

応用電力変換工学

舟木剛

第11回 直流-直流変換

磁心(トロイダルコア)

フライバックコンバータ

フォワードコンバータ

ダブルエンドフォワードコンバータ

プッシュプルコンバータ

2008年12月10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	Ni,Fe合金	100,000	超高透磁率
	パーマロイ	Ni,Fe合金	20,000	高透磁率
	珪素鋼	Fe,Si	500	安価
酸化物磁心	MnZn系フェライト	Mn,Sn,Zn	600~	高透磁率, 低損失, 低周波用 電気抵抗高い, 高周波用
	NiZn系フェライト	Ni,Sn,Zn	5000	
			10~1,000	
圧粉磁心	カーボニル鉄ダスト	Fe	3~20	温度保証用 頑丈
	モリブデン・パーマロイ	Mo,Ni,Fe	14~145	
	センダスト	Si,Al,Fe	10~80	

2008/12/10

応用電力変換工学

2

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 $v = e = n \frac{d\phi}{dt}$

2008/12/10

応用電力変換工学

3

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

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

2008/12/10

応用電力変換工学

4

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

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

- トロイダルコアの自己インダクタンスL

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

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

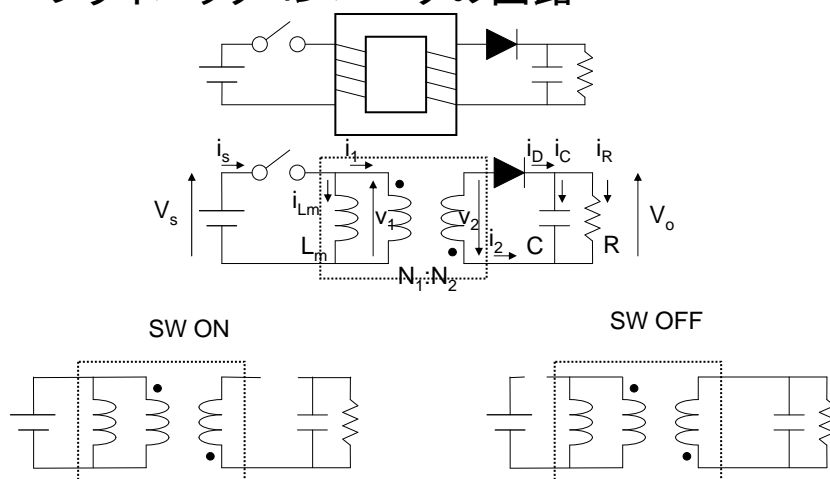
2008/12/10

応用電力変換工学

5

フライバックコンバータ

- フライバックコンバータの回路



2008/12/10

応用電力変換工学

6

フライバックコンバータ

- バックコンバータと類似の動作
 - 変圧器の入出力の極性に注意
 - スイッチオン時, 磁化インダクタンスにエネルギーを蓄積
 - スイッチオフ時, エネルギーを負荷に放出
- 回路動作の解析の仮定
 - 漏れインダクタンス無視
 - 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

2008/12/10

応用電力変換工学

7

フライバックコンバータ

- 動作の解析
 - オン時
 - 電源側 $v_1 = V_s = L_m \frac{d}{dt} i_{L_m}$
 - オン期間に増加する電流 $\Delta i_{L_{m-on}} = \int_0^{DT} \frac{V_s}{L_m} dt = \frac{V_s DT}{L_m}$
 - 負荷側
 - 変圧器二次側出力電圧 $v_2 = v_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) = V_s \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$
 - ダイオード印加電圧 $v_D = -V_o - v_2 = -V_o - V_s \left(\frac{N_2}{N_1} \right) < 0$
 - » ダイオードはオフになる
 - 二次側電流 $i_2 = 0$
 - 一次側電流 $i_1 = 0$
 - 磁化電流は流れる

2008/12/10

応用電力変換工学

8

フライバックコンバータ

動作の解析

－ オフ時

- 電流が電源から変圧器一次巻線に転流する

- 電源側
 - － 一次側に現れる二次側の負荷電圧 $v_1 = -V_o \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$

－ 磁化インダクタンス電流と電圧の関係 $v_1 = L_m \frac{d}{dt} i_{L_m} = -V_o \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$

－ オフ期間に減少する電流 $\Delta i_{L_{m-off}} = \int_{DT}^T -\frac{V_o}{L_m} \frac{N_1}{N_2} dt = -\frac{V_o(1-D)T}{L_m} \frac{N_1}{N_2}$

－ スイッチに印加される電圧 $v_{sw} = V_s - v_1 = V_s + V_o \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$
 » 電源電圧 V_s より大きくなる

2008/12/10

応用電力変換工学

9

フライバックコンバータ

動作の解析

－ オフ時

- 負荷側

－ 二次側の出力電流 $i_2 = -i_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = i_{L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$

－ 負荷電流 $i_R = \frac{V_o}{R}$

－ コンデンサ電流 $i_C = i_2 - i_R = i_{L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) - \frac{V_o}{R}$

－ 1周期を通して磁化電流零に戻る

$$\Delta i_{L_{m-on}} + \Delta i_{L_{m-off}} = \frac{V_s DT}{L_m} - \frac{V_o(1-D)T}{L_m} \frac{N_1}{N_2} = 0$$

$$V_o = V_s \frac{D}{1-D} \frac{N_2}{N_1} \quad \text{バックブーストとよく似た式}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

10

フライバックコンバータ

動作の解析

- 電源の供給電力と負荷の消費電力は等しい

$$P_s = P_o \quad V_s I_s = \frac{V_o^2}{R}$$

- 電源電流平均値は磁化電流平均値に等しい

$$I_s = \frac{I_{L_m} DT}{T} = I_{L_m} D$$

$$I_{L_m} = \frac{I_s}{D} = \frac{V_o^2}{D R V_s} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \frac{V_o}{(1-D) R} \frac{N_2}{N_1}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

11

フライバックコンバータ

動作の解析

- 連続導通の条件

- 磁化電流最大値

$$I_{L_m \max} = I_{L_m} + \frac{\Delta I_{L_m}}{2} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 + \frac{V_s DT}{2L_m}$$

- 磁化電流最小値

$$I_{L_m \min} = I_{L_m} - \frac{\Delta I_{L_m}}{2} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 - \frac{V_s DT}{2L_m}$$

- 連続導通限界

$$0 = I_{L_m \min} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 - \frac{V_s DT}{2L_m}$$

- 磁化インダクタンス最小値

$$L_{m \min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

- バックブーストと同様に考えると出力電圧脈動率は

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

12

フライバックコンバータ

動作の解析

不連続導通時

- 磁化電流はオフ期間中に0になる

– 偏磁は発生しない

- 磁化電流最大値 $I_{L_m \max} = \Delta i_{L_m \text{ on}} = \frac{V_s D T}{L_m}$

- 電源電流平均値 $I_s = \frac{1}{2} I_{L_m \max} D T / T = \frac{V_s D^2 T}{2 L_m}$

- 出力電圧と入力電圧の関係

$$P_s = P_o \quad V_s I_s = \frac{V_s^2 D^2 T}{2 L_m} = \frac{V_o^2}{R}$$

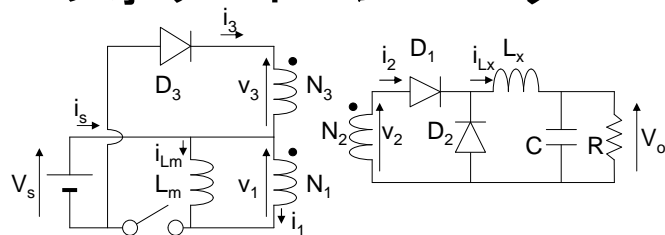
$$V_o = V_s D \sqrt{\frac{TR}{2 L_m}}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

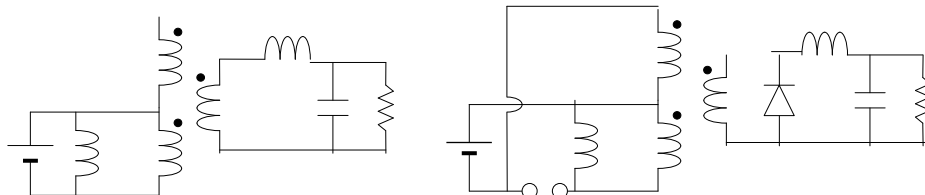
13

フォワードコンバータ



SW ON

SW OFF



2008/12/10

応用電力変換工学

14

フォワードコンバータ

- フォワードコンバータの回路
 - 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

2008/12/10

応用電力変換工学

15

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
 - オン中の電流増分

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

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

2008/12/10

応用電力変換工学

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

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

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

• 電源電流

– 負荷電流と磁化電流の和

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

2008/12/10

応用電力変換工学

17

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_{L_m} は巻線1に転流($i_{L_m} = -i_1$, $i_s = i_{L_m} + i_1 = 0$)

– 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

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

2008/12/10

応用電力変換工学

18

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

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

バックコンバータと似た式

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

2008/12/10

応用電力変換工学

19

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

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

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

- オフ期間は $(1-D)T$ より

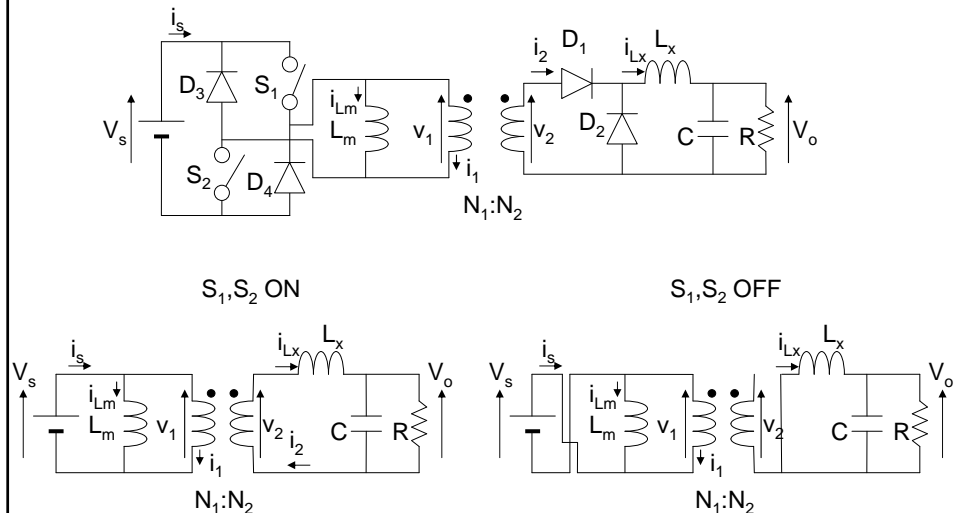
$$t = DT \frac{N_3}{N_1} < (1-D)T \quad \Rightarrow \quad DT \left(1 + \frac{N_3}{N_1} \right) < T \quad \Rightarrow \quad D < \frac{N_1}{N_1 + N_3}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

20

ダブルエンド形フォワードコンバータ



2008/12/10

応用電力変換工学

21

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
 - 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

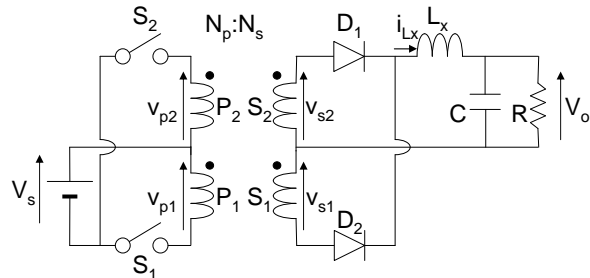
$$V_s \left(1 + \frac{N_1}{N_3}\right) \rightarrow V_s$$

2008/12/10

応用電力変換工学

22

プッシュプルコンバータ



2008/12/10

応用電力変換工学

23

プッシュプルコンバータ

- プッシュプルコンバータの回路
 - センタタップ付トランス全波整流回路と似ている
 - SW1とSW2は独立に制御
 - 片方のみオン, 両方オフの動作モードがある
 - 磁化エネルギーは負荷に放出される
- 動作解析
 - SW1オン, SW2オフ時 $v_{p1} = V_s$
 - 一次側巻線P1に電圧が印加される
 - P1が他の巻線に発生する電圧 $v_{p2} = V_s$

$$v_{s1} = v_{s2} = V_s \frac{N_s}{N_p}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

24

プッシュプルコンバータ

• 動作解析

– SW1オン, SW2オフ時

• D1:順バイアス, D2:逆バイアス

– 出力電流

» 出力電圧 V_o 一定として

$$v_{L_x} = L_x \frac{d}{dt} i_{L_x} = v_{s2} - V_o = \frac{N_s}{N_p} V_s - V_o$$

– オン中の電流増加分

$$\Delta i_{L_x D1on} = \frac{\frac{N_s}{N_p} V_s - V_o}{L_x} DT$$

2008/12/10

応用電力変換工学

25

プッシュプルコンバータ

• 動作解析

– SW1オフ, SW2オン時

• 一次側巻線P2に電圧が印加される $v_{p2} = -V_s$

– P2が他の巻線に発生する電圧 $v_{p1} = -V_s$

$$v_{s1} = v_{s2} = -V_s \frac{N_s}{N_p}$$

• D1:逆バイアス, D2:順バイアス

– 出力電流

» 出力電圧 V_o 一定として

$$v_{L_x} = L_x \frac{d}{dt} i_{L_x} = -v_{s1} - V_o = \frac{N_s}{N_p} V_s - V_o$$

– オン中の電流増加分

$$\Delta i_{L_x D2on} = \frac{\frac{N_s}{N_p} V_s - V_o}{L_x} DT \quad \text{SW1オン時と同様}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

26

プッシュプルコンバータ

• 動作解析

– SW1, SW2オフ時

- 一次側巻線に電流が流れない
 - L_x に流れていた電流は瞬間的に止まらない
 - » D1, D2を順バイアスして電流を流す
 - » 2次巻線S1, S2に大きさが等しい逆向き電流が流れる
- 出力電流
 - » 出力電圧 V_o 一定として $v_{L_x} = L_x \frac{d}{dt} i_{L_x} = -V_o$
- オフ中の電流減少分

$$\Delta i_{L_x \text{off}} = -\frac{V_o}{L_x} \left(\frac{1}{2} - D \right) T \quad \text{SW1オン時と同様}$$

2008/12/10

応用電力変換工学

27

プッシュプルコンバータ

• 動作解析

- 連続導通モードにおいて
 L_x の電流は一周毎に同じ値に戻る

$$\Delta i_{L_x \text{D1on}} + \Delta i_{L_x \text{off}} = \frac{\frac{N_s}{N_p} V_s - V_o}{L_x} DT - \frac{V_o}{L_x} \left(\frac{1}{2} - D \right) T = 0$$

- 入出力電圧の関係 $V_o = 2 \frac{N_s}{N_p} V_s D$
- 出力電圧の脈動率

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8 \cdot 2^2 L_x c f^2} = \frac{1-D}{32 L_x c f^2} \quad \text{バックコンバータと同様 但し, 周期} T/2$$

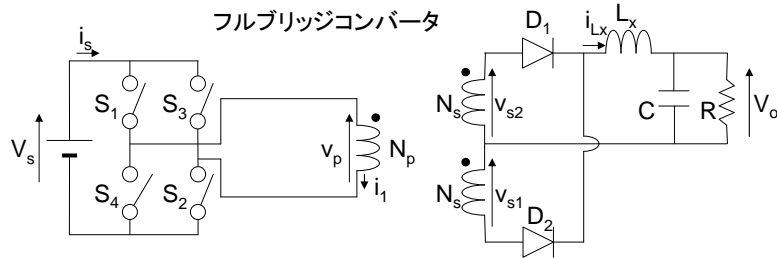
2008/12/10

応用電力変換工学

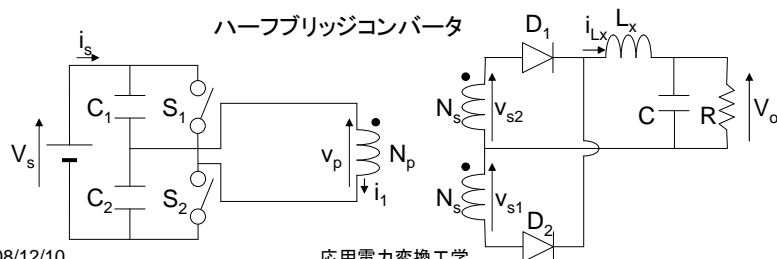
28

ブリッジコンバータ

フルブリッジコンバータ



ハーフブリッジコンバータ



2008/12/10

応用電力変換工学

29

ブリッジコンバータ

• プッシュプルコンバータと一次側が異なる

– フルブリッジコンバータの回路

- SW1とSW2オン時 $v_p = V_s$
- SW3とSW4オン時 $v_p = -V_s$
- オフ時 $v_p = 0$
- 出力電圧 $V_o = 2 \frac{N_s}{N_p} V_s D$

– ハーフブリッジコンバータの回路

- 直流電源電圧をCで分割
- 動作はフルブリッジコンバータと同様
- 出力電圧 $V_o = \frac{N_s}{N_p} V_s D$

2008/12/10

応用電力変換工学

30