

文章编号:1005-0523(2012)04-0081-05

移相全桥 ZVZCS 变换器潜电路的研究及分析

张祖伟, 林知明

(华东交通大学电气学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对零电压零电流移相全桥 ZVZCS 变换器中出现的潜在电路, 使用图论分析法, 去除无效冗余和正常工作的电路模式, 进而得到变换器中所有潜电路模式, 并且利用 Matlab/simulink 搭建电路进行仿真验证分析的正确性。

关键词: ZVZCS 变换器; 潜电路; 图论

中图分类号: TM461

文献标志码: A

随着电力电子技术的日益发展, 电力电子器件的稳定性越来越引起人们的关注, 潜电路的存在会严重影响电力电子设备的稳定可靠性。所谓潜电路是指隐藏在电路系统中的一种状态或通路, 当满足某一激励条件时, 会导致电路系统出现非预期的功能, 严重影响系统安全稳定性, 甚至会引发灾难性后果, 这种现象是因为电路自身缺陷导致, 与元器件失效无关^[1-2]。

近年来, 高频 PWM 软开关电源因其具有高效节能、体积小、噪声低、重量轻等特点受到众多电源设计者的青睐, 而移相全桥 ZVZCS 变换器^[3-6]是我们设计电源系统时常用的电路拓扑之一, 该变换器不仅能减少电路中通态损耗, 而且能实现超前臂 ZVS, 滞后臂 ZCS。下面针对移相全桥 ZVZCS 变换器中存在的潜电路进行研究, 找出其存在的潜电路, 并且对该潜电路进行分析论证, 为以后设计出更好的电路拓扑打下基础。

1 移相全桥 ZVZCS 变换器工作原理

变换器拓扑电路和主要波形如图 1 所示。

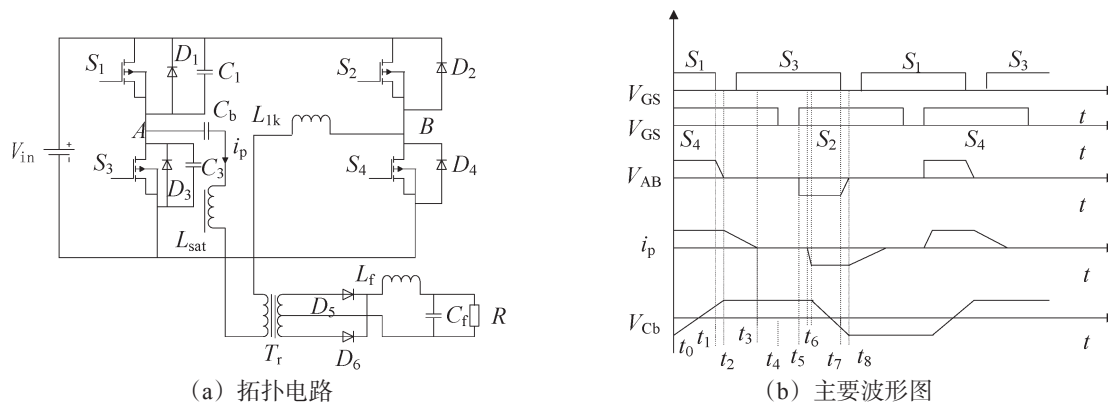


图 1 ZVZCS 变换器拓扑电路图及波形图

Fig.1 Topology circuit and waveforms of ZVZCS converter

收稿日期:2012-04-25

作者简介:张祖伟(1986—),男,硕士研究生,研究方向是电力电子与电力传动。

图1中 S_1 和 S_3 为超前臂, S_2 和 S_4 为滞后臂, 每个桥臂上下两个开关管 180° 互补导通, 为了避免同一桥臂两个开关管同时导通, 必须设置死区时间。输出电压可以通过控制 S_1 和 S_3 的驱动信号脉宽实现。超前臂利用外接并联电容 C_1 和 C_3 、变压器漏抗 L_{lk} 和输出滤波电感 L_f 来实现其ZVS, 滞后臂则通过隔直电容 C_b 和饱和电抗 L_{sat} 来实现其ZCS的。为了便于分析, 假设所有元器件都是理想的, 输出滤波电感足够大且 $C_1 = C_3 = C_r$, V_{GS} 为脉冲信号驱动电压, V_{in} 为直流输入电压, i_p 为原边电流, V_{AB} 是桥臂中点电压, V_{Cb} 是隔直电容电压, $S_1 \sim S_4$ 为IGBT, $D_1 \sim D_4$ 为各IGBT并联的续流二极管, D_5 和 D_6 为输出整流二极管, C_f 是输出滤波电容, R 为负载, T_r 为变压器。此拓扑结构工作状态可分为6个模式, 其各开关模式的工作过程如下所述。

模式1 ($t_0 \sim t_1$) 在此阶段, S_1 和 S_4 导通, 原边电流 i_p 从电源正极经 S_1 、 C_b 、 L_{sat} 、变压器原边绕组、 L_{lk} 和 S_4 流向电源负极, 并且给阻断电容 C_b 正向充电, 原边通过变压器向副边传递能量。

模式2 ($t_1 \sim t_2$) 在 t_1 时刻, S_1 关断。原边电流 i_p 从 S_1 中转移到 C_1 和 C_3 支路中, C_1 充电 C_3 放电, V_{C_1} 线性上升, V_{C_3} 线性下降。因为 C_1 和 S_1 并联并且 C_1 电压不能突变, 故 S_1 零电压关断。由于有电感的存在, 可认为 i_p 近似不变, 即 $I_{p_0} = I_0/K$, 其中 I_0 为输出负载电流。此时 C_1 和 C_3 的电压表达式为: $V_{C_1}(t) = (I_{p_0}/2C_r)(t - t_0)$; $V_{C_3}(t) = V_{in} - V_{C_1}(t)$ 。

模式3 ($t_2 \sim t_3$) 在 t_2 时刻, V_{C_3} 下降到零, 此后开通 S_3 , 故 S_3 是零电压开通。原边电流 i_p 经 S_4 、 D_3 和电感导通续流, V_{AB} 被箝位为零, i_p 开始线性减小, 即 $I_p(t) = i_p - V_{C_{bp}}/L_{lk}$ 。

模式4 ($t_3 \sim t_4$) 在 t_3 时刻, 原边电流 i_p 下降到零, 在此之后 S_4 实现零电流关断, 由于 L_{sat} 和 L_f 电感值足够大, 故可近似认为 i_p 保持为零 V_{C_b} 维持不变。

模式5 ($t_4 \sim t_6$) 在 t_4 时刻 S_2 开通, 由于原边电流 i_p 仍保持为零, 所以 S_2 是零电流开通。此时漏感 L_{lk} 上的电压为 $-(V_{in} + V_{C_b})$ 。由于原边电路不足以提供负载电流, 副边两个整流二极管依旧导通, 从 t_5 时刻原边电流 i_p 从零开始反方向线性增加, 在 t_6 时刻, 原边电流反方向增加到负载电流。

模式6 (t_6 时刻之后) t_6 时刻之后开始进入下半个周期, 其工作原理同上半个周期类似。

2 移相全桥ZVZCS变换器潜电路图论分析

本文利用图论法^[7-9]来寻找变换器中所存在的潜电路, 把等效电路简化为有向图, 依据连接矩阵计算出节点间的所有通路, 再根据路径判据剔除无效冗余和正常工作的电路, 从而找出潜电路路径。

2.1 有向图及连接矩阵

连接矩阵 C 由节点集合和边集合构成, 是一个 $n \times m$ 矩阵。矩阵元素 C_{ij} 定义^[10-11]如下:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j, \text{ 且节点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间没有边相连} \\ \sum_{x=1}^k e_x & e_1, e_2, \dots, e_k \text{ 为节点 } i \text{ 到 } j \text{ 之间的有向边} \end{cases}$$

根据上节的原理分析, 可将移相全桥ZVZCS变换器拓扑电路等效为图2。对等效电路节点编号并对各器件所在路径命名。其中节点1代表电源正极, 节点4代表电源地, e_{S_1} , e_{S_2} , e_{S_3} , e_{S_4} , e_1 , e_2 , e_3 分别代表 S_1 和 D_1 并联, S_2 和 D_2 并联, S_3 和 D_3 并联, S_4 和 D_4 并联。 C_1 , C_b 和 L 串联, C_3 所在支路。简化后的有向图如图3所示, 图中的箭头表示电流可能流动的方向, 其由电路元件的特性决定。

根据连接矩阵的定义, 由图3可得移相全桥ZVZCS变换器简化电路模型的连接矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & e_1 + e_{S_1} & e_{S_2} & 0 \\ e_1 + e_{S_1} & 1 & e_2 & e_3 + e_{S_3} \\ e_{S_2} & e_2 & 1 & e_{S_4} \\ 0 & e_3 + e_{S_3} & e_{S_4} & 1 \end{bmatrix}$$

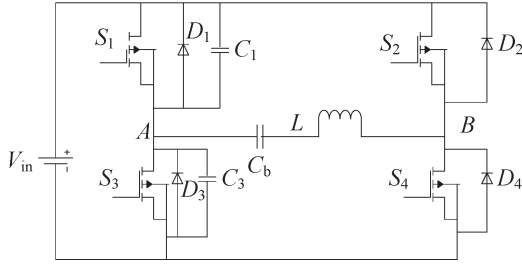


图2 等效电路
Fig.2 Equivalent circuits of converter

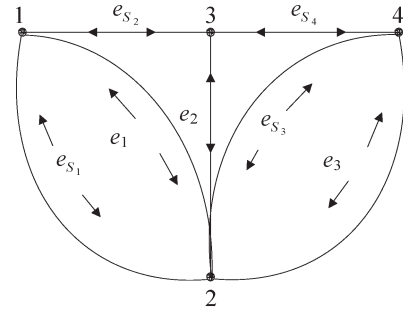


图3 ZVZCS变换器的有向图
Fig.3 The directed graph of ZVZCS converter

2.2 通路计算

计算包括电源(节点1)到地(节点4)和地(节点4)到电源(节点1)之间所有通路。根据连接矩阵算法的定理,余子式和开关函数为

1) 地到电源,余子式:

$$\Delta_{41} = \begin{bmatrix} e_1 + e_{S_1} & e_{S_2} & 0 \\ 1 & e_2 & e_3 + e_{S_3} \\ e_2 & 1 & e_{S_4} \end{bmatrix}$$

开关函数为: $F_{41} = e_1 e_2 e_{S_4} + e_2 e_{S_1} e_{S_4} + e_2 e_3 e_{S_2} + e_2 e_{S_2} e_{S_3} + e_1 e_3 + e_3 e_{S_1} + e_1 e_{S_3} + e_{S_1} e_{S_3} + e_{S_2} e_{S_4}$

2) 电源到地,余子式:

$$\Delta_{14} = \begin{bmatrix} e_1 + e_{S_1} & 1 & e_2 \\ e_{S_2} & e_2 & 1 \\ 0 & e_3 + e_{S_3} & e_{S_4} \end{bmatrix}$$

得到的开关函数为: $F_{14} = e_1 e_2 e_{S_4} + e_2 e_{S_1} e_{S_4} + e_2 e_3 e_{S_2} + e_2 e_{S_2} e_{S_3} + e_1 e_3 + e_3 e_{S_1} + e_1 e_{S_3} + e_{S_1} e_{S_3} + e_{S_2} e_{S_4}$

2.3 回路计算

计算矩阵 C 行列式的值,即可得到电路中全部的可能电流回路。其开关函数(略去了平方项无效路径)为

$$F_C = 2e_1 e_{S_1} + 2e_3 e_{S_3} + 2e_1 e_2 e_{S_2} + 2e_2 e_{S_1} e_{S_2} + 2e_2 e_3 e_{S_4} + 2e_2 e_{S_3} e_{S_4} + 2e_1 e_3 e_{S_2} e_{S_4} + 2e_3 e_{S_1} e_{S_2} e_{S_4} + 2e_1 e_{S_2} e_{S_3} e_{S_4} + 2e_{S_1} e_{S_2} e_{S_3} e_{S_4}$$

其中2代表回路是双向的,平方项可看作为特殊的回路视为无效回路,故在计算时略去。

2.4 有效通路的筛选

根据 KCL 和 KVL 定律可知,单个的元器件直接和开关器件相连时为无效回路,可剔除 $e_1 e_{S_1}$ 和 $e_3 e_{S_3}$ 回路。

根据变换器工作原理可知,同一桥臂上下两个开关管不能同时导通,故去除 $e_{S_1} e_{S_3}$, $e_{S_2} e_{S_4}$, $e_1 e_3 e_{S_2} e_{S_4}$, $e_3 e_{S_1} e_{S_2} e_{S_4}$, $e_1 e_{S_2} e_{S_3} e_{S_4}$ 和 $e_{S_1} e_{S_2} e_{S_3} e_{S_4}$ 回路;电容和电压源串联回路仅有瞬间电流故应判为无效回路,可去除 $e_1 e_3$ 回路。电流回路中应含有电感,可去除 $e_3 e_{S_1}$ 和 $e_1 e_{S_3}$ 回路。再除去正常工作回路即可得出潜在通路为

$e_2e_3e_{S_2}$, $e_1e_2e_{S_2}$ 和 $e_2e_3e_{S_4}$ 。

2.5 潜电路工作情况

由第一节变换器工作原理分析可知,潜电路1($e_2e_3e_{S_4}$)发生在模式1之后的阶段,当 S_1 关断后,电感电流并不是预期那样转向 C_1 和 C_3 支路,而是通过 C_3 , C_b , L_{sat} , L_{lk} , S_4 和 V_{in} 通路谐振,因此出现潜电路1;潜电路2($e_2e_3e_{S_2}$)和潜电路3($e_1e_2e_{S_2}$)发生在 S_2 开通 S_3 关断 t_7 以后的时刻,当 S_3 关断时,电感电流并没有流经 C_1 , C_3 , C_b , L_{sat} , L_{lk} 和 S_2 通路,而是通过 C_3 , C_b , L_{sat} , L_{lk} , S_2 和 C_1 , C_b , L_{sat} , L_{lk} , S_2 两条通路单独发生谐振,进而出现潜电路2和潜电路3。

3 仿真与试验结果

根据以上分析,在Matlab/simulink中搭建仿真模型,各参数设为: $C_1=C_3=10\text{ nF}$, $C_b=60\text{ }\mu\text{F}$, $f_s=100\text{ kHz}$, $L_{lk}=20\text{ }\mu\text{H}$, $C_f=220\text{ }\mu\text{F}$, $L_f=100\text{ }\mu\text{H}$, $V_{in}=100\text{ V}$,输出电压可调。为了使仿真更接近于实际,对IGBT特别设置了拖尾电流时间,并且对各器件和变压器参数都进行了额外相应设置。图4(a)为正常电路,改变负载分别得出潜电路波形如图4(b)、(c)和(d)。

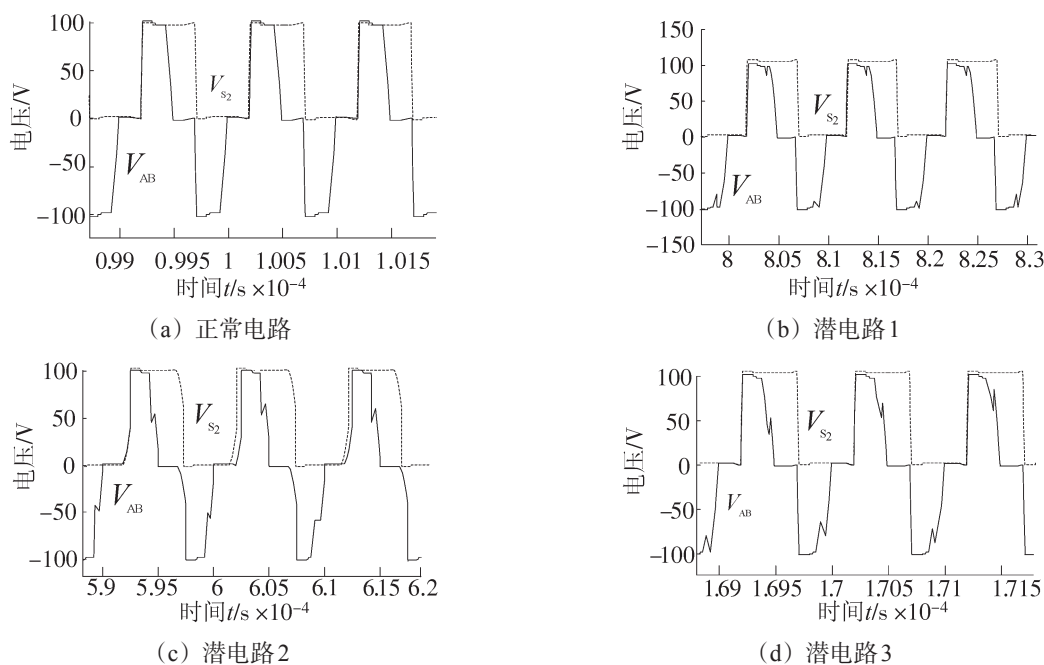


图4 V_{S_2} 和 V_{AB} 的仿真波形

Fig.4 Simulated waveforms of V_{S_2} and V_{AB}

由上图可以看出,当输出负载改变到某一值时,副边输出电流也发生改变到某一值,进而引发潜电路的出现,波形出现不同程度失真现象,结果与上述分析相吻合,虽然仿真波形与理想波形稍有偏差,但也在误差允许范围内。

4 结论

如今电力电子设备应用非常广泛,潜电路的出现严重影响其稳定性,找出其存在并加以分析,然后采取相应措施至关重要。上述简要分析了ZVZCS变换器的工作原理,并利用图论法找出了变换器中出现的潜电路,最后通过仿真验证了分析的正确性,从而为后续采取相应措施和改进方法提供了强大后盾。

参考文献:

- [1] 任立明. 潜在电路及潜在电路分析技术——潜电路分析技术之一[J]. 质量与可靠性, 1998, 1(2): 31-34.
- [2] 李国华, 胡昌华, 叶雪梅, 等. 潜在通路分析技术的发展[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(1): 84-88.
- [3] 王夏, 吕征宇. 一种新型移相全桥ZVZCS PWM变换器拓扑[J]. 电源技术应, 2006, 9(7): 15-20.
- [4] 胡平, 谢顺依, 杨迎化, 等. 新型ZVS全桥DC/DC变换器[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 103-105.
- [5] CHO J G, HUA G, LEE F C. Zero-voltage and zero current switching full bridge PWM converter for high power applications [J]. IEEE On Power Electronics, 2006, 11(7): 622-628.
- [6] 李升, 姜久春, 张维戈. 新型ZVZCS全桥变换器的研究及其改进[J]. 电力电子技术, 2008, 42(2): 21-23.
- [7] 卜月华. 图论及其应用[M]. 2版. 南京: 东南大学出版社, 2002: 35-47.
- [8] 丘东元, 涂文鹃, 张波, 等. 谐振开关电容变换器的潜电路特性[J]. 电子学报, 2007, 35(21): 1505-1510.
- [9] MA QINGLIANG, HU CHANGHUA, HU SHUHAI. Combining qualitative simulation with functional labels for automated Sneak circuit analysis[C]//The 3rd IEEE world Congress on Intelligent Control and Automation. Hefei, 2000: 102-108.
- [10] 张力. ZVS移相全桥变换器潜电路现象及分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 16-19.
- [11] 黎剑源, 丘东元, 张波. n 阶谐振开关电容变换器潜电路图论分析法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 53-59.

Research on Sneak Circuits in the ZVZCS Phase-shifted Full-bridge Converter

Zhang Zuwei, Lin Zhiming

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the sneak circuits in zero-voltage and zero-current phase-shifted full-bridge converter ZVZCS, this paper, by using graph theory analysis method to remove the invalid redundancy and the normal work circuit mode, gets the sneak circuit mode of the converter. Then the circuit simulation is carried out by Matlab/simulink to verify the correctness of the analysis.

Key words: ZVZCS converter; sneak circuit; graph theory