ワイヤ放電加工の電解腐食を抑制する トランス結合回路と仕上げ加工への適用^{*}

増井清徳^{**} 曽根 匠^{**}

Transformer Coupling Circuit and its Application for Finishing Process of Wire Spark Erosion with Non-electrolytic Corrosion

Kiyonori MASUI and Takumi SONE

Abstract

Finishing technology on the wire spark erosion has been investigated for improving the integrity on the machined surface. However, in relaxation type generator used in many factories, some DC leakage current under the de-ionized water causes electrolytic affection and may attack microstructure and/or decrease the hardness on its machined surface.

For the improvement on these problems, this paper describes transformer coupling circuit as an adaptor for relaxation type generator.

This circuit constructed with pulse transformer is installed between the capacitor and the working gap and converts the waveform to AC out put. Since the gap is isolated from DC source, such electrolytic affection is suppressed.

In machining tool steels, no electrolytic corrosion is observed and it is also useful to finish the machined surface with excellent quality.

Another advantage of this circuit installed on the rectangular pulse generator can deliver micro-power pulses to the working gap at high performance, and make it possible to keep the surface roughness less than $2\mu\text{m } R_{\text{max}}$ even in a dielectric water of high conductivity.

* 第111回・第116回電気加工研究会, 第9回電気加工国際会議(ISEM-9)で発表

** 大阪府立産業技術総合研究所

1. 緒 言

ワイヤ放電加工における仕上げ加工技術は、加工表面性状の改善を目的として検討されてきた。しかしながら、すでに多く使用されているコンデンサを用いた弛張式パルス電源では、加工液を介する漏洩電流が電解作用を誘起し、条件によっては、加工表面の金属組織を損ない、さらに、硬さを低下させるなど、加工面に悪影響を与えることが知られている。^{1, 2, 3)}

図1は、コンデンサ電源で合金工具鋼を加工した場合の加工面のSEM写真と断面組織の一例である。すでに筆者らが明らかにしたように³⁾、加工表面近傍には、電解腐食による孔が観察される。

(a) SEM写真

工作物：合金工具鋼SKD11，
加工液電導度：50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，
パルス波形条件は図3(a)に同じ。

(b) 加工断面組織

図1 電解腐食の状況

本研究は、こうした電解腐食を電氣的に抑制するトランス結合回路に関するもので、その動作原理、ならびに、適用例について述べる。

さらに、トランス結合回路を方形波パルス電源に適用すると、微小な電流パルスも効率的に伝送することができるので、高電導度の加工液でも高品位な仕上げ面を得ることができる。

2. 実験方法

実験装置は、トランジスタ制御型コンデンサ弛張式パルス電源に試作のトランス結合回路を付加したもので、表1にその実験条件を示す。また、本回路はコンデンサを開放するとトランジスタ制御型の方形波パルス電源としても使用できるものである。

表1 実験条件

ワイヤ放電加工機	AGIE DEM15/15LD
パルス回路方式	方形波充電コンデンサ弛張式パルス回路
開放電圧	200 V
テーブル送り	定速送り
加工液（電導度）	イオン交換水（ $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ ）
ワイヤ電極材	65/35 黄銅
線 径	0.2 mm
張 力	800 gf
工 作 物	合金工具鋼（SKD11）
硬 さ	HRC 60
厚 み	16 mm

図2は、トランス結合回路の概略図を示す。図のように、結合回路（破線内部）は、コンデンサと加工ギャップの間に挿入される。なお、本回路方式では、コンデンサへの充電は、トランジスタによる方形波パルス充電回路を使用しなければならない。

図2 トランス結合回路の概略（破線内部）

また、トランス結合回路は、パルストランス P_t と付加コイル L_e によって構成され、これらの仕様を表2に示す。トランスやコイルには、Mn-Zn フェライトによる高透磁率のトロイダルコアを使用しているため、少ない巻線数でも高いインダクタンスを得ることができる。

表2 トランス結合回路の仕様

		パルストランス P_t	付加コイル L_e
コア材質		Mn-Zn フェライト*	←
コア形状		トロイダル	←
初透磁率	μ_i	10000	←
飽和磁束密度	B_m (mT)	401	400
磁路長	l (mm)	170	124
実効断面積	S (mm ²)	477	254
残留磁束密度	B_r (mT)	90	107
キュリー温度	(°C)	>120	←
自己インダクタンス	(mH)	$L_1 = L_2 = 5.3$	$L_e = 0.28$
漏れインダクタンス	L_i (μH)	0.6	—
巻線数	N	一次：二次 = 15 : 15	4

* フェライト・コア；H5c2（TDK製）

3. 実験結果および考察

3.1 パルス波形の比較

図3は、電源回路の違いによる加工ギャップにおける波形の比較を示す。コンデンサ弛張式電源（図3(a)）では、パルス波形の繰り返し周期は制御できないので、電圧や電流波形はたえず変動して観測される。さらに、ギャップには平均的な加工電圧として、ほぼ無負荷電圧の50%程度の電圧が加わる。このときの直流電位が工作物に電解作用を生じると考えられる。³⁾

上段：電圧波形，下段：電流波形

図3 ギャップ波形の比較

いっぽう、図3(b)に示すように、トランス結合回路では、電圧パルスは、交流的な波形に変換される。このようにコンデンサ弛張式電源に、トランス結合回路を付加すると、加工ギャップの状態に従属

的な放電回路から、その状態に左右されない独立的なパルス回路方式に改造することができる。

3.2 動作原理

トランス結合回路の動作原理については、加工ギャップの状態を以下のように、開放、正常放電、および、短絡の3状態に分けて検討する。

(a) 開放状態

加工ギャップにパルス電圧が印加されても放電が発生しない開放状態では、図2の回路を等価的に図4のように置き換えることができる。この場合、トランスの一次側と二次側の巻線数が等しいので、ギャップには一次側と同じ電圧波形が誘起される。しかし、二次側の電流はほとんど流れないので、回路的には、トランスからの二次側

回路を無視し、コンデンサCの両端をコイル L_1 で短絡されたものとして考えることができる。図4の波形は、方形波パルスでスイッチングトランジスタTrを駆動した場合の各部の波形を示す。

(1) コンデンサへの充電期間 ($t_1 < t < t_2$)

$t_1 \sim t_2$ の間中は、コイルのインピーダンスは、コンデンサのそれに比べて極端に高いので、コイルにはわずかな電流しか流れず、直流電源からの大部分の電流はコンデンサへの充電に消費される。充電用トランジスタのオンタイムは、コンデンサへの充電がほぼ終了する時間($t_2 = 2.2C \cdot R(\text{sec})$)より決定され、ここでは $t_2 = 13 \mu\text{s}$ に設定した。

(2) コンデンサの充電終了後もコイルが依然とインダクタとして作用する期間 ($t_2 < t < t_3$)

t_2 でトランジスタがオフになると、今度は、充電されたコンデンサからコイルに流れる電流が増大し始める。この期間中も、 I_1 は徐々に増えるとともに、コイル内の磁束密度も比例的に増加する。 t_3 におけるコアの飽和電流 I_s ($I_s = B_m \cdot N \cdot S / L_1$, B_m : 飽和磁束密度, N : 巻線数, S : コアの実効断面積)は、コアの飽和磁束密度より決定され、本回路では、 $I_s = 0.54 \text{ A}$ で、それ以上の電流では、コアは完全に飽和領域に入る。

(3) コアの飽和とコンデンサからの放電期間 ($t_3 < t < t_4$)

t_3 で、コアが飽和すると、透磁率の低下からインダクタンスは、急激に減少し、コイルは低インピーダンス負荷として作用する。そこで、これまでコンデンサに蓄えられていた電荷は、一次側コイル

図4 ギャップ開放時の等価回路と各部の波形

を通して急激に放出され、ほぼコンデンサの短絡状態に近い電流 I_1 が流れる。しかし、コアは飽和してはいるものの、二次側コイルとは、相互インダクタンスによって依然と磁気結合しているために、二次側の加工ギャップに交流パルスが誘起される。この場合、二次側コイルは、一次側と同じ巻線数を有するので、二次側に発生する電圧波形のピーク値は、一次側のそれと全く同じ電位レベルである。

(4) コイルインダクタンスの回復期間 ($t < t_4$)

コンデンサからの放電が終了に近づくにともない、一次電流 I_1 も急激に低下する。 t_4 でコイルのインダクタンスが回復すると、それ以降の I_1 は、徐々に減少する。

以上のように、 t_1 から t_4 までの期間は、まず、最初にコンデンサが充電され、その後、コンデンサに蓄えられたエネルギーがコイルを介し、急峻な電流パルスとして放出される。通常、こうした急峻な大電流パルスのスイッチングや遅延制御には、高速大容量の半導体素子を必要とするが、高インダクタンスコイルやコアの飽和現象を利用することによっても容易に行うことができる。

なお、パルス流形の繰り返しは、トランジスタのスイッチング周期に基づき、これはコンデンサの充電・放電に要する時間と、放電の休止時間の総和から設定される。本回路例では $50 \mu\text{s}$ である。

(b) 正常放電状態

加工ギャップにパルス電圧が印加され、ギャップの絶縁破壊が起きるまでは、前項の開放状態と同様である。しかし、一旦絶縁が破壊され放電が開始すると、ギャップのインピーダンスは、急激に低下し、急峻な放電電流となって I_2 が流れる。この場合の回路図とパルス波形は、それぞれ前述の図2、図3(b)に示す。放電は主としてギャップ電圧 V_g の上昇途中で発生するが、なかには、 V_g の上昇直後に発生する場合もある。

放電電流波形の形状は、付加コイルによっても変化させることができる。コイルを付加した二次側回路では、新たにコイルのインダクタンスが加わるので、波形の立ち上がり、立ち下がり特性にその影響を受ける。

図5は、コイルの有無による波形の比較を示す。コイルを付加するとピーク電流値は低下するが、波形の振動を抑えることができる。こ

うした波形は、結果的に加工表面へのワイヤ材の付着を減少させる効果がある。

(c) 短絡状態

図6は、加工ギャップが短絡中の等価回路と各部の波形を示す。付加コイルを介して二次側を短絡した場合

図5 コイルの有無による放電電流波形の比較

合、トランスの漏洩インダクタンスを無視すると、一次側から見た回路インダクタンスは、ほぼ付加コイルの自己インダクタンス ($L_e = 0.28 \text{ mH}$) まで低下する。

このために見かけ上のトランス回路の飽和時間は、前述の開放状態や正常放電状態に比べて少し短縮され、コンデンサ充電用トランジスタが導通中にもかかわらず、一次側に飽和電流が流れる。(矢印)

また、付加コイルは、図のように短絡時における二次側の回路電流 I_2 を減ずる作用がある。この場合の I_2 は、コイルのインピーダンス ($2\pi \cdot f \cdot L_e$) に左右さ

れ、トランジスタのスイッチング周波数 f やインダクタンス L_e の影響を受ける。 f や L_e が高くなるにつれて、 I_2 のピーク値はさらに低下する傾向にある。

こうした短絡時におけるピーク電流の抑制作用は、ワイヤ放電加工では、異常時の短絡電流の集中を抑え、ワイヤの断線防止などにも効果が予想される。

いっぽう、付加コイルを取り外し、トランスの二次側を直接短絡すると、トランスの入力インピーダンスが極端に低下するために、コンデンサへの充電電流 I_c と、一次側電流 I_1 に対する遅延タイミング制御を行うことができない。

図7は、付加コイルを取り外した場合における短絡時の電流波形を示す。回路電流は図6の場合と大きく異なり、コンデンサへの充電波形は見られず、電源側からの方形波がそのまま二次側波形として現れる。

このように、付加コイルは、パルス波形の整形や短絡電流の抑制作用など、ト

ランス結合回路においては重要な役割を果たしているが、その動作原理については、さらに詳しい検討が必要である。

図6 ギャップ短絡時の等価回路と各部の波形

図7 コイルを取り外した場合の波形の比較

3.3 加工中のパルス波形と加工断面組織

実際のワイヤ放電加工中における各部の波形を図8に示す。すべての波形は、トランジスタのスイッチング周波数に基づく一定のパルス間隔で繰り返される。また、加工ギャップの電圧波形は、完全な交流パルスを呈し、過度の直流成分は現れない。

図8 加工中における各部の波形

図9は、本トランス結合回路で合金工具鋼を加工した時の加工断面の組織写真を示す。この場合の加工表面には、マイクロクラックが存在するものの加工液の電導度が $50\mu\text{S}/\text{cm}$ であるにもかかわらず、図1のような電解腐食による孔は、ほとんど観察されない。

工作物：合金工具鋼SKD11，
加工液電導度： $50\mu\text{S}/\text{cm}$ ，
波形条件は図3(b)に同じ

図9 トランス結合回路方式による加工断面組織

なお、トランス結合方式の加工速度は、コンデンサ弛張式電源に比べるとやや低下し、また、加工表面には、ワイヤ材の付着も観察される。このため実加工に際しては、ファースト・カットの荒加工よりも、セカンド・カット以降の仕上げ加工に適用した方が、ワイヤ材の付着もなく効果的である。

以上これまでの回路や加工は、放電エネルギーの比較的高いパルス波形を例に検討したが、通常、仕上げ加工としてのセカンド・カット以降は、放電エネルギーを徐々に低く設定しなければならない。こ

のため本回路方式では、順次、コンデンサの値を小容量のものに切り替えてその調節を行う。この場合、コンデンサ充電用方形波パルスのピーク電流とオンタイムも、使用するコンデンサの充電時定数に応じて調節する必要がある。

なお、加工中のトランスやコイルは、次第に発熱する。コアの発熱は透磁率の低下につながるので、クーリング・ファンなどによる冷却が必要である。

3.4 微小電流パルス回路への応用

高電導度の加工液では、漏洩電流やそれによって発生する腐食のために、微小な電流パルスによる放電状態を安定に維持することが困難な場合がある。しかし、図10のように方形波パルス電源にパルストランス（破線内部）を挿入すると、仕上げ加工に必要な微小電流パルスを効率的に加工ギャップに伝送することができる。この場合のトランスは、無線機などの高周波回路におけるインピーダンス整合器と同様な機能を有すると考えられる。⁴⁾

上段：電圧波形，下段：電流波形

図10 微小電流パルス回路への適用とパルス波形の比較

図10(a)・(b)は、パルストランスの有無における加工ギャップの電圧・電流波形の比較を示す。(a)では、電源ケーブルに存在する浮遊容量（約7nF）のためにパルスの応答性が低下し、特に、ギャップが開放時の立ち下がり期間中における漏洩電流が顕著に観測される。本例では、正常な放電の繰り返しが少ない、加工表面はまたたく間に赤錆で覆われてしまう。

いっぽう、(b)のパルストランスを挿入した回路では、波形が交流化されるとともに、パルスに対する応答性も改善されるので、きわめて安定な加工状態を維持することができる。また、長時間の加工においても錆の発生はほとんど見られない。

図11は、前図(b)のパルス波形で合金工具鋼を仕上げた場合の加工面のSEM写真と表面あらさを示す。高電導度加工液の使用にもかかわらず、腐食やマイクロクラックのない高品位な仕上げ面($R_{\max}$; $2\mu\text{m}$)が得られた。

図11 トランス結合回路方式による仕上げ加工例

4. 結 言

ワイヤ放電加工の電解腐食を抑制するトランス結合回路を試作し、その動作原理、ならびに、仕上げ加工への適用について検討を行った。

高透磁率コアを用いたトランスやコイルでは、高インダクタンスと磁気飽和現象を利用することにより、急峻なパルス波形の遅延制御と交流パルスへの変換が可能である。この動作に基づくトランス結合回路を、コンデンサ弛張式、もしくは、方形波パルス回路に適用すると、ギャップを過度の直流電位から絶縁することができ、加工面の電解腐食を抑制する効果がある。

さらに、高電導度加工液を使用する場合でも、微小な電流パルスを効率的に伝送することができる。合金工具鋼の仕上げ加工では、電解腐食の無い高品位な仕上面を得た。

また、トランス結合回路は、鋼のワイヤ放電加工以外に、超硬合金、チタン合金、亜鉛、アルミニウムなどのように、電解反応に鋭敏な金属材料の加工にも同様な効果が期待できる。

最後に、本研究の遂行にあたり、有益なご助言をいただいたオランダ Twente 大学 C.J.Heuvelman 教授、ならびに、東京大学生産技術研究所・増沢隆久教授に深く感謝いたします。また、実験にご協力いただいた TDK 株式会社・氏川 誠氏に厚くお礼申し上げます。

(1989.7.10 受付)

参 考 文 献

- 1) C.J.Heuvelman : The Improvement of Surface Integrity of Cemented Carbides with W-EDM, EDM-Seminar/EDM-Digest, U.S.A. (1982)
- 2) B.M.Schumacher : EDM Technology for Precise Workpieces with Excellent Surface Quality, Ann., ISEM-7 (1983) 126
- 3) 増井清徳, 曾根 匠 : ワイヤ放電加工面の電解腐食, 精密工学会誌, 54.6 (1988) 161
- 4) 小柴典居 : パルストランスと応用回路, (株)産報 (1969) 186