

単相三相変換器における昇圧チョッパ回路とアクティブバッファ回路の比較

大沼 喜也, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Comparison between a Boost Chopper and an Active Buffer as a Single to Three Phase Converter
Yoshiya Ohnuma, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

家庭で電動機を駆動するために、単相三相電力変換が必要となるが、力率改善回路や平滑キャパシタが装置の大型化や効率の低下を招いている。そこで著者らは、小型・高効率化可能なアクティブバッファ回路⁽¹⁾を提案した。

本論文では具体的に設計例を示し、シミュレーションにより装置体積と損失の両面から検討を行い従来回路と比較を行う。その結果効率 0.7% 向上、体積を 3/4 程度に低減できることが分かったので報告する。

2. 変換器の基本仕様

図 1 に従来回路として、ダイオード整流器と三相インバータに力率改善形回路として昇圧チョッパを付加した回路を示す。図 2 に提案回路を示す。提案回路は、直流中間部をアクティブバッファに置き換える。これは、スイッチと小容量のコンデンサを直列に接続した放電回路と昇圧回路を用いた充電回路で構成する。

表 1 に比較に用いる変換器の仕様を示す。入力単相 200V、出力電力は 1.5 kW とする。出力にはモータを模擬した RL 負荷を接続する。各変換器は出力可能な電圧が異なるが、負荷を調整し出力電力を一致させている。また、電源側にはスイッチング成分を除去するための入力フィルタを設ける。

3. 各部品の設計と体積算出

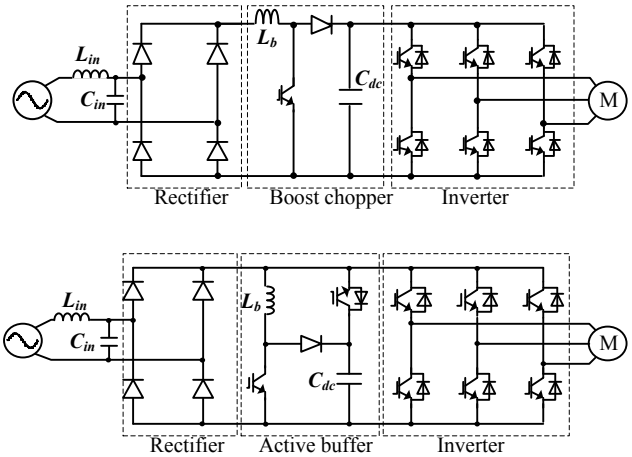
表 2 に各部品のパラメータ値を示す。各パラメータの設計は次節で詳細に述べる。キャパシタは製品より条件に一致したものを選定し体積を算出する。リアクトルは設計値より Area Product⁽²⁾を用いて体積評価を行う。冷却フィン損失をシミュレーションより求め、CSPI⁽³⁾を用いて体積を算出する。

3.1 半導体デバイス

半導体デバイスは耐圧、許容電流に適した素子を選定する。各回路の選定条件は同等なため、各素子はそれぞれ同じデバイスで構成し比較を行う。

3.2 直流リンクキャパシタ C_{dc}

従来回路のキャパシタは、昇圧チョッパにより 350 V に昇圧し、電圧リプルを 5% まで許容する値を選定する。一方提案回路は電圧を積極的に変動させるので、最高電圧 V_{Cmax} を 400 V、最低電圧 V_{Cmin} を 300 V とし電力脈動を完全に補



Items	Value	Items	Value
Input voltage (rms)	200 V	Carrier frequency	10 kHz
Input frequency	50 Hz	Output power	1.5 kW
Input filter cut-off frequency	1.5 kHz	Output frequency	50 Hz

Items	Conventional		Proposed		
	Required value	Selected value	Required value	Selected value	
DC-link capacitor C_{dc}	757 μ F 4 A	Electrolytic capacitor 1000 μ F 4A	136 μ F 4 A	Laminated ceramic C 150 μ F 20A	
Boost Inductor L_b	4.22 mH 11.4 A _{max}	$K_v=155, K_f=0.5$ $B_m=0.8, J_w=4$	0.5 mH 10.6 A _{max}	$K_v=155, K_f=0.5$ $B_m=0.8, J_w=4$	
Input filter	L_{in}	0.85 mH 10.6 A _{max}	$K_v=155, K_f=0.5$ $B_m=0.8, J_w=4$	0.85 mH 10.6 A _{max}	$K_v=155, K_f=0.5$ $B_m=0.8, J_w=4$
	C_{in}	13.2 μ F	Film capacitor 15 μ F 20A	13.2 μ F	Film capacitor 15 μ F 75A

* K_v : Proportional of inductor volume K_f : Fill factor B_m : Maximum density of magnetic flux, J_w : Current density

償できる値を選定する。単相三相変換器の場合、単相の電力脈動が支配的となるので各キャパシタ値は(1)式により求められる。

$$C_{dc} = \frac{2P_{out}}{\omega_m (V_{Cmax}^2 - V_{Cmin}^2)} \quad (1)$$

ここで P_{out} は出力電力、 ω_m は入力の角周波数である。また、キャパシタのリプル電流はシミュレーションで求める。表 2 に示す従来回路の条件では、電解コンデンサしか使用できず、キャパシタの選定は電流リプルが制約条件となる。一方提案回路では小容量のキャパシタを使用できるのでフィルムキャパシタや積層セラミックキャパシタの使用が可能となる。今回は村田製作所から発売されている積層

セラミックコンデンサ EVC シリーズ⁽⁴⁾を選定する。

3.3 昇圧リアクトル L_b

インダクタの体積は Area Product を用い、インダクタの体積 V_L は(2)式により一意に決定できる。

$$V_L = K_V \left(\frac{2W}{K_u B_m J_w} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (2)$$

ここで K_V はコアの形状から決定される定数である。また W は最大蓄積エネルギー、 K_u は窓の線積率、 B_m はコアの最大磁束密度、 J_w は巻き線の電流密度である。これより、インダクタの体積は蓄積エネルギーの $3/4$ 乗に比例する。今回は同じコアを使用した場合を想定する。従来回路の L_b はインダクタのリプル電流幅を 15% としてインダクタンスを求める。従来回路の場合、最大電流はリプル分を含んだ 11.4 A となる。一方提案回路インダクタは、不連続で動作する値を選定する。電流不連続の場合、電流の最大値は平均値の 2 倍と増加する欠点があるが、バッファに流入する電流は定格電流の半分となるので、結果として最大電流値は定格電流値と一致する。

3.4 入力フィルタ

初めに L_m を装置容量の 1% としてインダクタンスを求め、 C_m はカットオフ周波数が 1.5 kHz となる定数を選択する。

3.5 放熱フィン

放熱フィン、次項の損失シミュレーションによる損失を許容できるものを選定する。ただし放熱フィンの評価は CSPI を用いる。CSPI で放熱フィンを定義すればフィンの体積は電力変換器の損失に比例する。フィンの熱抵抗を R_{th} とすると、フィンの体積 V_F と CSPI の関係式は(3)式となる。

$$V_F = \frac{1}{R_{th} \cdot CSPI} \quad (3)$$

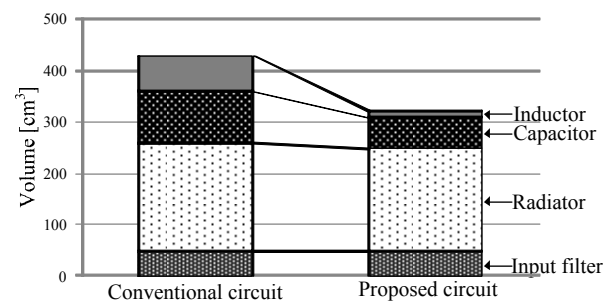
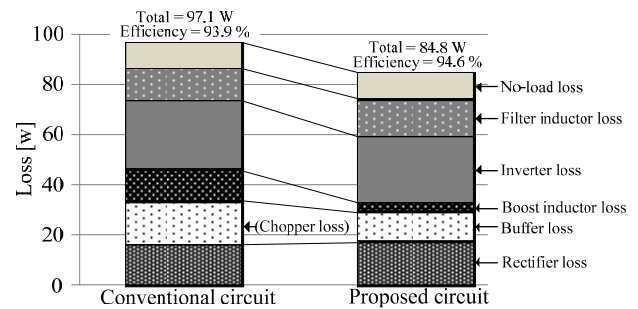
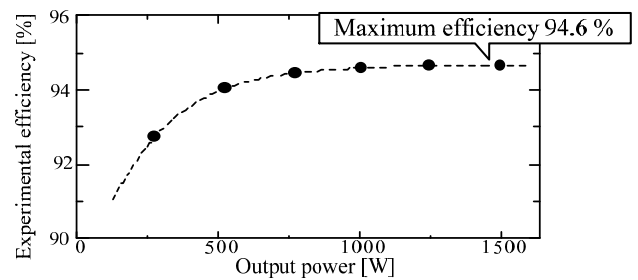
今回は CSPI が 5 のヒートシンクを選定し、周辺温度 40 度、チップ温度が 125 度以下になるフィンの体積を求めた。

5. 損失シミュレーションによる評価

高速パワーエレクトロニクス回路シミュレータ PLECS を用い損失解析を行った。インダクタの損失は等価抵抗 0.2Ω とし電流より損失を算出した。図 3 に提案回路の効率、図 4 に定格時の損失とその内訳を示す。提案回路は 94.6% の効率が得られ、実機の効率 94.6% と一致している。このことからシミュレーションの妥当性が確認できる。提案回路のバッファ回路の損失はスイッチが一つ増えているにもかか

文献

- (1) Y. Ohnuma, J. Itoh: ECCE Atlanta 2010, pp. 1801 - 1807
- (2) Wm. T. McLyman' Transformer and Inductor Design Handbook' CRC Press, 2004
- (3) Drogenik U., Kolar J.W., PCIM Europe 2005, pp. 608 - 619
- (4) (株) 村田製作所 : パワーエレクトロニクス用, <http://www.murata.co.jp/products/article/ta06d2/index.html>



わらず、チョッパ回路と比較し 30% 改善した。また昇圧リアクトルを含めると損失は半分程度軽減したことになる。これは提案回路のバッファ回路を通過する電流は入力電流の半分ですむので効率がよい。これより、全体の効率を比べると提案回路は従来回路に比べ 0.7% 効率が改善する。

6. 体積比較

図 5 に体積の比較結果を示す。従来回路と比較して提案回路は体積を約 $3/4$ にできることがわかった。特に、従来回路の昇圧リアクトルと DC リンクのキャパシタは 170 cm^3 と体積の約 40% を占めているのに対し、提案回路のアクティブバッファ回路は 74 cm^3 (総体積の約 20%) と $2/5$ にすることができる。これより、提案回路はアクティブバッファを用いることで小型化を実現している。

7. 結論

本論文では、昇圧チョッパを用いた場合とアクティブバッファを用いた場合の単相三相変換器の損失と体積の比較検討を行った。その結果、効率は 0.7% 向上、体積は約 $3/4$ に小型化できることが分かった。

今後、実機によりキャパシタの損失や詳細なインダクタの損失解析を行い体積と損失の関係を検証する予定である。