

移相控制 ZVS 全桥变换器滞后臂死区时间分析

Analysis to the Switching Dead-time of the Lagging Arm in FB-ZVS DC-DC Converter

西南交通大学 徐晓峰 连级三 (成都 610031)

河北建筑科技学院 赵建明 (邯郸 056038)

摘要:死区时间的合理选择是保证移相定频控制的全桥零电压开关 DC-DC 变换器零电压开关状态的必要条件。通过分析电路参数与滞后桥臂开关死区时间的关系,给出了滞后桥臂开关死区时间的允许范围,并通过实验进行了验证。

Abstract: Proper selection of the switching dead-time of the lagging arm is necessary for ensuring the ZVS operation of the phase-shifting FB-ZVS DC-DC converter. This paper presents the allowable region of the switching dead-time of the lagging arm through the analysis of the relationship between circuit parameters and switching dead-time. Finally, the results are verified through experiments.

关键词: 直流变换器 死区/零电压开关 移相

Keywords: DC converter; dead-time; ZVS; phase-shifting

1 引言

在以往的 DC-DC 变换器中,开关器件多处于硬开关工作状态,这会导致以下问题:首先,开关器件有较高的开关损耗,限制了开关频率的提高;其次,在关断大电流时,由于分布电感的存在,开关元件承受较高的开关应力。而 ZVS DC-DC 变换器在零电压条件下实现开关,使开关损耗大为降低,自关断器件可充分发挥其开关频率高的优点,同时 Miller 效应被减小到最低程度,减小了装置的 EMI。在各种 ZVS 拓扑方式中,采用移相控制的 FB-ZVS DC-DC 可以工作在 PWM 工作方式,因而,可使装置滤波器的设计优化,减小滤波部分的体积。零电压开关方式将电路的分布参数当作谐振元件的一部分,有效地消除了硬开关方式中分布参数的不利影响。

2 移相控制 FB-ZVS DC-DC 变换器工作原理

全桥移相 PWM 零电压开关 DC-DC 变换原理图及典型工作波形如图 1a、b 所示。

由图 1b 看出, $VT_1 \sim VT_4$ 驱动信号频率相同,且占空比均略小于 50%, VT_1 和 VT_2 、 VT_3 和 VT_4 的驱动信号分别错开 180° 。图中的阴影区段为左、右桥臂通断转换时发生谐振的区段。不难看出,右臂通断转换时,通过 C_3 、 C_4 与 L_r 和 L_o 谐振实现 VT_3 、 VT_4 的零电压开关,左臂通断转换时,通过 C_1 、 C_2 与 L_r 谐振实现 VT_1 、 VT_2 的零电压开关。同时,由于 VT_3 、 VT_4 是在变压器初级电流通过 VD_3 、 VD_4 续流时开通的,所以, VT_3 、 VT_4 为

零电流开通。 VT_3 、 VT_4 的驱动信号分别超前于 VT_1 、 VT_2 驱动信号,故右臂称为超前臂,左臂称为滞后臂。通常, VT_1 、 VT_2 为固定的驱动信号,通过控制 VT_3 相对于 VT_1 、 VT_4 相对于 VT_2 的相位差从 180° 到 0° 进行同步移相,就可以实现变压器一次侧输出占空比从 0 到 100% 变化。

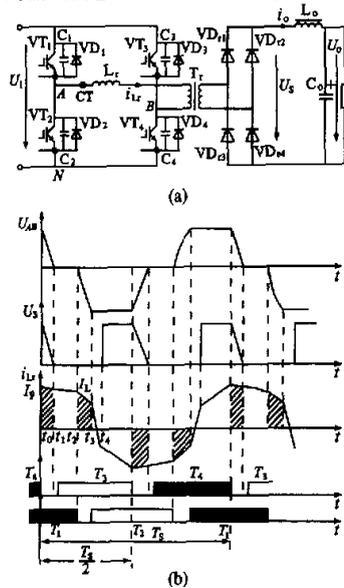


图 1 (a) 电路原理 (b) 典型波形

- 图中 $VT_1 \sim VT_4$ —— 开关元件
 T_r —— 高频变压器
 $C_1 \sim C_4$ —— 器件的等效并联电容(包括元件的寄生电容), $C_1 \sim C_4 = C_r$
 L_r —— 谐振电感(包括变压器漏感)
 L_o, C_o —— 输出滤波

VD_{r1} - VD_{r4}——整流二极管

3 电路参数对死区时间的影响分析

3.1 左右桥臂的死区时间分析

(1)右臂(超前臂)死区时间 t_{d1}

关断的器件在其等效并联电容被充电到电源电压以前, C₃、C₄ 与 L_r 和 L_o 谐振, 由 L_o 的储能和 L_r 的储能共同提供 C₃、C₄ 充放电所需能量。由于输出负载电流参与谐振, 且 L_o ≫ L_r, 这相当于变压器初级电流对 C₃、C₄ 进行恒流充放电, 因此, 这一阶段时间很短, VT₃、VT₄ 很容易实现 ZVS。完成谐振时间可以表示为:

$$t_{d1} \geq 2C_r U_i / I_p \quad (1)$$

式中 I_p——谐振电感电流峰值

(2)左臂(滞后臂)的死区时间 t_{d2}

从图 1 可以看出, 当 $t = t_2$ 时, 左臂 VT₁ 进行通断转换, $i_{Lr}(t_2) = I_2$ 。i_{Lr} 通过 C₁、C₂ 和 L_r 发生谐振, T_r 次级被短路。当 u_{C1} 谐振到等于电源电压 U_i 的同时, u_{C2} = 0, VD₂ 钳位导通, 谐振结束。此时, 如果 U_i < Z_rI₂, 则 i_{Lr} > 0, 如果不立刻开通 VT₂, 则 i_{Lr} 经 VD₃/VT₃ → U_i → VD₂ 续流; VT₂ 开通后, i_{Lr} 以 U_i/L_r 速率迅速下降, 在 $t = t_3'$ 时过零。为使 VT₂ 能实现 ZVS, 应当在 [t₂, t_{3'}] 区间将 VT₂ 开通, 如果在 $t > t_3'$ 以后开通 VT₂, i_{Lr} 过零后, C₂ 将会被充电, 使 VT₂ 不能实现 ZVS。如果 U_i = Z_rI₂, 谐振结束时 i_{Lr} = 0, t_{3'} = π/2ω_o。此时, 必须在 $t = t_3'$ 时开通 VT₂ 才能保证 VT₂ 实现 ZVS。很显然, 电源电压、谐振电路参数、负载电流大小均对左臂死区时间有影响。我们希望在要求的电源电压和负载电流变化范围内, 死区时间能够保证 VT₁、VT₂ 的 ZVS。满足要求的死区时间范围如图 2 所示。

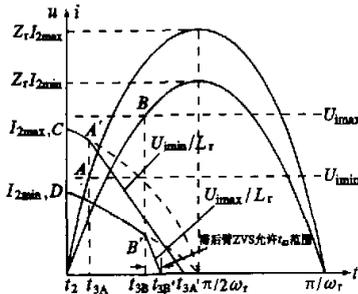


图 2 左臂通断转换死区时间

取 U_{imax} < Z_rI_{2min}, t₂A 和 CA't_{3A'} 分别为 U_i = U_{imin} 和 I₂ = I_{2max} 时, u_{C1} 和 i_{Lr} 的变化轨迹; t₂B 和 DB't_{3B'} 分别为 U_i = U_{imax} 和 I₂ = I_{2min} 时, u_{C1}

和 i_{Lr} 的变化轨迹。可以看出, 在 [t_{3B}, t_{3B'}] 区间内开通 VT₂, 能够保证在要求的电源电压和负载电流变化范围内, 使 VT₂ 实现 ZVS。因此死区时间 t_{d2} 的范围是:

$$\theta_1 / \omega_0 < t_{d2} < \cos \theta_1 / (\omega_0 \sin \theta_1) \quad (2)$$

式中 $\omega_0 = \sqrt{1/(2L_r C_1)}$, $Z_r = \sqrt{L_r/(2C_1)}$

$$\theta_1 = \arcsin [U_{\max} / (Z_r I_{2\min})]$$

死区时间的这一范围要小于通常要求的: t_{d2} < π/2ω_o^[1]。

3.2 实现 ZVS 的临界输出电流

保证零电压开关的变压器初级最小电流与最小输出电流有以下关系^[1]:

$$I_{o\min} = NI_{2\min} - \Delta I_o / 2 + \frac{U_o}{L_o} (1 - D_p) \frac{T_s}{2} \quad (3)$$

式中 N——变压器变比, N = N_p/N_s

ΔI_o——输出电流脉动量

D_p——变压器初级电压占空比

当 L_r/L_o' ≪ 1 时:

$$D_p = D_s [1 + 4(L_r/R')f_s] \quad (4)$$

式中 R' = N²R_o。

由式(3)计算出的 I_{2min} 必须用下式进行校验:

$$I_{2\min} > U_{\max} / Z_r \quad (5)$$

这与要求 t_{d2} < π/2ω_o 是一致的。

谐振电路参数与开关频率、输出电压、输入电压、输出负载变化范围都有关。增大 L_r 可扩大 ZVS 范围, 但带来的不利因素是使 t₃ ~ t₄ 阶段电流下降速度减慢, 增加了占空比损失, 导致开关器件通态损耗增大。同样, 等效谐振电容 C_r 也不宜增大。增大变压器变比可减小器件通态损耗, 但会使为达到 ZVS 所需的 L_r 增大。因此, 谐振电路参数、死区时间应满足式(2)~(5)的要求。

4 实验研究

为了研究采用功率 MOS 管的全桥移相 ZVS DC-DC 拓扑在高电压大功率场合的性能, 研制了一台 2.8kVA 的实验样机, 主电路技术参数如下:

输入电压: 500 ± 20% V DC

输出电压: 280V DC

输出电流: I_o = 5 ~ 10A

输出电压波动: ΔU_o = 1%

输出电流脉动: ΔI_o ≤ 1.5 I_{omin} %

VT₁ ~ VT₄: IRFP650

T_r: FUM 铁基超微晶铁心

变压器变比: N_p:N_s = 1:1

滤波电容: $C_o = 20\mu\text{F}$

滤波电感: $L_o = 150\mu\text{H}$

谐振电路参数: $L_r = 12\mu\text{H}$, $C_r = 156\text{pF}$

变压器次级电压: 350V

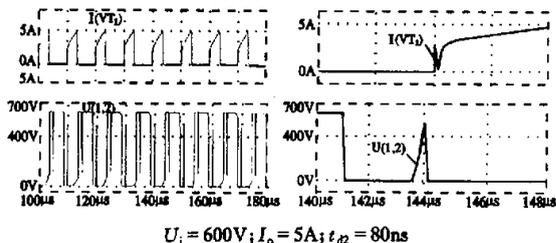
$\text{VDr}_1 \sim \text{VDr}_4$: DESI2 \times 61

器件的工作频率: 100kHz

由式(3)~(5)可以计算出 $I_{2\text{min}} = 4.45\text{A}$, $D_p = 1.17D_s$, 滞后桥臂的死区时间范围为 $46.3\text{ns} \leq$

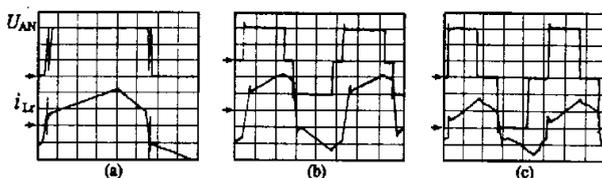
$t_{d2} < 64.5\text{ns}$, 即在这一范围内选择滞后桥臂死区时间, 能够保证在要求的输入电压和输出电流变化范围内滞后臂的器件均工作在 ZVS 状态。如果按 $t_{d2} < \pi/2\omega_0$, 则要求 $t_{d2} < 96\text{ns}$ 。从图 3 的仿真结果和图 4a 的实验结果可以看出, 死区时间取 $t_{d2} = 80\text{ns}$, 当输入电压较高, 负载较小时, VT_2 的漏-源电压出现畸变是由于 VT_1 、

VT_2 死区时间超出了保证 ZVS 所允许的范围, 在 VT_1 、 VT_2 开通前, C_1 、 C_2 分别被再次充电引起的, 这将导致 VT_1 、 VT_2 的非零电压开关, 当器件开通时, C_1 、 C_2 的储能通过器件释放, 将使器件承受较高的电流应力。由图 4b、c 可以看出, $t_{d1} = t_{d2} = 50\text{ns}$, 电压波形的畸变现象消失, 在要求的输入电压和输出电流变化范围内, 滞后臂的器件均工作在 ZVS 状态。



$U_i = 600\text{V}$; $I_o = 5\text{A}$; $t_{d2} = 80\text{ns}$

图 3 仿真波形



(a) $U_i = 600\text{V}$; $I_o = 5\text{A}$; $t_{d2} = 80\text{ns}$ (b) $U_i = 400\text{V}$; $I_o = 10\text{A}$; $t_{d2} = 50\text{ns}$ (c) $U_i = 600\text{V}$; $I_o = 5\text{A}$; $t_{d2} = 50\text{ns}$

图 4 实验波形(电压: $200\text{V}/\text{格}$; 电流: $5\text{A}/\text{格}$; 时间: $1\mu\text{s}/\text{格}$)

5 结论

(1) 全桥移相控制 ZVS DC-DC 变换器的开关器件均工作在零电压开关状态, 因此器件的开关损耗大为降低, 使变换器可以可靠地工作在比硬开关方式变换器更高的开关频率下。

(2) 设计了一个 2.8kVA 的样机, 并进行了实验。实测结果表明, 满载运行时的效率可达 92% , 在满负载的一半时, 效率仍可达 87% , 达到了预期效果。

(3) 理论分析和实验研究证明, 死区时间对移相控制全桥 ZVS DC-DC 变换器的 ZVS 状态有影

响。死区时间的选择应当根据设计要求, 由式(2)确定。

参考文献

- 1 Sabate J A, Vlatkovic V, Ridley R B, et al. Design Consideration for High-Voltage High-Power Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM converter. IEEE APEC, 1990; 275~284.

收稿日期: 1998-03-28

定稿日期: 1998-05-06

作者简介

徐晓峰: 男, 1963 年 12 月生, 博士。主要从事电力传动与电力电子技术方面的研究工作。

移相控制ZVS全桥变换器滞后臂死区时间分析

作者: [徐晓峰](#), [连级三](#), [赵建明](#)
作者单位: [徐晓峰, 连级三\(西南交通大学, 成都, 610031\)](#), [赵建明\(河北建筑科技学院, 邯郸, 056038\)](#)
刊名: [电力电子技术](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [POWER ELECTRONICS](#)
年, 卷(期): 1999, 33(1)
被引用次数: 9次

参考文献(1条)

1. Sabate J A; Vlatkovic V; Ridley R B [Design Consideration for High-Voltage High-Power Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM converter](#) 1990

引证文献(9条)

1. [徐明](#), [尹斌](#) [一种带辅助支路的移相全桥零电压开关变换器](#)[期刊论文]-[电力电子技术](#) 2006(4)
2. [王惠庆](#), [徐明](#), [尹斌](#) [带箝位辅助谐振支路的改进型变换器研究](#)[期刊论文]-[电力电子技术](#) 2006(3)
3. [王惠庆](#), [徐明](#) [一种带辅助支路的移相全桥变换器的改进研究](#)[期刊论文]-[电气应用](#) 2006(4)
4. [徐明](#), [尹斌](#), [周岩](#) [ZVS PWM全桥变换器副边箝位电路研究](#)[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2006(9)
5. [徐明](#) [移相控制ZVS全桥变换器的改进研究与工程实现](#)[学位论文]硕士 2006
6. [王经明](#) [移相控制PWMZVS全桥变换器的研究](#)[学位论文]硕士 2005
7. [陈青昌](#) [移相全桥数字化ZVS直流变换器研究](#)[学位论文]硕士 2005
8. [白建国](#) [ZVZCS三电平PWM逆变弧焊电源的研究](#)[学位论文]硕士 2004
9. [李金刚](#), [陈建洪](#), [钟彦儒](#), [宁耀斌](#) [FB-PWM变换器零电压转换的设计](#)[期刊论文]-[西安理工大学学报](#) 2002(2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_dldzjs199901005.aspx

授权使用: 北京交通大学(北京交通大学), 授权号: 1cf7dbf1-4832-417a-bae2-9ee70105e4fb

下载时间: 2011年5月18日