

D社の文献紹介もグループGD5を迎え、いよいよ佳境に入ってきました。本話では2010年溶学誌に掲載されたD-11*¹⁾をメインに、2014年に溶接技術誌に掲載されたD-15*²⁾文献を参照しつつ、紹介します。

D-11文献では、主題を「アーク溶接機器の最新技術」とし、そのキーワードはアーク溶接電源、インバータ化、デジタル化、CBT法としてあります。

インバータ化の項では、大いに基礎学習をし、デジタル化の項では最先端を行くWelbeeに関する学習を行い、それらの適用事例としてCBT法について理解を深めることを心掛けたいと思います。

1. 溶接電源制御技術の進化

冒頭には、新アークプロセスの実現やアーク溶接電源の高性能・高機能化には、デジタル化とインバータ化が欠かせない技術となっていると指摘されている。

1) 溶接電源のインバータ制御化（本項、紙面の都合で要約に留めさせていただきます。）

図271-1に、サイリスタ制御式溶接電源とインバータ制御式溶接電源の回路構成と特徴を示す。

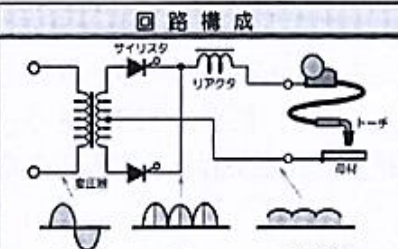
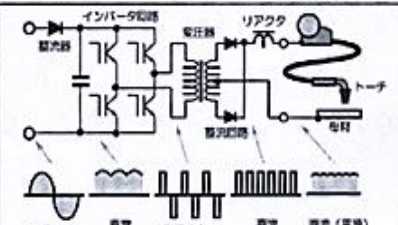
■ サイリスタ制御式溶接電源		■ インバータ制御式溶接電源
① 制御周波数	最大で商用周波数の6倍 300Hz あるいは 360Hz	1980年代のインバータ制御式溶接電源の制御周波数；高々数kHz
サイリスタ制御		① 商用周波数に依存することなく出力波形を制御できること。 ② サイリスタ制御式溶接電源の制御性能を超えるには十分な制御周波数を備えていた。 → インバータ制御式へシフト 近年では主回路制御装置のデジタル化と併せて高速化され、2次側で100kHz程度まで高速化。 インバータ制御回路のスイッチング素子には <u>IGBT が主に使用される。</u>
インバータ制御		① 変圧器の1次側（入力側）で出力を制御。 ② 高周波交流による出力制御。制御周波数：数万回/秒 ③ 変圧器、リアクタは小形軽量。

図 271-1 回路構成の比較と特徴

② 変圧器の小形・軽量化

インバータのスイッチング周波数の高速化に伴い、溶接電源の小型化が進められた（図271-2）。

今、入力側に交流周波数 f で実効値 V_1 の交流電圧を印加したとする。鉄心に発生する磁界 Φ ($=BA$) は次式で表すことができる。

$$\Phi = BA = \frac{V_1}{2\pi f N_1} \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

$$B = \frac{V_1}{2\pi f (AN_1)}$$

ただし、
 B ：磁束密度
 A ：鉄心断面積

同じ磁束密度を鉄心に発生させる前提で小形軽量の変圧器を設計するには、鉄心断面積や巻き数を小さくし、その分だけ交流周波数を高くすることができれば良いことが分かる。

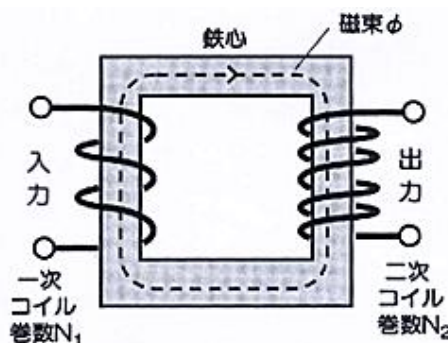


図 271-2 理想変圧器の模式図

■ サイリスタ制御式溶接電源

③ 省エネルギー化

無負荷損が発生

■ インバータ制御式溶接電源

① 無負荷損発生しない

② PWM 方式によるスイッチング制御により力率を改善することも可能

2) 溶接電源のデジタル制御化

・溶接電源制御回路のデジタル化も主回路制御方式のインバータ化とほぼ同時期から進められた。

① デジタル演算素子の進展 ⇒ 高速・高精度演算，高過渡応答の実現

・シーケンス制御からデジタル化が進められ、デジタル演算素子の高性能化に伴って出力波形を演算する波形制御回路が、MPU（Micro Processing Unit）や DSP（Digital Signal Processor）を用いてデジタル化された。

・最後にデジタルされたのが主回路制御装置であり、並列演算可能な FPGA（Field Programmable Gate Array）が採用され、出力波形のみならず精度よく高速スイッチング制御も可能となった。

② 直流リアクタとその対応 ⇒ 溶接電源の小型・軽量化

・従来の直流リアクタは大きなものが普通であった。それではインダクタンス値が大きくなり電流変化を妨げてしまう。そのため直流リアクタを小型化し、高速インバータ制御がその過渡応答を補償することで、複雑な出力波形を実現しつつ、溶接電源を更に小型化することが可能となった。

③ 今後の展望；

・近年では、アーク現象のシミュレーション技術の飛躍的進歩および複雑な現象の可視化がアーク現象の理解を容易にすることに寄与。

・これらを背景に、理論ベースでの電流波形制御法の提案やこれまで不可能と考えられてきた溶接法および溶接性能が実現される可能性が見えてきた。

・これらを実現するためには、はるかに凌ぐ演算パワーが今後求められる。デジタル化は、更に高性能な溶接電源プロセスの開発には欠かせない要素技術となってきている。

3) 溶接制御専用エンジン「Welbee；Welding best electronic engine」の開発

① 制御回路の構成方法；

汎用 L S I（Large Scale Integrated Circuit）を中心に回路設計をおこなうとムダが多くなった。そこで、溶接制御に特化した専用 VLSI（Very Large Scale Integrated Circuit）による高速演算周期と高い処理能力の実現を目指し、Welbee（Welding best electric engine）を開発した。

図 271-3 にデジタルインバータ制御式溶接電源の変遷を示す。なお、紙面の都合で各世代の解説は割愛。

	第1世代 1996 ～ 2000	第2世代 2001 ～	第3世代 2008 ～	第4世代 2010 ～
電源外観		 演算素子の高性能化	 FPGA 橋渡しの世代	 ASIC Welbee 世代の実現
演算素子	16bitマイコン	32bitマイコン / DSP	FPGA	ASIC
演算周期	100 μ s	25 μ s	1 μ s	20 ns
処理量	1	4	16	64

図 271-3 デジタルインバータ制御式溶接電源の変遷

② Welbee チップの高速演算性能と高い処理能力；

- ・ASIC（Application specified integrated circuit）で制御回路を構成することで実現されている。
- ・Welbee チップの機能ブロックの概要説明（[図 271-4](#) 参照願います。）

- ア) 出力波形制御に用いる溶接電流・電圧の瞬時値は高速AD変換ブロックでデジタル化
- イ) メモリブロックに格納された電源特性に最適化された波形制御データを読み出し
- ウ) CPUブロックやDSPブロックで出力波形演算とフィードバック制御を行い、インバータのスイッチング制御を行う
- エ) 通信制御ブロックは、外部機器との高速シリアル通信、機器間の情報伝達、同期制御、及び表示系の制御等を司る。

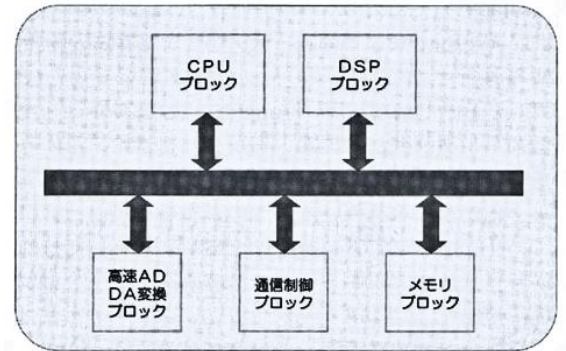


図 271-4 各機能ブロックの説明

以上のように、Welbee では溶接制御に係わる主要な機能ブロック等を **1 チップ化**し、主要なデバイスのみ高性能化を追求。他の 1 チップ化によるメリットとしては、各機能ブロックを高速で並列処理することで高速・高機能化を図り、高いコストパフォーマンス性を発揮。また、電子デバイスの調達性、安定供給にも寄与。とくに最近のコロナショックによる半導体の供給停滞の現状では、効果を発揮できているものと推定されます。

2. 新開発デジタルインバータ溶接電源

1) Welbee チップを搭載した新開発溶接電源の特徴とその項目

- ・主な特徴として 5 項目が挙げられ、その概要が示されている。
- ① Welbee チップによる高速・低スパッタ溶接法（CBT-EX 法）の実現
- ② メンテナンス性、耐久性の向上
- ③ 溶接機の IT 化による品質管理と拡張性
- ④ 溶接モードのライブラリー化
- ⑤ 環境配慮

以下、ここでは本文に比較的詳しく示されている①と②の項目についてのみ引用します。

2) Welbee による高速・低スパッタ溶接法の開発

- ・短絡移行となる電流領域の低スパッタ溶接法として、**CBT（Controlled Bridge Transfer）**法を初めとした各種低スパッタ制御法が提案・実現されてきた。
さらに、高能率化の観点からグロービュール移行領域でも低スパッタ化が求められている。
- ・このような市場ニーズに対して、**REGARC** 及びワイヤに **REM** を添加して特殊な溶滴移行形態を実現することでスパッタ発生を抑制する手法などが提案されている。
- ・しかし、これらの手法は薄鋼板・高速溶接化には最適とは言えない。その理由は、それらの電流領域ではハンピングを起こしやすく、それらを防ぐにはアーク長を短くしないといけないが、これらの手法ではグロービュール領域で高速・高精度にアークを安定化させることがむずかしい。
- ・そこで、Welbee チップの高速演算機能を用いることで、グロービュール移行での溶滴移行を短絡移行のように安定させ、高速溶接での低スパッタ性能を発揮する CBT-EX (Controlled Bridge Transfer-Expanded) 法を開発した。

3) CBT-EX 法の溶滴移行と適用例

■ CBT-EX 法では、短絡電流をアーク再点弧直前に即座に低い電流まで下げ、アーク再点弧時に発生するスパッタを抑制。アーク再点弧の予測には、トーチ先端と母材間の精密な電圧が必要になり、従来では電圧検出線を用いて電圧情報を取得していた。

しかし、この手法では電圧検出線自体にも不要な電圧降下やノイズを含む場合があり、アーク再点弧予測精度が下がった結果、低スパッタ制御性能を発揮できない場合があるという課題を抱えていた。

しかし、Welbee チップの高速演算機能を用いることで、電圧検出線を用いることなくトーチ先端と母材間の電圧を精度よく推定することが可能となり、アーク再点弧の予測精度をグロービュール移行領域でもほぼ 100% 近い精度にまで高めることが可能になった。

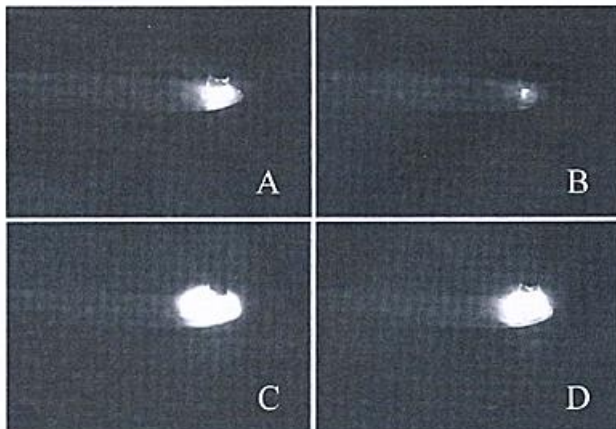


図 271-5 溶滴移行の観察例



図 271-6 CBT-EX 法の適用例

* CBT-EX 法による MAG 溶接・溶滴移行を高速ビデオカメラで観察した例を 図 271-5 に示す。

〔観察結果〕

フレーム A；アーク期間中の溶滴と溶融池の様子を示す。本来であればグロービュール移行となる電流域であるが、溶滴が安定した状態で懸垂しており、溶融池も非常に穏やかであることがわかる。

フレーム B；フレーム A の後、一旦短絡してからアークが発生した瞬間を示している。低スパッタ制御によりスパッタが発生していないことがわかる。

フレーム C；低スパッタ制御により不足した短絡期間中のジュール熱を補うためパルス状の高い電流を通电している様子を示している。

フレーム D；一気に溶融した金属が、ワイヤ直下に安定した状態で懸垂している様子を示している。

CBT-EX 法で実現した Welbee チップによる高速・高精度電流波形制御法が、通常ではグロービュール移行となる電流域でも、安定かつ穏やかな溶滴移行を実現し、短絡移行での低スパッタ性能と同等の効果を発揮することが可能である。

図 271-6 に板厚 1.6mm × 速度 200cm/min の条件による例を示す。溶け込みが概ね 30% を確保、スパッタ発生量も 0.1g/min 程度まで抑制され、表面にスパッタ痕が見当たらない。

なお、文献 D-11 は Welbee 開発終了時のもので、ほぼ 4 年後の文献 D-15 には実例が多く掲載されている。また、第 273 話（電流波形制御とその進化を知る(2/2)）のなかでは CBT-EX 法に関しさらなる詳細を示しました。併せて参照下さい。

以上。

*1) 文献 D-11； 恵良 哲生 特集 アーク溶接の最新技術－溶接機器・溶接材料・シールドガスからのアプローチ
アーク溶接機器の最新技術 (株)ダイヘン 溶接学会誌 第 79 巻(2010) 第 6 号 P20-23

*2) 文献 D-15； 恵良 哲生 特集 進化するアーク溶接 溶接技術誌 2014 年 2 月号 Vol. 62 P56-60
アーク溶接の進化－溶接機の電流波形制御はここまで進んだー (株)ダイヘン