大気中における直流 kA 級アークの電気特性と移動特性

正員 砂辺 欣也 (電中研)

正員 稲葉 次紀 (電中研)

1. ま え が き

直流送電は長距離化、大容量化および系統安定化などの面で多くの利点があるため、既に各国において実用運転に入っており、今後ともその運用が拡大するものと予想される。送電線における故障アークはがいしの破損やホーン、鉄塔、および電線などの溶損を生じる。これらは主としてアークの電位の傾き、アーク柱および電線上のアークスポットの移動現象などのアーク特性に影響される。従って、直流系統を交流系統と同等以上に高信頼度で運用するには、送電線に万一故障が生じたときのために、直流大電流アークの特性などを解明し、事前に適切な対策を講じておくことが重要である。しかし、直流の場合、交流に比べて大容量の試験用電源が得難いことなどから、送電線を対象とした大電流領域のアーク特性に関しては報告も少なく、ほとんど明らかにされていない。そのため、本論文では送電線を対象とした長ギャップ・大電流領域における気中直流アークの電位の傾きおよびアーク柱の局所的な蛇行性、電極上のアークスポットの移動速度などの基礎特性を実証的に明らかにした^{(1)~(3)}。

2. 実験方法

表1に対象としたアーク特性の測定項目、実験条件および範囲を示す。

アーク柱の特性を測定するため、図1(a)に示す水平直線配置電極装置を、また電極上のアークスポットの移動速度を測定するため、(b)図に示す水平平行鉛直面配置電極をそれぞれ用いた。

(a) 水平直線配置電極

(b) 水平平行鉛直面配置電極

図1 実験装置

Fig. 1. Experimental configurations.

表1 アーク特性測定条件

Table 1. Test conditions.

測定項目		アーク電圧-電流特性・アーク柱の上昇速度		アークスポットの移動速度		
電極	配置	水平直線〔図1(a)〕		水平平行鉛直面〔図1(b)〕		
	直径	1cm	2cm	1cm	2cm	120mm ² ACSR
	材質*	鉄, 銅, アルミニウム		鉄, 銅, アルミニウム ²³⁾		
電極間距離		0.1~2cm	10~300cm	50, 100, 150cm		100cm
電源電圧		DC 200 V	DC 10~40 kV	DC 10~15 kV		
アーク電流		50~100 A	50~10,000 A	100~1,000 A	1,000~5,000 A	5,000 A
発弧ヒューズ線		0.5A 警報用ヒューズ線 0.12mmφ 細銅線	0.12~0.2mmφ 細銅線	0.2~0.8mmφ 細銅線		
気象条件		無風		無風		
電源回路		低圧直流発電機		大容量短絡発電機+シリコン全波整流器		

*: 鉄: SS-41 (C: 0.05%), 銅: Cu₂-H (Cu: 99.5%), アルミニウム: A5056 (Al: 93% 以上, Mg: 4.5~5.6%)

Electric and Moving Characteristics of DC Kilo-Ampere High Current Arcs in Atmospheric Air. By *Kinya Sunabe*, Member & *Tsuginori Inaba*, Member (High Power Section, Yokosuka Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry).
砂辺欣也: 正員, 電力中央研究所横須賀研究所電力部大電流研究室 稲葉次紀: 正員, 電力中央研究所横須賀研究所電力部大電流研究室

また、アーク電流および電圧はそれぞれ分流器および抵抗分圧器を用いてミニコンピュータに収録し、記録・解析した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3. 水平直流アークの電気特性

〈3・1〉 アーク電圧最低値-電極間距離特性 アーク電流 100 A におけるアーク電圧最低値 $V_{\min}$ -電極間距離 D_{AK} 特性を図 2 に示す。

$V_{\min}$ はヒューズ線による発弧後、アークの浮上や湾曲が始まる前の、見掛け上アークが直線状態にあるアーク電圧の最低値かまたは浮上で湾曲が生じた後に再短絡が生じた時点で、アークは微小な蛇行が認められるもののほぼ電極中心線上にある。 $V_{\min}$ はほぼ電極間距離 D_{AK} に比例して増加し、 D_{AK} が 0.1~300 cm の範囲でばつきは少なく、次式で表される。

$$V_{\min}(\text{V}) = A(\text{V}) + BD_{AK}(\text{cm})^C \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A は電極の接触電圧降下、 B はアークの電位の傾きに相当する値、 C はべき数で、鉄、銅およびアルミニウム電極による差は特に認められず、それぞれ 19~20 V, 13 および 0.95 と実測された。更に、電極間距離 D_{AK} を 60~300 cm に限定すれば、全体の $V_{\min}$ に比べて電極の接触電圧降下 A の占める割合は $D_{AK}=60$ cm の場合でも 3% 以下となるから、(1) 式を次式に簡略化しても十分に近似できる。

$$V_{\min}(\text{V}) = BD_{AK}(\text{cm})^C \dots\dots\dots (2)$$

〈3・2〉 見掛け上のアーク柱の電位の傾き-電流特性

アーク柱は見掛け上一本の太い直線状コラムとみなせるが、詳細な写真撮影によると実際にはコラム内を弧心が極めて複雑に蛇行しており、その弧心の長さは見掛けのコラム長より相当長いことが判明している。しかし、コラム内の弧心長を求めることが極めて困難なことから、実用上は一本の太いコラムとみなしたほう

図 2 アーク電圧最低値-電極間距離特性

Fig. 2. Measured characteristics of minimum arc voltage.

図 3 見掛け上のアーク柱の電位の傾き-電流特性

Fig. 3. Measured apparent voltage gradient of arc column.

が便利なため、ここでは見掛けの長さを用いて電位の傾きを明らかにした。

(1) アーク電流による電位の傾きの変化 電極間距離 D_{AK} : 60~300 cm, アーク電流 I : 50~10,000 A の範囲における見掛けのアーク柱の電位の傾き E -電流 I 特性を求めると、図 3 に示すように E は電流の増加に対しほぼ一定であるものの、次式で表わすことができながら低下する傾向を示す。

$$E(\text{V/cm}) = pI(\text{A})^{-q} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 p および q は定数でそれぞれ 13.8 および 0.068 と実測された。

E は測定中 (約 0.1~0.2 s) のアーク電圧最低値 $V_{\min}(\text{V})$ を単純に電極間距離 $D_{AK}(\text{cm})$ で除した値であり、前述したようにアーク柱の実長は局所的な蛇行により D_{AK} より長くなるため、見掛けの電位の傾きを示す。また、図中の実測値は記号を記入した電流値の近傍 $\pm 20\%$ の範囲内の測定値の最大値および最小値ならびに算術平均値を示している。

(2) 経過時間によるアーク電圧の変化 アーク電圧は例えば図 4 に示すように、電流が 100 A 以下で鉄電極の場合、発弧用ヒューズが溶断した直後に最低値を示し、時間経過と共に徐々に増加する傾向があるのを除けば、その他の場合、発弧用ヒューズが溶断後徐々に低下し、数十 ms 後に最低値を示し、そのまま安定して持続する。

図 5 にアーク電圧最低値の算出時間 (発弧瞬時基準) を示す。アーク電流 100 A を除外すればアーク電圧最低値の生じる時間はアーク電流の増加と共に短くなるように見える。これらの時間はアークが安定するまでの時間遅れと考えたほうが妥当であろう。

一方、図 6 に発弧用ヒューズが溶断した直後のアーク電圧極小値 e_s を示す。アーク電流が 0.1~7 kA の範囲では電圧値に大きな差は見られず、電極間距離に比例してほぼ一定値を示している。これに比べてアーク電流が 8~10 kA の場合、これの約 1.5 倍の値を示している。

図 4 電流値によるアーク電圧波形の違い
(電極間距離 $D_{AK}=3$ m)

Fig. 4. Influence of arc current on wave form of arc voltage.

図 5 アーク電圧最低値の算出時刻

Fig. 5. The time for calculating minimum arc voltage.

これは発弧用ヒューズが影響しているものと推定される。すなわち、発弧用ヒューズとして前者は 0.12 mmφ スズめつき銅線または 0.2 mmφ 銅線を使用しているのに対し、後者の場合、電源設備の都合で電源電圧を高くすることができないため、上記ヒューズでは発弧後アークが継続しないため 0.8 mmφ 銅線を使用した。発弧直後の金属蒸気量は発弧用ヒューズの直径のはば 2 乗に比例すると考えられ、0.8 mmφ の場合 0.2 mmφ に比べて約 16 倍の銅蒸気がヒューズ溶解

図 6 ヒューズ発弧直後のアーク電圧極小値

Fig. 6. Minimum arc voltage just after pre-arcing time of fuse.

直後のアーク経路の気体中に混入しているものと推測される。気体の温度が発弧直後のような 10,000 K 以下の温度領域（と推測する）では、気体に銅などの金属蒸気が混入すると、その電離電圧（銅：7.87 eV）が窒素や酸素原子の電離電圧（窒素：14.53 eV，酸素：13.614 eV）と比べて低いため、電子密度が極端に（1~3 けた）増大する⁽⁶⁾。従って、アーク電圧は高くなるものと考えられる。

しかし、時間経過と共に銅蒸気は飛散し、アーク柱の温度が 15,000 K 以上に上昇すれば金属蒸気混入の影響は少なくなるため⁽⁶⁾、発弧用ヒューズの違いによる電子密度の差異はなくなるものと考えられる。

(3) 実質アーク長による電位の傾きの修正 16 mm 高速度カメラ（撮影速度：1,000 こま/s）または 35mm スチールカメラ（シャッター速度：1/2,000s）による撮影例として、図 7 にアーク電流が 100 A および 5,000 A の両ケースについて、発弧約 15 ms 後におけるアーク柱の形状の違いを示す。

アーク柱は巨視的に見ると、電極間の最短距離を結んでいるものの、細部を見ると相当に湾曲している。従って、実質アーク長を把握することは難しいが、この細部における湾曲数が大電流より小電流の場合に多いことから、アーク電流 50~10,000 A の範囲では実質アーク長から求めたアーク柱の電位の傾きは図 3 に示した見掛けの電位の傾きより更に小電流ほど低く、広い範囲にわたり一定値を示すものと考えられる。

図 8 にアーク電流値が安定している期間における

図 7 電流値によるアーク柱の形状の違い
(発弧から約 15 ms 後)

Fig. 7. Influence of arc current on figure of arc column.

図 8 アーク柱電位の傾きの変動幅

Fig. 8. The range of fluctuation of voltage gradient of arc column.

アーク電圧の変動幅を電極間距離で除したものを示す。単位電極間距離あたりのアーク電圧の変動幅 $\Delta V/D_{AK}$ (V/cm) は電極間距離 D_{AK} が変わってもあまり変化せず、アーク電流が増すに従い低下する。このことは、アーク電圧の変動はアークの浮上などによる大きなアーク形状変化 (この場合、 D_{AK} が小さいほど $\Delta V/D_{AK}$ は大きくなると考えられる) よりむしろアークのルーピング数がアーク電流が小さいほど多くなることと対比している。更に、アーク電流 500 A 以上ではアーク電圧の変動幅はアーク電圧最低値を上回ることがない。すなわち、アーク電圧最高値は最低値の 2 倍を超えないことがわかる。

(4) 直流と交流との比較 交流アークにおける電位の傾き E -電流 I 特性として、タングステンおよび銅電極で電極間距離 0.1 m, アーク電流 1 以下 ~ 10,000 A で求めた結果⁽⁷⁾ や鉄, 銅, アルミニウム電極で電極間距離 0.07 ~ 1.7 m, アーク電流 1 ~ 10,000 A で求めた結果⁽⁸⁾ から, 比較的安定なピーク値に対し, 次式が報告されている⁽⁹⁾。

$$E(\text{V/cm}) = A_{AC}(\text{V/cm}) + B_{AC}I(\text{A: 波高値})^{-n} \quad (4)$$

ここで、 A_{AC}, B_{AC} および n はそれぞれ 10 V/cm, 50 W/cm および 1.0 である。

図 3 によれば、100 A 程度の小電流では直流と交流との間に相違はほとんど認められないのに対し、直流アーク電流 10,000 A における E の値は 7.4 V/cm を示し、(4) 式から求められる同等な交流アーク電流 (波高値) に対する E の値 (約 10 V/cm)⁽⁹⁾ より 25% ほど低い。電位の傾きの低下する理由としては、一般に連続エネルギーによるアーク半径の増加⁽¹⁰⁾、電極から噴出する金属蒸気の混入率の低下⁽⁶⁾、放射成分の減少⁽¹¹⁾ などが考えられるが、ここではアーク半径の影響が有力である。交流アークの場合、アーク柱の半径は電流半波ごとに繰返し変化しているものと考えられる。交流大電流 (kA 級) におけるアークの電圧-電流特性はヒステリシスを描く⁽¹²⁾⁽¹³⁾。すなわち、電流上昇時は高いアーク電圧を示し、電流が減少するときにはこれよりも低いアーク電圧を示す⁽¹³⁾。これは、電流上昇時にはアーク半径を増加するためにエネルギー (高いアーク電圧) を必要としていることを示している。アーク電圧の算出位置は電流の波高値付近を通常用いるが、このときでもアーク半径は同じ電流値の直流アークの場合と比較すると小さいこと (高いアーク電圧) が予想される。ちなみに、アーク電位の傾きはアーク半径の 1.5 乗に反比例して減少する⁽¹¹⁾ から、十数% だけ半径が小さければアーク電位の傾きは 25% 上昇することになる。

〈3・3〉 電流を考慮したアーク電圧最低値特性

〈3・1〉 節ではアーク電流を一定とし、電極間距離を変化した場合のアーク電圧最低値について、電極間距離を 60 ~ 300 cm に限定して (2) 式を得た。次いで、〈3・2〉 節では電極間距離 60 ~ 300 cm で実測されたアーク電圧最低値から単位長あたりのアーク電圧最低値 (電位の傾き) を求め、アーク電流を変化した場合のアーク柱の電位の傾きについて (3) 式を得た。これらから、電極間距離 D_{AK} : 60 ~ 300 cm, アーク電流 I : 50 ~ 10,000 A の範囲におけるアーク電圧最低値 V_{min} (V) を表現する実験式として、 $I=100$ A を代入すると (2) 式となり、 $D_{AK}=150$ cm (D_{AK} の適用範囲のはば中間値) を代入すると (3) 式となる次式が考えられる。

$$V_{min} = B' D_{AK}^C I^{-q} \quad (5)$$

ここで、 $B'=17.8$, $C=0.95$, $q=0.068$ である。上式より、アーク電流および電極間距離の両者が変わった場合の V_{min} 値が予測できる。図 9 にアーク電流をパラメータとして V_{min} 値を算定した結果を示す。

図 9 アーク電圧最低値 - 電極間距離特性
Fig. 9. Evaluated minimum arc voltage.

4. 水平直流アークの局部蛇行特性

〈4.1〉 アークの最大偏移距離 アークはヒューズ線による発弧後、初め見掛け上直線状態にあるが、その後アーク自身の電流による磁界や対流によるじょう乱などで不規則に運動する。ここで、図 10 に示すように電極中心の水平面または垂直面へのアーク柱の鉛直距離を上方、下方および左右方向偏移距離と定義する。水平アーク柱の上下方向の最大偏移距離はアーク電流、電極間距離あるいはアーク柱の途中短絡現象（ルーピング）⁽⁹⁾などにより制限されるものと考えられる。図 10 は高速度撮影フィルムの解析結果から求めたアーク柱の最大偏移距離である。電極間距離 D_{AK} : 130~300 cm, 電極材料：鉄，銅，アルミニウム，通電時間：0.1~0.2 s の範囲では特に変化は認められないものの、アーク電流値に対しては、1,000 A 以下では 30 cm 以内であり、電流がこれを超えると徐々に増大し、10,000 A では約 50 cm に達する。また、下方より上方のほうがアーク電流 100~1,000 A の範囲では 10 cm ほど変化が大きいのは、浮力による上昇が十数 cm 見込まれる⁽¹⁴⁾のとほぼ対比している。すなわち、アークの浮力による全体的な浮上速度 V_b (m/s) は電流のほぼ 1/3 乗に比例し、アーク電流 I : 20~500 A_{rms}, 電極間距離 D_{AK} : 20~170 cm, 水平直線配置の鉄電極における交流アークについて次式が報告されている⁽¹⁴⁾。

$$V_b \text{ (m/s)} = 0.37 I \text{ (A}_{rms}\text{)}^{0.29} \dots\dots\dots (6)$$

例えば、 $I = 100 \sim 1,000$ A では $V_b = 1.4 \sim 2.7$ m/s となり、時間 0.05 s の間に 7~14 cm の上昇分が見込まれる。

〈4.2〉 アーク柱の局部的な上昇速度 アーク柱

図 10 水平アーク柱の最大偏移距離
Fig. 10. Measured maximum deviation of horizontal arc column.

の上昇の要因としては、(i) アークの浮力、(ii) 磁界、(iii) 風の影響が考えられる。

(i) アークの浮力による全体的な浮上速度 V_b は前記(6)式で表される⁽¹⁴⁾。しかし、アーク柱の浮上は電極間距離が狭い場合あるいはアーク電流が大きい場合には起こりにくく、また発弧後 3 サイクル (約 60 ms) 以内では浮上は始まらんとされている⁽¹⁵⁾。(6)式は浮力が熱的原因で生じるものと考え、直流アークに対しても同様に適用し得るものと思われる。

(ii) アーク柱の上昇に対する磁界の効果を知るとは、コラムの形状が時間と共に変化するため難しい。SF₆ ガス中の計算例であるが、アークコラムを短コラム線分の連続で近似し、コラム内を均一電流密度分布と仮定し、コラムの時々刻々の位置変化を二次元アークモデルで考察した結果によると、自己電流の電磁力によるアークコラムの移動速度は、アーク電流の 1/2 乗に比例すると考えられる⁽¹⁶⁾。

(iii) 風の影響によるアークの移動速度は風速にほぼ等しいと実測されている⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾。しかし、アークコラム付近の風速および風向を実際に測定することは難しい場合が多い。

高速度カメラ撮影フィルムを解析して、電極間距離 D_{AK} : 130~300 cm におけるアーク柱の局部的に繰返される移動運動における上昇速度 V_u (m/s) を上昇高さ/上昇時間の平均値で求めた結果を図 11 に示す。

V_u は上記要因のうち、(i) アークの浮力および(ii) 電磁力の両方の合成によるものと考えられるが、アーク電流と共に増加し、次式で表示できる。

$$V_u \text{ (m/s)} = 0.081 I \text{ (A)}^{0.71} \dots\dots\dots (7)$$

図 14 アークスポットの移動状態撮影オシログラム例

Fig. 14. An example of measured oscillograms of arc-spot travelling.

図 15 アークスポットの瞬間移動速度算出方法

Fig. 15. Method for evaluating instantaneous velocity of arc-spot.

図 14 にアークスポットの移動状態撮影オシログラム例を示す。アークスポットは、ほぼ一定速度で走行し、ある程度進行すると出発点よりやや進行した位置で短絡することを繰返し、全体として進行していることがわかる。

撮影オシログラムから、アークスポットの瞬間移動速度 V_s (m/s) は図 15 に示すようにアークスポットの移動線とオシログラムの時間軸との成す角度 θ から次式で求まる。

$$V_s = SK_L \tan \theta \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 S : オシロペーパーの撮影速度 (m/s),

K_L : 電極上とオシロペーパー上の長さの比

電極のうち、軟鉄（黒皮付き）では、一対の電極を全走行回数（8回）すべてに使用したが、履歴による速度差は特に認められなかった。その他については、すべてアーク走行履歴のない新品を使用した。

〈5.2〉 平行電極間のアーク柱の走行速度

アーク柱を電流密度一定の円柱と仮定すると、その直径はアーク電流の平方根に比例すると考えることから、アーク柱の移動速度 V_a (m/s) は低速度の場合、空気の粘性抗力が速度に比例するとして原理的に次式で表される⁽¹⁹⁾。

$$V_a \propto B I C' \dots \dots \dots (10)$$

ただし、 B : 磁界の強さ、 I : アーク電流、 C' :

定数値で 0.5

ここで、 B はアーク自身の作る磁界であるから I に比例する。よって、上式を改めて $V_a \propto I^C$ とすれば $C = 1.5$ となる。しかし、アークが高速で移動するにつれて粘性抗力はそれ以上に増加し、通常、速度の2乗にまで増加するとされているため、高速の場合には C の値は更に 0.75 にまで半減することも考えられる。更に、上式は本来均一印加磁界の場合の式であり、平行電極間のようにアークの位置により磁界の大きさが異なる場合に、一律に適用するには誤差を伴うと思われる。以上を総合すると C の値は 0.5~1.5 の間にあるものと想像される。

実際の例では、平行鉄電極間における交流アーク柱の移動速度の実測値として、アーク電流 150~1,400 A において $C = 0.67 \sim 0.79$ ⁽²⁰⁾ あるいは電流 500~20,000 A において 0.75⁽²¹⁾ の値が報告されている。

〈5.3〉 アーク柱などに作用する磁界の影響

図 16 に示す平行配置電極間のアーク経路に生じる磁界の強さを求めると、 OO' 間がアークで結ばれた場合の下部および上部電極に流れる電流 I (A) によって、上部電極の中心から距離 r (m) 離れた P 点に生ずる磁界 H (A/m) は次式で表される。

$$H = I / \{4\pi(D_{AK} - r)\} + I / (4\pi r) \\ = \{I / (4\pi r)\} \{1 / (1 - r/D_{AK})\} \dots \dots \dots (11)$$

アークスポットの近くでも電極中では電流が中心を流れるものと仮定すれば、(11)式は図 16 で示される。

従って、アークスポットの移動に作用する電極表面の磁界 H_s (A/m)、およびアーク柱に最も弱く作用する電極間中央の磁界 H_a (A/m) はそれぞれ次式で表される。

$$H_s = \{I / (\pi d)\} \{1 / (2 - d/D_{AK})\} \dots \dots \dots (12)$$

$$H_a = I / (\pi D_{AK}) \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 H_s は電極間距離 D_{AK} (m) に反比例し、アーク柱の移動速度に直接影響すると考えられる。

一方、 H_a は電極直径 d (m) にほぼ反比例し、アー

図 16 平行電極間アーク経路に生じる磁界

Fig. 16. Magnetic field along arc column between parallel bars.

クススポットの移動速度に影響すると考えられる。

送配電線の故障アークにおいては通常 $D_{AK} > d$ のため、(12)式および(13)式から常に $H_i > H_a$ となる。また、アーク柱は電極間中心部より電極近傍のほうが細いため、通常の電極配置においては、アークの移動に対する空気の粘性抗力も電極近傍のほうが少ないと想定され、アーク柱の移動速度よりアークスポットのそのほうが速いのが普通と考えられる。実際にもそのように移動するが、図 14 でわかるようにアークスポットが先行してもアーク柱の移動が遅れているため、再びアークスポットより後の位置でアーク柱が電極へ短絡してしまう現象が生じ、巨視的に見るとアーク柱の移動のほうが速いように見られるものと考えられる。

このほかにアークスポットのこう着現象があり、アークスポットの移動を妨げる作用をするものと考えられる。特に図 12 において、小電流域 (100 A) の陰極点の移動速度が極端 (1~2 けた) に低下するなどの原因として、こう着力をあげた。しかし、アーク電流 100 A 以上の陽極点および 1,000 A 以上の陰極点では発弧後 10 ms 以下⁽¹⁹⁾で、ここでいうところのこう着現象から脱しているものと考えられ、別の検討が必要であると考えられる。

6. あとがき

直流送電システムの電力輸送効率を向上させるためには、直流系統に故障が生じた場合の直流大電流アークの特性やアークスポットの移動範囲などを解明し、適切な対策を講ずることが重要である。このため、直流アーク電流 I : 50~10,000 A, 電極方向: 水平および平行, 電極間距離 D_{AK} : 10~300 cm, 電極材料: 鉄, 銅, アルミニウムおよび ACSR などの条件を中心として、アークの諸特性を実験により検討し、概略以下の結果を得た。

(1) 直流アーク電流 100 A における水平アークの電圧最低値 $V_{\min}$ (V) はほぼ電極間距離に比例し、(1)式で表せる。

(2) 水平アーク柱の電位の傾き E はアーク電流に対してはほぼ一定であるが、電流の増加でわずかに減少し、(3)式で表せる。そして、その値は交流アーク電流 (波高値) に対する値より、大電流域において約 25% 低い。

(3) 上記 2 項から、電極間距離 60~300 cm, アーク電流 50~10,000 A の範囲における直流アーク電圧最低値を求める実験式として(5)式を示した。

(4) 外部磁界のない場所での水平アーク柱の局部ルーピング (蛇行性) による電極中心軸水平面からの上下方向への最大偏移距離は、アーク電流が 1,000 A 以下では 30 cm 以内であるが、電流がこれを超えると徐々に増大し、10,000 A では約 50 cm に達することを示した。また、このときのアーク柱の局部上昇速度 V_a は(7)式で表されることを明らかにした。

(5) 水平平行電極上のアークスポットの瞬間移動速度 V は(8)式で表され、アーク柱の移動速度より速い。更にアーク電流 100 A の陰極点では、こう着力のため(8)式より極端 (1~2 けた) に移動速度が低下することを明らかにした。

これらの解明事項は、直流送電時の事故波及を抑制し、再投入時間の短縮、ひいては停電時間の短縮を図るために役立つものと期待される。

最後に、本研究の機会を与えていただいた当所横須賀研究所 尾崎勇造所長、ならびに研究を遂行するにあたり種々御指導いただいた深川裕正電力部長に対し、また実験実施にあたり御協力いただいた大電流研究室関係各位に感謝の意を表します。

(昭和 63 年 5 月 16 日受付, 同 63 年 12 月 12 日再受付)

文 献

- (1) 砂辺: 電中研研報, No. 683003 (昭 58)
- (2) 砂辺・岡崎・松田・関口: 昭 58 電気学会全大, No. 167
- (3) 砂辺・稲葉: 昭 58 電気学会東京支大, No. 82
- (4) 泉・合田・関口・高橋: 昭 57 電気学会全大, No. 1140
- (5) 泉・合田・関口・高橋: 昭 58 同上, No. 1041
- (6) 天川: 電中研研報, No. W86009 (昭 61)
- (7) L. A. King: ERA-Rpt., G/XT 172 (1961)
- (8) 半田: 電中研技報, No. 71001 (昭 46)
- (9) 半田: 電中研総報, No. 111 (昭 57)
- (10) Y. Kito, I. Miyachi & T. Sakakibara: Proc. 4th Int. Conf. on Gas Discharges, IEE, Swansea (1976)
- (11) 稲葉: 昭 52 電気学会全大, No. S1-4
- (12) 尾崎: 電学誌, 87, 1430 (昭 42-7)
- (13) 合田・松田・稲葉: 電中研研報, No. 684004 (昭 60)
- (14) 半田: 電学論 B, 99, 561 (昭 54-9)
- (15) 清水・半田: 昭 51 電気学会全大, No. 1011
- (16) 稲葉: 名古屋大学位論文 (昭 46)
- (17) 合田・渋谷・清水: 電中研研報, No. 684007 (昭 60)
- (18) 砂辺・稲葉: 電学論 A, 106, 428 (昭 61-9)
- (19) 福田: 電弧 (昭 23) 河出書房
- (20) 尾崎・補永: 電中研技報, No. 66007 (昭 41)
- (21) 合田・清水・渋谷: 昭 58 電気学会全大, No. 987