

3相5レベルANPCインバータの理論体積と実験機の体積に対する一考察

榎原 有吾*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

A Consideration about Volume of Calculation and Experimental Value of a Three-phase Five-level ANPC Inverter
Yugo Kashihara, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

近年、電力変換器の損失や体積を数学的に求め、最適化する技術が盛んに研究されている。筆者らは、これまでに5レベルアクティブ中性点クランプ形(以下 ANPC)インバータに注目して、数式を用いたパラメータ設計法について検討を行ってきた⁽¹⁾⁻⁽²⁾。しかしながら、実際の変換器の体積は、半導体素子のスイッチングによって発生する熱や部品間の配線などで、変換器中の部品体積の総和よりも大きくなる⁽³⁾。

本論文では、数式を用いて変換器の実体積を定量的に評価することを目的として、電力変換器の「実装率」を定義し、その検討を行なう。一例として、3相10kW ANPCインバータの設計と実機検証を行い、実装率について考察する。

2. ANPC トポロジー

Fig.1 に5レベルANPCインバータの回路図(1相分)を示す。Fig.1より、本回路は一相あたり8つの素子と3つのキャパシタで構成される。スイッチングによってキャパシタ電圧を加減算することで複数の電圧を出力する。

Table1 に変換器の仕様と製作に用いる素子を示す。入力には350V、出力電力は10kVAとする。

3. 回路設計手順

Fig.2 に変換器の設計フローチャートを示す。Fig.2の設計チャートは、変換器の仕様やデバイスパラメータを入力とする。これらのパラメータを用いて、変換器の各素子のパラメータを計算し、変換器全体の効率と体積、パワー密度を導出する。効率 η_{ANPC} は変換器の各素子の損失総和 P_{Loss} から(1)~(2)式で、変換器体積 Vol_{ANPC} は各素子の体積総和から(3)式で、変換器のパワー密度 ρ_{ANPC} は各素子のパワー密度の総和から(4)式で得られる。

$$P_{Loss} = P_{Sw} + P_{CL} \dots\dots\dots(1)$$

$$\eta_{ANPC} = \frac{P_m - P_{Loss}}{P_m} \dots\dots\dots(2)$$

$$Vol_{ANPC} = Vol_{sw} + Vol_C + Vol_H \dots\dots\dots(3)$$

$$\rho_{ANPC} = \rho_{sw} + \rho_C + \rho_H \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 P_{sw} は半導体素子の損失、 P_C はキャパシタ素子の

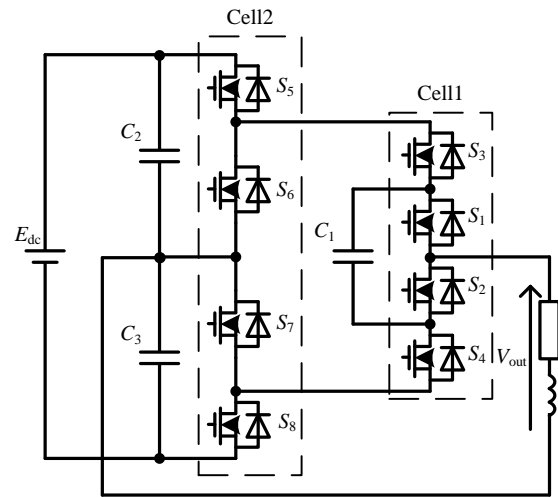


Fig.1. Five-level ANPC inverter circuit topology.

Table 1 Design parameters.

(a) converter specification

Input voltage	350V	Rated power	10kW
Output voltage	200V	Output frequency	50Hz
Output current	29A	Switching frequency	20kHz

(b) device lists

Switching device	Cell1	MOSFET:IRFP4668pBF(IR)
	Cell2	MOSFET:IXFB170N30P(IXYS)
Flying capacitor	EEUEE2C331	
DC smoothing capacitor	5 parallel connection (Panasonic)	
	ESMQ251VSN182MA45S	
	2 parallel connection (Nippon chemi-con)	

損失、 P_{in} は変換器の入力電力、 Vol_{sw} は半導体素子の体積、 Vol_C はキャパシタ素子の体積、 Vol_H はヒートシンクの体積、 ρ_{sw} は半導体素子のパワー密度、 ρ_C はキャパシタ素子のパワー密度、 ρ_H はヒートシンクのパワー密度である。

さらに、(3)式と実際の変換器体積から実装率PVR(Package Volumetric Ratio)を定義する。実装率は、変換器の実際の体積に対する変換器素子の体積が占める割合で、この値が1に近いほど部品の集積化が大きいことを示し、(5)式で表される。

$$PVR = \frac{\Sigma Vol}{(Conv_H \times Conv_W \times Conv_D)} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 ΣVol は変換器の各素子の体積の総和、 $Conv_H$ は

変換器の高さ, $Conv_W$ は変換器の幅, $Conv_D$ は変換器の奥行きである。実体積を理論体積と実装率を用いて表すことで、回路トポロジーが小型化に寄与する部分と実装技術により小型化する部分を分離して考えることができる。

4. 試作機による評価

Table 1 の変換器の試作と Fig.2 の変換器設計チャートを用いて 10kW の 3 相 ANPC インバータを試作し、体積について検討した。なお、今回は、変換器設計は主回路部分のみとし、リアクトルは考慮しない。主回路部分は 4 層のプリント基板を用いて試作し、効率が高いため放熱フィンには縦型のものを用いている。

<4・1> 実験結果

Fig.3 に、3 相 10kW ANPC インバータの動作波形を示す。Fig.3 より出力電流は良好な正弦波が出力されている。また、出力線間電圧は直流中点を基準とする出力相電圧は指令値に追従し、9 レベルの出力相電圧波形が得られた。さらに、フライングキャパシタ電圧は入力 V_{dc} の 1/4 である 87.5V になっており、5 レベル ANPC インバータの基本動作を確認した。実装した最大効率は出力 9.2kW のとき 98.6% であり、理論解析(98.7% at 9.2kW 出力)とよく一致している。

<4・2> 体積比較

Fig.4 に Table1 の条件を用いて設計した変換器を、Fig.5 に変換器の理論体積と実体積を比較した結果を示す。Fig.5 より、5 レベル ANPC インバータの理論体積が 0.9dm^3 、実体積が 1.55dm^3 となった。ここで、実際の変換器体積は、変換器の幅と奥行きを主回路基板の幅と奥行きとして、変換器の高さを実装した部品のなかで最も高い素子の高さとして導出を行なった。理論体積を用いたパワー密度は $10.2\text{kW}/\text{dm}^3$ であり、実際は $5.9\text{kW}/\text{dm}^3$ となった。(5)式を用いて実装率を求めると 0.58 となった。実体積の解析結果より、部品の配置、配線によって生じた空間体積は実機の 40% を占めている。この空間体積は、変換器のヒートシンクの熱設計や冷却方式に大きく依存し、パッケージング技術として最適化する余地がある。

5. 結論

本論文では、実装率を導入することによって回路トポロジーにより小型化に寄与する部分と実装技術により小型化に寄与する部分を分離する試みを行なった。実装率を向上させるには熱処理とパターンの引き回しなどが重要となる。

今後は、変換器のヒートシンクの熱設計と実装率について検討を行なう。

文献

- (1) 樫原 有吾・伊東 淳一:電学論 D, Vol 131, No12, 2011
- (2) 樫原 有吾・伊東 淳一:SPC-11-157, 2011
- (3) J. W. Kolar, etc.: IPEMC 2009-China, 2009

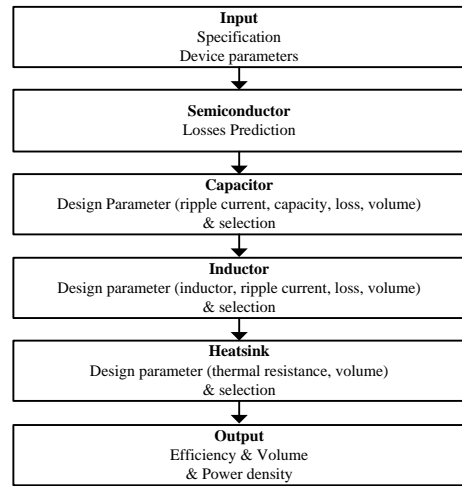


Fig.2. Inverter design procedure

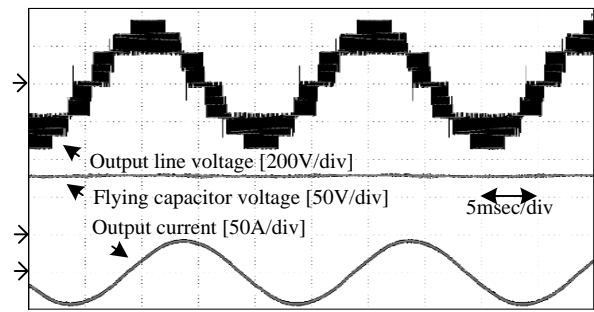
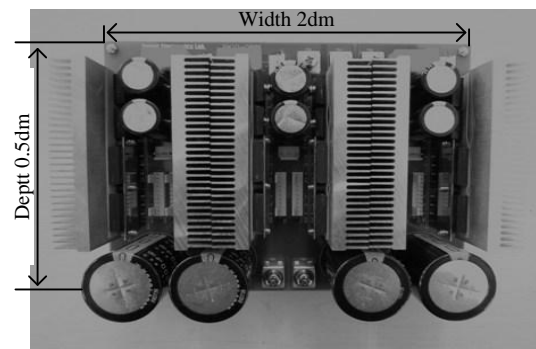


Fig.3. Experimental waveform.



(a) Top side



(b) Front side

Fig.4. A three-phase five-level ANPC inverter.

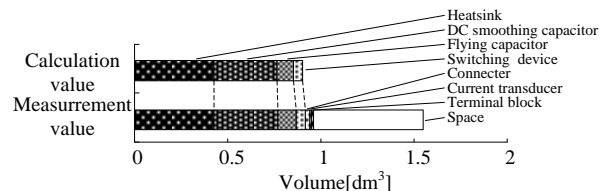


Fig.5. Volume of ANPC inverter.