

IGBT 並列接続における接続導体設計と電流バランスの関係についての考察

STUDY FOR RELATIONSHIP BETWEEN THE DESIGN OF BUS BARS AND THE BALANCE OF CURRENTS IN IGBTs CONNECTED IN PARALLEL

今野純也^{A)}, 富永勇^{A)}, 長谷川智広^{A)}, 山崎長治^{#, A)}

Junya Konno^{A)}, Isamu Tominaga^{A)}, Chihiro Hasegawa^{A)}, Choji Yamazaki^{#, A)}

^{A)} Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation

Abstract

In designing a large capacity power supply, there are cases that power semiconductors must be connected in parallel. There are cases that they are connected in parallel directly or they are connected in parallel as an inverter circuit. It is often better to connect directly in parallel in terms of cost and size. In that case, imbalance may occur in the current depending on the arrangement on the structure. Therefore, it is important to equalize the current in order to make the best use of power semiconductors. The current of each IGBT can be equalized by optimally designing conductors to connect them in parallel.

1. はじめに

大容量の電力変換装置では、パワー半導体を並列に接続した構成で用いることがある。このとき、パワー半導体を直接並列に接続する構成とインバータ回路として並列に接続する構成とがあるが、コストや寸法等の観点において直接並列に接続する構成の方が有利になる場合が多い。一方で、その構成においては構造的な配置や接続だけで電流アンバランスが発生することがあり、各パワー半導体に流れる電流が均等になるようにすることがパワー半導体を最大限に活かす上で重要である。

本論文では IGBT を直接並列接続した構成の単相フルブリッジインバータ回路を対象に磁場解析と試験を行った結果から、各 IGBT に流れる電流のバランスと並列接続導体の形状との関係について、出力周波数をパラメータにして検討したので報告する。

2. 対象回路と電流バランス

Figure 1 は IGBT を直接並列に接続した単相フルブリッジインバータ回路であり、直流入力 (DC input)、直流コンデンサ、入力側導体 (Bus PN)、IGBT (U 相: U1~U4 および V 相: V1~V4)、出力側導体 (Bus U および Bus V)、負荷 (Load) によって構成されている。

入力側・出力側導体のいずれも電流アンバランスが生じないように設計することが理想的である。しかし入力側導体はサージ電圧抑制のために低インダクタンスであることが求められることが多く、電流バランスまでを考慮した設計をすることは難しい場合がある。したがって比較的設計自由度の高い出力側導体で電流アンバランスを低減することができることが望ましい。次節以降では出力側導体の電流バランスへの影響について磁場解析と試験により検討する。

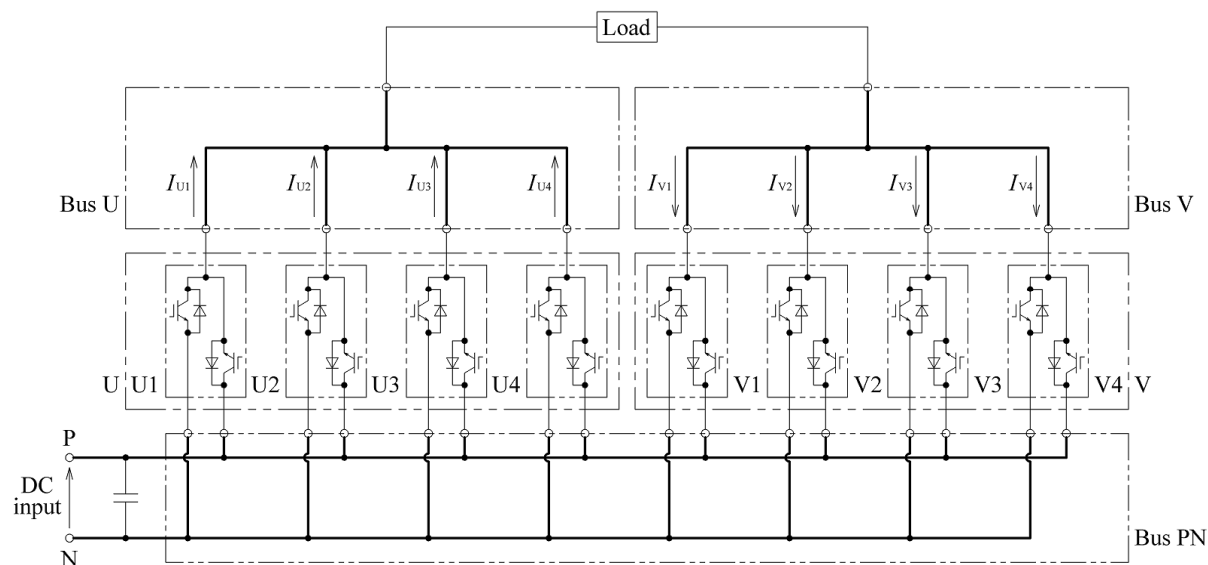


Figure 1: Single-phase full-bridge inverter circuit using 8 IGBTs (2 in 1).

YAMAZAKI.choji@tmeic.co.jp

3. 磁場解析による電流アンバランスの評価

出力側導体として Figure 2 に示した 2 種類の形状を想定し、それらに電流を流した時の電流バランスを、有限要素法解析システム “Femtet ®”を用いて解析した。Bus A は各電流経路の長さがおよそ一定となるように、Bus B は所定の方向に並べられた IGBT 素子のうちの内側に配置されたものほど電流経路が長くなるように設計されている。また、電流アンバランスは下式のように、平均値に対する相対値にて評価する。

$$\%I_{Un} = \frac{I_{Un}}{(I_{U1} + I_{U2} + I_{U3} + I_{U4})/4} - 1 \quad [\%] \quad (1)$$

Figure 3(a), (b)はそれぞれ Bus A, Bus B に電流を流したときの電流バランスを磁場解析により求めたものである。静磁界の場合の電流のアンバランスは、-0.08% ~ +0.1% (Bus A)、-7.6% ~ 7.3% (Bus B)であった。50Hz の場合の電流アンバランスは-1.3% ~ +1.8% (Bus A)、-7.3% ~ +7.9% (Bus B)であった。周波数 50Hz より大きい場合の電流アンバランスは最大で+46% (Bus A, 50000Hz)、+23% (Bus B, 5000Hz)であった。この結果から Bus A に対して Bus B は、外側に配置された IGBT (U1, V4) に流れる電流が大きく、内側に配置された IGBT (U4, V1) に流れる電流が小さくなるという違いがあり、その影響は周波数が高いときに顕著である。

また、電流アンバランスの要因を絞り込むため、Bus A、Bus B のインピーダンスの周波数特性を同解析により求めた (Figure 4)。このとき、各径路のインピーダンスの実部と虚部のどちらが支配的であるかを確認できればよいため、4 並列合算のインピーダンスについて解析を行った。

周波数が低い領域では、インピーダンスの実部すな

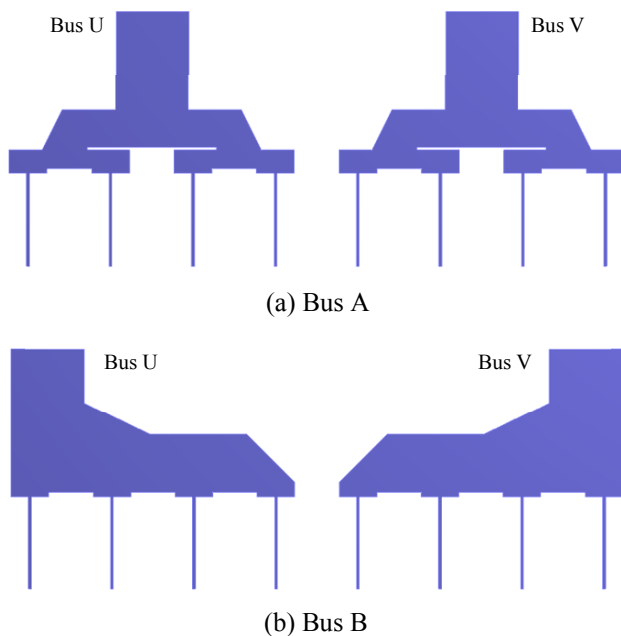
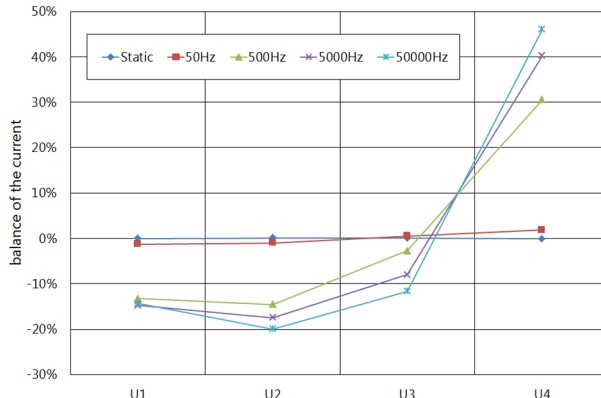
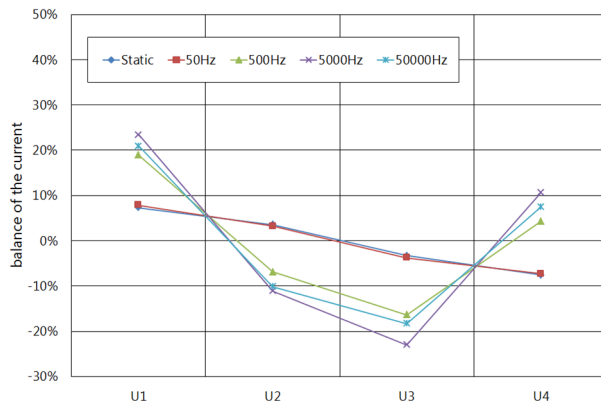


Figure 2: The Shape and disposition of bus bars.

わち抵抗成分が大きいのか、実部と虚部が同程度である。したがって各径路の長さが等しくなるようにすることでインピーダンスの差を小さくすることができる。周波数が高い領域ではインピーダンスの虚部すなわちインダクタンス成分が支配的となるため電流の経路長 (抵抗値) よりも相互インダクタンスを考慮し、導体形状を設計する必要がある。



(a) Case of Bus A



(b) Case of Bus B

Figure 3: Simulation results of the balance.

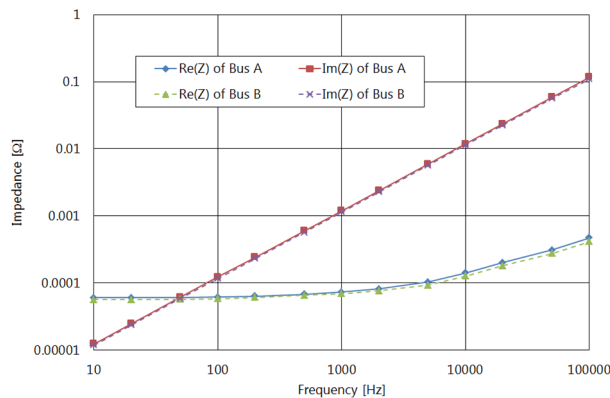


Figure 4: Simulation result of the impedance of bus bars.

4. 試験結果

Figure 5 は Figure 1 の回路構成において出力側導体として Figure 2(a), (b)の 2 種類の形状の導体を用いて試験を行った結果である。まず出力を直流とした場合では、いずれの導体を用いたときも電流のアンバランスはほとんど生じなかった。次にインダクタンス成分の影響を調べるため、ステップ状の電圧を出力して出力側導体に流れる電流を測定した。このときの電流アンバランスは Bus A を用いたときに $-16\% \sim +26\%$ 、Bus B を用いたときに $-8.2\% \sim +17\%$ であった。

インダクタンスの影響があるとき、Bus A から Bus B に変更することで各アーム4並列に接続された IGBT 素子のうち、外側 (U1, V4) に流れる電流が大きく、内側 (U4 V1) に流れる電流が小さくなることが確認できた。すなわち、並列接続導体の設計により、並列 IGBT 間の電流アンバランスの改善ができることが示された。

解析結果と試験結果はその傾向に差があるが、これは出力側導体に限定して解析を行ったためであると考えられる。今後は入力側導体などの影響も評価することで、より最適な形状を迫る。

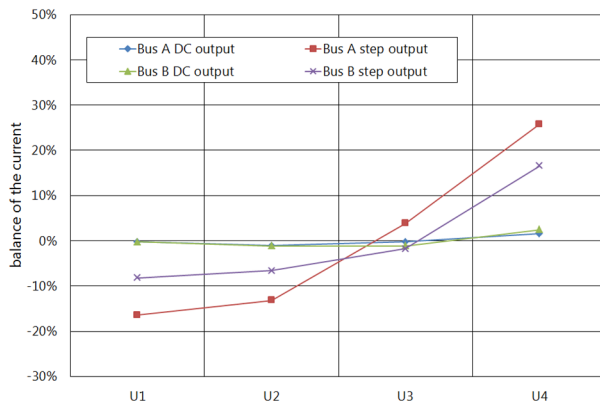


Figure 5: Experimental result.

5. まとめ

IGBT を直接並列接続した構成の単相フルブリッジインバータ回路において、各 IGBT に流れる電流のバランスと導体形状との関係を、出力周波数をパラメータにして評価した。直流出力・低周波出力の場合は導体の抵抗成分の影響が大きく、各電流経路の長さが一定となるよう導体を設計すればよい。周波数が高くなる場合は導体のインダクタンス成分が支配的となるため、各電流経路の相互インダクタンスを考慮した設計をする必要がある。

本論文では、並列接続導体の形状は2種類だけであったが、今後さらに最適な形状を迫っていく。