

基于部分子模块复用的MMC型中压 电能质量治理装置研究

赖嘉源¹, 要若天², 刘迪燊¹, 白浩², 夏子鹏¹, 刘亦朋¹

(1. 广东电网公司珠海供电局, 广东 珠海 519000;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要: 为进一步提升中压直挂型电能质量治理装置的功率密度和输出性能, 提出一种基于部分子模块复用的模块化多电平变换器(PSM-MMC)拓扑结构及其调控策略。PSM-MMC由4组桥臂子模块和3组桥臂切换开关构成, 通过桥臂切换开关对部分子模块进行复用, 提高子模块的利用率。与常规MMC拓扑相比, 所提PSM-MMC的子模块数可减少1/3。进一步, 针对PSM-MMC结构提出一种电平数倍增的混合调制策略, 在最近电平逼近调制的基础上, 引入两个子模块输出高频PWM波, 减小输出电压谐波。此外, 对PSM-MMC的工作模式进行详细分析, 并给出PSM-MMC的控制框图及电容电压平衡策略。最后, 在10 kV系统下进行仿真和实验, 验证了所提拓扑及调控策略的有效性。

关键词: 模块化多电平变换器; 模块复用; 桥臂切换; 电能质量; 电压平衡

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26210

Research on the MMC Type Medium-voltage Power Quality Control Device Based on the Multiplexing of Partial Submodule

LAI Jiayuan¹, YAO Ruotian², LIU Dishen¹, BAI Hao², XIA Zipeng¹, LIU Yipeng¹

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, Guangdong, China; 2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: In order to further improve the power density and output performance of the transformerless medium-voltage power quality control device, a partial submodule multiplexing modular multilevel converter (PSM-MMC) topology and its control strategy were proposed. The PSM-MMC was composed of four groups of arm submodules and three groups of arm switching switches. Some submodules were multiplexed by arm switching switches to improve the utilization rate of submodules. Compared with the conventional MMC topology, the number of submodules of the proposed PSM-MMC could be reduced by 1/3. Furthermore, a hybrid modulation strategy with level multiplication was proposed for the PSM-MMC. Based on the nearest level modulation, two submodules were introduced to output high-frequency PWM waveform to reduce the output voltage harmonics. In addition, the working mode of PSM-MMC was analyzed in detail, and the control block diagram and capacitor voltage balancing strategy of PSM-MMC were given. Finally, the effectiveness of the proposed topology and control strategy was verified by simulation and experiment under 10 kV system.

Key words: modular multilevel converter (MMC); submodule multiplexing; arm switching; power quality; voltage balancing

近年来,随着电力电子设备、新能源、储能技术的高速发展,接入电网的非线性负荷大量增加,使得中压配电网中电压闪变、谐波、电压暂降等电能质量问题愈发严重,严重威胁电力设备的

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(030400KC22120002(GDKJXM20222629))

作者简介: 赖嘉源(1986—),男,本科,工程师,主要研究方向为电能质量监测与治理,Email: laijiayuan@zh.gd.csg.cn

通讯作者: 要若天(1992—),男,博士,工程师,主要研究方向为电能质量监测与治理,Email: yaort@csg.cn

安全性^[1-5]。为减少电能质量引起的经济损失,国内外研究学者先后提出了静止无功补偿器、动态电压恢复器、统一电能质量调节器等电能治理装置^[6-9]。其中,基于模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)拓扑结构的直挂型电能质量治理装置凭借其控制灵活、模块化程度高、损耗低等优点,在中高压配电网得到了广泛应用^[10-12]。然而,MMC中子模块电容体积占到装置的50%以上,数量较多的子模块将导致装置体积庞大^[13-15]。因此,基于MMC拓扑的直挂型中压电能质量治理装置轻型化研究成为当前的研究热点。

在MMC的拓扑优化方面,文献[16]提出了一种混合型级联多电平变换器,该变换器由高压两电平变换器和多个全桥子模块串联构成,可以减少50%的子模块数量。但是,高压两电平变换器器件的电压应力和直流母线电压相等,增加了装置的成本和损耗。在此基础上,文献[17-18]在每个桥臂增加一组串联全控器件,提出了一种桥臂交替导通型MMC。该拓扑减少了50%的子模块,但电容电压平衡复杂,且存在固定的能量平衡工作点。基于三电平变换器和MMC拓扑,文献[19-20]提出了一类嵌入式模块化多电平变换器,通过级联晶闸管实现级联子模块的换向,减小了50%的桥臂电压。

此外,除了减少MMC子模块数量,已有学者从减小电容电压纹波角度实现电容值降低。文献[21-22]以最小化电容电压波动为目标计算环流参考值,并设计了特定的环流控制策略,从控制环流的角度间接实现了降容。但是,以上环流注入方法无法实现环流抑制,功率损耗也有所增加。文献[23-24]在传统MMC基础上增加一个中间模块,并通过额外的电容波动抑制策略减小子模块电容电压波动。但是,该类方法降低电容值有限,且仍需要大量的子模块。

基于此,本文提出一种基于部分子模块复用的模块化多电平变换器(partial submodule multiplexing MMC, PSM-MMC)拓扑结构,并针对该拓扑提出一种电平数倍增的混合调制策略。其次,详细分析PSM-MMC的工作模态,并给出基于PSM-MMC拓扑的中压直挂型电能质量治理装置的控制框图及电容电压平衡策略。最后,通过仿真和实验验证了PSM-MMC拓扑结构和调制策略的可行性。

1 PSM-MMC 基本原理

1.1 拓扑结构

所提PSM-MMC拓扑结构如图1所示,每相由4组桥臂和3组桥臂切换开关构成。其中,每组桥臂包含 $N/3$ 个子模块(submodule, SM),4组桥臂依次串联,通过桥臂电感L连接到变换器直流侧。SM可以是半桥结构或者全桥结构,文中采用半桥结构作为SM的拓扑。图中,C为子模块电容, U_c 为子模块电容电压, $u_{arm1} \sim u_{arm4}$ 为各桥臂输出电压, u_o 为PSM-MMC的输出电压。每组桥臂开关由若干个硅基绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)反向串联而成。3组桥臂切换开关一侧连接到输出交流侧,另外一侧连接到4个桥臂的连接节点。

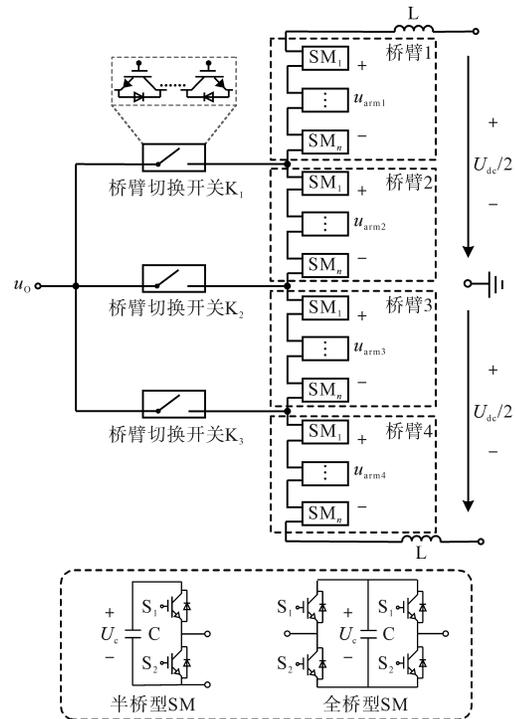


图1 PSM-MMC 拓扑结构

Fig.1 Topology of PSM-MMC

1.2 工作原理

PSM-MMC 运行时需要控制桥臂切换开关 $K_1 \sim K_3$ 进行投切,其投切原理如图2所示。传统MMC上、下桥臂输出参考电压可表示为

$$\begin{cases} u_{up_ref} = \frac{1}{2} U_{dc} - u_o \\ u_{low_ref} = \frac{1}{2} U_{dc} + u_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{up_ref}, u_{low_ref} 分别为上桥臂、下桥臂输出电压参考值。

以在最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)策略分析为例,传统MMC上、下桥臂投入的SM数量 N_p, N_n 可由下式计算:

$$\begin{cases} N_p = \text{round}\left(\frac{u_{\text{up_ref}}}{U_c}\right) \\ N_n = \text{round}\left(\frac{u_{\text{low_ref}}}{U_c}\right) \end{cases} \quad (2)$$

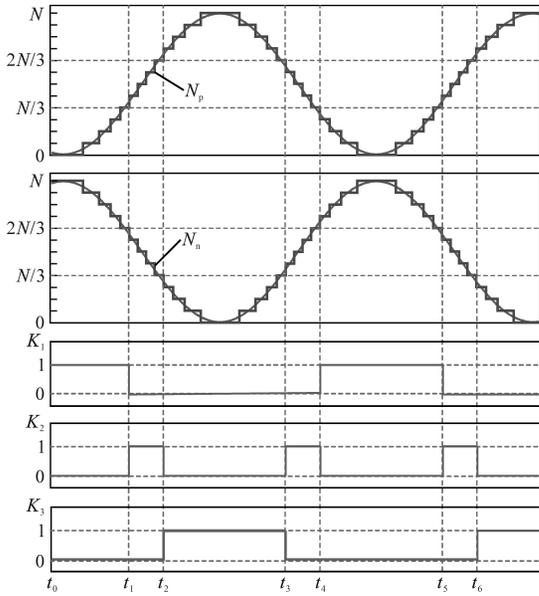


图2 桥臂切换开关投切原理

Fig.2 The switching principle of the arm switch

所提PSM-MMC可复用桥臂2,3中的SM,通过投切桥臂切换开关,达到等效传统MMC的输出性能,具体分析如下:

1) 当 $t_1 < t \leq t_2$ 时,上桥臂投入SM数量 $N/3 < N_p \leq 2N/3$ (下桥臂投入SM数量 $N/3 \leq N_n < 2N/3$),桥臂切换开关 K_2 导通, K_1, K_3 关断。PSM-MMC运行于模式1,桥臂2,3中的SM分别复用到上、下桥臂中,其等效电路如图3a所示。其中,桥臂1,2的SM构成上桥臂,桥臂3,4的SM构成下桥臂。上、下桥臂输出电压分别可表示为

$$\begin{cases} u_{\text{up}} = u_{\text{arm1}} + u_{\text{arm2}} \\ u_{\text{low}} = u_{\text{arm3}} + u_{\text{arm4}} \end{cases} \quad (3)$$

2) 当 $t_2 < t \leq t_3$ 时,上桥臂投入SM数量 N_p 处于上升阶段且 $2N/3 < N_p$,或 N_p 处于下降阶段且 $2N/3 \leq N_p$ (下桥臂投入SM数量 N_n 处于下降阶段且 $0 \leq N_n < N/3$,或 N_n 处于上升阶段且 $0 \leq N_p \leq N/3$),桥臂切换开关 K_3 导通, K_1, K_2 关断。PSM-MMC运行于模式2,桥臂2,3中的SM复用到上桥臂中,其等效电路如图3b所示。桥臂1~3的SM构成上桥臂,桥臂4的SM构成下桥臂。上、下桥臂输出电压分别可表示为

$$\begin{cases} u_{\text{up}} = u_{\text{arm1}} + u_{\text{arm2}} + u_{\text{arm3}} \\ u_{\text{low}} = u_{\text{arm4}} \end{cases} \quad (4)$$

3) 当 $t_3 < t \leq t_4$ 时,上桥臂投入SM数量 $N/3 \leq N_p < 2N/3$ (下桥臂投入SM数量 $N/3 < N_n \leq 2N/3$),PSM-MMC运行于模式1。

4) 当 $t_4 < t \leq t_5$ 时,上桥臂投入SM数量 N_p 处于下降阶段且 $0 \leq N_p < N/3$,或 N_p 处于上升阶段且 $0 \leq N_p \leq N/3$ (下桥臂投入SM数量 N_n 处于上升阶段且 $2N/3 < N_n$,或 N_n 处于下降阶段且 $2N/3 \leq N_n$),桥臂切换开关 K_1 导通, K_2, K_3 关断。PSM-MMC运行于模式3,桥臂2,3中的SM复用到下桥臂中,其等效电路如图3c所示。桥臂1的SM构成上桥臂,桥臂2~4的SM构成下桥臂。上、下桥臂输出电压分别可表示为

$$\begin{cases} u_{\text{up}} = u_{\text{arm1}} \\ u_{\text{low}} = u_{\text{arm2}} + u_{\text{arm3}} + u_{\text{arm4}} \end{cases} \quad (5)$$

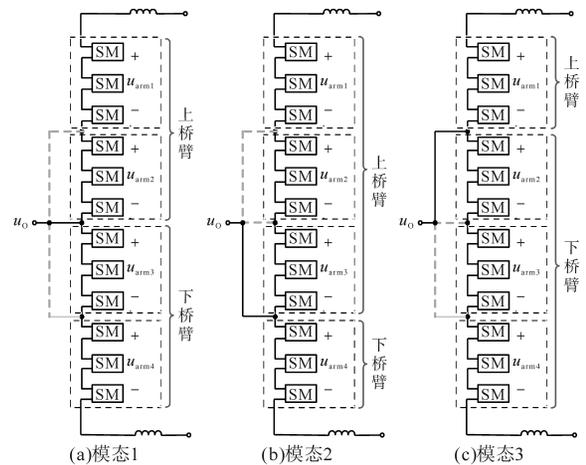


图3 PSM-MMC运行模式分析

Fig.3 Operational mode analysis of PSM-MMC

由图3可知,PSM-MMC在3个模式下均满足上、下桥臂共 N 个SM处于投入状态,等效传统MMC的运行模式。此外,PSM-MMC通过投切桥臂切换开关,提高了SM的利用率。PSM-MMC每相仅含 $4N/3$ 个SM,相较于每相需配置 $2N$ 个SM的传统MMC拓扑,其SM数量可降低1/3。

2 PSM-MMC调制策略

MMC运行于中压配电网时,通常配置数十个SM,采用NLM将在输出电压引入大量低次谐波,影响电能质量治理装置性能。与NLM比,载波移相脉宽调制(carrier phase-shifted PWM, CPS-PWM)输出的电压谐波含量低,但在CPS-PWM调制下SM投入数量将发生高频变化,难以满足PSM-MMC模式切换要求。基于此,本文提出一种电平

数倍增的混合调制策略,在NLM的基础上,在上、下桥臂各引入1个SM输出PWM波,减小输出电压谐波含量,如图4所示。

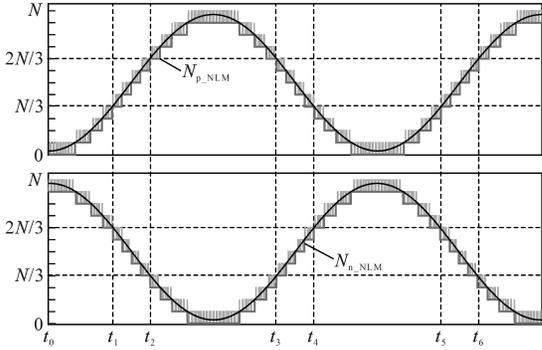


图4 PSM-MMC调制原理

Fig.4 Modulation principle of the PSM-MMC

所提调制策略中,每个SM具有3种模式:NLM投入模式、NLM切除模式和PWM模式。其中,上、下桥臂运行于NLM投入模式的SM数为

$$\begin{cases} N_{p_NLM} = \text{floor}\left(\frac{u_{up_ref}}{U_c}\right) \\ N_{n_NLM} = \text{floor}\left(\frac{u_{low_ref}}{U_c}\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\text{floor}(x)$ 为向下取整函数。

上、下桥臂处于NLM投入模式的SM输出电压可表示为

$$\begin{cases} u_{up_STEP} = U_c \text{floor}\left(\frac{u_{up_ref}}{U_c}\right) \\ u_{low_STEP} = U_c \text{floor}\left(\frac{u_{low_ref}}{U_c}\right) \end{cases} \quad (7)$$

上、下桥臂进行PWM模式的SM输出电压参考值由下式计算:

$$\begin{cases} u_{up_PWM} = u_{up_ref} - u_{up_STEP} \\ u_{low_PWM} = u_{low_ref} - u_{low_STEP} \end{cases} \quad (8)$$

所提调制策略将NLM计算所得的投入SM数作为桥臂切换开关的投切判断依据。因此,上、下桥臂各独立引入1个SM输出PWM波,可在不影响PSM-MMC模态切换的前提下,减小输出电压谐波。所提调制策略需对桥臂切换开关的投切时刻进行调整,具体分析如下:

1)当上桥臂处于NLM投入模式的SM数满足 $N_{p_NLM} < N/3$ 时,PSM-MMC运行于模态3。桥臂1中引入1个SM进行PWM调制输出 u_{up_PWM} ,桥臂2~4中引入1个SM进行PWM调制输出 u_{low_PWM} 。

2)当上桥臂处于NLM投入模式的SM数满足 $N/3 \leq N_{p_NLM} < 2N/3$ 时,PSM-MMC运行于模态1。桥

臂1、桥臂2中引入1个SM进行PWM调制输出 u_{up_PWM} ,桥臂3、桥臂4中引入1个SM进行PWM调制输出 u_{low_PWM} 。

3)当上桥臂处于NLM投入模式的SM数满足 $N_{p_NLM} \geq 2N/3$ 时,PSM-MMC运行于模态2。桥臂1~3中引入1个SM进行PWM调制输出 u_{up_PWM} ,桥臂4中引入1个SM进行PWM调制输出 u_{low_PWM} 。

由式(8)可知,上、下桥臂输出的PWM电压参考值互补。由于上、下桥臂各只有一个SM输出PWM波,将两个运行于PWM模式的SM载波移相角设置为 0° ,输出电压电平数量可从 $N+1$ 倍增至 $2N+1$ [25]。

3 PSM-MMC控制策略

要使PSM-MMC能够稳定运行,实现其准确产生补偿电流,合适的控制策略是必不可少的。PSM-MMC整体控制包括输出电流控制、循环电流控制和电压平衡控制3部分,如图5所示。将循环电流控制所得环流抑制参考电压 u_{cir_ref} 和输出电流控制所得输出参考电压 u_{o_ref} 叠加后,作为PSM-MMC模态切换的判断依据。最后,进行混合调制和电压平衡控制确定最终投入的子模块。

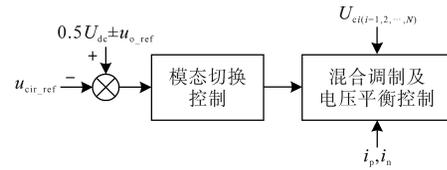


图5 PSM-MMC整体控制框图

Fig.5 Overall control block diagram of the PSM-MMC

循环电流控制策略可基于文献[26]直接计算环流抑制参考电压 u_{cir_ref} 。本文具体分析PSM-MMC输出电流控制和电容电压平衡控制方法。

3.1 PSM-MMC输出电流控制

PSM-MMC采用电压电流双闭环控制,如图6所示。外环采用电压控制,三相SM的电容电压的平均值 U_{c_ave} 和参考值 U_{c_ref} 作差,经PI控制器得

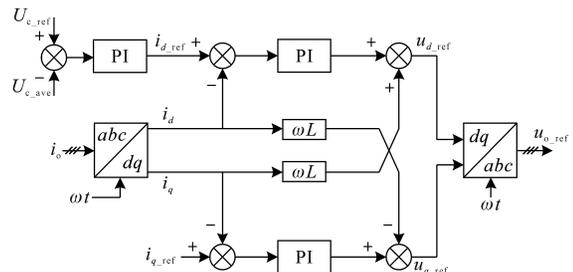


图6 PSM-MMC输出电流控制框图

Fig.6 Output current control block diagram of the PSM-MMC

到电流内环的 d 轴参考值。输出电流 i_o 的 d 轴、 q 轴分量(i_d, i_q)分别与参考值作差,经PI控制器减去解耦分量得到调制波的 d, q 轴分量 u_{d_ref} 和 u_{q_ref} 。最后,经 $dqabc$ 变换得到每相输出电压参考值 u_{o_ref} 。

3.2 PSM-MMC 电容电压平衡控制

由于PSM-MMC存在3种运行模态,且4个桥臂中SM均存在NLM投入、NLM切除和PWM3种运行模式。因此,每相SM将存在损耗不均的问题,若不加以控制将会造成电容电压不平衡。本文提出一种特定的SM均压策略,如图7所示。

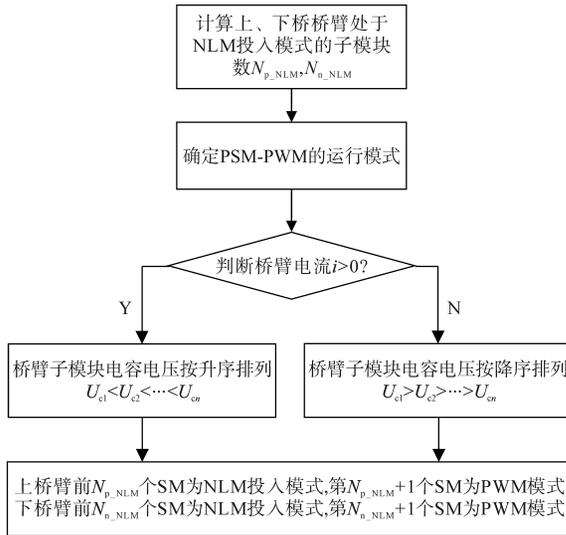


图7 PSM-MMC 电容电压平衡控制

Fig.7 Capacitor voltage balancing control of the PSM-MMC

首先,计算每时刻上、下桥臂处于NLM投入模式的SM数量 N_{p_NLM}, N_{n_NLM} 。其次,判断PSM-MMC的运行模式及组成上、下桥臂的SM。再次,判断上、下桥臂电流的大小,以上桥臂分析为例。当桥臂电流 $i > 0$ 时,将所有SM按电容值升序进行排列,取前 N_{p_NLM} 个SM进行NLM投入模式,第 $N_{p_NLM}+1$ 个SM进行PWM模式,所有投入的SM电容将充电。当桥臂电流 $i < 0$ 时,将所有子模块按电容值降序进行排列,优先取前 N_{p_NLM} 个SM进行NLM投入模式,第 $N_{p_NLM}+1$ 个SM进行PWM模式,所有投入的SM电容将放电。

4 仿真验证

为了验证本文拓扑结构及功能的有效性和可行性,在Matlab/Simulink仿真平台中搭建了基于PSM-MMC的仿真模型,仿真参数为:电网线电压10 kV,PSM-MMC直流电压20 kV,桥臂子模块数量 $N/3=4$,桥臂电感8 mH,子模块额定电容电压1 666 V,子模块电容9 300 μ F,载波频率5 kHz,

有功负载3 MW,无功负载2 Mvar。

4.1 混合调制策略性能验证

为验证本文所提混合调制策略的优越性,分别进行了PSM-MMC在NLM和所提混合调制下的仿真验证,如图8所示。在0.3 s前,PSM-MMC采用传统的NLM调制策略输出13电平阶梯波电压,输出电流谐波畸变率为2.65%。在0.3 s后,PSM-MMC采用本文所提混合调制策略输出25电平PWM波电压。由于引入PWM调制后,PSM-MMC的输出电压谐波集中在高次谐波,输出电流的畸变率大大减小,仅为0.26%。

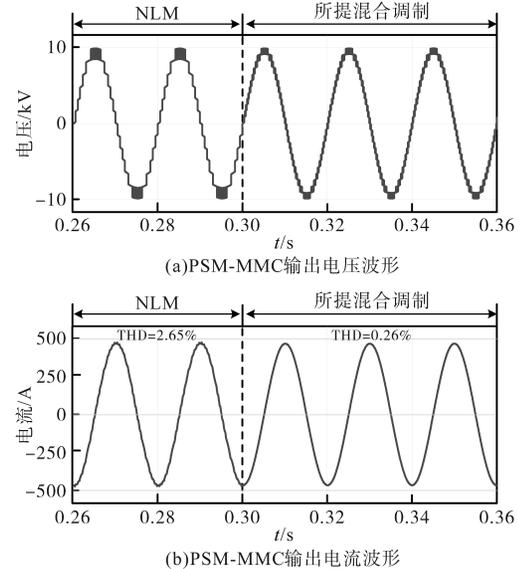


图8 NLM和所提混合调制策略对比

Fig.8 Comparison of NLM and the proposed hybrid modulation

4.2 无功补偿工况验证

PSM-MMC在无功电流补偿工况下的仿真波形如图9所示。设定在0.1 s之前装置未被投入,在0.1 s后装置投入。PSM-MMC输出电压 u_o 、电流波形 i_o 如图9a所示。在0.1 s之后,PSM-MMC投入电网并补偿负载2 Mvar的无功功率。网侧电压 u_s 、网侧电流 i_s 和负载电流 i_l 波形如图9b所示。由图9b可知,PSM-MMC投入后 u_s 和 i_s 同相位,验证了本文所提PSM-MMC具备良好的稳态无功电流补偿能力。

图10给出了PSM-MMC输出电压、桥臂切换开关触发脉冲和桥臂电压仿真波形。由图10a可知,PSM-MMC的交流侧可输出 $2N+1$ 电平电压,电平数达25个。由图10b、图10c可知,所提混合调制策略可以合理配置每个桥臂的SM进行NLM和PWM输出4电平电压,验证了本文所提电平数倍增的混合调制策略的正确性。

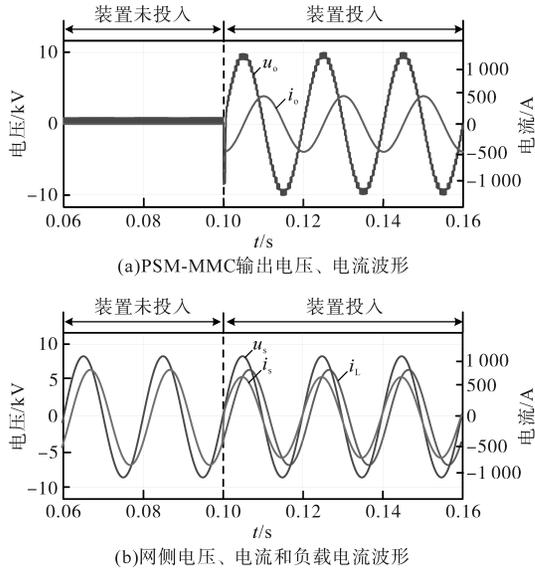


图9 PSM-MMC无功补偿工况仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms of PSM-MMC reactive power compensation condition

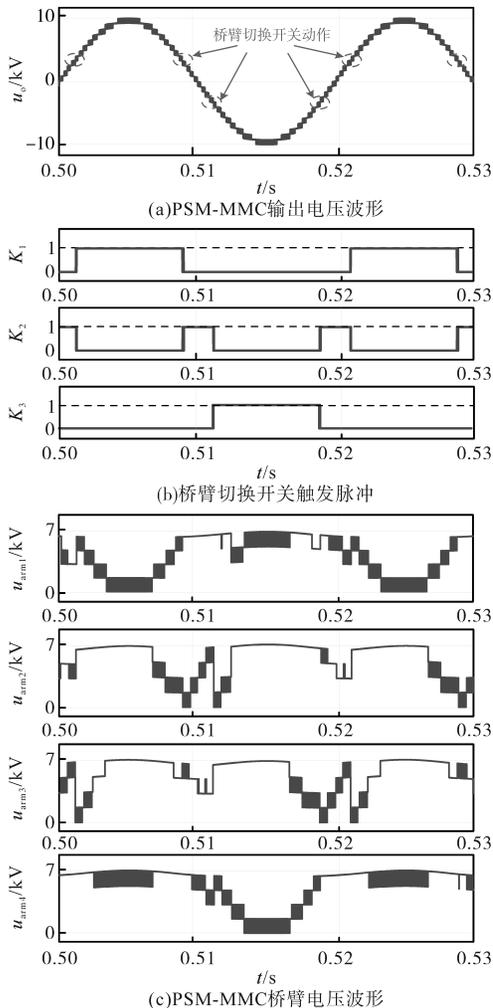


图10 PSM-MMC电压仿真波形

Fig.10 Simulation waveforms of PSM-MMC voltage

PSM-MMC 电容电压仿真波形如图 11 所示。在本文所提电容电压控制策略下,PSM-MMC 的

4 个桥臂电容电压均能稳定到参考值附近,且电容电压波动小于 5%。

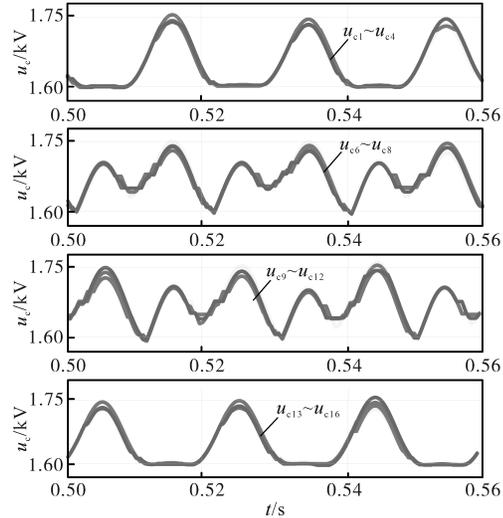


图11 PSM-MMC电容电压仿真波形

Fig.11 Simulation waveforms of PSM-MMC capacitor voltage

为验证 PSM-MMC 系统在负载突变工况下的动态性能,设置 1 s 时负载的无功功率从 2 Mvar 突变为 1 Mvar。

负载突变工况下 PSM-MMC 输出电压、电流波形如图 12a 所示。在补偿容量 2 Mvar 切换到 1 Mvar 过程中,由于滤波电感压降降低导致逆变器出口侧电压减小,PSM-MMC 输出电压在峰值处减少一个电平,输出电压电平数由 25 个减少到 23 个。由图 12b 可知,所提 PSM-MMC 在负载突变时仍能保持较好的无功电流跟踪能力,且未产生明显的冲击电流,网侧仍保持单位功率因数运行。

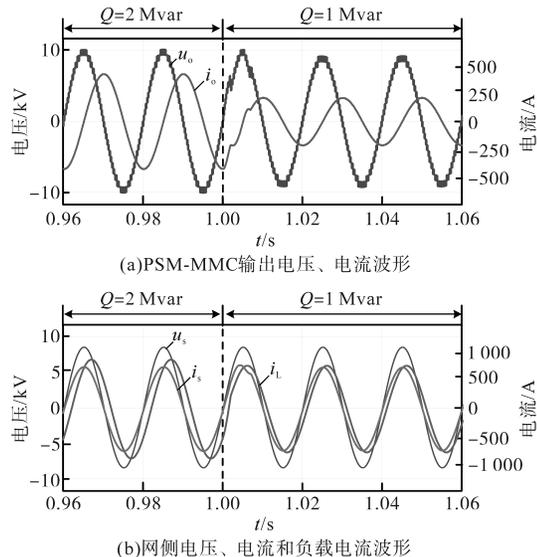


图12 PSM-MMC动态特性仿真结果

Fig.12 Simulation results of dynamic characteristics of PSM-MMC
负载突变时 PSM-MMC 的电容电压波形如图

13所示。SM电容电压仍能稳定在参考值,但电容电压波动幅值减小。由PSM-MMC动态性能仿真结果可知,当运行状态发生改变时,所提PSM-MMC拓扑和控制策略具备良好的动态性能。

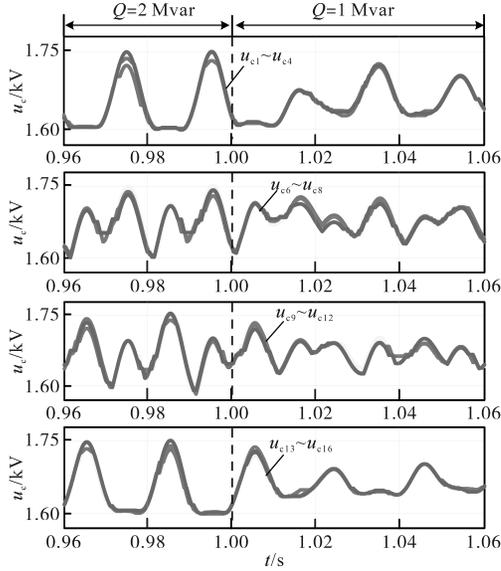


图13 负载突变情况下PSM-MMC电容电压仿真结果
Fig.13 Simulation results of PSM-MMC capacitor voltage under sudden load change

4.3 谐波补偿工况验证

设定在2.1 s时,负载侧注入3次谐波电流,负载电流发生畸变,如图14所示。由图14可知,PSM-MMC同时补偿负载侧无功电流及谐波电流,网侧的电压 u_s 和电流 i_s 依然为保持同相位的正弦波。此外,PSM-MMC的子模块电容电压均能保持稳定,如图15所示。

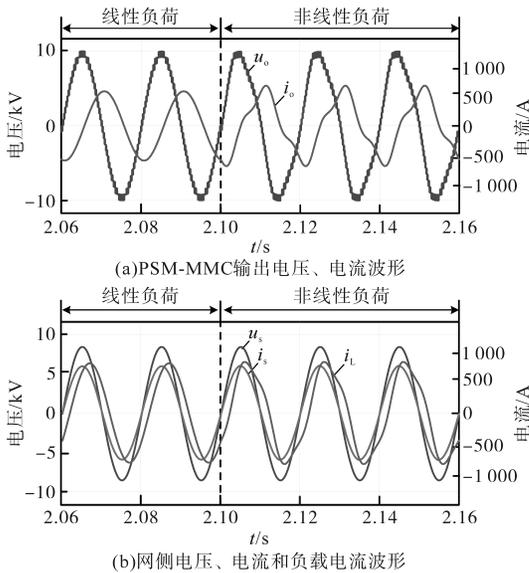


图14 PSM-MMC谐波补偿工况仿真波形
Fig.14 Simulation waveforms of PSM-MMC harmonic compensation condition

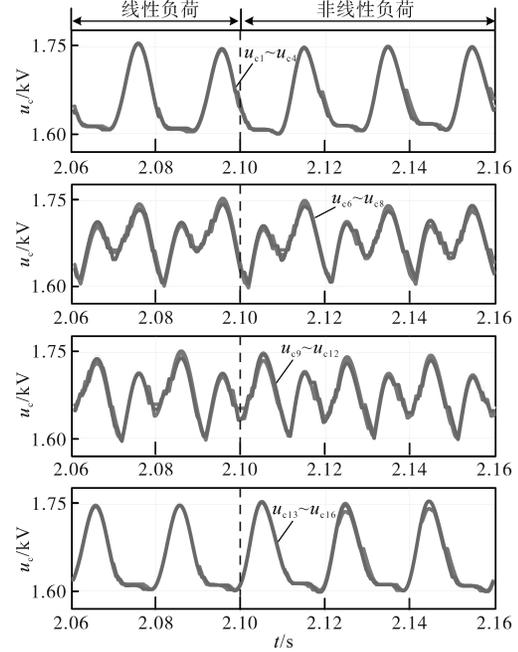


图15 谐波补偿工况下PSM-MMC电容电压仿真波形
Fig.15 Simulation waveforms of PSM-MMC capacitor voltage under harmonic compensation condition

5 实验验证

为进一步验证PSM-MMC在无功补偿下的拓扑结构和调控策略的正确性和有效性,基于第4节的仿真模型,在实验室搭建PSM-MMC硬件在环实验平台。主电路仿真模型位于主控制器中,外部控制器选择DSP28335,实验参数与仿真参数保持一致。

5.1 额定工况下PSM-MMC实验验证

以单相PSM-MMC分析为例,在10 kV系统、补偿容量为2 Mvar情况下的实验波形如图16所示。PSM-MMC输出接近理想正弦的25电平电压,如图16a所示。相较于每相需配置24个SM的传统MMC拓扑,PSM-MMC的SM数量仅为16,降低了1/3。图16b展示了投入PSM-MMC之后网侧电压 u_s 、网侧电流 i_s 和负载电流 i_L 波形,其中 u_s 和 i_s 实现单位功率因数运行,验证了本文所提PSM-MMC具备良好的稳态无功电流补偿能力。

图17给出PSM-MMC桥臂电压仿真波形,4个桥臂分别可输出4电平阶梯波电压,经桥臂切换开关投切后构成输出电压 u_o 。图18为PSM-MMC子模块电容电压,以每个桥臂第一个子模块分析为例。其中, $u_{c1}, u_{c2}, u_{c3}, u_{c4}$ 分别代表桥臂1~4中第一个子模块电容电压,每个子模块电容电压均在参考值1 666 V附近波动,验证了所提稳压

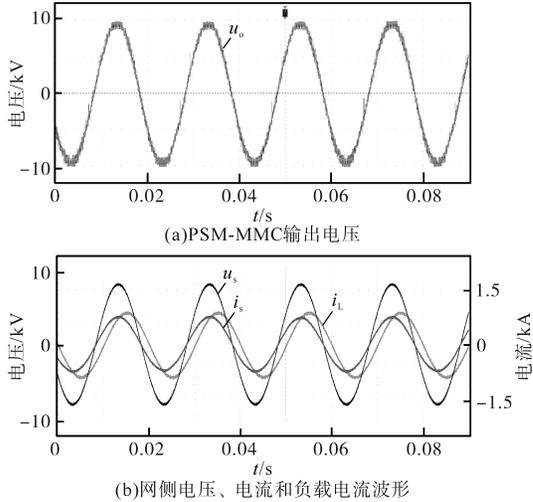


图16 PSM-MMC无功补偿工况实验波形

Fig.16 Experimental waveforms of PSM-MMC reactive power compensation condition

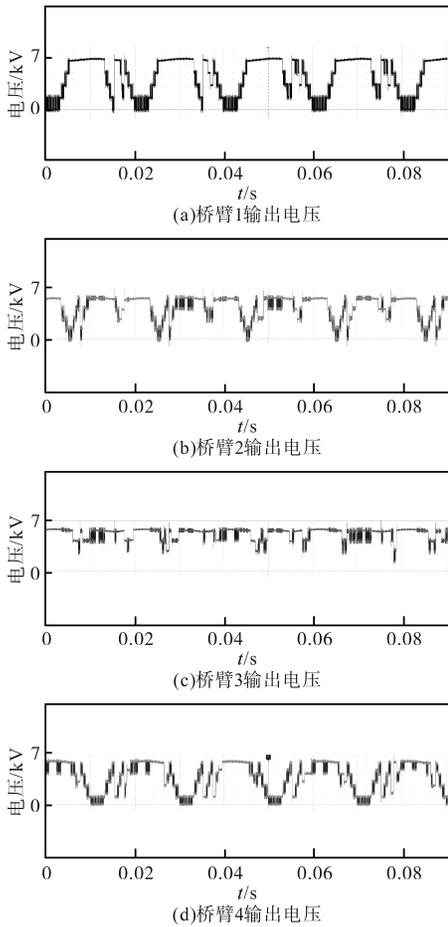


图17 PSM-MMC桥臂电压实验波形

Fig.17 Experimental waveforms of PSM-MMC arm voltage

策略的有效性。

5.2 PSM-MMC 动态性能实验验证

图19给出PSM-MMC动态性能验证的实验波形,在 t_0 时负载容量从1 Mvar切换到2 Mvar。在补偿容量切换过程当中,PSM-MMC均能实现迅

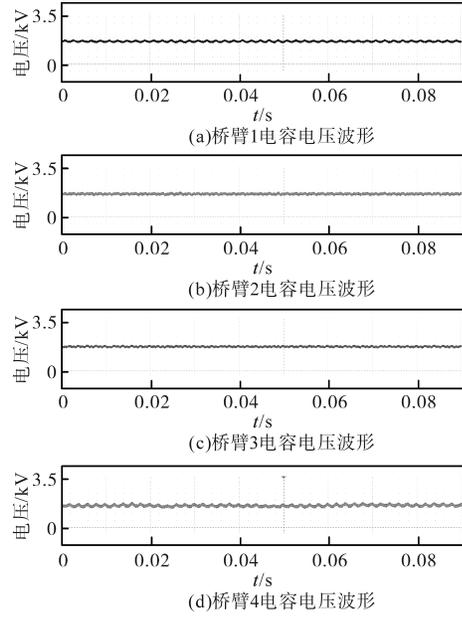


图18 PSM-MMC电容电压实验结果

Fig.18 Experimental waveforms of PSM-MMC capacitor voltage

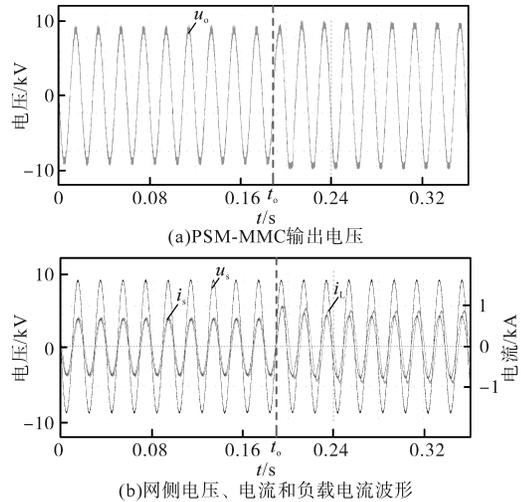


图19 系统发生负载阶跃的实验波形

Fig.19 Experimental waveforms with load change

速响应,并实现无功功率的准确补偿。

6 结论

为提升中压直挂型电能质量治理装置的功率密度和输出性能,本文提出一种基于部分子模块复用的模块化多电平变换器(PSM-MMC)拓扑结构。此外,针对PSM-MMC结构提出一种电平数倍增的混合调制策略和电容电压平衡策略。最后,通过仿真和实验验证了所提PSM-MMC方案的有效性和可行性,得出如下结论:

1)所提的PSM-MMC拓扑,仅添加3个桥臂切换开关的情况下,对部分子模块进行复用,提高模块利用率。相较于传统MMC能够减少1/3的模块数,减小了装置体积。

2)所提调制策略能将PSM-MMC输出电压增加至 $2N+1$ 电平,提升输出电压波形质量的同时不影响PSM-MMC桥臂切换。

3)所提控制策略可以将电容电压控制到参考值,并在无功功率补偿和谐波补偿工况具备良好的补偿效果和动态性能。

参考文献

- [1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术,2021,47(9):3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [2] 王泽青,夏成军,赖胜杰,等. 混合型MMC非闭锁型直流故障穿越的故障等效模型[J]. 电力工程技术,2023,42(2):103-111.
WANG Zeqing, XIA Chengjun, LAI Shengjie, et al. Fault equivalent model for non-blocking DC fault ride-through of hybrid MMC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 103-111.
- [3] 江畅,程启明,马信乔,等. 不平衡电网电压下基于模块化多电平变流器的统一电能质量调节器的微分平坦控制[J]. 电工技术学报,2021,36(16):3410-3421.
JIANG Chang, CHENG Qiming, MA Xinqiao, et al. Differential flat control for unified power quality controller based on modular multilevel converter under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3410-3421.
- [4] JIN Y, XIAO Q, JOSEP P, et al. A novel fault-tolerant operation approach for the modular multilevel converter-based STATCOM with the enhanced operation capability[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5541-5552.
- [5] 李峥,陈武,侯凯,等. 适用于中压配电网的无联结变压器柔性环网控制器[J]. 电力系统自动化,2022,46(14):169-176.
LI Zheng, CHEN Wu, HOU Kai, et al. Flexible ring network controller without interface transformer for medium voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 169-176.
- [6] 任鹏,涂春鸣,侯玉超,等. 基于Si和SiC器件的混合型级联多电平变换器及其调控优化方法研究[J]. 电工技术学报,2023,38(18):5017-5028.
REN Peng, TU Chunming, HOU Yuchao, et al. Research on a hybrid cascaded multilevel converter based on Si and SiC device and its control optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 5017-5028.
- [7] 陈静,赵涛,徐友,等. 一种适用于少子模块MMC的混合调制策略[J]. 电力工程技术,2022,41(5):186-192.
CHEN Jing, ZHAO Tao, XU You, et al. A hybrid modulation strategy suitable for MMC with small quantities of sub-modules [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 186-192.
- [8] 贾文慧,郭祺,涂春鸣,等. 集成电压补偿与无功支撑能力的并网变换器拓扑优化及控制[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):153-161.
JIA Wenhui, GUO Qi, TU Chunming, et al. Topology optimization and control of grid-connected converter with integrated voltage compensation and reactive power support capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 153-161.
- [9] 杜少通,刘杰,周娟,等. 一种基于NPC和H桥混合级联的6 kV静止无功发生器[J]. 电网技术,2022,46(12):5012-5020.
DU Shaotong, LIU Jie, ZHOU Juan, et al. A 6 kV hybrid cascade static var generator using NPC and H-bridge[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 5012-5020.
- [10] 周志,涂春鸣,侯玉超,等. 一种高性能低成本的中压异质器件混合型模块化多电平变换器及其控制策略[J]. 电网技术,2024,48(9):3686-3694.
ZHOU Zhi, TU Chunming, HOU Yuchao, et al. A high-performance and low-cost medium-voltage heterogeneous device hybrid modular multilevel converter and its control strategy[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3686-3694.
- [11] 任鹏,涂春鸣,侯玉超,等. 考虑异质器件混用与输出电平倍增的混合型MMC及其调控方法[J]. 电力系统自动化,2024,48(5):128-136.
REN Peng, TU Chunming, HOU Yuchao, et al. Hybrid modular multilevel converter considering heterogeneous device mixing and output level doubling and its regulation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 128-136.
- [12] 白志红,李奕飞,马皓. 基于简化SVM的模块化多电平变换器多子模块故障容错运行策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(20):7104-7117.
BAI Zhihong, LI Yifei, MA Hao. Fault-tolerant operation strategy of modular multilevel converter with multiple faulty switches based on a simplified SVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7104-7117.
- [13] 孙标,路茂增,张存山,等. 基于模組解耦控制的高调制比混合型MMC电容优化方法[J]. 电力工程技术,2023,42(5):148-157.
SUN Biao, LU Maozeng, ZHANG Cunshan, et al. Module decoupling control based capacitance optimization for hybrid modular multi-level converter with high modulation index[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 148-157.
- [14] WANG Y, HU C, DING R, et al. A nearest level PWM method for the MMC in DC distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9209-9218.
- [15] MA K, LI E, HE B, et al. Mechanism and cancellation of DC current fluctuation in MMC excited by circulating current mitigation under nearest level control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 6822-6831.

- [16] DARGAHI V, SADIGH A, KHORASANI R, et al. Active voltage balancing control of a seven-level hybrid multilevel converter topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 74–89.
- [17] 范世源, 杨贺雅, 杨欢, 等. 具有故障穿越能力的T型桥臂交替多电平换流器及其调制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 41–50.
FAN Shiyuan, YANG Heya, YANG Huan, et al. T-type alternate arm multilevel converter with fault ride-through capability and its modulation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 41–50.
- [18] YANG H, FAN S, DONG Y, et al. Arm phase-shift conducting modulation for alternate arm multilevel converter with half-bridge submodules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5223–5235.
- [19] LIU J, DONG D, ZHANG D. Hybrid modular multilevel rectifier: a new high-efficient high-performance rectifier topology for HVDC power delivery[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8583–8587.
- [20] LIU J, DONG D, ZHANG D. Hybrid modular multilevel converter family with higher power density and efficiency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9001–9014.
- [21] 董鹏, 蔡旭, 吕敬. 大幅减小子模块电容容值的MMC优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5369–5380.
DONG Peng, CAI Xu, LÜ Jing. Optimized method of MMC for greatly reducing the capacitance of the submodules[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5369–5380.
- [22] 李钰, 陆锋, 樊强, 等. 不平衡电网电压下的MMC子模块电压波动抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 91–100.
LI Yu, LU Feng, FAN Qiang, et al. Suppression method for voltage fluctuation of sub-module in multilevel modular converter with unbalanced power grid voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 91–100.
- [23] LE D D, LEE D C. A modular multilevel converter topology with novel middle submodules to reduce capacitor voltage fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 70–75.
- [24] HUANG M, KANG Z, LI W, et al. Modified modular multilevel converter with third-order harmonic voltage injection to reduce submodule capacitor voltage ripples[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7074–7086.
- [25] LI B, YANG R, XU D, et al. Analysis of the phase-shifted carrier modulation for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 297–310.
- [26] 屠卿瑞, 徐政, 管敏渊, 等. 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 57–61, 83.
TU Qingrui, XU Zheng, GUAN Minyuan, et al. Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 57–61, 83.

收稿日期:2024-10-10

修改稿日期:2024-12-17