

非線形デッドタイム誤差補償法における

Dual Active Bridge コンバータのインダクタ電流低減法

◎河内 謙吾 渡辺 大貴 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| hwatanabe@vos |itoh@vos.nagaokaut.ac.jp}

1. はじめに

Dual Active Bridge (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伝送電力に非線形な誤差が生じる問題がある⁽¹⁾。そこで、筆者らはインバータ出力電圧を3レベル動作させることで電力誤差を低減する手法を提案している⁽²⁻³⁾。しかし、文献⁽²⁻³⁾の提案法は位相差を固定値とし、ゼロ電圧期間を制御しているため、軽負荷領域では循環電流が増加し、その結果導通損失が増加する問題がある。

本論文では伝送電力指令に対して位相差とゼロ電圧期間を最小に制御することでインダクタ電流実効値を低減する方法を提案する。実験結果より、インダクタ電流実効値を最大64.1%低減し、損失を最大58.6%低減したので報告する。

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。各インバータからは方形波もしくは3レベルの電圧を出力する。また、非線形デッドタイム誤差を補償するために1次側と2次側のゼロ電圧期間を一致させて制御する。

図2に3レベル駆動時の動作波形を示す。1次側と2次側のインバータ出力電圧 v_{pr} , v_{se} の位相差 δ に加え、各インバータ出力電圧のゼロ電圧期間 ε および γ を制御することにより、電力を伝送する。3レベルモードによる伝送電力を(1)式に示す⁽²⁾。

$$P = \delta(2\pi - 4\varepsilon - \delta)V_m^2 / 2\pi\omega L \dots\dots\dots (1)$$

3レベルモードでは、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電圧極性反転現象を抑制し、非線形電力誤差を補償する。しかし、3レベル動作を用いることで、循環電流が増大し、所望の伝送電力を得るために必要なインダクタ電流実効値が増加する。3レベルモードにおいてインダクタ電流実効値を低減するには、伝送電力に対する位相差とゼロ電圧期間を最小に制御することで、循環電流を低減すればよい。ここで、電圧極性反転現象を回避するには、図2のゼロ電流期間 ϕ をデッドタイム以上に設計すればよく、ゼロ電流期間 ϕ がデッドタイムと等しいときに伝送電力に対する位相差とゼロ電圧期間が最

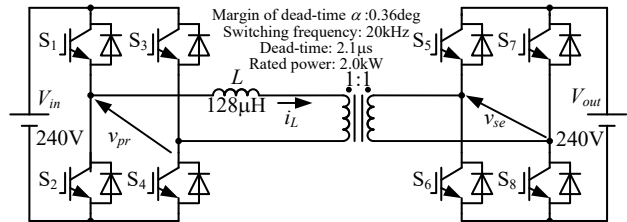


Fig. 1. Dual active bridge converter.

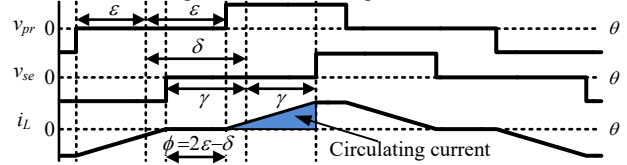


Fig. 2. Operation waveforms with 3-level operation.

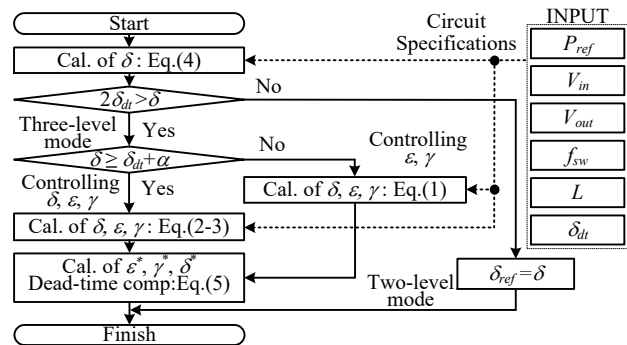


Fig. 3. Flowchart of determination of operation mode.

も短くなる。よって、インダクタ電流実効値はゼロ電流期間 ϕ を常にデッドタイム幅となるよう制御することで低減できる。この時のゼロ電圧期間および位相差とデッドタイム δ_{dt} の関係は(2)式となり、(2)式を考慮した位相差 δ は(3)式となる。

$$\varepsilon = (\delta + \delta_{dt}) / 2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta = \left\{ (2\pi - 2\delta_{dt}) - \sqrt{(2\pi - 2\delta_{dt})^2 - \frac{24\pi\omega LP^*}{V_m^2}} \right\} / 6 \dots\dots (3)$$

ここで、 P^* は電力指令値である。

図3に動作モードを決定するフローチャートを示す。まず、電力指令 P^* より電力伝送に必要な位相差 δ を(4)式より導出する⁽¹⁾。

$$\delta = \left(\pi - \sqrt{\pi^2 - 4\pi\omega LP^* / V_m^2} \right) / 2 \dots\dots\dots (4)$$

導出した位相差 δ とデッドタイム δ_{dt} の関係が $\delta > 2\delta_{dt}$ の場合に従来の方形波動作、 $\delta \leq 2\delta_{dt}$ 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。一方で3レベル動作となった場合は、(3)式により導出した位相差 δ と(2)式より求められるゼロ電圧期間 ε, γ を制御して電力を伝送する。位相差 δ がデッドタイム δ_{dt} となるとデッドタイム中にインダクタ電流がゼロになり電圧極性反転現象が発生するため、位相差 δ は $\delta_{dt} < \delta$ を満足する必要がある。よって、この条件を満たすために位相差 δ がデッドタイム δ_{dt} となる際には、位相差 δ に余裕度 α を持たせ $\delta_{dt} + \alpha$ までを制御範囲とする。ここで、余裕度 α を大きく設計すると循環電流が増加するため、余裕度 α はなるべく小さい値に設定するのが望ましい。設計例としてFPGAを用いたデジタル制御でコントローラを構成する場合、位相差はクロック周波数の半周期単位で設定できるため、余裕度として α を1クロック程度長めに設計すればよい。 $\delta_{dt} + \alpha$ 以降の負荷領域については位相差を $\delta_{dt} + \alpha$ に固定し、ゼロ電圧期間のみを制御する。3レベル動作適用時において、電圧極性反転現象を回避したことにより、1次側インバータ出力電圧のデューティにデッドタイム分の誤差が生じる。デッドタイムの影響を考慮したゼロ電圧期間 ε^*, γ^* および位相差指令 δ^* を(5)式に示す。

$$\delta^* = \delta + \delta_{dt}/2, \varepsilon^* = \varepsilon - \delta_{dt}/2, \gamma^* = \varepsilon \dots\dots\dots(5)$$

3. 実験結果

図4に提案法および従来法の動作波形を示す。2レベル動作を用いると電圧極性反転現象が発生し、伝送電力に46.9%の誤差が発生している。文献(2)の従来法を用いることで電力誤差を0.998%に低減できるが、指令電力を伝送するためにインダクタ電流実効値が11.3Aとなり損失が増加する。これに対し、提案法を用いると、ゼロ電圧期間をデッドタイム期間に保つことにより循環電流を低減し、インダクタ電流実効値を5.52Aに低減した。

図5に指令伝送電力に対する伝送電力の関係を示す。2レベルモードにおいて伝送電力に誤差が最大86.3%発生しているが、提案法を用いることで、電圧極性反転現象を抑制し、85.1%の電力誤差の低減を達成した。

図6に提案法および従来法と極性反転現象発生下における2レベルモードのインダクタ電流実効値と出力電力の関係を示す。文献(2)の従来法では電力を伝送するために11.0Aの電流を要していたが、提案法により、インダクタ電流実効値を64.1%低減した。また、文献(3)の手法に対しても最大で54.0%低減した。0.8kW以下においてインダクタ

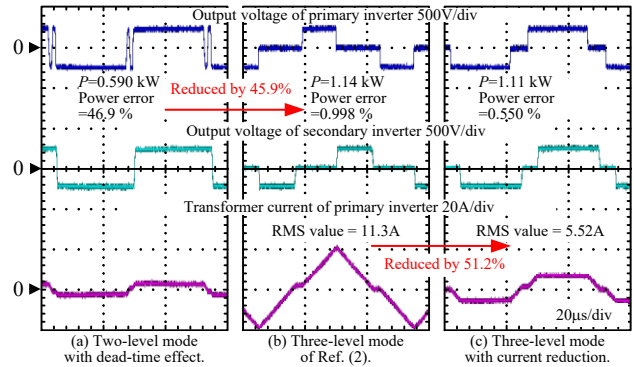


Fig. 4. Experimental waveforms of operation methods

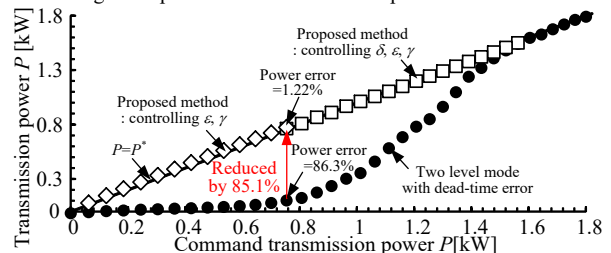


Fig. 5. Characteristic of transmission power.

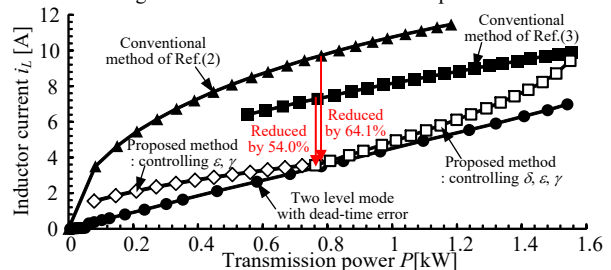


Fig. 6. Characteristics of output power and inductor current.

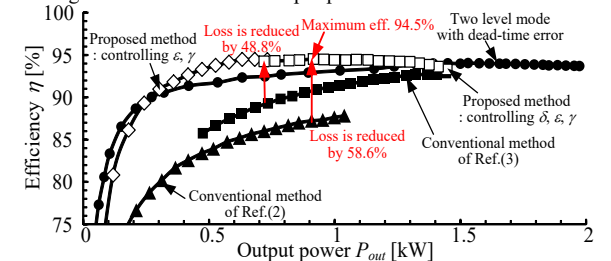


Fig. 7. Efficiency characteristics of proposed method and conventional method.

電流実効値が増加しているのは軽負荷になるにつれてゼロ電圧期間が増加することで循環電流が増加するためである。

図7に各動作モードの効率特性を示す。文献(2)の従来法においてはインダクタ電流が2レベルモードに対して2倍以上流れることで、導通損失が増加し効率が低下している。これに対し、提案法を適用することにより、インダクタ電流実効値の増加を抑制し、損失を最大58.6%低減することを達成した。また、文献(3)の手法に対しても損失を最大で48.8%低減した。

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) 河内, 渡辺, 伊東:平成 30 年電気学会産業応用部門大会(2018)