

溶接時の負荷条件における三相インターリーブ 降圧コンバータ制御応答の実機評価

三浦 克樹*, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)
橋本 裕志 (株式会社神戸製鋼所)

Experimental Evaluation of Three-phase Interleaved Buck Converter on Control Response for Welding Machine
Katsuki Miura, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)
Hiroshi Hashimoto (Kobe Steel, Ltd.)

1. まえがき

溶接品質の向上を目的として、アーク溶接電源の高速応答化が要求されている(1)。多相インターリーブ降圧コンバータは単相(2アーム)降圧コンバータに比べて等価スイッチング周波数が高くできるため、制御応答が向上することが一般的に知られている。しかし、多相インターリーブはインダクタが並列になるため、等価的にインダクタンスが減少し、外乱抑圧特性が悪化する。これは溶接電源のように外乱の影響が極めて大きい場合、憂慮する問題となる。そこで本論文では、溶接時の負荷を模擬した条件下において電流外乱応答を比較し、単相コンバータに比べてインターリーブ降圧コンバータが外乱応答の点でも優位であることを確認したので報告する。

2. 回路構成と動作原理

<2・1>回路構成 図1に三相インターリーブ降圧コンバータの回路図を示す。溶接機用電源として用いるため、出力段に平滑コンデンサをもたない。各相のインダクタ電流の位相は 120° ずれるため、出力電流 I_{load} のリプルは相殺され、単相よりも出力電流リプルが低減される。

<2・2>制御方法 図2に制御ブロック図を示す。インターリーブ降圧コンバータでは各相のインダクタ電流を制御する個別電流制御と、負荷電流を制御する一括電流制御があるが、本論文では制御機でのむだ時間を少なくできる一括電流制御を用いる。 120° 移相した3つのキャリア三角波のいずれかがピークになった時点で各相のインダクタ電流をサンプル&ホールドし、それらを加算することで負荷電流を算出する。これにより得られた負荷電流と電流指令値との差分をPI制御器に入力し操作量を得る。操作量は次のキャリア三角波のピークで更新され、キャリア三角波との比較によってPWM信号を得る。

<2・3>ゲイン設計 本論文では、単相とインターリーブ回路に対する共通のPI制御器のゲイン設計指針として、アーク炉の分野で比較的多く用いられているベトラーク調整を用いる(2)。(1)式にPI制御器の伝達関数とベトラーク調

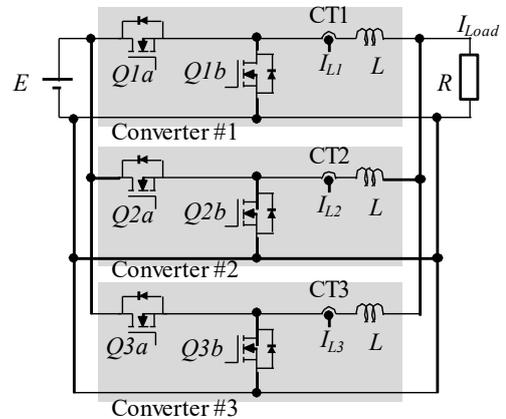


Fig. 1. Interleaved buck converter circuit.

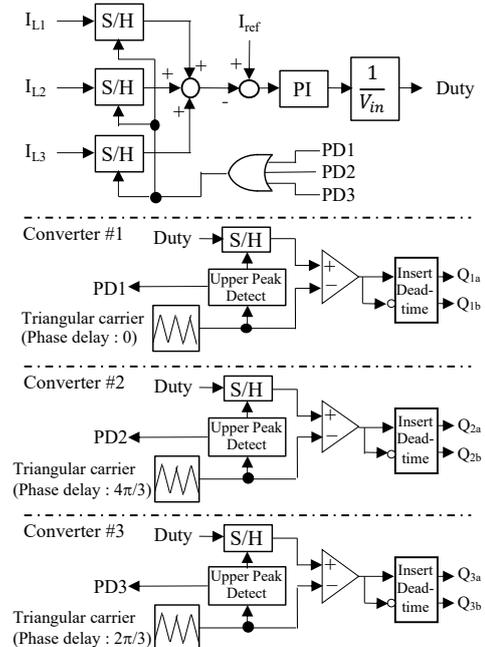


Fig. 2. Block diagram of interleaved buck converter.

整に基づくパラメータを示す⁽³⁾。

$$G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \dots\dots (1)$$

ここで, $T_i = \frac{L_e}{R_e}$ $K_p = \frac{L_e}{2\delta}$

ここで R_e は制御器から見た等価負荷抵抗値, L_e は制御器から見た等価出力インダクタンス, δ は制御器から見たむだ時間である。むだ時間 δ は電流サンプル&ホールドしてから電圧出力の中間時点までの時間である。

図3に単相コンバータとインターリーブ降圧コンバータの制御タイミングチャートを示す。(a)単相コンバータの場合, むだ時間はサンプリング周期 T_s と PWM 遅延 $T_s/2$ の和になり $\delta = (3/2)T_s$ とみなせる。一方で(b)に示すインターリーブ降圧コンバータの場合, むだ時間はサンプリング周期 $T_s/3$ と PWM 遅延時間の $T_s/2$ の和 $\delta = (5/6)T_s$ とみなせ, 単相に比べて短縮される。また, 電流一括制御の場合は制御器から見た等価出力インダクタンスは実際のインダクタンスの $1/3$ になる。このため, 積分時間 T_i は単相よりも小さくなる。

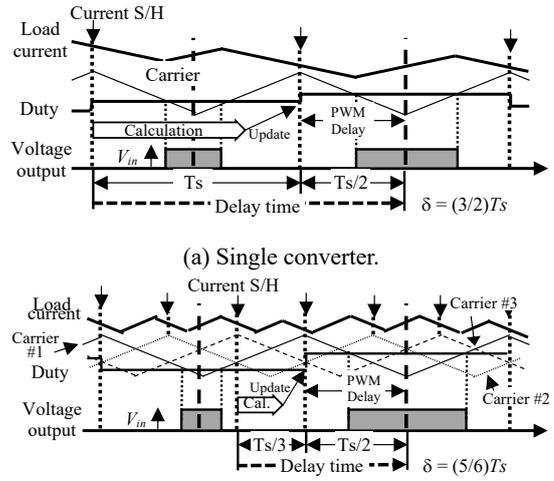
3. 電流応答評価

<3・1>実験条件 表1に主回路および制御器のパラメータを示す。溶接時において, アーク発生時には負荷は短絡状態から定常状態に瞬時に変化する。そこで本論文では負荷抵抗を $0.1\Omega \rightarrow 0.01\Omega$ (短絡状態) $\rightarrow 0.1\Omega$ とステップ変化させ電流応答を比較する。負荷抵抗の切り替えには IGBT を用い, 制御器にて切り替え指令を出力する。

<3・2>実験結果 図3に抵抗負荷をステップ変化したときの単相コンバータと三相インターリーブ降圧コンバータの電流波形を示す。なお電流指令は $100A$ である。負荷切替時のオーバシュート(アンダーシュート)は単相コンバータの方が小さい。これは, 一括電流制御では等価出力インダクタンスが単相コンバータの $1/3$ になるため, 外乱の影響を受けやすいためである。一方で指令値への静定時間はインターリーブ降圧コンバータの方が速い。これは一括電流制御ではむだ時間が単相より短いことと, 等価出力インダクタンスを $1/3$ とみなすことで積分時間を短くできるためである。

4. まとめ

本論文では, 溶接時の負荷変動を想定し, 単相コンバータとインターリーブ降圧コンバータの電流応答の比較を行った。一括電流制御を行っているインターリーブ降圧コンバータでは, 制御器から見た等価出力インダクタンスが単相コンバータの $1/3$ とみなせる。これにより, 同一の設計指針に基づいて制御ゲインを決定したときに PI の時定数を小さく設定できるため単相コンバータに比べて電流応答が向上する。今後は溶接試験による比較を予定している。

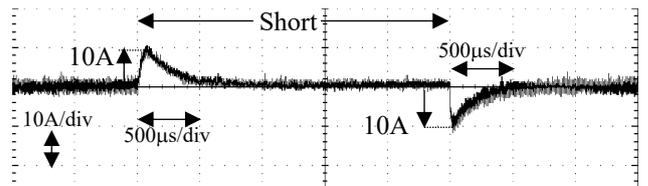


(a) Single converter.
(b) 3-phase interleave converter.

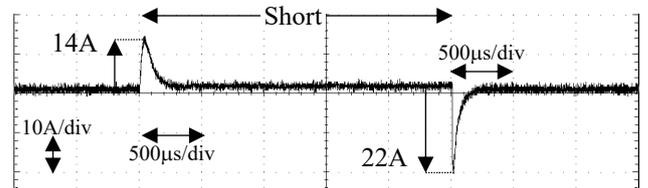
Fig. 3. Timing chart.

Table 1. System parameters.

| Circuit Parameters | | |
|---|---------------------|--------------|
| V_{in} | Input Voltage | 70 V |
| Switching Device (SiC-MOSFET) | | C3M0016120D |
| f_{sw} | Switching Frequency | 100 kHz |
| T_d | Dead Time | 250 ns |
| L | Output Inductor | 20 μ H |
| PI Gains (3-phase Interleave converter) | | |
| K_p | Proportional Gain | 0.400 |
| T_i | Integral Time | 66.7 μ s |
| PI Gains (Single Converter) | | |
| K_p | Proportional Gain | 0.667 |
| T_i | Integral Time | 200 μ s |



(a) Single converter.



(b) 3-phase interleave buck converter.

文献

- (1) 上山: 「総説 溶接電源」溶接学会誌, Vol.77, No.2 pp.27-32 (2008)
- (2) 仲井: 「アーク炉の電流制御装置」特開平 8-273227 (1996)
- (3) K. J. Åström, "Advances in PID Control", The Instrumentation, Systems, and Automation Society, pp.198-199 (2005)