

航空機電源用 12 スイッチ 5 レベル PWM 整流器の波形改善

学生員 野下 裕市 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

A Waveform Improvement of Reduced Switch Count Five-level PWM Rectifier for Aircraft Power Supply Systems

Yuichi Noge*, Student Member, Jun-ichi Itoh*, Member

This paper evaluates a reduced switch count five-level PWM rectifier as an aircraft power supply systems, which has high frequency power grid. The rectifier proposed by authors is combined a diode clamp type topology with flying capacitor type topology. The proposed rectifier only uses four switches per leg in spite of five-level converter. This paper describes the feature of the proposed topology and the corresponding method of the high input frequency. Finally, the performance of the input current control of the proposed circuit is confirmed by experiment. In addition, the compensation of input current distortion is confirmed by experimental results.

キーワード : PWM 整流器, マルチレベル, 空間ベクトル変調, 航空機電源

Keywords : PWM rectifier, Multilevel, Space vector modulation, Aircraft power supply

1. はじめに

近年, 航空機では従来の油圧式アクチュエータを用いた飛行制御システムに代わり, 小型軽量化が可能な電気式アクチュエータの採用が進んでいる。航空機に電力を供給する発電機はエンジンに接続されるため, その運転状態に応じ, 出力周波数が変動する。現在は移相変圧器とダイオード整流器を用いた多パルス整流回路とインバータを組み合わせたシステムが用いられている⁽¹⁾。しかし, 変圧器が大型で重いという欠点がある。航空機に搭載する電子機器の誤作動を防ぐための厳しい高調波規制⁽²⁾を達成するため, 整流器から発生する入力電流高調波を抑制するためのフィルタが大型化する。これらの理由から小型軽量で入力電流高調波が少ない整流回路が必要とされている。

入力電流高調波を抑制できる整流回路として, 力率改善(PFC)整流器があり, さまざまな回路構成や適用例が報告されている⁽³⁾。中でも PWM 整流器はスイッチ素子で構成されるため入力電流の制御性が高く, 実用化が進んでいる。

航空機電源システムは発電機の出力周波数が 400~800Hz と高く, 商用電源に用いる PWM 整流器に比べてスイッチング周波数を向上させる必要がある。しかし一般的な 2 レベル PWM 整流器では高耐圧素子を用いる必要があり, スwitchング周波数を向上させるのが困難である。

そこで高速スイッチングを実現する技術として, マルチレベル構成が考えられる。n レベル構成でスイッチ印加電圧を $1/(n-1)$ に低減できるため, 低耐圧で高速な MOSFET が使用できることから, スwitchング周波数が向上し, 入力

電流の小型・軽量化, 入力電流高調波の低減が実現できる。しかし従来のマルチレベル回路はスイッチ素子が多く, 回路構成と制御方法が複雑化する問題がある⁽⁴⁾。

そこで本論文では航空機電源用途として, 著者らが提案しているスイッチ素子数を半減した新たな 5 レベル PWM 整流器を適用する。提案する 5 レベル PWM 整流器はフライングキャパシタ方式とダイオードクランプ方式を組み合わせた回路構成を持ち, 外側クランプダイオードに出力電圧 V_{dc} の $1/2$ を持たせることで電流の通過素子数を削減し, 同時にスイッチ素子の印加電圧を $1/4V_{dc}$ に保つことができる。

本論ではまず, 提案する PWM 整流器の特徴及び動作を紹介する。次に高周波入力における動作特性を改善するため, 提案回路特有の問題である, 入力電流波形のゼロクロス付近に生じるひずみの発生原因と補償法を検討する。最後に実際の航空機電源規格 DO-160 に基づき, 波形改善効果を検討する。

2. 提案回路

(2-1) 従来回路

5 レベル変換器としては, ダイオードクランプ形とフライングキャパシタ形の構成がよく知られている。これらはスイッチに $1/4V_{dc}$ 耐圧の素子を用い, 1 相あたり 8 個のスイッチ素子が必要である。

(2-2) 提案回路

図 1 に提案回路を示す。提案回路はダイオードクランプ形とフライングキャパシタ形と組み合わせ, さらにパワーフローを AC-DC 一方向に限定することでスイッチ数を半分

に削減する。C₁はフライイングキャパシタで、1/4V_{dc}の電圧を保つようにスイッチングパターンを切り替えて充放電制御する。C₃の電位はダイオード D_{R1}, D_{S1}, D_{T1}を経て出力平滑コンデンサ C₂の中性点電位にクランプされ、バランス制御は不要である。

表 1 は従来回路と提案回路の回路素子数の比較を示している。提案回路の利点は大きく分けて 2 点ある。1 つめはスイッチ素子数が従来回路の半分となること。2 つめは 1 相あたりの電流通過素子数が従来回路の 4 から 3 に減少し、導通損失が低減されることである。以上から提案回路は他の 5 レベル回路よりも低コストかつ高効率を実現できる。

(2・3) 制御方式

図 2 に提案回路の制御ブロック図を示す。制御ブロックは、入力電流制御と出力電圧制御からなる。三相入力電流を入力電圧から検出した電源角度を用いて回転座標変換し、d-q 軸上で制御する。d 軸が有効電流、q 軸が無効電流を表し、q 軸電流指令値 I_q^{*}=0 とすることで入力力率 1 制御を行い、空間ベクトル変調により PWM パルスを得る。

3. 動作特性の改善

(3・1) 特徴と動作上の制限

提案回路はスイッチ数を削減するために、パワーフローを AC から DC の一方向に限定している。これは航空機のエンジンに接続された発電機に電力が逆潮流しないことが保証されており、保護上の観点から都合がよい。しかし、制御領域の切り替わり時に入力電流にひずみが生じる。

図 3 に入力電圧領域の分割を示す。ひずみが生じるのは図 3 の領域 III と IV、また VI と I の切替時である。図 2 の入力電圧 V_{in} 極性判定からスイッチングパターンの出力までに遅れがある場合、電流経路が制限されることで入力電流ひずみが発生する。この問題は電流経路にダイオードが存在することから、電流方向が制限されるためである。

図 4 を用いて入力電圧が負から正に切り替わるゼロクロス点(図 3 領域 VI-I)における問題点を説明する。領域 IV におけるスイッチングパターンは表 1 No.5 に示す 0V 出力である。(a)は通常動作であり、入力電流は中性点から流出する方向となる。入力電圧が正に切り替わる点の極性検出が遅れた場合、スイッチングパターンは領域 VI の状態に保持される。入力電流はクランプダイオードにブロックされるため中性点に流れず(b)の経路を通り +1/2V_{dc} に接続される。よって本来は +0V と +1/4V_{dc} でスイッチングすべき図 4 領域 I が、誤ったスイッチングパターンによって +1/2V_{dc} と +1/4V_{dc} となり、入力電流が急速に減少し、ゼロクロスで停滞する。

(3・2) ゼロクロスひずみの波形改善

制御系の遅れに起因するひずみを改善するため、d-q 座標の位相を補償する。提案回路では d-q 座標の角度情報を入力電源から検出するため、入力リアクトルに印加される電圧により位相遅れを生じる。図 5 に入力等価回路図と電圧ベクトル図を示す。電源相電圧 V_s、電源周波数を f_m [Hz]、リアクトル電流を I_s [A] とすると電源角度の変化 Δθ [rad] は(1)式

で表される。

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{2\pi f_m L_m I_s}{V_s} [\text{rad}] \dots\dots\dots(1)$$

f_m は常時変動するが、制御器内の d-q 座標回転速度から検出可能である。この Δθ を角度検出値に加算する。

4. 実験結果

実験条件は表 2 に示すように、キャリア周波数 16kHz、電源周波数 128~256Hz とした。これは電源周波数 800Hz、50kHz キャリアでの動作を想定したスケーリング条件である。

図 6 に f_m に対する入力電流ひずみ率が最小となる最適補

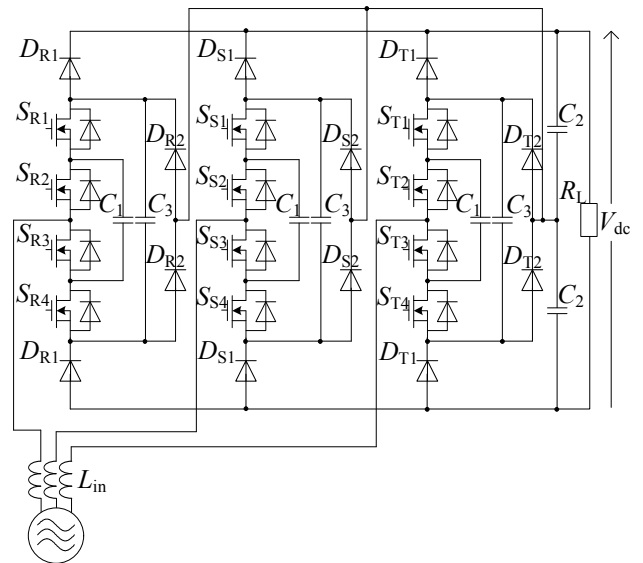


図 1 提案回路

Fig. 1. Proposed circuit

表 1 同耐圧の素子を用いた場合の素子数比較

Table 1. Comparing of device number.

	Diode clamp	Flying capacitor	Proposed circuit
Switch	24	24	12
Diode	60	24	36
Capacitor	4	30	13
Voltage Control of C	Impossible	Possible	Possible

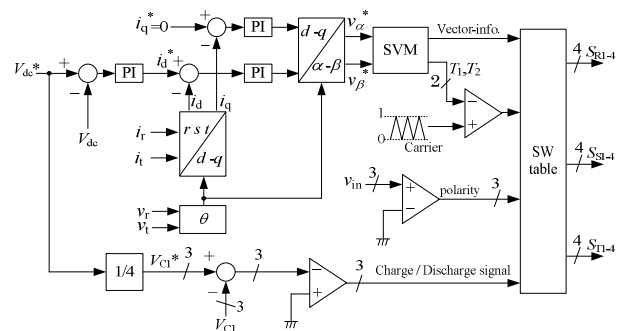


図 2 制御ブロック図

Fig. 2. Control block diagram

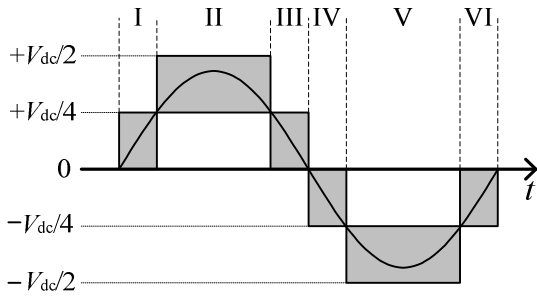


図3 入力電圧領域

Fig. 3. Input voltage area.

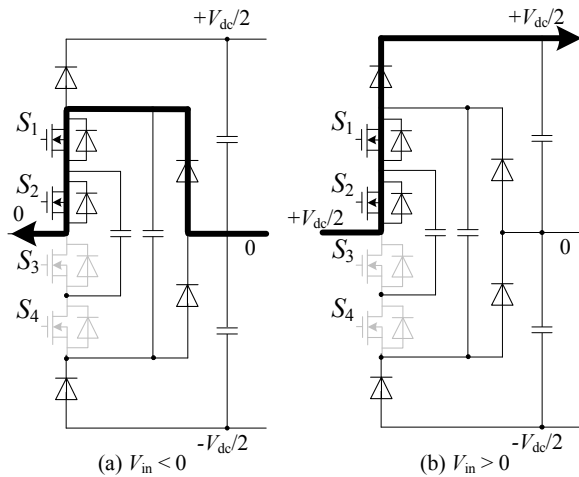


図4 入力電圧検出遅れ期間の動作例

Fig. 4. Example of switching sequence error

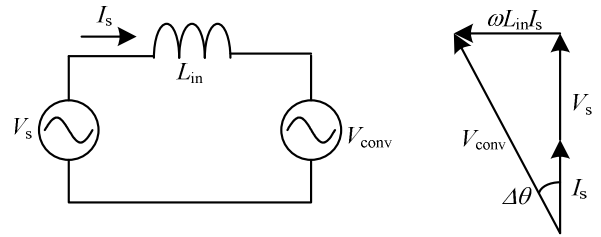
償量の測定結果を示す。横軸を制御周期で規格化し、矢印で示した数値は f_{in} が 256, 192, 128 [Hz] の条件においてひずみ率が最小となる点である。この3点を元に最小2乗法を用いて遅れ補償時間 T_d の周波数特性を近似すると

$$T_d = -9 \cdot 10^{-6} f_{in}^2 + 0.0061 f_{in} + 0.312 [s] \dots\dots\dots (2)$$

図7に(1)式による計算結果と、(2)式による実験的な結果を比較する。入力周波数に比例する傾向は同様であるが、変化率が大きく異なる。よって入力リアクトルによる電圧位相遅れのモデリングのみでは不十分と判断し、今回は実験から求めた(2)式の補償量を使用する。

図8に f_{in} を 128~256 [Hz] の間で変化させた場合の入力電流ひずみ率を示す。補償しない場合、 f_{in} に比例してひずみ率が上昇する。これに対し提案補償法を適用すると、ひずみ率は f_{in} に関わらず3%付近に抑制される。よって f_{in} が高く、制御が困難な領域において、良好な補償特性を実現できる。航空機電源は米国 RTCA の定める環境試験基準 DO-160 を満たす必要がある。

図9に基準値と、高調波の含有率を示す。補償なしでは、5次が5.7%、7次が3%と基準を超過する。これは前述のひずみに起因し、電流制御系が振動的になるためである。提案補償法を適用すると5次が2.2%、7次が1.6%と基準値近



(a) Equivalent circuit

(b) Voltage vector

図5 入力リアクトルの影響

Fig. 5. Influence of input reactor

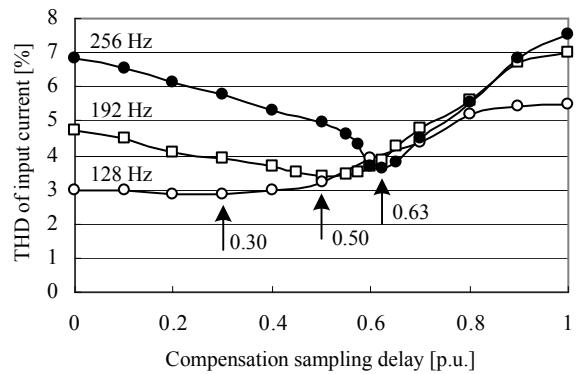


図6 電源周波数に対する最適補償量

Fig.6 Power supply frequency and optimum compensation time

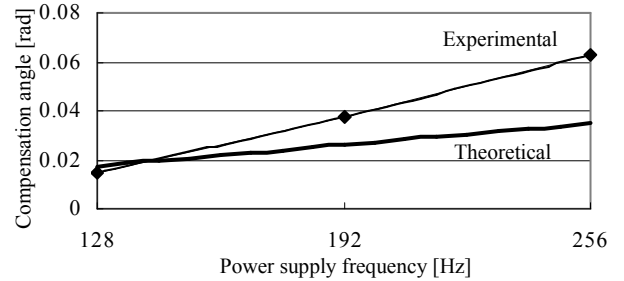


図7 ゼロクロスひずみ補償量

Fig. 7. Comparison of compensation angle

傍まで低下する。基準をわずかに上回る成分もあるが、これは実験に用いた負荷が軽く、入力電流の基本波成分が小さいためである。

図10に補償の有無による入力電流波形を示す。補償を行わない場合、ゼロクロス付近で入力電流が停滞する。電流制御系がこれを補償した結果、入力電流が跳躍し、ひずみを生じる。補償を行った場合、入力電流はゼロクロスで停滞せず、電流制御系の跳躍も見られない。

図11にゼロクロス付近の動作を示す。補償を行わない場合、図4で示したように、ゼロクロス手前で本来出力されない $+1/2 V_{dc}$ のパルスが確認され、入力電流が停滞している。一方で提案補償法を用いると、ゼロクロス付近においても正しいPWM出力電圧が得られ、入力電流も停滞しない。

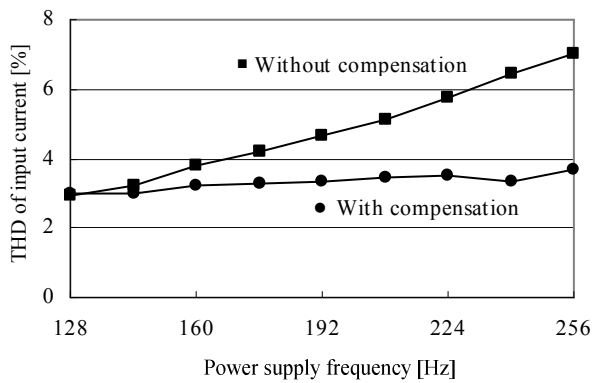


図 8 入力電流ひずみ率と電源周波数

Fig.8 Input current THD and power supply frequency

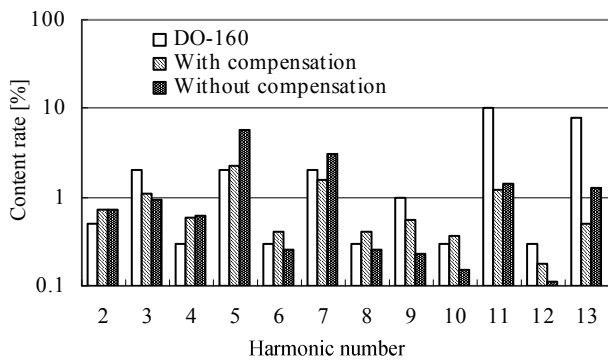


図 9 高調波規格との比較

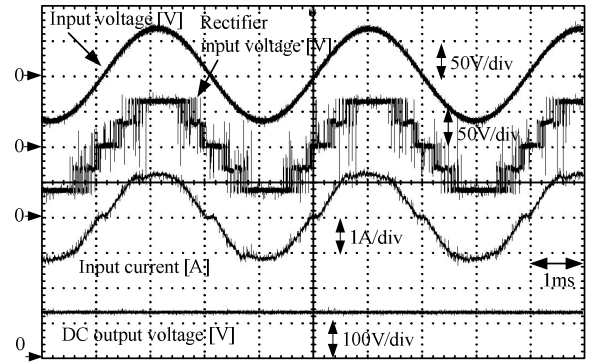
Fig. 9. Comparison of input harmonics between DO-160 standard and experimental

5. まとめ

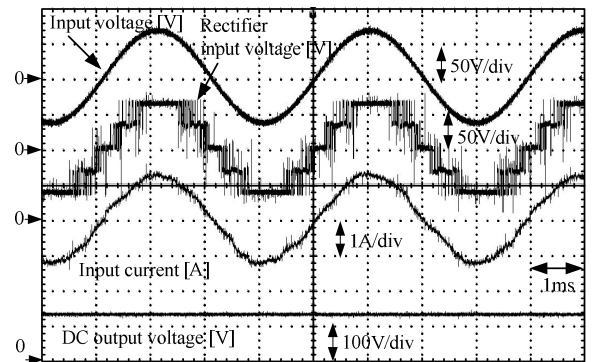
本論文では航空機電源システムに対し、スイッチ数を低減した簡易型 5 レベル PWM 整流器の適用を検討した。提案回路の制御方式を紹介し、実機を用いた動作検証を行った。高周波入力における動作特性を実機検証により示し、入力電流波形のゼロクロス付近に生じるひずみの補償を行い、256Hz 動作時の入力電流ひずみ率 3.7%の良好な結果を得た。また 128~256Hz の広い電源周波数において、入力電流ひずみ率を 3%台と低く一定に維持できることを確認した。

文 献

- (1) H. Wolf, T. Gathmann : "Active Three-Phase Rectifier for Aircraft Equipment", IEEE EPE.2005.219263 (2005)
- (2) RTCA: "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment", DO-160D (07/29/1997)
- (3) B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, and D. P. Kothari : "A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters", IEEE Transactions on industrial electronics, Vol.51, No.3, pp.641-660 (2004)
- (4) J. Rodriguez, J. Lai, and F. Z. Peng: "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications", IEEE Transactions on industrial electronics, vol.49, no.4, pp.724-738, 2002.



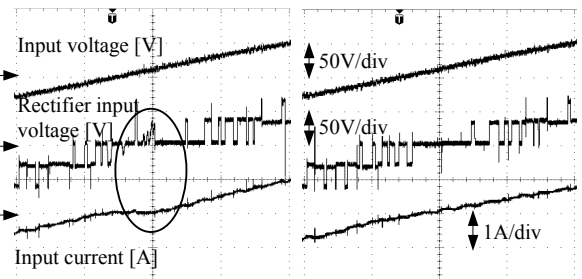
(a) Without compensation



(b) With compensation

図 10 動作波形

Fig.10 Operation waveform



(a) Without compensation

(b) With compensation

図 11 ゼロクロス付近の波形

Fig. 11. Comparison of zero-crossing distortion

表 2 実験パラメータ

Table 2. Experimental parameters

Output power	120 [W]
Input AC voltage	81 [V]
Switching frequency	16 [kHz]
DC output voltage command	128 [V]
Load resistance	100 [Ω]
Input inductor	2 [mH]
Flying capacitor	47 [μ F]
Clamping capacitor	100 [μ F]
DC link capacitor	220 [μ F]