

混合钳位式三电平变流器控制方法研究

蔡奇宏¹,陈晓²,陈丹霏³,刘建芳⁴

(1. 国网浙江苍南县供电有限责任公司,浙江 苍南 325800;2. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司,浙江 舟山 316000;3. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司,浙江 衢州 324000;4. 国网信通亿力科技有限责任公司,福建 福州 353100)

摘要:分析了混合钳位式三电平逆变器的4种开关工作状态及其钳位桥臂内侧功率开关器件关断过电压的原理,对其64种电压空间矢量在不同功率因数情况下对中性点电位的影响特性进行分析,并给出了独特的中性点电位平衡调制策略;在对钳位电容电压充、放电过程分析的基础上,针对不同能量流动方向,分别提出了利用开关状态切换的方式实现钳位电容电压平衡的调制策略,并给出了详细的电压空间矢量优化选择方法。设计了基于TMS28335+Xilinx CPLD/FPGA的控制电路和主电路,验证了其钳位机制的正确性及调制方法的有效性。

关键词:混合钳位;钳位过电压;中性点电位平衡;钳位电容电压平衡;优化调制

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19761

Study on Control Method of Hybrid-clamped Three-level Inverter

CAI Qihong¹, CHEN Xiao², CHEN Danfei³, LIU Jianfang⁴

(1. State Grid Zhejiang Cangnan Power Supply Limited Liability Company, Cangnan 325800, Zhejiang, China; 2. State Grid Zhejiang Zhoushan Power Supply Company, Zhoushan 316000, Zhejiang, China; 3. State Grid Zhejiang Quzhou Power Supply Company, Quzhou 324000, Zhejiang, China; 4. State Grid Info-Telecom Great Power Science and Technology Co., Ltd., Fuzhou 350003, Fujian, China)

Abstract: The four switches working states of hybrid-clamped three-level inverter and emplacement principle of switching-off over-voltage for its power switch device inline clamping bridge arm were analyzed. The effects of 64 kinds of voltage space vectors on the mid-point potential under different power factors were analyzed and a unique mid-point potential equilibrium modulation strategy was given. Based on the analysis of the clamping-capacitor charging and discharging circuit under different energy flow directions, the clamping-capacitor voltage balance modulation strategy using state-level switching means was put forward. And the SVPWM optimization algorithm was established in detail. Also, the control circuit and main circuit based on TMS28335+Xilinx CPLD/FPGA was designed, which validates the correctness of the embedding mechanism and validity of modulation strategy.

Key words: hybrid-clamp; clamping overvoltage; neutral-point potential balance; clamping-capacitor voltage balance; optimized modulation

多电平变换器装置具有功率大、开关频率低、输出谐波小等优点,在大功率变频调速场合得到广泛应用。为了克服二极管钳位式多电平变流器存在直流侧电容电压不平衡及各桥臂内侧功率开关器件关断过电压不能被钳位的缺陷,本文对一种新型混合钳位式多电平变流器进行

了研究^[1]。

以三电平为例分析,在二极管钳位式三电平变流器每相桥臂上增加一个钳位电容就构成了混合钳位式三电平变流器,钳位电容对拓扑结构的影响如下^[2-4]:1)通过钳位电容和直流侧电容的动态充放电可以减少中性点电位波动;2)钳

位电容和功率开关器件组成的钳位回路能够钳位桥臂内侧功率开关器件关断过电压;3)由于增加了钳位电容,每相桥臂可以输出4种开关状态,电压空间矢量增至64种,可以实现更精确的控制;4)交流侧负载和直流侧电容之间的连接通路与能量流动方向有关,对 midpoint 电位的平衡控制变复杂;5)2种零电平状态对钳位电容电压的影响不具有对称性,钳位电容电压控制难度增加。本文对该拓扑结构的钳位机制、中点电位和钳位电容电压平衡调制方法、空间电压矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)方法进行了理论研究并基于TMS28335+Xilinx CPLD/FPGA的控制电路和主电路进行了试验验证。

1 运行状态分析

混合钳位式三电平逆变器的拓扑结构如图1所示,包括三相桥臂(A,B,C)、2个主电容(C₁,C₂)和3个钳位电容(C_a,C_b,C_c),每相可以输出4种开关状态,分别用P,A,B,N表示,以一相桥臂为例分析(钳位电容预充电至半直流母线电压)^[5]。

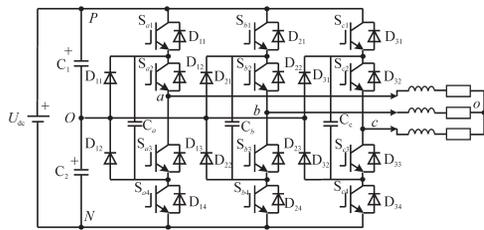


图1 混合钳位式三电平变流器拓扑结构

Fig.1 Topological structure of hybrid clamp three-level converter

每种开关状态下电流流动方向及钳位电容充、放电回路分别如图2所示,每种开关状态下左图实线代表电流流动方向,右图虚线代表钳位电容充、放电回路方向。

图2中电流回路①、②、④、⑤、⑧、⑨、⑫、⑬分别为P,A,B,N 4种开关状态下的双向电流通路。由图2可见,4种开关状态下共可以输出3种电平状态,其中零电平状态存在1个冗余开关状态。并且在P,A,B,N 4种开关状态下,当桥臂上、下最外侧功率开关器件导通时,直流侧上、下母线电容均可对钳位电容进行充电,释放其电压,从而实现直流侧中点电位的平衡,如图2中电流回路③、⑦、⑪、⑭所示;在A,B 2种零电平状态下,且电流路径为回路④或⑨的情况下,若钳位电容电压高于下母线或上母线电容电压时,则钳位电容可以通过回路⑥或者回路⑩放电,从而

实现直流侧上、下母线电容电压及钳位电容电压的自动均压控制。由于每相桥臂具备4种开关状态,所以混合钳位型三电平逆变器包含 $4^3=64$ 种电压空间矢量,电压空间矢量的增多,使得控制变得复杂,但控制精度会得到提高。

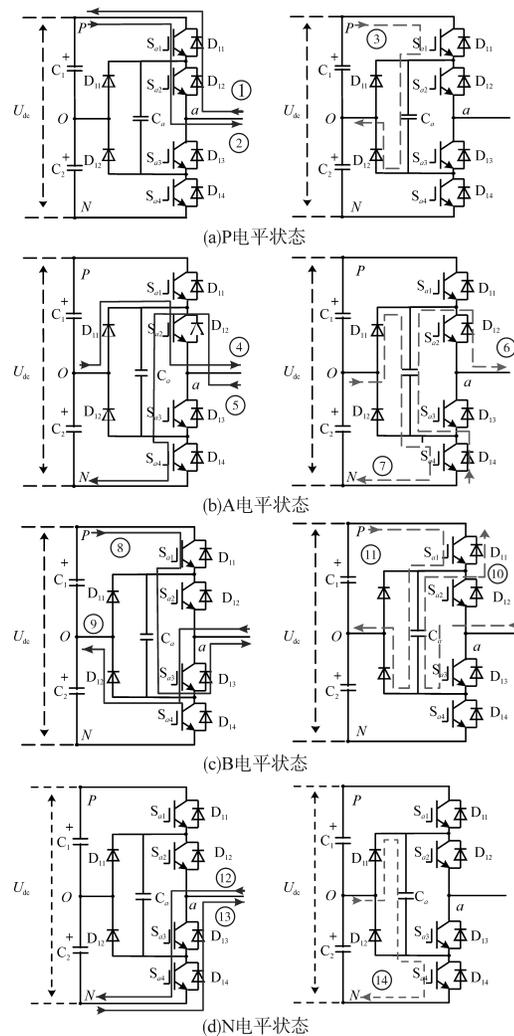


图2 4种开关状态下电流回路

Fig.2 Current loops in four switching states

2 混合钳位三电平结构钳位原理分析

传统二极管钳位式三电平拓扑结构存在桥臂内侧功率开关器件关断过电压的问题,而混合钳位式三电平结构可通过增加的钳位电容钳位住桥臂内侧关断过电压,如图3、图4所示。下面分别对其进行分析:假设二极管钳位式三电平逆变器的开关状态由P(S_{a1},S_{a2}导通,S_{a3},S_{a4}关断)切换至O(S_{a2},S_{a3}导通,S_{a1},S_{a4}关断)时,由于线路杂散电感存在,会在S_{a1}两端产生很高的感应过电压,此时通过钳位二极管D₁₁可以使S_{a1}两端过电压通过如图3a实线所示回路钳位在直流侧电容C₁上;当开关状态由O(S_{a2},S_{a3}导通,S_{a1},S_{a4}关断)切换至N

(S_{a3}, S_{a4} 导通, S_{a1}, S_{a2} 关断)时,同样会在 S_{a2} 两端产生感应过电压,当感应过电压低于直流母线电压时,由于形不成放电通路,如图 3b 中虚线所示, S_{a2} 两端过电压无法被钳位在直流侧电容上;只有当感应过电压超过直流母线电压时才可以通过如图 3b 实线所示回路放电,但此时功率开关器件容易发生破坏。对于开关状态由 $N \rightarrow O$ 和由 $O \rightarrow P$ 切换时的情况分别如图 3c、图 3d 所示,可以采取同样的方法分析。由上面的分析可以看出,传统二极管钳位式三电平变流器桥臂外侧的功率开关器件关断过电压可以被钳位在直流侧电容上,通过增加简单的电容吸收回路即可消除过电压,而桥臂内侧功率开关器件的关断过电压却无法被钳位。

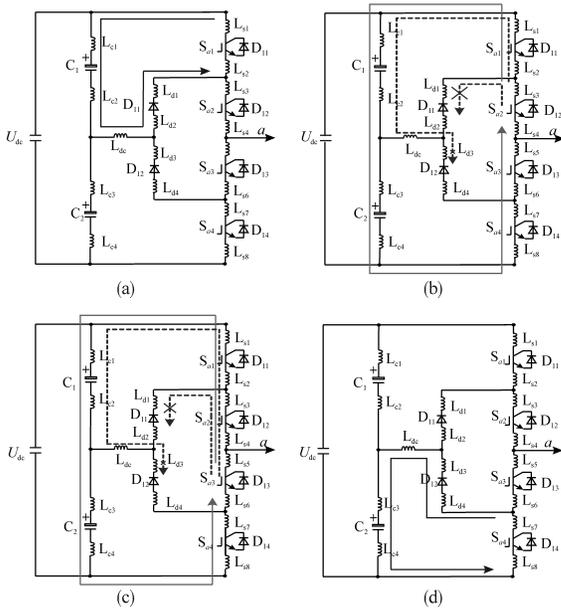


图3 二极管钳位三电平逆变器功率开关器件关断过电压钳位回路分析

Fig.3 Analysis of power switch device switching-off overvoltage clamping circuit of diode-clamped three-level inverter

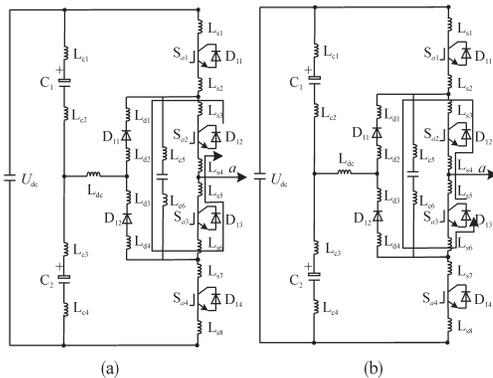


图4 混合钳位式三电平逆变器功率开关器件关断过电压钳位回路分析

Fig.4 Analysis of power switch device switching-off overvoltage clamping circuit of hybrid-clamp three-level inverter

而混合钳位式三电平逆变器由于加入了钳位电容 C_a ,且 C_a 分别和功率开关器件 S_{a2} 或 S_{a3} 成了钳位回路,此时 S_{a2} 或 S_{a3} 关断时产生的过电压就可以通过如图 4a、图 4b 实线所示回路钳位在电容 C_a 上。其桥臂外侧功率开关器件 S_{a1} 或 S_{a4} 关断时产生的过电压钳位原理同传统二极管钳位式拓扑结构。图 3、图 4 中 $L_{c1} \sim L_{c6}, L_{d1} \sim L_{d4}, L_{s1} \sim L_{s8}$ 和 L_{cd} 分别为线路各处杂散电感。

3 电压空间矢量对中性点电位的影响特性分析

混合钳位式三电平变流器可输出 64 种开关状态,对应 64 个电压空间矢量,但其中富含冗余矢量,等效后的电压空间矢量为 19 种,分别对应零矢量 V_0 、小矢量 $V_1 \sim V_6$ 、中矢量 $V_7 \sim V_{12}$ 、大矢量 $V_{13} \sim V_{18}$,如图 5 所示。冗余矢量的增多使控制的灵活性增加,可以实现更精确的控制^[6-7]。

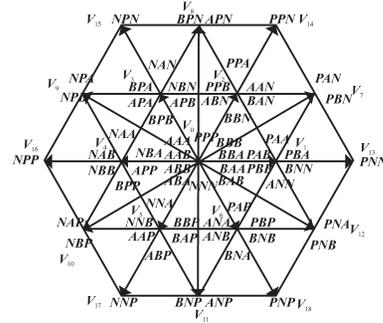


图5 电压空间矢量分布图

Fig.5 Voltage space vector distribution map

在 A, B 电平状态下,当负载电流方向发生变化时,交流侧负载与直流侧电容之间的连接点也发生改变,使同一电压空间矢量在不同的能量流动方向下,交流侧负载和直流侧电容之间的连接回路发生改变。以 PPA 为例,其在能量馈出状态和能量馈入状态下的瞬态电流通路及对应的电容和负载的连接关系分别如图 6 和图 7 所示,箭头方向表示各个回路电流方向。

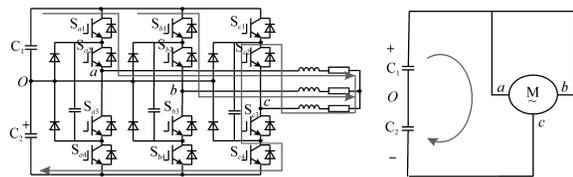


图6 能量馈出状态,矢量 PPA 对应的电流通路
Fig.6 Current path corresponding to vector PPA in the state of energy feedback

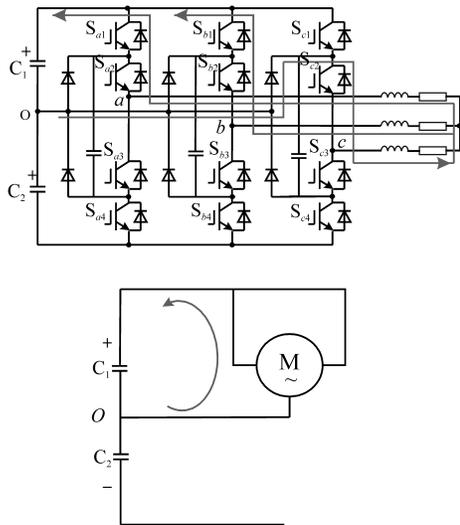


图7 能量馈入状态,矢量PAA对应的电流通路
Fig.7 Current path corresponding to vector PAA in the state of energy feeding

由图6、图7可见,矢量PAA在能量馈出状态下对中性点电位没有影响;而在能量馈入状态下会使中性点电位下降。通过对所有64种电压空间矢量进行分析后得出每个空间矢量对中性点电位的影响特性如表1所示。

表1 电压空间矢量对中性点电位影响特性

Tab.1 Influence characteristics of voltage space vector on neutral point potential

序号	电压空间矢量	对中性点电位影响特性	
		馈出状态	馈入状态
1	PAA, AAP, APA	o-	o--
2	PPA, APP, PAP	o	o--
3	PAB, PBA, BPA	o+	o--
4	BAP, APB, ABP	o+	o--
5	ABN, ANB, BAN	o-	o++
6	BNA, NBA, NAB	o-	o++
7	NBB, BBN, BNB	o+	o++
8	BNN, NBN, NNB	o	o++
9	BPP, PPB, PBP	o++	无回路
10	PBB, BBP, BPB	o++	无回路
11	PBN, PNB, BPN	o+	o+
12	BNP, NPB, NBP	o+	o+
13	PAN, PNA, APN	o-	o-
14	ANP, NPA, NAP	o-	o-
15	ANN, NAN, NNA	o--	无回路
16	NAA, AAN, ANA	o--	无回路
17	PNN, NPN, NNP	o	o
18	NPP, PPN, PNP	o	o
19	ABB, BBA, BAB	o	o+
20	BAA, AAB, ABA	o-	无回路
21	AAA	o--	无回路
22	BBB	o++	无回路
23	PPP	无回路	无回路
24	NNN	无回路	无回路

表1中o++表示具有较强使中点电位上升的特性,即每种可能存在的电流回路都会导致中点电位上升;o+表示具有使中点电位上升的特性,即每种可能存在的电流回路中可能会使中点电位上升或对中点电位没有影响;o表示对中性点电位没有影响;o-与o+作用特性类似,方向相反;o--与o++作用特性类似,方向相反。

4 钳位电容电压平衡调制策略

由前面运行状态的分析可知,在4种开关状态下均可以实现钳位电容的充电控制,若要保持钳位电容电压均衡,其放电控制成为关键。通过进一步的分析发现开关状态的切换只有遵循表2的规律时才能够实现钳位电容的自动放电控制。

表2 满足钳位电容平衡控制的开关切换过程

Tab.2 Switching process of satisfying clamp capacitor balance control

序号	馈出状态	馈入状态
1	P↔A	P↔B
2	N↔B	N↔A

以能量馈出状态下P开关状态切换至A或者B开关状态为例分析,2种切换状态下的电流路径变化分别如图8所示。

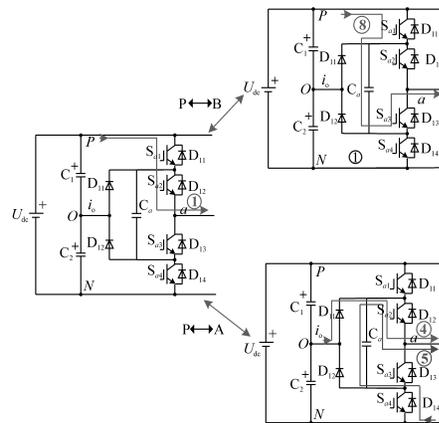


图8 开关切换时,电流通路变换图

Fig.8 Current path conversion diagram at switch switching

由图8可见,P与B之间互相切换时,钳位电容无法放电,而P与A之间互相切换时,钳位电容可以通过回路5放电。对N开关状态与A或B开关状态之间的切换可以采用同样方法进行分析。对于能量馈入状态下也可以采用类似方法进行分析。

5 电压空间矢量优化选择

三电平逆变器控制算法的核心在于电压空间矢量的选择。通过坐标变换将三电平逆变器的控制转化为两电平逆变器控制,从而得到由36个小三角形组成的电压空间矢量图。在每个小三角形中都存在8种“七段式”电压空间矢量组合,通过对8种“七段式”电压空间矢量组合对中性点电位的影响特性进行分析,发现其与单个空间矢量对中性点电位的影响特性类似,也可以分为5种情况,即 $o++$ 、 $o+$ 、 o 、 $o-$ 、 $o--$ 。

因此,其调制策略中8种“七段式”电压空间矢量的选择可以采取如下2种方式:1)选择对中性点电位影响特性较弱的“七段式”电压空间矢量组合,中性点电位的小波动可以通过钳位电容与直流侧电容之间的充、放电控制自动实现中性点电位的平衡;2)根据检测到的中性点电位偏差,选择具有相反影响特性的“七段式”电压空间矢量组合。对比2种方法,前者省去了电压比较环节,减少了系统的复杂度,本文即采用此方法。根据此方法选择出满足条件的“七段式”空间矢量组合后,再根据钳位电容电压调制策略进一步筛选即可得出优化后的电压空间矢量组合,进而得到其时序图,实现对新型混合钳位式三电平逆变器的SVPWM控制^[8-11]。

6 实验验证

针对上文提出的混合钳位式三电平变流器SVPWM优化调制策略,本文搭建了基于绕线电机的混合钳位式三电平逆变器样机实验平台,功率开关器件为InfineonFF650R17IE4双管IGBT模块,控制系统采用TMS28335+Xilinx CPLD/FPGA结构,实验参数如下:直流母线电压 $U_{dc}=100\text{ V}$,额定钳位电容电压 50 V ,直流母线电容 $C_1=C_2=1\ 050\ \mu\text{F}$,悬浮电容 $1\ 050\ \mu\text{F}$,开关频率 $f=2\text{ kHz}$,调制度为 0.8 ,每相阻感负载电阻值 $R=0.8\ \Omega$,电感值 $L=23\text{ mH}$,实验波形如图9所示。

图9a给出了由示波器测得的混合钳位式三电平逆变器输出的线电压波形,直流母线电压由三相二极管不控整流模块维持,可见其正弦度良好。图9b、图9c分别为直流侧半母线电容电压和钳位电容电压,在优化的中性点电位平衡调制策略下,直流侧两电容电压波形 U_{c1} 、 U_{c2} 基本重合,钳位电容电压基本稳定在半直流母线

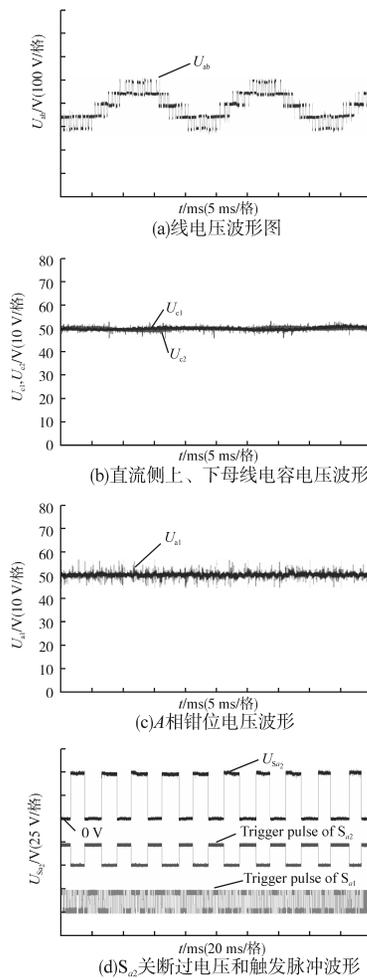


图9 实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms

电压附近,电压波动较小,证实了在该调制度和功率因数下混合钳位拓扑结构能够通过直流侧电容与钳位电容自动充、放电控制减少直流侧中性点电位的波动。图9d为桥臂内侧功率开关器件 S_{a2} 两端的关断过电压波形及 S_{a1} 、 S_{a2} 的触发脉冲波形,可见功率开关器件 S_{a2} 的关断过电压约为 50 V ,过电压被钳位在桥臂内侧的钳位电容上而不会维持,只需要增加简单的电容吸收电路即可实现对桥臂内侧功率开关器件的安全可靠保护。

7 结论

本文在对混合钳位式三电平变流器的工作原理和电压空间矢量分析研究的基础上,对混合钳位式三电平逆变器64种电压空间矢量,在不同功率因数情况下对中性点电位的影响特性进行分析,并对钳位电容电压的充、放电过程进行分析,分别得出中性点电位平衡调制策略和采用开关状态切换的钳位电容电压平衡调制策略,

并对其钳位桥臂内侧关断过电压的机制进行了分析。设计了基于 TMS28335+XilinxCPLD/FPGA 的控制电路和主电路进行了实验,试验结果表明,所述优化调制算法可以满足中点电位及钳位电容电压平衡需要,也验证了混合钳位式拓扑结构在调节中点电位平衡和钳位桥臂内侧功率开关器件关断过电压方面具有明显优势。

参考文献

- [1] 李永东,肖曦,高跃.大容量多电平变换器——原理·控制·应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] Yong-Seok K, Beom-Seok S, Dong-Seok H. A Novel Structure of Multi-level High Voltage Source Inverter[C]// Proceedings of TENCON '93. IEEE Region 10 International Conference on Computers, Communications and Automation, 1993:132-137.
- [3] Nabea A, Takahashi I, Akagi H. A New Neutral Point Clamped PWM Inverter[J].IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, IA-17(5):518-523.
- [4] 岳云涛,陈志新,魏幼萍.混合钳位式双PWM三电平变频调速系统[J].电工技术学报,2008,23(5):69-74.
- [5] 窦真兰,张同庄,凌禹.三电平NPC整流器空间矢量脉宽调制及中点电位平衡控制[J].电力自动化设备,2008,28(2):65-69,79.
- [6] Celanovic N, Boroyevich D. A Comprehensive Study of Neutral-point Voltage Balancing Problem in Three-level Neutral-point-clamped Voltage Source PWM Inverters[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(2):242-249.
- [7] 翁海清,孙旭东,刘丛伟,等.三电平逆变器直流侧电压平衡控制方法的改进[J].中国电机工程学报,2002,22(9):94-97.
- [8] Anshuman S, Arindam G, Avinsh J. Capacitor Voltage Balancing Schemes in Flying Capacitor Multilevel Inverters[C]// IEEE 38th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2007:2367-2372.
- [9] Jae Hyeong S, Chang Ho Choi, Dong Seok Hyun. A New Space-vector PWM Method for Three-level Inverters[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(4):545-550.
- [10] Steinke J K. Switching Frequency Optimal PWM Control of Three-level Inverter[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 7(3):487-496.
- [11] Khajehoddin S A, Bakhshai A, Jain P K. A Simple Voltage Balancing Scheme for M-level Diode-clamped Multilevel Converters on A Generalized Current Flow Model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5):2248-2259.

收稿日期:2018-12-20

修改稿日期:2019-02-20