

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231645

故障相桥臂转移接地消弧装置直流侧电压控制方法

郭谋发^{1,2}, 刘鑫斌¹, 张彬隆^{1,2}, 赵国军¹, 郑泽胤^{1,2}

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 智能配电网装备福建省
高校工程研究中心, 福建 福州 350108)

摘要: 为解决传统三相直挂式柔性消弧装置非故障相桥臂承担线电压的问题, 提出一种故障相桥臂转移接地的消弧方法。该方法通过开关控制故障相桥臂转移接地, 母线电压由故障相桥臂与非故障相桥臂共同承担, 三相桥臂共同输出电流, 以实现消弧。针对级联 H 桥直流侧需独立供电的问题, 提出分布式电压平衡换流调制方法。该调制方法根据 H 桥输出状态和电流方向对直流侧电容充放电的影响, 有选择地改变 H 桥的输出状态, 进而实现直流侧电压的稳定。使用该调制方法的消弧装置无须在直流侧配备独立供电电源, 在消弧过程中能保持 H 桥直流侧电压稳定。最后, 采用 Matlab/Simulink 仿真软件对所提方法进行验证, 仿真结果证明了所提方法的有效性。

关键词: 单相接地故障; 级联 H 桥变流器; 直流侧电压; 消弧; 转移接地

DC-link voltage control method of a fault phase bridge arm transfer grounding arc suppression device

GUO Moufa^{1,2}, LIU Xinbin¹, ZHANG Binlong^{1,2}, ZHAO Guojun¹, ZHENG Zeyin^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Engineering Research Center of Smart Distribution Grid Equipment, Fujian Province University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: There is a problem in that the non-fault phase bridge arm of traditional three-phase direct-hanging flexible arc suppression device bears the line voltage. Thus a fault phase bridge arm transfer grounding arc suppression method is proposed. This method controls the fault phase bridge arm transfer grounding through the switch. The bus voltage is shared by the fault phase bridge arm and the non-fault phase bridge arm, and the three-phase bridge arm outputs the current to achieve arc suppression. The cascaded H-bridge DC-link needs an independent power supply, so a distributed voltage balance commutation modulation method is proposed. The modulation method selectively changes the H-bridge output state according to the influence of H-bridge output state and current direction on the charge and discharge of the DC-link capacitor, and then realizes the stability of DC-link voltage. The arc suppression device using this modulation method does not need to be equipped with an independent power supply on the DC side, and can maintain H-bridge DC-link voltage stability during the arc suppression process. Finally, the proposed method is verified by Matlab/Simulink simulation software, and the results prove the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51677030).

Key words: single-phase-to-ground fault; cascaded H-bridge converter; DC-link voltage; arc suppression; transfer grounding

0 引言

配电网结构复杂, 环境多变, 易发生故障。其中, 单相接地故障占总故障数的 80%以上^[1-4]。单相接地故障发生时, 产生的电弧难以自熄, 处理不及

时会引发火灾^[5-6], 弧光过电压会破坏设备绝缘, 造成更严重的生产安全事故^[7-8]。

我国配电网以非有效接地方式为主^[9-10], 广泛应用的单相接地故障消弧装置有消弧线圈和消弧柜。然而, 受装置和元器件特性限制, 消弧线圈调节速度慢、更换成本高, 且仅对接地故障电流无功基波分量有较好的补偿效果, 对接地故障电流无功谐波分量和有功分量几乎没有补偿效果, 剩余接地

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677030); 福建省自然科学基金项目资助(2023J05106)

故障电流可能仍可维持电弧燃烧^[11]。消弧柜在故障选相错误或故障相母线接地后出现另一相接地的工况下,单相接地故障会发展为相间短路接地故障,威胁到主变压器的安全运行^[12]。消弧柜还存在受线路负荷影响大的问题,在重载线路、低阻值接地情况下,可能出现不能实现故障转移,甚至增大故障点电流的情况^[13]。

随着电力电子技术和自动控制技术的发展,有学者提出柔性消弧装置^[14],利用有源逆变器补偿接地故障电流。柔性消弧装置可分为主从式和全电力电子式。主从式消弧装置^[15-16]主要以可调式消弧线圈或相电源馈入变压器为主补偿装置,以有源逆变器为从补偿装置。单相接地故障发生后,主消弧装置补偿大部分的接地故障电流,剩余部分由有源逆变器进行补偿,有源逆变器所需容量较小,二者相互配合能对接地故障电流进行补偿。全电力电子式消弧装置^[17-18]以基于级联H桥拓扑结构的变流器设备为主。级联H桥变流器输出谐波低、耐压高、可拓展性强、输出电压电流和功率灵活可控,适合应用于中压配电网。单相接地故障发生后,装置向配电网注入故障补偿电流以抑制接地故障电流。

长期以来,国内外学者对全电力电子式消弧装置开展了大量的研究工作。有学者提出基于级联H桥变流器的中性点注入式消弧装置^[19],但这种结构的装置需要经接地变压器接入配电网且需要独立的供电电源,增大了装置的制造成本。文献[20]提出的三相直挂式柔性消弧装置可直接挂接于配电网线路上,但每个桥臂需要按其所承受的线电压进行设计,增大了电力电子器件的投入。文献[21]提出三相四桥臂柔性消弧装置,每个桥臂仅需按其所承受的配电网相电压进行设计,但桥臂数的增加依旧增大了装置的成本。因此,本文提出故障相桥臂转移接地消弧装置拓扑,在传统三相直挂式柔性消弧装置的基础上,每个桥臂增加一个接地开关,通过控制故障相桥臂接地开关闭合,将故障相桥臂转移成接地桥臂,线电压由故障相桥臂和非故障相桥臂共同承担,每个桥臂仅需按其所承受的配电网相电压进行设计,装置结构对称,具有一定的扩展性。

无论是主从式还是全电力电子式补偿装置,其逆变器大都基于H桥结构,H桥直流侧供电通常经交流电源和整流电路获得,供电电源的需求给装置的设计、生产、安装等带来了困难,因此如何免去供电结构成为了相关领域的研究热点。基于级联H桥拓扑结构的逆变变流器在静止无功补偿器中应用广泛。文献[22-23]采用注入零序或负序电压的方法,控制能量在相间的流动,以实现相间均压控制。文

献[24]在星型结构的基础上,在两组相间增加RLC谐振器,利用谐振频率分量控制能量在相间的流动,进而实现三相直流侧电压平衡。文献[25]根据功率流动计算相间电压控制的前馈补偿和三相需要注入的零序电压,结合反馈与前馈控制,实现相间电压平衡。针对单相接地故障电流抑制工况时直流侧电压控制的问题,文献[26]通过叠加直流侧电压补偿量,调整桥臂的输出电流或电压,进而控制桥臂的功率吸收和释放,从而维持直流侧总电压稳定,但文中只讨论了直流侧总电压的稳定控制,并未对H桥直流侧电压稳定控制进行探讨。文献[27]通过非故障相桥臂的功能切换,协调配合,交替进行故障电流补偿和直流侧稳压控制,进而维持直流侧电压的稳定。这些工作为柔性消弧装置免供电化的应用奠定了良好的基础。本文对影响H桥直流侧电容充放电的因素进行了分析,并由此提出分布式电压平衡换流调制方法,使用该方法的柔性消弧装置在消弧过程中能维持H桥直流侧电压稳定。

本文结合已有柔性消弧装置的特点,提出故障相桥臂转移接地消弧装置拓扑;分析了H桥直流侧电容充放电影响因素,提出分布式电压平衡换流调制方法,使用该调制方法的故障相桥臂转移接地消弧装置无须配备直流侧供电电源,并且在消弧过程中能保持H桥直流侧电容电压稳定。仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性。

1 故障相桥臂转移接地消弧方法

1.1 故障相桥臂转移接地消弧装置的拓扑结构

故障相桥臂转移接地消弧装置的结构简图如图1所示,装置由三相桥臂组成,每相桥臂均由 N 级联H桥变流器、滤波电感、接地开关和并网开关组成。图1中: E_A 、 E_B 、 E_C 分别为A、B、C相电源电压; U_{com} 为桥臂公共点电压; U_0 为中性点电压; U_f 为故障点电压; I_{ZA} 、 I_{ZB} 、 I_{ZC} 分别为A、B、C相桥臂输出电流; I_{A0} 、 I_{B0} 、 I_{C0} 分别为A、B、C相对地泄漏电流; I_f 为接地故障电流; R_0 、 C_0 分别为单相对地泄漏电阻和电容; R_f 为故障过渡电阻; L 为滤波电感; K_1 、 K_2 、 K_3 分别为A、B、C相桥臂并网开关; K_4 、 K_5 、 K_6 分别为A、B、C相桥臂接地开关; H_1 、 H_2 、 H_N 为H桥模块。当配电网发生单相接地故障时,故障相桥臂接地开关闭合、并网开关断开,非故障相桥臂接地开关保持断开、并网开关闭合,故障补偿电流注入流向如图1中红色虚线所示。此时母线电压由故障相桥臂和非故障相桥臂共同承担,各桥臂耐压仅需按照其所

承受的配电网相电压进行设计。

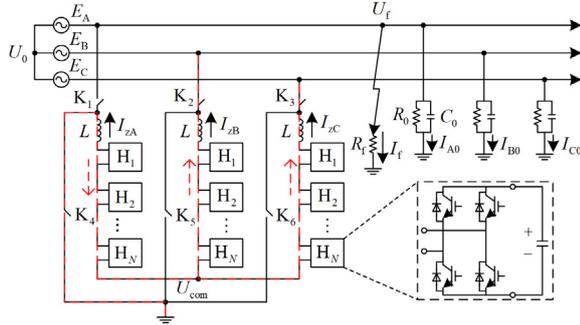


图 1 故障相桥臂转移接地消弧装置的结构简图

Fig. 1 Structure diagram of fault phase bridge arm transfer grounding arc suppression device

1.2 故障相桥臂转移接地消弧原理

假设配电网 A 相发生单相接地故障, 装置输出故障补偿电流前, 根据图 1 及基尔霍夫电流定律可得

$$I_f + I_{A0} + I_{B0} + I_{C0} = 0 \quad (1)$$

装置对接地故障电流进行补偿, A 相桥臂接地开关闭合、并网开关断开, B 相和 C 相桥臂接地开关保持断开、并网开关闭合。装置输出故障补偿电流后, 根据图 1 及基尔霍夫电流定律可得

$$I_{z_fc} = I_f + I_{A0} + I_{B0} + I_{C0} \quad (2)$$

式中, I_{z_fc} 为装置输出的故障补偿电流值, 当 A 相发生单相接地故障时, $I_{z_fc} = I_{zB} + I_{zC} = -I_{zA}$ 。

当装置输出的故障补偿电流等于配电网线路对地电流之和, 即

$$I_{z_fc} = I_{A0} + I_{B0} + I_{C0} \quad (3)$$

此时, 接地故障电流 I_f 被抑制为 0。当故障电流被抑制为 0 时, 中性点电压偏移至故障相电源电压负值, 即 $U_0 = -E_A$ 。此时, 故障相母线电压为 0。

假设配电网三相参数对称, 将 $U_0 = -E_A$ 代入式 (3), 可得装置输出的故障补偿电流给定值 $I_{z_fc}^*$ 为

$$I_{z_fc}^* = -3E_A(1/R_0 + j\omega C_0) \quad (4)$$

式中, ω 为角速度。

由于 $E_A + E_B + E_C = 0$, 故各相桥臂输出的故障补偿电流值可按式(5)给定。

$$\begin{cases} I_{zA_fc}^* = 3E_A(1/R_0 + j\omega C_0) \\ I_{zB_fc}^* = 3E_B(1/R_0 + j\omega C_0) \\ I_{zC_fc}^* = 3E_C(1/R_0 + j\omega C_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $I_{zA_fc}^*$ 、 $I_{zB_fc}^*$ 、 $I_{zC_fc}^*$ 分别为 A、B、C 相桥臂

输出的故障补偿电流给定值。

同理, 当 B 相或 C 相发生单相接地故障时, 故障相桥臂接地开关闭合、并网开关保持断开, 非故障相桥臂接地开关保持断开、并网开关闭合。各桥臂输出的故障补偿电流值仍可按式(5)给定。

2 计及直流侧电压稳定的控制方法

本文所提装置的 H 桥模块直流侧没有独立的供电电源为其提供能量, 为维持工作时直流侧电压的稳定, 需要控制变流器从配电网获得能量。本节将其直流侧电压稳定控制方法分为直流侧总电压补偿和分布式电压平衡换流调制方法两部分。

2.1 直流侧总电压补偿

直流侧总电压补偿用于控制级联 H 桥直流侧总电压稳定。为维持级联 H 桥直流侧总电压稳定, 需要从配电网吸收或释放能量。能量大小和流动方向与桥臂两端电压、输出电流及它们之间的相位差有关。因此级联 H 桥直流侧总电压平衡控制可通过调整桥臂输出电压或输出电流实现。

本文采用电流消弧方法对单相接地故障电流进行抑制, 故可通过调整桥臂输出电流进行直流侧总电压的补偿。各桥臂级联 H 桥直流侧总电压补偿信号的生成方法如图 2 所示。图中: N 为 H 桥级联数; U_{dc} 为直流侧电压给定值; NU_{dc} 为级联 H 桥直流侧总电压给定值; ΣU_{dc_A} 、 ΣU_{dc_B} 、 ΣU_{dc_C} 分别为 A、B、C 相级联 H 桥直流侧总电压实时值; i_{zA_dc} 、 i_{zB_dc} 、 i_{zC_dc} 分别为 A、B、C 相级联 H 桥直流侧总电压补偿量。

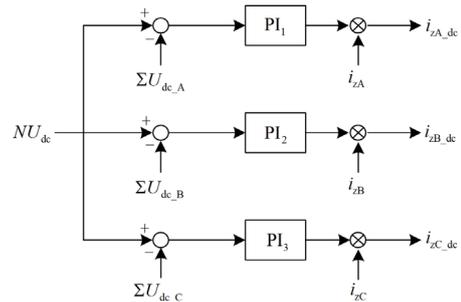


图 2 级联 H 桥的直流侧总电压补偿信号生成方法

Fig. 2 DC-link total voltage compensation signal generation method of cascaded H-bridge

为了不影响装置的补偿效果, 用于级联 H 桥直流侧总电压补偿的电流分量只能在各相桥臂间流通。装置各相的输出电流必须趋近于式(5)所分配的各桥臂注入故障补偿电流给定值。由此, 考虑直流侧总电压补偿后, 各相桥臂输出电流给定值如式(6)所示。

$$\begin{cases} i_{zA}^* = i_{zA_fc}^* - i_{zA_dc} + i_{zA_dc} \\ i_{zB}^* = i_{zB_fc}^* - i_{zC_dc} + i_{zB_dc} \\ i_{zC}^* = i_{zC_fc}^* - i_{zB_dc} + i_{zC_dc} \end{cases} \quad (6)$$

式中, i_{zA}^* 、 i_{zB}^* 、 i_{zC}^* 分别为 A、B、C 相桥臂的输出电流给定值。

2.2 分布式电压平衡换流调制方法

由于各 H 桥模块的损耗和输出状态不尽相同, 同一桥臂内的 H 桥模块直流侧电压值会出现不平衡的情况。通过分布式电压平衡换流调制方法使 H 桥模块直流侧电压稳定在给定值附近。

H 桥的拓扑结构如图 3 所示。图中, i_{dc} 为直流侧输出电流; i_z 为 H 桥输出电流; u_{dc} 为 H 桥直流侧电容电压; C_{dc} 为直流侧电容值。令 S 为 H 桥的输出状态, 当 $S = +1$ 时, H 桥输出正电平; 当 $S = 0$ 时, H 桥输出零电平; 当 $S = -1$ 时, H 桥输出负电平。

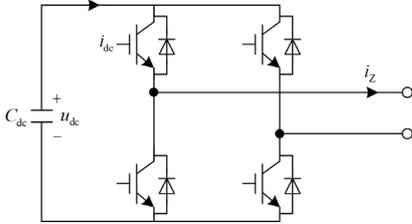


图 3 H 桥拓扑结构

Fig. 3 H-bridge topology

由图 3 可得, 直流侧电容电压与输出电流的关系为

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = -i_{dc} = -Si_z \quad (7)$$

由式(7)可知, 直流侧电容电压的增减与 H 桥输出状态和输出电流方向相关, 如表 1 所示, 其中: $i_z > 0$ 表示电流为正方向; $i_z < 0$ 表示电流为负方向。

表 1 电容充放电特性

Table 1 Capacitor charging and discharging characteristics

S	i_z	电容充/放电状态
+1	> 0	放电, 电压减小
	< 0	充电, 电压增大
-1	> 0	充电, 电压增大
	< 0	放电, 电压减小
$S = 0$ 或 $i_z = 0$		维持, 电压不变

故障相桥臂转移接地消弧装置控制各桥臂的输出电流对单相接地故障电流进行抑制, 故 H 桥输出电流流向不可控, 可通过控制 H 桥的输出状态控制直流侧电容电压。当直流侧电压过高时, 控制电容处于放电状态, 反之, 控制电容处于充电状态。

分布式换流调制方法常用于整流器^[28], 考虑直

流侧控制, 所提消弧装置的 H 桥模块处于整流、逆变的叠加状态。为此, 提出分布式电压平衡换流调制方法。分布式换流调制方法在每个采样周期仅允许相邻电压电平之间且仅在一个 H 桥模块上进行换向, 即禁止 H 桥模块的输出状态直接由正电平跳变到负电平, 或由负电平跳变到正电平, 且每个采样周期仅允许一个 H 桥模块进行换向。在此基础上, 分布式电压平衡换流调制方法还需要考虑 H 桥的输出状态、电流方向等因素对直流侧电容电压值的影响, 其流程图如图 4 所示。图中: N_{cyc} 为循环次数, 当 N_{cyc} 大于 N 时, 说明不满足换向条件, 此时进入下一采样周期; k 为 H 桥模块编号, 范围为 1~ N ; S_{old} 为当前 H 桥模块输出状态; u_b 为除当前 H 桥模块外, 其他 H 桥输出电平之和; $u_{dc}(i)$ 为第 i 个 H 桥模块的直流侧电容电压值; u_{ref} 为调制电压参考值; du 为 u_{ref} 与 u_b 之间的电压偏差量。

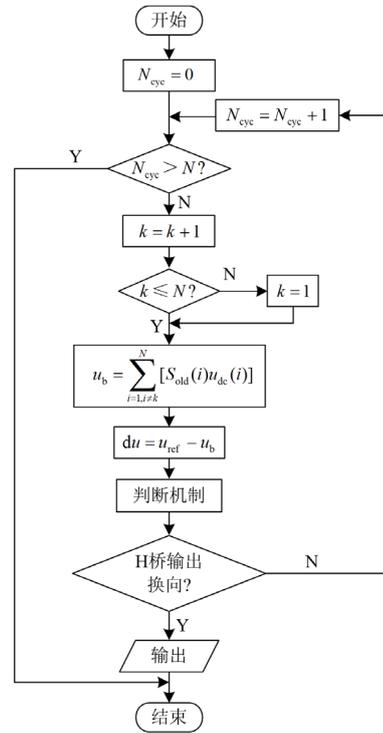


图 4 分布式电压平衡换流调制方法流程图

Fig. 4 Flow chart of distributed voltage balance commutation modulation method

每个采样时刻, H 桥模块输出状态换向的判断过程如下: 首先, 获取当前判断 H 桥模块的 du 、 S_{old} 、 u_{dc} 和电流方向; 然后根据 H 桥输出换向判断机制, 获得 H 桥的换向输出状态 S_{new} 和延迟动作时间 t_d , 若当前 H 桥无需换向, 获取下一编号 H 桥模块的 du 、 S_{old} 、 u_{dc} 和电流方向, 并对下一编号的 H 桥进

行判断; 最后, 延时 t_d 后, 将选定的 H 桥的输出状态进行切换。H 桥输出换向判断机制如表 2 所示, 其中: S_{old} 和 S_{new} 取值 1、0、-1 分别表示输出状态为正电平、零电平、负电平; t_d 的数值根据伏秒乘积等效原则计算得出; T_s 为采样周期。

考虑直流侧电压控制, 不同 du 情况下, H 桥模块的输出状态切换机制阐述如下。

当 $du = 0$ 时, 说明除去当前 H 桥模块, 其余 H 桥模块输出电平之和已满足调制电压参考值, 故当前 H 桥模块应输出零电平。

表 2 H 桥输出换向判断机制

Table 2 H-bridge output commutation judgement mechanism					
du	S_{old}	i_z	u_{dc}	S_{new}	t_d
$du \geq u_{dc}$	1	≥ 0	< 下限值	0	0
			\geq 下限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
		< 0	< 上限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
	0		\geq 上限值	0	0
		≥ 0	\leq 下限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
		< 0	> 下限值	1	0
-1		< 上限值	1	0	
		\geq 上限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$	
		—	0	0	
$0 < du < u_{dc}$	1	≥ 0	< 下限值	0	0
			\geq 下限值	0	$T_s \cdot du / u_{dc}$
		< 0	< 上限值	0	$T_s \cdot du / u_{dc}$
	0		\geq 上限值	0	0
		≥ 0	< 下限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
		< 0	> 下限值	1	$T_s \cdot (1 - du / u_{dc})$
-1		< 上限值	1	$T_s \cdot (1 - du / u_{dc})$	
		\geq 上限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$	
		—	0	0	
$-u_{dc} < du < 0$	0	≥ 0	< 上限值	-1	$T_s \cdot (1 + du / u_{dc})$
			\geq 上限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
		< 0	< 下限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
	-1		\geq 下限值	-1	$T_s \cdot (1 + du / u_{dc})$
		≥ 0	< 上限值	0	$-T_s \cdot du / u_{dc}$
		< 0	\geq 上限值	0	0
1		\geq 上限值	0	0	
		< 下限值	0	0	
		\geq 下限值	0	$-T_s \cdot du / u_{dc}$	
$du \leq -u_{dc}$	0	≥ 0	< 上限值	-1	0
			\geq 上限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
		< 0	< 下限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
	-1		\geq 下限值	-1	0
		≥ 0	< 上限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$
		< 0	\geq 上限值	0	0
	< 下限值	0	0		
	\geq 下限值	—	$N_{cyc} = N_{cyc} + 1$		

当 $du > 0$ 时, 说明其余 H 桥模块输出电压之和小于调制电压参考值, 即正向电压不足, 因此当前 H 桥模块应尽可能地输出正电平。

1) 假设 H 桥模块当前输出状态 $S_{old} = -1$ 。由于分布式电压平衡换流调制方法仅允许相邻电压电平之间进行切换, 为了尽可能地缩小 du , 应立即将 H 桥模块切换至旁路状态, 其切换机制如图 5(a)所示。

2) 假设 H 桥模块当前输出状态 $S_{old} = 0$, H 桥模块仅需要一次切换即可产生所需要的正电平。根据表 2 的机制判断当前 H 桥模块是否满足换向条件, 若满足, 则延时 t_d 后换向, 如图 5(b)所示。

3) 假设 H 桥模块当前输出状态 $S_{old} = 1$, H 桥模块已输出正电平。根据表 2 的机制判断当前 H 桥模块是否满足换向条件, 若满足, 则延时 t_d 后换向, 如图 5(c)所示。

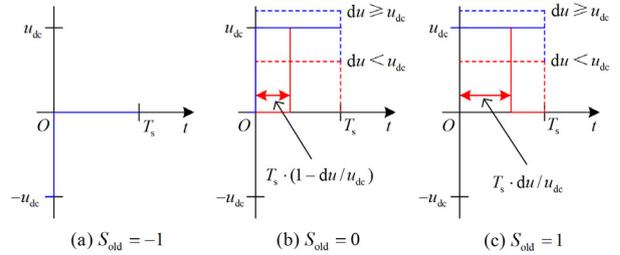


图 5 H 桥模块输出换向切换机制 ($du > 0$)

Fig. 5 H-bridge module output commutation switching mechanism ($du > 0$)

当 $du < 0$ 时, 说明其余 H 桥模块输出电压之和大于调制电压参考值, 即负向电压不足, 因此当前 H 桥模块应尽可能地输出负电平。

1) 假设 H 桥模块当前输出状态 $S_{old} = -1$, H 桥模块已输出负电平。根据表 2 的机制判断当前 H 桥模块是否满足换向条件, 若满足, 则延时 t_d 后换向, 如图 6(a)所示。

2) 假设 H 桥模块当前输出状态 $S_{old} = 0$, H 桥模块仅需要一次切换即可产生所需要的负电平。根

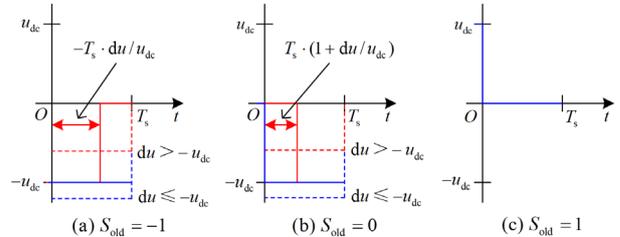


图 6 H 桥模块输出换向切换机制 ($du < 0$)

Fig. 6 H-bridge module output commutation switching mechanism ($du < 0$)

据表 2 的机制判断当前 H 桥模块是否满足换向条件, 若满足, 则延时 t_d 后换向, 如图 6(b)所示。

3) 假设 H 桥模块当前输出状态 $S_{old} = 1$, 为了尽可能地缩小 du , 应立即将 H 桥模块切换至旁路状态。其切换机制如图 6(c)所示。

2.3 控制系统数学模型

本文所述装置的级联 H 桥变流器控制框图如图 7 所示。图中: i_z^* 为桥臂的输出电流给定值; K_p 和 K_i 分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数; K_{pwm} 为变流器增益; R 为等效损耗电阻; i_z 为桥臂的实际输出电流值; u_i 为桥臂两端电压。为了抵消外部电压对输出电流的影响, 引入电压前馈环节, 增益为变流器增益的倒数, 由图 7 可得系统闭环传递函数 $G(s)$ 的表达式为

$$G(s) = \frac{I_z(s)}{I_z^*(s)} = \frac{K_{pwm}(K_p + K_i/s)}{(R + sL) + K_{pwm}(K_p + K_i/s)} \quad (8)$$

式中, $I_z(s)$ 和 $I_z^*(s)$ 分别为 i_z 和 i_z^* 经拉普拉斯变换后的量。

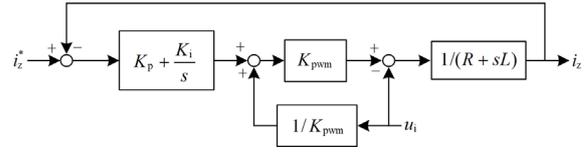


图 7 控制框图

Fig. 7 Control block diagram

一般情况下, 级联 H 桥逆变器经滤波电感接入电网, 以输出电流为控制目标, 连接点电压在闭环回路中是一个扰动量, 电压对输出电流的影响得不到有效控制。通过合适的传递函数把连接点电压提前到逆变器的调制输出电压位置, 进而降低连接点电压对输出电流的影响, 最终实现输出电流对给定电流的稳定、准确和快速跟随。

3 仿真分析

3.1 仿真建模

使用 Matlab/Simulink 软件建立 10 kV 配电网仿真模型, 如图 8 所示。

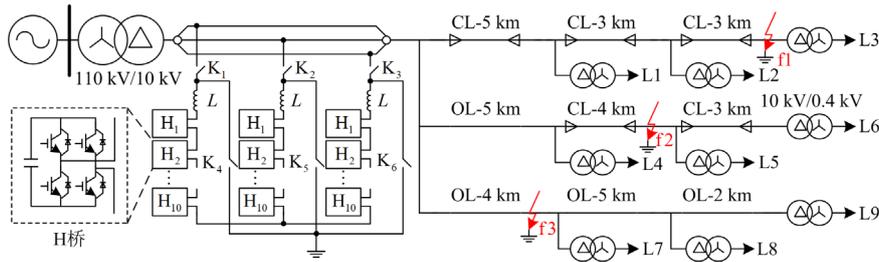


图 8 仿真模型

Fig. 8 Simulation model

仿真运算步长为 100 kHz, 采样周期为 10 kHz。H 桥级联数为 10; 滤波电感值为 0.05 H; H 桥直流侧电容值为 1000 μ F, 直流侧电压给定值为 1 kV。线路采用参数集中在 PI 段的平衡三相输电线路模型, 线路类型包括架空线路和电缆线路以及二者的混合线路, 共 3 条线路。架空线路及电缆线路的参数如表 3 所示。

表 3 线路参数

Table 3 Line parameters

线路类型	相序	电阻/(Ω /km)	电容/(μ F/km)	电感/(mH/km)
架空线路	正序	0.1700	0.0097	1.2100
	零序	0.2300	0.0080	5.4780
电缆线路	正序	0.2700	0.3390	0.2550
	零序	2.7000	0.2800	1.0190

可通过注入信号法求得配电网对地参数, 所搭建的仿真模型系统对地总电容约为 15.72 μ F, 对地泄漏总电阻约为 6945 Ω 。线路负载参数如表 4 所示。

表 4 负载参数

Table 4 Load parameters

负载	L1	L2	L3
功率/MVA	1.05 + j0.34	1.21 + j0.30	1.00 + j0.20
负载	L4	L5	L6
功率/MVA	1.04 + j0.30	1.10 + j0.22	1.08 + j0.20
负载	L7	L8	L9
功率/MVA	0.98 + j0.20	1.06 + j0.18	1.15 + j0.17

装置接到配电网线路上, 通过接地故障模块使线路发生接地故障, 在 f1、f2、f3 共 3 个故障点进行不同过渡电阻值接地故障的仿真验证。接地故障模块故障时间设置为 0.05 s 时刻, 0.1 s 时刻消弧装置投入, 注入电流迅速抑制接地故障电流。

3.2 接地故障电流补偿和 H 桥直流侧电压稳定效果

H 桥直流侧无独立供电装置, 仅有直流侧电容作为 H 桥直流侧电源支撑, 仿真中, 将 H 桥直流侧电容电压初始值设定为 1 kV, 按图 7 进行控制系统

的搭建, 调制方法选用分布式电压平衡换流调制方法, 上限值给定 1.1 kV, 下限值给定 0.9 kV。配电网线路 f1 处发生 A 相金属性接地故障、f2 处发生 A 相经 100 Ω 过渡电阻接地故障和 f3 处发生 A 相经 10 kΩ 过渡电阻接地故障时, 故障相桥臂转移接地消弧装置的消弧效果分别如图 9—图 11 所示。

由图 9 可知, 0.05 s 时刻配电网线路 f1 处发生 A 相金属性接地故障, 故障相母线电压骤降, 0.1 s 时刻消弧装置投入, 接地故障电流值迅速减小, 各相桥臂 H 桥直流侧电容电压均能稳定在 0.9~1.1 kV 范围内。

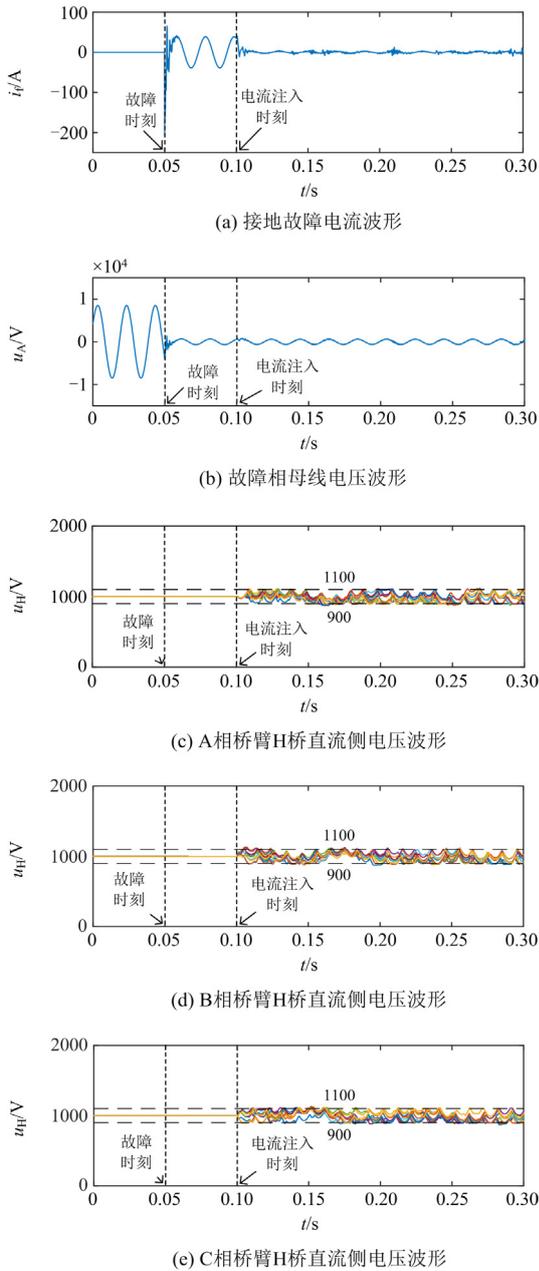


图 9 f1 处的消弧效果图(金属性接地故障)

Fig. 9 Arc suppression effect diagram at f1 (metallic earth fault)

由图 10 可知, 0.05 s 时刻配电网线路 f2 处发生 A 相经 100 Ω 过渡电阻接地故障, 故障相母线电压幅值减半, 0.1 s 时刻消弧装置投入, 接地故障电流值迅速减小, 故障相母线电压幅值随之降低, 各相桥臂 H 桥直流侧电容电压均能稳定在 0.9~1.1 kV 范围内。

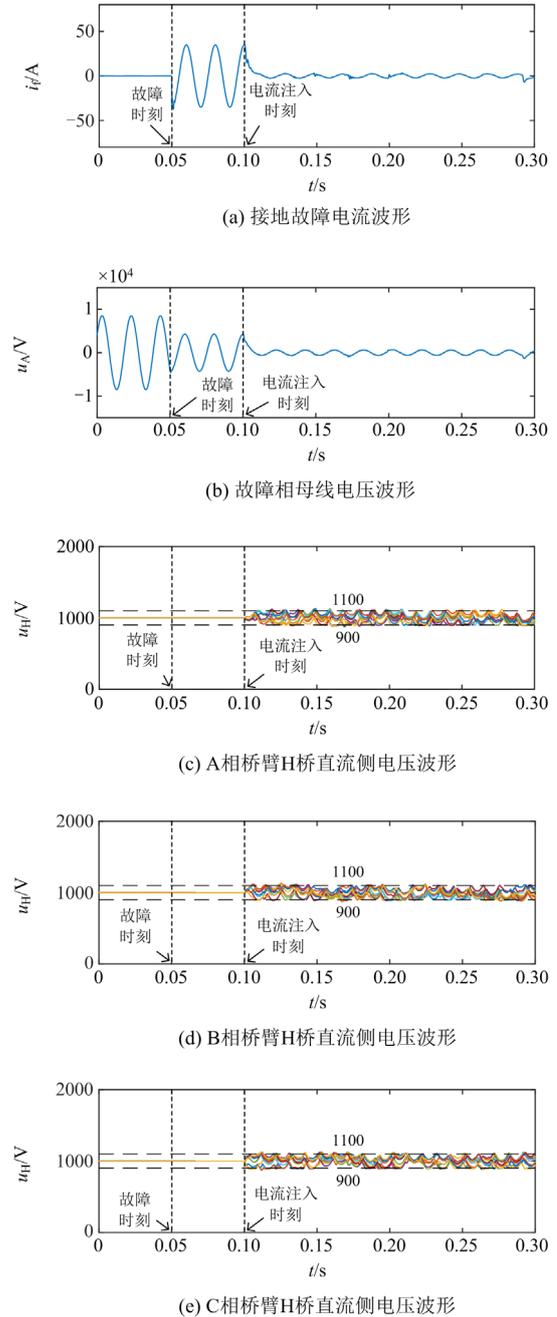
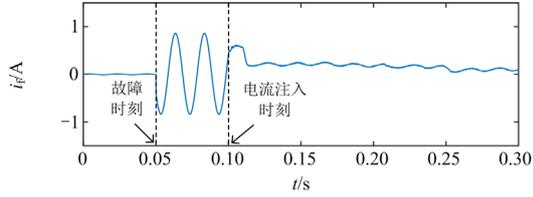


图 10 f2 处的消弧效果图($R_f = 100 \Omega$)

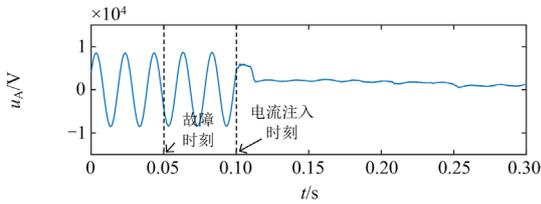
Fig. 10 Arc suppression effect diagram at f2 ($R_f = 100 \Omega$)

由图 11 可知, 0.05 s 时刻配电网线路 f3 处发生 A 相经 10 kΩ 过渡电阻接地故障, 高阻接地故障故

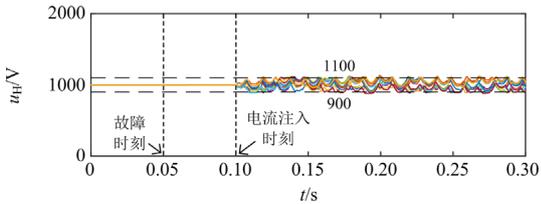
障电流值很小, 故障相母线电压幅值和正常运行时一样, 0.1 s 时刻消弧装置投入, 故障相母线电压幅值快速降低, 各相桥臂 H 桥直流侧电容电压均能稳定在 0.9~1.1 kV 范围内。



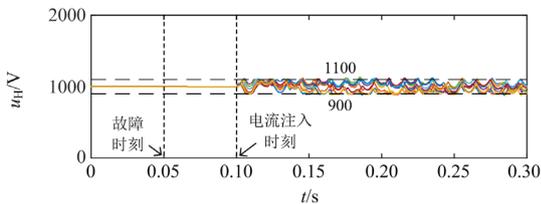
(a) 接地故障电流波形



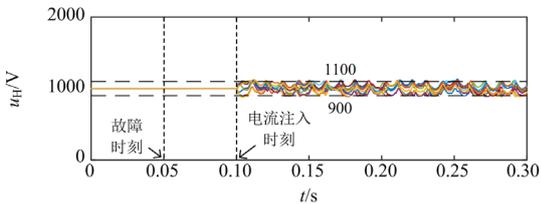
(b) 故障相母线电压波形



(c) A相桥臂H桥直流侧电压波形



(d) B相桥臂H桥直流侧电压波形



(e) C相桥臂H桥直流侧电压波形

图 11 f3 处的消弧效果图($R_f = 10 \text{ k}\Omega$)

Fig. 11 Arc suppression effect diagram at f3 ($R_f = 10 \text{ k}\Omega$)

不同故障点及过渡电阻的接地故障电流抑制效果如表 5 所示。

仿真验证了故障相桥臂转移接地消弧方法和分布式电压平衡换流调制方法的有效性。

表 5 接地故障电流抑制效果

Table 5 Ground fault current suppression effect

故障点	过渡电阻/ Ω	故障电流/A	故障残流/A
f1	金属性	27.76	2.141
	10	27.68	1.761
	100	24.47	1.120
	1000	5.545	0.2857
	5000	1.147	0.1897
	10 000	0.5809	0.1097
f2	金属性	28.12	2.061
	10	27.93	2.024
	100	24.72	1.686
	1000	5.624	0.3883
	5000	1.154	0.1233
	10 000	0.5854	0.1229
f3	金属性	29.80	1.949
	10	29.65	1.226
	100	25.68	0.8731
	1000	5.795	0.2405
	5000	1.199	0.1087
	10 000	0.6026	0.098 95

为进一步分析故障相桥臂转移消弧方法的优点, 对文献[19-21]及本文所提消弧方法进行比较, 对比结果如表 6 所示。

表 6 不同消弧方法对比

Table 6 Comparison of different arc suppression methods

对比项	文献[19]	文献[20]	文献[21]	本文
装置拓扑	单桥臂中性	三相三桥臂	三相四桥臂	三相三桥臂
接地变压器	需要	不需要	不需要	不需要
桥臂数	1	3	4	3
各桥臂电压设计等级	相电压	线电压	相电压	相电压
直流侧供电	需要	可不需要	可不需要	可不需要
拓展性	弱	强	强	强

配电网单相接地故障多为瞬时性故障, 消弧装置多数时间处于闲置状态, 考虑其拓展性, 应选择相线直挂式拓扑, 且直挂式拓扑无须由接地变压器接入配电网。文献[20]的装置拓扑虽然比文献[21]所提装置拓扑少一个桥臂, 但各桥臂均需按其所承受的配电网线电压进行设计。以单 H 桥电压是 1 kV 为例, 配电网线电压有效值为 10.5 kV, 考虑冗余, 则文献[20]的装置拓扑总模块数为 48, 而文献[21]的装置拓扑总模块数为 40, 所需模块数有一定的降低。本文所提故障相桥臂转移接地消弧装置仅需三桥臂, 且各相桥臂可按其所承受的配电网相电压进行设计, 则其装置拓扑总模块数为 30, 大大减少了

H 桥模块的数量, 综合成本低。且所提装置在配电网正常运行时拓扑结构三相对称, 可拓展无功功率补偿、谐波抑制等电能质量治理功能, 拓展性强, 综合经济性高。

除了上述对比外, 从直流侧控制方面进行比较, 配电网正常运行时, 中性点电压很低, 文献[19]的装置拓扑无法从中性点取源, 必须独立的直流侧供电。文献[20]提出一种直流侧电压平衡控制算法, 结合移相载波调制, 控制级联 H 桥直流侧电压在消弧过程中保持稳定。文献[21]通过叠加直流侧电压补偿量, 调整桥臂的输出电流或电压, 进而控制桥臂的功率吸收和释放, 从而维持级联 H 桥直流侧总电压稳定, 但文中只讨论了级联 H 桥直流侧总电压的稳定控制, 并未对各 H 桥模块直流侧电压稳定控制进行探讨。文献[27]通过非故障相桥臂的功能切换协调配合, 交替进行故障电流补偿和直流侧稳压控制, 进而维持直流侧电压的稳定。H 桥模块的直流侧电容充放电状态与模块交流侧输出电流方向及输出状态密切相关, 本文通过调制方法有选择地给定各 H 桥模块的通断信号, 实现直流侧电容电压的控制, 进而达到级联 H 桥直流侧电压平衡的目的, 装置在消弧过程中保持 H 桥模块直流侧电压稳定。本文所提调制方法在每个采样周期仅允许相邻电压电平之间且仅在一个 H 桥模块上进行换向, 在采样周期一定的情况下, 装置等效开关频率较低、开关管切换时的应力较小。

4 实验验证

4.1 实验平台

为验证所提故障相桥臂转移接地消弧方法的可行性和有效性, 依托课题组已有的配电网物理仿真系统对故障相桥臂转移接地消弧装置进行实验验证。

配电网物理仿真系统主要包括配电网物理线路仿真系统和故障发生模拟器。其中, 配电网物理线路仿真系统基于相似性原理进行搭建, 将 10 kV 配电网实际参数等效到 380 V 电网, 利用 380 V 实物系统模拟 10 kV 配电网系统, 该平台使相应设备体积更小, 易于在现有实验室的基础上进行配电网单相接地故障的实验验证。故障发生模拟器利用可控继电器控制系统经电阻接地。配电网物理仿真系统共有 6 条线路, 线路采用集中 π 型等效模型, 线路总对地电容约为 19.36 μF 。

故障相桥臂转移接地消弧装置主要包含三相

级联 H 桥变流器、接地和并网接触器、滤波电感及其他电量采集模块。三相级联 H 桥变流器的主要组成单元为 H 桥模块, 各相级联 H 桥变流器由 6 个 H 桥模块串联构成。接地和并网接触器采用 ABB 公司 A 系列可控接触器, 通过上位机给定信号控制其闭合与断开。连接电感采用额定容量 3.14 kVA, 额定电流 10 A, 额定电感 100 mH 的多抽头电抗器。H 桥模块由 H 桥单元、直流侧电容、整流供电部分组成。H 桥单元的功率开关器件使用英飞凌(Infineon)公司 1200 V/150 A 的型号为 BSM150GB120DLC 的 IGBT 半桥模块, 吸收电容参数为 1200 V/2 nF。直流侧电容的容值为 4700 μF , 耐压为 450 V, 其电容值较大, 电容电压波动小, 可近似看作直流电压源。整流供电部分由调压变压器、隔离变压器和三相不可控整流桥组成, 380 V 交流母线经整流供电部分对直流侧电容进行充电。在配电网物理仿真系统上测试故障相桥臂转移接地消弧方法的接地故障电流抑制效果, 滤波电感值为 40 mH, H 桥模块直流侧电压为 60 V, 采样频率为 5 kHz。配电网物理仿真系统和故障相桥臂转移接地消弧装置如图 12 所示。

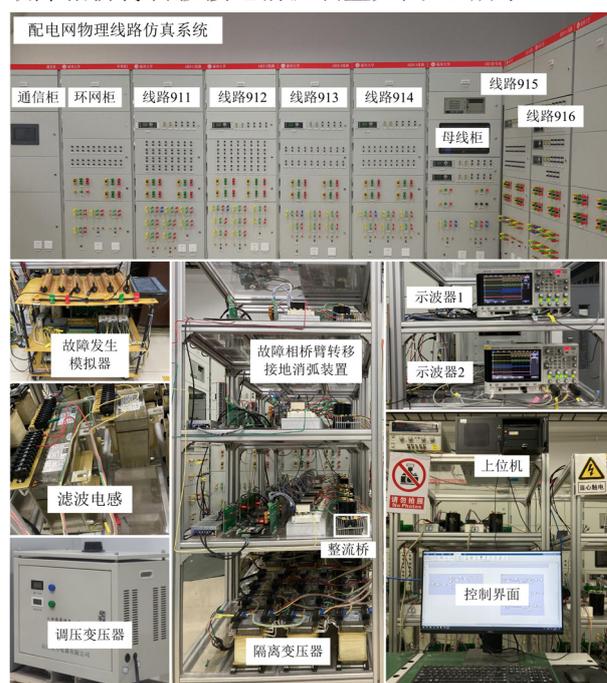
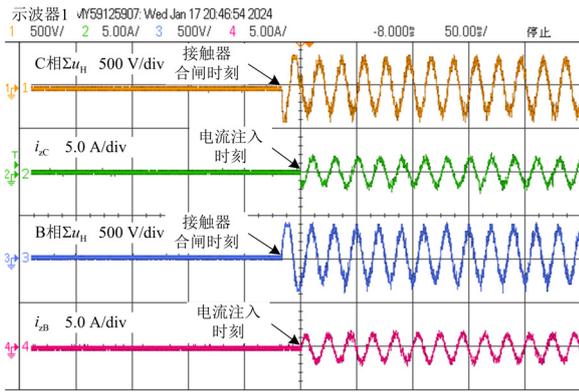


图 12 实验平台

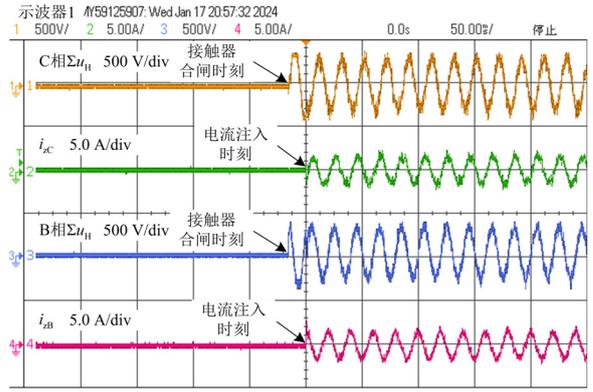
Fig. 12 Experimental platforms

4.2 故障相桥臂转移接地消弧方法

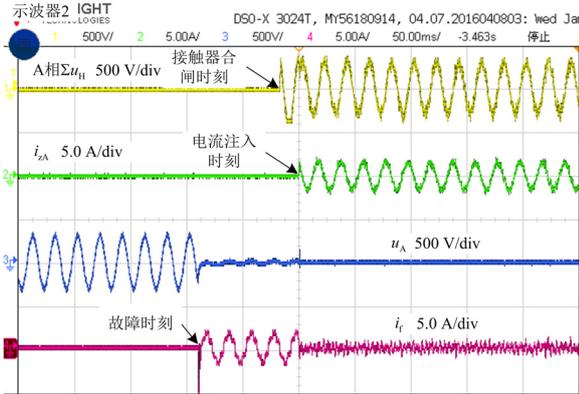
在配电网物理仿真系统上测试故障相桥臂转移接地消弧方法的接地故障电流抑制效果, 911 线路经故障发生模拟器接地。故障相桥臂转移接地消弧装置的消弧效果如图 13 所示。



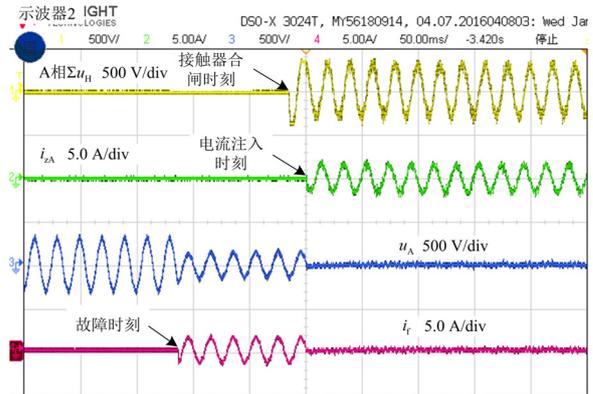
(a) 接地故障过渡电阻为10 Ω



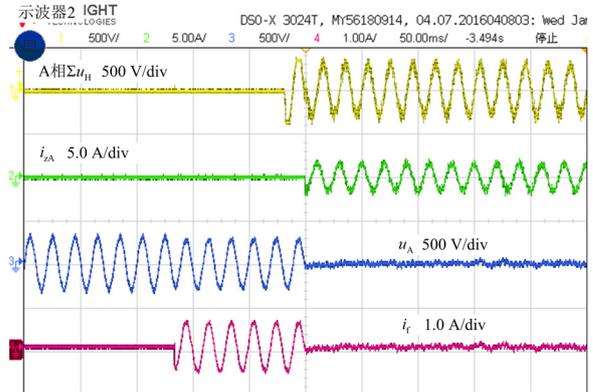
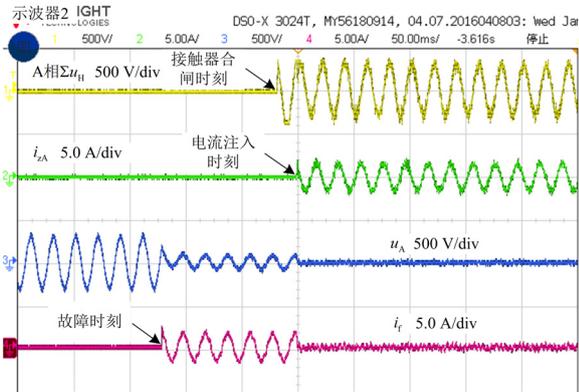
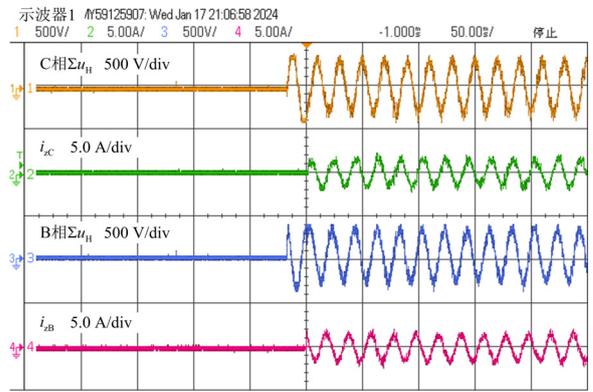
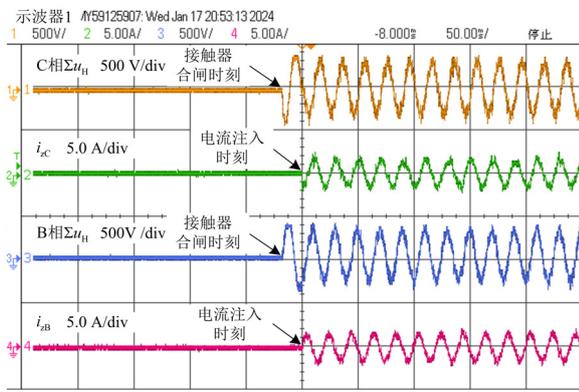
(c) 接地故障过渡电阻为100 Ω



(b) 接地故障过渡电阻为50 Ω



(d) 接地故障过渡电阻为500 Ω



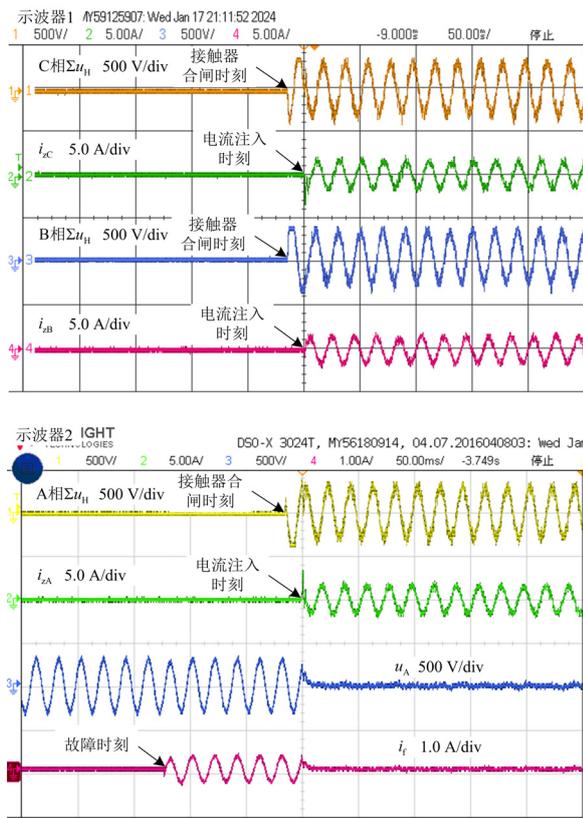
(c) 接地故障过渡电阻为 $1\text{ k}\Omega$

图 13 故障相桥臂转移接地消弧装置的消弧效果图

Fig. 13 Arc suppression effect diagram of fault phase bridge arm transfer grounding arc suppression device

图 13(a)—图 13(e)分别表示在接地故障过渡电阻为 $10\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 和 $1\text{ k}\Omega$ 的情况下, 各桥臂级联 H 桥变流器输出电压、输出电流、故障相母线电压和接地故障电流波形。其中, 示波器 1 的通道 1、2 和 3、4 分别表示 C 相和 B 相桥臂级联 H 桥变流器输出电压和输出电流波形; 示波器 2 的通道 1、2 表示 A 相桥臂级联 H 桥变流器输出电压和输出电流波形, 通道 3 表示故障相母线电压, 通道 4 表示接地故障电流。

由图 13(a)可知, 系统发生 A 相经 $10\ \Omega$ 电阻接地故障时, 接地故障电流值上升至 1.195 A , 经过大约 4 个周波后, 并网和接地接触器动作, 因接触器存在触电抖动, 经 15 ms 后故障相桥臂转移接地消弧装置注入电流, 接地故障电流减小。低阻接地故障时, 故障相母线电压值较低, 抑制电流注入后仍处于低位。

由图 13(e)可知, 系统发生 A 相经 $1\text{ k}\Omega$ 电阻接地故障时, 接地故障电流值上升至 210.1 mA , 消弧装置注入抑制电流, 接地故障电流减小。高阻接地

故障时, 故障相母线电压幅值与正常运行时相比几乎不变, 消弧装置注入抑制电流后, 故障相母线电压值出现明显下降。不同过渡电阻接地的接地故障电流抑制效果如表 7 所示。

表 7 故障相桥臂转移接地消弧装置故障电流抑制效果

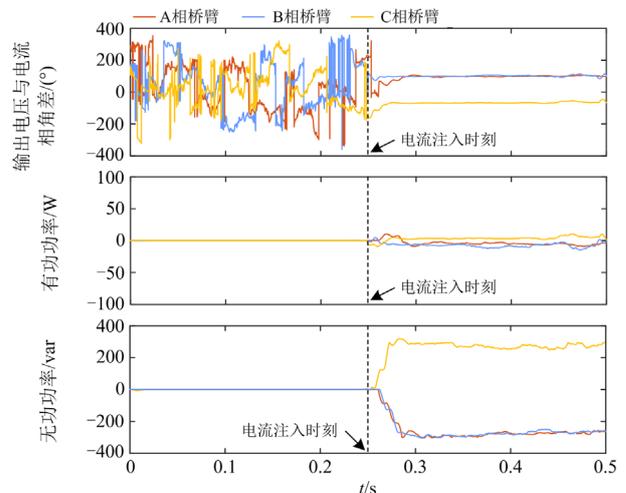
Table 7 Fault current suppression effect of fault phase bridge arm transfer grounding arc suppression device

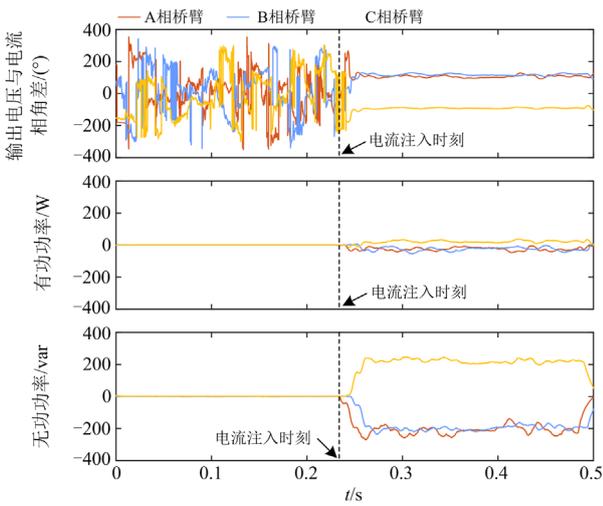
过渡电阻/ Ω	故障电流/A	故障残流/A
10	1.195	0.347
50	1.129	0.196
100	1.019	0.131
500	0.3977	0.0336
1000	0.2101	0.0208

实验结果表明, 不同过渡电阻情况下, 故障相桥臂转移接地消弧装置均能对单相接地故障电流进行有效抑制。

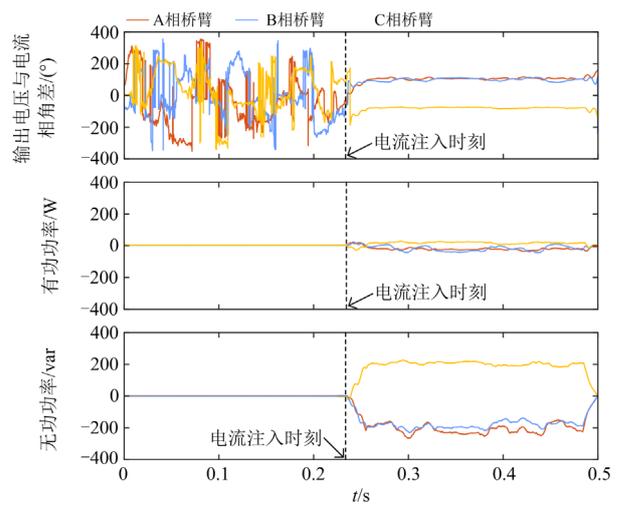
为了观察各相级联 H 桥变流器的输出功率, 将示波器中各相级联 H 桥变流器的输出电压和电流数据导出成 csv 文件, 通过 Matlab 软件提取相角差, 计算有功和无功功率。不同过渡电阻接地情况下, 各桥臂级联 H 桥变流器输出电压与电流的相角差、输出有功功率和无功功率如图 14 所示。

故障相桥臂转移接地消弧装置基于电流消弧方法的原理对单相接地故障电流进行抑制, 接地故障电流主要为容性电流, 消弧装置输出的电流主要为感性电流。由图 14 可知, 接地故障电流抑制过程中, 各桥臂级联 H 桥变流器输出电压与电流的相位基本垂直, 各桥臂输出的有功功率很小。而 H 桥直流的流侧电容电压的变化与有功功率输出的大小相关, 为保持 H 桥直流侧电容电压的稳定, 只需要控制 H 桥从交流侧取得少量功率即可。实验证明了 H 桥直流侧电压控制方法的可行性。

(a) 接地故障过渡电阻为 $10\ \Omega$



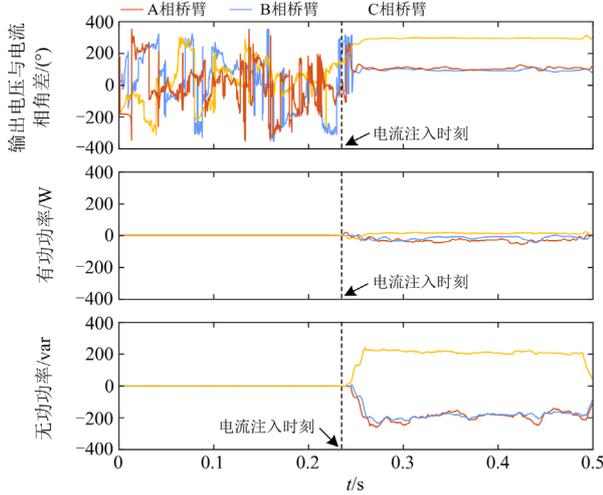
(b) 接地故障过渡电阻为50 Ω



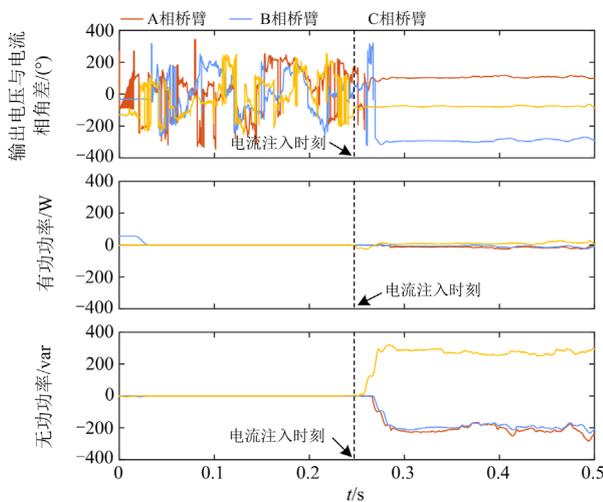
(e) 接地故障过渡电阻为1 kΩ

图 14 级联 H 桥变流器输出功率分析

Fig. 14 Output power analysis of cascaded H-bridge converter



(c) 接地故障过渡电阻为100 Ω



(d) 接地故障过渡电阻为500 Ω

5 结论

本文结合已有的柔性消弧装置拓扑，综合其特点提出新的拓扑结构，并对消弧装置 H 桥直流侧电压稳定控制方法进行研究，结论如下所述。

1) 针对传统三相直挂式柔性消弧装置各桥臂须按线电压等级设计的问题，提出故障相桥臂转移接地消弧装置的拓扑结构。该拓扑结构通过控制故障相桥臂转移成接地桥臂，非故障相线电压由故障相桥臂与非故障相桥臂共同承担，降低了单桥臂的电压设计等级。

2) 针对传统柔性消弧装置 H 桥直流侧须配备独立电源的难题，提出分布式电压平衡换流调制方法。所提调制方法根据 H 桥输出状态和输出电流方向对 H 桥直流侧电容充放电的影响，有选择地改变 H 桥的输出状态，从而使装置在抑制单相接地故障电流的工作过程中，仍能保持 H 桥直流侧电压稳定在一定范围内。

本文使用 Matlab/Simulink 仿真软件对所提消弧装置的拓扑结构和调制方法进行验证，仿真和实验结果证实了所提结构和方法的可行性和有效性。

参考文献

[1] LI Zhenxing, WAN Jialing, WANG Pengfei, et al. A novel fault section locating method based on distance matching degree in distribution network[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2021, 6(2): 253-263.

[2] 刘琼, 王文, 范必双, 等. 计及线路阻抗与负荷影响的不平衡配电网电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制,

- 2023, 51(7): 24-31.
- LIU Qiong, WANG Wen, FAN Bishuang, et al. Voltage-type arc suppression method for an unbalanced distribution network considering the influence of line impedance and load[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 24-31.
- [3] 陈洁羽, 左宝峰, 谈震, 等. 配电网单相接地快速处置装置运行情况研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 75-81.
- CHEN Jieyu, ZUO Baofeng, TAN Zhen, et al. Operation analysis of rapid disposal device for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Smart Power, 2022, 50(2): 75-81.
- [4] 汪洋, 任振宇, 朱旭东, 等. LCC-FHMMC 换流阀出口交流单相接地故障特性分析及保护方案设计[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 18-27.
- WANG Yang, REN Zhenyu, ZHU Xudong, et al. Characteristic analysis and protection scheme design of AC single phase grounding fault for LCC-FHMMC converter valve exit[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 18-27.
- [5] 薛永端, 亓志滨, 蔡卓远, 等. 基于零序导纳变化的跨线异名相两点相继接地故障检测[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 174-189.
- XUE Yongduan, QI Zhibin, CAI Zhuoyuan, et al. Cross-line different-phase two-point successive grounding fault detection based on change of zero-sequence admittance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 174-189.
- [6] 梁洪湘, 曾祥君, 喻锴, 等. 基于有源逆变分相注入的电压消弧与位移电压抑制方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 51-60.
- LIANG Hongxiang, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Voltage arc suppression and displacement voltage suppression method based on active inverter separate phase injection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 51-60.
- [7] 刘健, 张薛鸿, 张小庆, 等. 预防电缆沟起火的小电流接地系统单相接地故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 21-29.
- LIU Jian, ZHANG Xuehong, ZHANG Xiaoqing, et al. Treatment of a single-phase grounding fault in a small current grounding system to prevent fire in a cable trench[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 21-29.
- [8] 陈朝阳, 朱辉, 何轶聪, 等. 多馈线电缆线路弧光过电压传递特性与抑制措施[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 323-333.
- CHEN Chaoyang, ZHU Hui, HE Yicong, et al. Arc over-voltage transmission characteristics and suppression measures of multi-feeder cable[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 323-333.
- [9] 赵国军, 陈坤焱, 曾伟, 等. 计及等效负载变化的消弧逆变器性能分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 148-157.
- ZHAO Guojun, CHEN Kunyi, ZENG Wei, et al. Performance analysis and design of an arc suppression inverter considering equivalent load change[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 148-157.
- [10] 刘健, 张志华, 张小庆. 中性点非有效接地系统单相接地故障处理新技术[J]. 供用电, 2022, 39(5): 48-53.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. New technology of single-phase grounding fault processing in neutral non-effectively grounded systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 48-53.
- [11] 丁敬明, 邹贵彬, 周成瀚, 等. 考虑参数不对称的配电网单相接地故障柔性消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 58-67.
- DING Jingming, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A flexible arc suppression method for a single-phase grounding fault in a distribution network considering parameter asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 58-67.
- [12] 范松海, 陈坤焱, 肖先勇, 等. 配电网单相接地故障残余电流转移消弧方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 20-25.
- FAN Songhai, CHEN Kunyi, XIAO Xianyong, et al. Arc-suppression method based on transferring the residual current of single phase grounding fault in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 20-25.
- [13] 陈纛, 陈坤焱, 肖先勇, 等. 负荷对接地故障转移消弧技术的影响[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 24-30.
- CHEN Ying, CHEN Kunyi, XIAO Xianyong, et al. Effects of load on arc-suppression technology based on grounded-fault transfer device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 24-30.
- [14] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联 H 桥变频器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2677-2684.
- GUO Moufa, CHEN Jingjie, ZHANG Weijun, et al. A novel approach for fault arc extinguishing and feeder selection in distribution networks based on single-phase cascade H-bridge converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2677-2684.
- [15] 俞保记, 马柯翔, 司渭滨, 等. 配电网单相接地故障的柔性熄弧装置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 124-134.
- YUN Baoji, MA Kexiang, SI Weibin, et al. Flexible arc

- extinguishing device for a single-phase ground fault in a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19): 124-134.
- [16] 王鹏, 冯光, 王晗, 等. 基于 PWM 可控变换器的接地残流全补偿控制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(18): 110-118.
WANG Peng, FENG Guang, WANG Han, et al. A residual current compensation control method based on a PWM-controlled converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18): 110-118.
- [17] ZHENG Zeyin, GUO Moufa, YANG N, et al. Single-phase flexible arc suppression device based on BSC-SOGI-PLL method for distribution networks[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 121.
- [18] HOU Yuchao, GUO Qi, TU Chunming, et al. Adaptive active voltage-type arc suppression strategy considering the influence of line parameters in active distribution network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(5): 4799-4808.
- [19] ZHENG Zeyin, GUO Moufa, JIN Tao, et al. Hybrid flexible arc suppression device based on soft grid connection strategy for MV distribution systems[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2021, 15(17): 2499-2512.
- [20] 周兴达, 陆帅, 陈杨明, 等. 基于 SVG 两相电流注入的配电网单相接地故障消弧方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(10): 142-149.
ZHOU Xingda, LU Shuai, CHEN Yangming, et al. Single-network based on SVG two-phase current injection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(10): 142-149.
- [21] 游建章, 郭谋发. 集成无功补偿和故障抑制功能的一体化变流器及其控制策略[J]. *电网技术*, 2022, 46(6): 2241-2248.
YOU Jianzhang, GUO Moufa. Integrated converter with reactive power compensation and fault suppression and its control strategy[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(6): 2241-2248.
- [22] 季振东, 赵剑锋, 孙毅超, 等. 零序和负序电压注入的级联型并网逆变器直流侧电压平衡控制[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 9-17, 188.
JI Zhendong, ZHAO Jianfeng, SUN Yichao, et al. DC voltage balancing control for cascaded grid-connected inverters by injecting zero-sequence and negative-sequence voltages[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(21): 9-17, 188.
- [23] 陆道荣, 魏缪宇, 于宇, 等. 一种基于方波注入的星形级联静止同步补偿器的负序电流补偿策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(6): 1482-1494.
LU Daorong, WEI Miaoyu, YU Yu, et al. Zero-sequence-voltage injection based on square-wave to balance cluster voltages for star-connected cascaded STATCOM[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(6): 1482-1494.
- [24] 刘威, 季振东, 孙毅超, 等. 基于双频功率回路的星形级联 H 桥 STATCOM 不平衡补偿研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(9): 3527-3538.
LIU Wei, JI Zhendong, SUN Yichao, et al. Research on unbalance current compensation of star-connected cascaded H-bridge STATCOM based on dual-frequency power loop[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(9): 3527-3538.
- [25] 朱瑛, 饶军, 郭旭滨. 风电场无功补偿工况下级联 H 桥 STATCOM 电压平衡控制[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(21): 97-105.
ZHU Ying, RAO Jun, GUO Xubin. Voltage balance control of cascaded H-bridge STATCOM for wind farm under reactive power compensation condition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(21): 97-105.
- [26] JIAN Yujie, GUO Moufa, ZHANG Binlong. Active arc-suppression principle based on two-phase T-type CHB topology without DC power supply in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2022, 69(6): 2842-2846.
- [27] 黄泽钧, 郭祺, 涂春鸣, 等. 基于轮换消弧的配电网单相接地故障柔性调控方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(24): 152-161.
HUANG Zejun, GUO Qi, TU Chunming, et al. Flexible regulation method of single-phase grounding fault in distribution network based on rotating arc suppression[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(24): 152-161.
- [28] TARISCIOTTI L, ZANCHETTA P, WATSON A, et al. Active DC voltage balancing PWM technique for high-power cascaded multilevel converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(11): 6157-6167.

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-05-29

作者简介:

郭谋发(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网单相接地故障信息处理、保护控制及柔性消弧等; E-mail: gmf@fzu.edu.cn

刘鑫斌(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网及其自动化; E-mail: xinbin.liu@foxmail.com

张彬隆(1998—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为配电网接地故障柔性抑制、新型电力系统保护与控制、电力电子控制及应用。E-mail: 731154222@qq.com

(编辑 周金梅)