UDC 621.314.63-713: 621.3.011.4
621.382.333.32

論 文

47-B 25

油冷・油浸サイリスタバルブの 分布漂遊容量対策

三菱電機株式会社
三菱電機株式会社

多 田 一 彦
光 岡 宏

1. ま え が き

近年、電力用サイリスタの進歩に伴い直流送電変換装置用バルブとして従来用いられてきた水銀バルブに代わり、サイリスタバルブを用いるための研究開発が進められている。多数個のサイリスタを用いて構成されるサイリスタバルブの分圧および点弧方式などについては従来研究されてきているが、今後いかにしてこれをコンパクト化するかが実用化に際しての大きな問題であろう。

これに対して油冷、油浸のサイリスタバルブが考えられる。⁽¹⁾⁽³⁾ これは従来の水銀バルブのような精密な温度制御を必要とせず、単に冷却するのみでよい。また、変圧器と同様に鉄製タンクに収納し、バルブから発生するラジオ雑音のしゃへいの点からも良いことがわかる。

油冷、油浸構造に伴う多くの問題のうち分布漂遊容量の増加が特に大きな問題としてあげられる。分布漂遊容量の増加に起因する問題としてバルブ転流時の電流上昇率の増加および分圧の乱れがあり、⁽²⁾⁽³⁾ これらの問題によりバルブ内のサイリスタ素子破損の可能性が起る。

本論文では特に前者の問題をとり上げその解決法について述べている。また後者の問題については別の機会に報告したい。一般にこの分布漂遊容量の増加によ

る転流時の電流上昇率の増加に対する問題の解決法としてサイリスタ素子と直列にリアクトルをそう入することが定性的に判明している。今度そう入するリアクトル効果に関して理論的検討を行ない、バルブモデルおよび実バルブを用いての実験により、理論的検討の正当性を確認した。その結果、そう入するリアクトルの効果について定量的にはあくすることが可能となり、油冷、油浸サイリスタバルブの分布漂遊容量に起因する問題の一つが解決された。

以下、本論文にてその詳細を述べる。

2. 油冷・油浸サイリスタバルブの分布漂遊容量

〈2・1〉 バルブ構成に起因する分布漂遊容量 一般に油冷・油浸サイリスタバルブは第1図に示すように構成されており、鉄製タンク内にてバルブ定格電圧にあわせてステージを必要段数積上げて作られる。

なお、第1図中のモジュール自体は陽極リアクトルを含んでいない。また、油中の絶縁構成を容易にするためシールド技術が使われ、各ステージはシールド板でおおわれ、そのシールド板は主回路上の適応個所に接続されその電位を確実に固定している。油浸に用いる絶縁油は比誘電率が大きいので絶縁距離に比べて比較的大きな絶縁耐力が得られ、結局、絶縁距離を短くできコンパクトなバルブを製作することが可能である。しかしステージシールド板とタンク内壁との間の漂遊容量の増加は避けられない。しかも各ステージの大きさは同じであるので漂遊容量もほぼ同一値になる。第2図にステージシールドの一例を示す。

〈2・2〉 点弧方式に起因する分布漂遊容量 点弧方式には電磁点弧方式と光点弧方式の二種類がある

The Solution for the Problems Due to the Distributed Stray Capacitance on Oil-cooled and Oil-immersed HVDC Thyristor Valve. By K. TADA, Member & H. MITSUOKA, Member (Central Research Laboratory of Mitsubishi Electric Corporation)

多田一彦：正員，三菱電機株式会社中央研究所 第五研究部
光岡 宏：正員，三菱電機株式会社中央研究所 第五研究部

第 1 図 油冷・油浸サイリスタバルブの構成
Fig. 1. Structure of oil-cooled and oil-immersed thyristor valve.

第 2 図 ステージシールドの一例
Fig. 2. An example of stage shield.

が、電磁点弧方式を用いた場合その構成から必然的に漂遊容量が現われる。点弧電力も点弧信号と同様の方式を用いて送る場合にはさらに多くの漂遊容量が現われる。⁽⁴⁾ この容量値は使われるケーブルの絶縁材料、区間しゃへいの長さなどにより異なるが、〈2.1〉節で述べたシールドによる漂遊容量値に加算される。結局、漂遊容量が増加し以下に述べる問題が起こる。

3. 分布漂遊容量増加による転流時の問題

サイリスタバルブを用いた直流送電用コンバータ転流動作時に、ターンオンするバルブに立ち上がりの速

第 3 図 サイリスタバルブ等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of thyristor valve.

い電流が流れる。これは第 3 図のサイリスタバルブの等価回路に示すようにバルブ陽極・陰極間に現われる変圧器の直流側配線およびバルブブッシングを含めた漂遊容量と、バルブの各ステージの分布漂遊容量がターンオン時にいっせいに放電を開始し、バルブにこの放電電流が流れるからである。電源からの電流はコンバータ変圧器の大きな漏れリアクタンスのためにその電流の立ち上がりは低く、ターンオン初期にサイリスタに流れる電流はほとんど漂遊容量および分圧回路のコンデンサからの放電電流である。なお、第 3 図はステージ内の半数のサイリスタを一つのスイッチとして模擬したバルブを示している。

また、各ステージの分布漂遊容量からの放電電流について考えると下段のサイリスタほど大きな放電電流が流れることになる。油浸サイリスタバルブでは、分布漂遊容量の増加により空冷のバルブに比べさらに大きな放電電流が流れることになり、以下に示すような問題が新たに起こる。

- (a) サイリスタ順電流上昇率 (di/dt) の増加
- (b) スイッチング損失の増加
- (c) ターンオン時の過電圧の増加⁽⁵⁾⁽⁶⁾

これらの問題はいずれも前述した漂遊容量の放電電流に依存しているので、共通した問題解決策はサイリスタと直列にリアクトルをそう入し、この放電電流の急速な立ち上がりを抑制することである。このそう入するリアクトルについてはバルブ内の絶縁構成を容易

にするためおよび分布漂遊容量からの放電電流を考えると分割してそう入ることが好ましい。分割リアクトルがそう入されたバルブについて以下の検討を行なう。ターンオン時の分圧回路のコンデンサからの放電電流は容易にはあくされるので、分布漂遊容量をも含めた漂遊容量からの放電電流をはあくすることが必要である。

4. 漂遊容量の放電電流に関する理論的検討

転流時にターンオンするサイリスタバルブに流れる漂遊容量の放電電流を理論的に検討する。⁽⁷⁾ 検討に用いる漂遊容量を考慮したバルブの等価回路は第3図に示したものをを用いる。図のように下段のステージのサイリスタほど大きな放電電流が流れるので、この最下段のステージのサイリスタ電流についてのみ注目し、以下の検討を進める。

また、各ステージ内にて直列接続されている半数のサイリスタを同時に投入される一つの理想的なスイッチと仮定する。この仮定はサイリスタバルブターンオン時にバルブ内の各部の電圧・電流の変化に比べてサイリスタ素子のライズタイムが非常に短いと考えられるからである。

サイリスタバルブの陽極・陰極間に現われる漂遊容量を C_G 、バルブ構成からはほぼ等しい漂遊容量値となる点弧方式に起因する漂遊容量も含めた各ステージの分布漂遊容量を C_g 、放電電流抑制用に各ステージにそう入されるリアクトルの総和を L とする。ここで理論的検討に一般性を持たせるためにサイリスタバルブは N 段のステージより構成されているとする。

サイリスタバルブターンオン直前は、バルブの陽極・陰極間には電圧が印加されており、サイリスタがターンオンすると、すなわち第3図においてすべてのスイッチが同時に投入されるとバルブ陽極・陰極間の電位変化に応じて C_G からの放電電流 i_G 、各ステージの C_g からの放電電流をバルブの陽極端子に近いほうから $i_{G1}, i_{G2}, \dots, i_{GN}$ とすると図に示すような放電電流路が構成され、矢印のように漂遊容量の放電電流が流れる。

ターンオン期間中の各ステージの分圧は均等にされており、各ステージ間の電位変化を $e_s(t)$ とする。[したがって、バルブ陽極・陰極間の電位変化は $N \cdot e_s(t)$ となる]

注目した最下段のステージのサイリスタに流れる放電電流 i_N は(4a)式であらわされる。

$$i_N = i_G + i_{G1} + i_{G2} + \dots + i_{GN} \quad \dots\dots\dots(4a)$$

ステージのシールド板は、サイリスタの主回路上の

点であるステージの中間電位に接続することが絶縁構成上望ましい。漂遊容量と電位変化を用いて具体的に i_N について計算すると、 i_N は(4b)式で表わされる。

$$\begin{aligned} i_N &= C_G \frac{d}{dt} \{N e_s(t)\} + C_g \frac{d}{dt} \left\{ N \cdot e_s(t) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} e_s(t) \right\} + C_g \frac{d}{dt} \left\{ (N-1) e_s(t) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} e_s(t) \right\} + \dots\dots\dots + C_g \frac{d}{dt} \left\{ 2 e_s(t) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} e_s(t) \right\} + C_g \frac{d}{dt} \left\{ e_s(t) - \frac{1}{2} e_s(t) \right\} \\ &= C_G \frac{d}{dt} \{N \cdot e_s(t)\} + C_g \frac{d}{dt} e_s(t) \left\{ \frac{N(N+1)}{2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{N}{2} \right\} \end{aligned}$$

したがって

$$i_N = \left(C_G + \frac{N}{2} C_g \right) \frac{d}{dt} \{N \cdot e_s(t)\} \quad \dots\dots\dots(4b)$$

となる。ここで等価容量 $C_e = C_G + (N/2)C_g$ とすると i_N については(4c)式であらわされる。

$$i_N = C_e \cdot \frac{d}{dt} \{N \cdot e_s(t)\} \quad \dots\dots\dots(4c)$$

(4c) 式の最下段のサイリスタに流れる漂遊容量の放電電流 i_N はバルブ陽極・陰極間に接続された等価容量 C_e がバルブ陽極・陰極間の電位変化により放電する放電電流と等しいことを示している。

以上により i_N についてのバルブ等価回路として第4図に示す回路が推測される。第4図においてバルブターンオンを模擬するスイッチの投入時に流れる電流 i_N について求めると、リアクトルの総和 $N \cdot L$ と等価

第4図 漂遊容量の放電電流に関するバルブ等価回路

Fig. 4. Equivalent circuit of thyristor valve with regard to discharge current of stray capacitance.

容量 C_e との共振回路電流となることが容易にわかる。パルブターンオン直前に等価容量 C_e に E_m の電圧が存在していたとし、 i_N について求めると (4b) 式で与えられる。

$$i_N = \frac{E_m}{\sqrt{NL \left(C_G + \frac{N}{2} C_e \right)}} \times \sin \frac{t}{\sqrt{NL \left(C_G + \frac{N}{2} C_e \right)}} \dots\dots\dots (4d)$$

パルブターンオン時に問題となるサイリスタ電流 i_N は第5図に示すように最初の半サイクルの放電電流のみであり、半サイクル以降は実回路ではすでに変圧器を通して電源電流が流ははじめているし、また、回路損失によりこの放電電流は減衰すると考えられる。パルブ電圧は v で示されており、また、パルブターンオン時に流れる漂遊容量の放電電流を特徴づける放電電流最大値 i_{Nm} 、放電電流上昇率の最大値 $(di_N/dt)_m$ および放電電流の4分の1周期 $T/4$ がそれぞれ示されている。これらの各値の計算式を (4e)、(4f)、および (4g) 式に示す。

$$i_{Nm} = \frac{E_m}{\sqrt{NL \left(C_G + \frac{N}{2} C_e \right)}} \dots\dots\dots (4e)$$

$$\left(\frac{di_N}{dt} \right)_m = \frac{E_m}{NL} \dots\dots\dots (4f)$$

$$\frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{NL \left(C_G + \frac{N}{2} C_e \right)} \dots\dots\dots (4g)$$

以上、転流時にターンオンするサイリスタパルブに流れる漂遊容量の放電電流について、理論的検討を行ってきた。

その結果、放電電流と分布漂遊容量およびリアクトル効果に関する定量関係式を導くことができた。

第5図 ターンオン時のサイリスタ電流
Fig. 5. Thyristor current during turn on.

5. 漂遊容量の放電電流に関する実験および検討

前節の漂遊容量の放電電流についての理論的検討において示した転流時に、ターンオンするサイリスタパルブに流れる放電電流の分布漂遊容量効果および入するリアクトル効果についての定量的関係式の正当性を確認するために実験を行なった。⁽⁸⁾ 実験はサイリスタパルブモデルを製作し、ステージの段数を变化した場合の漂遊容量の放電電流について観測し、理論的検討値と比較した。

また開発した 70 kV、油冷、油浸サイリスタパルブターンオン時のサイリスタ電流、パルブモデルターンオン時のサイリスタ電流および理論的検討によるサイリスタ電流について、それぞれ比較検討を行なった。

〈5・1〉 油冷・油浸サイリスタパルブモデルによる実験 パルブモデルは第3図に示すような回路構成とし、ステージの段数を自由に換えられるようにしてある。漂遊容量については図に示す位置に既存のコンデンサ部品を接続し忠実に模擬した。また、ステージ内の半数のサイリスタを模擬した理想的なスイッチは、小容量のサイリスタを用いて模擬した。このサイリスタパルブモデルでは実パルブ現象と同様に時間は実時間動作、電圧は千分の一、電流は百分の一に換算された現象となるようにしてあり、パルブターンオン、ターンオフおよびサージ印加時などの諸現象がシミュレーションできる。

実験はパルブ内のステージの段数をそれぞれ、2段、4段、6段、8段と変えた場合のターンオン時に最下段

第6図 ステージ数と放電電流最大値との関係

Fig. 6. Relationship between number of stages and peak value of discharge current.

のサイリスタに流れる電流についての前節に示した i_{Nm} , $(di_N/dt)_m$, $T/4$ についてそれぞれ観測した。放電電流最大値 i_{Nm} は第6図、放電電流上昇率最大値 $(di_N/dt)_m$ は第7図、4分の1周期 $T/4$ は第8図に

第7図 ステージ数と放電電流上昇率の最大値との関係

Fig. 7. Relationship between number of stages and maximum current rise rate of discharge current.

第8図 ステージ数と放電電流の4分の1周期との関係

Fig. 8. Relationship between number of stages and a quarter of a period of discharge current.

それぞれ観測結果を点で、理論的検討の定量的関係を実線で示している。本実験ではステージの段数の増加に対応してバルブモデルターンオン直前の電圧を上昇させる。本モデルは実バルブ換算で1ステージあたり印加電圧 15 kV, リアクトル 160 μ H がそう入されており、またステージの分布漂遊容量 C_g はステージシールドおよび電磁点弧方式による漂遊容量も考慮した値として 500 pF とし、バルブ陽極・陰極間の漂遊容量 C_G が 0, および 2,000 pF の場合についてそれぞれ実験を行なったものである。

〈5・2〉 実バルブによる実験 開発した 70 kV, 油冷, 油浸サイリスタバルブ (4 段ステージ構成) およびバルブモデルターンオン時の最下段のサイリスタ電流波形と、バルブ電圧波形の観測結果を第9図に示す。⁽³⁾ これらの観測結果および理論的検討の関係式よ

第1表 バルブターンオン時の漂遊容量の放電電流値

Table 1. The value of discharge current of stray capacitance during turn on.

	I	II	III
i_{Nm} (A)	145	145	155
$(di_N/dt)_m$ (A/ μ s)	100	107	112
$T/4$ (μ s)	2.3	2.3	2.2

I : 実バルブターンオン実験時

II : バルブモデルターンオン実験時

III : 理論関係式

観測条件 (実バルブ換算値)

$E_m = 72$ kV, $C_G = 2,000$ pF, $C_g = 500$ pF, $N = 4$, $L = 160$ μ H

5 μ s/div, 24 kV/div, 100 A/div
(a) 実バルブ実験時

5 μ s/div, 20 V/div, 1 A/div
(b) バルブモデル実験時

第9図 ターンオン時のバルブ電圧、電流波形

Fig. 9. Voltage and current wave shapes of thyristor valve during turn on.

り求めた各値についてそれぞれ第1表に示す。

また、第9図より実バルブとモデルバルブターンオン時の現象が非常によく一致していることがわかり、ターンオン現象に関しバルブモデルが実バルブを忠実に模擬していることが確かめられた。

以上、バルブモデルおよび実バルブを用いてのターンオン実験結果よりサイリスタバルブターンオン時に流れる漂遊容量の放電電流は、分布漂遊容量効果およびリアクトル効果に関して前節にて求めた理論的検討による定量的関係式に従うことが明らかになった。また関係式より求めた値が実際の現象値よりサイリスタ素子にとっていくぶん厳しい値を示しており、この関係式の値について検討しておけばそれが安全値とみなせることがわかる。

6. 転流時の問題解決

油浸構造に伴う分布漂遊容量増加による転流時の問題は、分布漂遊容量に対するリアクトル効果の関係式から明らかなように分割そう入りアクトルにより解決される。一般に高電圧サイリスタバルブを得るにはバルブ構造により多数のステージを積上げる。高電圧になるほどいくぶん漂遊容量値は減少すると思われるが、ステージの段数の増加による分布漂遊容量の影響が著しくなり、必要なリアクトル値も増加する。

また、サイリスタ素子自身の性能向上による問題解決も考えられるが、素子許容通電電流容量の増加に比例してターンオン時の定格臨界順電流上昇率などのように、一般的に過渡時の性能向上があまり期待できないのが現状であり、リアクトルにたよらざるを得ない。

ターンオン時の過電圧は、ターンオン時に分布漂遊容量をも含めた漂遊容量からの放電電流がターンオンの遅れたサイリスタの抵抗、およびコンデンサよりなる分圧回路に流入し起こるので、万一、最も遅れてターンオンするサイリスタが最下段にあるとすると、このサイリスタの分圧回路に流入する放電電流は(4d)式で示した電流となり、最も大きな放電電流が流れるのでサイリスタに加わる過電圧も最も大きくなる。要するに下段のサイリスタほど分布漂遊容量の放電電流が加わり、流れる電流は大きくなるので放電電流が少ない個所にターンオンの遅れるサイリスタを、放電電流が多い個所にターンオンの速いサイリスタを接続する

ことにより、ターンオン時の過電圧は最小限に押えることができる。

サイリスタと直列にリアクトルをそう入し、分布漂遊容量をも含めた漂遊容量からの放電電流の大きさおよび電流上昇率を低く押えることにより、ターンオン時のサイリスタ過電圧の増加、またスイッチング損失の増加を防ぐことができる。

以上説明してきたサイリスタバルブでは陰極端子が接地され、油浸タンクが陰極と同電位になっているバルブを考えていたが、たとえばタンク電位がバルブの陽極と同電位の場合には、陽極端子に近いサイリスタほど漂遊容量による放電電流は大きくなることがわかる。この場合も同様に分割そう入りアクトルにより転流時の問題は解決される。

7. む す び

直流送電用サイリスタバルブとしてコンパクトな屋外形、油冷、油浸サイリスタバルブが考えられている。サイリスタバルブ油浸化に伴う多くの問題の中で分布漂遊容量の増加に起因する転流時の問題が大きな問題としてあげられる。この問題の解決策はサイリスタと直列にリアクトルを分割そう入することであり、そう入されたリアクトルの分布漂遊容量に対する定量的効果のはあくによりこの問題は解決された。

油冷、油浸サイリスタバルブのように半導体を電力機器へ適用する場合には、半導体の諸特性と電力機器としての現象をじゅうぶん考慮し、その特性と協調のとれた機器内部構成を採用することが大切である。

終わりにあたり、本研究に有益なご助言をいただきました当所 大野栄一博士に謝意を表する次第である。(昭和46年8月25日受付、同46年12月1日再受付)

文 献

- (1) J. Hengsberger, R. Wuthrich & F. Scherbaum: CIGRE, Session, 14-04 (1970)
- (2) E. Ohno, et al.: Conference on Power Thyristors and their Applications, IEE, No. 53, Part 1, pp. 406 (1968)
- (3) 大野, 他: 三菱電機技報 45, 6, 683 (昭46-6)
- (4) 迎, 他: 昭44 電気学会東京支部大会 362
- (5) G. Karady & T. Gilsig: The calculation of turn-on Overvoltages in a high voltage DC thyristor valve, IEEE Winter Power Meeting, (1971) New York,
- (6) 十川・大野・堀米: 電学誌 90, 1787 (昭45-9)
- (7) 光岡・多田: 昭46 電気学会全国大会 No. 541
- (8) 阿部, 他: 三菱電機技報 37, 865 (昭37-7)