

軽負荷時の動作モード切り替え時における Dual Active Bridge コンバータの過渡電流応答改善

河内 謙吾*, 比嘉 隼, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Improvement of Transient Current Response for Dual Active Bridge Converter at Changing Operating Mode at Light Load
Kengo Kawauchi, Hayato Higa, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

デュアルアクティブブリッジ(DAB)コンバータは軽負荷領域において、デッドタイムによりインバータ出力電圧に極性反転現象が発生し、伝送電力に誤差が生じる問題がある⁽¹⁾。そこで、筆者らはゼロ電圧を含んだ3レベル駆動により電力誤差を低減する方法を提案している⁽²⁾。しかし、2レベル駆動と3レベル駆動の切り替え時に直流偏差が発生し、電流ピーク値が増加する問題がある。従来の2レベル駆動では負荷変動時の直流偏差抑制法として位相シフト量の更新を基準キャリアの山と谷で行う方法が提案されているが、3レベル駆動から2レベル駆動への切り替え時にそのまま適用すると、励磁電流に直流偏差が発生する問題がある⁽³⁾。

そこで、本論文では過渡時の励磁電流を理論式より推定することで、励磁電流の検出なしに励磁電流の直流偏差を抑制する手法を提案する。文献(3)の直流偏差抑制法に加えて、次のキャリア周期にゼロ電圧期間を挿入することで、動作モード切替時におけるインダクタ電流および励磁電流の直流偏差を抑制できる。提案法の有効性をシミュレーションにより確認したので報告する。

2. 回路構成および直流偏差抑制方法

図1にDABコンバータの回路図を示す。1次側、2次側のインバータは方形波もしくはゼロ電圧期間を含む3レベルの電圧を出力する。

図2に2レベルモードと3レベルモードの動作波形を示す。図2(a)は2レベル動作波形であり、1次側と2次側のインバータ出力電圧の位相差 δ により電力が伝送される。図2(b)は、3レベル動作波形であり、1次側と2次側のインバータ出力電圧 v_{pr} , v_{se} のゼロ電圧期間 ε および γ を制御することにより、電力を伝送する。このモードでは、デッドタイム中にインダクタ電流がゼロになることで生じる極性反転現象による電力誤差を補償する⁽²⁾。なお、極性反転現象の影響回避のため $\varepsilon=\gamma$ として駆動させ、制御変数低減のため3レベルモードの際は位相差 $\delta=\pi/4$ rad とする。

図3に従来法および提案法の3レベルから2レベルにモード変更する際のインバータ出力電圧と各キャリアおよび各スイッチの関係図を示す。各キャリアは、基準キャリアの山と谷で2回に分けて位相シフト量の更新を行うことで、位相シフト指令値の変更前後のインバータ出力電圧の電圧時間積を小さくできるため、インダクタ電流の直流偏差を抑制する。

しかし、3レベル電圧波形から方形波に切り替えた前後で電圧時間積がゼロとならず、励磁電流に直流偏差が発生する。そこで、提案法は次のステップにゼロ電圧期間を挿入することで、励磁電流の増加を抑制し、直流偏差を抑制できる。

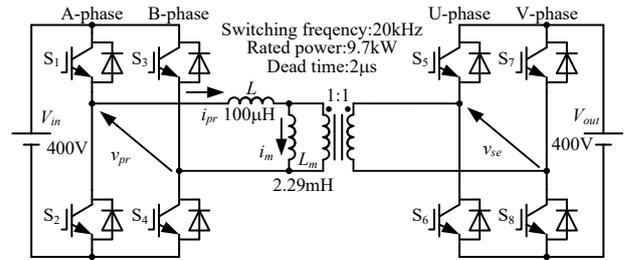


Fig. 1. Dual active bridge converter.

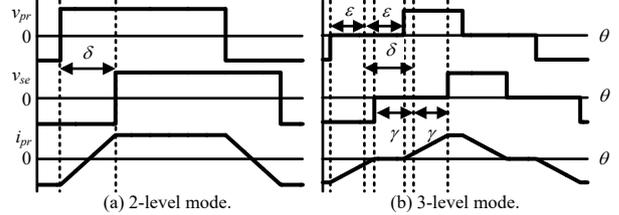


Fig. 2. Operation modes.

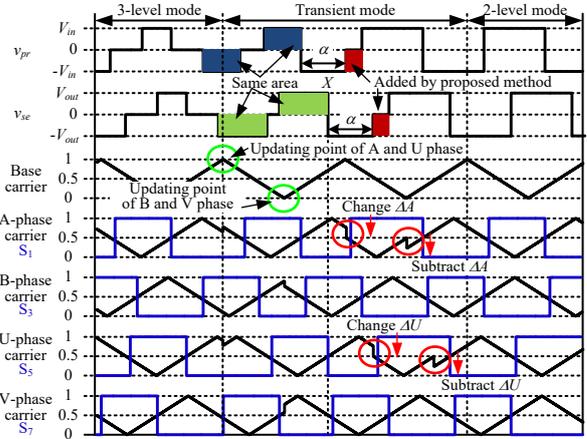


Fig. 3. Relationship between each inverter output voltage and phase shift carriers of proposed method.

図4に提案法における各相の位相シフト量を決定するフローチャートを示す。図4に示すように、モード変更は基準キャリアの山から開始する。これは、ゼロ電圧期間を挿入し、過渡時のインダクタ電流の直流偏差を抑制するためである。谷から開始すると、3レベル期間中にゼロ電圧期間が挿入され、変換前後の電圧時間積を小さくできないため、インダクタ電流に直流偏差が発生する。

次に、過渡時の励磁電流が2レベルのピーク値となるときに2次側インバータ出力電圧にゼロ電圧期間を挿入する。しかし、励磁電流の検出は不可能なため、理論式より2レベルのピークタイミングを推定する。3レベル駆動時における励磁電流のピーク値を初期値とすると、過渡時の励磁電流 i_{m_tran} は(1)式で表される。

$$i_{m_tran} = -\frac{V_{out}}{\omega L_m} \theta + \frac{V_{out}}{2\omega L_m} (\pi - 2\gamma) \quad (1)$$

また、2 レベル励磁電流のピーク値 i_{m_2Lv} は(2)式で表される。

$$i_{m_2Lv} = -\frac{V_{out}}{2\omega L_m} \pi \quad (2)$$

(1), (2)式より図3の S_7 がオンするタイミング X を基準とした過渡励磁電流 i_{m_tran} が2 レベルピーク値となる位相 α は(3)式で表される。

$$\alpha = \pi - \gamma \quad (3)$$

よって推定ピークタイミングは、 α をキャリアカウントに換算し、基準キャリアのカウントと同期して減少させることで求められる。カウンタがゼロとなったとき、U相のキャリア値を0.5に変化させ S_5 をオンすることで2次側インバータ出力電圧にゼロ電圧期間を挿入できる。よって、過渡時の励磁電流 i_{m_tran} が2 レベルピーク値のタイミングでゼロ電圧期間が入るため、励磁電流の増加を抑制できる。

また、このときのキャリア値の操作量 ΔU は、キャリアの現在値を U とすると(4)式で表される。

$$\Delta U = U - 0.5 \quad (4)$$

この方法は2 レベルのピーク値でゼロ電圧期間を入れるため、次に2 レベルの電圧を印加すれば励磁電流は定常状態となるが、キャリアの値を操作したことにより、 S_5 のターンオフが早まるため、方形波電圧とならず励磁電流に直流偏差が発生する。そこで、次にU相キャリアがピーク値の半分となったときに、ターンオン時のキャリア操作量 ΔU を引くことで位相シフト量を指令通りに操作する。このとき S_5 がキャリア操作前のタイミングでオフできるため、デューティ0.5の方形波電圧を励磁インダクタに印加できる。

また、2次側にゼロ電圧期間を挿入したため、1次側、2次側インバータ出力電圧間の位相差が指令値と異なるので、インダクタ電流に直流偏差を招く。そこで、1次側インバータ出力電圧にも同様に2次側に追加した期間分ゼロ電圧期間を挿入することで、インダクタ電流および励磁電流の直流偏差を抑制できる。

3. シミュレーション結果

提案する動作モード切替法の効果を確認するために、図1に記載したパラメータを用いてシミュレーションにより従来法と比較した。なお、今回の動作モード切り替えは、電力指令を0.33p.u.から1p.u.に変化させている。

図5に従来法を用いた動作モード切替時の動作波形を示す。図5より、インダクタ電流に直流偏差は生じていないが、励磁電流には直流偏差が重畳し、ピーク値が-3.39Aとなっている。

図6に提案する過渡電流抑制法の動作波形を示す。図6より、切替時の電流値が定常値以下であるため、インダクタ電流に直流偏差が発生しないことがわかる。励磁電流は提案法を適用することにより、ピーク値が-2.43Aとなっている。このピーク値は、原理上インダクタ電流の直流偏差抑制後に生じるが、提案法を適用することにより、励磁電流のピーク値を30%に抑制し、2周期で定常状態に安定することを確認した。

4. まとめ

本論文では、軽負荷時のDABコンバータの3レベルと2

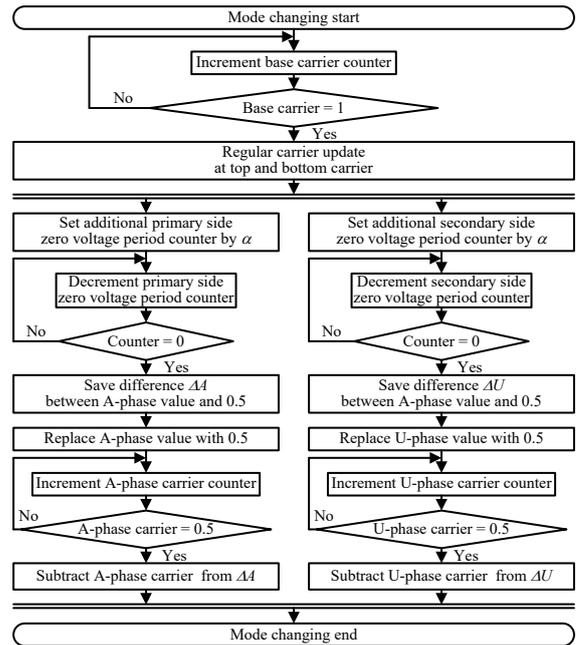


Fig. 4. Flowchart of mode changing.

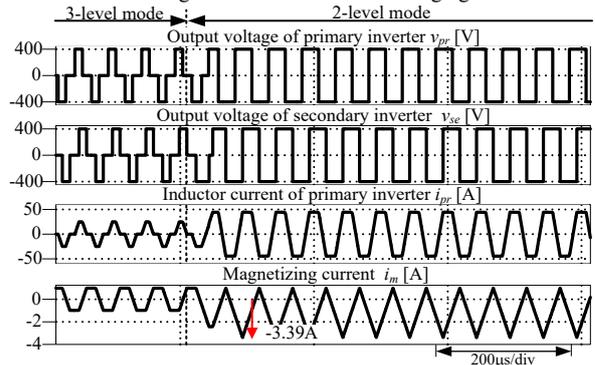


Fig. 5. Transient response with conventional method.

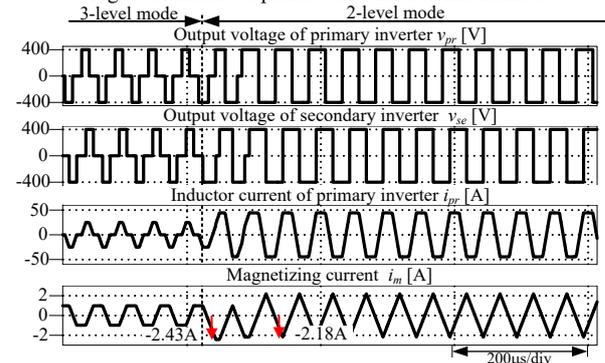


Fig. 6. Transient response with proposed method.

レベルの動作モード切り替え時において、インダクタ電流および励磁電流の直流偏差の抑制を検討した。過渡時の励磁電流が2 レベルの励磁電流のピーク値となるタイミングを理論的に導出し、各インバータ出力電圧にゼロ電圧期間を挿入することにより、励磁電流の検出なしに直流偏差の抑制を達成した。今後の予定は提案法を実機にて検証する。

文献

- (1) B. Zhao, et al: IEEE Trans. PELS, Vol.29, No.4, (2014)
- (2)河内, 比嘉, 伊東:平成29年度電気関係学会新潟支所(2017)
- (3) 比嘉, 伊東:平成29年度電気学会全国大会(2017)