UDC 621.314.653.004.62: 621.382.333.32
621.315.051.024

論文

48-B 76

直流送電用サイリスタバルブの信頼度計算手法

東京大学 関根泰次
東京大学 三木哲志
東京電力株式会社 桜井武一
東京電力株式会社 岩崎実
東京電力株式会社 長崎修

1. はじめに

直流送電の信頼度の向上をはかることは直流送電の広範な適用をはかるのに不可欠である。このような傾向から水銀式の変換装置は、より信頼度が高いと期待されるサイリスタ式のものに置き換えられつつある。しかし、このサイリスタバルブは非常に多数の素子から構成されるいわばパワエレクトロニクスの産物であるため、経済性を考慮しつつ高信頼度化をはかるよう適正な設計を行なう必要がある。サイリスタバルブの信頼度については、設計基準で決められる過電圧、過電流などに対して耐えられるか否かを問題にする耐力信頼度と主として、経年変化による素子故障に基づく利用可能度（アベイラビリティ）を問題にする信頼度の二つの側面がある。本論文で扱うのは後者の観点からみた信頼度である。

サイリスタバルブの信頼度を計算するためには、まずその構成要素が故障したときの影響を十分に解析する必要がある。本論文では、まずサイリスタバルブの各構成要素の通常状態での働きと故障時のふるまいについて検討し、ついでこれをもとにしてサイリスタバ

ルブ全体の信頼度を計算するプログラムについて述べることにする。

2. サイリスタバルブのモデル回路と構成要素の信頼度特性

サイリスタバルブ本体の代表的モデルを第1図に示す。第1図(a)は1モジュール全体を示し、このようなモジュールが多数個直列に接続されてサイリスタ本体が構成されている。図において R_1 , C_2 , R_2 などは分圧抵抗、分圧コンデンサ(モジュール内分圧)、保護抵抗でその数値は概ね数 10k Ω 、数 μ F、数 Ω 程度である。また C_1 は分圧コンデンサ、 R_3 , C_3 は分圧回路

(a) 1モジュール構成図

(b) ゲート回路

第1図 サイリスタバルブの信頼度モデル

Fig. 1. Reliability model of thyristor valve.

A Method for Calculating the Reliability of HVDC Thyristor Valve. By Y. SEKINE, Member, T. MIKI, Member (Faculty of Engineering University of Tokyo), T. SAKURAI, Member, M. IWASAKI, Member & O. NAGASAKI, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc.).

関根泰次: 正員, 東京大学工学部電気工学科

三木哲志: 正員, 東京大学工学部電気工学科

桜井武一: 正員, 東京電力株式会社

岩崎 実: 正員, 東京電力株式会社

長崎 修: 正員, 東京電力株式会社

でその値はだいたい $0.001 \sim 0.1 \mu\text{F}$, 数 $10 \sim$ 数 100Ω , 数 μF 程度である。以下に各構成素子の働きとそれが故障した場合の影響について概説する。また, 以下の記述において便宜上, サイリスタ, R_1, R_2, C_2 からなる回路を A 回路 (ユニット), C_1, C_3, R_3 からなる分圧回路を B 回路と呼び, A 回路素子の故障により, 1 ユニットの短絡故障となる故障を A 回路故障, B 回路素子の故障により, 1 モジュール全体の短絡故障となる故障を B 回路故障と呼ぶことにする。

〈2.1〉サイリスタバルブ本体の構成要素の働きと故障時のふるまい〔第1図(a)〕

(1) 分圧抵抗 R_1 分圧抵抗 R_1 は直列接続素子の順および逆方向漏れ電流のバラツキが, 静的阻止電圧に対する分圧を乱すので, これを補償するためにそう入された抵抗である。サイリスタがターンオフし逆電圧 E が印加された場合の等価回路は第2図のようになる。

(i) 短絡故障時 故障した抵抗と並列にあるサイリスタは常時短絡された状態になるが, 抵抗自体の短絡故障はほとんどない。なお, 逆電圧に対する各サイリスタの分担電圧は $E/(N-1)$ となる。

(ii) 開放故障時 通常の場合は R_1 が開放しても他の要素が R_1 と同じ働きをするのでほとんど影響を受けないが, 大きな電圧がかかる場合 (たとえば, 当該の変換所がブロックしているとき, 相手側の変換所から充電してきた場合) は開放した R_1 と並列にあるサイリスタの分担電圧は全電圧 E となり過電圧のために短絡する。しかし, この場合は2重故障であるのできわめてひん度は少ないものと考えられる。

以上から R_1 の故障による影響はごく稀な場合と考えられるが, 信頼度解析上は安全側にみて, R_1 が短絡しても開放しても, その該当個所の A 回路の短絡故障になるとしてさしつかえない。

(2) 分圧コンデンサ C_2 (モジュール内分圧)

分圧コンデンサ C_2 は次のような働きをしている。

(i) 外来サージ電圧に対する分圧 (順, 逆) …… (動的阻止電圧)

(ii) 転流回復電圧に対する分圧

(iii) 点弧時の過渡過電圧抑制

第2図 分圧抵抗 R_1 のターンオフ時の等価回路

Fig. 2. Equivalent circuit of grading resistor R_1 , tuning off.

第3図 分圧コンデンサ C_2 の等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of grading capacitor C_2 .

(iv) 転流回復時の過渡電圧抑制

(v) 順方向電圧上昇率の抑制

動的阻止電圧の分圧の乱れに対しては, 接合部静電容量のバラツキと, 組立構造により決まる分布容量の二つの原因があるが, 多数個の直列回路の場合, 後者が主因となる。この場合の等価回路は第3図のようになる。いま N 個直列接続の場合, 最先端素子の分担電圧を V_N とし, 各素子の分担電圧の平均値を V とすれば, 次式になる。

$$V_N = V N \sqrt{C_g/C_2} \coth(N \sqrt{C_g/C_2})$$

(i) 短絡故障時 故障した C_2 と並列のサイリスタは常時短絡された状態になる。電圧分担は, 最先端の C_2 が短絡した場合, 次の素子の分担電圧 V_{N-1} , 各素子の分担平均値 V は

$$V_{N-1} + (N-2)V = E'$$

$$V_{N-1} = V(N-1) \sqrt{C_g/C_2} \coth\{(N-1) \sqrt{C_g/C_2}\} = V A_{N-1}$$

$$\therefore V = E' / \{A_{N-1} + (N-2)\}$$

$$V_{N-1} = A_{N-1} E' / \{A_{N-1} + (N-2)\}$$

となる。しかし信頼度解析にあたっては, 簡略化して, この電圧分担は均一になるとして扱ってさしつかえない。

(ii) 開放故障時 開放した C_2 と並列にあるサイリスタは, 転流直後, 外来サージなどが入ってきたときの分担電圧が許容値以上になると考えられ, サイリスタは短絡故障となる。

したがって, C_2 の故障は A 回路の短絡故障となる。

(3) 保護抵抗 R_2 保護抵抗 R_2 の働きはサイリスタが点弧した場合, 分圧コンデンサ C_2 の放電電流を抑制するとともに, 過渡振動を抑制することにある。

(i) 短絡故障時 過電流のためサイリスタは短絡故障となる。

(ii) 開放故障時 C_2 開放時と同様になり該当サイリスタは短絡故障となる。

したがって R_2 の故障は A 回路の短絡故障となる。

(4) 直列リアクトル L 直列リアクトルの働きは

(i) 過渡振動の抑制

(ii) 点弧時の di/dt の責務の抑制(分圧用コンデンサの放電, ストレイキャパシタンスの放電)の二つである。

(i) 短絡故障時 ターンオン時の電流の立上りを緩やかにすることおよびサージ印加時の個々のサイリスタに加わる dv/dt 効果などがなくなり、最悪の場合、該当モジュール内のすべてのサイリスタが短絡故障となる。しかし実際にはリアクトル自体の短絡故障はほとんどなく、外部の物体が落下して、リアクトルを橋絡するなどの外部的原因だけが考えられ、その発生ひん度もきわめて少ないものと考えられる。

(ii) 開放故障時 実際上開放故障はないと考えられる。したがって、直列リアクトルの故障はほとんど無視しうる。

(5) 分圧回路 C_3, R_3 分圧回路 C_3, R_3 はパルプ転流時のオーバシュート電圧を抑制するダンピング回路として働くとともに(開閉サージ)～(商用周波数)程度の比較的緩やかな電圧の分担(モジュール間)に寄与する。故障時 C_2, R_2 と同じような現象になるが、1モジュール全部(B回路)の短絡故障になる。

(6) 分圧コンデンサ C_1 これは立上りの早いサージに対するモジュール間の分圧を行なう。

故障時 C_2 と同じような現象になるが、1モジュール全部(B回路)の短絡故障となる。

以上のように各要素の働き、故障時のふるまい、電圧分担などは、実際には対象となる電圧の周波数、立上りの緩急度により異なり複雑であるので、計算上、電圧分布はすべて均等とし、故障も常に最悪のケースを考慮した。

〈2.2〉 ゲート回路構成要素の働きと故障時のふるまい〔第1図(b)〕

(1) ダイオード D_1 これは負のゲート信号をブロックする働きをする。

(i) 短絡故障時 ゲート電流が D_1 に流れ、サイリスタにゲート信号が流れないので当該のサイリスタが点弧せず、全電圧がこれに加わるため短絡故障となる。(A回路短絡)しかし、ツェナーダイオードがあるので過電流とはならずCT二次短絡までは到らない。

(ii) 開放故障時 何らかの原因で負のゲート信号がはいる可能性があるが、それによってサイリスタが故障する可能性は少ない。

(2) ツェナーダイオード ZD ツェナーダイオードはある一定値以上の正の信号のみをゲート信号と判断する。

(i) 短絡故障時 正の派正的な雑音によって、サイリスタが誤点弧する可能性はあるが、これによ

てサイリスタが故障する可能性は少ない。

(ii) 開放故障時 サイリスタにゲート信号が流れないので、サイリスタの短絡故障に到る。(A回路故障)

(3) コンデンサ C_4 これは高周波分を除去する働きをする。

(i) 短絡故障時 CT二次側の短絡となり、該当するモジュールすべてのサイリスタにゲート信号が流れず、短絡故障に到る。(B回路故障)

(ii) 開放故障時 高周波成分がゲート信号にはいる可能性があるが、他のサージ対策もあり、これによってサイリスタが故障することはほとんどないと考えられる。

(4) 抵抗 R_4 抵抗 R_4 は電流分担を調整する。

(i) 短絡故障時 サイリスタにゲート信号が流れないが、抵抗が短絡故障を起こす可能性はきわめて小さいと考えられる。

(5) ダイオード D_2 (4個) これは、CT二次電流(ゲート信号)を整流する。

(i) 短絡故障時 1/2 サイクルはCT二次側が短絡されるので、その該当するモジュールの全サイリスタにはゲート信号が流れず、短絡故障に到る。(B回路故障)

(ii) 開放故障時 1/2 サイクルはサイリスタにゲート信号が流れないので、短絡故障(A回路故障)に到るが、ダイオードの開放故障は比較的少ないと考えられる。

(iii) D_1 と ZD の同時短絡時 CT二次側が短絡され、該当するモジュールの全サイリスタにゲート信号が流れずB回路故障となるが、 ZD の短絡故障はきわめて少ないと考えられる。

(6) 以上からゲート回路が関与するA, B回路の信頼度は次のようになる。

(i) A回路の信頼度 $R_{GA}(t)$

$$\begin{aligned} \therefore R_{GA}(t) &= R_{D1}(\text{short})(t) R_{ZD}(\text{open})(t) \\ &\quad \{ \{ R_{D2}(\text{open})(t) \}^4 \\ &= \exp \{ -\lambda_{D1}(\text{short}) + \lambda_{ZD}(\text{open}) \\ &\quad + 4 \lambda_{D2}(\text{open}) \} \} \end{aligned}$$

総合の故障率は、次式で示す。

$$\lambda_{GA} = \lambda_{D1}(\text{short}) + \lambda_{ZD}(\text{open}) + 4 \lambda_{D2}(\text{open})$$

(ii) B回路の信頼度 $R_{GB}(t)$ ここで1番左側の並列モデルの信頼度は ZD の短絡故障率がきわめて小さく、1とみなせるので

$$\begin{aligned} R_{GB}(t) &= R_{C4}(\text{short})(t) \{ R_{D2}(\text{short})(t) \}^4 \\ &= \exp \{ -\{ \lambda_{C4}(\text{short}) + 4 \lambda_{D2}(\text{short}) \} \} \end{aligned}$$

第 4 図 A 回路信頼度分析図

Fig. 4. A figure of reliability analysis of A circuit.

第 5 図 B 回路信頼度分析図

Fig. 5. A figure of reliability analysis of B circuit.

となる。ただし、これはゲート回路 1 個に対する信頼度である。1 モジュールに N 個のゲート回路があると 1 モジュールあたりの B 回路の信頼度は

$$\{R_{GB}(t)\}^N$$

となる。したがって、総合の故障率は次式となる。

$$\lambda_{GB} = N \{ \lambda_{C4}(\text{short}) + 4 \lambda_{D2}(\text{short}) \}$$

〈2・3〉サイリスタバルブ本体の信頼度分析図

以上の検討結果をまとめると、サイリスタバルブ本体の信頼度分析図は第 6 図のようになる。

〈2・4〉サイリスタバルブのゲートパルス発生装置、制御装置の信頼度モデル サイリスタバルブのゲートパルス発生装置および制御装置の回路構成は第 7 図のとおりであり、ゲート変圧器、絶縁変圧器などの絶縁破壊を除いては、いずれの故障もバルブの損傷などの事故にはならないが、バルブの停止になる。これらの装置を構成する個々の信頼度特性は異なると考えられるが、故障モデル的には総合して単一のものとして扱うことができ、さらにこれを簡単のために指数関数モデルとして扱うものとする。実際上は、MG などの電源、ゲート変圧器、絶縁変圧器などの信頼度は他に比較して高いものと考えられるので、主にゲートパルス発生装置と制御装置について考慮すればよいと考えられる。このような観点から信頼度関数を次のように置く。

$$\text{ゲートパルス発生装置の信頼度: } R_{GP} = e^{-\lambda_{GP}t}$$

$$\text{制御装置の信頼度: } R_{CC} = e^{-\lambda_{CC}t}$$

$$\text{総合の信頼度: } R_{GT} = e^{-\lambda_{GT}t}$$

第 6 図 サイリスタ本体の信頼度分析図

Fig. 6. A figure of reliability analysis of overall thyristor valve.

第 7 図 ゲートパルス発生装置および制御装置

Fig. 7. Pulse generating and control device.

3. サイリスタバルブの信頼度計算プログラム

〈3・1〉サイリスタバルブの信頼度表現方法 サイリスタバルブの信頼度評価を行なう際、これをどのように表現するかは実際の観点からも、また信頼度解析上からもきわめて重要である。サイリスタバルブの信頼度を表現するために、われわれは、まず一つのサイリスタバルブをとり、それを構成する素子（あるいは付属素子）がある決められた数（たとえば全素子数の 10% 前後）だけ機能を失ったとき、このサイリスタバルブは運転停止を必要とするものと定義する。次にたとえば 100 台のサイリスタバルブが稼働しているとき、どれか一つのサイリスタバルブが（上に述べた

意味で) 運転停止を必要とするまでの時間を T_{99} とする。別の言葉でいえば 100 台の中 99 台のサイリスタバルブは T_{99} 以上連続して運転持続できるわけで、われわれはこの T_{99} を 99% 運転持続時間と定義することにする。同じような方法で T_{90} , T_{50} なる 90%, 50% 運転持続時間も定義できるが、本論文では便宜上 T_{99} , T_{50} をとることにする。またサイリスタバルブの運転停止を必要とすると判定するための素子故障数は全素子数の 10% とした。

〈3.2〉サイリスタバルブの信頼度計算モデル

サイリスタバルブ本体は、一般に第1図(a)のように N 個のサイリスタ素子とその付属部品から構成されるモジュールが多数(M 個)直列に接続されている。ここで、信頼度計算上モジュール内を機能的に A 回路と B 回路に分けて考える。〔第1図(a)参照〕 A 回路内のどれかの素子部品が故障すると、その A 回路は内部短絡される。また、 B 回路の素子部品が故障すると、1モジュール全体が内部短絡される。なお、ゲート回路の故障はその発生箇所と故障モードに応じて、 A 回路または B 回路の故障になるのでそれぞれに含めて考えた。

〈3.3〉サイリスタバルブの信頼度計算上考慮すべき電圧 サイリスタバルブの絶縁設計電圧の一例を示すと第1表のようである。この信頼度計算手法ではサイリスタバルブの許容耐電圧としては、避雷器の保護レベル電圧 E 。またはこれに若干の裕度 (γ) をみた γE を使用し、素子の一部が故障して健全素子にかかる分担電圧が素子の定格電圧をこえたときこの素子は故障するとして扱った。また、素子のデレレーティング率、故障率などを決める常時印加電圧としては定格直流電圧 E_d を使用することにする。

〈3.4〉計算手法概要 信頼度計算は次の手順によって行なう。

- (i) 各素子の運転時間は指数分布と仮定し、0～の一様乱数を発生しておおのの運転時間を求める。この場合、 A 回路、 B 回路を一つの単位として扱う。
- (ii) おおのの運転時間を $t_1, t_2, \dots, t_n$ としその中で最小のものを求める。 t_i^* が最小であったとすると、新たに故障する素子は i^* で、前回の故障時点から新たに素子が故障するまでの運転持続時間は t_i^* となる。このとき i^* が A 回路の場合には、その A 回路を短絡し、 B 回路の場合にはその B 回路を含むモジュール全体を短絡する。
- (iii) 回路状態が変化したので、このときの健全な回路に対する電圧分担率を求め、分担率が許容値以上になった回路は故障したとして内部短絡する。

第1表 サイリスタバルブの絶縁レベル

Table 1. The insulation levels of thyristor valve.

項 目	佐久間変換装置試験所の例	
	電圧 (kV)	サイリスタ数 (モジュール数)
設計最高電圧 (VDF×定格直流電圧)	E_M	480
サイリスタバルブBSIL (=BIL)	E	400
避雷器緩波頭放電電圧上限 (=衝放電電圧上限保護レベル) 電圧	E_a	340
“ 下限		250
最高くり返し電圧波高値	E_r	212
過渡過電圧波高値		164
定格交流電圧波高値		155
定格直流電圧	E_d	125

ただし、サイリスタバルブの絶縁破壊特性 ($V-t$ 特性) は一定とする。サイリスタ用避雷器の放電開始電圧-時間特性も一定とする。ここで、サイリスタ素子の定格電圧を E_1 (2.5kV)、サイリスタ素子の直列数を $M \times N$ 個 (192 個) とすれば、
 $VDF = E_1 \times MN / E_d = E_M / E_d$ (3.84)
 となる。() 内は佐久間変換装置試験所の例。

第8図 シミュレーションのタイムチャート

Fig. 8. Time chart for simulation.

(iv) 回路状態が落ち着いた時点で、電圧分担率に対応する各素子の故障率を求める。

(v) 新しく求めた故障率をもとに(i)～(iv)までの計算をくり返し、全素子が故障するまで行なう。

(vi) 全素子が故障すると1ゲーム終了とし、これが必要ゲーム数 (100 ゲーム程度) 行ない、これらのデータを統計処理して、結果として出す。この計算の概略フローを第9図に示す。

〈3.5〉 保守方法のシミュレーション サイリスタバルブは多数の構成要素からなっているので、これまでの電力機器とは異なった方法で保守が行なわれるものと思われる。また、保守方法および保守周期などがサイリスタバルブ全体の信頼度に大きな影響を与えるはずである。このプログラムでは次の二つの保守方式を模擬できるようになっている。なお、定期保守時期以前にサイリスタバルブを停止する必要が生じれば

第9図 サイスタバルブの信頼度シミュレーション概略フロー
Fig. 9. Outline flow of simulation of thyristor value reliability.

Fig. 9. Outline flow of simulation of thyristor value reliability.

いうまでもなく直ちに保修する。また、定期保修時期にいたっても、運転を継続しうる場合は定期保修時期に達すると同時にそのバルブを保修するものとする。

(a) 保修周期 TPM 経過すると、MV 台のバルブをあらかじめ定められた順番に従って保修していく。一巡した後は始めのバルブにもどり以後同様の保修をくり返す。

(b) 保修周期 TPM 経過した場合、MV 台のバルブのうちその時点で最も故障サイリスタ数の多いバルブを優先的に保修する。

また、プログラムでは保修時のミスも考慮するため保修にあたって不良素子を修復せずそのまま看過する割合、すなわち不良の見落し率 α (看過した不良素子数/全不良数) と保修作業により健全な素子に損傷を与える割合、すなわち

素子損傷率 β (損傷素子数/全健全素子数) を考慮できるようになっている。

〈3.6〉プログラムの規模、計算時間など 今回開発したプログラムの概要は次のとおりである。

(1) 規模

サイリスタ数 300 個

(2) 使用計算機ならびに言語

計算機 HITAC 5020 E

使用言語 FORTRAN IV

(3) 計算時間ならびに所要記憶容量

計算時間 約 3 分 30 秒 (100 ゲーム)

所要記憶容量 約 27kW

〈3.7〉計算例 計算例の一例を第 10 図および第 2 表に示す。

4. 本プログラムの特徴

本論文で述べたサイリスタバルブ信頼度プログラムの特徴を列挙すれば次のようである。

(1) デジタル計算機を使用し、モンテカルロシミュレーション法を用いた結果、実際上起こりうる種々の要因を具体的にかつ定量的に検討することが可能となった。

(2) 一部素子が故障したときの各素子の電圧分担率の変化、およびその素子故障率に与える影響を考慮している。このため各素子の故障特性のふるまいをいっそう正確に模擬できるようになっている。

(3) 各素子の耐圧特性の影響も具体的に考察しうる。

(4) サイリスタバルブの信頼度に重要な影響を及ぼす保修方法などのバルブ運用方法について、具体的な検討を行なう手段が確立された。なお、サイリスタ

第 10 図 サイリスタバルブの運転時間特性

Fig. 10. Operation time characteristics of thyristor valve.

第 2 表 アウトプットの一例

Table 2. An example of outputs.

CASE=10004		GAME=1	
ST	JAT	IA	IB
4875.26	186	6	1
7859.42	180	12	2
16193.62	174	18	3
23605.32	168	24	4
24449.03	162	30	5
28684.28	156	36	6
28839.84	150	42	7
30325.38	144	48	8
36387.49	138	54	9
37597.76	132	60	10
37597.76	0	192	32
IA	TAVRG	TSGM	BAVRG
1	6066.69	4762.23	0.96
2	6264.52	4859.09	1.00
3	6264.52	4859.09	1.00
4	6264.52	4859.09	1.00
5	6264.52	4859.09	1.00
6	6264.52	4859.09	1.00
7	11220.42	7328.08	1.92
8	11478.82	7485.56	2.00
9	11478.82	7485.56	2.00
10	11478.82	7485.56	2.00
11	11478.82	7485.56	2.00

CASE: ケース番号, GAME: ゲーム番号, ST: シミュレーション時間, JAT: 健全 A 回路数, IA: 故障 A 回路数, IB: 故障 B 回路数, TAVRG: シミュレーション時間の平均値, TSGM: シミュレーション時間の標準偏差, BAVRG: B 回路故障数の平均値

バルブの信頼度の協調を計ることはサイリスタバルブの実用化にあたって最も基本的な問題の一つであるが、本プログラムはこの面でも大きな役割を果しうると信じる。われわれは、今後さらにこの問題についても検討を加える予定である。

(昭和 48 年 1 月 9 日受付)