

3 レベル動作による電流不連続モードを用いた Dual Active Bridge コンバータの電力誤差補償の基礎検討

◎河内 謙吾 比嘉 隼 伊東 淳一

長岡技術科学大学 電気電子情報工学専攻

{k_kawauchi@stn|hhiga@stn|itoh@vos}.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

近年、電気自動車や蓄電システムの普及により Dual Active Bridge (DAB) コンバータが注目されている⁽¹⁾。DAB コンバータは電力およびパワーフローをトランスの入出力電圧の位相差のみで制御できる。また、ゼロ電圧スイッチングが達成できることから高効率化の観点で有利である。しかし、インバータ電圧の位相差が小さい軽負荷時において、デッドタイムによりインバータ出力電圧に中点クランプが発生し、伝送電力に誤差が発生する⁽²⁾。

本論文では、インバータのレグ間の位相差を変えることでゼロ電圧を含んだ3レベル電圧波形を用い、デッドタイムによる電力誤差を低減する手法を提案する。提案手法では、インダクタ電流波形に電流不連続モード(以下、DCM)⁽¹⁾を適用することで中点クランプを避けることができるため、伝送電力の誤差を低減できる。シミュレーション結果により軽負荷領域の電力誤差を最大0.34%まで低減できたので報告する。

2. 回路構成および動作原理

図1にDABコンバータの回路図を示す。一次側と二次側のインバータからは方形波もしくはゼロ電圧を含んだ3レベルの電圧を出力する。

図2に方形波電圧出力時における動作波形を示す。デッドタイムがない場合はインダクタ電流が台形波となりインバータ出力電圧の位相差 δ によって出力電力を制御できる⁽²⁾。一方、デッドタイムがある場合、デッドタイム期間中にインダクタ電流がゼロになると中点クランプが発生するため、理論的な値に対して電力に誤差が発生する。

図3にゼロ電圧を含む3レベル電圧波形出力時の動作波形を示す。図3(a)からデッドタイムがない場合は各インバータのゼロ電圧期間を一致させることでインダクタ電流がDCMとなっている。しかし、図3(b)のようにデッドタイムがある場合は電流ゼロ付近でスイッチングするインバータのゼロ電圧期間にデッドタイム分の誤差が発生する。ゼロ電圧期間にゼロ電圧期間分の補償が必要である。

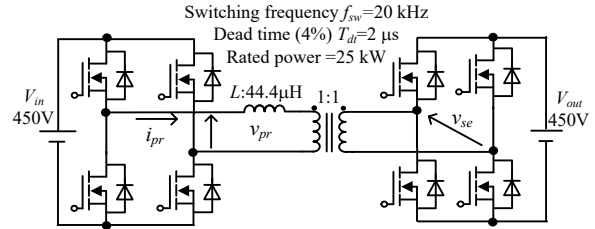
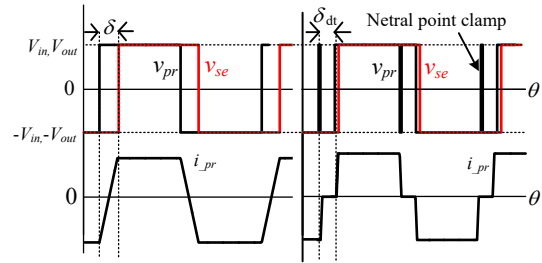
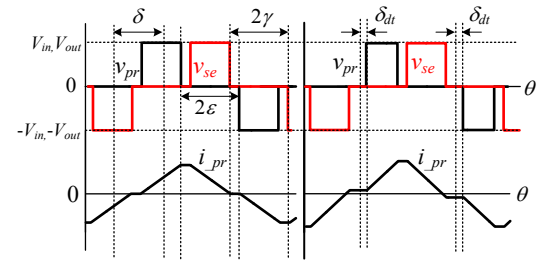


Fig. 1. Dual active bridge converter.



(a) Without deadtime. (b) With deadtime.
Fig. 2. Operation waveform with 2-level operation.



(a) Without deadtime. (b) With deadtime.
Fig. 3. Operation waveform with 3-level operation.

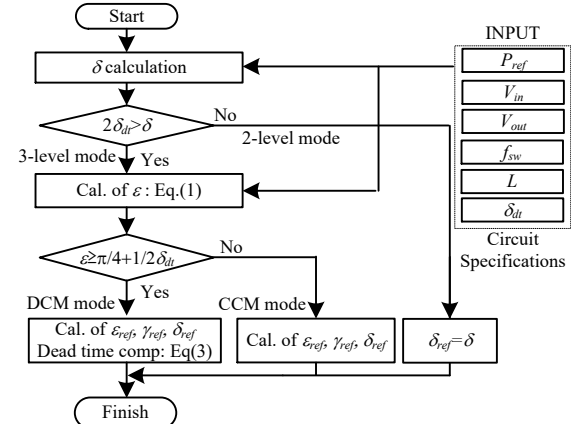


Fig. 4. Flowchart of determination of operation mode.

図4に各動作モードを決定するためのフローチャートを示す。なお、この条件は入出力電圧が一致していると仮定している。まず、電力指令 P_{ref}

から必要な位相差 δ を位相差と電力の関係式⁽¹⁾から導出する。計算した位相差 δ とデッドタイム δ_{dt} の関係が $\delta > 2\delta_{dt}$ の場合に2レベル動作, $\delta \leq 2\delta_{dt}$ では3レベル動作を使用する。計算した位相差 δ を位相差指令 δ_{ref} とすることで電力指令通りに動作可能である。一方, 3レベル動作となった場合, 使用する電流モードを決めるために, DCMにおける電力指令 P_{ref} を出力するために必要なゼロ電圧期間 ε を(1)式から計算する。

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\pi - \sqrt{2\pi\omega L P_{ref} / V_{in}^2} \right) \quad (1)$$

なお, 3レベルDCMでは, 位相差 δ は伝送電力に寄与しないため, 各インバータのゼロ電圧期間のみで電力が決まる。(1)式により計算したゼロ電圧期間により, 使用する電流モードを決定する条件を(2)式に示す。

$$\varepsilon > \pi/4 + 1/2\delta_{dt} \quad (2)$$

(2)式が成立する場合はDCM, 成立しない場合は3レベル電流連続モード(CCM)を使用する。なお, CCMのスイッチングパターン導出については今後の課題とする。DCMを使用する場合, 電流ゼロ付近でスイッチングするインバータのゼロ電圧期間にデッドタイム分の誤差が発生するため, 補償する必要がある。デッドタイムの影響を考慮したゼロ電圧期間 $\varepsilon_{ref}, \gamma_{ref}$ および位相差指令 δ_{ref} を(3)式に示す。

$$\begin{aligned} \delta_{ref} &= \pi/4 + \delta_{dt} \\ \varepsilon_{ref} &= \varepsilon - \delta_{dt}/2 \\ \gamma_{ref} &= \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

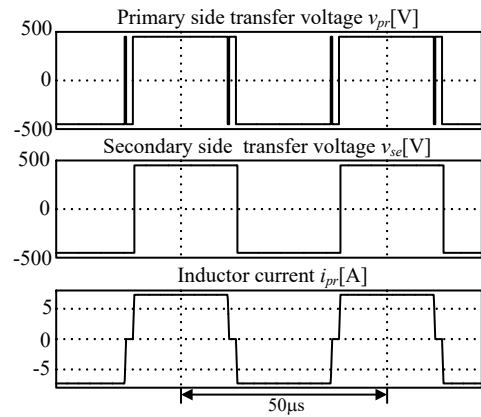
なお, ゼロ電圧期間のみ補償すると位相差も変わるため, 位相差指令にもデッドタイム分の補償を入れている。

3. シミュレーション結果

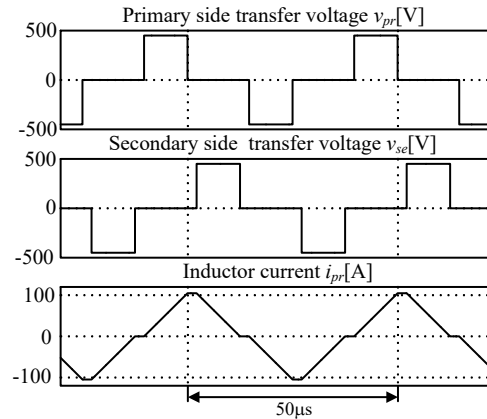
本章では3レベルDCM動作の妥当性を確認するために, 図1に記載している条件を用いてシミュレーションにより2レベル動作と3レベルDCM動作を比較する。

図5は, 電力指令 $P_{ref}=0.39\text{p.u.}$ を与えた場合の2レベル動作と3レベルDCM動作の波形である。図5(a)より, 中点クランプが発生し, 電力指令に対する伝送電力の誤差率が70%となっている。一方, 図5(b)より3レベルDCMを適用することで指令通りの電力の出力を達成している。

図6に指令電力に対する3レベルDCM動作および2レベル動作の伝送電力を示す。2レベル動作の場合, 電力指令値が0.34p.u.以下では位相差 δ がデッドタイム δ_{dt} より小さくなるため, 伝送電力



(a) 2-level mode $P=0.12\text{p.u.}$



(b) 3-level mode $P=0.39\text{p.u.}$

Fig. 5. Simulation results of proposed method and conventional method. Reference of the output power is 0.39 p.u.

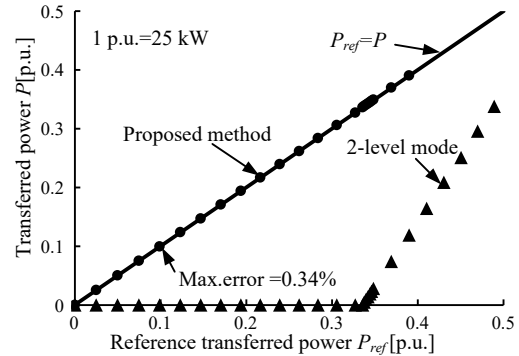


Fig. 6. Characteristics of reference transferred power and transferred power.

がゼロとなる。一方, 3レベルDCM動作を適用することで電力指令値と伝送電力が最大誤差0.34%で一致していることが分かる。

以上のことからデッドタイムによる軽負荷動作時の誤差補償できていることを明らかにした。

文 献

- (1) F. Krismer, IEEE Trans. PELS., Vol. 27, No.1, (2012)
- (2) B. Zhao et al., IEEE Trans. PELS, Vol.29, No.4, (2014)