5 インバータ制御によるアーク溶接機の 進歩と自動化への適応*

Recent Advances in Inverter Controlled Arc Welding Power Sources
and their Application*

山 本 英 幸**

Hideyuki YAMAMOTO**

キーワード：インバータ制御，アーク溶接電源，ガスシールドアーク，
自動化

1. は じ め に

インバータ制御のアーク溶接機が我国で初めて製品化されたのは1982年であるが，その後の技術進歩は目ざましく，現在ではガスシールドアーク溶接機を中心に，ほぼすべての機種，容量の溶接電源に採用され，その需要が急速に増加している。

特に，我国におけるアーク溶接機へのインバータ制御の採用目的は欧米のそれとはかなり異なり，単に溶接電源の小形・軽量化，省電力化など機能面の改善に止まらず，むしろ溶接性能の向上に主眼が置かれて技術開発が進められていることが特長的である。このため，インバータ制御の溶接電源の普及によって，各種半自動アーク溶接の性能が一段と改善され，同時にアーク溶接ロボットや自動専用溶接装置と結合して溶接の自動化と信頼性の向上に大きく貢献してきた。

ここでは，本誌「技術資料」に2年前にまとめられた“インバータ制御アーク溶接機”の内容をふまえ，その後の進歩と技術動向，最近のトピックスなどを付け加えると共に，溶接の自動化推進の立場から見たインバータ制御アーク溶接機の役割と適応性について考えて見たい。

2. アーク溶接電源の出力制御法の変遷と インバータ制御電源の適用状況

我国におけるアーク溶接法の主流はガスシールドアーク溶接法であり，最近の溶接材料，溶接機器の生産統計から見ても，全アーク溶接法における適用比率はすでに60%を越えている²⁾。

このようなガスシールドアーク溶接法の普及拡大が，溶接の自動化に大きく貢献してきたことは言うまでもないが，同時に溶接電源の制御方法の進歩による溶接の機能，性能の向上が自動化の推進に果たしてきた役割もきわめて大きい。

図1は，ガスシールドアーク溶接に使用されている我国の溶接電源の出力制御方式の変遷と普及状況および主な溶接機の開発時期をまとめたものである^{2,3)}。図1(a)は消耗電極式について示したもので，1970年頃，それまでの磁気増幅器に替ってサイリスタが出力制御素子として初めて直流電源に採用されて，機能改善が図られた。その後，パルスミグの開発や電源の大容量化が進められ，現在でもなお普及形の炭酸ガス・マグ溶接機として多く利用されている。80年初頭に，サイリスタよりはるかに高速制御の可能な大容量のパワートランジスタが登場し，これを利用した2次側チョップパ制御のパルス電源が開発された。

そして，82年に，一段と高速制御可能なトランジスタインバータ制御の炭酸ガス溶接機が初めて開発され，最近では，パルス・マグ溶接機，交流炭酸ガスマグ溶接機などにも適用が進んでいる。

*原稿受付 平成元年3月29日

****正 員 ㈱ダイヘン溶接機事業部 Member,
DAIHEN Co., Ltd, Welding Products
Div.

図 1(a) 消耗電極式ガスシールドアーク溶接用電源の出力制御方式の変遷

図 1(b) 非消耗電極式ガスシールドアーク溶接用電源の出力制御方式の変遷

制御素子 制御周波数	磁気 増幅器	サイリスタ	パワートランジスタ パワー MOSFET
100 Hz	点弧 位相制御	点弧 位相制御	
1,000 Hz (1 kHz)		インバータ 制御	チョッパ 制御
10,000 Hz (10 kHz)			インバータ 制御
50,000 Hz (50 kHz)			

図 2 溶接電源の制御素子と制御周波数

図 1(b) に示す非消耗電極式ガスシールドアーク溶接用の電源についても、開発の時期は異なるものの、サイリスタ制御からトランジスタチョッパ制御、インバータ制御へと変遷の経過はほぼ同じであり、適用電源の種類も、直流電源に始まって、パルスティグ電源そして交流ティグ電源、プラズマ電源へと拡大してきた。

図 2 は、溶接電源の制御素子や制御方法と、出力

の制御周波数の関係を比較したもので⁴⁾、図 1 に示した制御方法の変遷と、後述するように制御素子の制御周波数の高速化の推移とをきわめて密接な関係にあることは明らかである。

3. インバータ制御溶接電源の現状と特徴

従来のアーク溶接電源の主流であったサイリスタ制御では、商用周波数電源に直接接続した変圧器で溶接に適した電圧に降圧したあと、商用周波数に同期してサイリスタの点弧位相角を制御することで出力を調整したあと平滑用の直流リアクトルを通してアークに供給される。

これに対して、新しいインバータ制御では商用電源の交流を一旦直流に変換したあと、再び高速のスイッチング素子によるインバータによって通常 10～50 kHz 程度の高周波交流に変換する。そのあと、高周波用変圧器により降圧し、再び整流、平滑して直流を供給している²⁾。この出力を制御するインバータのパワデバイスには、制御周波数が 20 kHz 未満では、モジュール形バイポーラトランジスタ、20 kHz を越

表1 インバータ制御溶接電源の主回路方式とパワーデバイス

使用デバイス	バイポーラ	MOS FET
制御周波数	7~16KHZ	20~50KHZ
主回路方式	フルブリッジ ハーフブリッジ 2石式フォワード	フルブリッジ 2石式フォワード
素子定格の例	150A 500V ゲーリントン 200A 500V シングル	50A 450V 並列運転 10A 500V 並列運転

図3 インバータ制御交流アーク溶接電源の主回路構成

図4 各種ガスシールドアーク溶接電源の重量比較

えるものには、モジュール形、またはディスクリートのパワ MOSFET が並列に運転されており、表1に示す通り、各種のインバータ主回路方式と組合せて使用されている⁵⁾。

最近注目されているインバータ制御交流アーク溶接用電源の主回路構成は図3に示す通りで、変圧器2次側の直流リアクトルまでは直流電源と同じであるが、その後段に2次インバータを設けて再び交流に変換している。2次インバータは1次に比べて周波数が低く、通常100Hz前後であるが、極性変換の応答速度が速く矩形波交流が得られることが特徴である⁶⁾。

このように、インバータ制御の場合の基本的な特長は変圧器に印加される交流周波数が従来のサイリスタ制御に比べて数100倍となることであり、このため溶接機的主要構成部品である変圧器や2次

側の整流後の平滑用リアクトルが大幅に小形・軽量化されるとともに、出力電流の応答速度を飛躍的に速めることができる。

図4は、これまでに市販されている各種インバータ制御電源の定格電流に対する重量をサイリスタ制御電源と比較したもので、最近では100A以下の小容量には10kg前後のハンディタイプも実現している。

インバータ制御電源は、開発当初は従来機と比較した小形・軽量化など機能面を中心に技術開発が進み、制御周波数の高速化にしのぎが削られていたが、その後、各種溶接法に適した溶接性能や作業性の改善、信頼性の向上に力がそがれ、特に最近では出力の高速応答性を活用して、アーク溶接現象そのものを直接的に制御する各種波形制御方法が提案され、ほとんどの電源にその制御アルゴリズムが組み込まれている。

4. アーク溶接現象とインバータ制御電源の役割

アーク溶接におけるアーク放電現象、電極消耗や溶滴移行現象、溶融池形成現象など、いずれもかなり高速でしかも複雑な現象なために、従来これらを溶接電源の出力調整で直接的に制御することは困難とされてきた。

しかし、インバータ制御電源の出現により従来よりはるかに高速の出力制御が可能となり、目的に応じた適切な出力電流、電圧波形を得ることが比較的容易となった。

このため先に述べたような機能面の多くの改善はもちろん、溶接性能面においても著しい向上が図られ、これまでになかった新しい性能が生みだされつつある。

表2はアーク溶接の性能に関連する主な諸現象の物理的な動作時間(時定数)、もしくは固有周波数と、これに対する溶接電源の主な出力制御素子および制御方式の制御可能周波数を対比してまとめたものである⁷⁾。

溶接電源のインバータ化による出力制御の高速化に伴い、種々の現象に適した速度での高速制御が可能となり、制御対象が高速側に拡大していることが理解できる。

ガスシールドアーク溶接における最近の具体的な制御対象とその効果を挙げると、

(1) 出力電流・電圧の高精度化によるアークの高

表 2 アーク溶接現象と電源の出力制御方式

速安定化

- (2) 起動・終了時の過渡特性の改善によるアーク起動性の向上, クレータ部の処理条件の適正化
- (3) 短絡移行溶接における各種電流波形制御によるスパッタの低減
- (4) 任意周波数, 任意波形のパルス電流制御による溶滴移行の安定化やビード形状の制御
- (5) 交流波形の極性比率制御と各極性における適正電流の任意設定による, 母材溶込みと余盛量の制御などがある。

表 3 は, 上記の目的に対する従来電源の出力波形と問題点, これまでに提案され, 実用化されているインバータ制御電源の各種出力波形制御とその効果を対応してまとめた。

これらの各種波形制御法に共通した特徴は, 制御可能なパラメータが従来に比べて飛躍的に増大し, その結果, 精密な適応制御が可能となったが, 反面, 波形の選択が複雑になり適性条件の一元化 (シナジーック制御) の必要性が一層増大している。

5. 各種アーク溶接法における溶接性能の向上と自動化への適応性

アーク溶接の自動化は, ガスシールドアーク溶接法の普及とともに進展し, 特に, 最近のアーク溶接ロボットの汎用化に伴い, 半自動溶接から自動溶接への進歩が著しい。ここでは, ガスシールドアーク溶接の自動化におけるインバータ制御電源の役割と具体的成果について, ここ 1, 2 年に新しく発表されたものを中心におもなものをまとめてみた。

5.1 炭酸ガス・マグ溶接法

炭酸ガスアーク溶接を中心とした消耗電極式ガスシールドアーク溶接法は, 他の溶接法に比べて効率, コスト作業性の面で多くの利点があるが, 自動溶接に不可欠なリカエシ溶接や, 再現性の確保の面で改善すべき課題も多い。特に炭酸ガス溶接でのアーク固有の問題としては, (1) 溶接スパッタが多く, 溶接部近傍や, ノズルへの付着対策が必要, (2) アークスタートの信頼性に欠ける, (3) 高速溶接時のアーク不安定, (4) ビード外観の悪さ等が挙げられ

表3 アーク溶接電源における各種波形制御法

制御方法	〈従来の方法〉		〈最近の波形制御法〉		TIG溶接の効果	CO ₂ MAG-MIG溶接の効果
	波形	問題点	波形	問題点		
起動	内部インダクタンスで決まる 	・アーク起動の不安定	立ち上がり速度 起動電流/時間 定常電流 	・アーク起動の改善 ・起動時消耗低減	・アーク起動改善 ・起動時消耗低減	・短絡スタートの制御 (瞬時スタート実現)
終了時	アンチスティック 電圧 	・終了時の溶渣/ バーンバック	終了時電流/電圧 立ち下り速度 定常電流 	・クレータ処理	・クレータ処理 ・ワイヤ溶着/ 燃上り防止 ・アーク再起動性改善	
定常アーク	回路インダクタンスで決まる 	・短絡ピーク大 → スパッタ多 ・短絡周期の不安定	短絡ピーク電流 アーク時立ち下り速度 アーク再起動電流 立ち下り速度 立ち下り遅れ時間 短絡時 アーク時 短絡時間 	・スパッタ発生量の低減 ・アーク力の低減 ・ビード外観 (チリ)の制御 ・高速ビードの安定 形成 ・短絡周期の安定化		
パルス波形制御	パルス電流変動 パルス 立ち上り時間 立ち下り時間 ベース電流 ベース時間 高周波パルス 重量方式有 	・溶渣移行非同期 ・溶渣径大 ・非短絡時のアーク長大	・裏波が容易(低周波) ・溶込み制御(低周波) ・アーク硬直力の増加 (高周波) ・小電流の安定化 (中・高周波)	・溶渣移行改善 (パルス溶着) ・溶込みの改善 ・内部欠陥の制御 ・短絡時のスパッタ制御		
極性比率制御	サイン波 高周波重量 	・電極消耗多 ・極性効果による直流分有 (制御困難) ・高周波重量必要	EN電流値 EN時間 転流時間 EP電流値 EP時間 	・溶込み確保 ・再点弧時の高周波不要 ・電極消耗低減 (EP比率少) ・クリーニングの確保	・ワイヤ溶着量の増加 (EN比大) ・母材溶込みの制御 (ギャップ溶接向)

図5 パルスマグ溶接での電流波形制御法

図6 各種アーク溶接法のスパッタ量の比較

る。

これらの問題にたいして、先に述べた通り、溶滴の短絡移行現象を直接制御する各種方法がこれまで多く発表され、スパッタの発生量がかなり抑制できるようになった⁸⁾。また、炭酸ガス溶接に替るパルスマグ溶接でのパルス波形の適正化が図られる共に、最近では、パルス移行と短絡移行の両者の利点を生かした“パルス短絡法”が開発され、高速溶接時のアークの安定化と、スパッタの低減が一段と進んでいる⁹⁾。

図5は、パルスと同期した短絡移行の新しい電流制御法の一例を示す⁹⁾。

図7 交流炭酸ガス・マグ溶接におけるビード形状と極性比率の関係

図8 交流ティグ溶接における電極消耗の比較

図6は、従来のサイリスタ制御電源と、最近のインバータ制御の炭酸ガス・マグ溶接電源のスパッタの低減効果の例を示す⁷⁾。

アーク起動性の改善についても、インバータ制御の最大の利点である起動電流の速応性を活用して、ワイヤの先端が母材表面に短絡する瞬間に急峻な尖頭電流を通电して瞬時にアークに成長させる手法が開発され、瞬時スタート性がほぼ100%近くまで改善され¹⁰⁾、ロボットの稼働率の向上に寄与している。

高速溶接については、開先条件や、シールドガス、ワイヤの組成等その影響する要素が多いが、アーク

図9 ガスシールドアーク溶接機器の改善課題

の安定化とアーク力の制御により、従来 1m/min 程度のものが、インバータ制御電源の導入により 2m/min 程度まで高速化されている。

最近のトピックスとして、交流波形制御を消耗電極式ガスシールドアークに適用した例が発表されている^{11,12)}。この方法は、ワイヤの溶融量と母材の溶融量が、極性によって異なる点に注目して、インバータ制御の高速極性反転性を活用して従来困難とされていた交流アーク安定性を確保し、同時に極性比率を任意に設定できるものである。図7は、この極性比率とビード形状の関係を示すもので¹¹⁾、薄板の溶接や、開先がキップの大きい場合に効果が認められ、今後のセンサ機能と結合した適応制御が検討課題となっている。

5.2 ティグ・プラズマ溶接法

ティグ溶接、プラズマ溶接法は、特に溶接性能の面で良好であり、非鉄材料、特殊材料の溶接の自動化に有効であるが、(1)消耗電極式に比べて溶接速度が遅い、(2)くりかえし、連続溶接における電極の消耗による再現性の不足、(3)高周波起動による周辺装置への影響などが改善点として指摘されている。

溶接能率の改善策としては、高周波パルスの適用によってアークの硬直性を増加する方法がすでに実用されているが¹¹⁾、自動化に不可欠な溶加ワイヤの加熱電流をアーク電流と同期させて制御する方法も開発されている¹³⁾。

アルミニウム合金などの交流ティグ、プラズマ溶

接には、ダブルインバータ制御電源の適応が急速に進んでおり^{13,14)}、最近では電極の消耗防止や起動性の向上のため、トリア入りタングステンに替る、セリア、ランタナ入りタングステン電極との組合せによる効果が検討されている¹⁵⁾。

図8は、従来電源のサイン波交流と、インバータ制御による非平衡矩形波交流による電極消耗の低減効果の例を示す¹³⁾。

また、ダブルインバータ制御による矩形波交流では、再点弧時の高周波重畳が不要となるため、コンピュータ処理や、周辺制御装置への電波障害を低減できる大きな利点がある。

6. 今後の課題

アーク溶接電源のインバータ化に伴い、これまで述べた通り、溶接の自動化の障害となってきた機能・性能面の問題点の大幅な改善が図られ、その適応性が拡大してきた。

アーク溶接ロボットと組合わせて使用される専用溶接電源については、ロボットとのインターフェースを内蔵し、ロボットからの各種指令信号を直接電源に取りこんで出力制御できるものや、アークロボットの適応性の拡大のため必要なセンサーの1つであるアークセンサ機能に適合した溶接特性についても配慮されたものが開発されている¹⁶⁾。

図9に、ガスシールドアーク溶接の自動化、ロ

ボット化を進めるうえで溶接機器、とくに溶接電源の今後の改善課題をまとめた⁷⁾。

性能面では、なお一層の溶接現象の解明による新しい制御方法の開発が期待され、センサ技術の発展と相まって、溶接結果のフィードバックによるオンライン制御の体系的研究が必要である。

機能面では、電源の波形制御のデジタル化など、急速に進歩しつつある周辺のコンピュータ機器やアーク溶接ロボットとの結合性を改善しなければならない。

さらに、溶接管理の面では、溶接条件のデータベース化や AI 化に対応できる機能の向上などが挙げられ、なお新たな課題が多く残されている。

参 考 文 献

- 1) 坂部, 鹿島, 三田, 荒谷: インバータ制御アーク溶接機, 溶接学会誌, Vol.55 (1986), No.7, P.419~428
- 2) 山本: 最近のアーク溶接機器, 溶接技術, Vol.57 (1988), No.5, P.56~62
- 3) H. Yamamoto, Y. Nishida, S. Uegri: Trends and Problems of Arc Welding Power Sources in Japan IIW Doc. XII-960-1986
- 4) 山本, 長坂: 溶接電源の効果的選択, 溶接技術, Vol.54 (1985), No.2, P.19~27
- 5) 新田, 天野: 高周波スイッチングデバイス応用電源システムの動向(溶接機器用電源), 昭和 63 年, 電気学会全国大会講演論文集, 第 5 分冊(1988), PS-6-17~20
- 6) 長坂, 寺山, 山本: インバータ溶接機の進歩, 溶接技術, Vol.56 (1987), No.2, P.52~59
- 7) 山本: 最近のガスシールドアーク溶接方法と溶接機器の現状, 溶接学会, 溶接法研究委員会資料, SW-1866-88, アーク物理研究委員会, 88-685 (1988)
- 8) 三田, 坂部, 品田: 波形制御 CO₂ アーク溶接, 溶接学会, アーク物理研究委員会, 87-643 (1987)
- 9) 山本, 原田, 安田: インバータ制御パルスマグ溶接機の新電流波形制御と高速溶接におけるスパッタの低減, 溶接技術, Vol.58 (1989), No.2, P.67~76
- 10) 中山, 原田: 炭酸ガス・マグ溶接電源の実践的選び方, 溶接技術, Vol.57 (1988), No.2, P.60~65
- 11) 丸山, 岡田, 本間: 極性比率制御 GMA 溶接電源について, 溶接学会, 溶接法研究委員会資料, SW-1868-88 (1988)
- 12) 西田, 谷本, 美濃岡: 交流パルス MAG 溶接の開発, 溶接学会, 溶接法研究委員会資料, SW-1870-88 (1988)
- 13) 三田, 田桑: 最近のティグ溶接機器について, 溶接学会, 溶接法研究委員会資料, SW-1867-88 (1988)
- 14) 藤山: アルミニウムの交流プラズマ溶接, 溶接技術, Vol.56 (1987), No.11, P.60~64
- 15) 日向, 安田, 井川, 恩沢: 交流ティグ溶接におよぼす電極材質の影響, 軽金属溶接, Vol.26 (1988), No.12, P.553~560
- 16) 村上, 清原, 原田: 最近のアーク溶接ロボットとロボット専用電源, 溶接技術, Vol.57 (1988), No.12, P.63~72

溶接に関する国際行事の御案内 (1989)

会 議 名	日 時	開 催 地	会議用語	主 催 (連 絡 先)
VIII Latin-American Welding Congress	NOVEMBER	Buenos Ayres ARGENTINA	Portuguese Spanish	Instituto Argentino de Siderurgia-C.M. della Paolera 226-(1104) Buenos Aires-ARGENTINA
XV Congreso Brasileiro de Soldadura	NOVEMBER	? BRASIL	English Portuguese	Asoc. Bras. Soldagem Rua Fiacao da Saude, 18-AptO. 102 CEP 04144-V. da Saude San Pablo-SP-BRASIL
VII General Assembly CENIM	1989	Madrid SPAIN	English French Spanish	C.E.N.I.M.-Av. da Gregorio del Amo 8-28040 Madrid-SPAIN

(70頁へつづく)