—— 論文および報告 ——

交流熔接電弧の安定度と熔接機特性との関係について

安 藤 弘 平 * 村 上 信 一 ** 阪 本 武 春 ***

On the Relation Between the Characteristics of A. C. Arc Welder and the Stability of Welding Arc.

By K. Ando *, S. Murakami, ** T. Sakamoto

A b s t r a c t

The a. c. welder with high efficiency due to the small stray load loss is also preferable in the standpoint of arc stability. The instantaneous value of the leakage flux of the transformer is not zero at the instant of the zero value of the welding current due to the m. m. f. of the eddy current induced by the flux, so the secondary open voltage does not rises to its steady value instantaneously by the damping action of the leakage flux above mentioned. The voltage recovery at open circuit due to arc vanishing lags only about 1/2000 second by a new designed welder which has a efficiency value of 88%, the time being approximately one third of a old type welder, whose efficiency value is 70%. The difference of the arc stability of the above mentioned two welders is observable clearly by hand welding when we use some electrodes, but is not observable when we use some other electrodes.

The arc voltage and current wave forms by a electrode of poor arc stability are shown in Fig. 9, (a) and (b) being the case of the welder of quick and slow voltage recovery respectively. By a electrode of good arc stability, the arc voltage rises slowly after zero current instant (Fig. 1), due to the good conductivity of the arc part, so the lagging of the voltage recovery of the welder does not affect on the arc stability.

1 ま え が き

著者らは偶然の機会から交流電弧熔接機の構造、特性が相当強く電弧の安定に影響を及ぼすことを発見したので、その研究経過をここに発表して熔接機製作関係の人々、熔接棒の製作研究関係の人々、あるいは電弧熔接の基礎的実験研究をする人々の御参考に供したいと思う次第である。偶然の機会と云うのは、株式会社電元社で熔接機の製作資材の節約を図ることを目的として、新しい型の熔接機を設計製作してその試験を一昨年行つた。この新型の熔接機は担当技師の努力もあつて従來の型のものに比べて重量の節約が出来、それに伴つて損失も少なくなつて高能率のものとなつた。試験の際新製品であり、無負荷電圧もあまり高くないので、念のため電弧を発生してみ、うまく電弧が出るか否かを調べてみた。ところが意外にも従來の熔接機に比べて遙かに電弧が安定で、あたかも直流電源で電弧を出しているかのような感じであつた。しかし電弧を出したのは、メーカーの試験場で、いわば熔接作業には素人に近

い人であるので、果して電弧が従來の熔接機に比べて安定であるか否かについて十分の確信がもてなかつた。それでこの件を阪大木原教授に照会して有安氏に電弧試験を行つて貰うことにした。同氏は東大仲教授の下で熔接棒の検定試験のときに実際の熔接作業を行うことを擔当する一級技術者であるから、その腕に信頼して判定を乞うた次第である。その結果やはり従來の熔接機に比べてこの新しい型のものは電弧が安定であるとの判定を得た。

この新型のものが従來の旧型の熔接機に比べて何故に電弧が安定となるかの説明は実は初めは筆者には判らなかつた。前記の如く新型は旧型に比べて損失が少く高能率のものとなつたので、当然低力率で、電圧と電流との位相差が大である。それで電流が零となつて萬一電弧が消失した際に現われる電源電圧

* 正員、大阪大学工学部、熔接研究所、Member, Prof. of Eng. Faculty, Osaka University

** 正員、株式会社 電元社、Member, Engineer of Dengensha Co.

*** 大阪大学工学部

は高くなっているから、これが、たしかに電弧安定の一原因であると考えられる。しかし後に数値例で示す如くその程度は僅かなものであるので、満足な原因の説明にはならない。従つて電弧安定の原因としては過渡現象的のものだけが問題となるわけであるが、検討の結果変圧器の漏洩磁束によつて影響されるものであることが理論的にも実験的にも明かとなつたので、ここに報告する次第である。まず電弧の安定に関して基礎的の解説を誌して後本論に入ることとする。

Ⅱ 電 弧 の 安 定

熔接電弧の安定に影響を與える因子としては、熔接電源の無負荷電圧、熔接電流、被覆棒の種類等があることはよく知られている所である。一般に電源の無負荷電圧が高いほど、またある範囲内では與えられた熔接棒に対しては熔接電流が多いほど安定である。また被覆の種類によつて著しく安定度が異なることは実際に電弧発生作業を行つた者の齊しく経験する所である。これらの条件を同一にして実験すると電源の種類、特性の影響が認められるようになるのであつて、直流電源と交流電源との差は最もよく知られているところである。

交流が直流に比べて電弧不安定となるのは、云うまでもなく電流の瞬時値が零となると、電弧を形成しているイオン及び電子が再結合で消失するので、次のサイクルで再びイオン及び電子を作つて再点弧しなければならないが、電流零の附近で電極表面が冷却して熱電子が出難くなり、再点弧が失敗して電弧が永久に消失してしまうことが起り得るからである。交流電弧の電圧電流波形は熔接棒の種類によつて異なるが、比較的電弧が安定に出る優良な棒について示すと第1図の如くである。図に見るように熔接電流 i が零を通過して増大するとき、電弧電圧 e_A も亦零を通過して比較的徐々に増大してA点に達し、後 e_A は低下している。A点以後は本格的な電弧であつて、O からAまでの小電流は、前のサイクル中の熱的影響による熱電子放射に基づく電流であると考えてよからう。電弧が不

第1圖、熔接電弧の電圧電流波形安定な電弧の熔接棒の場合

安定な熔接棒では第9図の如くで、O点からA点に到達するまでの時間が短く、かつ一般にA点の電圧も高い。

さて電弧の電圧、電流特性が第1図(b)の如くであるので、これに電流を供給する電源としてはA点即ち電流が零となる瞬間(O)より僅か後の瞬間に於て電弧が必要とする電圧(A)よりも十分高い電圧を供給して電流の速かな増加を図つて電弧を安定にすることが必要である。これには電源電圧の実効値が大であるだけでなく、第1図点線に示す如く電源電圧 e_t は電流 i よりも相当に位相が進んでいることが必要である。このように電流 i が電源電圧 e_t より遅れるためには、回路にインダクタンスが必要で、普通漏洩インダクタンスの大きな変圧器を用いて、これを與えている。

上述の如くに交流電弧が不安定で消失するのは電流の瞬時値が零となつて次のサイクルで再点弧しない場合であるから、第2図のO点に於て電流 i が零となり、そのまゝ消失したとすると、その点で負荷回路は開路されたことになり、それ以後は棒と母材との間には電源の無負荷電圧 e_0 があらわれる。O点に於ける電源電圧はOKであるが、実際には端子電圧

第2圖 開路過渡電圧の波形

は曲線 $OPQRS$ のような過渡現象を経て定常波形 RS に移る。普通この変圧器の開路過渡現象として教科書などに記されているのは第2図(a)の減衰振動の場合であるが、熔接変圧器の場合には後に述べる理由によつて(b),(c)図の如く非振動的となる。

(b)は(c)よりも開路過渡電圧の上昇回復の速な場合であつて、このように電圧の上昇回復が速かであれば、この電圧が棒と母材との間にかゝるから、熱電子は放出加速されて、電弧が再生し得る機会は多くなる。それで電弧は(c)のような特性の電源の場合に比べて安定となることは云うまでもない。従つて電弧安定に関しては次の事項が問題となる。

- 1) O 点に於ける開路電圧 OK の高いこと
- 2) $OPQRS$ のような過渡現象を経て回復上昇するのが敏速なこと

この中(1)の項は電源電圧 e_0 の実効値を一定として考えると電圧と電流との位相差に関し、低力率のもの即ち損失の少い熔接機に於て有利となるが、後に示す数値例で判る如くこれはあまり影響がなく、(2)の過渡現象が重要な役割を演ずるのである。

Ⅲ 実験経過

(a) 電弧安定の確認実験 既に述べたように電元社で、新しく試作した熔接機(以下新型と呼ぶ)は従来の旧型(旧型と呼ぶ)に比べて電弧が安定であることは偶然の機会から発見せられ、その後木原教授、有安氏によつて認定せられたが、この電弧安定の判定は熔接手の感じによるもので数量的に表現出来ず、云わば判然としない量であるが、さらにこの判定には熔接電弧に特有な次のような悪条件が入つてきて、判定はなかなか困難である。即ち今とえ熔接電源、無負荷電圧、熔接電流、熔接棒等を一定としても、母材表面の状況で電弧の安定は大いに左右せられる。錆びた母板上に電弧を出すのは容易であるが、磨いた板上では困難である。磨いた母板でも初め一寸電弧を出してスパッターリングによつて酸化鉄の微粉が母板上に附着すれば、その後は電弧は著しく安定となる。実は新旧両型の電弧安定の差異はそれほど顯著なものではないので、表面の状況の多少の差で安定度の判定が逆となることがある。表面の状況を常に確実に一定に保つて実験することは云うべくして不可能であるから、これによる影響を除去して新旧両型の安定の差を比較確認するためには、表面はなるべく一定に保ちながら何回も比較実験を繰返し、その都度優劣を判定して、その結果の統計を求めて判断を下すことが必要である。電源電圧値、熔接電流値を同一に保つて、同一

の熔接棒を使用すべきことは云うまでもない。電弧安定に関してはこれらの多くの条件が関連し、その判定がやゝもすると不確実となる恐れがあるので、著者らは木原、有安両氏によつて認定された新旧両型の比較をさらに厳密に注意して繰返し試験した。

実験に於ては無負荷電圧の設計値が新旧両型で多少異なるので、臨時に1~2回の巻線を附加して、また一次側のタップ並びに電源電圧を調整して、二次電圧は127Vに保つた。熔接棒は工場手持の径3mmの被覆棒を用いた。規定電流を流すと電弧が十分安定となつて、後に説明するように新旧両型の区別が困難となるので、熔接電流をわざと減らして36Aとした。熔接手は前記の有安氏をわすらわした。

電弧安定の判定に熔接手の先入主観が入るのを避けるために、新旧両熔接機はその二次側を切換開閉器にて切換え、熔接手は母板、熔接棒把持器などを取換えないでそのまゝ熔接作業が出来るのみならず、熔接手が氣付かない間に新旧両電源が切換えられ、かくして熔接手は自分が現在電弧を出している電源が果して新型であるか旧型であることを知らずに、ただ引続いて2回與えられる電源の安定感を比較してその判断を報告するようにした。また新旧両熔接機は熔接手から遠く距て、熔接機から生ずる雑音が熔接手に聞えないようにし、この雑音の差によつても電源が熔接手に知れないようにするなどの注意も行つた。各回の判定は前に述べたように母板表面状況、あるいは熔接棒の局部的性質の差異によつて影響を受けるので、実験を数十回繰返し、その統計的平均を求めた。かくしてその判定の困難な電弧安定の比較も十分信頼のおける適当な方法で実験を行つたのであつて、その結果は既に知られていた事実即ち新型の方が旧型よりも電弧が安定であることを確認したのである。

なお新旧両型の電弧安定度を定量的に比較するために新型の無負荷電圧を調整して127Vより漸次低下し、旧型の127Vのものと同程度の安定感となる電圧を求めた所115Vとなつた。即ち同一熔接電流36Aに対して旧型127V、新型115Vで電弧安定感が同一となつたのであつて、変圧器容量も実はそれだけ新型は低下し得られるわけである。しかしこの実験過程で新型の無負荷電圧を121Vにした状態は新型の127Vの状態よりもさらに安定感が大であるとの判定結果となつた。これは一見矛盾したことのよう考えられるが、熔接電流を一定値36Aに保つため、無負荷電圧の変化に應じて可動鐵心を調整したことが原因であることが後に至つてよく理解された。しかし実験当時(昭和22年7月)は時間の関係

上この問題を深く調べることはなし得なかつた。

(b) 電弧安定の原因の説明実験 上に述べた如く新型が旧型に比べて電弧が安定となることを実験的に確認したので、その原因を究明するために新型溶接機を阪大工学部溶接工学教室へ移して研究することとした。まずその結果得られた結論を記すと次のようである。即ち溶接変圧器は漏洩磁束の大きな変圧器であるが、この漏洩磁束のために変圧器鐵心その他の部分には著しい渦流が流れ、この渦流の流れる回路は漏洩磁束の変化に対して制動回路の如く働き磁束の急変を遅らせる。それで溶接電流が零となつた瞬間に漏洩磁束は未だ零となつていない有限の値を有している。電弧が消失した際この漏洩磁束がその後遅れて変化するので、二次回路の開路端子電圧は第2図に示すように直ちに無負荷定常値OKにならず、(c)図の如く変化する。渦流の制動作用が少なければ、(b)の如く急速に無負荷定常値に復する。(b)の場合には(c)の場合に比べて電弧が安定となることは既に述べた通りである。それで新型の旧型に比べて電弧が安定であると云う実験事實は、新型の方が渦流が少なくて第2図(b)に近く、旧型は(c)に近いのであるとして説明がつく。これは既に述べた、新型の方が著しく損失が少なくて高能率である事實と丁度よく一致する。

以上は本研究で得た結論であるが、上の記述のみでは單なる定性的の推定であつて実証を伴つていないわけであるが、この推定は次のようにしてこれを明快に実証し得た。即ちこの推定の中、電源の開路過渡電圧が漏洩磁束に関する渦流の大小によつて第2図(b)あるいは(c)の如く変化することは後に述べる実験及び理論的考察によつて明かとなつたが、一方実際の電弧負荷に対する実験的証明としては、溶接機に積極的に渦流が多くなるように、漏洩磁束に対する制動巻線を附加して制動作用を強力にした場合と、制動巻線のない場合とについて電弧の安定を比較してみた。実験結果は予期以上に明瞭に制動作用の効果が現われた。即ち漏洩磁束の通る可動鐵心を取巻いて制動巻線を巻き、これに開閉器を取付けて自由に制動作用を與えたり除いたりなし得るようにした。制動回路を開いて、溶接電流、溶接棒等の一定條件で電弧を発生している際、制動回路を閉ざすと、たちまち電弧は消失もしくは極めて不安定となり、また不安定ながら制動回路を閉じたまま電弧を発生している際、制動回路を開くと、たちまち電弧が安定となることが明瞭に看取された。

実はこの実験は(a)項に述べた新旧両型の比較実験よりもやりよい実験である。と云うのは新旧両型

の比較には両電源の取換のため切替開閉器によつて一旦電弧を中断しなければならぬのに対して、この制動線輪の効果の実験では、電弧は連続したまま、負荷回路とは独立な制動回路を開閉すればよいので、電弧起動等にわずらわされることがなく比較判定が簡單明瞭に行える。それで新旧両型の比較判定には前記の如く数十回の実験を繰返し統計的に比較しなければならなかつたのであるが、制動線輪の場合は毎回同じ結果が明瞭に得られた。もつともこの明瞭に区別された他の一因は制動線輪の効果が十分強かつたため、制動回路に外部抵抗を挿入して制動効果を弱めれば差異が認め難くなることは云うまでもない。実験は径4mmの電弧安定度のあまりよくない被覆棒を用い、無負荷電圧80V、溶接電流90A(ポンペ回数にて約5400)にて行つたもので、可動鐵心上に巻いた制動線輪は電弧発生状態にて約1200ポンペ回数となり、制動線輪中の損失は約1.0kWである。

なお念のため記しておくが、制動線輪は可動鐵心を取巻いて巻いたのであるから、無負荷二次電圧には何等影響を與えない。ただ制動回路を閉ざすと、漏洩磁束の通過が妨げられるので、溶接電流は多少増加する。実験では90Aが92A(実効値)に増したが、これは調整しなかつた。電流が増大すれば電弧は安定となるはずであるが、実際には逆即ち不安定となつて制動線輪の効果を十分認定し得たので、あえて電流を調整しなかつたのである。

制動線輪を開いた場合及び閉じた場合の電弧の電圧電流波形は後掲第9図の如くである。後に説明する。

(c) 基礎的実験 さて交流溶接電弧の安定度が電源溶接機によつて異なる事實に対しては、第2図の如く電流が零となつた後の電圧恢復現象を観察研究するが常識的であつて、電弧が安定に発生して

第3圖 放電管による電流波形制御による電源開路電圧の觀察

* 電弧を中断しなくてもよい切替方法があるが、実験では中断した。

いる定常状態の電圧電流波形(第1図, 第9図)を観察したのでは, 電弧の複雑な現象にわずらわされて, 電源特性の差(第2図)を明瞭に観察することは困難, あるいは不可能である。ぜひ共電弧が消失した直後の電源のみの特性にて定まる第2図(b)(c)の電圧恢復現象を観察しなければならない。しかしこれには普通の熔接電弧を負荷として, たまたま起る電弧消失の瞬間を捕捉して観察することは困難であり, 熔接電弧の代りに例えばイグニトロンを2個逆並列に接続して交流を流し得るようにし, かつその点弧子を制御して電流波形を第3図の如くにし, 各サイクルごとに起る開路過渡電圧(図の $O_1 O_2$, $O_3 O_4$ の期間)をブラウン管オシログラフなどで観察することが簡明である。筆者はこの様の実験の場合を慮つてかつて在職した京都大学の熔接研究室では必要な器具を豊富に整備したのであるが, 現在勤務する阪大熔接教室は設立後新しく, かつ甚だしい戦災を蒙っているので, 理想的の実験は行い得ない。本研究を遂行するために現象観察用のブラウン管オシログラフの組立はもちろん, 1個の電圧計, 1個の開閉器も乏しい研究費から購入したのであつて, 充実した研究室の設備を以つてすれば2週間以内に完了し得る実験を実に1ヶ年余を費して不完全ながら行い, 漸やく確実なる結論に到達し得た次第である。

さて実験としては熔接負荷状態に近い状態で実験することが望ましいが, 熔接電流に近い大電流を流し得るイグニトロンが入手し得なかつたので, 1.5Aのサイラトロン TX920 を用い, その格子制御によつて第3図のような電流波形を得るようにした。この場合サイラトロン(またはイグニトロン)は第4図(a)の電弧の代りに電弧の部分に挿入したいのであるが, 流れる電流を 1.5A 以下に保持するため(b)図の如くに接続した。(b)図の端子ABより左側の部分が開路過渡現象に関して(a)と全く同一の状態にあることは説明

するまでもない所であろう。かくして可動鐵心には(b)項に述べた如く制動線輪を巻き, またこの可動鐵心を通る漏洩磁束を観察するために探索線輪を巻いてその誘起電圧の波形を

第4図

ブラウン管オシログラフで観測した。その結果は第5図の如くである。図の $O_1 O_2$, $O_3 O_4$ なる電流休止期間は実際には全周期の約 $1/10$ に保つて実験したが, 図を見易くするために, この部分のスケールを

変えて長く示してある。

第5図の点線は制動回路を開いた場合, 実線は閉じた場合で, いずれも $O_1 O_2$ の期間に探索線輪に電圧が誘起されていることが認められる。この電流休止期間に電圧が誘起せられる理由は後に詳しく説明する如く負荷電流が零となつた O_1 あるいは O_3 の瞬間に於て漏洩磁束が未だ零となつていなく, その後に於ても変化して零に減衰しようとするからである。この誘起電圧を e_3 とし, 漏洩磁束を ϕ_3 とすると,

$$e_3 = -\frac{d\phi_3}{dt} \text{ で與えられるから, もし } O_1 \text{ 点以後の}$$

電流が永久に零であれば, その後 ϕ_3 は零に減衰するはずであるから, 時間の原点を O_1 にとつて考える

$$\int_0^\infty e_3 dt = \int_0^\infty -\frac{d\phi_3}{dt} dt = \phi_{30} \dots \dots \dots (1)$$

となり, 図の $D' G' H'$ のような e_3 の曲線と時間軸との間の面積が O_1 瞬間に於ける漏洩磁束 ϕ_{30} を與えることになる。図に見る如く制動回路が開かれて制動作用の弱い場合(点線)では ϕ_3 は O_1 点以後急速に減衰するのは当然のことであるが, この場合(1)式によつて ϕ_{30} の値も小であつたことが判る。ブラウン管による観測では制動回路を開いた場合 e_3 従つて ϕ_3 は O_1 以後およそ $1/2000$ 秒で殆んど減衰し, 制動回路を閉ざしたときには $1/700$ 秒程度で減衰する。

なお図の O_3, O_4 点で電流が流れ初めた場合に制動回路が開路の場合 $O_2 F$ のような正弦波形で予想されるよりも急峻な電圧が現われているのは第4図の電流制限用の抵抗の存在のため閉路過渡現象として電流が突入するからであつて, 制動線輪の閉ざされている場合にはこれが制動されて現われないのである。

第5図のような実験結果は見掛上直接第2図或は第3図の開路過渡電圧を観察したことにならぬが,

第5図 可動鐵心に巻いた探索線輪の誘起電圧(点線は制動回路開路の場合)

* 直流電弧熔接用発電機の電弧安定に関する動的特性の判別には開路過渡現象を観察するのが最もよい方策であることは, 筆者が既に明かにした所であるが, 交流熔接機についても, 同様の結論になることが本文で明かにされたわけである。

十分これを実証したものであることは次の考察で明らかである。

Ⅳ 理論的考察

(a) 開路過渡電圧が非振動的となる理由 普通の変圧器では開路過渡電圧は第2図(a)のように減衰振動となり、従つてその振動周期も電圧上昇速度に影響し、これには変圧器巻線間の分布静電容量が影響することになるが、ここで考察している熔接変圧器の開路過渡電圧は第2図(b),(c)の如く非振動的となる。これは次のように説明し得られる。

即ち熔接変圧器はその特性上漏洩磁束が普通の変圧器に比べて遙かに大である。これをインピーダンス電圧について考えてみるに普通の変圧器では4~12%であり、従つて漏洩磁束は全磁束の4~12%以下であるのに対して熔接変圧器に於ては80~100%に及び、巻線の配置の如何によつては百数十%に及ぶ場合もある。この漏洩磁束は一部薄鉄版に垂直方向にも出て大きな渦流を生じ、漂流負荷損を生ずる。事実10kVA程度の普通の変圧器の能率は約97%であるに対して、熔接変圧器は例えば75%位である。これを損失で比較してみると3%と約10%(但しkVA容量に対して)とであつて、熔接変圧器の損失が大である。熔接変圧器は連続定格ではないから設計上銅損及び無負荷鐵損は多少大きくとられているが、その和は5%を出でない。それが実際の損失が約10%もあることは流漂負荷損が極めて大であるため、これは前記の漏洩磁束が極めて大であることの直接の結果である。

このように普通の変圧器とは著しく趣きを異にして、漏洩磁束による渦流損が大であるが、この損失の大きい渦流回路が開路過渡現象に関與するので、普通の変圧器では振動的となる現象が、熔接変圧器では非振動的となり、第2図(b),(c)の如くなるのである。

(b) 渦流回路による磁束の制動作用 上述の如く開路過渡現象が第2図(b),(c)の如くなる時、何故に漂流損の大きい場合即ち漏洩磁束による渦流の大きい場合には開路過渡電圧の上昇恢復が遅れて第2図(c)の如くなるかの問題は、一言にして云えばレンツの法則によつて説明し得られると称し得る。これは制動回路の一般通念として云えるのであるが、具体的に解析すると次のようである。

問題の考察を簡単にするために次の如く考える。

(イ) 一次巻線及び二次巻線はそれぞれ別の鉄心部分に集中的に巻かれているとし、この鉄心部分の磁束を Φ_1, Φ_2 とする。漏洩磁束を Φ_3 とす

る。 $\Phi_3 = \Phi_1 - \Phi_2$

(ロ) Φ_1 を一定とする。これは電源電圧が一定であるから、一次巻線中の抵抗電圧降下を無視すると完全に成立する。

(ハ) 漏洩磁束を取巻いて流れる渦流回路を第三次回路と名付ける。一次、二次、三次電流を I_1, I_2, I_3 とし、瞬時値を i_1, i_2, i_3 にて示す。巻数を凡て1に換算したものとす。即ちアンペア回数を示すものとする。定常状態では正弦波形的に変化するものとする。

(ニ) 抵抗を R , 自己誘導係数を L , 相互誘導係数を M で示す。

第6図 電流及び磁束の位相関係(C)図のO点以後は開路過渡現象)

しからば一次電源電圧 E_{t1} と $I_1, I_2, I_3, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ の関係は第6図あるいは第7図の如くなる。即ち I_1 は E_{t1} よりある角 φ だけ遅れ、 I_2 は I_1 と殆ど 180° 位相を異にしている。 I_1 と I_2 との合成は殆んど零であるが、その合成した位相に Φ_1 が生じている。 Φ_1 はまた E_{t1} より 90° 遅れている。

Φ_3 についていえば

$$\Phi_3 = M_{13}i_1 + M_{23}i_2 + L_3i_3 \dots \dots \dots (2)$$

であつて

$$\frac{d}{dt} (M_{13}i_1 + M_{23}i_2 + L_3i_3) + i_3 R_3 = 0 \dots (3)$$

から判る如く

$$e_3 = -\frac{d\phi_3}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

は ϕ_3 より 90° 位相が遅れ、この e_3 と i_3 とは同相である。即ち上の如くに定義した ϕ_3 と i_3 とは 90° 位相差があり、同様に ϕ_2 と i_2 とは 90° 位相差がある。それで i_2 従つて i_1 が零となる瞬間即ち第6図に於て O なる瞬間を考えると ϕ_{31} は最大値の位相にあるが、最重要なことは ϕ_3 がこの瞬間に零でないことである。

元來漏洩磁束は漏洩リアクタンスに関し、負荷電流 (I_1, I_2) に比例して生ずる磁束なのであるが、漏洩磁束によつて生ずる薄鉄板その他の部分の渦流のために、現実に通過している磁束 ϕ_3 は負荷電流 I_1 (I_2) と同一位相とならず、これより

第7図 電流、磁束の位相関係

も少し遅れた位相に生ずるのである。これはあえて特別の現象ではなく例えば一次と二次とだけがあるとして考えるとき、二次閉路ならば ϕ_1 は I_1 と同相に生ずる (I_1 が無負荷励磁電流となる) に対して、二次閉路ならば第7図に見る如く ϕ_1 は I_1 より遅れて生じている。この場合二次の閉回路が一次に対して制動回路として働き ϕ_1 を I_1 より遅らしたと考えてもよいのであつて、同様に三次が閉路ならば ϕ_3 は I_1 と同相に生ずるのが、三次閉路によつて I_1 より遅れて生ずるのであるとも云える。

このように負荷電流 I_1 (I_2) が零の位相に ϕ_3 が零でないのであるから、もし第6図の O 点で I_1 (I_2) が零となつたときのサイクルで電弧の再点弧が失敗して永久に電流 I_3 が零となつたとすると、 O なる瞬間の ϕ_3 (これを ϕ_{30} とする) はその後時間と共に第6図 (c) の曲線 DH の如く減衰するはずである。一方 ϕ_1 は電源電圧 E_1 によつて規定されていて、電弧の消失に無関係に変化する。これを第6図 (c) の曲線 ABC にて示す。 ϕ_1, ϕ_3 の変化が上の如く定まるので、 ϕ_2 は $\phi_2 = \phi_1 - \phi_3$ として與えられ、従つて二次開路電圧は

$$e_2 = -\frac{d}{dt} \phi_2 = -\frac{d}{dt} \phi_1 + \frac{d}{dt} \phi_3 = e_1 - e_3 \dots\dots\dots (5)$$

として與えられる。右辺の第1項は開路定常電圧で、第2項が即ち過渡項である。

O なる瞬間以後は $i_1 = i_2 = 0$ であるから、(3)式は

$$L_3 \frac{di_3}{dt} + R_3 i_3 = 0 \dots\dots\dots (6)$$

となり、 ϕ_3 は (2) 式からも判る如く、 i_3 のみによつて作られるから、 O 点を時間の原点とすると、

$$\phi_3 \text{ は } \phi_3 = \phi_{30} e^{-\frac{R_3}{L_3} t} \dots\dots\dots (7)$$

なる形で減衰され、可動鉄心に巻いた探索線輪には

$$e_3 = -\frac{d\phi_3}{dt} = \frac{R_3}{L_3} \phi_{30} e^{-\frac{R_3}{L_3} t} \dots\dots\dots (8)$$

なる形の電圧が誘起される。これは既掲第5図 O_1, O_2, O_3, O_4 期間に現われている。

第8図は第6図 (c) の O 点以後の磁束変化を詳しく示したものである。即ち ϕ_1 は電弧の消失とは無関係に曲線 ABC の如く変化し、 ϕ_3 はもし電弧が消失していなければ曲線 DF の如く変化するのであるが (第6図 (a) 参照)、消失のため (7) 式によつて曲線 DGH の如く減衰する。 ϕ_2 は消失していなければ曲線 JK の如く変化するが、消失によつて曲線 A

第8図 開路後の磁束の変化

消失によつて曲線 BC (ϕ_1) と曲線 DGH (ϕ_3) の差として曲線 JLM の如く変化し時間の経過と共に曲線 ABC (ϕ_1) に近づく。この ϕ_2 の曲線 JLM が図に見る如く曲線 JK より傾斜が大となるので開路端子電圧が上昇するのである。

もし萬一 ϕ_3 が鎖線で示した $D'G'H'$ の如く急速に減衰したとすれば、 ϕ_2 は鎖線 JL' の如くなり、

O 点附近に於て $\frac{d\phi_2}{dt}$ の符号が逆となり、開路過渡電圧は負の値となつてしまふが、このような矛盾したことは起らないことは次の如く証明される。即ち

(2), (3), (4) 式によつて

$$e_3 = -\frac{d\phi_3}{dt} = i_3 R_3$$

は O 点の前後に於て成立し、 O 点に於ける i_3 を I_{30} とすると、 O 点以前の ϕ_3 の曲線即ち曲線 DF の D 点に於ける傾斜も、 O 点以後の ϕ_3 の曲線即ち曲線 DGH の D 点に於ける傾斜も共に $I_{30} R_3$ 等しい。従つて ϕ_2 の曲線 JLM の J 点の傾斜は曲線 JK の J 点に於ける傾斜即ち零に等しい。このために開路過渡電圧は

* 普通電気工学の教科書などでは変圧器の一次及び二次の漏洩リアクタンスとして論じているが、これはもちろん漏洩磁束が負荷電流に比例して、しかも同一位相で生じていると假定しているののであるが、この同一位相の点に問題があるわけである。

第2図の曲線 $OPQR$ の如く零から連続的に変化するのである。開路過渡電圧 e_2 は(5)式の如く $e_1 - e_3$ にて與えられるが、開路瞬間には $e_2 = 0$ となり、常に $e_3 = e_1$ となることは興味あることであるが、これは第5図からも認められる。

なお上の考察でもし R_3 が小であると(8)式に見る如く ϕ_3 の減衰が緩やかとなるので e_3 が小となり、一見開路過渡電圧 e_2 が大となるかの如く考えられるが、 R_3 が小ならば ϕ_3 従つて ϕ_{30} が大となつて、 e_2 は反対に小となる。これは $R_3 = \infty$ なる場合即ち制動作用の全くない場合を考えれば容易に肯くことが出来る。

以上の考察から明かなように、二次回路の開路過渡電圧 e_2 は開路定常電圧 e_1 から第5図に見る漏洩磁束の減衰による電圧 e_3 を差引いたもので、渦流の大なる場合(第5図曲線 $D'G'H'$)の方が電圧恢復が遅れる(第2図(c))ことが肯かれる。

(c) 力率の低下による開路電圧増大の吟味 渦流損などの損失が減少すると、それだけ力率が低下し、電圧と電流との位相差が大となるので、電流零の位相の電源電圧が最大値の方へ近づくから、電源電圧の実効値が同一でも、電弧消失時の開路電圧が高くなり、これが電弧安定の原因となるのではないかと考えられるが、次の数値例で判る如く、これは大したものではない。

今假に二次無負荷電圧を120Vとし、端子圧30Vの全負荷状態の能率を損失の多い場合70%, 少ない場合に85%とすると、その状態の力率は

$$\cos \varphi = \frac{30}{120} \times \left(\frac{1}{0.70}, \frac{1}{0.85} \right) = 0.358, \quad 0.295$$

$$\therefore \sin \varphi = 0.931, \quad 0.955$$

即ち開路瞬時値は0.931:0.955の比で少しだけ損失の少ない場合の方が高くなるが、電弧の安定度の差は電圧の実効値をこの程度に変えた場合よりは遙かに著しい。

V 電弧安定度判別の限界

電弧安定に関しては上に述べた如く熔接変圧器内の漏洩磁束による渦流の多少が影響するが、またこの安定は電流値、電源電圧値(実効値)、被覆棒の

種類によつても影響される。電弧が安定となるよい熔接棒を使用すると電源の特性の差異即ち開路過渡電圧の上昇速度の遅速の差は判らず、同じように安定に電弧が出て電源特性の区別がつかなくなる。例えば被覆棒の代りに炭素電極棒を2本水平に相對せしめて、その間に電弧を発生せしめると、棒径6mm、電極間の距離2mm、電流30A、無負荷電圧100V程度ならば電弧は十分安定であるが、このような條件で電弧発生中に電源を開閉器で1~2秒間開いて電弧を中断し、後直ちに閉路すると電弧はそのまゝ点する。即ちこの場合は電極先端の熱電子放射の性能はこの1~2秒間の間には消失せず、再び回路が閉じられて電圧が加えられると、この熱電子の放射飛行によつてたちまち電弧が再生するのである。この場合は謂わば電源電圧の恢復が1~2秒間遅れても差支えないのであつて、第2図(b)(c)に論じたような半周期(50サイクルならば0.01秒)以内の遅速は全々問題とならないわけである。これは極端な例であるが被覆棒でも電弧の安定な棒では電圧恢復速度の遅速は問題にならない。安定な棒の電弧電圧電流波形は既掲第1図の如くであつて、電流が零から増大する際の電圧の上昇が比較的緩か即ち第1図(b)のOAの傾斜は緩やかである。つまり電流が零から増大する際電弧はあまり急には大なる電圧を必要としないのであるから、電源としてもその電圧恢復が速やかである必要がないのである。電弧の不安定な棒では第1図(b)のOAの傾斜が急峻となり第9図のような波形となる。第9図(a)は新型熔接機をそのまゝ用いて電源電圧の恢復が十分速い場合であるが、(b)は既述の如く制動巻線を閉ざして恢復を遅らせた場合である。電弧電流が零から増大する際電弧としては(a)の如く急速に高い電圧を必要とするのであるが、一方電源側としては制動巻線のない場合にはこの電弧の必要とする電圧を充分供給するが、制動巻線が閉じられて電源の恢復が遅れると、電源電圧が不足して熔接電流は増大し得ず、(b)図に見る如く電流が零に近い値の期間が長く続くのである。これがため電弧電圧も図のPQの如く高くな

第9図 電弧の不安定な熔接棒を使用した場合の電弧電圧電流波形

り、不安定な状態を示す。その後電流が十分増大して、はじめて本格的な電弧となるのである。

制動回路を開いた場合と閉じた場合とで電弧電圧の波形に関する第9図(a)(b)の差はブラウン管オシログラフの上で判然と認められたが、これに対応して溶接作業を行つている溶接手に於ても、電弧の安定に差があることに判然と気が付き、傍から電弧を観察している者もまたこれを認め得られ、制動回路の開閉の効果があまりに著しいのに実は筆者も驚いた。制動回路を閉じて不安定となつた場合には電弧はポーという音が大きくなり、揺がつか感じがする。これはオシログラフで波形が第9図(b)の如くなるが、決して一回も電弧が消失していないことが確認せられるような状態に於て認められるのである。このように電弧の発生状態が異なるので、熔着金属の波(ビード)の形も異なり、大村溶接士は溶込みも差があるだろうと推定しているが、これらの問題は今後研究をしたいと考えている。

以上を要するに電弧の安定は溶接機の開路過渡現象に関する特性によつて影響を受けるが、影響の程度は溶接棒の性能によつて異なり、電弧の安定なよい溶接棒では差が認められなくなる。溶接機は云うまでもなく溶接電弧を負荷とするものであるから、その負荷の性質によつて具備すべき条件が定められるのであつて、負荷たる棒側の条件がよければ電源たる溶接機の性能が悪くても差支えないと云う常識的の結論となる。しかしこの具備条件を定量的に表わすことは目下のところ困難である。溶接電弧の電圧電流特性は被覆の種類によつて異なるはもちろん、同一被覆棒でも電流値によつて著しく異なり、かつ変動するからであつて；これらの溶接棒の電弧特性を充分明かにしてはじめて溶接機の具体的具備条件が明かとなるわけであるが、これは他日の研究にまつべきであろう。

Ⅶ 研究結果並に結果の利用

(a) 研究結果 先ず本文で明かにした事項をまとめると次のようである。

- 1 交流溶接電弧の安定度は溶接機の過渡現象的特性によつて影響を受けることがある。
- 2 その原因は変圧器の漏洩磁束によつて誘起せ

られる渦流に直接関連し、漂游負荷損の多い溶接機ほど電弧安定度が悪い。結論的には低能率の溶接機ほど電弧安定度が悪いと云える。

- 3 低能率のものは高力率であり、電流電圧の位相関係からも電弧不安定の原因が考えられるが、これは定量的には大したものではない。
- 4 電弧不安定の眞の原因は漏洩磁束によつて鐵心その他の部分に誘起せられる渦流のために漏洩磁束自体が溶接電流と同一位相とならず、電流零の位相に於て零でない値を有し、これが電弧消失後零に減衰する際二次回路に電圧を誘起し、二次回路の開路過渡電圧の上昇を遅らせる点にある。渦流の多いものほど(即ち損失が多く低能率のものほど)電圧恢復が遅れる。
- 5 その遅れは凡そ $1/2000$ 秒乃至 $1/700$ 秒である。
- 6 電弧の安定な溶接棒では電流が零を通過した直後の電圧の上昇が著しくなく、従つて電源としても電圧の急速な上昇を必要としない。不安定な溶接棒では必要とする。それで電弧の安定な溶接棒では電源電圧の遅速に関係なく安定に電弧が出るに対して、不安定な棒では電源の前記電圧恢復特性が敏感に影響し、電圧恢復の速い電源では電弧は安定に出て、恢復の遅い電源では不安定となる。電源の電弧安定に関する特性はその負荷とする電弧に関し、溶接棒の種類によつてその重要性が異なる次第である。
- 7 本研究によつて次に述べる如く交流溶接機の規格制定の基礎が與えられる。

(b) 本研究の利用 本研究結果によつて導かれる直接の問題は交流溶接機の無負荷電圧の合理的の低下の目安が確立せられ、電源設備容量、溶接機資材、電力損失等に著しい節約軽減を生じ得る点である。

従来直流電弧溶接機については、電弧安定に関し、てその靜的特性(発電機の外部特性曲線)並びに動的⁽¹⁾特性(過渡現象的特性)に関して詳しい研究があつて、殆んど完全に明かにせられているが、交流溶接機については僅かに靜的特性についての報告がある^{(2),(3)}だけで、動的^{(2),(3)}特性即ち本文に述べたような開路過渡現象が電弧の安定に影響を及ぼす件については具体

的には少しも知られていなかった。それで同一無負荷電圧の甲乙両熔接機があつても、その電弧安定に関する優劣を比較することは出来なかつたが、本研究によつて可能となつた。さらに熔接機の静的特性（無負荷電圧、力率等）と動的特性（過渡現象）とを併せ考えると無負荷電圧の異なる甲乙両熔接機も比較することも出来る。例えばここに無負荷電圧の比が 1:2 なる、甲乙両熔接機があると、一般に乙の方が電弧安定に関して優れていると考えられるが、もしも甲の電圧恢復上昇速度が乙の 2 倍以上であれば、電弧再生瞬間の過渡的の電圧は甲の方が高く、電弧は甲の方が安定となると考えられる。かくして熔接機の電弧特性を勘案して、熔接機の無負荷電圧を合理的に低下して、熔接機の容量従つて電源設備、熔接機資材を節約し、電力損失を小さくするための研究の拠り所が本研究によつて明かになつたわけである。

最近のアメリカの Welding Journal を見るとアメリカでは交流熔接機についてもかねて筆者らが考えるような合理的の詳細な規格が出来ている⁽⁴⁾。アメリカより資材の乏しい我國で、しかも敗戦の現状では一層合理的な規格によつて資材の節約を図らなければならぬはずであるのに、先般制定せられた我國の規格ではその逆のようである。アメリカでは例えば無負荷電圧は 70V 程度であつて、日本の 140V 乃至 80V では電源設備、変圧器値段その他何れの点に於ても太刀打が出来そうにもない。無負荷電圧の低下は熔接機の電弧特性の改善にもよるから、熔接機の製造者は熔接機の製造者と連絡を保ちながら、熔接機の動的特性の改良研究によつて無負荷電圧の低下を図るべきで、本文がそれに役立てば著者らの幸とする所である。

なお著者らは電元社の新型熔接機について実験したのであるが、本研究結果から推して恐らく日立製作所の新型の熔接機も同様、電弧安定に関してよい特性を有しているだろうと想像せられる。また G. E. 社の型(東京芝浦電気)、特に最近の型も同様よい特性を有すると推定せられるが、あの G. E. 社の特殊な構造が單に構造上の理由に基づいて決定せられたのか、あるいは本文に指摘した如き変圧器の動的特性に氣付いてアメリカにて古くから行われていたのかは著者らには明かでない。^{*}

Ⅶ 謝 辞

本研究は多くの人々の援助によつて行つたものである。誌して謝意を表わしたい。既に記した如く本研究の端緒は電元社で発見せられた事実によるもので、研究を木原教授からすすめられたものである。研究に当つては筆者の特別な要求によつて電弧安定の確認実験を行つたり、熔接機を阪大へ送つていただくなど電元社から種々の便宜を與へられた。また実験用の放電管は京大林助教の御好意によつて入手したものである。実験研究に当つては阪大熔接工学教室講師長谷川光雄氏(大阪変圧器株式会社研究課長)の助言を得ておる。

また電弧発生の実地試験は東大仲研究室の有安氏、阪大熔接工学教室嘱託の大村氏によつたものである。研究費の一部は財団法人熔接研究所から、筆者が京大退官後特別に御配慮をいただいている同所長田中先生によつて支出せられたものを活用した。⁽¹⁾

この研究は直流電弧熔接機の過渡特性、交流熔接機の静的特性並びに熔接電弧の特性等の研究に関連して筆者がかねてから行いたいと考えていた問題であり、これらの研究智識を援用すれば、実験設備さえあれば 2 週間を出でずして実験を完了解決して得ていたはずの程度の問題である。それが熔接機を阪大へ移してから 1 年余を経ているのは全く実験設備の不足のためであるが、この間筆者を激励された同僚木原教授の友情は著者が悪条件にたたかつて 1 個の電圧計、1 個のスイッチを購入するなど、情ない思いで実験を進めるに際して、元氣を與えられた。好意ある多くの人々に謝意を表する次第である。

(昭和 23 年 7 月稿)

文 献

- 1) 岡本, 安藤 熔接協会誌 昭和 10 年 4, 8, 10 月
- 2) 岡本, 安藤, 豊原 電気評論 昭和 12 年 6, 8 月
- 3) 村上 熔接協会誌 昭和 12 年 3 月
- 4) Welding Journal 1946 年 4 月 317 頁
- 5) 安藤, 長谷川 熔接協会誌 昭和 16 年 6 月

* 本稿を誌した後、電元社の新型と同様の型の熔接機について大坂光彦氏が「電気日本」昭和 23 年 6 月号に述べているのに氣付いたが、その記事は電弧安定の機構の説明が誤つており、オシログラムにも疑義がある。別の機会に論じたい。