

文章编号:1005-0523(2018)02-0105-08

一种新型双变压器三电平 DC/DC 变换器的研究

袁义生^{1,2},梅相龙¹,毛凯翔¹

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013;

2. 大功率交流传动电力机床系统集成国家重点实验实,湖南 株洲 412000)

摘要:本文提出了一种双变压器三电平变换器,通过在主桥臂并联一组辅助桥臂,再将辅助变压器的二次侧串联至主变压器的一次侧实现。该变换器不仅保留了传统三电平变换器的优点,同时通过辅助桥臂的通断从而实现宽范围输出电压;详细分析了双变压器三电平变换器的工作原理,分别比较了该变换器和传统变换器在不同输出范围下的效率。研制了一台 1 500 W 的原理样机,实验结果验证了理论分析的正确性以及该新型变换器的可行性。

关键词:双变压器;宽范围输出;三电平变换器

中图分类号:TM46

文献标志码:A

随着世界能源的危机和污染问题不断加深,电动汽车的加速发展势在必行,高效率大功率密度的直流充电桩自然成为电动汽车的研究重点。目前市场流行的电动汽车直流充电桩大多为两级式结构:前级为 PFC 功率因数校正电路;后级为高效率隔离型 DC/DC 变换电路。但采用的充电电路拓扑单一,要满足市场上 200~750 VDC 的宽范围充电电压范围时,通常只在输出高压时能保持高效率,而输出低压时效率较输出高压时下降不少。究其原因,变压器及其他磁性元件是按照高占空比甚至满载设计的,当电路占空比较低时,各元件无法达到最高效率点工作。所以进行高效率宽范围输出的拓扑研究是有必要的。

文献[1-2]均提出了副边变匝比的方式拓宽输出电压的范围,但是使用单个开关管控制一个绕组难以实现输出电压的无极平滑调节,而多个绕组多个开关管的使用无疑会使电路成本大幅上升。文献[3-4]分别提出了半桥/全桥、两电平/三电平模态变换提高效率和输入范围的电路,但拓扑的根本结构并未改变,提高的范围较为有限且其控制相对复杂。文献[5]提出了变压器并串联结构全桥 LLC 谐振变换器,该方案对于宽范围的提升比较可观,但是流经开关管和整流二极管的电流是传统变换器的两倍,开关管和整流二极管的电流应力很大,这对于开关管和二极管是不小的冲击。文献[6-7]提出的双变压器提升输入输出范围方案效果不佳,且主要将双变压器用于实现开关管的软开关,视野较为局限。文献[8-11]提出了在主电路侧并联一组 Boost 电路,主要优化在于添加的辅助电路在宽范围输入时 PWM 控制策略的调整,对于电路拓扑整体的宽范围输入/输出探究不足。文献[12]提出在变压器直接并/串结构,但是其开关管二极管电流仍然很大,电路的开关管和二极管的通态损耗会增加。文献[13-16]基于变压器串并结构的基础上,在整流桥间串联了电感,此举的主要优化在于抑制电流的纹波,使器件的电流应力有所减小,但在宽范围输入/输出的研究上仍显不足。文献[17]采用了两个变压器副边串联的结构,但采用的整流二极管数量多了一倍,这增加电路的硬件成本和复杂程度,不符合经济需求。文献[18]所提出的方案应用场所狭窄,仅在低压小功率范围场所适用,无法适用于直流充电桩等大功率场合中。

收稿日期:2017-10-09

基金项目:国家自然科学基金(51467005);江西省重点研发计划(20171BBE50018);大功率交流传动电力机床系统集成国家重点实验实开放课题(2017ZJKF10)

作者简介:袁义生(1974—),男,教授,博士,硕士生导师,研究方向为电力电子及控制技术。

所以为了能够获得宽范围输出的同时,又能在输出低压时保持高效率,本文首次引入一组辅助桥臂,提出了一种新型双变压器三电平变换器,并分析其工作原理及各阶段工作过程,给出其与传统三电平电路设计的相异之处,并通过实验对本文所提新电路进行了验证。

1 工作原理

1.1 电路拓扑

图1为新型双变压器三电平变换器电路拓扑, $Q_1\sim Q_4$ 为辅助桥臂开关管, $Q_5\sim Q_8$ 为主桥臂开关管, $D_1\sim D_4$ 为副边整流二极管, $D_5\sim D_8$ 为两组箝位二极管, $D_9\sim D_{12}$ 为 $Q_1\sim Q_4$ 的体二极管, $D_{13}\sim D_{16}$ 为 $Q_5\sim Q_8$ 的体二极管, $C_3\sim C_6$ 为辅助桥臂开关管 $Q_1\sim Q_4$ 的寄生结电容, $C_7\sim C_{10}$ 为主桥臂开关管 $Q_5\sim Q_8$ 的寄生结电容, L_r 为滤波电感, TX_1 为主变压器, TX_2 为辅助变压器,两变压器变比均为 $n_1=n_2=1:1$ 。

为了简化分析,作如下假设:①所有开关管、二极管、电感、电容均为理想器件;②输出电容足够大,等效为电压源 U_o ;③所有开关管的寄生结电容均相等。

电路主要有两种工作状态即低压输出模式和高压输出模式,以下根据两工作模式给出工作原理分析。

1.2 低压输出(辅助桥臂输出零电平)模式

当输出低压时,辅助桥臂输出零电平即 Q_1 和 Q_4 关断, Q_2 和 Q_3 常通。主桥臂正常开通,在一个开关周期内共有10个开关模式,如图2所示。

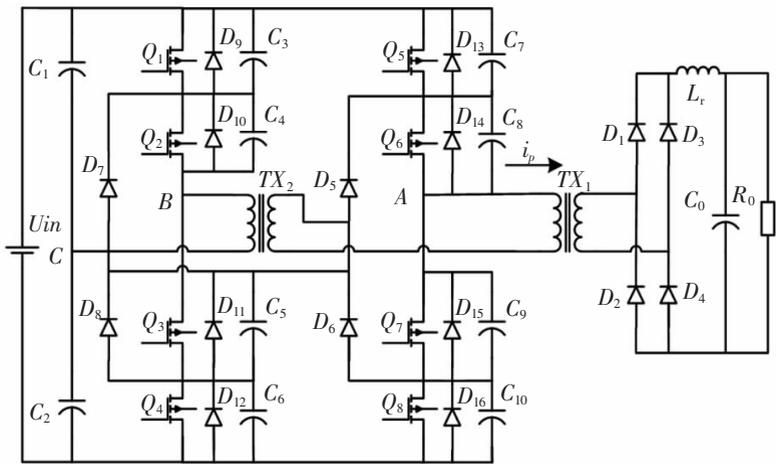


图1 新型双变压器三电平变换器

Fig.1 The new interleaved three-level converter with dual transformer

由于辅助桥臂输出零电平,所以低压模式下只分析主桥臂的开关过程。

开关模式0,在 t_0 时刻之前 Q_5 和 Q_6 导通,副边二极管 D_1 、 D_4 导通,能量经变压器向副边传递, Q_7 和 Q_8 关断,两管承受电压均为 $U_{in}/2$,A点的电压为 U_{in} 。

开关模式1 $[t_0-t_1]$, t_0 时刻 Q_5 关断。 i_p 线性下降并给其结电容 C_7 充电,此时, C_7 两端的电压从零开始线性上升。A点的电压下降为 $U_{in}/2$,此时箝位二极管 D_5 导通。

开关模式2 $[t_1-t_2]$, t_1 时刻开通 Q_7 ,此时变压器 TX_1 副边的二极管全部导通,变压器 TX_1 副边和原边电压全部为零,但电流仍从 Q_6 流过。能量不进行传输。

开关模式3 $[t_2-t_3]$, t_2 时刻关断 Q_6 ,主变压器绕组有下正上负的趋势,辅助变压器绕组有上正下负的趋势,箝位二极管 D_6 导通。

开关模式4 $[t_3-t_4]$, t_3 时刻开通 Q_8 , i_p 反向线性增加,A点电位为 $-U_{in}$,副边二极管 D_2 、 D_3 导通,电路开始另半个周期的工作。

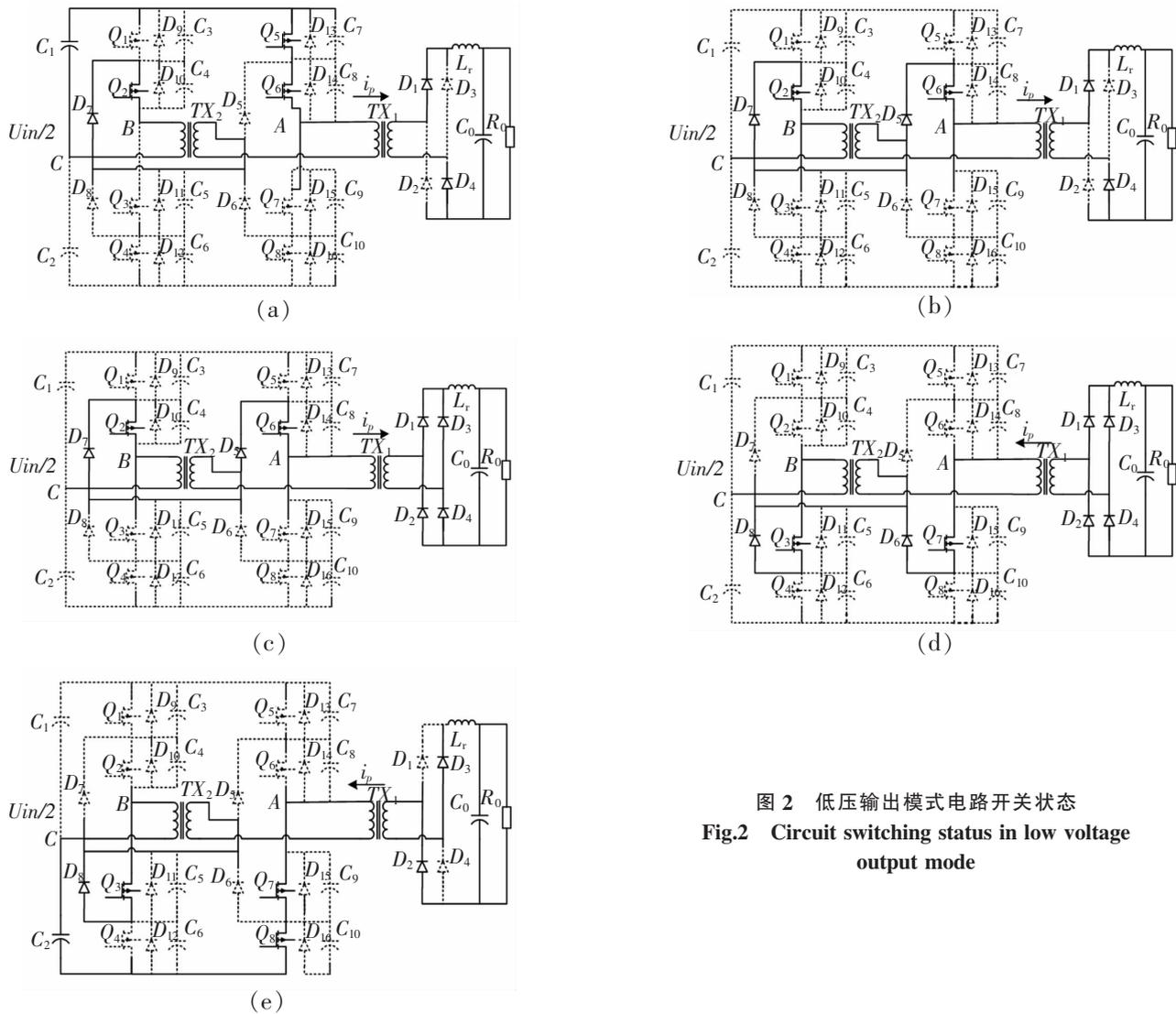


图 2 低压输出模式电路开关状态
Fig.2 Circuit switching status in low voltage output mode

1.3 高压输出(辅助桥臂开通)模式

当输出高压时,辅助桥臂开通,但时序上要与主电路的脉冲一致,占空比大小可根据输出的大小而给定。在一个开关周期内一共有 10 个开关模式。为简化分析,下面以主桥臂和辅助桥臂均为满占空比时进行分析,如图 3 所示。

开关模式 0,在 t_0 时刻之前 Q_1, Q_2, Q_5, Q_6 导通,副边二极管 D_1, D_4 导通,能量经变压器向副边传递, Q_3, Q_4, Q_7, Q_8 关断,辅助变压器 TX_2 的副边加在主变压器 TX_1 原边实现增大输出,四管承受电压均为 $U_{in}/2$ 。

开关模式 1 $[t_0-t_1]$, t_0 时刻 Q_1, Q_5 同时关断。 i_p 线性下降并给其结电容 C_3, C_7 充电,此时, C_3, C_7 两端的电压从零开始线性上升。两变压器电压开始下降, A 点的电压下降为 $U_{in}/2$, 此时箝位二极管 D_5, D_7 导通。

开关模式 2 $[t_1-t_2]$, 在 t_1 时刻同时开通 Q_3, Q_7 , 此时变压器 TX_1 副边的二极管全部导通, 变压器 TX_1, TX_2 副边和原边电压全部为零, 但电流仍从 Q_2, Q_6 流过。能量不进行传输。

开关模式 3 $[t_2-t_3]$, 在 t_2 时刻关断 Q_2, Q_6 , 此时主变压器绕组和辅助变压器绕组有下正上负的趋势, 箝位二极管 D_6, D_8 导通。

开关模式 4 $[t_3-t_4]$, 在 t_3 时刻开通 Q_4, Q_8, i_p 开始反向线性增加, 副边二极管 D_2, D_3 导通, 电路开始另半个周期的工作。

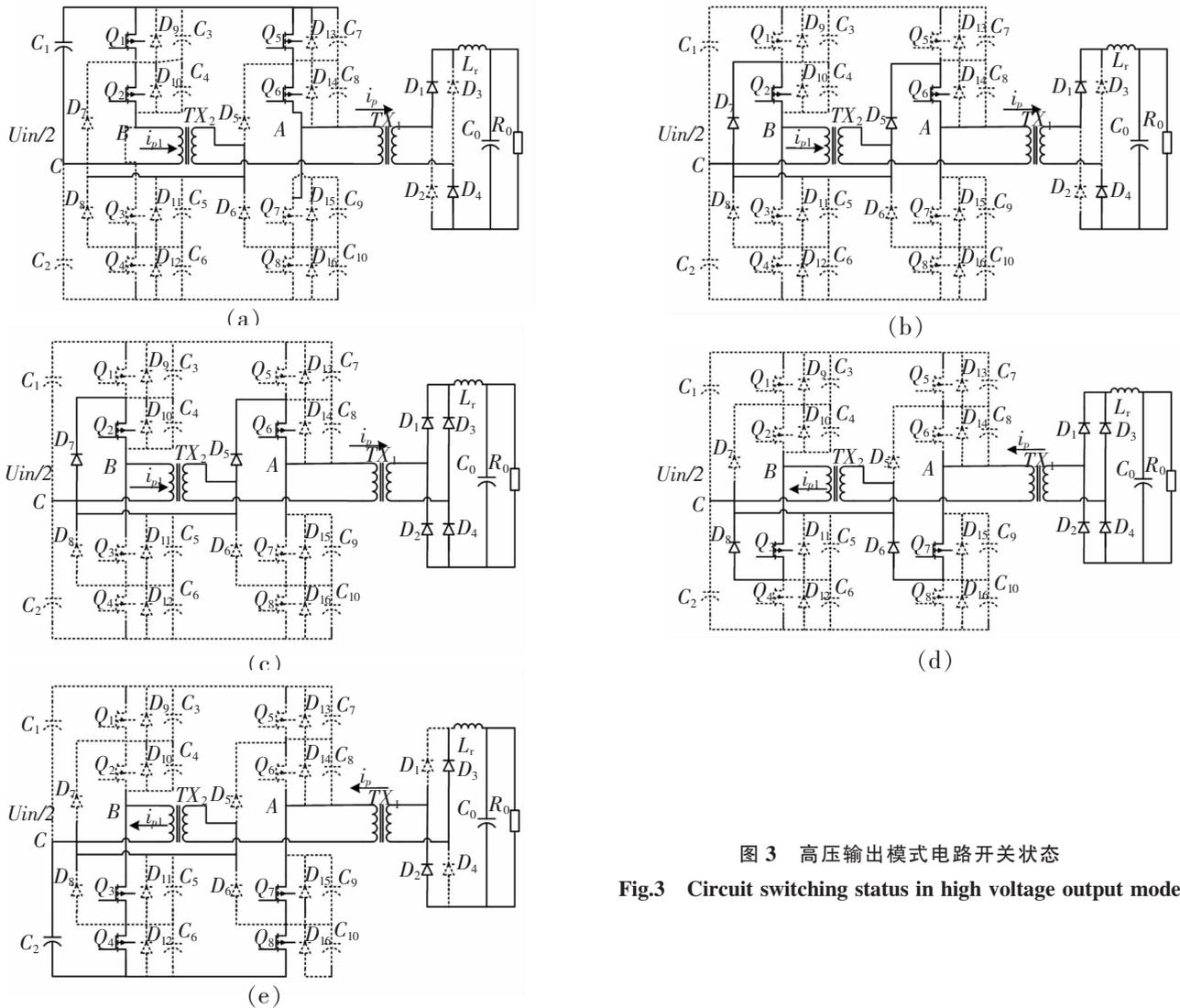


图3 高压输出模式电路开关状态

Fig.3 Circuit switching status in high voltage output mode

2 器件设计与分析

以传统三电平拓扑为例与新拓扑对比进行了器件选型分析。

1) 一次侧开关器件。在高压输出带满载时,本文所提拓扑一次侧的开关管 $Q_1 \sim Q_8$, 二极管 $D_5 \sim D_8$ 与传统电路中对应该器件流过的电流一致,其所承受的电压也一致。故这些器件的选择设计与传统电路一致,且比传统电路具有的优点是实现开关器件的电流均流。

2) 二次侧器件。二次侧的二极管 $D_5 \sim D_8$ 与电感 L_o 在高压输出带满载时,与传统电路中对应该器件工作状态完全一致,所以这些二极管的选型也是一致的。

3) 变压器。假设传统拓扑中主变压器 TX_1 的匝比为 $N_{pt} : N_{st}$ 。

所提拓扑中主变压器 TX_1 二次侧绕组 N_s 与传统变压器的 N_{st} 承受电压和电流均一致,故两者绕组设计一致。但是, TX_1 的一次侧绕组 N_p 由于承受电压是传统变压器的 N_{pt} 的 2 倍,故 $N_p = 2 N_{pt}$, 而 N_p 中流过的电流 I_p 是 N_{pt} 流过的电流的 1/2。当 TX_1 与 TX_i 选择用相同尺寸磁芯时,前者一次侧绕组的损耗是后者的 $\frac{1}{2\sqrt{2}}$ 。

辅助变压器的 TX_2 的一/二次侧绕组的设计一致,匝数为 N_{pt} , 电流是传统变压器 TX_i 一次侧绕组的一半,其总绕组损耗是 TX_1 中 N_p 的一半。

根据 AP 法设计变压器,有:

$$A_p = A_e A_w = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{4k_w k_f B_{AC} f} 10^4 \quad (1)$$

其中 A_e 为有效磁芯截面积; A_w 为窗口面积; I_1 为原边电流; I_2 为副边电流; U_1 为原边电压; U_2 为副边电压; k_w 为窗口面积利用系数; J 为电流密度; B_{AC} 为磁感应密度; f 为开关频率; k_f 为波形系数。由于新拓扑的原边电压 U_1 为传统拓扑的 2 倍,而新拓扑的原边电流 I_1 为传统拓扑的 1/2,所以新拓扑主变压器的匝数是传统拓扑的 2 倍,漆包线的有效截面积是传统拓扑的 1/2,两者的 AP 值是一致的。对辅助变压器而言,其电压为主变压器的一半,所以辅助变压器的 AP 值是主变压器的一半。

3 仿真与实验结果

为了验证提出的新型双变压器三电平变换器的工作原理,在实验室完成了一台 1 500 W 的实验样机,其输入电压 U_m 为 200 VDC,输出电压 U_o 为 80~180 VDC,输出电流 I_o 为 3~10 A,开关管 Q_1 ~ Q_8 均为英飞凌 infineon 生产的 65F6041,两变压器变比 K 均为 1:1,变压器励磁电感为 1.8 mH,漏感为 2 μ H,变压器磁芯为 EE42 型,原副边均采用三明治绕法,原副边匝数均为 19 匝。开关频率为 50 kHz,输出滤波电感为 480 μ H,输出滤波电容为 380 μ F。图 4 为采用 Saber 对所提新电路进行的仿真结果,其中分为辅助桥臂不开通、辅助桥臂满占空比开通及辅助桥臂半占空比开通 3 种情况,由此对新拓扑进行了初步分析与验证。图 5 为新拓扑的实验波形,同样根据辅助桥臂不开通、辅助桥臂满占空比开通及辅助桥臂半占空比开通与之对应的 3 种情况测取了波形,对此进行了实验验证与分析,实验波形和仿真波形一致,与前文理论分析一致,证明了新拓扑的可行性。

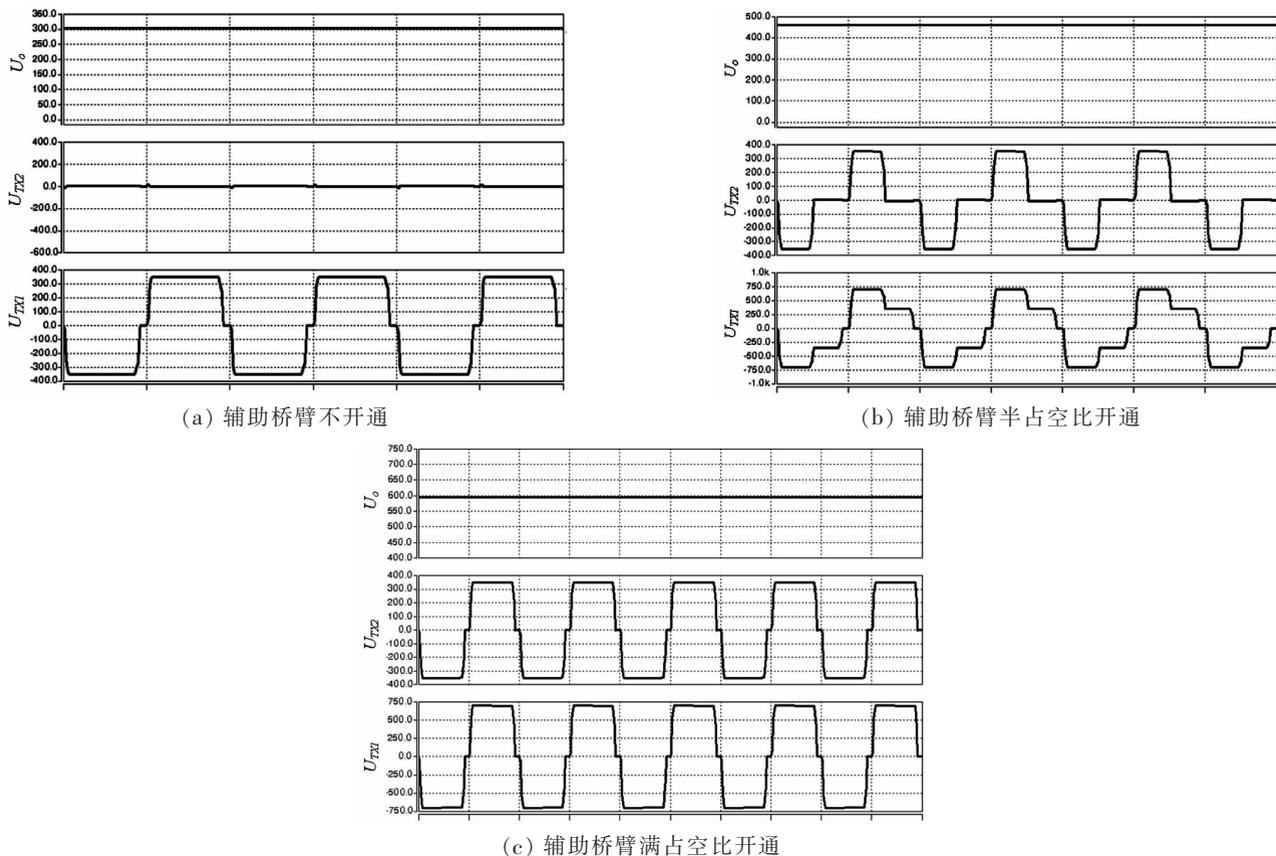
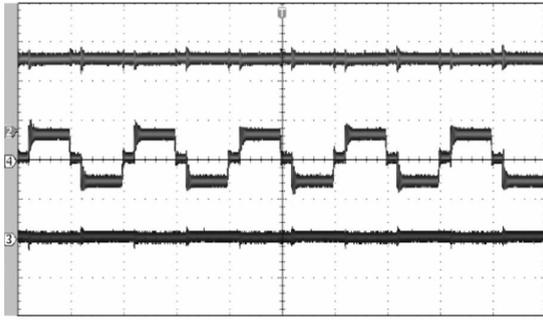
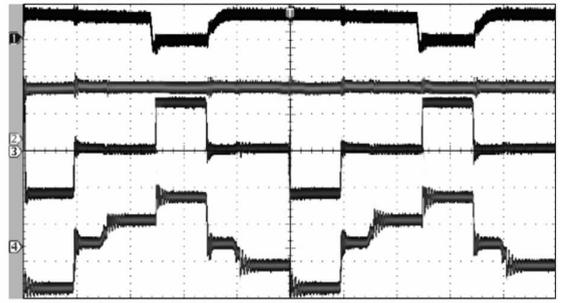


图 4 基于 Saber 的新拓扑低压、中压、高压输出仿真波形图

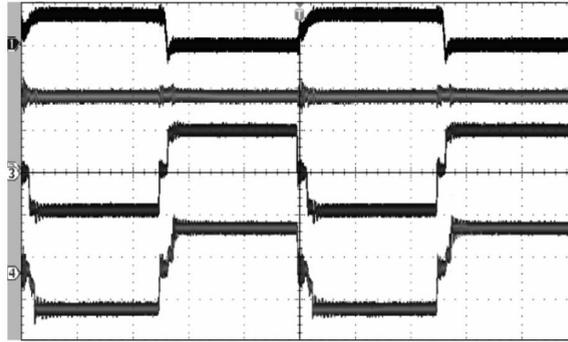
Fig.4 Simulation output waveform of the low, medium and high voltage of new topology based on Saber



(a) 辅助桥臂不开通



(b) 辅助桥臂半占空比开通



(c) 辅助桥臂满占空比开通

图5 新拓扑低压、中压、高压输出波形图

Fig.5 Output waveform of the low, medium and high voltage of new topology

表1为按辅助桥臂不开通、辅助桥臂满占空比开通及辅助桥臂半占空比开通3种情况测取的新拓扑电路效率,由表1可得新电路可在全范围内达到高效,最高效率可达93.5%以上。

表1 新拓扑电路效率

Tab.1 The efficiency of the new topology

$U_{in}=200$ VDC			
U_o/V	168	124	82
P_{in}/W	1 417	679	301
P_{out}/W	1 325	623	268
$\eta/\%$	93.52	91.8	89.2

4 结论

提出了一种新型双变压器三电平变换器,具有以下特点及优点:

- 1) 新拓扑有两组并联的三电平桥臂,两桥臂自然均流;
- 2) 两变压器采用级联联结方式,降低了主变压器变比;
- 3) 电路在低压输出时占空比高,提高了低压输出时的效率;
- 4) 这种电路及变压器连接方式也可以应用在其他软开关电路中,具有很好的推广价值。

参考文献:

- [1] 杨广浩,嵇保健,洪峰,等. 变匝比交错并联三电平正激变换器[J]. 中国电机工程学报,2017(12):3555-3564.
- [2] 刘军. 变匝比变换器技术的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [3] 金科,阮新波. 复合式全桥三电平 LLC 谐振变换器[J]. 中国电机工程学报,2006(3):53-58.
- [4] 栗晓华. 一种宽输入范围的双桥 LLC 谐振变换器研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.
- [5] 周贺,马灵甫,王腾飞,等. 变压器串联结构全桥 LLC 谐振变换器研究[J]. 电力电子技术,2016,50(4):54-56.
- [6] 张方华,严仰光. 变压器匝比不同的正反激组合式双向 DC-DC 变换器[J]. 中国电机工程学报,2005(14):57-61.
- [7] 袁义生,张育源,周盼,等. 抑制两级式逆变器中间母线电压二次纹波的方法[J]. 华东交通大学学报,2015,32(6):93-99.
- [8] CARRASCO J A,GARCIA R,EJEA J B,et al. Parallel power regulation techniques for resonant converters[C]//Cuernavaca:IEEE, V IEEE International Power Electronics Congress Technical Proceedings, IEEE, 1996:277-281.
- [9] CARRASCO J A,ALAN H WEINBERG,ESTEBAN SANCHIS,et al. A conductance-controlled variable transformer turns ratio regulator for a zero-voltage-zero-current power switching converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(6): 1070-1077.
- [10] JOSE M BLANE,AUSIAS GARRIGOS,JOSE A CARRASCO,et al. High-efficiency regulation method for a zero-current and zero-voltage current-fed push-pull converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2):444-452.
- [11] LIN B R,CHEN P L,HUANG C L,et al. Analysis of LLC converter with series-parallel connection[C]//Taichung:IEEE, 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, IEEE, 2010:346-351.
- [12] HU CHEN,WU XINKE,FANG Z PENG,et al. A hybrid ZVZCS phase-shift full-bridge converter with series/parallel auto-regulated transformer windings[C]//Orlando:IEEE, 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), IEEE, 2012:329-334.
- [13] CHEN HUI,WU XINKE,CHEN HU,et al. A hybrid ZVS full-bridge converter with transformer winding series-parallel auto regulated current double rectifier[C]// Raleigh:IEEE, 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), IEEE, 2012:2209-2214.
- [14] CHEN HUI,WU XINKE,FANG Z PENG,et al. A hybrid push-pull converter with series-parallel structure in the primary windings[C]//Hangzhou:IEEE, 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, 2012:58-63.
- [15] WU XINKE,CHEN HUI,ZHANG JUNMING,et al. Interleaved phase-shift full-bridge converter with transformer winding series-parallel auto regulated (SPAR) current double rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9):4864-4873.
- [16] LIN BOR-REN,DONG JIA-YU,et al. ZVS resonant converter with parallel-series transformer connection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7):2972-2979.
- [17] OUYANG ZIWEI,MICHAEL A E,ANDERSEN,et al. Wide input range power converters using a variable turns ratio transformer [C]//Long Beach, California:IEEE, 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), IEEE, 2016: 2473-2478.
- [18] JOSE A CARRASCO,ALAN H WEINBERG,ENRIQUE MASET,et al. A high-efficiency regulation technique for a zero-voltage-zero-current power switching converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(4):739-747.

Research on a New Three-level DC/DC Converter with Dual Transformer

Yuan Yisheng^{1,2}, Mei Xianglong¹, Mao Kaixiang¹

(1. East China Jiao Tong University Electrical and Automativn Engineering Coueage, Nanchang, 330013, China;

2. High Pvner AC Owive Oleetrie Locomotive System integrated State Key Laboratory, Zhu Zhou, 412000, China)

Abstract: This paper proposed a new interleaved three-level converter with dual transformers, which was realized by paralleling an auxiliary bridge arm to the main bridge arm and series connecting the secondary side of the auxiliary transformer series to the primary side of the main transformer. The advantages of traditional three-level converter were maintained, and wide range output voltage was obtained through the on/off of auxiliary arm. It analyzed the working principle of dual transformer three level converter, compared the efficiency of the converter and the traditional converter in different output range. Finally, a prototype of 1500W was built to verify the correctness of the theoretical analysis and the feasibility of the new converter.

Key words: dual transformers; wide range output; three-level converter