変圧器の励磁電流は負荷に供給されることも多い

平地 克也*

Magnetizing Current of Transformer is usually Provided to Load

Katsuya Hirachi*

Abstract - Currents of transformer consist of load current and magnetizing current. It is believed that magnetizing current flows only in primary winding and is not provided to load. It is correct for ordinary transformers but not for transformers of DC/DC converters. In this paper, many examples in which magnetizing currents flow in secondary winding and provided to load are described.

キーワード : DC/DC コンバータ、励磁電流、高周波トランス

Keywords : DC/DC converter, magnetizing current, high frequency transformer

1. はじめに

変圧器の電流には負荷電流と励磁電流の2種類があり、負荷電流は1次巻線と2次巻線を共に流れるが、励磁電流は1次巻線のみを流れ負荷には供給されない、と考えられている。通常の変圧器では確かにその通りであるが、DC/DCコンバータの高周波変圧器ではこの常識は通用せず、励磁電流は1次巻線にも2次巻線にも流れるのが普通である。負荷に供給される場合も多い。励磁電流は1次巻線のみ流れて負荷には供給されないという常識がDC/DCコンバータの正確な理解を妨げていると思われる^[1]。

本論文ではDC/DCコンバータの高周波変圧器の励磁電流が有する重要な特性を説明し、励磁電流が2次巻線にも流れ、負荷にも供給されることを示す。そして、励磁電流のこのような特性を考慮することによりDC/DCコンバータの正確な理解が可能となることを4種類のDC/DCコンバータの実験結果に基づいて説明する。

2. 励磁電流の経路

〈2・1〉 変圧器の基礎 図1に変圧器の電流と磁束を示す。1次巻線 N_1 を流れる励磁電流 i_m が磁束 ϕ_m を作り、2次巻線 N_2 に鎖交して電圧 v_2 を発生させる。 v_2 は負荷 R_L に負荷電流 i_2 を流し、1次巻線には $i_2 \times (N_2/N_1)$ の大きさの負荷電流 i_1 が流れる。 i_1 と i_2 はその「電流×ターン数」に比例した磁束 ϕ_{m1} と ϕ_{m2} を発生させようとするが、 $i_1 N_1 = i_2 N_2$ なので ϕ_{m1} と ϕ_{m2} は同じ大きさであり互いに打ち消し

合う。以上をまとめると変圧器の基礎として次の2項目が成立する^[2]。

- ① 磁束を作らない電流（負荷電流）には必ずペアになる電流があり互いに磁束を打ち消し合っている。
- ② 励磁電流にはペアになる電流がない。

図1 変圧器の電流と磁束

〈2・2〉 DC/DC コンバータの励磁電流の経路 図1のような通常の変圧器では励磁電流 i_m は常に1次巻線を流れる。しかし、DC/DCコンバータではやや複雑である^[3]。

1石フォワード型DC/DCコンバータの場合を図2に示す。スイッチ素子 Q_1 がONしている時の電流経路を図2(a)に示す。1次巻線 N_1 に負荷電流 i_1 と励磁電流 i_m が流れ、2次巻線には負荷電流 i_2 だけが流れている。 i_1 と i_2 は互いに逆方向の磁束を作り、打ち消しあっている。 Q_1 がOFFすると N_1 巻線の電流経路が断たれ、よく知られているように、図2(b)に示すように励磁電流 i_m は N_3 巻線に転流する。なお、詳しく説明するならば、 Q_1 がOFFすると i_m はまず R_1 と C_1 に転流し、 C_1 の充電が完了後 N_3 巻線に転流する。なお、後述するように、その後 N_2 巻線にも転流する^[4-8]。

図3のフライバック型DC/DCコンバータでは Q_1 がONの時は図3(a)のように N_1 巻線に電流 i_1 が流れ、 Q_1 がOFFの時

* 舞鶴工業高等専門学校
〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋 234 番地
Maizuru National College of Technology
234 Aza Shiroya, Maizuru, Kyoto, Japan 625-8511

は図 3(b)のように N_2 巻線に電流 i_2 が流れる。図 3(a)(b)から明かなように i_1 と i_2 は共にペアになる電流がないので磁束を作るので励磁電流である。そして、図 3(b)から分かるように、 i_2 は負荷に供給される。変圧器の常識では励磁電流は負荷には供給されないが、DC/DC コンバータでは必ずしも常識通りではないように思える^[9]。

図 4 に多出力フライバック型 DC/DC コンバータを示す。よく知られているように、2 次側巻線のターン数が全て同じ (n_2 ターン) なら全ての出力電圧は等しくなる。それは Q_1 が OFF の時は励磁電流が V_{O1} 、 V_{O2} 、 V_{O3} のうち最も電圧の低い回路の巻線に転流するからである。その結果、その回路の電圧は上昇し、結局 $V_{O1}=V_{O2}=V_{O3}$ となる。

図 5 に 2 出力昇降圧チョップを示す。 Q_1 が ON の時に流れる電流 i_m は励磁電流である。 Q_1 が OFF すると励磁電流 i_m は i_1 と i_2 に転流するが、もし $V_{O1}>V_{O2}$ なら励磁電流は全て i_2 に転流し、逆に $V_{O1}<V_{O2}$ なら全て i_1 に転流する。その結果 $V_{O1}=V_{O2}$ となる。この性質は 2 つの等しい電圧を得たい場合に使用される^[10,11]。

以上様々な DC/DC コンバータの動作から DC/DC コンバータの励磁電流の振る舞いはかなり複雑であり、変圧器の常識がそのまま適用できない可能性があることが分かる。

(a) Q_1 が ON している時

(b) Q_1 が OFF している時

図 2 1 石フォワード型 DC/DC コンバータ

図 3 フライバック型 DC/DC コンバータの電流経路

図 4 多出力フライバック型 DC/DC コンバータ

図 5 2 出力昇降圧チョップ

〈2・3〉 変圧器の励磁電流とリアクトル電流

「変圧器の電流と磁束」において負荷 R_L を取り外すと i_2 と i_1 は 0A になるが、 i_m は流れ続ける。この場合は 2 次巻線 N_2 は不要なので N_2 も取り外すと図 6(a)となる。この図は即ちリアクトルに他ならない。従って変圧器の励磁電流はリアクトルの電流と同じものである。リアクトルは通常図 6(b)のように鉄心の一部にギャップを挿入するが、これは鉄心の磁気抵抗を大きくして励磁電流 i_m を大きくするためである。リアクトルには大きな電流を流すことが多いのでこのような工夫をしている。逆に変圧器の励磁電流は通常は小さい方が好都合なのでギャップを設けないのが普通である。

図 6 変圧器とリアクトル

図 7 に変圧器とリアクトルの BH 曲線の概要を示す。変圧器は通常ギャップを設けないので(a)のように H は小さくヒステリシス特性を持った独特の形状となる。ギャップを挿入すると(b)のように H が大となり細長い楕円形となる。

図7 変圧器とリアクトルのBH曲線

さらにギャップを大きくすると(c)のようにほぼ直線に近い形状となる。リアクトルは通常大きなギャップを入れるので(c)の形状となっている。なお、励磁電流 I_m と磁界 H は

$$I_m N = H l \quad (N \text{ はターン数、} l \text{ (m) は磁路長})$$

の関係にあり I_m は H に比例する。

上記のように、変圧器ではギャップは挿入せず、リアクトルではギャップを挿入するのが普通であるが、例外も多い。1石フォワード型(図2)では鉄心のリセットを促進するために小さなギャップを入れることがある。プッシュプル型(図12)では偏磁抑制のためにギャップを挿入することが多い。フライバック型(図3)では大きなギャップを挿入する。逆にリアクトルでギャップを挿入しないこともある。圧粉鉄心では透磁率が低いのでギャップを挿入しない。コモンモードチョークではノーマルモードの電流は小さいので大きなインダクタンスを得るためにギャップは挿入しない。よって、ギャップの有無も変圧器とリアクトルを区別する基準とは言えず、結局変圧器の励磁電流とリアクトル電流を区別するものは何もないと言える。

〈2・3〉 励磁電流の重要な性質その1 リアクトルの電圧 v と電流 i の関係は次の式による。

$$v = L \frac{di}{dt} \quad i = \frac{1}{L} \int v dt$$

リアクトル印加電圧 v が一定値 V_L なら次の式になる。

$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta T}$$

$$\text{よって、} \Delta I = \frac{1}{L} V_L \Delta T \quad \cdots \cdots (1) \text{式}$$

(1)式は次のことを表している。

「リアクトル電流の変化量 ΔI は印加電圧 V_L と印加する時間 ΔT の積に比例する」

よって、

「 $\Delta T=0$ なら $\Delta I=0$ であり、リアクトル電流は変化しない」
励磁電流はリアクトル電流と同じなので、次のようになる。
「励磁電流の変化量は変圧器印加電圧と印加時間 ΔT の積に比例する」

よって、

「 $\Delta T=0$ なら励磁電流 i_m は変化しない」

したがって、例えばスイッチ素子の ON/OFF により i_m の電流経路が妨げられても i_m はとにかく何としても同じ大きさ

で流れ続けねばならない。以上のことから励磁電流には次の重要な性質があることが分かる。

重要な性質その1：励磁電流は回路条件が変わっても流れ続ける

〈2・4〉 励磁電流の重要な性質その2 図2(a)では N_1 巻線に電源電圧が印加されているので励磁電流は当然 N_1 巻線を通る。図2(b)では N_1 巻線は Q_1 が OFF しているので流れることができず、 N_2 巻線は D_2 が逆バイアスされているので流れることができず、励磁電流は結局 N_3 巻線に流れる。

図4の多出力フライバック型 DC/DC コンバータの Q_1 ターンオフ直後の動作は図8のような等価回路を考えると分かり易い。励磁電流は回路条件にかかわらずに流れ続けるので電流源 I_m と考える。電流 i_m は当然 C_1 、 C_2 、 C_3 のうち最も電圧の低いコンデンサに流れる。図5「2出力昇降圧チョップ」の場合も図8と同様に考えられる。このように、励磁電流は動作モードにより変化する回路の状態に対応して最も流れやすい巻線を通る。以上のことから励磁電流には次の重要な性質があることが分かる。

重要な性質その2：励磁電流は最も流れやすい巻線を通る

図8 Q_1 のターンオフ直後の等価回路

3. 各種 DD コンの励磁電流の経路

〈3・1〉 1石フォワード型 DC/DC コンバータ 図2(a)(b)にて1石フォワード型 DC/DC コンバータの Q_1 が ON している時と OFF している時の電流経路を示したが、(b)のモードでは変圧器には電源電圧 V_{in} が負方向に印加されているので(1)式に従って励磁電流の変化量 Δi_m は次の式で与えられる。

$$\Delta i_m = \frac{1}{L}(-V_{in})\Delta T$$

したがって、励磁電流 i_m は時間の経過 ΔT と共に減少し、やがて 0A となる。次に C_1 の電圧により逆方向に励磁され図 9(a)のように「 $C_1 \rightarrow R_1 \rightarrow N_1 \rightarrow C_{in} \rightarrow C_1$ 」の経路で負方向に励磁電流が流れる。そして C_1 が電源電圧 V_{in} と同じ電圧まで放電すると D_2 が順バイアスされ、励磁電流は N_1 巻線から N_2 巻線に転流する (図 9(b))。図 10 の楕円で示した波形はこの時の D_2 電流である^[5-7]。図 9(b)の電流経路から明らかに、この励磁電流は負荷に供給されている。励磁電流が負荷に供給されることはフライバック型 (図 3) だけの特殊な現象ではなく、フォワード型でも同じことが生じている。また、図 9 のように励磁電流が負方向に流れていることから 1 石フォワード型 DC/DC コンバータでは変圧器の BH 曲線は図 11(b)に示すように第 3 象限に及んでいると考えられる。よって、従来の定説では図 11(a)に示すように変圧器の最大磁束密度 B_m は「 $B_m = B_r + \Delta B$ 」であったが^[12-14]、実際には、図 11(b)に示すように「 $B_m < \Delta B$ 」であることが分かる^[6]。

図 9 1 石フォワード型 DD コンの電流経路

上：FET の V_{ds} (50V/div)、下： D_2 電流 (2A/div)

時間：10 μ sec/div

図 10 1 石フォワード型 DC/DC コンバータの波形

図 11 フォワード型 DC/DC コンバータの BH 曲線

〈3・2〉 プッシュプル型 DC/DC コンバータ プッシュプル型 DC/DC コンバータは 2 つのスイッチ素子 Q_1 、 Q_2 の ON/OFF に応じて 4 つの動作モードがある。図 12 に各動作モードの電流経路を示す。Mode①では Q_1 が ON、 Q_2 が OFF しており、負荷電流、励磁電流共に n_1 巻線を流れる。Mode①の状態から Q_1 が OFF して Mode②に移行する。 Q_1 が OFF すると負荷電流は 2 次側に転流し、 $D_2 \rightarrow D_1$ 、および $D_4 \rightarrow D_3$ の経路で流れる。励磁電流も Q_1 が OFF しても流れ続けなければならないので最も流れやすい n_3 巻線に転流し、 $n_3 \rightarrow D_1 \rightarrow D_3 \rightarrow n_3$ および $n_3 \rightarrow D_2 \rightarrow D_4 \rightarrow n_3$ の 2 つの経路で流れる。励磁電流は D_3 と D_2 を逆流することになるが、励磁電流より大きな負荷電流が順方向に流れているので D_3 と D_2 の全体の電流は正方向である。Mode③は Q_2 が ON、 Q_1 が OFF であり、Mode①と対称的な動作を行う。Mode③から Q_2 が OFF して Mode④となる。Mode④は Mode②と同様の動作を行うが、励磁電流の方向が逆であり、 D_1 と D_4 が逆流となる。

図 13 に D_1 と D_2 の電流波形を示す。励磁電流が無視できるなら D_1 電流と D_2 電流は Mode②と Mode④で全て等しくなるが、 D_1 電流は Mode②では励磁電流が加算、④では減算されるので Mode②の電流が大きくなっている。 D_2 電流はその逆である。

プッシュプル型 DC/DC コンバータの 2 次側を流れる励磁電流は軽負荷時の出力電圧や偏磁現象の抑制効果に大きな影響を与えることが確認されている^{[15][16]}。

(a) Mode① (Q_1 :ON Q_2 :OFF)

(b) Mode② (Q_1 :OFF Q_2 :OFF)

(c) Mode③ (Q_1 :OFF Q_2 :ON)

(d) Mode④ (Q_1 :OFF Q_2 :OFF)

→ 負荷電流 - - - - - 励磁電流

図 12 プッシュプル型 DC/DC コンバータの電流経路

図 13 D_1 、 D_2 の電流波形 i_{D1} 、 i_{D2}

〈3・3〉 絶縁型 ZETA コンバータ 図 14 に絶縁型 ZETA コンバータの回路図と電流経路を示す。 Q_1 が ON の時は図 2(a) (1 石フォワード型 DD コン) と同様に負荷電流は n_1 巻線と n_2 巻線の流れ、励磁電流は n_1 巻線の流れる。

Q_1 が OFF すると負荷電流は図 2(b) (1 石フォワード型 DD コン) と同様にダイオード D_1 を通って環流するが、励磁電流は図 2(b) とは異なり n_3 巻線がないので n_2 巻線に転流して C_2 を充電する。励磁電流によって C_2 に蓄積された電荷は次の Q_1 ON 時に図 14(a) に示す経路で負荷に供給される。よって、絶縁型 ZETA コンバータでも励磁電流は負荷に供給される。

図 15 と図 16 に実測波形を示す^[17]。 $n_1 : n_2 = 1 : 1$ 、 Q_1 の通流率は約 0.5 としている。この時は図 14 の電流経路から明かなように次の 4 つの電流の平均値は全て同じ値となる：
① Q_1 ON 時の励磁電流 ② Q_1 OFF 時の励磁電流 ③ Q_1 ON 時の 2 次側負荷電流 ④ Q_1 ON 時の 1 次側負荷電流
(励磁電流は同じ値で連続するので①と②は等しい)
(C_2 の充電電荷と放電電荷は同じなので②と③は等しい)
(変圧比は 1 : 1 なので③と④は等しい)

図 15 と図 16 の波形から①～④それぞれの平均値は全て等しく 2A になっていることが分かる。

(a) Q_1 ON 時

(b) Q_1 OFF 時

図 14 絶縁型 ZETA コンバータの電流経路

Q_1 の V_{DS}

10V/div

10 μ sec/div

0V →

I_{n1}

2A/div

0A →

(Q_1 ON 時は n_1 には負荷電流+励磁電流が流れている)

図 15 絶縁型 ZETA の Q_1 の V_{DS} と n_1 電流 I_{n1}

Q1 の V_{DS}
10V/div
10 μ sec/div
0V $\rightarrow$
In2 2A/div
0A $\rightarrow$

(n2 には Q1 ON 時は負荷電流、OFF 時は励磁電流が流れている)

図 16 Q1 の V_{DS} と n2 電流 In2 (n1 : n2 = 1 : 1)

〈3・4〉 絶縁型 SEPIC コンバータ 図 17 に絶縁型 SEPIC コンバータの回路図と電流経路を示す。絶縁型 ZETA コンバータと同様に励磁電流は 2 次巻線にも流れ負荷に供給される。図 18 と図 19 に実測波形を示す。n1 : n2 = 1 : 1、Q1 の通流率は約 0.5 としている。この時は図 17 の電流経路から明かなように次の 4 つの電流の平均値は全て同じ値となる：

- ① Q1 ON 時の 1 次巻線励磁電流 ② Q1 OFF 時の 2 次巻線励磁電流 ③ Q1 OFF 時の 1 次側負荷電流 ④ Q1 OFF 時の 2 次側負荷電流

(励磁電流は同じ値で連続するので①と②は等しい)
(C2 の充電電荷と放電電荷は同じなので①と③は等しい)
(変圧比は 1 : 1 なので③と④は等しい)

図 18 と図 19 の波形から①～④それぞれの平均値は全て等しく 2A になっていることが分かる^[18]。

(a) Q1 ON 時

(b) Q1 OFF 時

図 17 絶縁型 SEPIC コンバータの電流経路

V_g
5V/div
10 μ sec/div
0V $\rightarrow$
In1 2A/div
0A $\rightarrow$

(n1 には Q1 ON 時は励磁電流、OFF 時は負荷電流が流れている)

図 18 絶縁型 SEPIC の Q1 ゲート電圧 V_g と n1 電流 In1

V_g
5V/div
10 μ sec/div
0V $\rightarrow$
In2 2A/div
0A $\rightarrow$

(n1 : n2 = 1 : 1)

(Q1 OFF 時は n2 には負荷電流 + 励磁電流が流れている)

図 19 絶縁型 SEPIC の Q1 ゲート電圧 V_g と n2 電流 In2

3. むすび

励磁電流は 1 次巻線のみ流れ、負荷には供給されない、という変圧器の常識は DC/DC コンバータでは通用しないことを示した。そして DC/DC コンバータの変圧器には次の 2 つの重要な性質があることを示した。

- ① 励磁電流は回路条件が変わっても流れ続ける
- ② 励磁電流は最も流れやすい巻線を通る

この性質の結果として励磁電流は 2 次巻線にも流れ、負荷に供給されることも多い。具体例として 1 石フォワード型 DC/DC コンバータ、プッシュプル型 DC/DC コンバータ、絶縁型 ZETA コンバータ、絶縁型 SEPIC コンバータの励磁電流の実測波形を示した。励磁電流の 2 次側への転流を考慮して初めて DC/DC コンバータの正確な理解が得られることを確認した。

(2013 年 10 月 19 日発表)

文 献

- [1] 平地克也：「変圧器の励磁電流は 2 次巻線に流れることも多い」、平成 25 年電気学会産業応用部門大会、第 1 分冊、pp.327-330, 2013

- [2] 平地研究室技術メモ No.20071118、「変圧器の基本」
- [3] 平地研究室技術メモ No.20100817、「励磁電流の重要な性質」
- [4] 平地研究室技術メモ No.20061230、「フォワード型 DC/DC コンバータの負方向の励磁電流」
- [5] 平地研究室技術メモ No.20070106、「フォワード型 DC/DC コンバータの 2 次側を流れる励磁電流」
- [6] 平地克也、人見剛士：「フォワード型 DC/DC コンバータの励磁電流の経路について」、電子情報通信学会、信学技報、EE2006-30, 2006
- [7] 人見剛士、平地克也：「フォワード型 DC/DC コンバータの励磁電流の検討」、パワーエレクトロニクス学会誌、Vol.32, pp.69-75, 2007
- [8] 村上直樹、山崎幹夫：「一石フォワードコンバータにおける主トランスリセット条件の解析」、電子情報通信学会、信学技報、PE84-26, 1984
- [9] 平地研究室技術メモ No.20100730、「変圧器の励磁電流と負荷電流」
- [10] 平地研究室技術メモ No.20080324、「2 出力昇降圧チョッパの紹介」
- [11] 井上修平、平地克也、坂根誠、山中雅雄：「2 つの出力を有する昇降圧チョッパ回路の特性解析」、電気学会半導体電力変換研究会資料、SPC08-6, pp.37-42, 2008
- [12] 白庄司進、戸川治郎：「スイッチングレギュレータの設計法とパワーデバイスの使いかた 8 章 各種方式の回路設計法と応用例」、誠文堂新光社、96 頁、1981 年
- [13] 長谷川彰：「スイッチングレギュレータ設計ノウハウ 3.5 節 高周波変圧器の最適設計」、CQ 出版社、95 頁、1993 年
- [14] 原田耕介、他：「スイッチング電源ハンドブック 2.1 節 基本回路と設計演習」、日刊工業新聞社、28 頁、1993 年
- [15] 平地研究室技術メモ No.20110228、「電圧型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの励磁電流について」
- [16] 石田武揚、平地克也：「プッシュプル方式 DC/DC コンバータの励磁電流と偏磁現象について」、パワーエレクトロニクス学会誌、Vol.38, JIPE-38-19, pp.149-156, 2012
- [17] 平地研究室技術メモ No.20130531、「Zeta コンバータの基本特性」
- [18] 平地研究室技術メモ No.20120130、「絶縁型 SEPIC コンバータ」
- [19] 平地研究室技術メモ No.20111123、「DC/DC コンバータの励磁電流の測定方法とシミュレーション方法」
- [20] 佐藤美澄、平地克也：「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータの励磁電流について」、パワーエレクトロニクス学会誌、Vol.37, p.244, 2012

<平地研究室技術メモのアドレス：http://hirachi.cocolog-nifty.com/kh/>

平地 克也

1954 年 5 月 22 日生まれ。1979 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月湯浅電池株式会社入社、無停電電源装置、スイッチング電源、高力率コンバータ、太陽光発電システム、連系インバータなどの研究開発に従事。1999 年 3 月山口大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。2004 年 8 月国立舞鶴工業高等専門学校電気情報工学科教授、現在に至る。博士（工学）。電気学会、電子情報通信学会、パワーエレクトロニクス学会など会員。

【質 疑】

パナソニック株式会社・澤井徹郎氏

【質問 1】 プッシュプル方式の励磁電流が 2 次側のダイオードを逆流するのはどのようなイメージを持てば良いか。

【回答 1】 例えば、Mode②のダイオード D3 において、通常は負荷電流 > 励磁電流なので励磁電流は D3 を逆流できる。しかし、負荷電流 < 励磁電流となると両者の合計が負となるので D3 を逆流できず、動作モードが変化する、という内容で説明しています。

「ダイオードを逆流する」という考え方は確かになじみにくいかもしれませんが。その場合は下の図のように考えて下さい。Mode②では負荷電流（実線）は D4→D3 と D2→D1 の 2 つの経路に分流する。励磁電流（点線）は D4→n3→D1 の経路で流れる。励磁電流の分だけ D1 と D4 の電流は大きくなる。励磁電流と負荷電流の合計（即ち L1 電流）は一定なので励磁電流の分だけ D3 と D2 の電流は小さくなる。励磁電流が増加し、D3 と D2 の電流が 0A となるとそれ以上の励磁電流は下図の経路では流れることができないので動作モードが変化する。

【質問 2】 励磁電流の 2 次側への転流や負荷への供給はシミュレーションでも表現できるか。

【回答 2】 シミュレーションでも正確に表現できます。変圧器には特殊なモデルは不要であり、1 次巻線と並列に励磁インダクタンスを配置するだけで OK です。詳細は文献 [19] を参照下さい。

【質問 3】 フォワード方式において主スイッチ素子の寄生容量は励磁電流に影響するか。

【回答 3】 影響します。寄生容量の分だけスナバコンデンサ C1（図 2）が増加したのと同じ影響があります。従ってスナバコンデンサ C1 がなくても寄生容量だけで励磁電流の 2 次側への転流は発生します。文献 [6] の図 10 にその時の波形写真を掲載しています。

【質問4】 軽負荷時の励磁電流による出力電圧の跳ね上がり現象はプッシュプル方式以外でも発生するか。

【回答4】 フルブリッジ方式も励磁電流の径路はプッシュプル方式とほぼ同じです（文献[20]）。よって、フルブリッジ方式でも同様の現象が発生すると思われます。

（株）村田製作所・細谷達也氏

【質問1】 スイッチ素子の ON/OFF など動作モードが変わっても励磁電流は連続して流れ続ける、と説明されていますが、磁束保存より磁束が連続である、との理解が本質であり、これを起点としての説明と比較するとどのような理解になるのでしょうか。

【回答1】 通常の DC/DC コンバータではほぼ全ての磁束が鉄心の中を流れています。鉄心の磁束と励磁電流は正確に比例します。よって、磁束の連続はそのまま励磁電流の連続を意味しています。しかし、例えば非接触電力伝送などのように漏れ磁束が大きい場合はその影響を無視できません。その点は今後の検討課題です。

【質問2】 多出力フライバック型 DC/DC コンバータでは励磁電流は最も流れやすい所、即ち電圧の最も低い所に流れる、という説明がありました。しかし、「流れやすい所」ではなく、ダイオードの作用により電圧の低い所へ電流が流れているのではないか。流れやすさはインピーダンスで決まり、スイッチの作用とは別ではないか。

【回答2】 「ダイオードの作用により電圧の低い所へ電流が流れている」という考え方で間違いないと思います。例えば図8では C1 の電圧が最も低いと D1 が導通し、その結果 D2 と D3 は逆バイアスされて C2 と C3 には電流は流れません。

元大阪電気通信大学・入江寿一氏

【質問1】 DC/DC コンバータでは変圧器に対して「結合リアクトル」という言葉が使われます。変圧器がリアクトル的な動作をするという意味だと思います。見解はいかがですか。

【回答1】 例えば図3のフライバック型 DC/DC コンバータでは変圧器が特殊な動作（リアクトル的な動作）を行うので、これは変圧器ではなく結合リアクトルなのだ、というように説明されることがあります。しかし、第2章で説明したようにリアクトル電流と変圧器の励磁電流は同じものであり、両者を区別して考える必要はないと思います。

フライバック型 DC/DC コンバータの変圧器もフォワード型の変圧器も励磁電流の大きさが異なる以外に違いは無く、同じ原理に基づいて同じように動作していると思います。