

過飽和連系インダクタを用いた電力変換器の高パワー密度化手法

◎西川 滉大, 日下 佳祐, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

連系インバータの高パワー密度化のために、連系インダクタの更なる小型化が求められている⁽¹⁾⁽²⁾。連系インダクタを小型化する手法として、スイッチングの高周波化や許容電流リップルの増加がある。一方で、一般的に連系インダクタは磁化特性の線形領域で設計されている。そのため、磁束密度や磁界を大きくできず、インダクタの小型化には限界がある。そこで本稿では、磁気飽和を積極的に許容したインダクタ設計手法を提案する。

2. 過飽和インダクタの設計手法

図1に検討する連系インバータの回路図を示す。連系インダクタのインダクタンス L は、基本波電流が最大となる点において許容電流リップル率 r_l を満たす条件で設計する。

図2に、設計に使用したコアの磁化特性を示す。ここでは、線形領域と非線形領域の境界は 0.9 T とした。飽和による非線形性は、磁界 H を磁束密度 B で多項式近似した $H(B)$ にて表現する。このとき、 $H(B)$ の微分はコアの透磁率 μ_c の逆数となる。鉄心磁路 l_c とギャップ長 l_g の関係が $l_c \gg l_g$ である場合、コアとエアギャップの透磁率を合成し、全体を単一のコア材料とみなしたときの等価透磁率 μ_{eq} は(1)式となる。

$$\mu_{eq} = \left(\frac{1}{\mu_c} + \frac{l_g}{l_c \mu_0} \right)^{-1} = \left(\frac{dH(B)}{dB} + \frac{l_g}{l_c \mu_0} \right)^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

全体の等価磁化特性 $H_{eq}(B)$ は等価透磁率 μ_{eq} の逆数を積分することで(2)式にて表すことができる。

$$H_{eq}(B) = H(B) + \frac{l_g}{l_c \mu_0} B \dots\dots\dots (2)$$

図3に設計を行うインダクタの形状を示す。体積計算の簡略化のため、鉄心断面 A_c および鉄心磁路 l_c は正方形と仮定する。 $l_c \gg l_g$ とした場合、インダクタを囲う直方体の体積 Vol は、鉄心断面 A_c と窓面積 A_w より(3)式で近似できる。

$$Vol \approx (2\sqrt{A_w} + 2\sqrt{A_c})(\sqrt{A_w} + 2\sqrt{A_c})(2\sqrt{A_w} + \sqrt{A_c}) \dots\dots\dots (3)$$

ここで窓面積 A_w は、占積率 K_u と電流密度 J 、巻数 N によって決定される。

次に、鉄心断面 A_c を求める手法について説明する。インダクタ巻線によって生じる磁界に漏れがないと仮定すると、基本波電流最大値における磁界 H_m とインダクタの形状から、鉄心断面 A_{c1} は(4)式となる。

$$A_{c1} = \left(\frac{N \cdot \sqrt{2} I_{out}}{4 H_m} - \sqrt{A_w} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

一方で、許容電流リップル率 r_l と等価磁化特性 $H_{eq}(B)$ より、電流リップルに相当する磁束密度振幅 ΔB を求めると、スイッチング周期あたりの電圧時間積との関係から、鉄心断面 A_{c2} は(5)式となる。

$$A_{c2} = \frac{V_{DC} - \sqrt{2} V_{Grid}}{N \cdot \Delta B \cdot f_{sw}} \cdot \frac{\sqrt{2} V_{Grid}}{V_{DC}} \dots\dots\dots (5)$$

この時、インダクタが許容電流リップル率を満たす条件は $A_{c1} \geq A_{c2}$ である。よって鉄心断面 A_c は、この条件を満たす最小の巻数 N により決定される。

3. 設計例

ここでは、図1に示す回路パラメータを例として、連系インダクタを設計した。

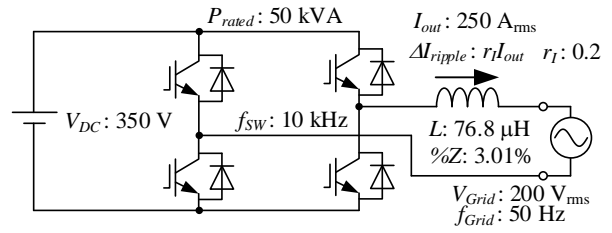


Fig. 1. Single-phase inverter.

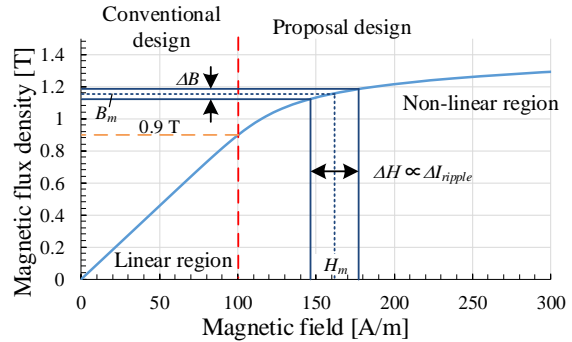


Fig. 2. Magnetization characteristic of inductor core.

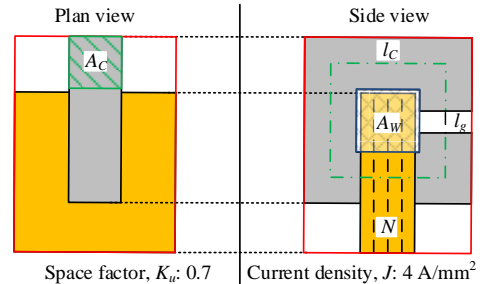


Fig. 3. Configuration of designed inductor.

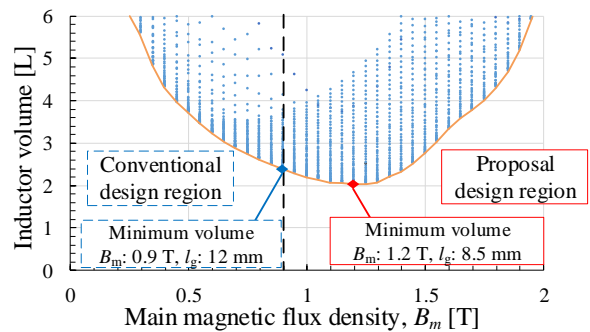


Fig. 4. Results of inductor volume calculation.

図4に、 B_m を $0.05\text{ T} \sim 2.0\text{ T}$ まで 0.05 T 刻み、 l_g を $0\text{ mm} \sim 30\text{ mm}$ まで 0.5 mm 刻みで計算したときのインダクタ体積の推定結果を示す。体積が最小となる条件は、 $B_m = 1.2\text{ T}$ 、 $l_g = 8.5\text{ mm}$ であり、このときのインダクタ体積は 2.04 L である。従来の飽和領域を用いない ($B_m = 0.9\text{ T}$) とき、最小インダクタ体積 2.40 L となり、提案設計手法によりインダクタ体積を 15% 低減し、小型化できることを確認した。

今後は、インダクタ損失と冷却体積を考慮した高パワー密度化手法についての検討を行う。

参考文献

1. M. Liserre et al.: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No.5, pp1281-1291, (2005)
2. H. N. Le et al.: 2017 IEE-Japan Industry Applications Society Conference, No.1-124, pp549-552, (2017)