

T型三电平逆变器的中点平衡建模与控制

李勇, 郭勇, 皇甫星星, 王景霄, 张茂强, 刘为群

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: T型三电平电路是一种新颖的钳位型拓扑, 它通过双向开关实现直流侧中性点与负载的连接; 与传统二极管钳位(NPC)相比, 该电路器件少、器件损耗均匀、运行效率高, 因此在光伏等新能源发电中得到大量应用。中性点电压平衡问题是该类电路的固有问题, 需妥善解决。文中首先分析了T型三电平中点电位的产生机理和影响因素, 接着建立了中点电位的数学模型, 提出了一种基于调制波电压指令分区的分析方法, 得到零序电压对中点电位的解析表达式, 据此建立了中点电位的平衡控制策略, 并对控制器进行了设计。最后通过仿真分析, 验证了理论分析的正确性。

关键词: T型三电平; 中点平衡; PWM调制; 零序电压

中图分类号: TM315

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)02-0061-05

0 引言

自日本学者 NABAE A 等人于 1980 年提出中点箝位型三电平^[1]的拓扑以来, 三电平因其与两电平相比, 具有更低的单管耐压水平, 更多的电平数, 更小的 dv/dt , 在工业传动和新能源发电等领域^[2]得到广泛应用, 也发展出了多种拓扑类型; 这些拓扑大致可分为钳位型和级联型两种结构^[3], 前者包括二极管钳位(NPC)和电容钳位, 后者则包含 H 桥级联。T型三电平是一种新颖的钳位型拓扑, 通过双向开关实现直流侧中性点与负载的连接。与传统 NPC 相比, T型三电平器件少、器件损耗均匀、运行效率高^[3], 因此在光伏等新能源发电中得到大量应用。

对于包括 T型三电平在内的钳位型三电平拓扑, 常因上下桥臂器件参数不一致或脉宽调制(PWM)不对称等原因, 造成直流中性点电位不平衡^[4,5]。电容电压偏差过大时会造成输出电流波形畸变, 低次谐波含量增加; 当不平衡现象加剧时, 甚至有可能造成功率开关器件损坏。中性点电位不平衡可通过硬件方式或 PWM 调制策略来消除^[6]; 但前者实施成本高且不灵活, 所以实际应用中较少采用, 后者是学术界和工业界广泛采用的方案。通过 PWM 开关状态的调整, 可以在不影响输出波形的情况下, 调整流入流出中性点的电流, 达到电容电压平衡的目的。

目前中点平衡的研究主要集中在空间矢量调

制(SVM)调制算法上^[7-10], 主要思路是通过冗余小矢量的调整去控制中点电流, 而对于载波调制(CBPWM)的研究相对较少^[11-15]。CBPWM 容易实现, 且可通过载波层叠法扩展到更多电平的拓扑控制, 而 SVM 在超过五电平以后, 算法将非常复杂; 另一方面, SVM 和 CBPWM 本质上可以相互转换^[17], 因此对 CBPWM 的研究和实践具有很高的价值。

本文首先分析了中点电位的产生机理和影响因素, 接着建立了中点电位的数学模型, 提出了基于调制波电压指令分区的方法, 得到零序电压对中点电位的解析表达式, 据此建立了中点电位的平衡控制策略, 并对控制器进行了设计。

1 T型三电平中点电压波动的机理

图 1 为 T型三电平并网逆变器的典型电路。图中的中点电流模型可以简化为图 2。

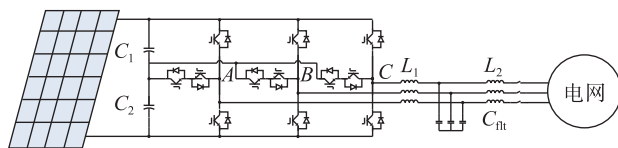


图 1 T型三电平并网逆变器

Fig.1 T-type three level grid-connected inverters

逆变器输出中点电平时, 必然有电流流入或流出中点, 并对总线电容 C_1, C_2 进行充电或放电。中点电流可以表示为:

$$i_0 = i_1 - i_2 \quad (1)$$

其中: i_1, i_2 分别为流入上臂电容 C_1 、下臂电容 C_2 的电流; i_0 为中性点电流。 i_0 可进一步表示为:

$$i_0 = D_{0A}i_A + D_{0B}i_B + D_{0C}i_C \quad (2)$$

收稿日期: 2016-12-11; 修回日期: 2017-02-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050101)

定义 D_{0x} 为 x 相的零电平占空比, 电容电流和中点电流的参考方向如图 2 的箭头所示。

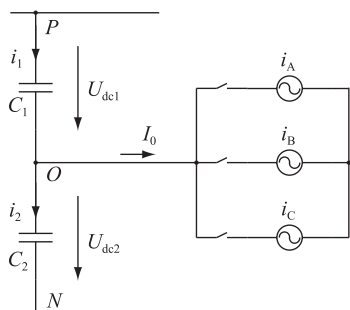


图 2 中点平衡原理

Fig.2 The mechanism of neutral point voltage balancing

正负母线电容的电压变化可表示为:

$$\begin{cases} dU_{dc1} = \frac{i_1 dt}{C_1} \\ dU_{dc2} = \frac{i_2 dt}{C_2} \end{cases} \quad (3)$$

设正负母线电容相等, 即 $C_1 = C_2 = C$, 则:

$$d(U_{dc1} - U_{dc2}) = \frac{(i_1 - i_2) dt}{C} \quad (4)$$

将式(2)带入式(4)后得:

$$\Delta U_{dc} = U_{dc1} - U_{dc2} = \frac{\int (D_{0A} i_A + D_{0B} i_B + D_{0C} i_C) dt}{C} \quad (5)$$

式(5)表明, 零电平将所示的 T 型三电平拓扑的负载电流与母线电容的中点相接, 上下桥臂的电容电压差由各相零电平与对应的负载电流决定。若不考虑上臂电容 C_1 和下臂电容 C_2 的偏差, 那么电容越大, 越利于平抑中点电位波动。但考虑体积和成本, 不建议采用过大的母线电容, 而是通过对 D_{0x} 的调节, 达到降低 ΔU_{dc} 的目的。

2 T 型三电平的中点电位建模

在基于 CBPWM 计算中, 零电压的占空比可以表示为:

$$D_{0x} = \begin{cases} 1 - U_{xCmd} & U_{xCmd} > 0 \\ 1 + U_{xCmd} & U_{xCmd} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

也就是:

$$D_{0x} = 1 - |U_{xCmd}| \quad (7)$$

式中: U_{xCmd} 为 x 相标么化后的调制波指令, 其取值范围在 $[-1, 1]$ 。可以看到, 各相电压的零电位占空比与该相电压的调制波指令值及其符号有关。对于一个稳态对称运行工况, 占空比的频率是调制波频率的 2 倍。

将式(7)代入式(2)可得中点电流为:

$$i_0 = (1 - |U_{ACmd}|) i_A + (1 - |U_{BCmd}|) i_B + (1 - |U_{CCmd}|) i_C \quad (8)$$

若在调制波注入零序电压 U_z , 则上式可以表示为:

$$i_0 = (1 - |U_{ACmd} + U_z|) i_A + (1 - |U_{BCmd} + U_z|) i_B + (1 - |U_{CCmd} + U_z|) i_C \quad (9)$$

对式(9)进行整理:

$$i_0 = -|U_{ACmd} + U_z| i_A - |U_{BCmd} + U_z| i_B - |U_{CCmd} + U_z| i_C \quad (10)$$

若对式(10)进行解析, 需要判定 $|\cdot|$ 内变量的正负号。通过图 3 的电压空间矢量的分区, 可将式(10)进行化解。

如图 3 所示, \vec{U}_{Ccmd} 为参考电压矢量, \vec{U}_{Ccmd} 在 A, B, C 轴上的投影分别是各相电压指令。以 \vec{U}_{Ccmd} 在第 I 象限为例, 即 $11\pi/6 < \theta < \pi/6$; 该情况下, $U_{ACmd} > 0$, $U_{BCmd} < 0$, $U_{CCmd} < 0$ 。

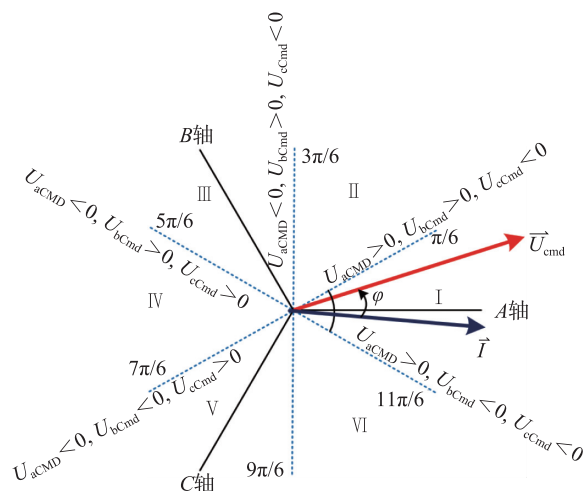


图 3 电压矢量与分区

Fig.3 Voltage vector and its partition zone

考虑 U_z 不改变原有 U_{xCmd} 的正负极性, 则有:

$$i_0 = (-U_{ACmd} i_A + U_{BCmd} i_B + U_{CCmd} i_C) + U_z (-i_A + i_B + i_C) \quad (11)$$

定义 i_{0_intr} 为由占空比指令形成的中点电流, 本文称为中点固有电流。

$$i_{0_intr} = -U_{ACmd} i_A + U_{BCmd} i_B + U_{CCmd} i_C \quad (12)$$

定义 i_{0_uz} 为因注入零序电压 U_z 而产生的中点电流, 本文称之为中点调节电流。

$$i_{0_uz} = U_z (-i_A + i_B + i_C) \quad (13)$$

因此式(11)可以表示为:

$$i_0 = i_{0_intr} + i_{0_uz} \quad (14)$$

根据 \vec{U}_{Ccmd} 所处的区间, 也可将式(13)表示为:

$$i_{0_uz} = U_z [-\text{sgn}(U_{ACmd}) i_A - \text{sgn}(U_{BCmd}) i_B - \text{sgn}(U_{CCmd}) i_C] \quad (15)$$

进一步简化为:

$$i_{0_uz} = - \sum_{x=A,B,C} \text{sgn}(U_{xCmd}) i_x U_z \quad (16)$$

同样可以对 \vec{U}_{Cmd} 处于其他象限的情况进行分析,去掉式(10)中的绝对值符号,得到如式(16)和式(12)所示的 i_0 解析表达式。

由式(5)、式(14)和式(16)可得图4所示的传递函数。

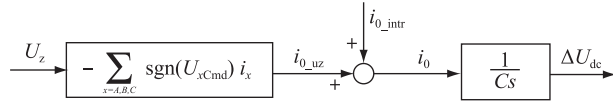


图4 中点电位的传递函数

Fig.4 Transfer function for neutral point voltage balancing

上述分析可知,在注入零序电压后,T型三电平的中点电流将由中点固有电流和中点调节电流组成。式(12)表明,中点固有电流受到负载电流和 U_{xCmd} 影响;式(16)表明,负载特性虽影响调节电流,但可通过 U_z 对 i_{0_uz} 进行控制,从而达到控制中点电位的目的。

为便于控制器开发,对式(16)进行简化。以第一象限为例:

$$i_{0_uz} = - \sum_{x=A,B,C} \text{sgn}(U_{xCmd}) i_x U_z = - 2 i_A U_z \quad (17)$$

令功率因数为 φ ,则式(17)可进一步表示为:

$$\begin{aligned} - 2 i_A U_z &= - 2 \frac{3}{\pi} U_z \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} I_m \cos(\omega t - \varphi) d\omega t = \\ &= - \frac{6 I_m}{\pi} U_z \cos\varphi \end{aligned} \quad (18)$$

对其他象限做同样分析,可得表1。

表1 电压扇区与 i_{0_uz} 的平均值
Table 1 i_{0_uz} in different partition zone

扇区	$-\sum_{x=A,B,C} \text{sgn}(U_{xCmd}) i_x U_z$	平均值 (功率因数为 $\cos\varphi$)
I	$-(i_A - i_B - i_C) U_z = -2 i_A U_z$	$-2 \frac{3I_m}{\pi} \cos\varphi U_z$
II	$-(i_A + i_B - i_C) U_z = 2 i_C U_z$	$2 \left(-\frac{3I_m}{\pi}\right) \cos\varphi U_z$
III	$-(-i_A + i_B - i_C) U_z = -2 i_B U_z$	$-2 \left(\frac{3I_m}{\pi}\right) \cos\varphi U_z$
IV	$-(-i_A + i_B + i_C) U_z = 2 i_A U_z$	$2 \left(-\frac{3I_m}{\pi}\right) \cos\varphi U_z$
V	$-(-i_A - i_B + i_C) U_z = -2 i_C U_z$	$-2 \left(\frac{3I_m}{\pi}\right) \cos\varphi U_z$
VI	$-(i_A - i_B + i_C) = 2 i_B$	$2 \left(-\frac{3I_m}{\pi}\right) \cos\varphi U_z$

由此可以得到中点电位在1/6周期内的平均值模型如图5所示。

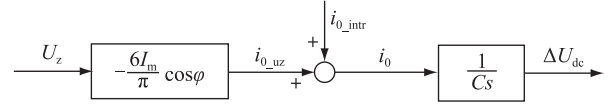


图5 中点电位的简化数学模型(1/6周期平均值)

Fig.5 Simplified model for neutral point voltage balancing (average model)

3 中点电位的控制策略

根据图5可以看出,中点固有电流和中点调节电流汇集形成 i_0 ,并汇集进入中点电容后产生中点电位波动。将中点电位差 ΔU_{dc} 作为反馈量导入中点电位调节器,通过参数的合理设计得到 U_z ; U_z 作用在简化模型上后得到 i_{0_uz} , i_{0_uz} 对各种因素引起的中点电压波动进行调节,中点电位的平衡控制如图6所示。

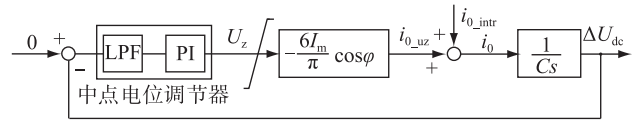


图6 中点电位的平衡控制

Fig.6 Control diagram for neutral point voltage balancing

由图6所见,功率因数 $\cos\varphi$ 、电流幅值 I_m 和直流电容对中点平衡均有影响。

4 仿真结果与分析

为了验证上文所述的控制策略及中点电位调节器参数设计的正确性,在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型。

图7给出了中点电压平衡条件下逆变侧线电压波形、逆变器侧电流和并网点处电流。图7中,相电压为三电平,线电压则呈现为五电平,各个电平都比较平整;逆变侧电流在经过网侧滤波后得到入网电流,入网电流的波形质量较好,符合并网逆变器标准。

图8给出了中点电压不平衡情况下的逆变侧线电压波形、逆变器侧电流和并网点处电流。可见,线电压电平台阶不平整,导致入网电流发生较大的畸变,较难满足入网的电能质量要求。

采用本文所述的中点平衡控制策略,仿真结果如图9所示。图9中,0.25s之前,由于中点不平衡,并网点处的电流存在畸变, U_{dc1} 和 U_{dc2} 存在约150V的恒定偏差;0.25s时,投入了中点平衡算法,调制波中注入的零序电压 U_z ,中点电位趋于平衡,入网点电流也得到较大改善。仿真结果表明,中点电位控制可以有效削弱不平衡,改善电流波形。

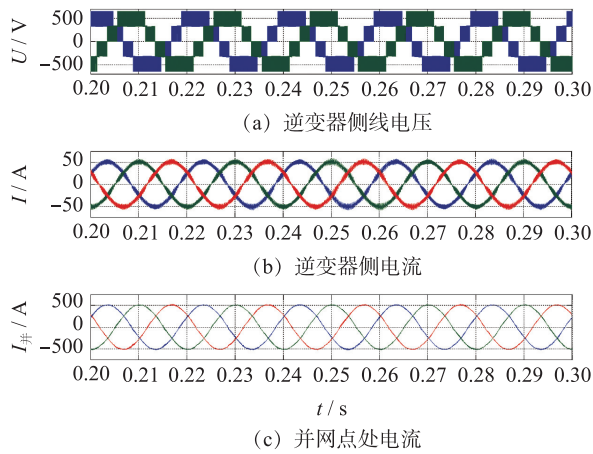


图7 逆变器输出电压电流波形(中点电压平衡)

Fig.7 Simulation waveforms for inverter output voltage (with neutral point voltage balancing)

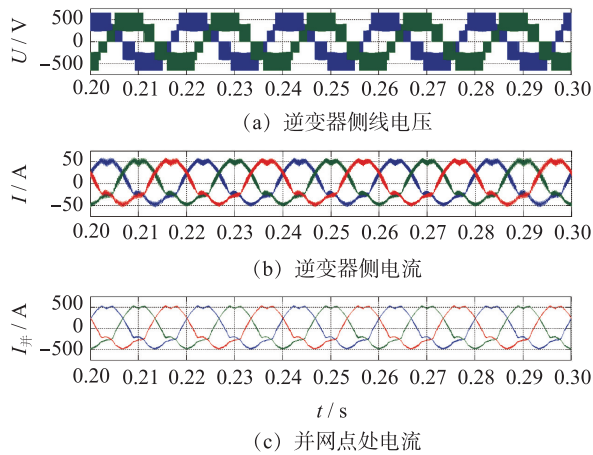


图8 逆变器输出电压电流波形(中点电压不平衡)

Fig.8 Simulation waveforms for inverter output voltage (with neutral point voltage un-balancing)

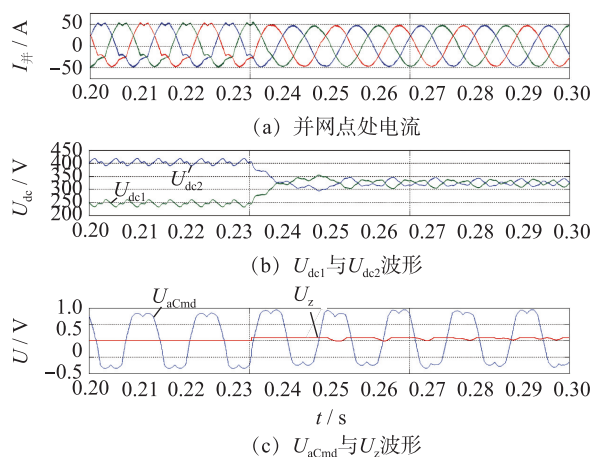


图9 中点平衡控制策略投入前后的波形

Fig.9 Simulation results when the mid-point voltage balancing carried out

5 结论

T型三电平电路是一种新颖的钳位型拓扑,通

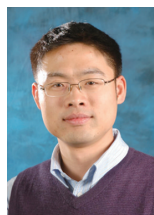
过双向开关实现直流侧中性点与负载的连接;该电路器件少、器件损耗均匀、运行效率高,在光伏等新能源发电中得到大量应用。中性点电压平衡问题是该类电路的固有问题,需要妥善解决。本文首先分析了T型三电平中点电位的产生机理和影响因素,接着建立了中点电位的数学模型,提出了一种基于调制波电压指令分区的分析方法,得到零序电压对中点电位的解析表达式,据此建立了中点电位的平衡控制策略,并对控制器进行了设计。最后通过仿真分析,验证了理论分析的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A new neutral point clamped PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1981, 17(5): 518-523.
- [2] 李宁峰,于国才. 屋顶太阳能光伏发电系统的设计[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 43-45.
LI Ningfeng, YU Guocai. Design of the Photovoltaic Roof Power Generation System [J]. Jiangsu Electrical Engineering [J]. 2012, 31(3): 43-45.
- [3] 唐飞,郑蕾,伍小杰. 三电平空间矢量脉宽调制逆变器控制研究[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(5): 4-6.
TANG Fei, ZHENG Lei, WU Xiaojie. Study on the control of three-level pulse-width modulation space vector controlled inverter[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, 22(5): 4-6.
- [4] 田凯. 基于双调制波载波PWM策略的中点电位平衡问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
TIAN Kai. Neutral-point potential balancing problem research based on double-modulation-wave carrier-based pwm strategy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [5] 孙超. 三电平T型并网逆变系统设计[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
SUN Chao. Design of three-level t-type grid-connected inverter system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [6] 姜卫东,杨柏旺. 不同零序电压注入的NPC三电平逆变器中点电位平衡算法的比较[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 17-25.
JIANG Weidong, YANG Bowang. Comparisons of the neutral point voltage balancing algorithm for NPC three-level inverters based on different zero-sequence voltage injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33): 17-25.
- [7] 宋文祥,陈国呈,武慧,等. 一种具有中点电位平衡功能的三电平空间矢量调制方法及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 95-100.
SONG Wenxiang, CHEN Guocheng, WU Hui, et al. A novel SVPWM strategy and its implementation considering neutral-point potential balancing for three-level NPC inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 95-100.
- [8] 金红元,邹云屏,林磊,等. 三电平PWM整流器双环控制技术及其在中点电压平衡在控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 64-68.

- JIN Hongyuan, ZOU Yunping, LIN Lei, et al. The control of three-level PWM rectifier and neutral-point potential balancing [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20):64-68.
- [9] 张 志, 谢运祥, 乐江源, 等. 消除中点电位低频振荡的三电平逆变器空间矢量脉宽调制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3):103-109.
- ZHANG Zhi, XIE Yunxiang, LE Jiangyuan, et al. SVM method to emulate the neutral-point potential balancing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3):103-109.
- [10] 陈鑫兵, 何礼高. 基于模糊控制的三电平逆变器中点电位平衡策略[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10):103-108.
- CHEN Xinbing, HE Ligao. Fuzzy control of point voltage balancing for three-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10):103-108.
- [11] 原熙博, 李永东, 王琛琛, 等. 基于零序分量注入的三电平PWM整流器目标优化控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3):116-121.
- YUAN Xibo, LI Yongdong, WANG Chenchen, et al. Object oriented optimal control method for three-level PWM rectifier by zero-sequence voltage injection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3):116-121.
- [12] 孟永庆, 沈传文, 刘 正, 等. 基于零序电压注入的三电平中点箝位整流器中点电位控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10):92-97.
- MENG Yongqin, SHEN Chuanwen, LIU Zheng, et al. Study on neutral-point control method for three-level NPC rectifiers by injecting zero-sequence voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10):92-97.
- [13] 王新宇, 何英杰, 刘进军. 注入零序分量 SPWM 调制三电平逆变器直流侧中点电压平衡控制机理[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5):70-77.
- WANG Xinyu, HE Yinjie, LIU Jinjun. The three-level voltage balancing with zero voltage injection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5):70-77.
- [14] 王付胜, 邵章平, 张 兴, 等. 多机 T 型三电平光伏并网逆变器的环流抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1):40-49.
- WANG Fusheng, SHAO Zhangping, ZHANG Xing, et al. Circulating current reduction for t-type three-level grid-connected photovoltaic inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):40-49.
- [15] 周京华, 贾 斌, 章小卫. 混合式三电平中点电位平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24):82-89.
- ZHOU Jinghua, JIA Bin, ZHANG Xiaowei. A hybrid three-level neutral-point balance control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24):82-89.
- [16] 李永东, 肖 曦, 等. 大容量多电平变换器[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LI Yongdong, XIAO xi, et al. Multilevel inverters for high power[M], Beijing: Science Press, 2005.
- [17] 李 勇. 基于电力电子技术的异步电机发电系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- LI Yong. Research on the induction generator system based on the power electronics converter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aero. & Astr., 2008.

作者简介:



李 勇

李 勇(1981—),男,江苏南京人,高级工程师,从事新能源发电与电网接入、交直流微电网、新能源汽车的电力推进及高压变频器技术研究工作;

郭 勇(1984—),男,安徽界首人,工程师,从事电力电子与电力传动研究工作;

皇甫星星(1989—),男,江苏淮安人,工程师,从事电力电子功率变换技术及应用研究工作;

工作;

王景霄(1986—),男,河南镇平人,工程师,从事电力电子与新能源变换技术研究工作;

张茂强(1984—),男,山东邹城人,工程师,从事电力电子功率变换技术及应用研究工作;

刘为群(1966—),男,安徽滁州人,研究员级高级工程师,从事电力电子功率变换技术及应用研究工作。

Modeling and Control of Neutral Point Voltage Balancing for T-Type Three-level Inverters

LI Yong, GUO Yong, HUANGFU Xingxing, WANG Jingxiao, ZHANG Maoqiang, LIU Weiqun

(NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China, 211102)

Abstract: T-type three-level circuit is a novel clamp topology, which achieves connection of the DC side neutral point and the load through the two-way switch. Compared with the traditional Neutral-Point-Clamp (NPC), the circuit uses fewer components, the device loss is uniform, the operation efficiency is high, and therefore it is widely used in new energy power generation such as photovoltaic power generation. Neutral point voltage balance problem is the inherent problem of this type of circuit, which need to be properly resolved. In this paper, the generation mechanism and influencing factors of T-type three-level midpoint potential are analyzed, and then the mathematical model of midpoint potential is established. An analysis method based on modulation wave voltage instruction partition is proposed, and the analytic expression of the zero sequence voltage to the midpoint potential is established. Based on this, the balance control strategy of midpoint potential is established, and the controller is designed. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified by simulation analysis.

Key words: T-type three-level voltage; voltage balance control; PWM modulation; zero-sequence voltage

(编辑 刘晓燕)