論文および報告

アフターアーク現象 (第2報)*

小沢正義** 森田敏勝** 大村國雄**

On the After-Arc Phenomena (Report 2)*

By M. Ozawa**, T. Morita** and K. Omura**

Abstract

Authors have already published a part of the themes about the after-arc phenomena, the aim of which is to contribute to the improvement of the stability of the arc as mentioned in § 1.

In our 1st report we have mentioned the special behaviors of the after-arc with D.C. arc, and in this report we will clarify the same phenomena with A.C. arc, in which the perfect results in measuring the arc voltage will be explained.

Experimentally, much efforts have been made at the following points;

- a) To fix the phase of the current at the interruption.
- b) The phase of the power source be changeable at the reignition.

The former has been done by use of the thyatron, to the grid of which the impulse generated at the zero-point of the arc current was applied, and the latter was made possible by combining the other thyatron with the proper relay circuit.

In reference to the measurement of the arc voltage, the vacume tube was used in order to catch the small voltage without disturbing the arc space through measurements.

The following conclusions are illustrated;

- a) The after-arc phenomena with A.C. arc have a kind of characteristics of rectification, and on the case of the electrode negative it continues longer than the case of the reverse.
- b) The interrupter voltage V_i begins to decrease immediately after the arc resistance R_a became to be comparable with the oscillo. resistance R_o .

緒 言

アフターアーク現象について筆者らはすでに一部発表したのであるが、この研究が熔接アークの研究において、どのような位置を占めるであろうかということは一応考えてみる必要がある。これは § 1 において、遮断器の絶縁回復特性と比較検討することにする。

第1報が、アフターアーク現象の特異な存在の仕方について、主として直流電源を用いて発表したのに引続いて、本報においては交流電源を用いて、交流アークのアフターアーク現象を取扱っている。

なぜ交流アークのそれを扱わねばならなかったかという質問に対して、筆者らは、随時論文が明らかにするであろうと思うが、最初の出発点は、一般の熔接棒がほとんど交流アーク熔接に使われているから、自ら、それに適するよ

うになっているし、また、適するように作られていなければならない。従って、熔接アークの定安度を取扱う場合には、少なくとも、熔接棒に関する限り交流アークを用いた方がより実動的であると考えたからである。さて、交流アークのアフターアーク現象を取扱う上において、実験的には次の点に多くの努力が払われている。

- i) アーク電流の遮断時の位相を固定すること
- ii) 再点弧試験時における電源電圧の位相を変えられるようにすること

以上のことは、サイラトロン、自動開閉器を適当に組合わせて、その障害を除去することができた。

以上の点を念頭において、実験を綿密に進めた結果、直流アークのアフターアーク現象に比して、交流アークのそれが異なる著しい点は、整流特性を持つことである。これが、予想以上に甚しく、熔接棒が負電極になった場合の方が鉄板が負電極になった場合よりも長い時間アーク空間が導電性を保っていることが把握された。

さらに、アーク電圧の測定に対しては、真空管を用いて増巾する一方、アークの空間からエネルギーを取ることが

* 原稿受付昭和30年12月6日 (昭和30年度熔接学会春季學術講演会において発表)

** 正員 電気試験所 Member Electrotechnical Laboratory of Japanese Government

ないように工夫されたことで、アーク電圧の時間変化が明瞭にされた。

1 基礎的考察

アフターアーク現象——仮に熔接アークの場合こう名付けたのであるが——は、遮断器の方では post arc という名前を以て呼ばれている現象である。

遮断器は、本来電気回路を確実に切るため、換言すれば再点弧なく切るための道具であるから、post arc の持続時間は極めて短く、数 μs からせいぜい数百 μs の程度であり、この短時間のアークの空間の様子を電気回路と一緒に考察するのが post arc である。

これに反して、熔接アークは、何等かの原因でアークが切れても、容易に再点弧されるのが望ましく、従って、アフターアークの持続時間も長くなっており、筆者らの実験によれば 1 sec に達することは極めて普通の場合である、

したがって、アフターアーク現象は、アークが一旦切れてからアークの空間に現われる状態を 1 sec 程度の比較的長い時間に亘って取扱われなければならない。

交流アーク熔接の場合、アーク電流は 1/100 sec (50 の場合) ごとに零を通る。従って、アークの空間はその時間だけでは電流が通らないため、アークの維持に必要なイオンまたは電子の発生が中止されるわけで、これは、一方において、空間の温度を下げ、イオンまたは電子の消失を増して、イオンまたは電子の生成とその消失との不平衡を招き、アークの消失を招くに至る。

従って、これを防ぐために、インダクタンスを回路に挿入して、交流アークの電源電圧と電流との位相をズラしたり、または、電源電圧を高くして、再点弧を容易ならしめるよう工夫している。換言すれば、かくすることにより、イオンまたは電子の生成の割合をその消失の割合より大きくするようにしている。実際、インダクタンスを導入することにより、電流が零または電流が極く小さい時間を短くして、それらの荷電体の消失を防いでいる。

しからば何が故にこのような有利な結果を導くかということに対して、理論的な取扱いは、非常に複雑な要素が入ってくることは遮断器の方ですでに¹⁾ 発表もされているが、決して完全とはいえない。

しかし、簡単にいい得ることは、アーク電流が零になった瞬間より、アークの空間がその絶縁性を回復してゆく速さと、電気回路がその電圧を回復してゆく速さとの競走により、もし前者が勝てば、アークは完全に消失してゆき、もし後者が勝てば、アークは再点弧するに至る。

この場合、もちろん、大きな要素となるのは、残留イオンであり、それはまた温度にも極めて密接に関係がある。

これらの関係を精密に解くためには

① アークを含めた電気回路の方程式

② アークのエネルギー入力—損失の平衡方程式
の二つの方程式から解かなければならない。特に複雑なのは、第二の方程式で、この中に当然含まれてくるアークの温度 T と、イオン化係数 α とは Saha の式を満足せねばならぬし、また、損失の仮定も導入されなければならない。

従ってこの解は簡単には得られないが多くの疑問はあるが、適当な仮定の下に解いている論文も²⁾ 発表されているが、これらはいずれも遮断器に関するものであり、アフターアークについては未だ寡聞にして筆者らこれをみない。

これらの数値的取扱いについては、後の機会に譲ることとして、以上の考え方を基礎にして、研究成果を述べることにする。

2 実験方法および装置

i) オシログラム回路の説明

第 1 図に使用した回路を示す。前報におけると同様に遮

Fig. 1 The circuit diagram of measurements

断器の電圧およびアーク電流をオシログラムに撮ることは変りない。只、アーク空間から取るエネルギーをできるだけ少なくして、アーク電圧をオシログラムに撮るために真空管回路を用いている。簡単な回路で、改めて説明するまでもないが、グリッドリークは 1MΩ を入れ、ほとんどエネルギーを取らないようにした。

また、増巾することによって、アーク電圧の極く僅かな変化でも容易に取り得るように、真空管の陽極回路にオシログラムを入れ、充分にアーク電圧が高くなったときには、真空管電流が飽和するから、特別に保護装置を入れなくても、オシロ振動子に損傷を来すことはない。

ii) 遮断方法の説明

次に、交流アークの遮断において問題になるのは、アーク電流を電流波形のどの位相において切るかということである。アフターアークの初期条件を一定にするためには、電流の位相は常に一定の所において切らなければならない。このために第 2 図に示されるような回路を用いている。すなわち、サイラトロン TX-920 を用いて、このグリッドに主回路のアーク電流によるインパルスを入れる。このインパルスは、飽和変圧器を用いて、アーク電流の零の近辺において発生するごとく調節しておく。サイラトロンの陽極回路には電磁オシロの自動開閉器の励磁回路に

絡がり、サイラ
ロンが点弧する
ことにより、電
磁オシロの自動
開閉器が開いて
、遮断器の励磁
がとまり、アーク
電流が切れるよ
うになっている
。

この場合、イン
パルスが入る時間
が問題になるが、

これは、電磁オシロのシャッターが開いてから、あるいは
開く前の任意の時間において、これがグリッドに加わる如
く、電磁のシャッタ回路に入れて、調節できる如くしてある
。

順を追って現象を説明すると、アークが点弧しているとき、
任意の時間に電磁のシャッターボタンを押すとシャッターが開
き、その後一定時間後アーク電流の零点付近において発生する
インパルス回路が閉ちて、サイラトロンにインパルスが加わる。
インパルスが加わると直にサイラトロンは点弧し、この電流によ
って、電磁の自動開閉器が励磁され、遮断器の励磁回路を切る。
かくして遮断器は開く結果となる。

以上で瞬間的関係は明瞭にオシロに記録されるが、実際にア
ーク電流が切れるのは、遮断器自身の遅れ以外はほとんど遅れ
がなく動作する。遮断器自身の遅れは、この固有な特性によっ
て定まるので、アーク電流は、この電流位相零の時間から、一
定の時間後にアークが必ず切れるという結果になる。

3 アーク電圧の時間的变化

筆者らは前報において、アークの空間における絶縁回復の時
間的な模様をみるために、遮断器の開放後の電圧をオシログラ
ムに撮ったのである。これによって、電源電圧とオシロの抵抗
による電圧降下との差がアーク空間に加わっている電圧と考
えて、その絶縁回復の時間的な変化を説明しようとした。この
場合、なぜ、アーク電圧はそれとして別にオシログラムに撮
らなかったかという疑問に対して、筆者らは、純粹にアーク空
間のようすを見るためで、これに何等かの操作、換言すれば、
測定のための器械を導入することにより、アーク空間を擾乱
することを好まなかったからであると述べたい。

しかるに、アーク電圧の実証の段階に至ると、アークの空
間からエネルギーを最小に取るようにして、何とかアーク電
圧を測定しなければならない。これは筆者らの実験に対する
要望に応ずることでもある。

Fig. 2 The method of the interruption

そこで、すでに前節にも述べたる如く、真空管増巾によ
って、アーク電圧を増巾する一方、アークからはグリッド
リークに与えるだけの極めて少ないエネルギーで、陽極回
路に導入されたオシログラムでアーク電圧を調べたのであ
る。

その結果は第3図に示される。

Fig. 3 The oscillograms of arc-current I_a , interrupter voltage V_i , and arc-voltage V_a

使用された棒は東洋電極 K. K の銘柄 G-200 の 4 mm
棒である。電流は 180 A で、アーク長は 5mm である。
図示される如く、電流遮断後 2.5 μ の間は殆んどアーク
電圧は零であるが、その後回復して、7 μ 後には 10V 前
後となり、10 μ 後にはほぼ 30V となっている。その後
は真空管が飽和して明瞭ではないが徐々に上昇して無負荷
電圧に近づく。

第4図を見れば、この時間的な変遷の様がよく理解され
る。

Fig. 4 The oscillograms of arc-current I_a , interrupter voltage V_i , and arc-voltage V_a

これは、真空管を用いずアーク端子に 61k Ω の抵抗を
通して、オシロの振動子を入れて、アーク電圧のオシログ
ラムを撮ったのである。すなわち、アーク電圧は瞬間的に
徐々に増加して、遂に電源電圧に近づいている。

4 遮断器の開離電圧の時間的变化

遮断器が開放すれば、アークはもちろん消弧するが、筆者らの実験装置第 1 図を見れば容易に理解される如く、もしアークの空間が幾分でも導電性があるならば、これを電磁オシロの振動子で、電気回路を構成することになるから、電流が流れて、前報に述べた遮断器の電圧としてオシログラムに現われることとなる。

従って、この大きさは、他方から考えると、アークの空間とオシロの振動子の抵抗に制限されて回路を流れる電流の大きさによるのであるから、このオシロの振動子の抵抗に依り、遮断器の時間的な変化は、その大きさのみならず、その瞬間的な変化模様を異にするものではないかと推察される。

この推察が正しいか否かを検討するために、アークの条件を可能な限り一定に保ちつつオシロ抵抗を $61\text{k}\Omega$, $121\text{k}\Omega$ の 2 種に変えて、遮断後の遮断器電圧の時間的な変化をオシログラムに撮った。もちろんこれは、アーク空間を流れる電流を示す。第 5 図に示されるのは、このオシログラムの 1 例である。

これを

見れば、直にわかる如く、抵抗が増せば、このアークの空間を流れる電流の大きさは、明らかに小さくなっている。

しかる

に、この電流の平坦部分の

Fig. 5 The variation of V_i or after-arc current with the resistance in series to oscillo

時間の長さを考えてみると、そう簡単には結論は出ない。しかし、たしかにいえることは、それらの時間的な長さが、オシロの抵抗によりさして変らないということである。

筆者らはこゝでアークの本質に立入らなければならない。

我々は、アークを R_a なる抵抗を持つ一種の抵抗体（これをアフターアーク抵抗と呼ぶ）と考える。そして、 R_0 をオシロの抵抗とすればアーク電流（寧ろアフターアーク電流） I_a は電源電圧 V により

$$I_a = \frac{V}{R_a + R_0} \quad \text{で与えられる.}$$

これを書き改めて

$$V = I_a R_0 + I_a R_a \quad \dots \dots \dots (1)$$

いま、アーク電圧の非常に小さい部分で、瞬間的にあまり変らない部分を考えれば

$$I_a R_a \approx 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

従って、 $I_a R_0 = V$ とならなければならない。それで、もし、オシロの抵抗 R_0 を増してゆくと I_a は小さくなる。換言すれば、オシロに現われる I_a の大きさは常にオシロ抵抗 R_0 によって決められると考えてよい。

この場合、アフターアーク抵抗 R_a は時間的に一定なものではなく、アーク空間から外方にイオンの拡散その他に依り、簡単には上式の説明する電気回路とは無関係に時間的に一般には増大してゆく。

この増大の仕方は、純粹にアークの空間の条件によって定まる時間定数を持って行われると考えられる。従って、最初に述べたオシロ抵抗のいかにかわらず、アーク抵抗の変化は一定であると看做してよい。

さて、このようにして R_a が増すと、(1) 式により $V = \text{const.}$ であるから、 $I_a R_0$ は小さくなる。 $R_0 = \text{const.}$ であるから I_a が小さくなる。これはさらに R_0 を増すことにより、かくして R_a は無限に増大してゆく。

これは要するに、 I_a が時間的に減じ始めるときは、常に R_0 に匹敵する程度に R_a が増大し始めるときであり、これは、アークの空間の模様に関係すると同時に、オシロの抵抗にも関係するものといえることができる。

かく考えることにより、第 5 図のオシロがよく説明されると思う。すなわち、オシロ抵抗を変えると、遮断器を通るアフターアーク電流 I_a の大きさは異なっている。しかし殆んど、それが変り始める迄の時間が多少の差こそあるが一定しているのは、既にのべたアフターアーク抵抗 R_a の時間的な変化が極めて速かて $61\text{k}\Omega$ に達する時間も $121\text{k}\Omega$ に達する時間もさして変らないことに基因するものと思われる。

5 アフターアークの整流特性

すでに、第 3 図以下において、オシロが示すように、アフターアークは明らかに整流特性を持っている。

すなわち、熔接棒が負になった場合には、それが正になった場合より、電流が流れ易いことを示している。

金属整流器が一方の方向には高い抵抗を持ち、他方には低い抵抗を示して、流れる方向により、電流の大きさが異なるのと全く同じである。

一般に熔接アークが整流特性を示すことはすでに発表されており、たとえば、鉄板対被覆熔接棒の場合については山口、高田両氏^{*3)} および安藤氏⁵⁾ がアーク電流数 A の程

で実験を行い、熔接棒が負になったときより余分の電流が流れることを示している。

また最近、アルミニウム熔接に用いられているいわゆるシグマークについても、同じことが⁴⁾発表されている。

筆者らの行ったのは、もちろん上記諸氏の実験とは異なるもので、熔接アークが終了した後の空間の模様を検討しているのであるが、そのアフターアークがやはり、同じような整流特性を持つということは、注目すべきことで、これが、熔接アークの安定性にいかに影響しているかは、次報にて述べる。

第 3 図以下で示されるように、アフターアークの整流特性はこれまでの整流特性とは異なり、時間的に整流特性になるということである。

すなわち、アークが消弧した後 $5 \sim 0.1 \text{ sec}$ の間は、正負いずれの方向にも同じ抵抗をアークは示すが、それ以後になると、熔接棒が正の方向は急に抵抗を増し、無限に大きくなるが、熔接棒が負の方向には、相変わらず低い抵抗しか示さず、およそ、3 倍以上の時間を過ぎてから、徐々に抵抗を増して、遂に無限大に至る。

これを時間を区切って考えてみれば、アークの消弧後、 1 sec の間は全然整流特性を示さないが、その後、次第に整流特性を示し始めて、 $20 \sim 30 \sim$ 後には、完全なる整流特性を示すようになる。さらに時間が進めば、熔接棒が負の方向の抵抗を除々に増し、それにしたがって、整流特性も次第に悪くなり、完全に絶縁性を回復すれば、整流特性も消え、一種の絶縁体となることは自明である。

この原因を求むことは、非常に困難なことであるが、熔接棒および鉄板の温度の下ってゆくことにも、大いに関係があると思われるが、さらに大きな影響を持つと思われるのは、アフターアークの残留イオンであると考えられる。

すなわち、おびたしい量の正負のイオンが、アークの外側に拡散し、または再結合する一方、多くのそれらは、それぞれその逆の極にアーク中を拡散して、各極には、いわゆるイオンシースと呼ばれる高い電場を持つ空間を形成する。

もし、正イオンが負の熔接棒の附近に集中すれば、熔接棒の細い形状のために、ここに高い電場を生じ、電子を引張り易くする。また逆に正イオンが負の鉄板側に集中したとすれば、鉄板の形状は平面で広いから、横方向に拡散して、熔接棒の場合ほど高い電場を作り得ない。従って、電子も容易に引張り出せない結果になると思われる。

これが、アフターアークの整流特性を現出させる大きな原因であろうと推察される。

6 結 論

本報において、筆者らは主として、交流アークのアフターアーク現象を取扱ったが、これは直流アークの場合と無関係なのではない。

§ 4 における実験等は、前報において、疑問とされて実験を要請されたものである。

しかしながら、交流アークのアフターアークを取扱うためには、直流の場合とは異なった実験装置を要し、アフターアークの初期条件を一定にすることに意を注いだことは § 2 において示した通りである。

アフターアークの整流特性はある意味においては、当然予想されることであるが、こうした実験がいままで行われなかったことは、否めない事実で、この整流特性がある時間後に始めて現われるということは、いままでのアークの常識では考えられないことであり、大いに留意されるべきことと思われる。

筆者らは、アークを一種の抵抗体と考え、その抵抗 R_a を考えて、一部の現象を説明したのであるが、この考えは、さらに発展して、アークの動特性とも関連すること、将来において再検討を加えたいと思う。

拙筆に当り、本研究の遂行に当り、杉原放電機器課長の御指導御鞭撻および大阪大学安藤教授の貴重な御指示によること多く、ここに深謝すると共に、本研究に異常な関心を示され、研究材料の御提供をいただいた東洋電極 K K の中久保、岡田両氏に満腔の謝意を表する次第です。また研究室の木村、菊池両氏の実験上の御援助に対し感謝する次第である。

文 献

- 1) A.M.Cassie : Theorie Nouvelle de Arcs de Rupture et de la Pigridite der circuits C.I.G.R.E. Tom. 1 102 (1939).
- 2) O. Mayr : Beiträge zur Theorie des statischen und dynamischen Lichtbogen. Archin f. Electrotechnik Heft 12 588 (1943).
- 3) 山口太三郎、高田安之 : 熔接棒に生ずる電弧の整流特性, 熔接学会誌 Vol. 21 89 (1952).
- 4) R.W. Tuthill : The effect of wave shape in Inert-Arc Welding circuit Wel. Jour. Vol. 27. 785 (1948).
H.T. Herbst : Electrical characteristics of the Arc in "Heliarc" Welding Wel. Jour. Vol. 27. 600 (1948).
- 5) 安藤 : 交流アーク特性降下による電流の直流分について, 熔接学会誌 Vol. 21. No. 8.3 (昭27).