

非接触給電システムに用いる 倍電流整流回路のリアクトルの電流リップル

工藤 貴広*, 遠井 敬大, 金子 裕良, 阿部 茂 (埼玉大学)

Reactor Current Ripple in Current Doubler Rectifier circuit using Contactless Power Transfer System

Takahiro Kudo*, Takahiro Tohi, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe (Saitama University)

1. はじめに

非接触給電は利便性・保守性に優れた給電方式であり、すでに電動歯ブラシや携帯電話で実用化が進んでいる。また蓄電装置として急速充電が可能な電気二重層キャパシタ (EDLC) が注目されており、非接触給電による低電圧大電流での高効率な充電法が必要とされている。低電圧の EDLC を高効率で充電するため、一次直列二次直列コンデンサ方式 (SS 方式)⁽¹⁾ の非接触給電装置と倍電流整流回路⁽²⁾⁽³⁾ を組み合わせたシステム (図 1) を用いた⁽⁴⁾。SS 方式の非接触給電装置はイミタンス変換器特性となるため、定電圧で駆動すると出力が定電流となり、EDLC の定電流充電に適している。また倍電流整流回路には 2 つのリアクトルが含まれるが、インダクタンスの値が小さいとリアクトルの電流リップルが大きくなり、整流回路の出力電流が低下する。反対に、インダクタンスの値が大きすぎるとリアクトルの寸法が大きくなってしまふ。

本論文では、SS 方式の非接触給電装置を定電圧で駆動した場合のリアクトルの電流リップルとインダクタンスの関係性を明らかにする。EDLC への給電実験を行い、電流リップルの計算式の精度を検証する。なお、EDLC の充電電流のリップルは LC フィルタを用いることで十分小さくできるため今回は検討しない。

2. 倍電流整流回路の動作原理と電流リップルの関係

SS 方式の非接触給電では一次側を定電圧で駆動すると二次側は定電流となるため、倍電流整流回路の入力は正弦波の定電流源と見なしてよい。図 2 に SS 方式の非接触給電装置を定電圧駆動した場合と正弦波定電流源を用いた場合の倍電流整流回路の各部の電圧電流波形を示す。

倍電流整流回路の動作を説明する。図 2 の電圧電流波形を整流動作により A~D の 4 つのモードに分ける。ここでリアクトル電流経路に注目すると、リアクトル L_1 のみを考えた場合、 i_{L1} の電流経路は図 3 となる。同様に L_2 のみを考えると i_{L2} の電流経路は図 4 となる。図の R_L は EDLC を抵抗負荷としてみなした値である。倍電流整流回路では、図 3 と図 4 の動作が同時に行われるため出力電流 i_L は常にリアクトル電流 i_{L1} 、 i_{L2} の和となり一定の値をとる。理想的には入力電流実効値の $2\sqrt{2}$ 倍の値が出力電流 i_L となる。しかし、

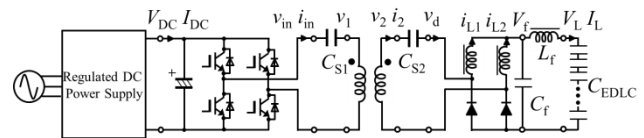
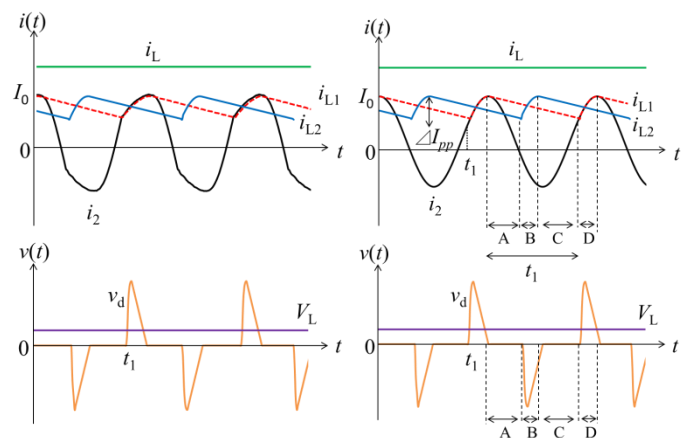


図 1 EDLC 非接触給電システム

Fig.1. Contactless power transfer system for EDLC charging



(a) SS 方式非接触給電(定電圧駆動) (b) 正弦波定電流源

図 2 倍電流整流回路の各部電圧電流波形

Fig.2. Wave forms of voltage and current

リアクトルのインダクタンスが小さいとリアクトル電流にリップルが含まれ、出力電流 i_L の平均値 I_L が低下するため、 I_L は実際には $2\sqrt{2}$ 倍よりも小さくなる。電流リップルが大きくなるほど I_L の値は低下する。

3. リアクトルの電流リップルの算出

電流連続モードの倍電流整流回路におけるリアクトルの電流リップル ΔI_{pp} とインダクタンスの値 $L_1 (= L_2)$ の関係を明らかにし、リアクトルの電流リップルを算出する。正弦波定電流源を用いた場合の電流波形とリップルの関係を図 2 (b) に示す。リップルを求めるため、電流波形を検討する。まず入力電流 i_2 を余弦波としその振幅を I_0 とすると i_2 は (1) 式で表される。

$$i_2 = I_0 \cos(\omega t) \dots \dots \dots (1)$$

次にリアクトル電流 i_{L1} について検討する。 V_f は V_L とほぼ同じ値となるため $V_f \cong V_L$ とする。図 3 の A→C の範囲では、リアクトル L_1 に入力電圧 v_d が印加されないため、 L_1 にかかる電圧 V_{L1} は $-V_L$ と近似することができ、 i_{L1} は(2)式で表される。

$$i_{L1} = -\frac{V_L}{L_1}t + I_0 \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式の交点を $t_1(t_1>0)$ とすると(3)式が成り立つ。

$$I_0 \cos \omega t_1 = -\frac{V_L}{L_1}t_1 + I_0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $A=\cos\omega t_1$ とすると、リアクトルの電流リップルの peak to peak 値は(4)式で表される。

$$\Delta I_{pp} = I_0(1 - A) \dots\dots\dots (4)$$

(3), (4)式より t_1 は(5)式で表される。

$$t_1 = \frac{L_1}{V_L} \Delta I_{pp} = \frac{\cos^{-1} A}{\omega} \quad (\pi < \cos^{-1} A \leq 2\pi) \dots\dots\dots (5)$$

(5)式より、 ΔI_{pp} を L_1 を用いて表すと(6)式で表される。

$$\Delta I_{pp} = \frac{V_L \cos^{-1} A}{L_1 \omega} \dots\dots\dots (6)$$

また出力電流 I_L は I_{L1} , I_{L2} の和であるため、リアクトルの電流リップル ΔI_{pp} を用いて(7)式で求められる。

$$I_L = 2(I_0 - \frac{\Delta I_{pp}}{2}) \dots\dots\dots (7)$$

以上 (1)式~(7)式をまとめると①~④の手順でリアクトルの電流リップル ΔI_{pp} と出力電流 I_L が求まる。

- ① イミタンス変換器特性より、一次側のインバータ電圧 v_{in} を決めると、出力が定電流となるため I_0 が決まる。
- ② EDLC 充電開始時の電圧 V_L は既知なので、インダクタンス L_1 の値を決め、(3)式に代入すると t_1 が得られる。
- ③ $A=\cos\omega t_1$ として(6)式に代入するとリアクトルの電流リップル ΔI_{pp} の値が求まる。
- ④ リアクトルの電流リップル ΔI_{pp} の値を (7)式に代入すると出力電流 I_L の値が求まる。

逆に、目標の出力電流 I_L とリアクトルの電流リップル ΔI_{pp} を決定すれば、その値を満たす L_1 の最小値(= L_2)が決まり、一次側のインバータ電圧 v_{in} も決定することができる。

4. 給電実験による評価

(6)式の有用性を確認するため、図 1 の回路で EDLC への給電実験を行った。EDLC の充電電流のリップルによる発熱を避けるため、整流出力に LC フィルタを接続し、 $C_f=108\mu F$, $L_f=16\mu H$ とした。

電源周波数 $f_0=9.8kHz$, 倍電流整流回路のリアクトル L_1 , $L_2=100\mu H$, 出力電圧 $V_L=24, 42V$ とした時のリアクトルの

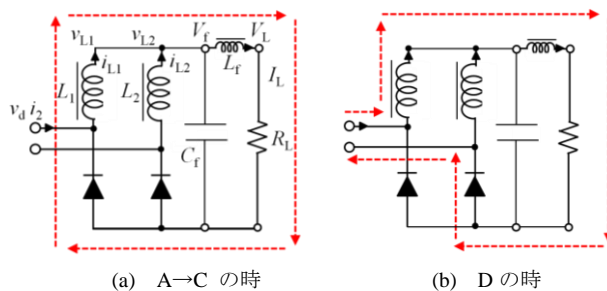


図 3 リアクトル電流 i_{L1} の電流経路
Fig.3. Current paths of i_{L1}

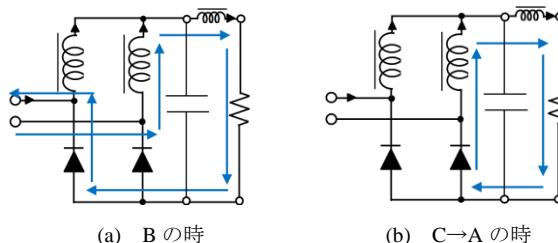


図 4 リアクトル電流 i_{L2} の電流経路
Fig.4. Current paths of i_{L2}

表 1 リアクトルの電流リップル ΔI_{pp} の比較

Table 1. Experimental results.

| I_0 [A] | V_L [V] | I_L [A] | 測定値 ΔI_{pp} [A] | 計算値 ΔI_{pp} [A] |
|-----------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| 46.9 | 24.0 | 75.0 | 19.1 | 20.6 |
| 51.1 | 42.0 | 70.0 | 30.7 | 34.5 |

電流リップル ΔI_{pp} について測定値と(6)式より算出した計算値を比較した。結果を表 1 に示す。表 1 から ΔI_{pp} の測定値と計算値の誤差は最大で 11% となり、(6)式の有用性を確認することができた。また ΔI_{pp} を(7)式に代入し出力電流 I_L の計算値を求めると、測定値との誤差は最大で 3.3% という結果が得られた。誤差の原因は $V_f \cong V_L$ として近似したことや、図 2(a)のように i_2 の電流波形が完全な正弦波ではないことが影響していると考えられる。

5. まとめ

SS 方式の非接触給電装置を定電圧で駆動した場合の、倍電流整流回路のリアクトルの電流リップルとインダクタンスの値の関係を明らかにし、リアクトルの電流リップル ΔI_{pp} の算出方法について示した。

文献

(1) 遠井・金子・阿部：電学半導体電力変換研資, SPC11-179(2011)
 (2) 山路・金・石原・戸高・坂口・内藤・橋口：電子情報通信学会技術研究報告. EE, 電子通信エネルギー技術 106(337), 19-24, (2006)
 (3) 中野・樋口・平地：電学論 D, Vol.116, No.10 pp.1081-1082 (1996)
 (4) 遠井・工藤・金子・阿部：電学半導体電力変換研資, SPC13-013 (2013)