論文および報告

溶接機用電磁スイッチについて*

大塚郁夫** 中尾 真** 初芝武美**

On the Electromagnetic Switch for the Spot Welder Use*

By Ikuo Otsuka**, Makoto Nakao** and Takemi Hatusiba**

Abstract

When the stored energy of an electrolytic capacitor of the spot welder is discharged through the primary circuit of the welding transformer by providing an electromagnetic switch, electrical phenomena such as high frequency oscillation or arc appear between the switching contacts.

Though the high frequency oscillation is due to an electrical cause, the arc is attributable to the mechanical chattering of the contacts.

The modes of arc occurrence are analyzed and the mechanical chattering of contacts is rendered visible by means of oscilloscope.

The theoretical consideration of the chattering mechanism showing that the contact chattering is reduced by minimizing the momentum of the moving part of a switch and the contact gap length as well as by increasing the contact force, is verified by a series of experiments.

I. 緒 言

電解コンデンサ放電型点溶接機では Fig. 1 に示されるごとく、大容量のコンデンサに蓄積された電荷を溶接変圧器の一次側に放電し、二次側に溶接に必要な大電流を得る。したがって放電には適当なスイッチが必要で、現在比較的小型のものには電磁スイッチ、大型にはイグナイトロンが多く用いられている。交流機と違って主放電スイッチに流れる電流は大きく、放電時間は短い。一例をあげると、電解コンデンサ容量 12,500 μ F, 充電電圧 500 V の場合、一次側の放電電流の最大値は約 800 A, 放電時間は 3×10^{-2} sec, 電流最大迄の時間は 5×10^{-3} sec である。放電スイッチとして使用上問題になるのは閉路時で、開路時は電流零、電荷零と見てよい。次に使用頻度は高く、一日一万回以上開閉することもある。とくに電磁スイッチの接点の消耗ははげしく、連続

使用の場合2~3ヶ月で接点を交換しなければならない。この消耗は主として閉路時生ずる火花によっておこるものであるが、使用頻度が高い場合、スイッチ自身の機械的損傷も重畳されると見られるので、電磁スイッチの開閉時に発生する現象を電氣的、機械的両面から研究を進めた。

Fig. 1 Welding circuit

Photo. 1 Electromagnetic switch made by W. Co. Ltd.

* 原稿受付, 昭和36年9月4日

** 正員, 理化学研究所 Member, The Institute of Physical and Chemical Research

Photo. 2 Voltage and current oscillogram of contacts (1)

Photo. 3 Voltage and current oscillogram of contacts (2)

II. 電磁スイッチの開路時 発生する電気現象

実験には Photo. 1 に示すW社製クラップ型電磁スイッチを使用した。交流定格 200 V, 100 A で、前述のコンデンサ容量 12,500 μ F の溶接機に使用しているものである。まず高電圧（最大 500 V）に充電された電荷をこの電磁スイッチで放電した場合、その閉路時接点に現われる電圧、および接点に流れる電流をシンクロスコープで観察した。代表的なオシログラフを Photo. 2, Photo. 3 に示した。Fig. 2 はその現象の時間的関係を図解的に示したもので、電圧波形においては閉路の瞬間、高周波振動が約 15 μ s 続き、これがアークに移行、30 μ s 後完全閉路となるが (Photo. 2 のオシログラフに相当)、それから約 300 μ s 後ふたたびアーク電圧が現われ、約 400 μ s ほど続きふたたび完全閉路となる

Fig. 2 Illustration of oscillogram

Fig. 3 Photo-transistor detecting circuit of arc flash-light

Photo. 4 Oscillogram of arc flash-light between contacts

(Photo 3 のオシログラフに示される)。電流は回路定数で決まる波形を示すが、高周波電圧、アーク電圧発生時に高周波振動が発生する。高周波振動は電気的な原因によるが、アーク電圧の発生は接点の機械的な振動（チャタリング）が原因している。高周波振動の発生についても色々問題を含んでいると思われるが、この報告では接点の消耗を解明するので、振動によるアーク電圧の発生のみに着目した。すなわち接点の消耗から考えると、第2番目のアーク発生時に電流が 100~200 A にも達している、この期間のアークによる接点の損傷が支配的である。このことは、Fig. 3 のときフォトトランジスタ回路によって発光の状況を観察すると一層はっきりする。すなわち Photo. 4 のごとくなり、ちょうど第2番目のアーク発生時にその発光が強く感じられる。またこの曲線は比較的長く尾を引いているが、これは接点材料自身の発光がアーク消滅後も残っているためであろう。

III. 接点振動の発生状況の観察

接点振動の発生状況を観察するために、Fig. 4 のごとき装置で可動鉄片の動きと接点振動との関係を求めた。すなわちマグネット側にマグネットとは独立に抵抗線を張り、可動鉄心に取付けた摺動片がその上を鉄心が引きつけられるにつれて摺動できるようにした。したがってこの抵抗線に電流を流しておくと、mn 間の電圧降

Fig. 4 Wiring diagram for surveying contact chattering

下の変化によって可動鉄心の動きを代表することができる。また接点側では接点間に 1.5 V の電池を 500 Ω の抵抗を通してつないで置き、接点間の電圧を観察すれば、接点の開いている間は 1.5 V の電圧が現れるが、閉じると電圧は零となる。したがって振動すればそれに応じて電圧が零と 1.5 V の間を振動する。Photo. 5 はそのオシログラフの一例で、Fig. 5 は可動鉄心の動きと接点振動の相関関係を示した説明図である。すなわち励磁コイルが動作すると可動鉄心は引つけられるが、約 25 msec 後に可動接点が固定接点に接触し、ここで接点の衝突による第一の振動が観察される。その後 1~1.5 msec 付近で可動鉄心が固定鉄心に追突する。そこで鉄心またはスイッチ全体が振動するのが観察されるが、その際第二の接点振動が観察されることがある。実験した W 社製スイッチではほとんど見られなかったが、スイッ

Photo. 5 Oscillogram showing the relation between magnet motion and contact chattering (W. Co. Switch)

Fig. 5 Relation of contact chattering to magnet motion

チによっては第二の振動がひどく現れるものがある。

IV. スイッチの連続実験

Photo. 6 (a), (b), (c) に示した K 社製、N 社製、L 社製の三種のスイッチを実際の溶接回路に使用して 50 万回の連続放電実験を行ない、接点およびスイッチの消耗状況をしらべた。なお K, N 社製はクラップ型交流電

(a) Switch of K. Co. make

(b) Switch of N. Co. make

(c) Switch of L. Co. make

Photo. 6 Electromagnetic switches for running test

Photo. 7 The whole view of the experimental apparatus

Photo. 8 Oscillogram showing the relation between contact chattering and magnet motion (K. Co. Switch)

磁スイッチで交流定格 100 A, 接点材料は Ag-W 合金であるが, L 社製はソレノイド型直流電磁スイッチで, 接点容量 200 A, 接点材料は Ag であった. Photo. 7 は実験装置の全形である.

アークの発生はそれぞれ異なり, N および L 社製はさきの W 社製のものとほぼ同様の現象を示すが, 中でも L 社製のはスイッチ全体が小さく, 運動体のモメンタムが小さいので振動の発生時間が短い. K 社製スイッチは設計上の不備から, 第二の接点振動によるアークが重畳されている. Photo. 8 はその振動の発生を説明しているが, 明らかに第二の振動が起っている. Photo. 9 (a), (b), (c) はそれぞれのスイッチのアーク発生状況を示すものである. 50 万回までの結果を Fig. 6 および Table に示す. 接点の消耗量は 50 万回の放電中おおよそ直線的に増加し, 発生するアークエネルギーによく比例しており, K 社製スイッチが一番消耗はげしく, L 社製のが一番優秀であった. なおスイッチに電流を通さないで開閉のみを行なった場合の接点の消耗については, K 社製の 10 万回開閉後の値を示すと 0.025 g となり, Table のいずれよりもはるかに少ないことがわかる.

またスイッチの回転軸, 軸受の機械的摩擦について 70 万回の開閉実験によってしらべた. Fig. 7 に示すごとく軸受についてはかなり見られたが, その絶対値は小さ

Photo. 9 Voltage and current oscillograms for three kinds of switch

Fig. 6 Increase of contact-matter loss during repeated discharges

Table Relation between arc energy and amount of contact matter loss

Switch	Arc energy in one discharge duration (WS)	Weight loss after 27×10^4 times discharge (g)
Switch of K. Co. make	8.2 (WS)	3.478 (g)
" " N. Co. "	1.95 (")	1.235 (")
" " L. Co. "	0.21 (")	0.149 (")

Fig. 7 Wear increase of bearing

く、100万回程度の使用に対しては接点の消耗がそのために加速されるということは観察されなかった。また軸受にナイロンブッシングを使用したものについても比較実験を行なったが軸受の摩耗は大差ないが、回転軸の摩耗はほとんど見られなかった。したがって注油の必要がないので、ナイロンブッシングの使用も面白いと考えられる。

V. 考 察

クラップ型電磁スイッチの振動のメカニズムについては古く報告があるが、ここでは簡単のためにソレノイド型直流電磁スイッチのメカニズムについて考察した。この考察によって機械振動に何が寄与しているかが判明したが、設計上の条件を求めるには今なお不十分である。

i) 直流電磁石の吸引力 (牽引力)

Fig. 8 のごとき電磁石についてその牽引力は次式で示される²⁾。

$$F_t = \left[\frac{I_w}{4.9L} + \left(\frac{I_w}{3951(l_0 - x)} \right)^2 \right] A \quad \text{.....(1)}$$

ただし、 I_w はコイルのアンペアターン、 L はコイルの長さ、 l_0 は最大空げき長、 A は鉄心の断面積である。

ii) 可動鉄心の突入速度

(1)式で示された牽引力で可動鉄心を含む運動体が吸引さ

Fig. 8 Solenoid type electro-magnet

それるが、の速度を求める。今仮りに (1) 式で $l_0 - x$ が小さい場合、第一項を無視して考えると、次の微分方程式が得られる。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = K \frac{1}{(l_0 - x)^2} \quad \text{.....(2)}$$

ここで M は運動体の質量、 $K = \left(\frac{I_w}{3951} \right)^2 A$ 、 x は $t=0$ のとき、可動鉄心の位置を 0 としして吸引される方向の長さ。

$t=0$ において $\frac{dx}{dt} = 0$ として t について積分すると、

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - \frac{K}{M} \int_0^x \frac{1}{(l_0 - x)^2} dx = \frac{1}{2} \left[\frac{dx}{dt} \right]_0 = 0$$

$$\therefore v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{2K}{Ml_0} x} \quad \text{.....(3)}$$

$x=l_0$ すなわち鉄心が完全に引きつけられ、空げきが 0 のとき v は無限大 (実際には鉄心の磁束密度 B_m は一定値になるので無限大とはならない)。となり考察しにくいので、 Δl だけ空げきを残して鉄心が止まるように設計されている (または鉄心に直結した接点が固定接点に接触する) とすると、 $l_0 - l = \Delta l$ として $x=0$ のときの速度 v_0 は

$$v_0 = \sqrt{\frac{2K}{M} \left(\frac{1}{\Delta l} - \frac{1}{l} \right)} \quad \text{.....(4)}$$

iii) 反跳運動

次に鉄心に直結した接点がある位置で固定接点に追突して跳ねかえったときの状態を考える。ここで接点追突後は鉄心は引きつけられたままの状態では、可動接点はあるスプリングで固定接点におしつけられるとする。したがって衝突時可動接点はそのスプリング圧に対抗して跳ねかえり、スプリングを Δx だけおし上げたを考える。(Fig. 9) まず追突寸前の速度を v_0 、追突直後の速度を v_1 とすると、 $v_1 = -e v_0$ 。ここで e は反撥係数である。

次に追突後は接点の持っていた運動のエネルギーがスプリングの位置のエネルギーに変換されるから、元々 x_0 だ

a) Before making contact b) After making contact

Fig. 9 Contact motion before and after making

けスプリングが圧縮されていたとすると次の式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}k(x_0 + \Delta x)^2 - \frac{1}{2}kx_0^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし m は接点の重量, k はスプリングのバネ定数である。(5)式で左辺は接点の運動のエネルギー, 右辺第一項は追突後スプリングに蓄えられた全エネルギー, 第二項は追突前, すでに蓄えられていたエネルギーである。(5)式から Δx を求めると,

$$\Delta x = \sqrt{x_0^2 + \frac{mv_1^2}{k}} - x_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

次に接点が離れてふたたび衝突するまでの時間を計算して見る。接点が離れている間の運動はスプリングの単弦振動とみなされるから, その時間は容易に求められる。すなわち,

$$t_1 = 2\sqrt{\frac{m}{k}} \cos^{-1} \frac{x_0}{x_0 + \Delta x}$$

(6)式を代入して

$$t_1 = 2\sqrt{\frac{m}{k}} \cos^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + \frac{mv_1^2}{k}}}$$

$\cos^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + \frac{mv_1^2}{k}}}$ の幾何学的関係を Fig. 10 に示す

が, $x_0 \gg \sqrt{\frac{mv_1^2}{k}}$ の場合は $\cos^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + \frac{mv_1^2}{k}}} \approx \frac{\sqrt{\frac{m}{k}}}{x_0} v_1$

となるから

$$t_1 = \frac{2m}{k} \frac{v_1}{x_0} = \frac{2m}{k} \frac{ev_0}{x_0} \quad \dots\dots\dots(7)$$

第2回目以下の追突によって接点の離れる時間を, $t_2, t_3, \dots$ とすると, 離れている全体の時間は

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots\dots\dots$$

$$= \frac{2mv_0}{kx_0} e \left(\frac{1-e^n}{1-e} \right) \quad \dots\dots\dots(8)$$

したがって振動をへらすには, Δx すなわち t , または T を減らすようにすればよい。(6), (7), (8)式からわかるように mv_0 を減らすことがまず考えられる。 v_0 を減らすには(4)式で l を小さくすることが考えられる。次に x_0 または k を大きくしてもよい。すなわち kx_0 はスプリング圧に相当するので, スプリングを強くするか, スプリングにあらかじめ十分にエネルギーを蓄えておく

Fig. 10 Geometry of $\cos^{-1} \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + \frac{mv_1^2}{k}}} = \theta$

ことがよい。しかし, これらを実現させようとする, その値にはおのずから限度があるし, それぞれの間に相関関係があって制限される。理想的には Δx を 0 にするには, v_0 を 0 にしなければならないが, このような構造のスイッチでは実現はむづかしく, 新しいメカニズムを採り入れなければ解決されない。

VI. 可動鉄心の投入速度, スプリング圧の接点振動に及ぼす影響

考察の結果を実証する例として, 可動鉄心の投入速度とスプリング圧の接点振動に及ぼす影響をしらべた。実験に使用した電磁スイッチは連続実験に使用した K 社製のもので, 前述のごとく接点振動の最もはげしいものである。その原因として Photo. 8 に示すごとく投入速度が大きいこと, および接点の接触圧が 0.9 kg という低い値であることがあげられるので, 投入速度を小さくし, 接触圧を増すことによって接点振動を減らすことが期待される。

投入速度を変える方法として, 励磁コイルに加える電圧を変えた。接触圧は接点のスプリング圧によって変えることができる。すなわち閉路時の接触圧が 0.9 kg のスプリングと, 2.2 kg とするスプリングとについて実験した。

Photo. 10 はスプリング圧 0.9 kg で励磁電圧を 200 V, 150 V, 100 V と変えた場合で, 振動はいぜんと現われるが接点の開いている時間は次第に短くなる。

Photo. 11 はスプリング圧を 2.2 kg として励磁電圧を 200 V, 160 V, 120 V と変えた場合で, 電圧を下げて投入速度を減らすと, 顕著に振動時間が減少していることがわかる。Photo. 21 は実際に溶接回路につかってコ

Photo. 10 Effect of exciting voltage of magnet on contact chattering (contact load ; 0.9 kg)

Photo. 11 Effect of exciting voltage of magnet on contact chattering (contact load ; 2.2 kg)

Photo. 12 Effect of exciting voltage of magnet on arc occurrence (contact load ; 2.2 kg)

ンデンサの電荷を放電した場合の電圧波形を示す。

VII. 結 言

以上、電解コンデンサ放電型溶接機用電磁スイッチの閉路時に発生する電気現象をしらべ、次のことを明らかにした。また接点振動について簡単な考察を行なった。

1) スイッチ接点消耗の原因は接点振動によって生ずるアークによるものである。

2) 接点振動には、可動接点が固定接点に追突したときに発生する振動と、その直後可動鉄心が固定鉄心に追突して生ずる振動が接点に伝わって発生するものとの二種類ある。

3) 同じ接点材料については、スイッチ接点の振動によって発生するアークのエネルギーと接点消耗量との間には比例関係がある。

4) 50万回程度の開閉使用による回転軸等の機械的摩擦は、アーク発生には影響を与えない。

5) 考察によると、接点振動をへらすには、可動接点を含む運動体のモメンタムをへらすこと、スプリング圧を大きくするか、スプリングに十分な位置エネルギーを蓄えることが必要である。理想的に振動をなくすには、追突時運動体の保有する運動のエネルギーを他の機構によって吸収する必要がある。

6) しかし現用のスイッチでも投入速度、スプリングの接触圧を適当に選ぶことによって、接点振動をかなりへらすことができた。

終りに御指導戴いた宮田聡博士ならびに実験上の便宜をはかって戴いたオリジン電気株式会社溶接課に厚く感謝する。

文 献

- 1) 森泉, 製鉄: 日立評論, 27, 7, 昭19 (1944)
- 2) 電気学会: 特殊機器, 50: 昭31 (1956)