大気中交流アークの浮力による自然消弧

電力中央研究所 半田 栄

1. はじめに

アーク柱は浮力によって浮上し、長く伸ばされることによってアーク電圧が増大し自然消弧するが、消弧するまでの時間や、それまでに浮上する高さなどを調べることは、保護継電器の動作時間整定、電力回路の事故アークによる二次的事故の誘発防止、設計などに有用である。大気中交流アークは複雑な形状をしているが、これを単純なモデルに置き換え、浮上することによる長さの増加と浮上速度の関係を求めれば、自然消弧時間を見積ることができる。ここでは、水平直線状に配置した電極間の大気中交流アークについて、自然消弧時間を求め実験と比較した。電極は $2\text{ cm}\phi$ の鉄、銅およびアルミニウムの棒で、直列負荷は無誘導抵抗およびインダクタンスである。電源電圧はおもに $4,000\text{ V}_{\text{rms}}$ で行ない、また比較のため $2,000, 12,000\text{ V}_{\text{rms}}$ でも若干の実験をした。発弧時の電流は $20\sim 5,000\text{ A}_{\text{rms}}$ である。発弧時のアークの電圧-電流特性を求め、その結果を用いて自然消弧時間を計算したが、実験結果と比較的良好一致をみた。

2. アークの電圧-電流特性式

アークの電圧-電流特性は古くから実験によって求められており、一般には Ayrton, Steinmetz および Nottingham 氏らの与えた実験式が広く適用されている。三者の実験式にはそれぞれ差異はあるが、

- (1) アーク電圧はアーク長に比例すること
- (2) アーク電圧は電流の n 乗 ($n>0$) に逆比例すること

に関しては一致している。以上の関係がなりたつことは、電流 30 A 以下、電極間距離 50 cm 以下のアーク

についてはじゅうぶんに調べつくされている。しかるに、さらに大電流で、しかも大気中の自然アークについては、アーク柱の不規則な運動によって特性が正確には求め難いなどの理由から、これまでも二、三実験式を求めた例はあるが、じゅうぶんとはいえない。アークの自然消弧を調べるためには電圧-電流特性が必要なので、今回は新たにその特性を調べた。

〈2・1〉 実験方法 第1図に示す電極装置を室内(無風)に配置し、電極間に張った細銅線によって発弧させ、その電圧-電流特性を測定した。負荷は無誘導抵抗およびインダクタンスである。電極は $2\text{ cm}\phi$ の鉄、銅およびアルミニウムである。電圧、電流は発弧後3サイクル目(50 Hz ベース)の値を電磁オシログラフにより測定した。電流は実効値(波形は正弦波)、アーク電圧は波高値を読んだ。発弧後3サイクルではアーク柱は浮上を始めておらず、電極間にほとんど直線状になっていることを8ミリ撮影機によって確かめてある。また、発弧後1~2サイクルでは発弧時の急激な電圧の変動により測定回路が誘導を受け、測定値が大きな誤差を持つ。以上の理由により、発弧後3サイクル目の値を測定した。電極間距離 $0.07\sim 1.7\text{ m}$ 、発弧時(発弧後3サイクル目)電流 $20\sim 5,000\text{ A}_{\text{rms}}$ について実験した。

〈2・2〉 実験結果と考察 第2図は無誘導抵抗またはインダクタンスを負荷とした鉄電極アーク柱の電界と電流の関係を示す。ここで電界は、発弧後3サイクル目のアーク電圧を電極間距離(上記の理由により

第1図 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus.

Self-Extinction of AC Arc by the Buoyancy Force in Free Air. By S. HANDA, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry.)

半田 栄 正員、電力中央研究所技術第一研究所、電力第一部電力遮断研究室、アーク放電担当

20 mmφ 水平直線状電極。電極間距離 0.07~1.7 m。抵抗負荷ならびにインダクタンス負荷。○印はその近傍 ±10% の電流における電界の算術平均

第 2 図 大気中交流アークの特性

Fig. 2. Field-strength of AC air arc against current.

アーク長とみなせる)で除したものである。図中、電流が 50, 100, 200, 400, 1,000, 5,000 A_{rms} に記入してある ○ 印は、それぞれの電流値の近傍 ±10% の範囲内の測定値を算術平均した値である。電流が数百 A_{rms} 以上では電界はほとんど一定値となっている。図中の実線は、

$$E = (A + BI^{-n}) \dots\dots\dots (1)$$

$$A = 1.2 \times 10^3, B = 6 \times 10^3, n = 0.5$$

を示す。ここで、 E はアーク電界 (V/m), I は電流 (A_{rms}) である。この特性式は比較的良く実験結果を表わしているといえる。

電界は負荷の種類に依存しなかった。また、電極を鉄の代わりに銅およびアルミウムを用いて 50, 1,000 A_{rms} で実験したが、電界には有意差は認められなかった。

5,000 A_{rms} のデータ数は少ないが、電流を 1,000 A 程度以上に増加させると電界は徐々に上昇している。また、この傾向はすでに報告されている。⁽¹⁾

第 2 図には電極間距離が 0.07~1.7 m のものに対するすべての値が記入されており、それに対する有意差は認められなかった。電界 E はアーク長 l に依存していないといえる。これはアーク電圧 V_{ARC} が

$$V_{ARC} = EI \dots\dots\dots (2)$$

で示されることを意味している。また、これは実験範囲内では両電極降下電圧がアーク電圧に比して無視できる程度にアーク長が長いことによる。(2)式に(1)式を代入すればアークの電圧-電流特性の実験式を得る。

$$V_{ARC} = (A + BI^{-n})l \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 V_{ARC} , l の単位はそれぞれ V_{0-P}, m である。 A はじゅうぶん大きな電流値に対する E の値を示す。

第 3 図 アークを含む回路内の電圧分担

Fig. 3. Potential distribution in a circuit with arc.

n は電極 (陽極) 材料の沸点によって決まる定数であることが、1 cm 以下 10 A 以下の直流アークについて Nottingham 氏によって求められているが、⁽²⁾ 本報告の実験範囲のように長さ、電流値ともに大きなアークでは、アーク特性に電極材質が利くとは考え難い。また、上述したように電極材質による差異は認められていないので、今回のような条件では n は単に気体の種類と圧力によって決定されるものである。

3. 時間とともに長さが増大するアークの特性

自然条件下のアーク柱は一般に時間とともにその長さが増加する。これは浮力や電磁力によるアーク柱の運動が原因である。また、電極間距離が時間とともに増大して行く場合は、当然のことながらアークは長くなっていく。断路器による小電流しゃ断時のアークや、汚損液 (導電性液) 面の沿面アークの伸展などはこれに相当する。

〈3.1〉 アーク長と電流の関係 アーク長が増加すると、それに伴ってアーク電圧が上昇してゆき、回路を流れる電流は減少してゆく。回路は電源、アーク、各種負荷の直列で構成されていると考え、回路内の電圧分担は第 3 図のようになる。ここで、 V_s , V_{ARC} はそれぞれ電源電圧、アーク電圧で I は電流である。 Z は電源のインピーダンスをも含めた回路の直列インピーダンスで、 R , L , C はそれぞれ抵抗、インダクタンスおよびキャパシタンスである。 V_{ARC} は (2) 式で決定されるものであり、アークは交流に対しては純抵抗と見なすことができるものとした。 E は I の関数であり、 I は l の関数であるとする、図より

$$Z^2 I^2 = V_s^2 - E^2(I)l^2 - 2E(I)lRI \dots (4)$$

両辺を l で微分すると、

$$\frac{dI}{dl} = \frac{-E(I)[E(I)l + RI]}{l(E(I)l + RI) \frac{dE(I)}{dI} + Z^2 I + E(I)lR} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。アークが伸長することによる消弧現象は、アークのわずかな伸びが急激な電流の減少をもたらすことと等価であり、その条件は

$$dI/dl \rightarrow -\infty \quad \dots\dots\dots (6)$$

で示される。これは (5) 式の右辺分母が 0 となる条件であるから、

$$\frac{dE(I)}{dI} = -\frac{1}{l} \left(\frac{E(I)lR + Z^2 I}{E(I)l + RI} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

この条件を満たす l, I を l_1, I_1 とすると、これらは自然消弧時の値を示すことになる。

$$l, I \text{ の初期条件を } l_0, I_0 \text{ とすると, (4) 式は} \\ Z^2 I_0^2 = V_s^2 - E^2(I_0) l_0^2 - 2E(I_0) l_0 R I_0 \quad (8)$$

同様に l_1, I_1 では

$$Z^2 I_1^2 = V_s^2 - E^2(I_1) l_1^2 - 2E(I_1) l_1 R I_1 \quad (9)$$

(7) 式は l_1, I_1 では

$$\left. \frac{dE(I)}{dI} \right|_{I=I_1} = -\frac{1}{l_1} \left(\frac{E(I_1) l_1 R + Z^2 I_1}{E(I_1) l_1 + R I_1} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

(8)~(10)式より I_0 と l_1 の関係を求めることができる。直列インピーダンスが抵抗のみの場合 ($Z=R$) と、リアクタンスのみの場合 ($Z=\omega L-1/\omega C$) に分けて計算する。

(1) 式がなりたつとすると、

$$\left. \frac{dE(I)}{dI} \right|_{I=I_1} = -n B I_1^{-(n+1)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

であるから、(8)~(11) 式より

⬇ 抵抗負荷の場合 ($Z=R$)

$$1 - N \left(1 + \frac{nA}{X_1} \right) = T \left(\frac{1}{I_0} - W_0 \right) (X_1 - A)^{-1/n} \quad \dots\dots\dots (12a)$$

リアクタンス負荷の場合 ($Z=\omega L-\frac{1}{\omega C}$)

$$1 - N \left(1 + \frac{2nA}{Y_1 - nA} \right) = 2^{1/n} T^2 \left(\frac{1}{I_0^2} - W_0^2 \right) \times [Y_1 - (2+n)A]^{-2/n} \quad \dots\dots\dots (12b)$$

ここで、

$$N = 1/(1+n), \quad T = [(1+n)B]^{-1/n}$$

$$W_0 = (A + B I_0^{-n}) l_0 / (V_s I_0)$$

また、 X_1, Y_1 は l_1 の関数で、

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= V_s / I_1 \\ Y_1^2 &= n^2 A^2 + 4(1+n) X_1^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(12), (13) 式より I_0 と l_1 の関係を求めることがで

きるが、 V_s, l_1, l_0 は常に $l_1/V_s, l_0/V_s$ の形で変化するので、これを求めたほうが便利である。

$Z=R$ の場合に (12a) 式で $l_0=0$ (発弧時アーク長が 0), $A=0$ とすると

$$l_1 = \frac{(n+1)^{n+1}}{n^n B} V_s I_0^n$$

となり、これは Obenaus 氏が汚損面発弧におけるアークの伸展について求めた式である。⁽³⁾

(11) 式を (9) 式または (10) 式に代入して $I_1=I_0, l_1=l_0$ とおくと、発弧したアークが瞬時に自然消弧する電流値を与える式が得られる。その電流値を I_{0min} とすると、

抵抗負荷の場合

$$I_{0min} = \left[\frac{(1+n)B}{X_0 - A} \right]^{1/n} \quad \dots\dots\dots (14a)$$

リアクタンス負荷の場合

$$I_{0min} = \left[\frac{2(1+n)B}{Y_0 - (2-n)A} \right]^{1/n} \quad \dots\dots\dots (14b)$$

ここで、 X_0, Y_0 は l_0 の関数で、

$$X_0 = V_s / I_0, \quad Y_0^2 = n^2 A^2 + 4(1+n) X_0^2$$

である。

(9)~(11) 式より、 I_0 と l_1 の関係を求めると

抵抗負荷の場合

$$n I_1^{-(n+1)} = \left(\frac{1}{I_0} - W_0 \right) [A/B + (1+n) I^{-n}] \quad \dots\dots\dots (15a)$$

リアクタンス負荷の場合

$$n I_1^{-(n+2)} = \left(\frac{1}{I_0^2} - W_0^2 \right) [A/B + (1+n) I^{-n}] \quad \dots\dots\dots (15b)$$

〈3・2〉 大気中交流大電流アークの場合 大気中交流大電流アークでは 〈2・2〉 節の (1) 式より A, B, n が与えられているので、これらを (12) 式に代入すると、

抵抗負荷の場合

$$\frac{1 - \frac{1}{1.5} \left(1 + \frac{6 \times 10^2}{X_1} \right)}{8.1 \times 10^7 (X_1 - 1.2 \times 10^3)^{-4}} = \left(\frac{1}{I_0} - W \right) \quad \dots\dots\dots (16a)$$

リアクタンス負荷の場合

$$\frac{1 - \frac{1}{1.5} \left(1 + \frac{1.2 \times 10^3}{Y_1 - 6 \times 10^2} \right)}{1.05 \times 10^7 (Y_1 - 3 \times 10^3)^{-4}} = \left(\frac{1}{I_0^2} - W^2 \right) \quad \dots\dots\dots (16b)$$

となる。ここで W, X_1, Y_1 は (13) 式によって与えられるもので、

$$W = (1.2 + 6I_0^{-0.5}) \times 10^3 l_0 / V_s I_0 \left. \vphantom{W} \right\} \dots (17)$$

$$X_1 = V_s / l_1, \quad Y_1^2 = 3.6 \times 10^5 + 6X_1^2$$

である。(16)式の左右両辺をそれぞれ求めて作図により解く。後に便利のように $(l_1 - l_0) / V_s$ と I_0 の関係を l_0 / V_s をパラメータとして求めた。結果を第4図に示す。発弧時の電流が同じであれば、抵抗負荷の場合よりもリアクタンス負荷の場合のほうが長く伸びてから自然消弧することになる。

同様に、自然消弧する電流 I_1 と I_0 との関係を l_0 / V_s をパラメータとして求めると第5図となる。たとえば、電極間距離 1.6 m、電源電圧 4,000 V_{rms} ($l_0 / V_s = 4 \times 10^{-4}$) で、100 A_{rms} のアークを抵抗負荷でつけるとアークが伸びるに従って 58 A_{rms} まで減少して自然消弧することになる。図中の $I_1 = I_0$ の直線より左上では $I_1 > I_0$ であってアークは存在しない。この意味は、すなわち $I_1 = I_0$ ではアーク長が発弧時より少しでも伸びれば消弧するということであるから、この直線は第12図の曲線と等価なものである。

第4図 自然消弧までのアーク長増加分と発弧時の電流の関係(計算)

Fig. 4. Elongated arc-length by the self-extinction against current at the arc initiation for different initial arc-length.

第5図 発弧時の電流と自然消弧する電流の関係

Fig. 5. Critical current of self-extinction against current at the arc initiation for different initial arc-length.

4. 大気中水平直線電極間交流アークの自然消弧時間

アークは浮力によって浮上することにより、その長さが時間とともに増大してゆき自然消弧する。その間電流が変化しないとすると、自然消弧はアーク電圧が電源電圧に等しくなった場合(直列負荷は無視する)に起こることになるが、⁽⁴⁾ 実験結果を良く説明しているとは言い難い。

〈4・1〉 浮力によるアークの浮上 〈3・2〉節で求めたように、発弧時の電流 I_0 と電源電圧 V_s 、電極間距離 d_{AK} (ここでは l_0 に同じ) によって、伸長してゆくアークが持続しえる最大の長さ l_1 が決定される。いま、アークがほぼ第6図に示すように方形を保ちながら浮上していくものとする。第7図に8ミリ撮影機による測定結果を例示するが、この近似は概略としては妥当なものといえる。⁽⁵⁾ 第6図より

$$l_1 = 2h + l_0 \dots (18)$$

となる。

アークの浮上速度は浮上し始めを除いてほぼ定速であり、⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 電流が増加するとゆるやかに速度も増加する傾向にある。⁽⁷⁾ しかし、浮上するアークでは電流が時間とともに減少しているのであって、速度の電流依存性の考察は複雑になる。よって、ここでは速度は電流に依存せず一定であるとして考察を進める。速度を v とすると、 $h = vt$ ゆえ

$$t = (l_1 - l_0) / 2v \dots (19)$$

すなわち、第4図の縦軸は自然消弧時間に比例している。 v は 100 A で約 1 m/s である。⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾

第1図のような水平直線電極では、アークが浮力によっても浮上しない範囲があり、実験的に

$$I^2 / d_{AK}^3 \geq 4 \times 10^6 \text{ A}^2 / \text{m}^3 \dots (20)$$

と確かめられている。⁽⁵⁾⁽⁶⁾ この条件の範囲内では、アークは浮上しないので自然消弧しないことになる。

第6図 浮力によって浮上するアークのモデル

Fig. 6. Model of arc column lifted by the buoyancy force.

電極間距離: 1.7 m, 電流: 100 A_{rms}

第 7 図 浮上中アークの形状例 (左上より右へ, こま間隔 17.5 ms)

Fig. 7. An example of a shape of lifting arc.

(16), (17) 式 (第 4 図) と (19), (20) 式よりアークの自然消弧する範囲を求めることができる。

以上の考察では浮力以外の力を考えていないのであるが, 第 6 図のような上昇過程ではアーク柱の曲がりに対する電磁力など, はかの力も働いているはずである。ただし, 仮定したアークの形状や浮上速度は, それら他の力も働いている実際の状態について実験により求めたものであるから, 式と実験結果を比較することに問題はない。

電極配置が垂直直線の場合には, 浮力はアークを伸ばす方向には働きにくいので, 水平直線の場合に比べて自然消弧時間は相当に長くなるものと思われる。

〈4・2〉 実験結果と考察 第 1 図と同じ装置で〈2・1〉節と同じ条件のもとに実験を行ない, アークの自然消弧時間を電磁オシログラフより読みとった。オシログラフの一例を第 8 図に示す。結果を第 9 図に示す。電極間距離によって分類してある。電源電圧は 4,000 V_{rms} である。図中, ↑印がついているのは, その点の時間 (大部分が 1 s) で回路を切ったもので, 実際はより長い時間アークが持続する可能性のあることを示す。●, ○印は直列負荷がそれぞれ抵抗, インダクタンスの場合である。

〈4・1〉節で考察した式から, 第 4 図を用いて発弧時のアーク電流と消弧時間の関係を求めると第 8 図中に示した曲線となる。実線, 点線は直列負荷がそれぞれ抵抗, リアクタンスの場合である。直列負荷が抵抗とリアクタンスの直列でできている場合には, この間にはいると考えて良いであろう。また, アークの浮上限界 (20) 式より求めた直線も図中に示してある。2 本の線で区分された領域のうち, 右下側はアークが持続する範囲であり, 実験結果と良く一致している。電流が小さいところでは実験結果と計算結果に差が出ているが, これには小電流で浮上速度が小さくなることが一因となっているようである。

第 9 図を見ると, 同じ電流でも自然消弧時間はまちまちである。消弧時間の最低値は計算によって求めた

鉄電極, インダクタンス負荷, 電極間距離 1.6 m

第 8 図 オシログラフの一例

Fig. 8. An illustration of oscillogram.

曲線の近傍にあるが, この線はアークが単調に定速で上昇し続けると仮定して求めたものである。しかし, 実際はアークは上昇しながら第 10 図に示すように途中で短絡をくり返すことが多い。このため自然消弧する長さになるまでの時間が伸びるものと考えることができる。この途中, 再短絡を起こす条件はまだ明確でない。

電源電圧を変化させると, たとえば電極間距離が 0.8, 1.6 m の場合には第 11 図のようになる。同様に計算結果を記入してある。特に 2,000 V においては, 実験結果と計算結果との差が 4,000 V の場合より大きくなっており, 自然消弧時間への電源電圧の依存性は計算結果ほどに強くは表われていない。また, 電極間距離がこの図に示したように大きい場合には, 計算結果との差が著しい。

このように計算結果と実験結果との間には,

- (i) 電源電圧が低い場合
- (ii) 電極間距離が大きい場合
- (iii) 電流が小さい場合

に著しい差が生じているが, その原因は, 主に以下に示す理由によるものと考えられる。第一は, 小電流においては浮上速度が小さくなることであり, これを考慮すれば (iii) 項の条件での自然消弧時間の計算値は,

(a)

(b)

(c)

(d)

第 9 図 自然消弧時間の電流依存性

Fig. 9. Self-extinction time against current at the arc initiation.

第 10 図 浮上するアークの途中短絡

Fig. 10. Cut-down of a lifting arc.

負荷	実測値	計算値
抵抗	●	▲
インダクタンス	○	△
電源電圧	2×10^3 V	4×10^3 V

↑印は、その時間で回路を切ったもの

(a) 電極間距離 0.8 m

(b) 電極間距離 1.6 m

第 11 図 自然消弧時間の電流依存性
(電源電圧による変化)

Fig. 11. Self-extinction time against current at the arc initiation for different source-voltage.

さきに求めた値より大きくなる。第二は、浮上速度が浮上し始めには平均的な速度より小さいことであり、自然消弧時間の小さい条件、すなわち(i)または(ii)項の場合にはこれがきくので、平均的な浮上速度が計算に用いた値より小さくなる。これを考慮すれば、(i)または(ii)項の条件での自然消弧時間の計算値は

さきに求めた値より大きくなる。第三は、(iii)項の条件では電界が計算に用いた値より小さくなる可能性があることで、これを考慮すれば(iii)項の条件での自然消弧時間の計算値は、さきに求めた値より大きくなる。以上の三点を定量的に求めるまでには至っていないが、これらを見積れば計算結果と実験結果がさらに一致することが期待できる。

発弧したアークが瞬間に消弧する電流値 $I_{0\min}$ は(14)式で与えられるが、定数を代入すると抵抗負荷の場合

$$I_{0\min} = \left[9 \times 10^3 / \left(\frac{V_s}{d_{AK}} - 1.2 \times 10^3 \right) \right]^2 \dots (21a)$$

リアクタンス負荷の場合

$$I_{0\min} = \left[1.8 \times 10^4 / (Y_0 - 3 \times 10^3) \right]^2 \left. \begin{array}{l} Y_0^2 = 3.6 \times 10^8 + 6(V_s/d_{AK})^2 \end{array} \right\} \dots (21b)$$

これを図示すると第12図となる。図中、実線および点線は直列負荷がそれぞれ抵抗およびリアクタンスの場合を示す。たとえば、電極間距離 1.6 m、電源電圧 4,000 V_{rms} ($d_{AK}/V_s = 4 \times 10^{-4}$) のアークを抵抗負荷でつけた場合、発弧時電流が 47 A_{rms} では瞬時消弧することになる。この曲線は上述したように、アークがその長さを伸ばすために瞬時消弧してしまう電流を示したものであって、発弧可能最小電流との関係は不明である。しかし、試みに比較的太い細銅線 (0.8 mmφ) を両電極間に張った実験において、発弧した場合と発弧しなかった場合との実験結果を第12図中に示す。電極が鉄の場合の例で、● および ○ 印は直列負荷がそれぞれ抵抗およびインダクタンスの場合である。下

第12図 発弧したアークが瞬時に消弧する電流値

Fig. 12. Current on which the arc extinct instantly after its initiation.

線を加えたものが発弧しなかったものを示す。これによると、50 A_{rms} 以上では比較的良く一致している。

5. むすび

アークの自然消弧特性を調べることは、アークによる事故の拡大を防止するために必要である。本報告は大気中水平直線電極間交流アークの浮力による自然消弧を調べたものである。おもな結果を以下に記す。

(1) 水平直線電極間のアークは浮力によって浮上するが、その形状を方形で近似し、浮上速度 v を電流、時間によらず一定とし、アーク全長の増大によって電流が減少していくと考えると、自然消弧時間 t と発弧時の電流 I_0 、電極間距離 d_{AK} 、電源電圧 V_s の関係式は以下のように示される。

抵抗負荷の場合

$$1 - N \left(1 + \frac{nA}{X_1} \right) = \left(\frac{1}{I_0} - W_0 \right) T (X_1 - A)^{-1/n}$$

リアクタンス負荷の場合

$$1 - N \left(1 + \frac{2nA}{Y_1 - nA} \right) = 2^{1/n} T^2 \left(\frac{1}{I_0^2} - W_0^2 \right) \times (Y_1 - (2+n)A)^{-2/n}$$

ここで、

$$N = 1/(1+n), \quad T = [(1+n)B]^{1/n}$$

$$W = (A + BI_0^{-n})d_{AK}/(V_s I_0)$$

また、 X_1 , Y_1 は t の関数で

$$X_1 = V_s / (2vt + d_{AK})$$

$$Y_1^2 = n^2 A^2 + 4(1+n)X_1^2$$

ただし、アークの電圧は電界にアーク長を乗じたもので示されるとし、電界 E は電流 I の関数で、 A, B, n を定数として

$$E = A + BI^{-n}$$

なる形で示されるとした。

(2) 大気中水平直線電極間交流アークの電圧-電流特性を実験より求めた。実験条件は電極材質 2 cmφ 棒 (鉄, 銅, アルミニウム)、電極間距離 0.07~1.7 m、直列負荷: 抵抗, インダクタンス、電源電圧 2,000~12,000 V_{rms}、発弧時の電流 20~5,000 A_{rms} である。その結果、電極材質、電極間距離、電源電圧によらず、ほぼ

$$E = A + BI^{-n}$$

$$A = 1.2 \times 10^3, \quad B = 6 \times 10^3, \quad n = 0.5$$

となった。ここで I (A_{rms}) はアーク電流、 E (V/m) は電界で、ともに発弧後 3 サイクル目の値であるが、電界はアーク電圧波高値を電極間距離で除したものである。この時間ではアークはまだほとんど浮上していな

い。電界が電極間距離に依存していないという結果から、アーク電圧は El となる。

(3) (2)項と同じ条件でアークの自然消弧時間を測定した。その結果、自然消弧時間は電源電圧、電極間距離および電流によって決まるある下限を持つことがわかった。

(4) (1)項の結果へ(2)項の結果を代入して得られた実験式で、(3)項の結果をほぼ説明することができた。ただし、アーク浮上速度は 1 m/s とし、電源電圧には実効値を用いた。また、アークの浮上限界条件も考慮に入れた。電極間距離の長い場合 (1.6 m) と電源電圧の依存性については、まだ不じゅうぶんな点があるが、この点は浮上速度の電流と時間依存性を考慮することによって解決されるものと思われる。

(5) 時間とともに長さの増加していくアークでは、発弧したアークが瞬時に消弧してしまう電流値が存在し、その計算結果は $0.8\text{ mm}\phi$ の細銅線による発

弧最小電流の電極間距離と電源電圧への依存性および 50 A_{rms} 以上の電流において比較的良く一致した。

この実験の遂行にあたり、種々のご助力を賜った電力中央研究所電力第一部 有働部当任、同部電力遮断研究室 尾崎室長はじめ同室各位、中でも補永、尾野両研究担当に対し深謝する。また、実験に便宣を与えて下さった超高压電力研究所武山研究所 富山所長はじめ同所各位に謝意を表す。また、いろいろ手助けをしてくれた芝浦工大生 久保川君に感謝する。

(昭和 46 年 4 月 21 日受付, 同 47 年 6 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 尾崎: 電中研技研報告 No. 66080 (昭 42)
- (2) W.B. Nottingham: Phys. Rev. **28**, 764 (1926)
- (3) F. Obenaus: Dtsch. Elektrotechnik **4**, 135 (1958)
- (4) 半田: 昭 46 電気学会全国大会 155
- (5) 半田・尾崎(康): 電中研技研報告 No. 69012 (昭 44)
- (6) 半田: 電学誌 **91**, 1349 (昭 46-7)
- (7) 半田: 昭 45 日本物理学会春の分科会 4 PGH 1