応用電力変換工学

舟木剛

第9回　磁心(トロイダルコア)
フォワードコンバータ

平成19年12月5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。

山村著，CQ出版トロイダルコア活用百科より

分類	種類	素材	比透磁率	特徴
金属磁心	スーパーマロイ パーマロイ 珪素鋼	Ni,Fe合金 Ni,Fe合金 Fe,Si	100,000 20,000 500	超高透磁率 高透磁率 安価
酸化物磁心	MnZn系フェライト NiZn系フェライト	Mn,Sn,Zn Ni,Sn,Zn	600～5000 10～1,000	高透磁率，低損失，低周波用 電気抵抗高い，高周波用
圧粉磁心	カーボニル鉄ダスト モリブデン・パーマロイ センダスト	Fe Mo,Ni,Fe Si,Al,Fe	3 ～20 14 ～145 10 ～80	 温度保証用 頑丈

高周波リアクトル(トランス)
トロイダルコア

- 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μ(=$\mu_0 \mu_s$)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

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

    - 磁束数

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

    - トロイダルコアの自己インダクタンスL

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

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

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）
      - フライバックはオフ時にエネルギーを転送
    - オフ時に磁化電流を転流（1次-3次巻線間）
      - 次のオン時までに磁化電流を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Vo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
      - D1オン　順バイアス　$V_{D1} = v_2 - v_{Lx} - V_o$
      - D2オフ　逆バイアス　$V_{D2} = -v_2 = -V_S \frac{N_2}{N_1} < 0$
      - D3オフ　逆バイアス　$V_{D3} = -V_S - v_3 = -V_S \left(1 + \frac{N_3}{N_1}\right) < 0$
    - 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

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

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

$$v_1 = V_S = L_m \frac{d}{dt} i_{L_m}$$

      - オン期間に増加する電流

$$\Delta i_{L_m on} = \int_0^{DT} \frac{V_S}{L_m} dt = \frac{V_S DT}{L_m}$$

    - 電源電流
      - 負荷電流と磁化電流の和

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

フォワードコンバータ

- オフ時(電源側)
  - オフの瞬間Lm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

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

フォワードコンバータ

- オフ時(出力側)
  - オフの瞬間Lxに流れる電流は停まらない
    - I2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

$$\Delta i_{L_x off} = \int_{DT}^{T} -\frac{V_o}{L_x} dt = -V_o \frac{(1-D)T}{L_x}$$

      - 磁化エネルギーを電源に回生
- 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

$$\Delta i_{L_x on} + \Delta i_{L_x off} = \left(V_S \frac{N_2}{N_1} - V_o\right)\frac{DT}{L_m} - V_o \frac{(1-D)T}{L_x} = 0$$

バックコンバータと似た式

$$V_o = V_S D \frac{N_2}{N_1}$$

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

不連続!!

  - 電流が0に戻る時点を求める

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

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

  - オフ期間は(1-D)Tより

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