UDC 537.523.5:537.633.9
621.3.064.46

論文

52-B53

スパイラルアークの形成とその動特性

正 員 長 縄 廣 司 (名城大)

正 員 宮 地 巖 (名 大)

1. ま え が き

高電圧長距離送電において、直流方式を交流方式と比較した場合、建設費の点から見て、経済的であること。周波数の異なる系統間の電力融通にさいし、直流を介して行なえば同期化の問題がなく、各系統は独自に周波数の制御を行ない得ること。また、系統が分離されて短絡容量の軽減ができるなど、多くの点で直流送電が有利であることがわかった。現在、その実施方法について検討がなされている⁽¹⁾。

直流多端子系統において、交流系統と同じく故障区間のみをしゃ断することによって、他の健全な分岐線への事故波及を防止する方法をとれば、直流しゃ断器が必要となる。まだ、これに対処する十分なしゃ断器が開発されていなく、系統構成上、その開発が急務とされている⁽²⁾。

直流は交流のように半サイクルごとに、電流が瞬時的な零点通過をしないので、何らかの限流作用によって直流電流をしゃ断することが必要となる。しかし、限流効果を極端に増せば、電流の急変に基づく過大な異常電圧が発生し、更に、線路に貯えられた電磁エネルギーが消弧を妨げて、しゃ断は一層困難なものとなる。また、異常電圧の上昇は系統機器の絶縁強度の観点からも問題を招くこととなる。

直流しゃ断は、交流しゃ断と比べて本質的な相違があることで、高電圧大電流のしゃ断器を開発することが困難で、技術的にも難かしいとされている。筆者らは、アークに直角な磁界を加え、これを大きく伸ばして、限られた消弧室の空間を有効に利用することで、アーク電圧を高め、電流しゃ断を行なう方式を開発した。

磁気しゃ断方式は、原理的にも古くから用いられて

いる⁽³⁾。しかし、使用電圧の高電圧化につれ、しゃ断に必要なアーク長を得る機構上に問題があって、高電圧には不相当とされていたが、アークをスパイラル状として、限られた消弧室内で十分に輪を抬げることによって、必要なアーク長を得ることで問題は解決される。

鳳、福田氏らは、電極軸と平行な縦磁界で交流アークを点弧し、搜索コイルに誘起する電圧と、2方向から見たアーク姿態でアークがスパイラル状に伸展すること、アークの直径を小さくすれば、スパイラル状の傾向が強くなることを報告している⁽⁴⁾。しかし、この方法はしゃ断器への実用開発までには至らなかった。

最近、SF₆ガスの性能が消弧剤として優秀であるということが認知されるに及んで、電力用しゃ断器へも積極的に用いられるようになった。これに伴ってSF₆ガス中の消弧現象、アーク動特性などSF₆ガスに関する多くの研究発表がなされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

SF₆ガス中の小電流アークは、複雑なアーク姿態となって長さを伸ばす。また、他のガス中に比べて、直径の小さい電流密度の高いアークとなることから、電磁駆動力が強く作用する。隣接するアークの細げきに深くガスが浸透してアークの周囲を包むので、隔離が容易となる。これらの総合効果がアーク姿態を複雑な形状にするものと考えられる。

この論文では、SF₆ガスを充てんした消弧室に、電極軸に平行な縦磁界を作用させ、この中でアークを点弧すれば、ほとんど必らずアークがスパイラル状に変形して輪が拡大することを報告する。次いでアークとSF₆ガスとの接触による冷却効果が高まって、アーク電圧を高くすることで電流は限流し、直流しゃ断が行なわれることを報告する。

2. 実験装置

しゃ断試験は第1図に示した実験回路による。試験電圧は、3.3kV—100kVA、交流三相単巻変圧器の出力タップの切換えを行なうことより、シリコン全波整流器の出力電圧を1, 2, 3, および4kVに調整して

Formation of Spiral Arc and its Dynamic Characteristics. By Hiroshi Naganawa, Member (Faculty of Science and Technology, Meijo University) & Iwao Miyachi, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University)

長縄廣司: 正員, 名城大学理工学部電気工学教室
宮地 巖: 正員, 名古屋大学工学部電気工学教室

第 1 図 実験回路

Fig. 1. Schematic diagram of experimental circuit.

与えられる。また、しゃ断装置をインピーダンスの無視できる導体に置きかえたときの回路電流、すなわち規約短絡電流は⁽⁷⁾、出力電圧 1kV につき 350A である。このとき、保護用しゃ断器 MBB は投入器 S の動作後 3 サイクルでしゃ断するよう設定されている。

消弧室はエポキシ製の内径 90 mm、高さ 300 mm の円筒形で、上下に金属ふたがあり、電極間には発弧用のヒューズ線が取付けられるような構造となっている。金属ふたの脱着は容易に行なわれ、Oリングで消弧室と密着し室内は真空、加圧に耐えるものである。消弧室中央部の外壁にはアクリル板の観測窓が設けられ、その両側に一對の励磁巻線が巻かれている。励磁巻線はしゃ断する回路と直列に接続され、巻線を通る電流（しゃ断電流）によって、電極軸方向と同方向の縦磁界を生じる。また、消弧室へのガス封入は、真空ポンプを用いてあらかじめ真空引きを行なったうえで所定の高気圧を各試験ごとに新しく封入する。

アーク姿態の観察は 35 mm 高速度カメラにより、電極の軸方向と軸に直角な 2 方向の観測窓から見た、同時刻のアーク姿態を、反射鏡を通して同一のフィルム面上に撮影して行なわれる。なお、高速度カメラの内部には光電素子が組込まれ、これがアーク姿態の撮影時刻に信号パルスが発生する。パルスは試作のブラウン管オシロ装置に記録され、同時刻のアーク時間、アーク電圧および、アーク電流に対応したアーク姿態であることが確認できるようになっている。

消弧室内の磁束密度は、励磁巻線によるものとアーク自体によるものととの合成となる。励磁巻線が、しゃ断すべき主回路と直列接続された自己励磁方式では、電流の大きさによって磁束密度は一層影響をうける。消弧室の電極軸中心上における A-A' で、励磁巻線の電流によって生じる磁束密度分布特性を第 2 図に示す。

電極軸中心点 P の磁束密度は試験の結果、励磁巻

第 2 図 消弧室内部の磁束密度分布

Fig. 2. Magnetic flux density inside the arc chamber.

線の巻数 N 、励磁電流 I (A) に対して $3.1 \times 10^{-2} NI$ (G) となった。また、アークによる磁束密度の影響を見るため電極間隔 30 mm の間に直径 50 mm の、スパイラル状に 3 回巻きた銅線のアークモデルを置いた場合について実測した。アークモデルを流れる電流方向によって、点 P の縦軸方向の磁束密度が異なり、試験電流 $I=25$ A の範囲で励磁巻線のつくる磁束密度に対し、約 $\pm 30\%$ 変化した。

3. スパイラルアークの形成

縦磁界中に置かれた固定電極間に銅ヒューズ線を張る。電流によって、ヒューズ線が溶断した後のアークが電磁駆動力を受けて運動するさいの振舞いを観察した。その動きは第 3 図で説明される。図の縦磁界は上部電極側より下部電極側に向かう磁束により得られ、均一な磁束密度をもつとする。ヒューズ線が発弧する瞬間、アークがわずかでも Z 軸に対して屈曲しておればアークを流れる電流のうち磁束と直交する成分によって、アークは電磁駆動力を受け力の作用方向に移行する。この作用はアークを流れる電流の向きによっては逆方向となる。アークの動きはその形状と電流の向きで次のように分類される。

(1) 電流通路の XY 平面上への射影が、Z 軸を中心に半径方向外側に向かうアークに対しては、XY 平面上で反時計方向に移行しようとする電磁駆動力が働く。

(2) (1) の場合と反対に、電流が半径方向内側に向かうアークには時計方向に移行させる力が働く。

(3) Z 軸に平行な縦方向のアークは、磁束と鎖交

第 3 図 アークの運動

Fig. 3. Movement of arc path.

しないので直接的には電磁駆動に関与しないが、アークの形状変化を考えると、移行部分間の継ぎの役目を果す。

(4) Z 軸を中心とした水平な輪状のアークを流れる電流が時計方向の場合には、輪を拡げる方向の力が働く。

(5) 水平な輪状に反時計方向に流れる電流のアークには、輪を小さくする力が働く。すなわち、Z 軸の中心に向かう力が働いて、アークは縮められる。

これらのことより、電流が上部電極から下部電極に向かってアークを流れると、発弧後のアークが屈曲からスパイラル状に変形し、この場合の電流方向は上部から見て時計方向に流れ、アークの各部は放射方向の電磁駆動力を受けて、輪が外側に向かって伸びる。また、両固定電極表面上のアークの足は輪が拡がるにつれて、互いに逆方向に移行する作用を受ける。このようなアークの拡がりと、アークの足が電極表面上を回転することによって、アークはスパイラル状に拡がりその巻数とその輪の大きさを増大し、アークの実長を大きく伸ばすことが可能となる。電磁駆動によってスパイラル状に拡がるアークを、ここではスパイラルアークという名で呼ぶことにする。

このようにスパイラルアークの伸展は、アークの幾何学的形状に大きく左右されるが、その影響を確認するために次のような実験を行なった。すなわち、銅ヒューズ線発弧直後のアーク形状が、直線状のものとスパイラル状のものについて、アークの初期の形状が以後のアークの伸展に及ぼす影響、および、電流のしゃ

(b) スパイラルヒューズ発弧

DC : 4kV, 1,400A, 限流値 90A, SF_6 : 6atm

第 4 図 ヒューズ線の形状とスパイラルアークの形成

Fig. 4. Formation of spiral arc initiated by different types of fuses.

断効果に与える影響を求めた。第 4 図左端に示すように電極間隔 60 mm に 0.1 mmφ の銅ヒューズ線の一つは直線状に、他の一つはあらかじめスパイラル状にして張り、発弧後のアークの伸展状況を X 軸、Z 軸の両方向からカメラに撮影した。なお、何回かの予備実験の結果から、消弧室の大きさ、しゃ断電流および、磁束密度などから、スパイラルの直径を 5 mm に選定した。

第 4 図は DC, 4kV, 規約短絡電流 1,400 A, 限流値 90 A の試験例であり、同図(a)は直線状の銅ヒューズ線を用いた場合のアーク姿態であり、(b)はスパイラル状の銅ヒューズ線を用いたものである。スパイラル巻きのアークは直線状の場合とは異なり、発弧前のスパイラル巻きされた、ヒューズ形状を維持して拡がり、アークは半径方向にスパイラルを大きく拡げてアークの長さを伸ばしている。従って、スパイラルヒューズ発弧の場合、直線ヒューズ発弧に比べて所要しゃ

第 1 表 直流アークしゃ断特性

Table 1. Arc characteristics of DC interruption.

ヒューズ形状	最大アーク長 (cm)	アーク時間 (ms)	しゃ断電流限流値 (A)
直線	64.3	5.3	90
スパイラル	61.1	1.7	90

DC : 4kV-1,400 A, SF_6 : 6atm

断時間が短縮された。第1表にヒューズ形状による直流アークのしゃ断特性を示す。

直線ヒューズによる発弧の場合には、アークが直線状からスパイラル状に移行するために、多くのアーク時間が必要である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、アークがスパイラルに変形すれば、以後速やかにアークは拡がっていく。

以上の結果、いずれのヒューズ形状を用いても、縦磁界中のアークは次第にスパイラルアークに移行して電流をしゃ断する。

4. スパイラルアークの動特性

第3図に示された縦磁界中で、アークの電流が上部電極から下部電極に向かって時計方向へ、らせん状に流れば、XY平面上でアークを放射方向に拡げる電磁駆動力が働く。しかし、ヒューズ線の巻き方向と電流方向との相互関係によっては、駆動力の作用方向が反転する。発弧直後から引続いて放射方向に電磁駆動力が発生する場合を放射巻き、発弧によりスパイラルが一度収縮する場合を、求心巻きと呼ぶこと

(a) 放射巻

(b) 求心巻

DC: 1kV-350A 限流値 93A, SF_6 : 5atm
スパイラルヒューズ: 3巻, 別磁巻線: 60巻

第5図 スパイラルアーク姿態の変化

Fig. 5. Developing sequence of spiral arc profiles.

にする。

スパイラルヒューズ線の巻き方向によってアークが拡がる様相を、観察したものの例を第5図に示した。これは $0.1\text{mm}\phi$ の銅線を半径 5mm, 巻回数3巻きのスパイラルヒューズとして、電極間隔 30mm にそう入し、封入 SF_6 ガス圧 5atm のもとで、DC 1kV, 規約短絡電流 350A, 限流値 90A の条件で行なった試験結果で、(a)図は放射巻きのアーク姿態を、(b)図は求心巻きのアーク姿態を示す。

これら(a)(b)図において、上段はそれぞれZ軸から見たアーク姿態、下段はX軸から見たもので、図中に付した数字は上下のアークの位置を対比するためのものであり、また、各上段の図中の点線の円は、上下の電極の位置を示している。これらの試験結果から、放射巻きの場合は、第5図(a)に示すように、発弧後スパイラルアークは順調な拡がりや伸びを示しているが、求心巻きの場合には同図(b)に示すように、発弧直後からのスパイラルアークの拡がりは見られず、0.96ms後のアークは不規則な形に押しつぶされ、新しい小ループが発生している。その後4.26msまでの間のアークの近接した部分で短絡し、もとのスパイラルアークは一部巻きもどされた形となり、次第に求心巻き部分は消滅する。その後は放射巻き方向のアークが成長伸展して行く。

求心巻き状態のアーク間の短絡現象は、引き続き伸びるアークの形状が、求心巻きより放射巻きへと転向を促す効果を与える。また、アーク時間はアーク全体が放射巻き状態となるまでの形状変化の過程に左右される。その結果、求心巻きの場合にはしゃ断に必要なアークの実長を得るまでの時間が延びる。なお、第5図と同一条件で実施した5回の試験における平均のループ短絡現象は、放射巻きの場合 0.51回/ms, 求心巻きの場合 2.94回/msであった。

5. アークしゃ断とアークの短絡

アークしゃ断を促進するためには、発弧後のアークを SF_6 ガス中で、電流密度の大きい細い直径のスパイラル状とし、次でこれを消弧室内で十分な大きさに拡げて、アーク長を伸ばすことが必要である。これによって消弧室の空間利用率を向上させ、 SF_6 ガスとの接触を高めて、冷却効果を増加させることができる。また、アークの足を回転移行させることによって電極温度の上昇を抑制して電極の消耗を防ぎ、かつ金属蒸気の発生を防止することができる。更にアークの足の回転は、スパイラルの巻回数を増すほど望ましい効果がある。

DC: 2.8kV-926A, SF_6 : 6atm

第 6 図 アークの短絡

Fig. 6. Short circuit of conducting arc path.

伸展途中のアークの部分が、相互に短絡することを防げば、アークの実長の増大につれて見掛けの抵抗が増加し、アーク時間特性の時間むらを少なくするとともに、しゃ断効果をあげることができる。

第 6 図は DC, 2.8kV-926A の電流しゃ断のさい、アークの短絡前後のアーク姿態を示した 2 例である。写真は消弧室の Z 軸方向から見たものであり、薄い支

第 7 図 スパイラルアークによる直流しゃ断特性
Fig. 7. Interrupting characteristics of DC by spiral arc.

持片とこれによって支持された上部電極が破線で示されている。(a)図はアークが広がる途中に発生した、小ループが短絡した場合の形状変化を示す。(b)図は大きく広がったアークの足が上、下電極上で互いに半回転して出会ったとき、足部につながるアークの間隔が不十分であることによって、大きなループが短絡した場合を示す。

1,000A 以下のしゃ断試験によれば、多くは小ループの短絡であり、主として電極軸より離れた器壁付近で生じている。この傾向は、 SF_6 の封入ガス圧が低いほどアークの広がりが大きいほど多く見受けられる。また、短絡回数は低い圧力ほど多く、かつ、アークの進行性の少ないほど小ループが発生し難い。これらのことから、スパイラル数が減少し、消弧室の空間的利用率が悪く、必要な消弧室容積が増加する結果となる⁽¹⁰⁾。

第 1 図の消弧室電極間に直線ヒューズを張り、スパイラルアーク方式で、DC, 1kV-350A のしゃ断試験を行なった。そのアーク姿態、アーク電圧および電流のオシログラムを第 7 図に示す。アーク姿態は消弧室の X 軸、Z 軸から見たもので、高速度カメラに内蔵した光電素子の発する撮影信号パルスで、同一時刻のアーク姿態と電圧、電流との対応が明示される機構となっている。ここで X 軸から見たアーク姿態のうち、c 点のアーク形状に比べ d 点のアーク長が短かく、アーク電圧も下がっている。これは c 点以後に、アークの短絡が起きたことを示す。従って、限流効果を高めるためには、短絡が発生しないようにすることが肝要である。

次にアークの短絡長と、短絡発生ひん度を求めた。まずアーク姿態からアークの全長 l を求め、この時刻に対応するアーク電圧の値 v_a から平均の電位の傾き $E = v_a/l$ を求める。 E とアーク電圧の変動値 Δv_a よりアークの短絡長 $\Delta l = \Delta v_a/E$ が得られる。また、のこぎり状にアーク電圧が急変する、不連続部分の発生回数でもって短絡発生ひん度を表わした。すなわちこの場合にはアーク電圧の不連続な、のこぎり状の変化は、大なり小なりアークの短絡によって生じたものと、アーク姿態の変化から見なした。

第 2 表は励磁巻線 60 巻きの消弧室で、電極間隔 30mm に張った直線ヒューズの発弧により、DC, 1kV-350A をしゃ断した試験例である。圧力の増加によって短絡発生ひん度は減少する傾向にあり、大ループの短絡はアークを 1

第 2 表 スパイラルアークの短絡発生ひん度

Table 2. Frequency of occurrences of short circuit in spiral arcs.

スパイラル数 短絡前-短絡後	発 生 ひ ん 度							
	2atm		3atm		5atm		7atm	
	ループ		ループ		ループ		ループ	
	大	小	大	小	大	小	大	小
4 - 4		2		1		4		1
4 - 3	6				4		2	
4 - 2	2							
4 - 1	3							
3 - 3		8		7		6		4
3 - 2	10		9		2		1	
3 - 1	4						1	
2 - 2		4		6				
2 - 1	5							
計	44		23		16		9	

DC: 1kV-350A 限流値 115~122A

励磁巻線: 60 巻, 直線ヒューズ発弧

度に 10 数 cm も短絡することが判った。なお, 小ループの短絡も多く発生した。

発弧直後には, 短絡は下部電極の近傍に多く発生することが認められ, アーク時間の経過とガス温度の上昇につれて, 電極中央部から, 更に上部電極近傍にも短絡が発生した。実験結果によれば, 2atm の場合には, 過半数が一度に 10cm 以上の短絡を生じている。圧力が 5~7atm になれば, 短絡長は 5cm 程度のがほとんどで, 圧力増加は短絡長を小さくする傾向にあるようである。

6. 直流しゃ断への適用

第 8 図は電極間隔をパラメータとした場合の SF_6 ガス圧に対するアーク時間の関係を示す。同図は直線ヒューズの発弧によるもので, 測定値は多数回試験結果の平均で表わされている。この試験結果から, アーク時間特性は電極間隔が広いものほど, 圧力が高いほど, 限流効果によって速くしゃ断することがわかる。

スパイラルアークを直流しゃ断器に適用する場合, 電極の開離による発弧アークの拡がり, 当然開離速度によっても影響を受けるが, 本質的にはヒューズ発弧の場合と, ほぼ同様な拡がりをもつアーク姿態となる。ただ, 開離速度の遅い場合には, 狭い電極間に発生するスパイラルアークの絶縁距離が小さくなり, 短絡し易くなる。すなわち, ヒューズ線発弧の場合は電極の開離速度の影響を無視した, しゃ断器と見なすことができる。

第 9 図は, 直流しゃ断器に適用した例で, $\phi 120\text{mm}$ の消弧室で, DC, 2.8kV-926A を電極開離によって

DC: 1kV-350A 限流値 86~110A, 励磁巻線: 60 巻
直線ヒューズ発弧

第 8 図 アーク時間特性

Fig. 8. Arcing time characteristics.

DC: 2.8kV, 926A, SF_6 : 6atm第 9 図 電極開離時のアークの拡がり
と足の動き

Fig. 9. Expansion of arc path and rotation of arc spots in case of contact separation.

しゃ断した場合のアーク姿態を示している。(a)~(d)の順序に従って, アーク時間の経過とともにアークは大きく輪に拡がり, アークの足は両接触子上で, 互いに逆方向に移動してスパイラル数を増す状態が示されている。この試験例のように電流が 1,000A 程度

の大きになると、だ行性は減少する。このように優れた絶縁特性をもつ SF_6 ガス中で、スパイラル化したアークの間にガスが深く浸透する結果、短絡発生ひん度は少なく、アークの拡がりによる冷却効果が有効に作用し、小容積の消弧室で大きい限流効果が得られている。

7. む す び

高気圧の SF_6 ガスを満たした消弧室内に、電極軸と平行な縦磁界を与えた場合、電極間に張ったヒューズ線を溶断発弧させた後のアークは、電磁駆動力によって容易にスパイラル状に伸展することが判った。このようなスパイラルアーク方式で直流電流のしゃ断を行えば、アークは放射方向に拡がりながらアークの実長を伸ばすから、小形、軽量の消弧室でしゃ断に必要なアークの長さを得ることができる。

この論文に示したしゃ断方式は、アークの受ける電磁力がしゃ断電流の自乗に比例する結果、大きい故障電流ほど、アークのスパイラル化の傾向が強く現われる。また、 SF_6 ガスの消弧性とアークの冷却効果とあいまって、アーク抵抗を増加し、極端な異常電圧を発生することなく、電流をしゃ断することができる。

筆者らは、 SF_6 ガス中でスパイラルアークが形成さ

れる機構を明らかにし、大容量直流しゃ断器を開発するための一つの足がかりを得るため、基礎的なしゃ断試験を行ない、電極間隔、励磁の強さ、および SF_6 ガス圧力のアーク動特性に与える影響を求めた。

終りに、この研究を進めるにあたり、ご討論いただいた、名城大学理工学部 古田久一教授、信州大学工学部 永野泰男教授、ならびに名古屋大学工学部 鬼頭幸生教授に厚くお礼を申し上げるとともに、終始この実験に協力いただいた名古屋大学工学部 水野 保助手、名城大学理工学部 大野英之助手、ならびに同電気機器研究室の卒業生諸君に厚く感謝する。また、この研究の一部には、名城大学より学術研究費の援助を受けたことを付記する。 (昭和 50 年 11 月 22 日受付)

文 献

- (1) 電気学会：昭46電気工学年報 245 (昭 47-3)
- (2) 町田：直流送電 25 (昭 46-2) 東京電機
- (3) 潮・大木：しゃ断器・避雷器 192 (昭 45-10) 東京電機大
- (4) 福田：電弧 228 (昭 23-10) 河出書房
- (5) 伊藤・宮本・鎌谷：三菱電機技報 39, 8, 947 (昭 40-8)
- (6) 潮・宮本：電学誌 82, 714 (昭 37-5)
- (7) 電気学会：電力ヒューズ JEC-175, 7 (昭 43)
- (8) 長縄，他：昭46電気学会全国大会 No. 704, 923
- (9) 長縄，他：昭50電気四学会東海支部連大 No. 144
- (10) 長縄，他：昭47電気四学会東海支部連大 No. 18 p-E-15, 290