

チョップ回路では誘導起電力は発生しない！？

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2012/11/4 舞鶴高専 平地克也

多くのパワエルの教科書ではリアクトルに発生する誘導起電力を使って昇圧チョップの動作原理を説明しています。しかしこの方法ではリアクトルの電圧や電流を正確に計算することができず、かえって理解を妨げているように思います。昇圧チョップではリアクトルの電圧は誘導起電力として自ら発生するのではなく、外部から強制的に印加されます。これは昇圧チョップ以外の電力変換回路でも言えることであり、パワエルの教科書ではリアクトルの動作説明に誘導起電力は使うべきでないと私は考えます。

昇圧チョップと誘導起電力

図1に昇圧チョップの回路構成と電流経路を示します。スイッチ素子QがONの時とOFFの時の動作は次の通りです。

<QがONの時> 電流経路：E L Q E

リアクトルLに電源電圧 V_{in} が印加される。

$$v_L = V_{in}$$

その結果リアクトルの電流 i_L は増加する。増加量 i_L は次の式で表される。

$$i_L = V_{in} T_{on} / L$$

なお、 T_{on} はQのON時間です。

<QがOFFの時> 電流経路：E L D C E

ダイオードDの電圧降下を無視すれば v_L は次の式で与えられる。

$$v_L = V_{in} - V_{out}$$

昇圧チョップでは $V_{in} < V_{out}$ なので v_L は負の値であり、リアクトルの電流 i_L は減少する。減少量 i_L は次の式で表される。

$$i_L = (V_{in} - V_{out}) T_{off} / L \quad \dots \text{減少しているので負の値}$$

なお、 T_{off} はQのOFF時間です。

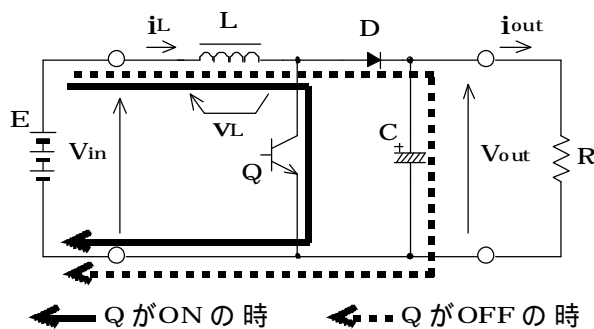


図1 昇圧チョップの回路構成と電流経路

Q が OFF の時は電流経路は E L D C E なので、電圧の低い所 (V_{in}) から電圧の高い所 (V_{out}) に電流が流れることになり、初めて学ぶ学生は理解に苦しみます。この現象はリアクトルの性質によるものですが、多くのパワエレの教科書ではリアクトルの誘導起電力を使って次のような内容で説明しています (例えば文献[1])。

「Q がターンオフすると L に流れる電流 i_L は減少に転じるので、リアクトル L には図 1 の v_L に示す極性とは逆の極性に誘導起電力が発生する。この電圧は電源電圧 V_{in} に加わってダイオード D は導通し、電流はコンデンサ C に流れ、出力電圧 V_{out} を上昇させる。」

一見もっともな内容のように思えますが、この説明では i_L が減少に転じると言っても何 A 減少するのか、誘導起電力が発生すると言っても v_L が何 V になるのか計算することができません。また、昇圧チョップの起動直後は次のように動作し、「逆の極性に誘導起電力が発生する」という現象は生じません。

< 起動直後の動作 >

起動前 (Q はずっと OFF) は E L D R E の経路で電流が流れており、D の電圧降下を無視すれば $V_{out} = V_{in}$ です。Q が ON/OFF を開始すると電流経路は図 1 となりますが、起動直後は C がまだ充電されていないので $V_{out} = V_{in}$ です。その場合、Q が OFF しても $v_L = V_{in} - V_{out} = 0V$ であり、 v_L が負になるという現象は発生しません。即ち、Q が OFF しても誘導起電力は発生しないことになります。

このように、リアクトルの誘導起電力を使って昇圧チョップの動作を説明するのはちょっと無理がありそうです。

リアクトルの動作の基本

リアクトルの電圧と電流の関係は $v = L \frac{di}{dt}$ です。差分の形で表せば $V = L \frac{\Delta I}{\Delta T}$ となります。変

形すると、 $\Delta I = \frac{1}{L} V \Delta T$ となります。この式から明かなように、 $T=0$ なら $I=0$ です。つまり、

時間ゼロではリアクトル電流は変化しない、即ち、リアクトルの電流は瞬時に変化することはできないことがわかります。したがって、スイッチ素子の ON/OFF で回路の条件が変わって電流の流れが妨げられてもリアクトルは別の電流経路を捜して電流を流し続けねばならないのです。このようリアクトルの性質をリアクトルの定電流特性と呼ぶことにします。

昇圧チョップで Q が OFF した時の動作はリアクトルの定電流特性を使って次のように説明するべきでしょう。

「Q が OFF してもリアクトル電流 i_L は同じ大きさを流れ続けねばならない。その結果 D が導通し、C に電力が供給される。キルヒホッフの法則からリアクトルの電圧 v_L は $V_{in} - V_{out}$ となる。」

このように説明すれば 1 頁の < Q が OFF の時 > に示したように v_L や i_L の大きさは正確に計算でき、起動直後の動作も矛盾なく説明できます。実際、このように説明しているパワエレの教科書もあります [2]。

なお、リアクトルの基本的な性質については平地研究室技術メモ No.20060820^[3]と No.20080207^[4]を参照下さい。また、昇圧チョップパの動作原理については No.20080214^[5]を参照下さい。

誘導起電力とは

誘導起電力は電磁誘導によって発生する起電力であり、次の式で表されます。

$$v = N \frac{df}{dt}$$

なお、N は巻線のターン数、 f は磁束です。

磁気回路のオームの法則 $f = \frac{Ni}{R_m}$ を代入すると、 $v = \frac{N^2}{R_m} \frac{di}{dt}$

なお、ターン数 × 電流 (Ni) は起磁力、 R_m は磁気抵抗です。

インダクタンスの公式 $L = \frac{N^2}{R_m}$ を代入すると、 $v = L \frac{di}{dt}$

よって、リアクトルの場合はよく知られた電気回路の公式 $v = L \frac{di}{dt}$ が誘導起電力を表す式となり

ます。公式 $v = L \frac{di}{dt}$ は「リアクトルは電流が変化すれば電圧が発生する」ことを示しています。

この現象を自己誘導と言います。したがって、図2のように可変電流源 I があり、リアクトル L の電流 i を自由に変化させられるなら L に発生した電圧 v は誘導起電力と言えるでしょう。

しかし、図1の昇圧チョップパでは「Lの電流を変化させて電圧を発生させる」というような動作モードはありません。<Q が ON の時>で示したように、Q が ON の時は V_{in} が L に印加され、 $v_L = V_{in}$ となります。<Q が OFF の時>で示したように、Q が OFF の時は電流経路から明かなように $v_L = V_{in} - V_{out}$ となります。よって、昇圧チョップパでは L の電圧は常に外部から与えられているのであり、L が自ら誘導起電力を発生させるような動作は存在しません。

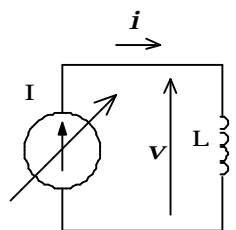


図2 可変電流源によるリアクトル電流の制御

リアクトルの電流をスイッチで遮断した時の動作

図3ではリアクトル L にスイッチ SW を介して直流電流を流しています。この回路では定常時のリアクトル電流 i は E/R_1 ですが、SW を遮断すると i がいきなり 0A になり v_L に無限大の電圧が発生します。しかし現実にはいきなり完全に 0A になることはなく、SW にアークが発生してしばらく電流が流れた後、L のエネルギーがアークで全て消費されてから 0A になります。SW が OFF の瞬間の等価回路は図3 (b)と考えられます。 R_2 はアーク放電の経路の抵抗値です。SW が OFF しても

Lの定電流特性により同じ大きさの電流がR₂に流れます。R₂は抵抗値が非常に大きいのでR₂電圧VR₂は非常に大きな値となります。v_Lは次の式で表されるのでLには大きな負電圧が印加されます。

$$v_L = E - VR_2 - VR_1$$

この大きな負電圧を誘導起電力と呼んでもいいのかもしれませんが、上記のようにLの定電流特性により電流が流れ続けた結果として抵抗に発生した電圧がLに印加された、と考える方が分かり易いでしょう。

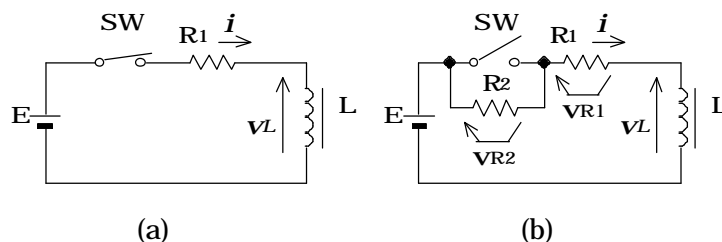


図3 Lの電流をいきなりOFFする回路

図1や図3に限らず、パワエレが対象とするおそらく全ての回路でLの電圧は外部から強制的に与えられるように思われます。図2のようにLの電流を変化させてLに誘導起電力を発生させているような回路はパワエレの世界には無いのではないかと考えます。パワエレの教科書ではLの動作説明に誘導起電力は使うべきでないと思います。

< 参考文献 >

- [1] 松瀬、齋藤、「基本から学ぶパワーエレクトロニクス」、電気学会、2012年発行、の179頁
- [2] 岡山努、「スイッチングコンバータ回路入門」、日刊工業新聞社、2006年発行、の40頁
- [3] 平地研究室技術メモ No.20060820、「コンデンサは電流で充電、リアクトルは電圧で充電する」
- [4] 平地研究室技術メモ No.20080207、「リアクトル電流の考え方」
- [5] 平地研究室技術メモ No.20080214、「昇圧チョッパはなぜ「昇圧」できるのか？」

以上