

電圧変動時における Dual Active Bridge DC-DC コンバータの電力誤差補償法

河内 謙吾*, 渡辺 大貴, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Transmission Power Error Compensation Method of Dual Active Bridge Converter for Variable Voltage

Kengo Kawachi, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

近年, DC マイクログリッドシステムへの適用を目的に Dual Active Bridge (DAB) コンバータの研究が盛んに行われている⁽¹⁾. DAB コンバータは, デッドタイムにより軽負荷領域において伝送電力に誤差が発生する問題がある⁽²⁾. デッドタイムによる電力誤差補償法として位相差指令にデッドタイム相当の位相角をフィードフォワード補償する手法がある⁽³⁾. しかし, 文献(3)の手法は電圧極性反転現象により生じる非線形電力誤差には対応しておらず, 十分でない⁽²⁻³⁾. そこで筆者らは非線形電力誤差に対し, トランス電圧を3レベル動作させ, ゼロ電流期間をデッドタイム以上に制御することで電力誤差を補償する方法を提案している⁽⁴⁾. しかし, 入出力電圧比と巻き数比が異なる条件下での電力誤差補償法については未検討であった.

本論文では, 電圧変動に応じて位相差およびゼロ電圧期間を制御することで電力誤差を補償する方法を提案する. 実験結果より, 49%の電力誤差を3.5%に低減し, 提案法の妥当性を確認したので報告する.

2. デッドタイムによる伝送電力への影響

図1にDABコンバータの回路図を示す. DABコンバータはフルブリッジインバータ2台と高周波トランスで構成され, トランス電圧の位相差 v_{pr} , v_{se} により電力を伝送する.

図2に方形波駆動時における動作波形を示す. デッドタイムを考慮しない場合, 電力誤差は発生せず指令値通りに電力が伝送される. 一方, デッドタイムがある場合, 軽負荷領域において伝送電力に誤差が生じる. インダクタ電流がデッドタイム期間中にゼロになる場合, 図2(b)のようにインダクタ電流がゼロにクランプされ, 電圧の極性が反転することで誤差が発生する⁽³⁾. また, 図2(c)中の範囲Aのようにインダクタ電流の極性がデッドタイム期間中に負である場合, ダイオードの順方向とインダクタ電流の向きが逆となるため, ダイオードにインダクタ電流が導通しない. これにより電圧の立ち上がりがデッドタイム分遅れるため誤差が発生する⁽³⁾.

図3に出力電圧 V_{out} を0%から-25%まで変動させた際における位相差と伝送電力の関係を示す. デッドタイムが存在する場合, 出力電圧が変動することで伝送電力が大きく変化することがわかる. この時の電力誤差は上述したデッドタイム期間中のインダクタ電流の状態によって変化する. 本論文では, こうした電圧変動が発生した際にも電力誤差を補償可能な手法を提案する.

3. 電圧変動時における伝送電力誤差補償法

図4に電圧変動時において文献(4)の電力誤差低減手法を適用した際の動作波形を示す. 電圧が変動したことで, ゼロ電流期間がデッドタイム以上生成されなくなり, 電圧極性

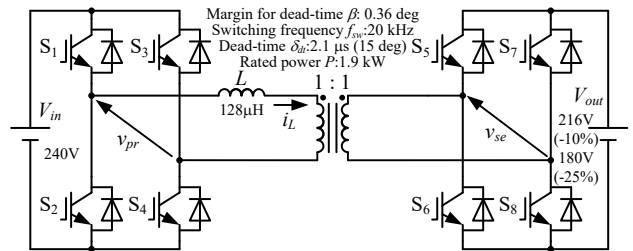


Fig. 1. Dual active bridge converter.

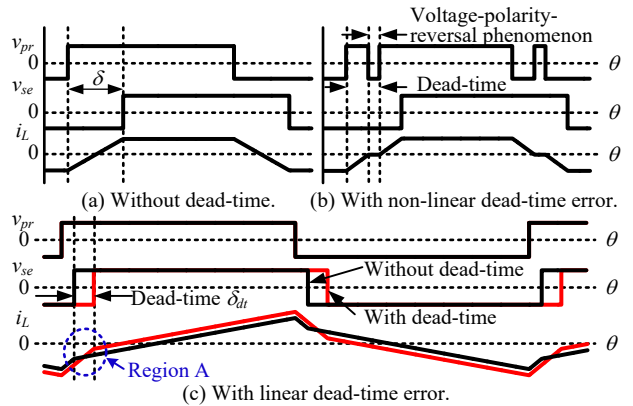


Fig. 2. Operation waveforms of two-level operation.

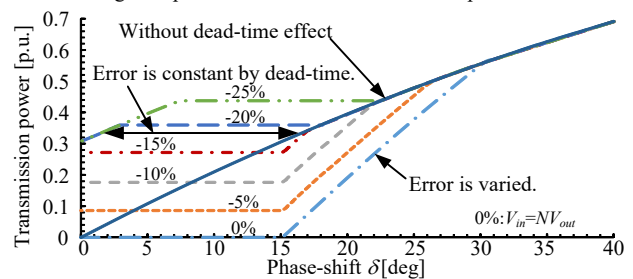


Fig. 3. Transmission power error with voltage fluctuation.

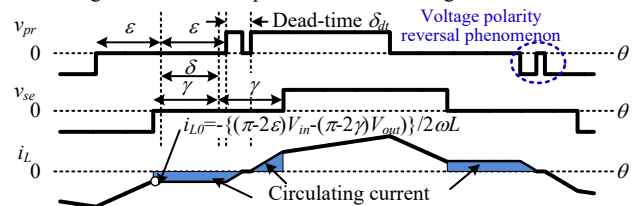


Fig. 4. Operation waveforms of conventional three-level mode.

反転現象が発生していることがわかる. ゼロ電流期間を設けるには, 図4のインダクタ電流 i_{L0} がゼロとなるようにゼロ電圧期間 ϵ , γ を制御すればよい. このとき, $i_{L0}=0$ となる条件は, $V_{out}=\alpha V_{in}$ と置くと(1)式で表される.

$$2\varepsilon = 2\alpha\gamma + (1-\alpha)\pi \quad (1)$$

ここで、 α は電圧の変動率である。

図5に提案する3レベルモードの動作波形を示す。3レベルモードでは、位相差 δ に加え、1次側、2次側のトランス電圧のゼロ電圧期間 ε, γ を用いて電力を伝送する。ここで、3レベルモードの電力式を(2)に示す。

$$P = \{(\pi - 2\gamma)(\delta - \varepsilon + \gamma) - (\delta + \varepsilon - \gamma)(\delta + \varepsilon + \gamma - \pi)\} V_m V_{out} / 2\pi\omega L \quad (2)$$

提案法では電圧極性反転現象を抑制するために3種類の動作モードを用いて電力誤差を補償する。インダクタ電流の増加を防止するために、各モードは電力に対する位相差とゼロ電圧期間を抑制し、循環電流を低減するように制御する。モードIでは、循環電流を抑制するためにゼロ電流期間 ϕ をデッドタイム δ_{dt} に制御する。このときの動作条件は(1)式および $\phi = \delta_{dt}$ より(3)式で表される。

$$2\gamma = 2\{\delta + \delta_{dt} - (1-\alpha)\pi/2\} / (\alpha + 1) \quad (3)$$

(1),(3)式を用いることで、位相差 δ のみで電力を制御できる。モードIにおいて2次側ゼロ電圧期間 2γ がデッドタイム δ_{dt} 未満となると電圧極性反転現象が発生する。従って、モードIにおける位相差 δ の指令範囲は(4)式となる。

$$\delta \geq (1-\alpha)(\pi - \delta_{dt})/2 \quad (4)$$

モードIIにおいては、(4)式の等号成立時における位相差を固定値とし、2次側ゼロ電圧期間 γ を指令値として制御する。モードIIにおいては、デッドタイム期間中にインダクタ電流がゼロに達することを防止するため、(5)式を満足する必要がある。

$$\lambda = \varepsilon - \gamma + \delta > \delta_{dt} \quad (5)$$

ここで、 λ はパルス間の位相差であり、図5(c)にて示される。(5)式をパルス間の位相差 λ が満足しなくなった場合、モードIIIを用いる。モードIIIでは、パルス間の位相差 λ を $\delta_{dt} + \beta$ に制御する。ここで、 β は電圧極性反転現象を防止するための余裕度である。余裕度 β を大きく設計すると循環電流が増加するため、余裕度 β 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 β を1クロック程度長めに設計すればよい。ここで、 $\lambda = \delta_{dt} + \beta$ となる条件は図5(c)より(6)式で表される。

$$\delta = \delta_{dt} + \beta + (1-\alpha)(\gamma - \pi/2) \quad (6)$$

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(7)式に示す(4)。

$$\delta^* = \delta + \delta_{dt}/2, \quad \varepsilon^* = \varepsilon - \delta_{dt}/2, \quad \gamma^* = \gamma \quad (7)$$

4. 実験結果

図6に出力電圧 V_{out} を-10%変動させた際の2レベルおよび提案法の動作波形を示す。2レベル動作を用いるとデッドタイム期間中にインダクタ電流がゼロになるため、電圧の極性が反転し電力誤差が発生する。これに対し、提案法を用いることでゼロ電圧期間を調整し、電圧極性反転現象を抑制できる。

図7に-10%、-25%電圧変動時における伝送電力指令に対する伝送電力の関係を示す。図7(a)に-10%電圧変動時の電力特性を示す。2レベル動作を用いると、伝送電力に非線形に誤差が発生し、最大49%の電力誤差が発生する。一方、提案法を用いることで、電圧変動が起きた際にも電圧極性

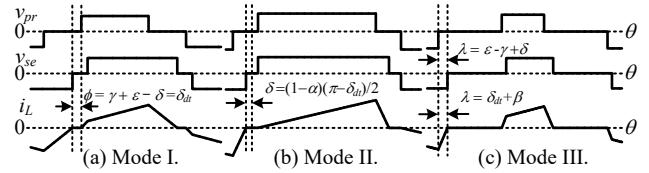


Fig. 5. Operation waveforms of proposed three-level modes.

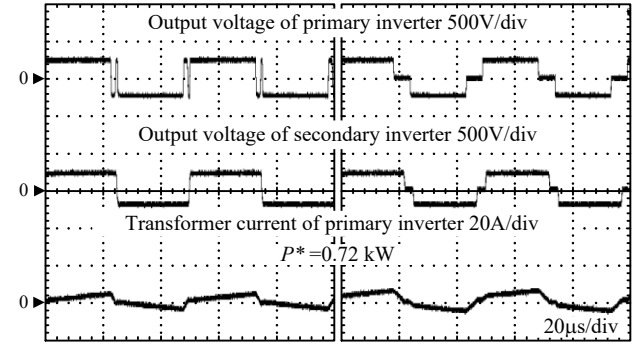
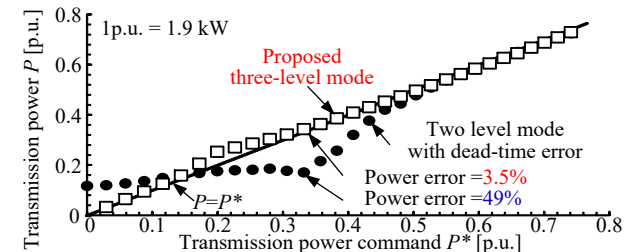
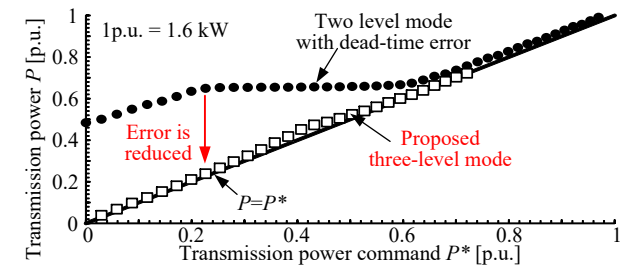


Fig. 6. Operation waveforms of two-level and three-level operation.



(a) Output voltage condition is reduced by -10% from nominal value.



(b) Output voltage condition is reduced by -25% from nominal value.

Fig. 7. Transmission power characteristic.

反転現象による非線形電力誤差を補償し、2レベルで発生した49%の誤差を3.5%に低減している。図7(b)に電圧が-25%変動した際の電力特性を示す。電圧変動により電力誤差が線形となった場合においても提案法を適用することによって電力誤差の低減を達成している。なお、伝送電力指令値が図7(a)においては0.2p.u.、図7(b)においては0.4p.u.にて提案法に誤差が生じている。これは0.2p.u.および0.4p.u.周辺にてターンオン時にゼロ電流スイッチング(ZCS)が達成されるので寄生容量を放電しきれず、電圧の立ち上がりが遅くなることでゼロ電圧期間が減少するためである。今後は、この問題に対し循環電流を流通させることでZCSを防止し、電力誤差を低減する方法を検討する。

文献

- (1) Felix J., et al: IEEJ Trans. IA, Vol.4, No.5, (2015)
- (2) B. Zhao, et al: IEEE Trans. PELS, Vol.29, No.4, (2014)
- (3) K. Takagi, H. Fujita: EPE2015, (2015)
- (4) J. itoh, K. Kawauchi, H. Watanabe: ICRERA2018, (2018)