

无源软开关 BUCK/BOOST 电路的研究

柳莺¹ 吴洪洋² 何湘宁¹

¹ 浙江大学电力电子技术研究所 (杭州 310027)

² 台达电力电子 R&D 中心 (上海 201209)

摘要: 本文分析研究了一种新颖的结构简单的无源无损软开关 BUCK/BOOST 电路。首先重点分析了该主电路 BOOST 拓扑结构的工作原理, 并且考虑到中点电压平衡问题, 提出了其控制的实现方法。然后分析了无源无损软开关在该电路中的应用, 给出了换流过程的状态图及相关波形。

叙词: 多电平 BUCK/BOOST 软开关

1 引言

近年来, 多电平变换器逐渐成为高压大功率研究领域的一个热点, 其应用也被扩展到 DC-DC 变换领域[1][2][3]。文献[3]提出了具有实用价值的新颖的三电平 BUCK/BOOST 电路, 如图 1、2 所示。本文将在第二节以 BOOST 电路为重点阐述其工作原理。

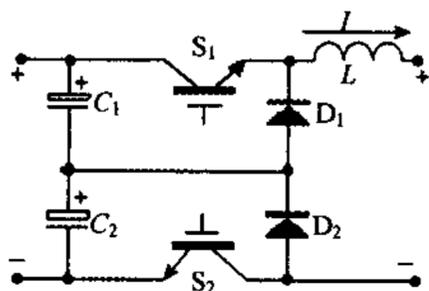


图 1 具有实用价值的三电平 BUCK 电路

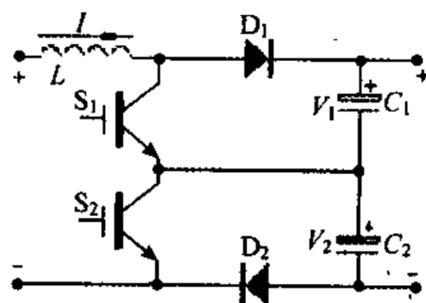


图 2 具有实用价值的三电平 BOOST 电路

基于拓扑、控制和检测简化的目的, 文献[3]提出了采用无源无损软开关技术的三电平 BOOST 电路, 如图 3 所示。类似地可以得到如图 4 所示的无源软开关三电平 BUCK 电路。本文将在第三节对其工作过程进行分析。

2 三电平 BOOST/BUCK 电路

首先阐述三电平 BOOST 电路的工作原理和实现方法。方便分析, 以“0”和“1”分别表示开关管的关断和开通。如图 2, 开关管 S_1 、 S_2 的不同状态组合“00”、“01”、“10”、“11”对应于电路的四种工作模式。^[4]

在“00”工作模式下, 开关管 S_1 、 S_2 关断, 续流二极管 D_1 、 D_2

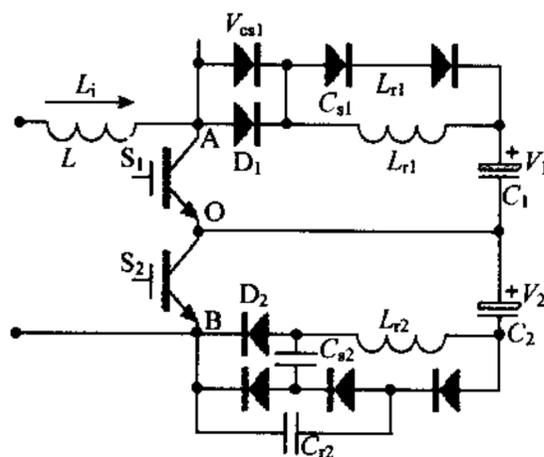


图 3 三电平无源软开关 BOOST 电路

导通。由于输出电压 V_0 大于输入电压 V_i , 电感电流 i_L 在 $V_0 - V_i$ 作用下线性下降, 输出电容 C_1 、 C_2 串联充电。 $V_{AB} = V_1 + V_2$ 。

“01”工作模式下, S_1 关断, S_2 、 D_1 导通。此时, 若电容 C_1 两端电压 V_1 大于输入电压 V_i , 电压电流 i_L 在 $V_1 - V_i$ 作用下线性下降; 若 V_1 小于 V_i , 则 i_L 在 $V_i - V_1$ 作用下线性上升。该工作模式下, C_1 充电, C_2 放电。 $V_{AB} = V_1$ 。

“10”工作模式下, S_1 、 D_2 导通, S_2 关断。此时, 如果电容 C_2 两端电压 V_2 大于 V_i , 则 i_L 在 $V_2 - V_i$ 作用下线性下降; 如果 V_2 小于 V_i , 则 i_L 在 $V_i - V_2$ 作用下线性上升。该工作模式下, C_2 充电, C_1 放电。 $V_{AB} = V_2$ 。

“11”工作模式下, S_1 、 S_2 导通, D_1 、 D_2 关断。电感电流 i_L 在 V_i 作用下线性上升。 C_1 、 C_2 串联放电。 $V_{AB} = 0$ 。

可见, 电感电流上升或下降还与输入输出电压 V_i 和 V_0 的关系有关。另外, 设计 BOOST 电路的控制时还须考虑由于输出电容 C_1 、 C_2 的分压不平衡引起的中点电压平衡问题。

为方便分析, 将三电平 BOOST 电路的工作区域分为两个部分:

1) $V_i > V_0/2$ 区域:

此区域中, 在中点电压平衡情况下, V_1 和 V_2 均小于输入电压 V_i , 因而只有工作模式“00”可以使电感电流下降。模式“01”

和“10”都可以用来增加电感电流,但两者对 midpoint 电压的作用不同。模式“01”下,电容 C_1 充电,从而使 midpoint 电压下降。模式“10”下, C_2 充电, midpoint 电压上升。模式“11”在此工作区域中不使用,因为“00” \rightarrow “11”的跳变不符合三电平变换器工作模式切换的原则,即同一时刻不能有两个开关同时动作。

2) $V_i < V_0/2$ 区域:

此区域中,在 midpoint 电压平衡情况下, V_1 和 V_2 均大于 V_i ,因而只有工作模式“11”可以使电感电流上升。模式“01”和“10”都可以用来减小电感电流,但两者对 midpoint 电压的作用不同。模式“01”降低 midpoint 电压,而模式“10”则增加 midpoint 电压。同样地,模式“00”在此工作区域中不使用。

可见,只需增加如下两个控制逻辑即可实现三电平 BOOST 电路的控制。

$L_1 = 1$ 如果 $V_i > V_0/2$

或 $L_1 = 0$ 如果 $V_i < V_0/2$

$L_2 = 1$ 如果 $V_i > V_2$

或 $L_2 = 0$ 如果 $V_i < V_2$

其中,逻辑 L_1 用来判断工作区域, L_2 用来控制 midpoint 电压平衡。 L_1 、 L_2 与来自传统二电平 BOOST 电路的控制逻辑 L_0 共同作用,决定三电平 BOOST 的工作模式,如表 1 所示。

表 1 三电平 BOOST/BUCK 工作模式

L_0	L_1	L_2	工作模式
0	0	0	01
0	0	1	10
0	1	0	00
0	1	1	00
1	0	0	11
1	0	1	11
1	1	0	01
1	1	1	10

由上表可得开关管 S_1 、 S_2 的门极信号 G_1 、 G_2 的表达式如下:从而可实现三电平 BOOST 电路的控制。

类似地,只需增加如下两个控制逻辑,即可实现三电平 BUCK 电路的控制。

$L_1 = 1$ 如果 $V_i/2 > V_0$

或 $L_1 = 0$ 如果 $V_i/2 < V_0$

$L_2 = 1$ 如果 $V_i > V_2$

或 $L_2 = 0$ 如果 $V_i < V_2$

其工作模式选择表及 G_1 、 G_2 控制逻辑表达式结果均与 BOOST 情况完全一致。

3 无源软开关三电平 BOOST/BUCK 电路

无源软开关三电平 BOOST、BUCK 电路分别如图 3、图 4 所示。附加的软开关单元结构非常简单,由谐振电感 $L_{r1(2)}$ 、谐振

电容 $C_{r1(2)}$ 、储能电容 $C_{s1(2)}$ 和三个二极管 $D_{1(2)1}$ 、 $D_{1(2)2}$ 、 $D_{1(2)3}$ 构成。电感 $L_{r1(2)}$ 和电容 $C_{r1(2)}$ 、 $C_{s1(2)}$ 之间的谐振实现了开关管的零电流开通和零电压关断,以及续流二极管的零电压关断和零电压开通。同时,每个开关周期电容 $C_{s1(2)}$ 收集这些谐振能量,并最终转移到负载,实现了吸收电路的无损运行。

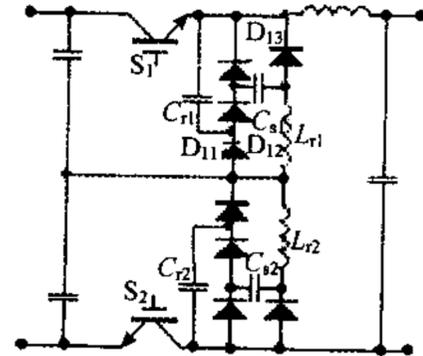


图 4 三电平无源软开关 BUCK 电路

以 BUCK 电路为例对三电平无源软开关电路的换流过程进行分析。首先做如下假设:

- 1) 除续流二极管外,均为理想器件;
- 2) 输入电感远大于谐振电感 $L_{r1(2)}$;
- 3) 输出电容足够大,使得输出电压恒定。

由于电路结构的对称性,仅分析 S_1 与 D_1 之间的换流过程。每周期工作过程分为 8 个阶段,如图 5(a) - (h) 所示。

阶段 1 ($t_0 < t < t_1$): 时刻 t_0 之前, S_1 关断, S_2 、 D_1 导通。电路处于 S_2 与 D_1 导通负载电流的稳定状态。 t_0 时刻, S_1 开通, 谐振电感 L_{r1} 的存在使得 D_1 的电流值从输入电流 I_i 开始线性下降, 同时 S_1 的电流 I_{s1} 从零开始以同样斜率线性上升, 实现了开关管 S_1 的零电流开通。

阶段 2 ($t_1 < t < t_2$): t_1 时刻, D_1 反向恢复结束并关断。由于 V_{Cs1} 和 V_{Cr1} 均等于零, D_{12} 自然开通。谐振电感 L_{r1} 、谐振电容 C_{r1} 储能电容 C_{s1} 串联谐振。 D_1 两端电压从零谐振上升, 实现了续流二极管 D_1 的零电压关断。

阶段 3 ($t_2 < t < t_3$): t_2 时刻, C_{r1} 充电至 V_i , 从而 D_{11} 导通, V_{Cr1} 保持恒定。 L_{r1} 、 C_{r1} 、 D_{12} 和 D_1 开始第二个谐振过程。

$$G1 = \overline{L1}L2 + \overline{L1}L0 + L2L0 \quad (1)$$

$$G2 = \overline{L1}L1 + \overline{L1}L0 + \overline{L2}L0 \quad (2)$$

阶段 4 ($t_3 < t < t_4$): t_3 时刻, I_{Lr1} 减小到零, D_{12} 、 D_{11} 关断, 谐振结束, 至此, 储存在 L_{r1} 中的能量全部转移到 C_{r1} 中。之后, C_{r1} 和 C_{s1} 的电压保持不变。电路处于 S_1 、 S_2 导通的稳定运行状态。

阶段 5 ($t_4 < t < t_5$): t_4 时刻, S_1 关断, 输入电流经 D_{11} 对 C_{r1} 放电。 S_1 的管电压等于 $V_i - V_{Cr1}$ 。由于 $t_4(-)$ 时刻, V_{Cr1} 等于 V_i , 因此, 管电压从零开始上升, 即实现了 S_1 的零电压关断。

阶段 6 ($t_5 < t < t_6$): t_5 时刻, C_{r1} 放电到零, D_{12} 、 D_{13} 导通。于是

L_{r1} 端电压等于 V_{o1} , C_{s1} 经 L_{r1} 向输出端谐振放电。

阶段 7 ($t_6 < t < t_7$): t_6 时刻, I_{Lr1} 上升至 I_i , D_{11} 、 D_{12} 关断。之后, I_i 继续经 D_{13} 使 C_{s1} 放电。

阶段 8 ($t_7 < t < t_8$): t_7 时刻, C_{s1} 放电至零, D_{13} 关断, D_1 从零电

压自然开通。储存在 C_{s1} 中的能量完全转移到负载。负载电流经 D_1 输出, 电路又回到与阶段 1 初始时刻 t_0 相同的稳定运行状态, 等待下一个开关周期的到来。

三电平 BOOST 软开关电路的换流过程与之类似。

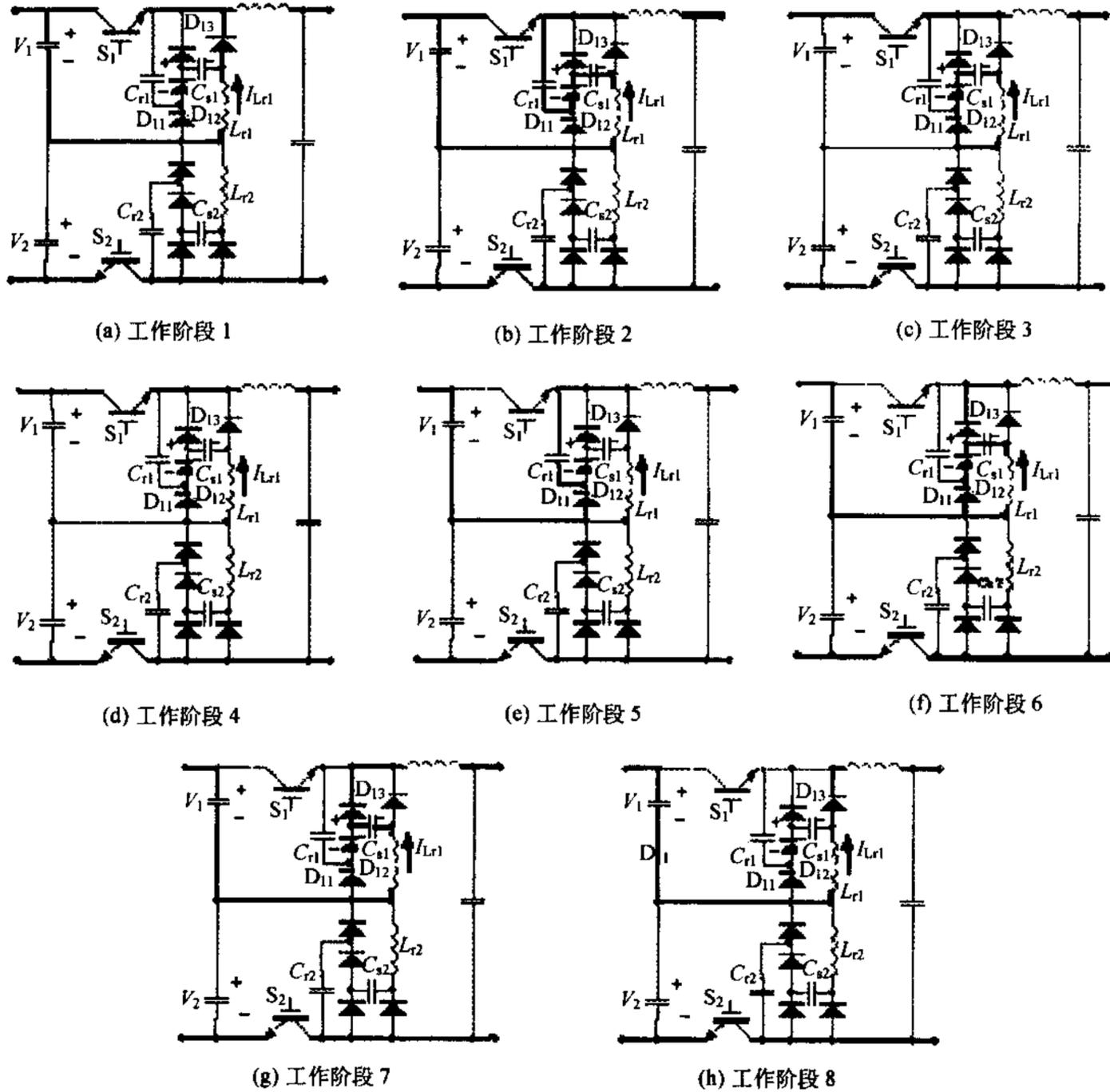


图 5

4 结论

本文研究了一种单相三电平软开关 BOOST/BUCK 电路拓扑, 分析了主电路拓扑以及无源无损软开关单元的工作原理和工作过程。该电路结构简单, 具有诸如电压应力低、开关损耗小等诸多优点。附加的无源无损软开关单元不需要额外增加检测或控制电路, 因而不会增加控制电路的复杂度。

参考文献

[1] Michael T. Zhang et al, "Single phase three-level boost power factor

corrector converter", Proceeding of IEEE APEC '95, Vol1, pp. 434-439, March 1995

[2] Bor-Ren Lin, Hsin-Hung Lu, "Single-phase three-level PWM rectifier", Proceeding of IEEE PEDS '99, Vol. 1, pp. 63-68, July 1999

[3] Hongyang WU, Xiangning He, "A Novel Single Phase Three-level Power Factor Correction Circuit with Passive Lossless Snubber", Proceeding of IEEE APEC '2002, Vol. 2, pp. 968-974, March 2002

[4] 吴洪洋, "多电平变换器及其相关技术研究", 浙江大学博士学位论文, 2001 年 12 月。