

スイッチングパルスの高調波を利用した DC/DC コンバータのマルチポート出力制御

清水 一樹 松下 由憲 野口 季彦 (静岡大学)
木村 修 砂山 竜男 (矢崎総業)

Multi-Port Output Control of DC/DC Converter Using Harmonic Component of Switching Pulse
Kazuki Shimizu, Yoshinori Matsushita, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)
Osamu Kimura, Tatsuo Sunayama (Yazaki Corporation)

1. まえがき

車両補機の消費電力増大に伴って補機用電源電圧を 12 V から 48 V とする動きが活発化している。しかし、当面は両電圧の併用が見込まれるため、車載用絶縁形 DC/DC コンバータをマルチポート化して複数の電圧出力を独立に制御することが求められる。降圧チョップを用いれば 48 V 出力ポートから容易に 12 V 出力も得られるが、電力変換が多段化するため総合効率の悪化が懸念される。そこで、本稿では絶縁形 DC/DC コンバータの一次側パルスの基本波と第 2 次高調波に着目し、2 ポートの出力電圧を独立に制御する手法を検討したので報告する。

2. 提案する 2 ポート絶縁形 DC/DC コンバータの回路構成と動作原理

提案する 2 ポート絶縁形 DC/DC コンバータの回路構成を図 1 に示す。高周波変圧器の巻数比を利用してデューティサイクル D の一次側パルスを降圧して二次側に出力する。降圧された二次側パルスにはスイッチング周波数に相当する基本波のほか第 2 次高調波も含まれているので、これら成分の周波数差を利用して 48 V と 12 V の 2 ポートに弁別する。48 V 出力ポート側には基本波周波数と、12 V 出力ポート側には第 2 次高調波と共振する直列共振回路をそれぞれ設けている。二次側パルスの基本波と第 2 次高調波は独立ではないが D によって制御することができるので、 D を調整することにより最終的な 2 ポートの直流電圧を所望の値に制御することができる。2 つのポートから出力される直流電圧は一次側パルスの D を調整するためにフィードバックされており、48 V 出力ポートと 12 V 出力ポートの各指令値に対する状態の組み合わせに応じて適切な D を決めることにより両出力ポートの電圧を制御する。本稿で提案するマルチポート出力制御は唯一の操作量 D を調整することにより 2 つの直流電圧を独立して制御できる点に特長があり、このため独立に動作する複数の一次側パルス発生回路や複数の高周波変圧器も不要である。

図 2 は高周波変圧器の二次側パルスを示したもので、これをフーリエ級数展開すると次式のように表される。ただし、 V は一次側パルス発生回路のパルス電圧発生波高値、 a は高周波変圧器の巻数比、 $\omega = 2\pi f$ はパルス発生回路のスイッチング角周波数である。

$$v = \frac{V}{a} \left(\frac{D}{2} + \frac{1}{n\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin n\pi D \cos n\omega t \right) \quad (1)$$

提案する手法では二次側パルスの基本波と第 2 次高調波のみを使用するため、それらを抜き出すと次のようになる。

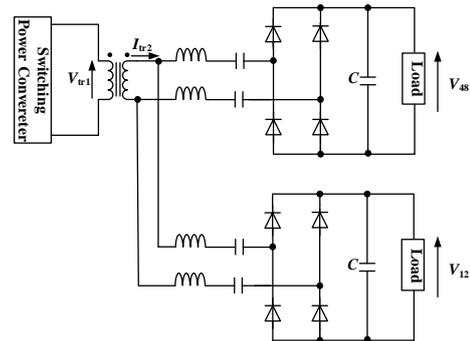


図 1 2 ポート絶縁形 DC/DC コンバータ
Fig. 1. Two-port insulated DC/DC converter.

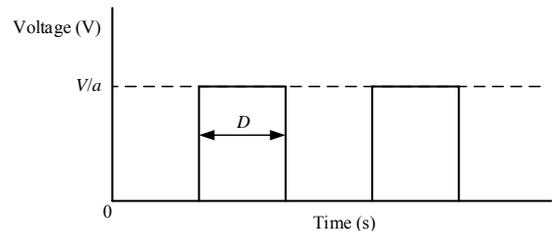


図 2 高周波変圧器の二次側パルス波形
Fig. 2. Secondary pulse waveform of high-frequency transformer.

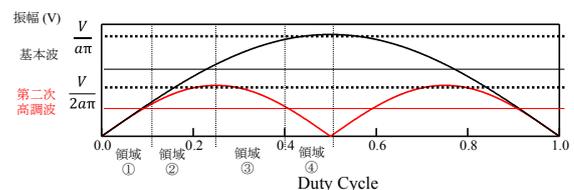


図 3 基本波と第 2 次高調波の振幅特性
Fig. 3. Amplitudes of fundamental and second-order harmonic component.

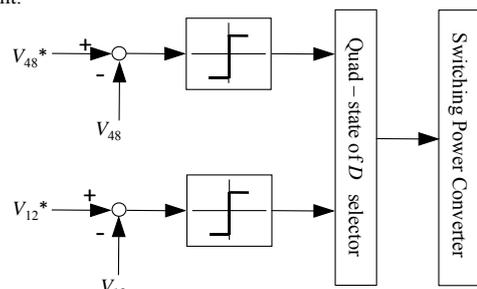


図 4 デューティサイクルの 4 値リレー制御系
Fig. 4. Quad-output-state relay controller of duty cycle.

$$v_1 = \frac{V}{a\pi} \sin\pi D \cos\omega t \tag{2}$$

$$v_2 = \frac{V}{2a\pi} \sin 2\pi D \cos 2\omega t \tag{3}$$

したがって、基本波と第2次高調波の振幅は D の関数となり、両者は図3に示されたように D に対して正弦波状に変化する。基本波は第2次高調波に対して2倍の振幅をもつため48V出力ポートの制御に利用することとし、12V出力ポートは第2次高調波で制御を行う。基本波振幅は $0 \leq D \leq 0.5$ の範囲で D に対して単調性をもっているため、基本波の最大振幅に対してある振幅のときに48V出力ポートの電圧がその指令値と一致して平衡状態になったときの D が48V出力ポートの電圧上昇、降下の切り換わり点となる。同様に12V出力ポートも $0 \leq D \leq 0.25$ の範囲で電圧上昇、降下の切り換わり点となる D が存在する。48V出力ポート、12V出力ポートそれぞれの電圧切り換わり点である D を境に $0 \leq D \leq 0.5$ の範囲を4つの領域に分類する。これら4つの領域には出力ポートの電圧増減の組み合わせが全て存在している。4つの領域の D を用いて4値リレー制御することにより、2ポートの直流電圧を独立に制御する。図4は本回路の制御ブロック図である。フィードバックした2つの直流電圧と指令値の大小だけと比較し、一次側パルス発生回路の4値 D のうち1つを決定している。

3. シミュレーションによる動作検証

提案する2ポート絶縁形DC/DCコンバータの動作をシミュレーションにより検証した。各種回路パラメータは表1に示したとおりである。一次側パルス発生回路のスイッチング周波数に合わせて48V出力ポート側の共振周波数は100kHzとし、12V出力ポート側の共振周波数を200kHzとした。両ポートとも1kWの出力を想定しているため、48V出力ポートと12V出力ポートの電流はそれぞれ20.8Aと83.3Aである。

以上の運転条件におけるシミュレーション結果を図5と図6に示す。両図とも上から48V出力ポートの電圧、12V出力ポートの電圧、高周波変圧器二次側電流、高周波変圧器一次側電圧である。まず、図5の動作波形から48V出力ポート、12V出力ポートとも長周期的に指令値に追従し、所定の電圧に制御されていることがわかる。これらの動作波形を拡大したものが図6であるが、48V出力ポートについては200kHzの電圧リップルのほか、5kHz程度の長周期的な揺らぎが加わっている。一方、12V出力ポートは400kHzの電圧リップルに16kHzほどの揺らぎが加わっている。高周波変圧器の二次側電流は2つの共振回路により、100kHzと200kHzの正弦波が重畳した波形になっており、これらが全波整流されるため各出力ポートの電流リップルならびに電圧リップルの周波数は200kHzと400kHzになる。両ポートの出力電圧に重畳する長周期的な揺らぎは D の4値リレー制御に起因すると考えられるが、詳しいメカニズムの検討は今後の課題とする。また、過渡的な負荷変動(外乱)に対する安定性と応答性についても精査が必要である。

4. まとめ

本稿では、高周波パルスの基本波と第2次高調波に着目

表1 シミュレーションパラメータ

Table 1. Simulation parameters.

| Parameters | Values |
|------------------------|---------|
| DC bus voltage | 280 V |
| Switching frequency | 100 kHz |
| 48-V port output power | 1 kW |
| 12-V port output power | 1 kW |
| Turn ratio | 2:1 |
| Smoothing capacitor | 47μF |

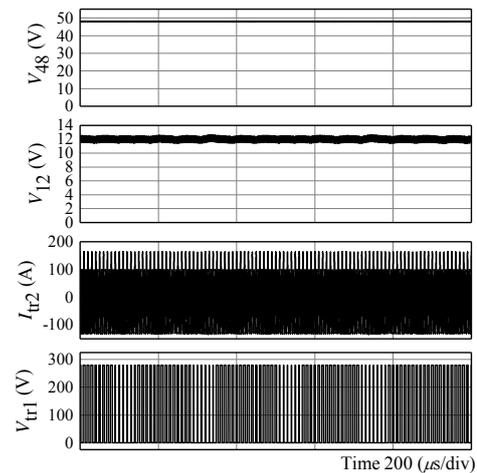


図5 2ポート絶縁形DC/DCコンバータの動作波形
Fig. 5. Operation waveforms of two-port insulated DC/DC converter.

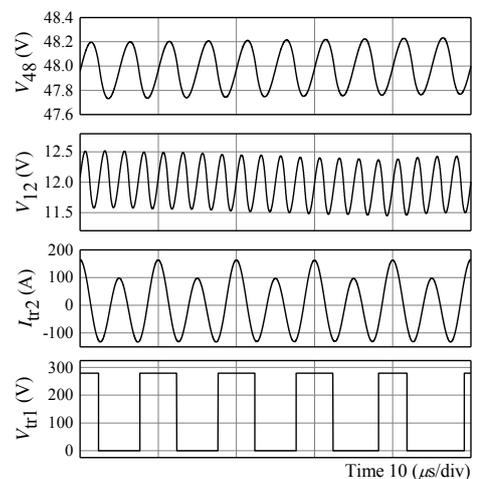


図6 動作波形の拡大図
Fig. 6. Expanded operation waveforms.

し、2つの出力ポートの直流電圧を独立に制御するDC/DCコンバータについて検討した。シミュレーションを通じて2ポートの出力電圧制御が精度良く実現できることを検証し、提案手法の妥当性を確認できた。

文献

- (1) 詹・松下・野口・木村・砂山:「多相インバータを用いた昇流型DC/DCコンバータ」平成27年電気学会産業応用部門大会, pp. I-353-I-356 (2015)
- (2) 寺谷:「自動車電源DC48Vのインパクト—DC42Vとの比較とDC60V以下の将来展望—」IEEJ Transaction on Industry Applications, vol. 135, no.9, pp.892-897