_{rr}	μS	1.5	1.5	2.4	5.0
	熱 抵 抗	$R_{th(j-c)}$	℃/W	0.9	0.55	0.35	0.05
パ ッ ケ ー ジ			TO-66フラットベース	TO-3フラットベース	スタッド形	平 形	

値を所要の値に確保する必要があるため、ゲート回路の配線長は短くするよう設計上の配慮が必要となる。

(2) また、図12に見るようにスナバコンデンサ容量を大きくし、スナバ回路の配線インダクタンスを小さくしたほうが可制御電流は大きくとれる。これは、ターンオフ時の再印加電圧が低減されることによる。ただし、スナバコンデンサ容量

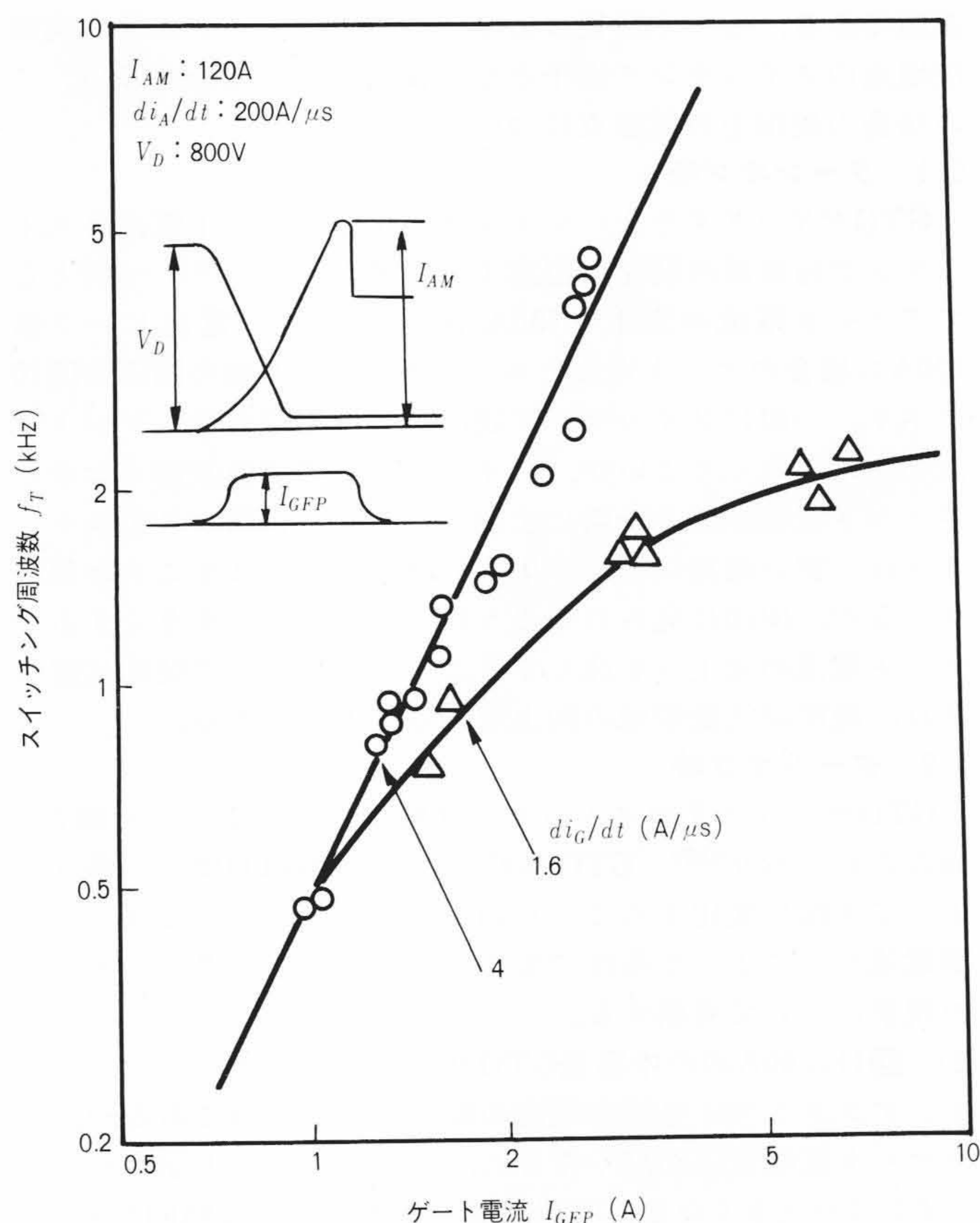


図10 ターンオン時のゲート電流とスイッチング周波数の関係 di_G/dt 及びゲート電流を増加させることによって、適用周波数帯域の向上を図ることができる。

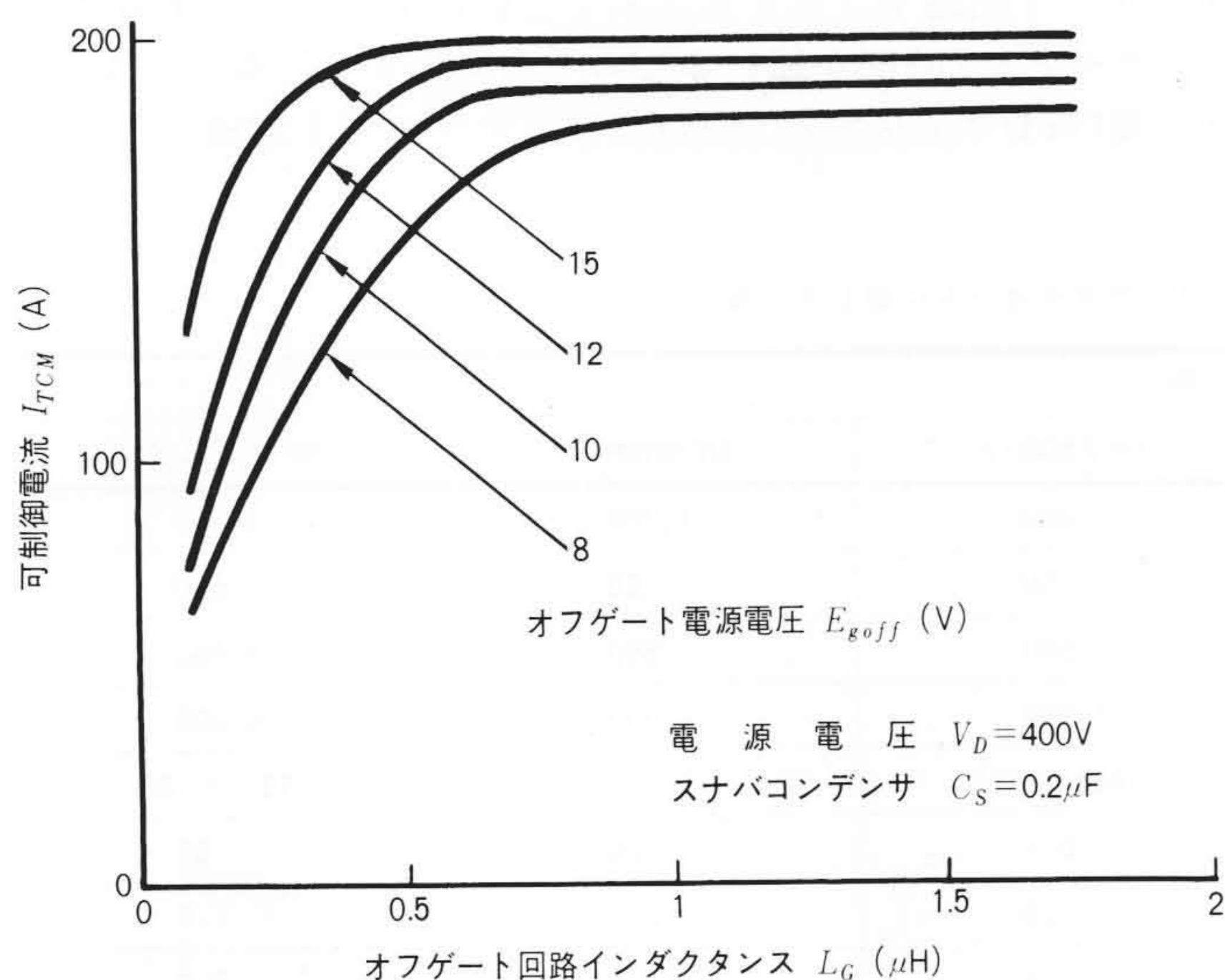


図11 可制御電流とオフゲート回路インダクタンスの関係 オフゲート電源電圧が高く、オフゲート回路インダクタンスが大きくなると、可制御電流は増える。

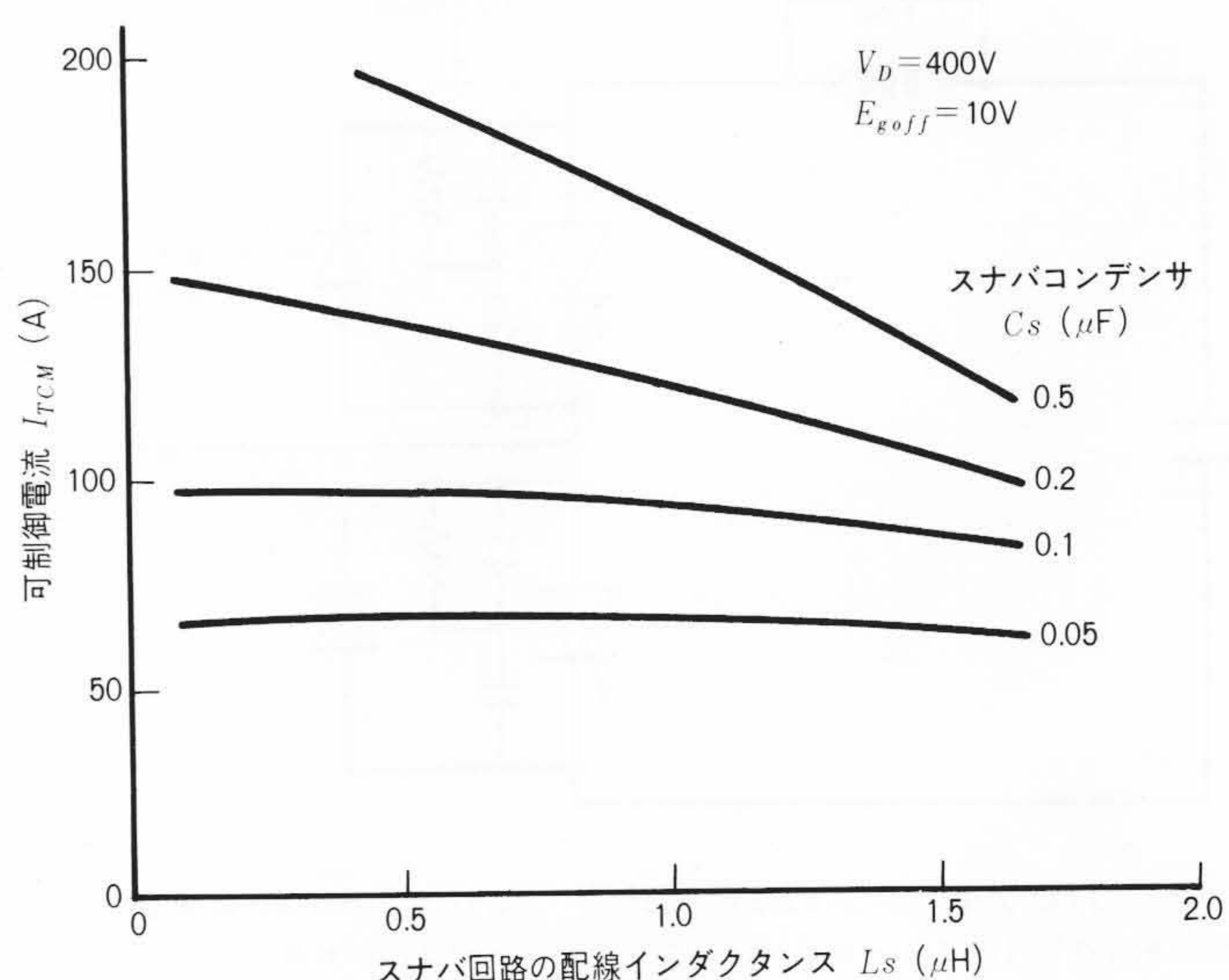


図12 可制御電流とスナバ回路配線インダクタンスの関係 スナバコンデンサ容量が大きく、スナバ回路配線インダクタンスが小さいと、可制御電流は増える。

に比例してスナバ損失が増大する傾向があるため、必要以上の容量は避けるべきである。

したがって、可制御電流を大きくするためには、(1) オフゲート電源電圧はゲート・カソード逆耐圧以内でできるだけ大きくすること、(2) オフゲート回路インダクタンスは、それぞれのGTOサイリスタの性能に合致した仕様とすること、(3) スナバコンデンサ容量は必要に応じた値とすること、(4) スナバ配線は極力短くすること、などによって、GTOサイリスタとしての性能を十二分に発揮することができる。

6 結 言

日立GTOサイリスタは、中・小容量から順次大容量へとシリーズ化してきたが、その特長を生かし、VVVF(AVAF)インバータ、CVCFインバータなどの各応用機器に展開されてきている。既に4,500V耐圧のGTOサイリスタの可能性が実証されるなど、今後とも高耐圧、大容量化が進められ、大容量の製品に応用されるものと期待される。

参考文献

- 1) Y. Yamazaki, et al.: GTO Applications for Power Supply Systems, Hitachi Review, Vol. 31, No. 4, p. 195~198 (1982-8)
- 2) A. Ishibashi, et al.: GTO Inverter for General Motor Drive, Hitachi Review, Vol. 31, No. 4, p. 185~188(1982-8)
- 3) 松田, 外: 交流電動機用PWMインバータへのGTOサイリスタの応用, 日立評論, 63, 6, 379~384(昭56-6)
- 4) 桜田, 外: 最近のGTOサイリスタ, 日立評論, 63, 6, 369~372(昭56-6)
- 5) 長野, 外: 電力用GTOのオン電圧・ターンオフ特性間トレードオフの改善, 電気学会研究会資料, EDD-78-74(昭53-9)
- 6) 福井, 外: GTOサイリスタのスイッチング特性, 日立評論, 63, 6, 373~378(昭56-6)
- 7) Y. Matsuda, et al.: Application Engineering of Gate Turn-Off Thyristors, Hitachi Review, Vol. 31, No. 4, p. 173~178 (1982-8)