過渡空気アーク時定数の器壁断面積および 中心温度依存性

正 員 松 村 年 郎 (名古屋大)

正 員 鬼 頭 幸 生 (名古屋大)

正 員 宮 地 巖 (名古屋大)

1. ま え が き

最近における電力システムの巨大化に伴い、しゃ断器を始めとする開閉保護装置の責務が増大しており、しゃ断アーク現象の学理的解明が望まれている。ここで対象とするのは、1気圧以上の高気圧中に点弧するアークで、電流の大きさは少なくとも数アンペア以上の領域である。電力系統では周波数 50 ないし 60 Hz を主体とする交流アークが発生し、消弧は普通電流零点付近で起こる。このような過渡的なアーク陽光柱については Cassie 氏⁽¹⁾および Mayr 氏⁽²⁾の理論がよく知られており、アーク時定数という概念が導入されている。

高気圧アーク陽光柱においては熱的過程が主体をなしており、局所熱平衡を前提として熱力学的手法でアーク特性を解明している。この観点に立てば、陽光柱の導電率分布は気体の温度分布から一義的に定まり、陽光柱の電気的特性はそのコンダクタンスから電圧電流の関係として導かれる。Gassie 氏は陽光柱断面積の変化に基づき、Mayr 氏は温度分布変化に基づいている違いはあるが、両者ともエネルギー平衡式における蓄積エネルギーをアークコンダクタンスと関係づけており、時定数はいずれもコンダクタンス変化の遅れを示す指標である。Yoon 氏らは Mayr 理論に基づいて

各種気体中に自由点弧するアークの時定数を実測している⁽³⁾。Frind 氏は陽光柱からのエネルギー損失が熱伝導のみによってもたらされる場合についてアーク時定数、陽光柱導電半径および気体の輸送特性との関係を論じている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。このほかにも、このような単純な損失機構を持つアークについて過渡特性の研究は盛んで、Edels 氏や Jones 氏ら⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾、Hertz 氏⁽⁹⁾、Hermann 氏⁽¹⁰⁾らによって進められてきた。

このような研究の中には、もちろん、電流のステップ状変化に対するアーク陽光柱の応答を論じたものもあり、輸送係数との関係にまで言及しているものも少なくない。しかし、これらはいずれも気体の輸送特性、これはもちろん温度の複雑な関数であるが、それを簡単に折線などで表示しているため、因果関係が数式で表わされる反面、結果がごく限られた物理的条件下にしか適用できない。また、Yoon 氏⁽³⁾、Edels 氏ら⁽⁶⁾は小さな電流変化について論じているため、その結果は準定常的な変化の時定数を与えていると言え、過渡状態におけるアーク時定数の具体的な数値例は少ない。

筆者らがここで取扱っているものは、1気圧の空気中に点弧し、損失機構が熱伝導によるアーク、具体的には器壁安定化アークであるが、これに比較的大きなステップ状の電流じょう乱を与えた場合の陽光柱の過渡応答からアークコンダクタンスの過渡的な時定数を導出している。ここでは高温空気の輸送係数の複雑な温度特性を、動的アーク方程式の数値解析に完全に導入しているので、この点に関しての近似はない。従って、本論文に述べている結果は、外的制約条件、すなわち与えられた器壁半径、器壁温度の下で、電流のじ

Dependence of Air Arc Time Constant on the Stabilizing Bore Cross-Section Area and on Axis Temperature in a Transient State. By Toshiro Matsumura, Member, Yukio Kito, Member & Iwao Miyachi, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).

松村年郎：正員，名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程
鬼頭幸生：正員，名古屋大学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

よう乱に対するコンダクタンスの応答をシミュレーションによって求めたということになる。この結果は 8.5 A から 31 A の電流範囲における数種の電流レベル間の推移について実験によって確かめてある。最終的に空気の場合、コンダクタンスの応答は陽光柱中心温度に対して一義的に整理することができ、過渡状態におけるアーク時定数と中心温度および器壁直径との関係を一種の実験式として導くことができた。この点、Frind 氏が解析的に時定数を導電半径および温度伝播率（熱伝導率/密度・定圧比熱）と関係づけ、Edels 氏らが時定数をアーク電流と対応づけたのとは対照的である。更に、本論文に示したような観点に立てば、陽光柱中心温度を媒介として、過渡推移中のコンダクタンスの時定数が具体的に決定でき、ここでの結果がいかなる電流変化に対する応答の算定にも適用できるところに特徴がある。

2. 器壁安定化空気アーク陽光柱の過渡応答

〈2・1〉 アーク陽光柱の基礎方程式 1 気圧の一定圧力条件の下で点弧する器壁安定化アークに外部から何らかのじょう乱が与えられたとき、その応答は局所熱平衡が陽光柱全域にわたって成立していると仮定すれば、陽光柱内温度の空間的・時間的変化を求めることに帰着する。放射による損失を無視することができる範囲を取扱うものとして、1 気圧で孔径 3~8 mmφ、電流範囲を 55 A 以下とした⁽¹¹⁾。安定化陽光柱内で軸方向の対流もないものとする。陽光柱は軸対称であると考えられ、温度に関して最終的に次式を得る⁽¹²⁾。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

ただし、 T ：温度、 r ：陽光柱中心から半径方向への距離、 t ：時間、 ρ ：質量密度、 C_p ：定圧比熱、 σ ：導電率、 κ ：熱伝導率、 E ：電界の強さ、 v_r ：半径方向の質量速度である。 ρ と v_r とは質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r \rho) = 0 \quad (2)$$

で結ばれている。他方、電界の強さ E はアーク電流 i と陽光柱単位長さあたりのコンダクタンス G との比

$$E = i/G \quad (3)$$

で表わされる。各時刻における G は、そのときの温度分布から求めた導電率分布を断面全体にわたって積分して求められる。

$$G = \int_0^R 2\pi r \sigma dr \quad (4)$$

ただし、 R は円形断面の安定化器壁の半径で、器壁は常に 300 K に保たれている。本論文ではこれを陽光柱半径として取扱う。

これらの式に現われる気体の物性係数 σ , κ , ρ , C_p などは温度の関数で、Yos 氏⁽¹³⁾によって与えられている数値を用いることにする。

境界条件として、(1) 陽光柱の直径を 3, 5 あるいは 8 mmφ, (2) 安定化器壁の温度を 300 K, (3) 外部じょう乱を加えられる前の定常点弧電流をそれぞれ指定する。

外部じょう乱としてアーク電流をステップ状に増減させることとする。このような条件の下で(1)式を数値積分すれば、温度 T の時間的・空間的変化が求まる。この際、高温空気の各物性係数の非線形な温度依存性を完全に計算過程に組み込むために、Hermann 氏の方法⁽¹⁰⁾をもとにして文献(12)に示した手法を用いるものとする。

〈2・2〉 陽光柱内温度分布の過渡応答

アーク電流が 19 A から 8.5 A にステップ状に減少した場合を例にとり、アーク陽光柱内の温度分布の過渡推移を第1図に示す。(a), (b) 図および(c) 図はそれぞれアーク直径 3, 5 および 8 mmφ の場合に対応している。陽光柱中心温度はそれぞれ 12,000 から 8,000 K, 10,000 から 7,000 K および 7,500 から 6,500 K へと移行している。1 気圧の安定化空気アークにおいては温度分布の特徴を中心温度によって分類することができる。すなわち、半径の大きさにかかわらず、中心温度が 8,000 K 以下ならば、かなり「平たんな温度分布」を呈し、中心温度が 8,000 K を越えると中心付近の温度のみが高まって「隆起した温度分布」をとるようになる。しかしいずれの場合も、顕著な導電性を示す 5,000 K (第1図(a)~(c)にその温度レベルを一点鎖線で記入してある) 以上の導電領域の占める半径は、陽光柱半径の少なくとも 75% 以上で、空気の場合導電半径があまり変わらないという特徴がある。

温度分布の過渡推移について着目すれば、第1図(a)のアーク直径 3 mmφ の場合、最初も最後も中心部が隆起した温度分布を呈している。このようなとき、電流変化直後の中心部の温度低下が著しいのに対し、周辺部の変化は緩慢でその低下量も大きくない。全体として中心部の温度変化が過渡応答の主体をなしており、約 70 μs を要して 8.5 A の定常温度分布に達している。

それと対照的に(c) 図のアーク直径 8 mmφ の場合には、最初も最後も平たんな温度分布を呈している。このような場合、電流を減少させると陽光柱の各部に

第1図 ステップ状電流変化に対する器壁安定化空気アーク陽光柱内の温度分布の過渡推移 (電流変化 19→8.5 A)

Fig. 1. Time variations of temperature profiles in wall-stabilized air arc columns caused by a step decrease in current (19→8.5 A.)

おいてはほぼ一様に温度が下降し続け、約 700 μs で次の新しい定常温度分布を示すようになり、変化に要する時間は (a) 図に比べて 10 倍を要している。

アーク直径 5 mmφ の場合、温度分布の形状は (a) 図と (c) 図の中間で、(b) 図のように隆起した温度分布から平坦な温度分布へと移行している。電流減少直後、中心部の温度のみが急激に低下し、約 20 μs を経過して中心温度が 8,000 K 以下になると平坦な温度分布を呈するようになる。それ以後は陽光柱各部の温度がほぼ一様にゆっくりと低下し、最終的な定常状態には約 200 μs で到達する。この時間は (a) 図と (c) 図の中間的な大きさである。

55 A 以下の電流範囲において数種の電流レベル間の移行に関して同様の検討を行なった結果、前に述べた 3 種のアーク直径の範囲ではその大きさによらず次のことが言える。

電流が階段状に変化して次の定常状態に移行中の過渡的な温度分布と言えども、各時刻の中心温度に相当する定常温度分布とほとんど同じ分布をとる。直径のいかんによらず、平坦な温度分布を呈しているときには陽光柱各部の温度は全体的にゆっくり変化し、中心部が隆起した温度分布を呈しているときには、中心付近のみの温度変化が顕著でしかも応答が速い。

〈2・3〉 アークコンダクタンスの過渡応答 前節で求めたような温度分布の推移が電気的特性に及ぼす影響を調べるために、陽光柱単位長さあたりのコンダクタンス G の過渡応答を検討する。

第2図 ステップ状電流減少に対するアークコンダクタンスの過渡応答 (19→8.5 A)

Fig. 2. Transitions of the arc conductances resulting from a step decrease in current (19→8.5 A.)

第1図の各図に対応する G の過渡応答を第2図に実線、破線および一点鎖線で示す。第3図は第2図とは逆に同じ電流レベル間でアーク電流を増加させた場合である。両図ではアーク直径の大きさによる応答速度の違いを明確にするため、アークコンダクタンス $G(t)$ を次式で規格化した $G_n(t)$ で示している。

$$G_n(t) = \frac{G(t) - G_i}{G_f - G_i} \times 100 (\%) \dots \dots \dots (5)$$

第3図 ステップ状電流増加に対するアークコンダクタンスの過渡応答 (8.5→19A)

Fig. 3. Transitions of the arc conductances resulting from a step increase in current (8.5→19 A).

ここで、 G_i は電流変化前のアークコンダクタンス、 G_f は変化後の電流値に対する最終のコンダクタンスである。各アーク直径における定常電流に対するコンダクタンスの値と中心温度とを第1表に示す。電流変化は、ここに示す5種類の電流レベルから選んだ任意の2レベル間で行なっている。

第2図および第3図における変化を詳細に見ると、次のようなことが指摘できる。まず規格化したコンダクタンス $G_n(t)$ が98%になるまでの全時間(指数関数的変化ならば時定数の4倍に相当する時間)は、電流減少の場合、3 mmφで70 μ s、5 mmφで200 μ s、8 mmφで700 μ sであり、電流増加の場合3 mmφで50 μ s、5 mmφで150 μ s、8 mmφで500 μ sである。このように電流増加時減少時ともに、アーク直径が大きいほどコンダクタンスの変化がゆっくりしている。また同一直径では、電流減少時の方が増加時より最終値に収束するまでに時間がかかっている。次に、この全変化過程を前半と後半とに分けて検討すれば、電流減少時の方が変化初頭におけるコンダクタンス変化が速いが、変化末期では逆にその変化はゆっくりしている。この特徴はアーク直径5 mmφの場合に特に顕著に現われている。第2図で5 mmφの場合のコンダクタンスは、第3図破線に示す増加時と比較すれば、電流減少直後極めて急速に減少しているにもかかわらず、最終値には遅く収束している。この原因は、第1図(b)に見られるように電流減少直後、温度分布形

第1表 安定化空気アーク陽光柱中心温度(K)およびコンダクタンス(cm/Ω)の定常値

Table 1. Stationary state values of the conductance and the axis temperature in wall-stabilized air arc columns.

直径	3 mmφ		5 mmφ		8 mmφ	
電流(A)	コンダクタンス G	中心温度 T_a	コンダクタンス G	中心温度 T_a	コンダクタンス G	中心温度 T_a
5	0.073	7,000	—	—	—	—
8.5	0.145	8,000	0.207	7,000	0.305	6,560
19	0.501	12,000	0.652	10,000	0.805	7,500
31	0.949	13,700	1.36	12,000	1.74	10,100
55	—	—	2.83	14,000	3.99	12,300

$G(\text{cm}/\Omega)$, $T_a(\text{K})$

状において中央部の隆起した高温部分が急速に冷却するが、温度分布が平坦になるにつれて変化速度が緩慢となるためである。電流増加時には、減少時とは逆の温度分布形状変化をするため、変化直後には比較的ゆっくりコンダクタンスが増加し、変化末期には減少時よりも速やかに最終値へと収束する。

このようなわけでコンダクタンスの変化は陽光柱内部の温度分布に関連を持つことが予想され、これを検討した結果が第3章に述べてある。本章ではその前に、このように計算されたコンダクタンスの過渡変化を実験によって確かめた結果を次節に述べる。

〈2.4〉 実験的検討 数値解析の結果を実験的に確かめるために、第4図(a)に示すような器壁安定化装置を組立て、(b)図の回路でアーク電流をステップ状に増減させ、アーク電圧の過渡応答を測定した。電流の立上り時間は1 μ s以下であり、この場合のアークコンダクタンスの変化速度に比べれば、電流の変化はステップ状とみなして差し障りない。(a)図で上下の電極には銅を用い、それらの間に厚さ6 mmの水冷中空円筒を7枚あるいは8枚積層構成とし、アーク長は57 mmおよび64 mmとかなり長くとした。このように比較的長い陽光柱を測定対象としたのは、できるだけ空気固有の特性を得るためである。水冷円筒の個数が少なくなるとアーク長が短くなると、電極からの銅蒸気が陽光柱全体に混入し、アーク電圧が低下する⁽¹⁴⁾。しかし、本実験のように安定化部分を長くすれば、銅蒸気は両端の水冷円筒に凝縮し、陽光柱中央部にはほとんど混入せず、全体としてアーク電圧への銅蒸気の影響を小さくできる。

電界の強さの応答は、二つの異なったアーク長の電圧応答の差をアーク長の差で割って求めた。それから(3)式を用いてアークコンダクタンスを算定した。

例として、3種類の直径について、電流変化8.5→19 Aの測定結果を第2図および第3図にプロットし

第4図 器壁安定化装置の断面図および実験回路
Fig. 4. Cross-section of the adopted stabilizing device and experimental circuit for a steplike current injection into a stationary wall-stabilized arc.

ている。各点は20回の測定の実験値を示している。測定のばらつきは5%程度であった。両図のように理論値と実験値とはかなり良く一致しているの、このような方法で安定化アーク陽光柱のコンダクタンスについて過渡応答を算定できることが確かめられた。

3. アークコンダクタンスの過渡的な時定数

〈3.1〉 過渡時定数と中心温度 前章で確かめたように、過渡状態におけるアークコンダクタンスの理論値と実験値とはかなり一致している。本章ではアークコンダクタンスの過渡応答を理論値に基づいて検討する。コンダクタンスの変化の速さを定量的に表現するために、コンダクタンスの過渡的な時定数 $\theta(t)$ を導入する。

$$\theta(t) = \frac{G_f - G(t)}{dG/dt} \dots\dots\dots (6)$$

この定義によれば、時定数 $\theta(t)$ が一定値となることはコンダクタンスが指数関数的に変化していることを意味する。しかし、第2図および第3図に示すコンダクタンスの変化は、一見しただけでも単純な指数関数的変化でない。この場合、(6)式で定義される θ は時間的に変化する。このような時定数は各時刻にお

第5図 過渡時定数と中心温度瞬時値との相関関係
Fig. 5. Transient time constant of the arc conductance as a function of the instantaneous axis temperature in transient arc column with a parameter of the bore diameter.

る中心温度によって一義的に決まるということは、直径5mmφについては既に文献(12)で指摘した。ここでもその手法に従って、各アーク直径について時定数 $\theta(t)$ を縦軸、陽光柱中心温度の瞬間値 $T_0(t)$ を横軸にとって両者の関係を調べることにした。

第1表に示したアーク電流の各レベル間のあらゆる推移について求めた過渡的な時定数は第5図の斜線を施した領域に入っている。三つの領域は互いに交わることなく、ここで検討した温度範囲においてアーク直径が大きいほど過渡的な時定数も大きな値をとる。これは、直径が大きいほどコンダクタンスがゆっくり変化していることに対応している。

アーク直径5mmφで指摘した過渡時定数の中心温度に対する依存性は他のアーク直径についても成立している。すなわち、陽光柱中心温度が10,000Kを上回る範囲で変化している期間には θ は各直径ともほぼ一定で、階段状の電流じょう乱に対するコンダクタンスの応答は指数関数的である。これに反して中心温度が9,000K以下の範囲にあるときは、中心温度が低くなるほど大きな値となっている。この事実は第2図、第3図において、電流変化後コンダクタンスの最終値に達する全時間が電流減少の場合に長いことを裏付けている。

〈3.2〉 過渡時定数とアーク直径 第5図において、7,000, 8,000, 9,000Kおよび10,000K以上の各中心温度における時定数の平均値を求め、アーク直径の2乗に対してプロットしたものが第6図である。この図から、時定数 θ が各中心温度においてアーク直径の2乗、すなわちアーク断面積に比例していることがわかる。従って、

第 6 図 過渡時定数と器壁断面積との関係

Fig. 6. Average transient time constant of the arc conductance as a function of the bore cross-section area.

$$\theta = A(T_0) \times D^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表わすことができる。ただし、 D はアーク直径で、比例定数 $A(T_0)$ は陽光柱中心温度によって異なる値をとる。

〈3.3〉 過渡時定数の表式化 (7) 式の関係があることがわかったので、時定数 θ をアーク直径 D の 2 乗で割り中心温度に対してプロットすれば、各直径とも第 7 図の斜線を施した一つの領域に入っている。同図の○印は各中心温度における θ/D^2 の平均値を示す。言い替えば、(7) 式の比例定数 $A(T_0)$ を中心温度に対してプロットしたことになる。第 7 図は各直径における時定数からアーク直径に対する依存性を消去したものとみなすことができ、第 5 図のアーク直径をパラメータとする時定数と中心温度との関係を一つの曲線に帰着させたものである。そこには第 5 図の各直径にみられた共通の特徴、すなわち中心温度が 10,000 K 以上では時定数が一定値、9,000 K 以下では中心温度が低いほど時定数が大きくなることとはっきり現われている。

技術的な応用の便宜のため、この特性を第 7 図の太い実線のように 2 本の直線で代表させることにする。すなわち、

$$A(T_0) = \theta/D^2 = \begin{cases} -0.6 \times 10^{-3} T_0 + 6.2 & (T_0 \leq 9,000 \text{ K}) \\ 0.8 & (T_0 > 9,000 \text{ K}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 A および T_0 の単位はそれぞれ $\mu\text{s}/\text{mm}^2$ および K である。

第 7 図 係数 $A(T_0)$ と中心温度瞬時値との関係

Fig. 7. Coefficient $A(T_0)$ related with the instantaneous axis temperature of transient arc column.

(7) 式および (8) 式から安定化空気アークのコンダクタンスの過渡時定数の代表値は、中心温度 T_0 とアーク直径 D に関して次式で表わされる。

$$\theta = (T_0, D) = \begin{cases} (-0.6 \times 10^{-3} T_0 + 6.2) \times D^2 & (T_0 \leq 9,000 \text{ K}) \\ 0.8 \times D^2 & (T_0 > 9,000 \text{ K}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 θ 、 T_0 および D の単位はそれぞれ μs 、K および mm である。

すなわち、9,000 K を境として中心温度がそれ以上ならば、いかなる直径でもそれぞれ対応する一定の時定数を持つ。また 9,000 K 以下では、中心温度が低いほど直線的に時定数は大きくなる。

〈3.4〉 考察 (9) 式の関係をもとに本論文で検討した 3 種類の直径について示せば、第 5 図の各領域中の太い実線を得る。これらは各アーク直径における過渡時定数の代表値を示したものであり、アーク直径が大きいほど時定数の大きさはこの代表値の周りに分布している。しかしながら、時定数をアーク直径の 2 乗で割れば、第 5 図の各領域は第 7 図において一つの領域に帰着することがわかった。すなわち、各直径とも時定数は同程度のばらつきを持ち、その大きさは平均値に対して最大 25% 程度であると言える。このコンダクタンスの変化速度のばらつきは、陽光柱内の温度分布にわずかな違いがあっても導電率は鋭敏に異なった値をとるためと考えられる。高温空気の導電率は温度に対して指数関数的に上昇する⁽¹⁵⁾ため、〈2.2〉節で述べたように陽光柱各位置において過渡変化中の温度が同じ中心温度のときの定常状態の値から数 % 程度ずれても、過渡導電率分布の定常状態からのずれは大きく

なる。更に、アークコンダクタンスのように巨視的に陽光柱全体をみると、その差が積分されることになる。従って、陽光柱内の温度上昇量に最大 10% 程度のばらつきがあるとすれば、そのときのコンダクタンスの上昇量に最大 25% 程度のずれが生じ得る。これが第 7 図の θ/D^2 のばらつきの原因と考えられる。

本論文では、安定化空気アークのコンダクタンス時定数を陽光柱中心温度およびアーク直径（陽光柱中心から常温に至るまでの距離）と関係づけることができた。一方、Frind 氏は時定数を解析的に導電半径および温度伝搬率と関係づけている⁽⁴⁾。しかしその場合、安定化器壁半径のような外部境界条件が同一でも、例えば電流の大きさが変化したとすれば、この導電半径を具体的に指定することは困難である。また陽光柱には温度分布が存在するにもかかわらず、どの温度に相当する温度伝搬率を用いて時定数を算定すれば良いか示されていない。これに対して、本論文の結果では、アーク直径は安定化器壁の直径という外部的な境界条件として与えられ、陽光柱中心温度のみの関数として一義的に過渡的な時定数を決定できるようになった。この点、Frind 氏の時定数が持つ欠点を克服できたものと思われる。ただし、筆者らの結論は電流 55 A 以下、アーク直径 8 mmφ 以下の条件下における一種のシミュレーションによって求められているので、(9) 式に表われる係数の因果関係は明らかでない。しかし、上述の条件内ならば、(9) 式は安定化空気アークの正確な時定数を与える。

Edels 氏はアーク時定数とアーク電流との関係を示しているが⁽⁶⁾、そこでは小さなステップ状電流変化を与えており、定常状態から少しずれた場合の時定数を論じているものと考えられる。本論文では比較的大きな電流変化を与えているので、準定常的な変化でなく完全に過渡状態の時定数が得られている。

一般に定常状態においては、一定のアーク直径の下で陽光柱の温度、電界の強さおよびコンダクタンスなどはアーク電流に対して与えられている⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。過渡状態においても同様に、コンダクタンスやその変化の時定数をアーク電流と対応づけることが可能かのように思われがちである。しかし、このような考え方には問題があることは、アークにステップ状電流変化を与えた場合を考えてみれば明白である。電流変化を与えた後、アーク電流は一定であるが、陽光柱のコンダクタンスは第 2 図および第 3 図に示すような経過をたどって最終値へと変化しつつあり、その時定数も時間と共に変化している。ここでは時定数を電流と対応づけることは無意味であり、陽光柱の過渡的な状態を表

わすもの、例えば時々刻々の中心温度などに対応づけるのが合理的である。更に、アーク陽光柱内では局所熱平衡が成立しており、その場合、現在の陽光柱内の熱的状态が決まり、過去の熱的状态の推移によらないと考えられる。本論文で時定数を陽光柱中心温度と対応づけることができたということは、任意の電流レベルからどのように電流が変化したとしても、そのときの中心温度によってそのときのコンダクタンスの変化の時定数が決まることになり、任意の電流変化に対してアーク陽光柱の電気的特性の過渡応答が求まる可能性が生じたことになる。

5. 結 論

高気圧大電流アーク陽光柱の過渡応答の基礎的な特性を明らかにするために、本論文では 1 気圧の空气中に点弧する器壁安定化アーク（器壁直径 3, 5 および 8 mmφ）にステップ状の電流じょう乱を与え、アーク陽光柱コンダクタンスの過渡応答を考察することにより、アーク時定数の新しい側面を見いだすことができた。

(1) アークコンダクタンスの過渡的な時定数は、器壁直径および陽光柱中心温度の瞬時値と関係づけられることがわかった。すなわち、どの器壁直径においても、中心温度が 9,000 K 以上であれば時定数はほぼ一定、中心温度がそれより低いときは時定数は中心温度の低下と共に大きくなる。また同一中心温度で比較すれば、時定数は平均的に器壁直径の 2 乗に比例する。

(2) 技術的な応用の便宜のため、過渡的な時定数 $\theta(\mu\text{s})$ を器壁直径 $D(\text{mm})$ および中心温度の瞬時値 $T_0(\text{K})$ の関数として次式で与えた。

$$\theta = \begin{cases} (-0.6 \times 10^{-3} T_0 + 6.2) \times D^2 & (T_0 \leq 9,000 \text{ K}) \\ 0.8 \times D^2 & (T_0 > 9,000 \text{ K}) \end{cases}$$

器壁安定化アークの場合、 D は器壁直径として明確に決まることが大きな特徴である。

以上の結果から、ある初期時点において定常状態にあったアークにどのような電流変化が起きても、刻々の中心温度に対するアーク時定数を媒介としてコンダクタンス変化を追跡することが可能となった。このことにより、器壁安定化空気アークの時定数は気体によって定まる定数という Mayr 氏の述べた性格を脱し、アークのその時点における応答を指定するパラメータとして理解することができるようになった。

最後に、本研究の実験に協力いただいた本学大学院博士課程前期課程学生 家田泰伸氏（現在、東京芝浦電

気株式会社勤務)に感謝いたします。また、計算は名古屋大学大形計算機センターおよび同大学プラズマ研究所計算機センターで行なったことを記して感謝の意を表す。
(昭和53年11月7日受付)

文 献

- (1) A. M. Cassie: "Théorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidité des circuits", CIGRE Paper, No. 102 (1939)
- (2) O. Mayr: "Beiträge zur theorie des statischen und dynamischen Lichtbogens", *Arch. Elektotech.*, **37**, 588 (1943)
- (3) K. H. Yoon & H. E. Spindle: "A Study of the Dynamic Response of Arcs in Various Gases", *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs.*, **77**, 1634 (1959)
- (4) G. Frind: "Über das Abklingen von Lichtbögen. I, Theoretische Überlegungen", *Zeit. Angew. Phys.*, **112**, 231 (1960)
- (5) G. Frind: "Über das Abklingen von Lichtbögen. II, Prüfung der Theorie an experimentellen Untersuchungen", *ibid.*, **112**, 515 (1960)
- (6) H. Edels & E. Graffmann: "Time Constant Measurements of High Pressure Arc Columns", *Z. Phys.*, **228**, 396 (1969)
- (7) R. Holmes & G. R. Jones: "The Effects of a Temperature Dependent Thermal Diffusivity and Radiation Loss on Arc Column Decay", *ibid.*, **215**, 466 (1968)
- (8) G. R. Jones & H. Edels: "Electrical Conductance Decay of Arc Columns in Some Common Gases", *ibid.*, **229**, 14 (1969)
- (9) W. Hertz: "Messung und Deutung des Leitwertabklagens zylindrischer Bögen", *ibid.*, **245**, 105 (1971)
- (10) W. Hermann: "Computation of Decaying Wall-Stabilized Arcs", *Z. Naturforsch.*, **23 a**, 443 (1973)
- (11) Y. Kito, I. Miyachi & T. Sakakibara: "Influence of Radiation Loss on the Stabilized Air Arc Characteristics", Proc. 4th Int. Conf. on Gas Discharges, IEE., Conf. Pub., No. 143, 1 (1976)
- (12) 松村・榊原・鬼頭・宮地: 「電流じょう乱を与えられた器壁安定化空気アークのコンダクタンス時定数」, 電学論 A, **97**, 513 (昭 52-10)
- (13) J. M. Yos: "Transport Properties of Nitrogen, Hydrogen, Oxygen and Air to 30,000 K", Amendments to AVCO RAD-TM-63-7 (1967)
- (14) 作田・鬼頭・宮地: 「器壁安定化空気アークの電界の強さに及ぼす銅蒸気の影響」, 電気学会プラズマ研資 EP-77-30 (昭 52-12)
- (15) 鬼頭・宮地・足立: 「器壁安定化空気アーク陽光柱の電界の強さ」, 電学論 A, **96**, 280 (昭 51-6)