

## 位相シフトフルブリッジ方式の軽負荷時のソフトスイッチング方法

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

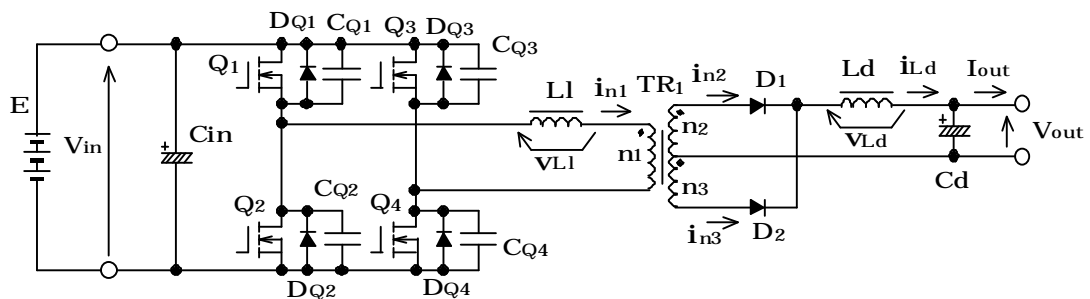
2017/5/1 舞鶴高専 平地克也

**【あらし】** 位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータは進みレグと遅れレグの 2 つのレグでブリッジ回路を構成している。このうち遅れレグのソフトスイッチングは、変圧器の漏れインダクタンスに蓄積されたエネルギーを利用して実現されるので、このエネルギーが小さくなる軽負荷時はソフトスイッチングが困難となる。この場合、変圧器の漏れインダクタンスの代わりに励磁インダクタンスに蓄積されたエネルギーを用いてソフトスイッチングを実現することができる。しかしながら、軽負荷時は平滑リアクトルが電流不連続モードで動作することがあり、その場合は励磁インダクタンスに蓄積されるエネルギーが小さくなり、ソフトスイッチングが困難となる。本技術メモではそのような場合でもソフトスイッチングを実現できる方法を紹介する。

### 位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータの動作

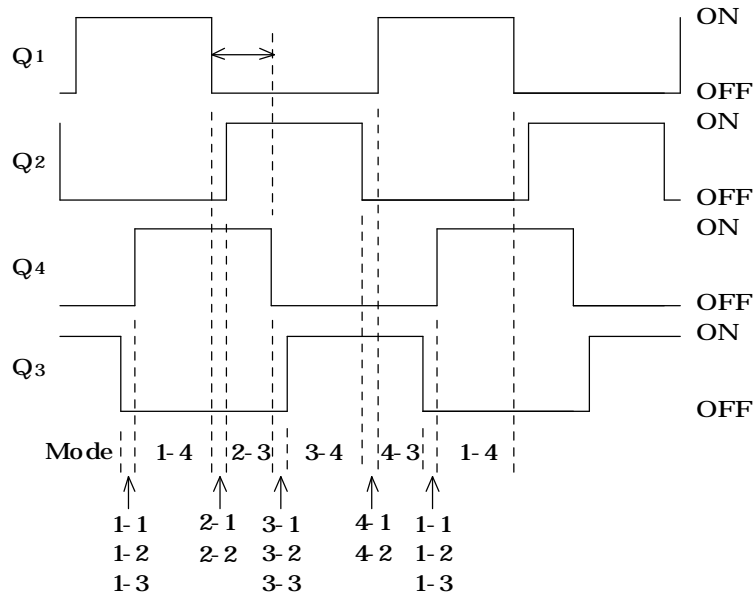
図 1 に位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータの回路構成を示す。スイッチ素子  $Q_1, Q_2$  で進みレグ、 $Q_3, Q_4$  で遅れレグをそれぞれ構成している。ダイオード  $D_{Q1}, D_{Q2}, D_{Q3}, D_{Q4}$  はスイッチ素子が FET の場合はその寄生ダイオードを使用する。 $C_{Q1}, C_{Q2}, C_{Q3}, C_{Q4}$  は各スイッチ素子の寄生容量であるが、スナバコンデンサを設ける場合は寄生容量とスナバコンデンサの容量の合計である。 $L_l$  は変圧器  $TR_1$  の漏れインダクタンスである。

図 2 に各スイッチ素子の ON/OFF のタイムチャートと動作モードを示す。Mode1-4 と 3-4 は  $Q_1, Q_4$  または  $Q_2, Q_3$  がオンしており、出力側に電力が伝達されるので伝達モードと呼ぶ。Mode2-3 と 4-3 は  $Q_2, Q_4$  または  $Q_1, Q_3$  がオンしており、電流が 1 次側を環流するので環流モードと呼ぶ。これら 4 つの主要な動作モードの間に、例えば Mode2-1, 2-2 などの短時間の過渡的な動作モードがあり、スイッチ素子のソフトスイッチングはこの過渡的な動作モードの間に行われる。これら多数の動作モードの動作内容とソフトスイッチングの動作原理は文献[1]と[2]で詳しく説明されている。



(進みレグ： $Q_1, Q_2$ 、遅れレグ： $Q_3, Q_4$ )

図 1 位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータ



(デッドタイムは実際の値より長く表示している)

図2 スイッチ素子の ON/OFF のタイムチャートと動作モード番号

### 遅れレグのソフトスイッチング (文献[3]より)

図3に遅れレグの過渡時の動作を示す。Mode2-3(環流モード)からQ4がターンオフしてMode3-1となり、C<sub>Q4</sub>が充電されC<sub>Q3</sub>が放電する。充放電が完了するとD<sub>Q3</sub>が導通しMode3-2となり、この期間にQ3がZVSでターンオンすることによりソフトスイッチングが実現される。したがって、Mode3-1でC<sub>Q3</sub>とC<sub>Q4</sub>の充放電が完了することがソフトスイッチング成立の条件である。

図4(a)にMode3-1の等価回路を示す。図3(b)において、電流の流れていない部品は削除し導通しているスイッチ素子は短絡している。また、2次側整流ダイオードはD<sub>1</sub>,D<sub>2</sub>双方が導通して変圧器は短絡状態なので図4(a)では変圧器を短絡して削除している。図4(a)を整理し、等価変換すると図4(c)となるので、C<sub>Q3</sub>,C<sub>Q4</sub>の充放電が完了する条件は次式で表されることが分かる。なお、I<sub>n1</sub>は

Mode2-3(環流モード)終了時点の変圧器1次巻線電流i<sub>n1</sub>の大きさである。

$$\frac{1}{2}L_l I_{n1}^2 > \frac{1}{2}(C_{Q3} + C_{Q4})V_{in}^2 \quad \dots (1)$$

したがって、遅れレグのソフトスイッチングを成立させるにはI<sub>n1</sub>が(1)式を満足するような大きさになければならないが、軽負荷時はI<sub>n1</sub>が小さくなり、(1)式を満足させることが難しくなる。

### 励磁電流によるソフトスイッチング

上記のように、軽負荷時は漏れインダクタンスの蓄積エネルギーが小さいのでソフトスイッチングが困難となる。そこで、漏れインダクタンスによらず、励磁インダクタンスの蓄積エネルギーによるソフトスイッチングが行われる。詳細は文献[4]で説明されているが、負荷が軽くなっても励磁電流は減少しないので、軽負荷時でも励磁電流でC<sub>Q3</sub>,C<sub>Q4</sub>の充放電を行うことができる。しかしながら、この方法も万能ではなく、文献[4]でも説明しているように励磁電流は2次側に転流するのでC<sub>Q3</sub>,C<sub>Q4</sub>

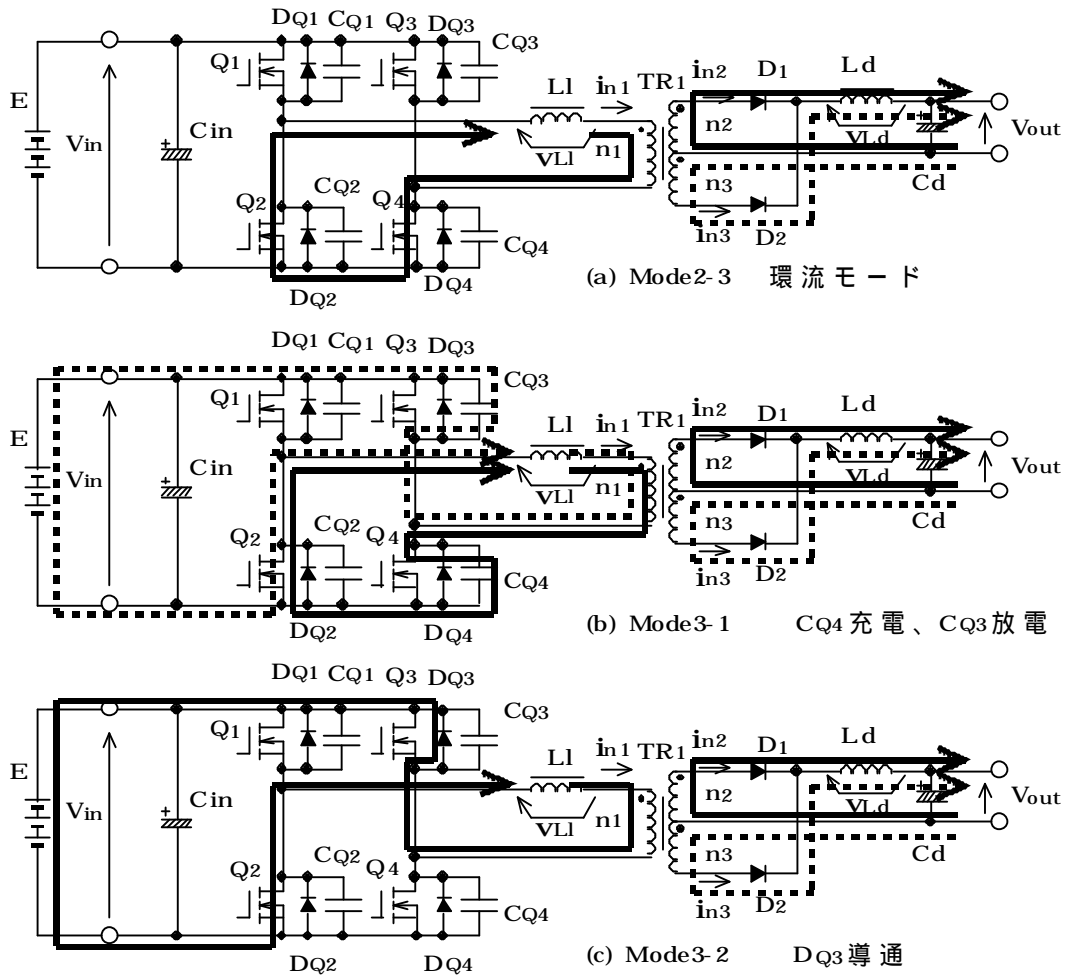


図3 遅れレグの過渡時の動作

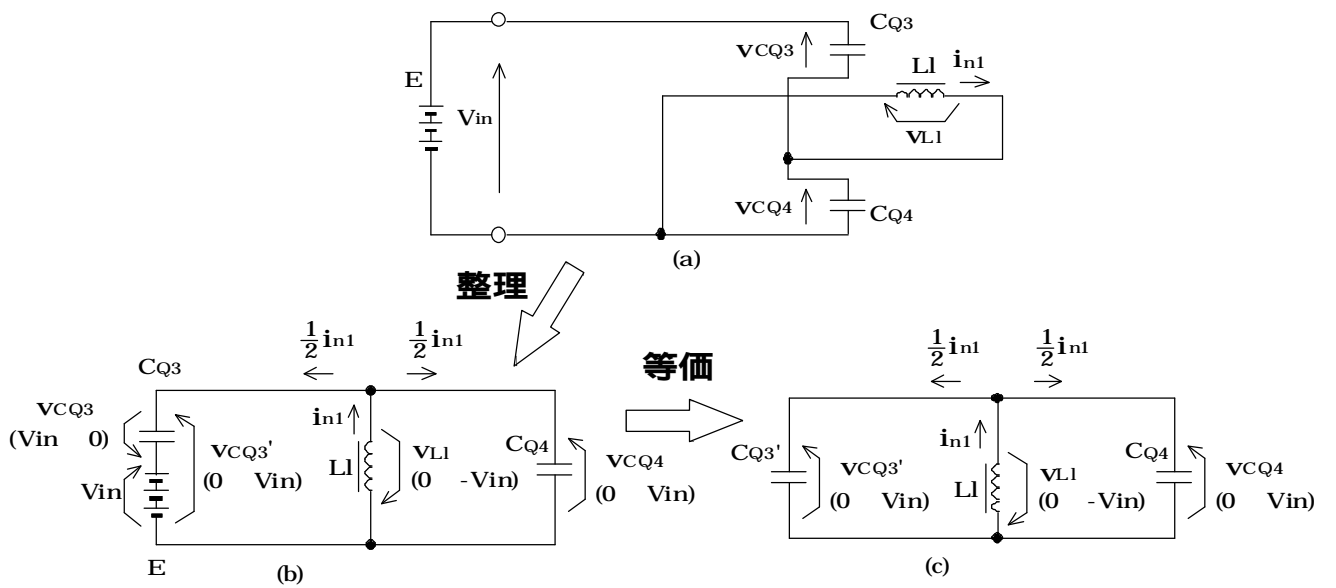
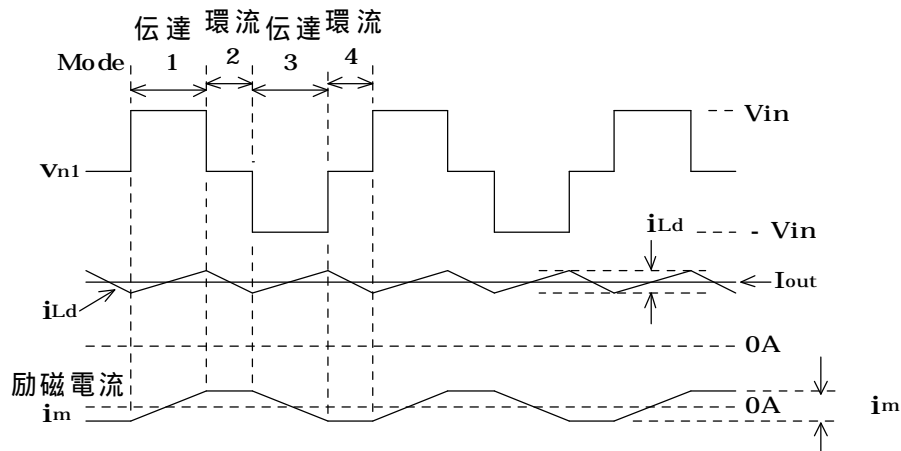


図4 Mode3-1の等価回路

の充放電を完了できない場合もある。

さらに、平滑リアクトルが電流不連続モードとなるような軽負荷時には、次に示すような現象が発生し、励磁電流によるソフトスイッチングは困難となる。図5に位相シフトフルブリッジ方式の主要波形を示す。出力電流  $I_{out}$  は平滑リアクトルの電流  $i_{Ld}$  の平均値なので、 $I_{out} < i_{Ld} / 2$  となると  $i_{Ld}$  は不連続となり、出力電圧  $V_{out}$  が跳ね上がろうとする。その結果、定電圧制御を行うには位相シフトの角度（図2参照）を増やして伝達モードの割合を小さくしなければならない。図5に示すように、環流モードの励磁電流の大きさは  $i_m / 2$  であり、 $i_m$  は伝達モードの長さに比例する。したがって、平滑リアクトルが電流不連続モードとなると励磁電流が小さくなり、励磁電流によるソフトスイッチングも困難となる。



(過渡時の動作モードは無視している)

図5 位相シフトフルブリッジ方式の主要波形

### 補助回路によるソフトスイッチング

軽負荷時の遅れレグのソフトスイッチングを確保する方法として、図6のように補助回路を付加する方式が使用されている。C1,C2,L1が付加された補助回路である。C1,C2で入力電圧  $V_{in}$  を  $1/2$  に分圧している。L1は分圧電位と  $n_1$  巻線のセンタタップの間に接続される。

図7に補助回路の波形を示す。軽負荷時に平滑リアクトル  $L_d$  が電流不連続モードで動作している時を想定し、伝達モードの割合が小さい時の波形を示している。伝達モードでは  $n_1$  巻線のセンタタップの電位は  $V_{in} / 2$  となるので  $L_1$  の電圧  $v_{L1}$  はゼロである。環流モードの Mode2 では  $Q_2$  と  $Q_4$  がオンしているので、 $n_1$  巻線の電位は  $0V$  なので、 $v_{L1} = V_{in} / 2$  である。Mode4 では  $Q_1$  と  $Q_3$  がオンしているので、 $n_1$  巻線の電位は  $V_{in}$  なので、 $v_{L1} = -V_{in} / 2$  である。したがって、 $L_1$  の電流  $i_{L1}$  は Mode 2 で増加、Mode 4 で減少、Mode1 と 3 では一定となる。環流モードで増加または減少するので、環流モードが長いほどピーク値が大きくなり、 $C_{Q3}, C_{Q4}$  の充放電を確実に実現することができる。充放電の電流経路は次の通りである。

$C_{Q4}$  の充電 :  $L_1 \quad n_1 \quad C_{Q4} \quad C_2 \quad L_1$

$C_{Q3}$  の放電 :  $L_1 \quad n_1 \quad C_{Q3} \quad C_1 \quad L_1$

なお、位相シフトフルブリッジ方式では入力電圧が最小の時に伝達モードが  $100\%$  に近い最大の値になるように設計されるが、この場合は環流モードが短くなるので、 $L_1$  電流のピーク値は小さくな

る。この場合は  $L_1$  のエネルギーによる  $C_{Q3}, C_{Q4}$  の充放電は期待できないので、漏れインダクタンスや励磁インダクタンスのエネルギーで充放電を実現するように設計する。

図6の回路はかなり古くから使われている回路であるが、近年の論文(文献[5])で図8の回路が提案されている。 $L_1$  に  $L_2, C_3$  からなる並列共振回路が接続されている。この回路構成では、 $L_2, C_3$  の値を適切に選べば、図9に示すように  $i_{L1}$  をピーク値の大きな波形、即ち蓄積モード終了時点で大きな電流となる波形を得ることができる。図7の  $i_{L1}$  とピーク値が等しくなるように設計すると実効値を抑制することができ、損失の低減が期待できる。

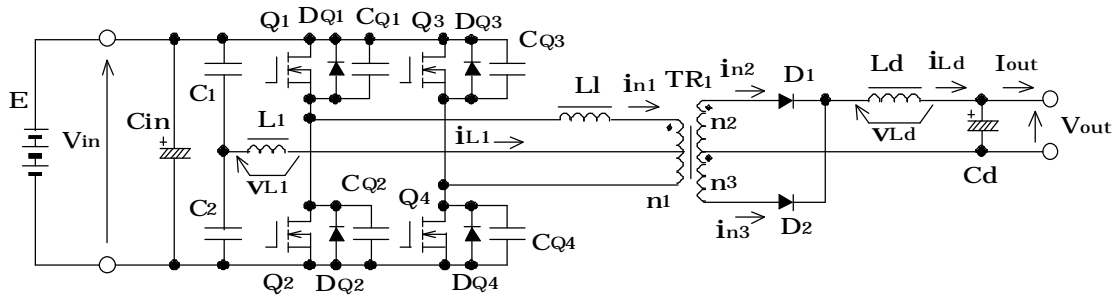


図6 補助回路によるソフトスイッチング

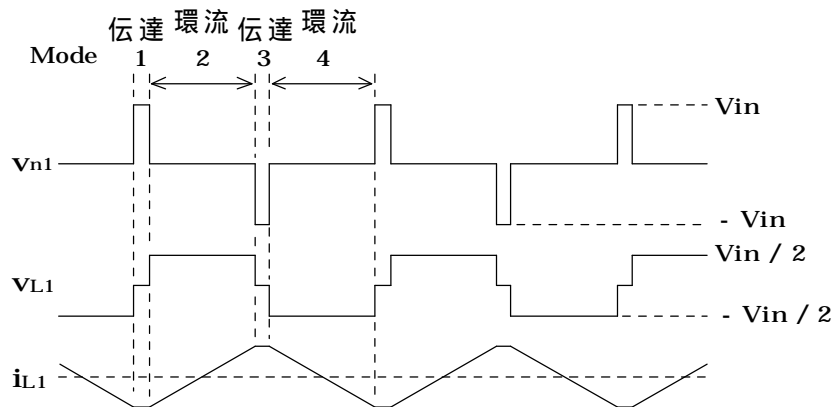


図7 補助回路の波形

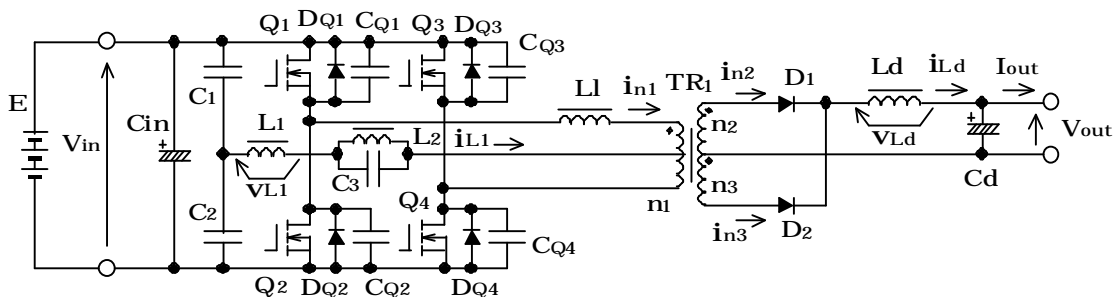
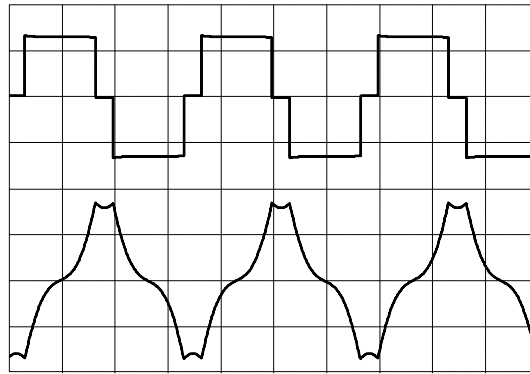


図8 補助回路に並列共振回路を付加した回路



上 :  $v_{L1}$ 、下  $i_{L1}$

図9 並列共振回路を付加した回路の波形

### 遅れレグのソフトスイッチングの考え方

遅れレグのソフトスイッチングを実現するための 3 つの方法を説明した。それぞれ次のような特徴がある。

- (1) 漏れインダクタンスを利用する方法：負荷電流が大きい時は効果的にソフトスイッチングを実現できる。軽負荷時でもこの方法でソフトスイッチングを実現するためには、変圧器の結合を悪くして漏れインダクタンスを大きくする、外付けリアクトルを付加する、などの対策が必要となる。負荷が非常に小さい時は対策方法がない。
- (2) 励磁インダクタンスを利用する方法：軽負荷時でもソフトスイッチングを実現可能。ただし、励磁電流が 2 次側に転流するという現象に配慮が必要。変圧器にギャップを設けて励磁電流を大きくする、漏れインダクタンスをある程度大きくする、などの対策が必要となる場合が多い。平滑リアクトルが電流不連続モードで動作するときはソフトスイッチングは困難となる。
- (3) 補助回路を付加する方法（図 6）：微小負荷時でもソフトスイッチングを実現可能。環流モードが短い場合は効果がなくなるので、(1)や(2)の方法と併用が必要。

これらの方法により負荷変動の全範囲で遅れレグのソフトスイッチングを実現することができる。しかし、漏れインダクタンスを大きくすることや励磁電流を増加させることにはデメリットもあるので、ソフトスイッチングを実現することによるメリットとデメリットを比較して採否を決める必要がある。位相シフトフルブリッジ方式はいろんな用途に用いられるので、用途に応じて要求性能が異なりソフトスイッチングの重要性も異なる。動作周波数が低い場合は、軽負荷時の遅れレグのソフトスイッチングはあきらめることが適切な選択となることも多い。

### 参考文献

- [1] 平地克也、「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータの基本」、平地研究室技術メモ No.20110728
- [2] 平地克也、「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータのソフトスイッチングの原理」、平地研究室技術メモ No.20110928
- [3] 平地克也、「進みレグのソフトスイッチングと遅れレグのソフトスイッチング」、平地研究室技術メモ No.20141214
- [4] 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よるソフトスイ

チング、平地研究室技術メモ No.20140331

- [5] Alireza Safaei, Praveen Jain, and Alireza Bakhshai, "A Robust Low-RMS-Current Passive Auxiliary Circuit for ZVS Operation of Both Legs in Full Bridge Converters", Proc. of APEC2015, pp.21-27

以上