直流送電用バルブのためのサイリスタ特性の最適化検討

正員 田 辺 茂 (東芝) , 正員 小 林 淳 男 (東芝)

Some Discussions on Thyristor Characteristic Optimization for HVDC Valves

Shigeru Tanabe, Member (Toshiba Corp.) Sumio Kobayashi, Member (Toshiba Corp.)

We have been developing thyristor valves for high-voltage dc transmission systems for more than 20 years. During this period, the size, power loss and reliability are dramatically improved and one of the technical advancements which support the improvements is to increase the voltage and current rating of thyristors.

However when thyristor voltage rating becomes higher than 6kV, increasing the voltage rating does not lead size and power loss reduction of the valve because of turn-off characteristic deteriorations.

This paper describes the method which can optimize the thyristor characteristics in such a way that the size and power loss of valves are minimized. Two different approaches for HVDC and back-to-back systems are presented.

キーワード: HVDC, BTB, サイリスタバルブ, サイリスタ特性

1. まえがき

電力需要の増大と新しい発電所建設が増々困難になっている状況から、電力系統の広域運用強化の重要性が高まり、海峡をケーブルで送電したり、あるいは互いに異なる周波数の交流系統を連系するため直流送電が採用されるようになり、今後もその適用が増加していくと予想される。

直流送電システムでは、交流送電にない特有な機能があるが、交直変換器が必要になるため、その損失、所要面積及びコストが直流の採用可否を決定づける重要な要因となる。環境問題に対しても多くの利点を有する直流送電の発展には、変換装置の低損失化と小型化が重要な開発目標となる。

国内における過去20年のバルブの容積と損失変遷の例を

まとめると図1及び図2のようになる。^{(1)・(2)・(3)}図から、単位変換容量当たりのバルブ容積は約1/3、損失は約1/2に減少していることが分かる。

バルブ容積の減少には、冷却方式を風冷から水冷に変えたこと及び、バルブ構造の多重化(4重バルブ構造)が大きく寄与している。更には、サイリスタの大容量化も大きくバルブ容積の減少に寄与してきた。図3にサイリスタの大容量化の変遷を示す。この20年余りで、電圧定格は3.2倍、電流定格は7倍になった。一方、損失はサイリスタの大容量化やバルブアレスタの保護レベル低減によるサイリスタ使用数の低減が主要な要因となり減少してきた。

今後更に、バルブ容積の減少を図るためには、絶縁及び耐震設計の改善が必要である。一方、容積減少と損失低減の両方に対して有効な手段として、サイリスタの大容量化

図1 バルブ容積の変遷
Fig.1 Changes of Valve Volume

図2 バルブ損失の変遷
Fig.2 Changes of Valve Power Loss

図3 サイリスタ大容量化の変遷
Fig.3 Changes of Thyristor Ratings

図4 バルブモジュール回路例
Fig.4 Circuit Diagram of a Valve module

と特性改善がある。
筆者らはサイリスタバルブの更なる小型化・低損失化を実現するため、従来あまり検討されていなかった互いにトレードオフの関係にあるサイリスタ特性の最適化について検討した。

すなわち、100mmφから150mmφのシリコンウェハを使用して、直流送電及びBTB用に最適な特性を有するサイリスタの実現を図るため、バルブの外形及び損失を最小にするためのサイリスタ特性を検討した。直流送電システム及び、BTBシステムそれぞれにつき、バルブの小型化、低損失化のためのサイリスタ特性の最適化手法を明らかにすると共に、その具体例を示す。

2. バルブの小型化・低損失化の課題

サイリスタを使用した直流送電用バルブは既に25年の実績があり、十分に高い信頼度を示しているが⁽⁴⁾、今後HVDCシステムを更に普及させるためには、増々小型化・低損失化が要求される。ここでは、従来適用してきた技術の課題を明らかにする。

＜2.1＞ 小型化 バルブモジュール及びバルブの小形化の課題について以下に検討する。

＜バルブモジュール＞

バルブモジュールは、バルブを電圧縮約したユニットであり、代表的な回路構成例を図4に、外形を図5に示す。モジュールには7個の光サイリスタとその附属回路を収納している。個々の部品の外形寸法がモジュールの外形に影響するのは当然であるが、ここでは個々の部品の小型化については扱わない。

モジュールの平面積に占める各構成要素の割合の一例を表1に示す。この表は、図4で示した回路において、光サ

図5 バルブモジュール外形の例
Fig.5 External View of a Valve module

イリスタを7ヶ直列接続した場合を想定している。光サイリスタを適用しているので、ゲート回路は存在しない。表からわかるように、平面積の約半分を組立・保守及び絶縁距離用スペースで占めている。部品の中では、スナバ回路ユニットが最も大きなスペースを占めている。スナバ回路用コンデンサの静電容量が大きいとコンデンサ自体の外形が大きくなるだけでなく、スナバ抵抗の損失が大きくなるので、この外形も大形化する。従って、モジュール外形の縮少には、スナバコンデンサの静電容量減少が効果的であることが分かる。

表1 バルブモジュール占有面積(例)
Table1. Area occupation in a valve module

構成要素	割合
LTTスタック	9%
スナバ回路ユニット	26%
バルブリアクトル	11%
電圧検出ユニット	5%
組立・保守スペース及び絶縁距離	49%
合計	100%

＜バルブ＞

バルブの占有面積は、4台のバルブを積層した4重バルブ構造とすることにより、大幅に減少した。4重バルブ構造を実現したのは、高度な耐震解析技術に裏付けられた耐震構造設計である。磁器碍子の4倍以上の曲げ強度を有するガラス繊維強化プラスチック（FRP）製の絶縁支柱を開発し、適用している。

4重バルブの幅や奥行き寸法は、バルブモジュールの外形、絶縁支柱の太さ及び、絶縁距離で決まる。

4重バルブの高さの約60％はモジュール上下間の空間絶縁距離であるが、実際にバルブの高さを決めているのは、絶縁支柱の沿面絶縁距離である。沿面絶縁距離は、使用環境（気温、湿度及び汚損度）に大きく影響を受けるので、想定条件下における材料の長期間使用時の $v-t$ 特性を考慮して決定する必要がある。⁽⁵⁾ このように、バルブ高さは、周囲条件が決定すると、それに応じて決まる。気中絶縁の更なる合理化は小型化の要点の一つであるが、その他に今後の小型化に最も効果があるのは、スナバ回路用コンデンサの静電容量の減少によるモジュールの小型化であることは先述の通りである。

＜2.2＞ 低損失化 バルブの損失は、サイリスタ及びバルブリアクトルのコイル及びブスで発生する通電電流に関係した成分（電流損失）と、電流には関係しないスナバ回路やバルブリアクトルのコアで発生する成分（電圧損失）に分けられる。

その内訳の比率は、HVDC（直流送電線を持つシステム）とBTB（直流送電線のない系統連系システム）とで異なるが、変換容量を300MWとし、直流電流を各々1200Aと2400Aと仮定した時の代表的な例を表2に示す。直流送電システムでは、送電線路の損失をできるだけ少なくするため、電圧定格を高めに、電流定格を低めに設定する。BTBでは連系容量のみが設定され電圧、電流定格は任意に決められるので、所要サイリスタ数を最小にするためサイリスタの利用度を最大にするように選定される。100mmφのシリコンウェーハで6kV-2500Aサイリスタを使用した場合についてのバルブ損失の試算例を表2に示す。表2は100％負荷の場合であり、負荷率が変われば当然電圧、電流損失の比率が変わってくる。

表から、HVDCシステムでは直流電流が少ないため、電

表2 バルブ損失の内訳
Table2. Power loss in a valve

		HVDC (250kV-1200A)	BTB (125kV-2400A)
電 流	サイリスタ	40%	57%
	バルブリアクトルコイル およびブスワーク	12%	14%
電 圧	スナバ回路	42%	24%
	バルブリアクトルコア	6%	5%
合 計		100%	100%

流損失と電圧損失とがほぼ等しく、一方、BTBシステムでは、直流電流が大きいため電流損失が全損失の70％以上を占めていることが分かる。これより、HVDC用とBTB用とで、低損失化の施策が異なるべきであることが分かる。

HVDC用では、スナバ回路損失の低減が、BTB用ではサイリスタ通電損失の低減を行えば効果が大きいと考えられる。

3. サイリスタ特性のトレードオフ

サイリスタの高耐圧化は、バルブにおけるサイリスタ直列数を低減する効果があるので、特に定格電圧の高い直流送電システムに対して有利となる。また、BTBシステムでは、直流電圧を低く、直流電流を大きくした方が機器を小型にでき、また経済的である。従って、同一口径のシリコンウェーハのサイリスタでも、HVDC用とBTB用とでその電圧・電流定格の最適値は異なってくる。

HVDC用では、システムから決まる適正な直流定格電圧・電流が仕様として与えられるので、電流が流せる範囲で、できる限りサイリスタの電圧定格を高くするのがサイリスタ直列数の低減の観点から望まれる。サイリスタの高耐圧化のためには、シリコンウェーハ内の4層の内nベース層の厚さを増加して電界緩和をし、また、比抵抗を大きくする必要がある。しかし、こうした施策はサイリスタの順方向電圧降下であるオン電圧を増加させるので、オン電圧が耐電圧の上昇の割合以上に増加した場合、サイリスタ直列数が減少してもバルブの電流損はかえって増加してしまう。

オン電圧の増加を減少させるには、nベース層のキャリアライフタイムを長くする方法があるがこの場合、逆回復電荷（ Q_{rr} ）やターンオフタイム（ T_q ）が増加する。サイリスタのオン電圧（ V_T ）と Q_{rr} および T_q の関係を図6に示す。

図6 Q_{rr} , T_q と V_T の関係
Fig.6 Relationship between Q_{rr} , T_q and V_T

4. モジュールの容積、損失とサイリスタ特性の関係

サイリスタの特性とモジュールの容積やバルブ損失の関係について検討する。

〈4.1〉 モジュールの容積とサイリスタ特性 2章で述べたように、モジュールの外形を小形化するためにはスナバコンデンサの静電容量 (Cg) 低減が必要である。Cgは、サイリスタがターンオフした時の転流振動の抑制及び、直列接続したサイリスタ間の逆回復電荷 (Qrr) のバラツキ、ΔQrrに起因する電圧アンバランスの低減の役割がある。

図7にCgをパラメータにした時のQrrと転流振動倍数の関係の一例を示す。転流振動倍数とは、ターンオフ過電圧ピーク値とターンオフ直後の基本波逆電圧の比である。Qrrが小さければ、小さなCgで所定の転流振動におさめることができることが分かる。

一方、QrrのバラツキΔQrrに起因する直列サイリスタ間の電圧アンバランスΔVは次式で表される。⁽⁶⁾

$$\Delta V \approx \frac{\Delta Q_{rr}}{C_g} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式からΔQrrが小さければ、小さなCgで所定のΔVを実現できることが分かる。Qrrの絶対値が小さければ、ΔQrrも自然に小さくなる。

以上より、スナバコンデンサ容量を小さくするには、Qrrを小さくするのが有効であることが分かる。

次に、サイリスタのオン電圧VTとモジュール外形について考える。VTが大きくなると、通電損失が増加し、運転中のサイリスタ接合温度Tjが増加する。運転中のTjは、(2)式で表せる。

$$T_j \approx T_{wi} + \left(\frac{I_d}{3} \times VT + P_{sw} \right) \times (R\theta_{THY} + R\theta_{HS}) \dots\dots (2)$$

ここで Twi : サイリスタを冷却する冷媒の温度 (℃)

Id : 三相ブリッジの直流電流

Psw : サイリスタの導通損失以外の損失

RθTHY : サイリスタの熱抵抗 (K/W)

RθHS : サイリスタ用ヒートシンクの熱抵抗(K/W)

(2)式においてVTが増加した時、Tjを一定に維持するにはTwiを下げるかRθHSを下げれば良い。

ここでは、サイリスタの損失増加に対しバルブ自身でのみ対応することを考えると、RθHSを下げる必要がある。RθHSを下げる手段としては、冷媒の流量の増加である程度までは対応可能であり、この範囲であればヒートシンクの外形を変えずに対応が可能となる。

しかし、VTの増加がある範囲を越えるとRθHSの低減は、もはや冷媒の流量増加ではまかないきれなくなる。この場合は、よりRθHSの小さい、従って外形が大きなヒートシンクを使用する必要がでてくるため、モジュール容積

図7 Qrrと転流振動の関係
Fig.7 Relationship between Qrr and Commutation Overshoot

は大きくなる。

〈4.2〉 バルブの損失とサイリスタ特性 2章で述べたように、バルブ損失の大部分はサイリスタ損失とスナバ回路損失である。バルブリアクトルの損失は少なく、またサイリスタのVTやQrrと直接の関係がないのでここでは無視する。

文献(7)によると、サイリスタ損失、Pthは次式で表わせる。

$$P_{th} = (I_{avg} \cdot U_{th} + I_{rms}^2 \cdot R_a) \cdot N \dots\dots\dots (3)$$

ここで Iavg : サイリスタの平均順電流, [A]
Irms : サイリスタの実効値順電流, [A]
Uth : サイリスタの立上り電圧, [V]
Ra : サイリスタの導通抵抗, [Ω]
N : サイリスタ直列数

ここで検討を簡略にするため、サイリスタ電流を大きさId、通電幅120°elの矩形波と仮定すると、以下の式が成立する。

$$I_{avg} = \frac{I_d}{3} \dots\dots\dots (4)$$

$$I_{rms} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_T = U_{TH} + I_d \cdot R_a \dots\dots\dots (6)$$

これより(3)式は、以下のように書き直すことができる。

$$P_{th} = \left(\frac{I_d}{3} \cdot V_T \right) \cdot N \dots\dots\dots (7)$$

一方、スナバ回路の損失Psnは、文献(7)によると次式で表わせる。

$$P_{sn} = (2\pi \cdot f)^2 \cdot C_g^2 \cdot \left(\frac{U_{im}}{N} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cdot \cos 2\alpha \right) \cdot R_g \cdot N$$

$$+ 0.8785 \cdot f \cdot C_g \cdot \left(\frac{U_{im}}{N} \right)^2 \cdot [\sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha + u)] \cdot N \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 f : 電源周波数, [Hz]

U_{im} : バルブ巻線電圧ピーク値, [V]

α, u : 制御遅れ角および重なり角, [ラジアン]

以下の検討は、(7)、(8)式を用いて損失を求める。(7)式から明らかのように、サイリスタの通電損失は、 V_T と比例関係にある。一方、(8)式からスナバ回路損失は、 C_g に比例することがわかる。そして、 C_g は4.1節で示したように Q_{rr} と正の相関がある。従って、サイリスタの V_T を減少させると Q_{rr} が増大し、これによりスナバ回路損失が増加する。つまり、サイリスタの通電損失とスナバ回路損失はトレードオフの関係にある。

〈4.3〉 モジュール容積、バルブ損失とサイリスタのオン電圧との関係 表1に示したバルブモジュールにおける各要素の占有面積の割合、図6に示した Q_{rr} と V_T の関係および図7に示した Q_{rr} と C_g の関係を基にして、モジュール容積およびバルブ損失が V_T と共に変化する様子を求めたのが、図8である。図はバルブ定格としてdc 125kV-2800Aを想定して求めた。

モジュール容積は、 V_T が大きくなると Q_{rr} が小さくなり、スナバ回路が、小形化するので右下がりのカーブになる。しかし V_T が大きくなるにつれ、 Q_{rr} の減少の割合が少なくなると共に、サイリスタの通電損失増加に伴う冷却系の容積増加があるため、全体としては容積はほとんど変化しなくなる。図には示していないが V_T を3V以上にすると、容積のカーブは右上がりに転じる。

損失については、電流損失は V_T と共に比例して増加するので、直線的に右上がりとなる。電圧損失は、 V_T の増加につれて Q_{rr} が小さくなるので C_g が小さくなり右下がりのカーブとなる。

図8 V_T とバルブ損失、容積の関係
Fig.8 Relationship between V_T and Module Volume and Loss

図8の例では V_T は2.5V程度に選定するのが良いことがわかる。2.5Vに選定すると2Vに選定した場合と比較し、モジュール容積で16%、バルブ損失で7%、小型化あるいは低損失化できる。

5. ターンオフタイムの影響

サイリスタのターンオフタイム(T_q)は、変換器の運転特性や必要とする調相設備の容量に影響すると共に、バルブ損失にも影響する。

ここでは、 T_q の調相設備容量への影響などを定量的に検討する。

〈5.1〉 T_q と他のサイリスタ特性との関係 T_q は、逆回復電荷と同様にキャリアライフタイムに関連した特性である。図6に示したように、 Q_{rr} と同様、 V_T を小さくすると T_q が大きくなる傾向がある。

従来は、 T_q は400 μ Sにすることを前提として^{(8)、(9)}サイリスタの他の特性を決定していた。

〈5.2〉 T_q とバルブ巻線電圧の関係 5.3節で述べるように、 T_q を小さくすることにより、インバータ運転時の γ を小さくすることが可能になるが、これはまた変換装置用変圧器のバルブ巻線電圧を下げることもつながる。

インバータ運転時の直流電圧、 E_{di} は次式で示される。

$$E_{di} = 1.35 \cdot \frac{U_{im}}{\sqrt{2}} \cdot (\cos \gamma - \frac{1}{2} \cdot X_c \cdot \frac{ipu}{epu}) \dots \dots (9)$$

ここで ipu : 直流電流 [pu]

epu : バルブ巻線電圧 [pu]

X_c : 転流リアクタンス [pu]

ipu , epu 共に1.0とした時、一定の E_{di} を得るために必要な U_{im} を γ を変えて求めたのが図9である。例えば、 T_q を200 μ S小さくして、 γ を3.6°小さくすると、バルブ巻線電圧を2.5%低くすることができる。

これにより、スナバ回路損失は、6%減少する。更に、サイリスタ直列数を2.5%減少できるので、サイリスタ直列数が40ヶ以上の電圧定格の高いバルブでは、サイリスタ数を減らすことができ、その分電流損失が低減する。

〈5.3〉 T_q と消費無効電力 Q_d の関係 サイリスタの T_q は、変換器のインバータ運転時の余裕角最少値(以下 γ_{min} と略す)を決定する主要素の1つである。 γ_{min} は、次式により決定される。

$$\gamma_{min} = T_q + \Delta t \dots \dots (10)$$

ここで Δt : 直列接続されたサイリスタ間の Q_{rr} のバラツキに起因する電圧位相差で生ずるサイリスタ送電圧期間のバラツキや波形歪や高調波に起因する余裕角の減少分など

代表的な数値を表3に示す。

図9 γ とバルブ巻線電圧の関係 (50Hz)
Fig.9 Relationship between γ and Valve Winding Voltage

図10 γ minと消費無効電力 (50Hz)
Fig.10 Relationship between γ min and var

表 3 γ minの内訳例
Table3. Items of margin angle

システム 周波数	Tq	Δ t	γ min
50Hz	(400μS)		
	7.20° el	12.5° el	19.7° el
60Hz	(400μS)		
	8.64° el	13.0° el	21.6° el

表から分かるように、Tqの減少がそのままγ minの減少につながる。

次に、Tqの減少が変換器の消費無効電力量にどの程度影響するかを検討する。

交流側の波形歪がなく、また変換器の損失を0と仮定すると、変換器の力率φは次式で与えられる。

$$\cos \phi = \cos \gamma - \frac{X_c}{2} \times \frac{i_{pu}}{e_{pu}} \quad (11)$$

(11)式を用いてXcが15%と20%の場合で、Id=E2=1.0puと仮定した時、γ minの変化で消費無効電力Qdの変化の様子を求めたのが図10である。図からTqを200μS減少するとγ minは3.6° el減少し、約10%の無効電力量減少になることが分かる。

調相設備容量を変換所容量の55%とした時、調相設備の占有面積は18%程度となる。従って10%の消費無効電力の減少を全て変換所の調相設備容量の減少に振り向けるとすれば、変換所の占有面積を約2%減少させることができることになる。

6. HVDC用サイリスタの特性最適化

長距離直流送電線を含むHVDCシステムの典形例として、500kV-1400Aの直流定格を想定する。

- 使用するサイリスタは以下の手順で選定する。
- ① システム電圧が高いので、サイリスタ電圧定格は、実現可能な最高電圧である8kVとする。
 - ② サイリスタのシリコンウェーハ直径3インチ～5インチのうちで、8kV定格とした時、1400Aが通電できる最小のウェーハ直径を選定すると、4インチとなる。
 - ③ 4インチ-8kVサイリスタのオン電圧VTと逆回復電荷Qrrのトレードオフを最適化する。

バルブ損失の検討結果を図11に示す。VTが3.6～4.2V程度の所にバルブ損失の最小値がある。この最小値は、VTが2.7Vの場合に比べてバルブ損失が22%小さい。

以上の検討は、通電電流が定格値（負荷率100%）の場合である。実際のシステムでは常に負荷率100%で運転されることはないので、損失の評価には、負荷率に応じた重み付けをすることが多い。表4に示した重み付けの1例をもとに、オン電圧特性の最適化カーブを見直したのが図12である。この図より、負荷率を考慮すると、最適なVTは、4.2V程度となり負荷率を考慮しない時より高目の値になることがわかる。

図11 オン電圧特性の最適化 (HVDC用)
Fig.11 Optimization of VT for HVDC Thyristor

図12 オン電圧特性の最適化 - 損失評価係数考慮 - (HVDC用)
Fig.12 Optimization of V_T for HVDC Thyristor Considering Loss Evaluation

表 4 負荷率を考慮した損失評価の例
Table4. Loss Evaluation Considering Transmission Power

負荷率(%)	直流電流(A)	重み付け(%)
25	350	10
50	700	50
75	1,050	30
100	1,400	10

このように、特に電流が小さいシステムでは、単にオン電圧にのみ注目したサイリスタ設計ではバルブが最適にならないことが分かる。

7. BTB用サイリスタの特性最適化

直流送電線の無いBTBシステムでは、変換容量のみが指定され、定格直流電圧・直流電流は、製造者が任意に選定できるのが一般的である。従って、適用するサイリスタのシリコンウェーハ径を選択した後、バルブを最適化するサイリスタの電圧・電流定格を決定する。

図13は、シリコンウェーハ径150mmのサイリスタの電圧・電流定格の関係を示したもので、8kVで3.5kA、6kVで5.5kA程度となる。同じ図にアーム短絡電流耐量も示した。万一、アーム短絡事故が発生した時、事故電流を検出後、ただちにゲートを止め変換器を保護停止するが、故障電流通流後の回復電圧に耐える能力をアーム短絡電流耐量と呼ぶ。変換器の定格直流電流を決定する際は、使用するサイリスタのアーム短絡電流耐量も考慮する必要がある。この関係を前提に、各種の定格のサイリスタを使用した時、同一変換容量のバルブの所要サイリスタ数、損失、外形がどのように変化するかを試算した。

結果を図14に示す。所要サイリスタ数は、サイリスタの電圧定格が下がると一旦減少するが、更に低くなると再び

図13 150φサイリスタの電圧・電流特性
Fig.13 Voltage and Current Characteristics of 150φ Thyristor

増加傾向を示す。再び増加するのは、アーム短絡電流耐量が、定格電流に比べて増加する割合が小さく、そのためシステムの定格直流電流をサイリスタの定格電流の増加率と同様には増加できないためである。バルブ損失は、所要サイリスタ数とほぼ同様な傾向を示すが、その変化率は所要サイリスタ数程、大きくはない。

一方、モジュール外形も所要サイリスタ数と同様な傾向であるが、その変化率は特に電圧定格の小さい、即ち定格電流の大きい領域で顕著である。その理由は、電流定格の増大に伴い通電損失を増大させずに主電流を通電するためにブスやバルブリアクトルのコイルの断面積が定格電流の2乗にほぼ比例して増大するためである。

図14から明かなように、バルブの評価指数を最も高くする観点から最適なサイリスタ定格電圧が見出せる。

サイリスタの定格電圧・電流が決定した後は、図12と同様なカーブを作成して最適な V_T - Q_{rr} のトレードオフ関係を見出せば良い。BTBの場合は、電流損失の占める割合が多いため、 V_T が小さい領域に最適値が存在することになる。

図14 BTBバルブ用サイリスタ定格の最適化
Fig.14 Thyristor Rating Optimization for BTB Valve

8. まとめ

直流送電用バルブの外形及び損失は、この20年でそれぞれ1/3及び1/2に減少した。こうした進歩には、冷却、絶縁及び耐震設計の進歩と共にサイリスタの大容量化が大いに貢献してきた。⁽¹⁰⁾

更なる小形化、低損失化のためにサイリスタの高電圧・大容量化が有効である。しかし、単なるサイリスタの大容量化だけでは充分でなく、以下に示すバルブと協調をとったサイリスタの特性最適化が重要であることを示した。

(1) サイリスタのオン電圧と逆回復電荷およびターンオフタイムはトレードオフ関係にあるため、単にオン電圧を低く設計したサイリスタを使用するとバルブの電圧損失が増加し、外形も大きくなる。

(2) バルブの負荷率を考慮してモジュール外形、バルブ損失共最小にする最適なオン電圧のサイリスタを選定することができる。

(3) 直流送電線のないBTBシステムでは、選定したシリコンウェーハに対してバルブを最適にする最適なサイリスタ電圧・電流定格が存在する。

サイリスタの電圧・電流定格最適化後にオン電圧と Q_{rr} のトレードオフを考慮して最適なオン電圧を選定すればモジュールの外形、バルブ損失を最小にすることができる。

(4) こうした最適化手法により従来設計に比べて、7～22%程度のバルブモジュール小形化、バルブの低損失化が期待できる。

サイリスタの設計および製造技術の進歩によりバルブが最適になるサイリスタ特性を造りこむことが可能になってきた。本論文が更なるサイリスタ改良の引金になれば幸いである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、有益な御提言や御助言を戴きました関西電力株式会社電力システム室、四国電力株式会社電力部、電源開発株式会社工務部及び東京工業大学深尾教授の各位に感謝申し上げます。(平成8年11月25日受付)

文 献

- (1) 桜井武一，大原順次，橋本定治，堀内恒郎，広瀬宏行，関谷恵輔，清水英一：「東京電力 新信濃変電所納300MW周波数変換設備」，東芝レビュー，33巻1号(昭53-1)

- (2) 久野守一，酒井満，堀内恒郎，小林淳男：「北海道・本州間電力連系設備」，東芝レビュー，35巻1号(昭55-1)
- (3) F. Nakajima, T. Yamazaki, K. Itoh, T. Matsumoto, T. Sakai：「Design and Type Test of a Light-Triggered Thyristor Valve for Back-to-Back Systems」，IEEE / PES 92 WM 215-4 PWRD (1992-1)
- (4) D. J. Christofersen, H. Elahi, M. G. Bennett：「A Survey of the Reliability of HVDC Systems Throughout the World During 1993-1994」，CIGRE 96 14-101 (1996-8)
- (5) T. Hasegawa, K. Yamaji, H. Irokawa, S. Tanabe：「Insulation Characteristic of 500kV Water Cooled Thyristor Valve for HVDC Transmission」，平8電学会B部門大，No152(平8-8)
- (6) 小林淳男：「サイリスタバルブにおけるターンオフ過電圧の解析」，電学論B，31，25～32(昭51-5)
- (7) JEC-2410-1989：「半導体電力変換装置」，72～77
- (8) 竹内南，五十嵐行雄，小宮山富夫，荒木洋一：「3000A 4000Vサイリスタの特性」，電学会電子デバイス研究会，EDD-79-111(昭54-9)
- (9) 田辺茂，高橋忠，角田良昭，金谷昌寿，田所雄一：「高電圧サイリスタバルブ用6kV-2.5kA光サイリスタの開発」平元電気学会全大，No. 481
- (10) 長谷川泰三，山地幸司，色川裕之，村尾武，伊村正幸，福田美也子：「500kV級光サイリスタバルブの開発」，平7電気学会B部門大会，No. 617

田辺 茂

(正員) 1951年8月14日生。72年3月国立東京工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。現在、府中工場パワーエレクトロニクス部勤務。主として直流送電用サイリスタバルブの開発、設計に従事。IEEE会員。

小林 淳男

(正員) 1938年2月3日生。60年3月東京電機大学電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として高電圧サイリスタ変換器の開発に従事。現在、府中工場技監。工学博士。IEEEシニア会員。