

デッドタイム中にゼロになると 1 次側トランスに電流が通流しない期間が生じ、電圧極性反転現象が発生する⁽²⁾。この現象により発生する電力誤差は極性反転の幅に応じて変動するため、従来のデッドタイム相当の位相角をフィードフォワードする方法では補償できない⁽¹⁾。そこで、本論文では電圧極性反転の影響を回避するために、図 3 に示す 3 レベル駆動により電力誤差を補償する。電圧極性反転現象は最大デッドタイム位相分発生するので、3 レベル動作を用いてトランスに印加されるゼロ電圧期間をあらかじめデッドタイム位相以上設けることで回避できる。ただし、デッドタイム位相分の誤差は発生するため、補償する必要がある。

次に動作モードの決定法を図 4 に示す。まず、2 レベル動作で電力指令 P^* を達成するための位相差 δ を(1)式に示す。

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\pi - \sqrt{\pi^2 - 4\pi\omega LP^* / V_{in}^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ω はスイッチング角周波数、 L はインダクタンス、 V_{in} は入力電圧である。導出した位相差 δ とデッドタイム δ_{dt} の条件が $\delta > 2\delta_{dt}$ を満たす場合は 2 レベル動作、 $\delta \leq 2\delta_{dt}$ となる場合は 3 レベル動作を使用する。2 レベル動作では計算した位相差 δ を指令値とする。次に、2 つの 3 レベル動作モードの決定方法を示す。モード I のゼロ電圧期間 ε の決定式を(2)式に、モード II のゼロ電圧期間 ε の決定式を(3)式に示す。また、モード I の動作範囲を(4)式に示す。

$$\text{Mode1: } \varepsilon = \frac{1}{2} \left(\pi - \sqrt{2\pi\omega LP^* / V_{in}^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Mode2: } \varepsilon = \frac{1}{4} \left(2\pi - \delta - 2\pi\omega LP^* / \delta V_{in}^2 \right) \dots\dots\dots (3)$$

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

(2)式より導出したゼロ電圧期間 ε が(4)式を満足する場合には 3 レベル動作のモード I を使用する。満足しない場合にはゼロ電圧期間 ε を(3)式から導出しモード II を使用する。最後に、デッドタイムを考慮した各インバータ出力電圧のゼロ電圧期間指令 ε^* 、 γ^* および位相差指令 δ^* を(5)式に示す。

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

(5)式において、モード I 適用時には δ に $\pi/2$ rad, モード II 適用時には $\pi/4$ rad を代入する。

3. 実験結果

提案法の有用性を確認するために、図 1 に記載する実験条件を用いて 2 レベル動作と 3 レベル動作を比較する。スイッチング周波数 f_{sw} は 20kHz であり、大容量を想定し IGBT を用いているため、デッドタイムは 2.2 μ s に設定している。このような条件でも電圧極性反転現象により非線形な誤差が発生する。

図 5 に電力指令値 0.4p.u.での 2 レベルおよび 3 レベルの動作波形を示す。図 5(a)は 2 レベルの動作波形であり、電圧極性反転現象により電力指令値に対し 55%の誤差が発生している。図 5(b)は提案する 3 レベル動作の波形であり、極性

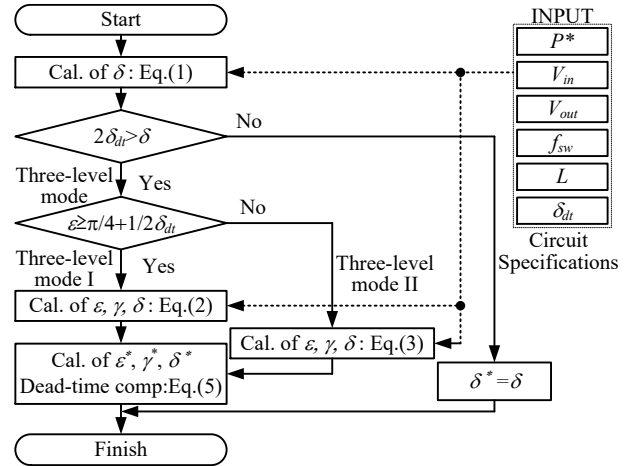


Fig. 4. Flowchart of determination of operation mode.

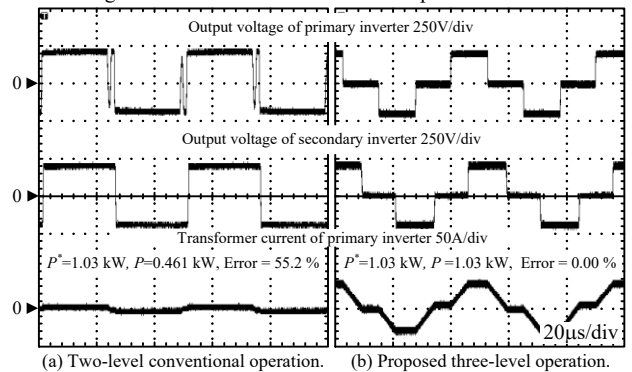


Fig. 5. Experimental waveform of two-level operation and three-level operation.

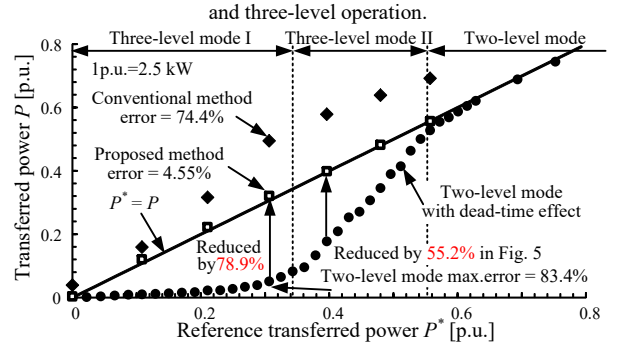


Fig. 6. Characteristics of transmission-power.

反転は発生していない。その結果、電力指令値に対し誤差なく電力を伝送している。

図 6 に電力指令に対する伝送電力を示す。2 レベル動作の場合、電力指令値が 0.56p.u.以下から電圧極性反転現象の影響により電力誤差が非線形に変化する。従来法を適用した場合、電力誤差を補償することはできず、誤差が最大 74.4% 発生する。一方、提案法を適用することで指令値通りに電力を伝送することができ、2 レベル動作と比較して電力指令に対する最大誤差を 78.9%低減できることを確認した。

文 献

- (1) K. Takagi, H. Fujita: "Dynamic control and dead-time compensation method of an isolated dual-active-bridge DC-DC converter", EPE2015 (2015)
- (2) B. Zhao, Q. Song, W. Liu, Y. Sun: "Dead-time Effect of the High-Frequency Isolated Bidirectional Full-Bridge DC-DC Converter: Comprehensive Theoretical Analysis and Experimental Verification", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 4, pp.1667-1680 (2014)