

応用電力変換工学

舟木剛

第8回 フォワードコンバータ

平成18年11月22日

高周波リアクトル(トランス) トロイダルコア

- トロイド(Toroid):円錐曲線回転面
 - トロイダル(Toroidal):ドーナツ型をした→絵
 - 比透磁率の高いトロイダルコアを用いると, コア内にある磁束が支配的となる。
- 電磁気学
 - 巻数 n のコイルに, 端子電圧 v を印加した時, 励磁電流 i が流れる。
 - コア磁束 ϕ
 - 逆起電力(誘導起電力) e
 - ファラデーの法則
$$e = n \frac{d\phi}{dt}$$
 - 端子電圧 v と逆起電力は等しい
$$v = e = n \frac{d\phi}{dt}$$

高周波リアクトル(トランス) トロイダルコア

- 直径D,断面積S, 透磁率 $\mu (= \mu_0 \mu_s)$ のコアに対する磁気抵抗 R_m

$$R_m = \frac{\pi D}{\mu S}$$

- 磁気抵抗 R_m , 磁束 ϕ , 電流 i , 巻数 n の関係

$$\phi = \frac{ni}{R_m}$$

- 端子電圧 v と励磁電流 i の関係

$$v = n \frac{d\phi}{dt} = n \frac{d}{dt} \left(\frac{ni}{R_m} \right) = \frac{n^2}{R_m} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

- 自己インダクタンス L は, 巻数の2乗に比例

$$L = \frac{n^2}{R_m}$$

高周波リアクトル(トランス) トロイダルコア

- 一般に, トロイダルコアの断面は四角

- 内半径 a , 外半径 b , 高さ t

- 半径 r の点におけるコアの磁束密度

$$B(r) = \mu H = \frac{\mu ni}{2\pi r}$$

- 磁束数

$$\phi = \int B ds = \int_a^b \frac{\mu ni}{2\pi r} t dr = \frac{\mu ni}{2\pi} t [\log r]_a^b = \frac{\mu ni}{2\pi} t \log \frac{b}{a}$$

- トロイダルコアの自己インダクタンス L

$$v = L \frac{di}{dt} = n \frac{d\phi}{dt}$$

$$L = n^2 \frac{\mu}{2\pi} t \log \frac{b}{a}$$

高周波リアクトル(トランス) トロイダルコア

- 正弦波電圧 v を印加した場合の磁束 ϕ

- 周波数 f ($\omega=2\pi f$), 振幅 V

- 正弦波電圧 $v = V \sin \omega t$

- 磁束 $v = n \frac{d\phi}{dt}$ より

$$\phi = \int \frac{v}{n} dt = \int \frac{V \sin \omega t}{n} dt = -\frac{V}{n\omega} \cos \omega t$$

- 磁束が周波数に反比例する

- » 周波数が高いほど, 磁束が減少

- » 周波数が高いほど, より小さいコアが使用可能

フォワードコンバータ

- フォワードコンバータの回路~~ず~~

- 三巻線変圧器を使用

- オン時に電源から負荷へエネルギー転送(1次-2次巻線間)

- オフ時に磁化電流を転流(1次-3次巻線間)

- 次のオン時まで磁化電流を0に減らす

- フライバックコンバータ程, 磁化インダクタンスは必要ない

- 回路動作の解析の仮定

- 理想三巻線変圧器を考える

- 漏れインダクタンス無視

- 磁化インダクタンスを1次巻線にまとめる

- 損失無視

- 出力の平滑コンデンサは大

- 出力電圧 V_o は一定

- 回路は周期定常状態

- スイッチング周期: T , デューティ比: D

- スイッチング素子(ダイオード含む)の動作は理想的

フォワードコンバータ

• 動作の解析

– オン時

- 巻線1に印加される電圧と, 他の巻線の発生電圧

$$v_1 = V_s, \quad v_2 = v_1 \frac{N_2}{N_1} = V_s \frac{N_2}{N_1}, \quad v_3 = v_1 \frac{N_3}{N_1} = V_s \frac{N_3}{N_1}$$

- ダイオードの導通状態

$$\begin{aligned} & \text{– D1オン 順バイアス } V_{D1} = v_2 - v_{Lx} - V_o \\ & \text{– D2オフ 逆バイアス } V_{D2} = -v_2 = -V_s \frac{N_2}{N_1} < 0 \\ & \text{– D3オフ 逆バイアス } V_{D3} = -V_s - v_3 = -V_s \left(1 + \frac{N_3}{N_1}\right) < 0 \end{aligned}$$

- 出力電流の応答

$$v_{Lx} = v_2 - V_o = V_s \frac{N_2}{N_1} - V_o = L_x \frac{d}{dt} i_{Lx}$$

- オン中の電流増分

$$\Delta i_{Lxon} = \int_0^{DT} \frac{V_s \frac{N_2}{N_1} - V_o}{L_x} dt = \left(V_s \frac{N_2}{N_1} - V_o \right) \frac{DT}{L_m}$$

フォワードコンバータ

• 動作の解析

– オン時

- 磁化電流の応答

$$v_1 = V_s = L_m \frac{d}{dt} i_{Lm}$$

$$\text{– オン期間に増加する電流 } \Delta i_{Lmon} = \int_0^{DT} \frac{V_s}{L_m} dt = \frac{V_s DT}{L_m}$$

- 電源電流

- 負荷電流と磁化電流の和

$$i_s = i_1 + i_{Lm}$$

フォワードコンバータ

• オフ時(電源側)

– オフの瞬間 L_m に流れる電流は停まらない

• I_{Lm} は巻線1に転流($I_{Lm} = -i_1$, $I_s = I_{Lm} + i_1 = 0$)

– 2次巻線のD1には逆方向電流 → D1オフ

– 3次巻線にD3の順方向電流を発生

» D3オン時の巻線3の印加電圧 $v_3 = -V_s$

» 巻線3の印加電圧が他の巻線に発生する電圧

$$v_1 = v_3 \frac{N_1}{N_3} = -V_s \frac{N_1}{N_3}, \quad v_2 = v_3 \frac{N_2}{N_3} = -V_s \frac{N_2}{N_3}$$

– オフ期間(D3オン時)の電流の応答

$$v_{Lm} = v_1 = -V_s \frac{N_1}{N_3} = L_m \frac{d}{dt} i_{Lm}$$

フォワードコンバータ

• オフ時(出力側)

– オフの瞬間 L_x に流れる電流は停まらない

• I_2 はD1からD2に転流

– D2オン時の出力電流の応答 $v_{Lx} = -V_o = L_x \frac{d}{dt} i_{Lx}$

– オフ中の電流減少分 $\Delta i_{Lx,off} = \int_{DT}^T -\frac{V_o}{L_x} dt = -V_o \frac{(1-D)T}{L_x}$

• 定常状態では出力電流は1周期毎に同じ値に戻る

連続導通としたら $\Delta i_{Lx,on} + \Delta i_{Lx,off} = \left(V_s \frac{N_2}{N_1} - V_o \right) \frac{DT}{L_m} - V_o \frac{(1-D)T}{L_x} = 0$

$$V_o = V_s D \frac{N_2}{N_1} \quad \text{バックコンバータと似た式}$$

フォワードコンバータ

- 変圧器が偏磁しないためには、オフ期間中に磁化電流が0に戻らなければならない

– 電流が0に戻る時点を求める

$$\frac{d}{dt}i_{L_m} = -\frac{V_s}{L_m} \frac{N_1}{N_3} \quad \Rightarrow \quad \Delta i_{L_m \text{ off}} = -\frac{V_s}{L_m} \frac{N_1}{N_3} t$$

$$\Delta i_{L_m \text{ on}} + \Delta i_{L_m \text{ off}} = \frac{V_s DT}{L_m} - \frac{V_s}{L_m} \frac{N_1}{N_3} t = 0 \quad \Rightarrow \quad t = DT \frac{N_3}{N_1}$$

– オフ期間は(1-D)Tより

$$t = DT \frac{N_3}{N_1} < (1-D)T \quad \Rightarrow \quad DT \left(1 + \frac{N_3}{N_1} \right) < T \quad \Rightarrow \quad D < \frac{N_1}{N_1 + N_3}$$

ダブルエンド形フォワードコンバータ

- フォワードコンバータの欠点
 - 磁化インダクタンスに蓄えられたエネルギーの解放のため、三次巻線が必要
- フォワードコンバータの回路^ず
 - 2つのスイッチを同時にオンオフさせる
 - スイッチオン時
 - 変圧器一次側に電源電圧 V_s 印加
 - 変圧器二次側に電圧発生D1オン, D2オフ。電力伝送
 - 変圧器磁化電流増加
 - スイッチオフ時
 - D1オフし、二次側に電流が流れない。D2オン環流
 - 磁化電流がD3,D4オンし、電源側に回生
 - デューティ比0.5以下で磁化電流がリセットされる
 - 出力電圧は、原型と同じ
 - スイッチに印加される電圧 $V_s \left(1 + \frac{N_1}{N_3} \right) \Rightarrow V_s$

宿題

- フォワードコンバータの回路シミュレーション
 - 定常状態における理論値比較
 - 昇降圧比
 - 限界
 - 連続導通時, 不連続導通時
 - ターンオン・オフ時の境界値
 - リップル率
 - 連続導通・不連続導通
 - 効率(入出力電力比)