

# 高压直流输电系统中的全桥直流变压器研究

陈曦, 肖岚, 陈哲, 龚春英  
(南京航空航天大学, 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**研究了一种高压直流输电系统中的重要组成部分,即直流变压器。全桥直流变压器具有输入输出电压成比例,易于实现软开关等优点。详细分析了全桥直流变压器的工作原理,介绍了电流连续和断续两种工作模式,讨论了全桥直流变压器的输出特性以及漏感的选取,并在此基础上进行了实验验证,分析了影响直流变压器特性的因素。实验结果表明,直流变压器可以实现功率的传输和电压的提升,适用于高压输电系统。

**关键词:**变压器; 高压直流输电; 零电压开关

中图分类号: TM41

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2010)11-0098-03

## Research on the Full-bridge DC-transformer for HVDC-systems

CHEN Xi, XIAO Lan, CHEN Zhe, GONG Chun-ying

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The electronic DC-transformer is a key component of high voltage DC (HVDC) systems. The output voltage is proportional to input voltage, and all the switches are ZVS in the DC transformer. The operation principle of the DC-transformer based on full-bridge topology, includes continuous mode and discontinuous mode of the primary current is analyzed theoretically. The output characteristic and design principle of the leakage inductance are discussed theoretically and experimentally. Some factors that affect the characteristic of the DC-transformer are analyzed. The experimental results show that the DC-transformer, which can realize the power transmission and the voltage step-up, is suitable for HVDC-systems.

**Keywords:** transformer; high voltage direct current systems; zero voltage switching

**Foundation Project:** Supported by Nation Basic Research Program of China (973 Program) (No.2007CB210303)

## 1 引言

风力发电作为新能源的重要组成部分,代表着电力系统未来的发展方向。由于风电的分散性和风电装置小型化的普及,以及地理条件等因素的限制,远距离交流输电存在一定的局限性<sup>[1]</sup>。为减小传输中的损耗并增大传输容量,通常使用高压直流输电技术。文献[2]提出一种新型的高压直流传输结构,每组风机输出的电能通过变换器送到共同的高压直流母线上,适用于分布式发电系统,易于扩容<sup>[3]</sup>。

通常单个变换器应用于高压场合时,不但对功率器件的耐压要求较高,而且变压器的变比较大,导致出现寄生参数,体积大,效率低。采用输入并联输出串联的结构,能实现低压器件在高压场

合的应用。电子直流变压器可作为该结构的重要组成部分,省去了滤波电感,结构简单,采用开环控制,易于实现软开关<sup>[4]</sup>。

这里介绍了全桥结构直流变压器在初级电流连续和断续情况下的工作模式,分析了输出与输入、负载之间的关系,以及漏感的影响,最后给出了相关实验波形。

## 2 电路拓扑及其工作原理

### 2.1 直流变压器拓扑构成

图1示出全桥直流变压器的电路拓扑结构。

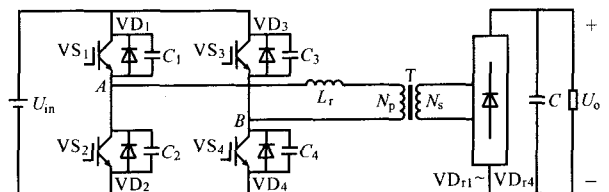


图1 全桥直流变压器

VS<sub>1</sub>与VS<sub>4</sub>同时开关,VS<sub>2</sub>与VS<sub>3</sub>同时开关,每个开关管以近似0.5的恒定占空比工作,在死区

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)  
(2007CB210303)

定稿日期:2010-07-13

作者简介:陈曦(1986-),男,江苏新沂人,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

时间内利用变压器初级漏感  $L_r$  和开关管的结电容实现开关管的 ZVS。

### 2.2 开关模态分析

为便于分析,先假设:① $VS_1\sim VS_4$  由理想开关、体二极管  $VD_1\sim VD_4$  和寄生电容  $C_1\sim C_4$  并联构成,且  $C_1=C_2=C_3=C_4$ ; ② $N_p, N_s$  分别是变压器初次级绕组,变压器变比为  $1:n$ ; ③ $C$  足够大,将它看作电压为  $U_c$  的电压源。以开关管开通前初级电流  $i_{Lr}$  是否降为零来划分,可分为  $i_{Lr}$  断续与连续的情况,图 2 示出  $i_{Lr}$  断续和连续情况下电路的主要工作波形。

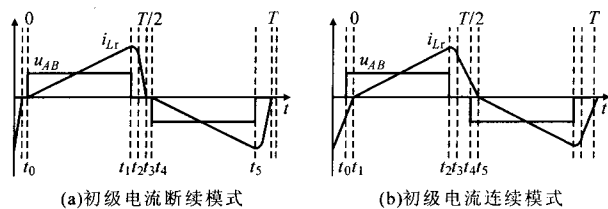


图 2 电路运行模式

#### 2.2.1 $i_{Lr}$ 断续

模态 1 $[t_0, t_1]$   $t_0$  时刻前,开关管全部关闭,  $i_{Lr}$  降为零。实际由于开关管结电容的存在,  $i_{Lr}$  会与开关管结电容产生振荡, 开关管无法真正实现 ZCS 开通。 $t_0$  时刻,  $VS_1, VS_4$  同时导通, 电源电压加在变压器  $A, B$  两点,  $i_{Lr}$  线性上升。上升斜率为:

$$\frac{di_{Lr}}{dt} = \frac{U_{in} - U_o/n}{L_r} \quad (1)$$

模态 2 $[t_1, t_2]$   $t_1$  时刻,  $i_{Lr}$  上升到最大值, 此刻  $VS_1, VS_4$  同时关断。由于  $i_{Lr}$  不能突变,  $i_{Lr}$  与开关管结电容产生振荡, 给  $C_1, C_4$  充电, 给  $C_2, C_3$  放电, 由于存在结电容,  $VS_1, VS_4$  为 ZVS 关断。

模态 3  $[t_2, t_3]$   $t_2$  时刻,  $C_2, C_3$  上电荷放电为零,  $VD_2, VD_3$  导通,  $L_r$  的能量回馈到输入电源中。此时加在变压器  $A, B$  两点的电压反向, 加在  $L_r$  上的电压为输入电压与次级折算过来的电压之和,  $i_{Lr}$  迅速下降, 下降斜率为:

$$\frac{di_{Lr}}{dt} = -\frac{U_{in} + U_o/n}{L_r} \quad (2)$$

模态 4 $[t_3, t_4]$   $t_3$  时刻,  $i_{Lr}$  下降为零, 由于结电容存在压降,  $L_r$  与结电容  $C_1\sim C_4$  发生振荡。

模态 5 $[t_4, t_5]$   $t_4$  时刻,  $VS_2, VS_3$  导通, 开始下半个工作周期。

#### 2.2.2 $i_{Lr}$ 连续

模态 1 $[t_0, t_1]$   $t_0$  时刻前, 开关管全部关闭, 此时  $VD_1, VD_4$  导通,  $i_{Lr}$  线性下降,  $VS_1, VS_4$  可实现 ZVS 开通。 $t_0$  时刻,  $VS_1, VS_4$  同时导通, 由于  $i_{Lr}$  仍在给输入电源回馈能量, 此时加在  $L_r$  两端的电压仍

为输入电压与次级折算过来电压之和。在  $t_1$  时刻,  $i_{Lr}$  下降为零。 $t_0\sim t_1$  之间  $i_{Lr}$  下降斜率同式(2)。

其余模态 2~4 同断续状态。

## 3 直流变压器设计及优化

### 3.1 输入输出特性

断续状态下, 设占空比为  $D$ , 由式(1), (2)可得:

$$U_o = nU_{in} - \frac{2n^2L_rI_oU_{in}}{2D^2TU_{in} + nL_rI_o} \quad (3)$$

连续状态下, 同样有:

$$U_o = n\sqrt{U_{in}^2 - 8nL_rfI_oU_{in}} \quad (4)$$

在临界情况下, 即  $i_{Lr}$  在开关管开通瞬间刚好降为零, 有:

$$I_o = \frac{D(1-2D)TU_{in}}{nL_r} \quad (5)$$

由式(3), (4)可得出输入输出与负载之间的关系, 图 3 示出不同  $U_{in}$  下, 计算得出输出电压  $U_o$  与负载电流  $I_o$  的关系曲线, 其中  $L_r=29.84 \mu\text{H}$ ,  $D=0.48$ , 变压器变比  $n=5.5$ , 开关频率为  $20 \text{ kHz}$ 。由图可知, 在一定负载范围内,  $i_{Lr}$  断续与连续的趋势一致, 且  $U_o$  随  $I_o$  的加大近似线性减小, 同一负载下,  $U_o$  随  $U_{in}$  的变化近似线性变化。因此当  $L_r$  在一定范围内时, 直流变压器随着  $I_o$  和  $U_{in}$  的变化, 输出平稳, 不会剧烈突变。

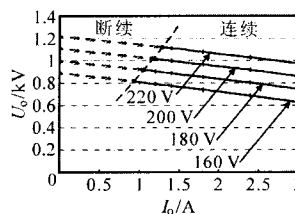
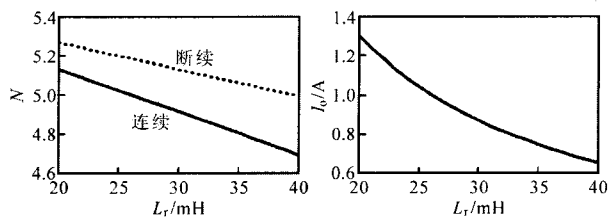


图 3 不同输入电压下输出与负载关系

### 3.2 $L_r$ 的选取

定义输出与输入的电压变比  $N=U_o/U_{in}$ , 图 4a 示出  $U_{in}=150 \text{ V}$ ,  $I_o$  为  $0.8 \text{ A}$  (断续情况) 和  $1.2 \text{ A}$  (连续情况) 时  $N$  与  $L_r$  的关系曲线。当  $L_r$  由  $20\sim 40 \text{ mH}$  变化时,  $N$  呈下降趋势, 所以为获得较高的  $U_o$ , 应使  $L_r$  尽量小。



(a) 输出输入电压变比与漏感关系 (b) 临界状态下负载与漏感关系

图 4 输出输入电压变比及负载与漏感关系曲线

图 4b 示出临界情况下  $U_{in}=150 \text{ V}$  时  $I_o$  与  $L_r$

的关系曲线,可见  $L_r$  越大,到达临界时所需负载就越小,即负载较轻时即可实现电流连续。由于断续且  $i_L$  过零时,与开关管寄生电容继续振荡,导致开关管开通时电流不为零,无法实现软开通,增加了开关管损耗。所以为真正实现软开关,应尽量使  $i_L$  工作在连续状态,这就要求  $L_r$  不能太小。因此,需合理设计  $L_r$ ,使电路既能获得较高的输出电压,又易于工作在电流连续模式,实现软开关。

### 3.3 高压侧寄生参数的影响

由于该直流变压器用于电压提升和功率传递,高压侧器件的寄生参数较大,如图 5 所示,在实际中要考虑寄生参数的影响。对变压器而言,其次级绕组电容  $C_p$ ,折算到初级是  $n^2 C_p$ ,在次级匝数较多的情况下,初级的等效电容较大,容易引起电流尖峰,损坏开关管。而高压侧需选择能承受高压的快恢复二极管,其寄生电容也会较普通快恢复二极管大,当初级电流降为零时,次级二极管关断,此时会使其结电容充电,折算到初级和漏感串联谐振。因此在制作变压器时要特别注意寄生电容的影响,通常次级采用分段绕制的方法,可有效降低变压器的寄生电容<sup>[5]</sup>。另外,在选择高压整流二极管时也要选择反向恢复时间短的快恢复二极管,这样也会减小其结电容造成的影响。

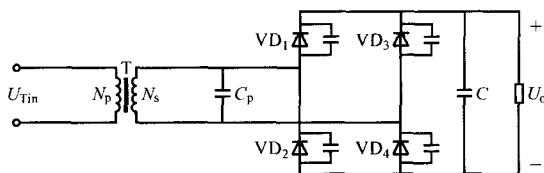


图 5 高压侧寄生电容

## 4 实验结果

为验证该直流变压器的工作原理,完成了一台最大输出功率 4 kW,输出 1 350 V 的原理样机。实验参数: $U_{in}=150\sim 250\text{ V}$ ;  $U_o=790\sim 1\ 350\text{ V}$ ;  $D=0.48$ ;  $n=5.5$ ;  $L_r=29.84\ \mu\text{H}$ ;  $C=50\ \mu\text{F}$ ; 开关频率  $f_s=20\text{ kHz}$ 。图 6a 示出  $U_{in}=150\text{ V}$  时  $i_L$  连续情况下开关管  $VS_1, VS_4$  的驱动信号及其集射极电压波形。可见,在此连续状态下,开关管开通前集射极电压已降为零,实现了 ZVS。图 6b, c 示出  $i_L$  在断续和连续情况下的实验波形。图 6b 中,在  $i_L$  过零后有一定的振荡;图 6c 中,  $i_L$  在开关管开通时仍未降为零,此时  $i_L$  仍处于电流回馈输入电源阶段,在此阶段开通开关管,实现了 ZVS。

图 7 示出  $U_{in}$  和  $I_o$  与  $U_o$  的关系曲线。可见,  $U_o$  随  $U_{in}$  的增加近似线性地增加,随着  $I_o$  的增加而近

似线性地降低,与分析一致。

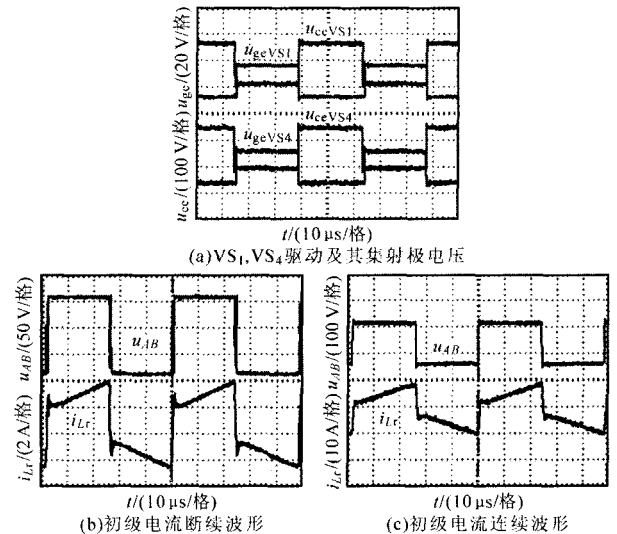


图 6 电压电流实验波形

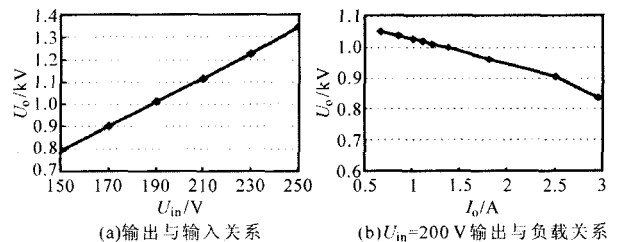


图 7 关系曲线

## 5 结论

研究了全桥直流变压器的工作特性,验证了直流变压器的输出电压与输入电压、负载的关系,分析了高压器件寄生参数带来的影响等。全桥直流变压器可实现输入输出的线性变换,响应速度快,易于实现 ZVS,具有较高的效率。在新型高压直流输电工程中,直流变压器是升降压和功率传输的重要组成部分,具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 吕广强. 风力发电的并网接入及传输方式[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(4): 55-57.
- [2] 陈杰, 张先进, 龚春英, 等. 基于直流并网的非并网风电系统及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 86-90.
- [3] 姚伟, 程时杰, 文劲宇. 直流输电技术在海上风电场并网中的应用[J]. 中国电力, 2007, 40(10): 70-74.
- [4] J Morren, S W H deHaan, J A Ferr-eira. Design Study and Scaled Experiments for High-power DC/DC Conversion for HVDC-systems[A]. 32nd IEEE PESC[C]. 2001, (3): 1529-1534.
- [5] 冯挹, 许早. 超微晶开关电源变压器的设计[J]. 现代雷达, 2000, 22(2): 81-86.