

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180778

MMC型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略

萧展辉¹, 蔡微¹, 黄剑文¹, 黎灿兵²

(1. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510080; 2. 湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对基于直流母线以模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)构成的多端柔性直流配电系统, 参照实际直流工程, 建立了连接低压直流设备的三端模块化多电平换流器等效网络数学模型, 并基于下垂控制改进了协同控制策略。同时, 针对配电系统换流站没有换流变压器的情况, 设计了零序电流抑制环节。在PSCAD/EMTDC上搭建了多端柔直配电系统的仿真平台。验证了所设计协同控制策略可以使有功-无功功率的调节更加平稳, 减少系统在异常情况下直流电压的波动; 在发生交流侧单相接地瞬时故障时, 零序电流抑制环节可以抑制过电流, 保护设备, 降低了换流站配置时的冗余度。

关键词: 模块化多电平换流器; 柔性直流配电; 协同控制; 零序电流抑制

Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults

XIAO Zhanhui¹, CAI Wei¹, HUANG Jianwen¹, LI Canbing²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the multi-terminal flexible DC power distribution system which is based on DC bus with Modularized Multilevel Converter (MMC), this paper establishes the mathematical model of the 3-terminal MMC system connected with low voltage device and improves the coordinate control scheme based on the droop control method, referred to practical project. To avoid the usage of converter transformer, this paper designs zero sequence current restrain control loop. The case study is carried out on a simulation system built in PSCAD/EMTDC. The time domain simulation results prove the validity of the proposed control scheme. The active and reactive power can be reallocated stably by the proposed coordinate control scheme and the DC voltage suffers less fluctuation when system exception happens; the zero sequence current can be eliminated by the proposed zero sequence current restrain control loop, which is good for reducing over current and protecting the converter.

This work is supported by Sino-US international Science and Technology Cooperation Project (No. 2016YFE0105300).

Key words: modular multilevel converter (MMC); flexible DC power distribution system; coordinate control scheme; zero sequence current restrain

0 引言

目前的配电网大多采用交流辐射状供电, 电力设备的供电完全依赖主站, 可靠性较低。同时, 辐射状的分区供电, 容易造成各个地区之间负荷的不平衡。此外, 有功功率、无功功率之间的传送受主站容量影响, 无功容量不足, 可能导致电能质量低下、系统运行失稳。为此, 需要装设大量的无功补偿装置, 增加了配电网成本。而随着电压源型换

流器的出现, 供配电区域之间通过换流器实现异步互联成为了可能。相比起传统的电流源型换流器(例如基于晶闸管的电网换相型换流器), 电压源型换流器可以通过控制开关器件的开通和关断, 实现有功、无功的解耦控制。同时, 电压源型换流器不存在换相失败问题, 特别适用于构建多端直流输电系统。而随着模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)技术的不断改进, 成本逐渐降低, 其已有取代传统的两电平、三电平换流器的趋势。相比于传统的两电平和三电平换流器, MMC 开关频率较低、拓扑简单、调试便捷、谐波含量较低,

基金项目: 中美国际科技合作项目资助(2016YFE0105300)

且具备更强的耐压能力^[1-3]。目前,国内已经有广东南澳柔直、舟山五端柔直等工程投运,这些多端柔性直流输电工程为柔直在配电网的应用提供了指导^[4-6]。

采用 MMC 换流站构建柔性直流配电系统,相比于传统的交流配电网络,可以整合各个区域的供配电网络,平衡负载,使得区域间的有功、无功可以互相支援,提升了供电可靠性;同时,还可以借助直流变压器,为充电桩、储能模块等直流设备供电,也可以接入光伏等分布式能源,节省用电成本。目前,浙江、江苏已开始建造基于 MMC 的柔直配电系统,改善配电网质量^[7-9]。

相较于高电压等级的输变电换流站,直流配电系统的换流站的建设存在如下问题:1)靠近负荷区建设,地价成本较高;2)受端一般为重要负荷,对用电质量要求高,不允许系统整体停运。针对以上难点,部分工程建立了集中式的换流站,将各个配电系统经过换流站整流后连接至直流母线上,实现多个交流系统的互联。由于用地限制,换流站一般不配备换流变压器。

在此情况下,配电系统还存在以下问题:1)在其中一个换流站退出运行时,可能造成系统功率无法消纳或者负荷缺额,系统可能会失稳;2)由于换流站直接与交流系统相连,在交流系统发生瞬时单相接地的故障时,会将故障零序电流传递至换流站,导致换流器桥臂产生较大的瞬时过电流,不但会导致换流器不必要闭锁,严重时还会导致子模块损坏,因此设计时不得不采用能承受更大瞬时电流的开关器件,增加换流站建设成本。

本文参照浙江某地的柔性直流配电工程拓扑结构,针对其数学模型,设计了基于有功-电压下垂控制的协同控制策略。同时,针对其缺少换流变压器的情况,配置了零序电流抑制环节,用于抑制故障电流。最后基于 PSCAD/EMTDC 搭建仿真平台,搭建了柔性直流配电系统的仿真模型,验证了协同控制策略能在异常情况下调节功率、稳定系统的功能;故障下,所设计电流抑制策略可以避免产生较大过流,降低了对子模块最大通流能力的要求,节省了换流站建设成本。

1 多端柔性直流配电系统基本结构与数学模型

模块化多电平换流器结构如图 1 所示^[10]。

参照文献[11-12],将图 2 中的每个桥臂简化为电压源,得到简化电路如图 3。

对三相分别列写基尔霍夫电压方程如式(1)。

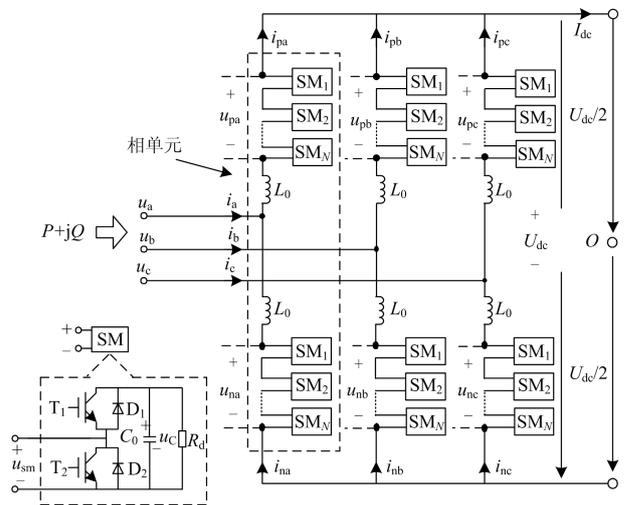


图 1 MMC 基本结构

Fig. 1 Basic structure of MMC

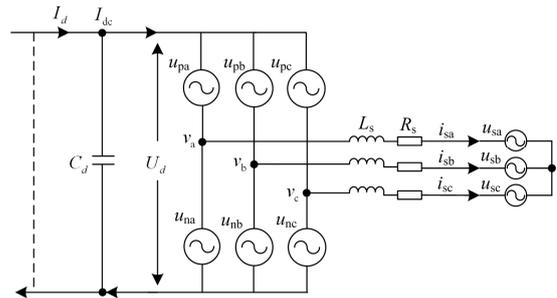


图 2 MMC 的简化拓扑

Fig. 2 Simplified topology of MMC

$$\begin{cases} L_s \cdot di_{sa}/dt + R_s \cdot i_{sa} = v_a - u_{sa} \\ L_s \cdot di_{sb}/dt + R_s \cdot i_{sb} = v_b - u_{sb} \\ L_s \cdot di_{sc}/dt + R_s \cdot i_{sc} = v_c - u_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)进行派克变换,再做拉普拉斯变换后,得到 MMC 频域数学模型如图 3 所示。

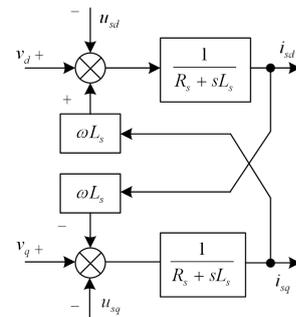


图 3 MMC 的频域数学模型

Fig. 3 MMC mathematical model in frequency domain

基于直流母线的柔性直流配电系统将所有的换流器接至直流母线,实现各个交流系统的背靠背互联。相比于构建直流网络,其具有占地面积小、构

造经济的特点。图 4 即为一典型的基于直流母线的多端柔性直流配电系统^[13]。

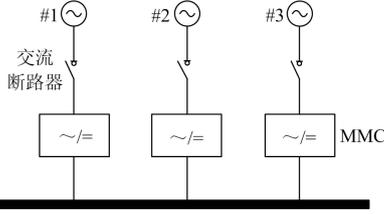


图 4 基于直流母线的多端柔直配电系统

Fig. 4 Multi-terminal MMC system based on DC bus

2 MMC 换流站基础控制策略

2.1 内环控制策略

目前, 对于电压源换流器的控制策略研究已经比较成熟, 一般都采用双闭环控制^[14]。其中内环一般定 d 、 q 轴电流控制, 如图 5 所示。

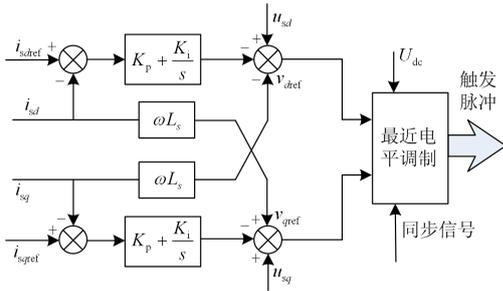


图 5 内环控制框图

Fig. 5 Inner loop current controller

2.2 外环控制策略

从系统外特性来看, 当 MMC 连接到有源系统时, MMC 总共有两个控制维度, 可以实现 4 种控制策略^[15]。图 6 给出了采用了电流矢量控制的 MMC 连接到有源系统时普遍采用的外环控制器框图。连接交流系统较强、短路比较高的换流站一般选择定直流电压-无功功率控制, 其他站一般定直流功率-无功功率控制。

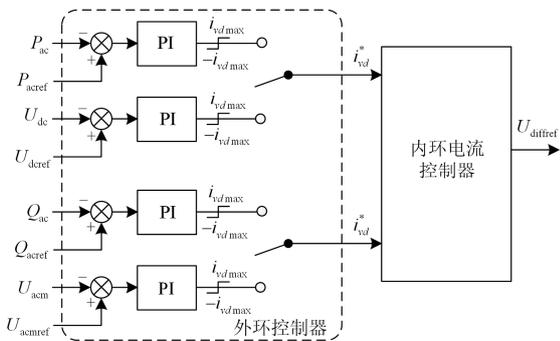


图 6 MMC 外环控制框图

Fig. 6 Schematic diagram of the outer loop MMC controller

3 多端系统协同控制策略

利用如图 7 所示带死区的 P - U 下垂曲线^[16]对有功功率-直流电压下垂控制进行修正, 以实现站间功率系统控制^[17-18]。

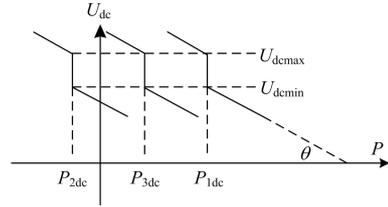
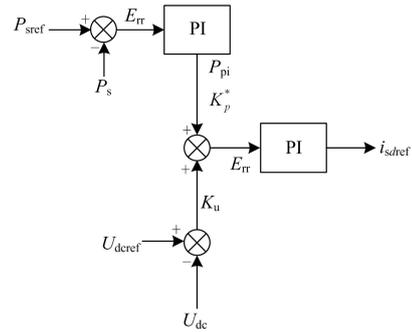


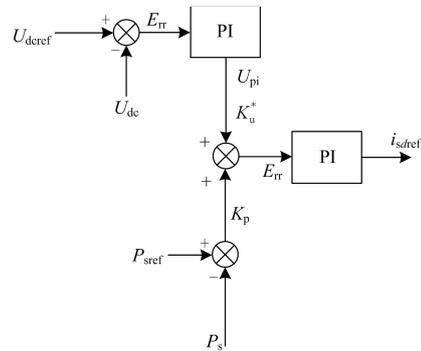
图 7 P-U 下垂曲线

Fig. 7 P-U droop curve

由于基于母线背靠背相连的直流系统, 换流站之间仅通过直流母线相连, 电气距离较近, 相较于其他多端直流系统, 在异常情况下, 更容易引起电压与功率的波动。因此, 本文在下垂控制的基础上, 附加了有功功率与直流电压控制环节, 用以保证系统稳定。对于 #1、#2 号站, 附加有功 PI 反馈控制环节, 优先保证有功功率稳定; 对于 #3 号站, 附加直流电压控制环节, 优先保证直流电压稳定^[19]。多端柔直配电系统中换流站的附加反馈控制环节如图 8 所示。



(a) 附加有功反馈控制环节



(b) 附加直流电压反馈控制环节

图 8 换流站的附加反馈控制环节

Fig. 8 Additional feedback controller in converter stations

4 零序电流抑制

不配备换流变压器的换流站在发生单相金属性接地故障时，交流系统的零序电流会直接传至换流站，引起换流站桥臂较大的过电流^[20]。根据目前 MMC 桥臂设计的冗余度，子模块设计承受瞬时最大电流值一般为额定容量 2 倍。超过子模块最大承受电流，可能会导致设备损坏。

为了避免桥臂过电流，本文在换流站的控制策略中配置了零序电流抑制环节，在单相接地故障发生时，利用该环节，将零序电流抑制在合理的范围内，避免桥臂电流过大损坏子模块^[21-24]。

将式(1)中三式相加，可得到时域下零序电流的数学模型为

$$L_s \frac{di_{s0}}{dt} = (v_0 - u_{s0}) - R_s i_{s0} \quad (2)$$

同理，在拉普拉斯变换之后可以得到其在频域下的模型为

$$(R_s + L_s s) \cdot i_{s0}(s) = v_0(s) - u_{s0}(s) \quad (3)$$

所采用的零序电流抑制环节如图 9 所示。

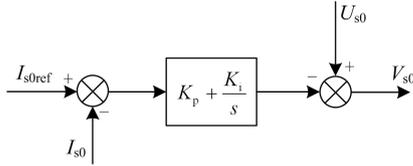


图 9 零序电流抑制环节

Fig. 9 Zero sequence current restrain control

在正常工况下运行时，零序电流为 0，零序电流环节不起作用；在非对称故障下，零序电流抑制环节可以起到抑制零序电流的效果。为了正常情况下负荷不平衡、系统扰动导致零序电流环节投入，设置零序电流抑制环节在系统零序电流大于 0.1 p.u.时投入。

5 仿真结果及分析

5.1 仿真系统的主回路参数

为了验证所提出方法的 MMC 多端柔直配电系统控制策略有效性，本文参考浙江某地多端柔直配电工程，基于 PSCAD/EMTDC 搭建了多端柔直配电系统的时域仿真模型。其详细工程拓扑如图 10 所示，两个 10 kV 及一个 20 kV 交流系统通过 MMC 换流站与直流母线相连。其中：#1、#2 两个 10 kV 交流系统经过电缆与换流站相连；#3 的 20 kV 交流系统直接与换流站相连。

在本工程中，10 kV 站的换流器每个桥臂为 20

电平，20 kV 站的换流器每个桥臂为 30 电平，其中 20 kV 换流站降压运行。三个换流站直流侧挂于同一根直流母线上。直流母线通过直流变压器连接 750 V 低压直流母线，挂载充电桩、光伏电站等低压电力设备，构成柔直配电系统。换流站并不配置换流变压器。相关系统参数如表 1 所示。

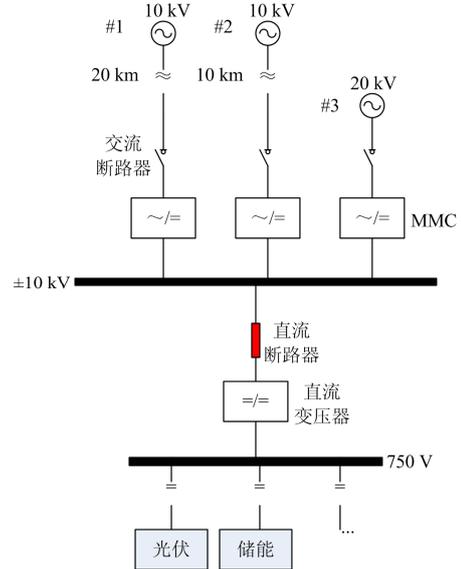


图 10 多端柔直配电系统基本拓扑结构

Fig. 10 Basic topology of multi-terminal DC distribution system

表 1 仿真系统主回路参数

Table 1 Main circuit parameters of simulated system

参数名称	取值
#1、#2 交流系统额定电压/kV	10
#1、#2 每个桥臂子模块数 N_{rated}	20
#1、#2 桥臂电抗 L_0 /mH	4
#1、#2 平波电抗 L_d /mH	10
#1 直流线路长度/km	20
#2 直流线路长度/km	10
#3 交流系统额定电压/kV	20
#3 每个桥臂子模块数 N_{rated}	30
#3 桥臂电抗 L_0 /mH	6
#3 平波电抗 L_d /mH	15
#3 直流线路长度/km	10
直流系统电压/kV	±10
子模块电容 C_0 /μF	200
子模块电容额定电压 U_{CN} /kV	1
直流变压器电平数	12
直流变压器线圈变比	110/100
直流低压侧电压/V	750
直流线路长度/km	10
低压侧等效 MMC 每个桥臂子模块数 N_{rated}	20
低压侧等效 MMC 桥臂电抗 L_0 /mH	0.4
低压侧等效 MMC 平波电抗 L_d /mH	1

直流变压器低压侧包括充电桩、光伏、风电等储能设备, 对于低压直流系统来说, 直流负载多通过电力电子整流设备与直流母线相连, 且具有如下特点: 1) 功率消耗不稳定, 可能从直流母线上吸收有功功率, 也可能向其输送有功功率; 2) 从母线吸收功率时, 由高压侧提供电压支撑, 稳定低压侧直流电压; 3) 向直流母线输送功率时, 光伏、风电等分布式能源可以为直流母线提供电压支撑, 稳定低压侧电压。综上, 其特性与电压源型换流器类似, 在考虑其影响时, 本文采用一个 20 电平的 MMC 换流站来代替直流负载, 换流站其余参数与其他换流站相同。

根据以上参数, 在 PSCAD/EMTDC 下搭建系统电磁暂态仿真模型, 验证本文所设计控制策略的有效性。

5.2 采用协同制策略的仿真结果

正常运行状态下, 直流系统的电压由#3 站控制, 大小为 ± 10 kV。#1 流入直流系统的有功功率为 2 MW, #2 流入的有功功率为 -5 MW, 直流低压负荷为 0.25 MW, #3 为平衡节点。

1) 为了验证在功率调整时, 系统可以很好地响应变化, 在 1 s 时, #2 站有功功率变为 -2 MW, #1 站有功功率变为 5 MW, 直流负荷不变, 观察直流电压、各换流站输送功率波形如图 11 所示。各站直流电压、有功功率均无较大波动, 功率调节在 0.3 s 之内完成。

2) 为了验证在小容量换流站退出运行时, 系统可以保持稳定, 设置#2 站在 1 s 时因故障退出运行, 交流侧开关跳开, 10 ms 后装置闭锁, 观察直流电压、各站功率如图 12 所示。直流电压并未有明显波动, 功率调节平稳, 在 0.1 s 内完成。

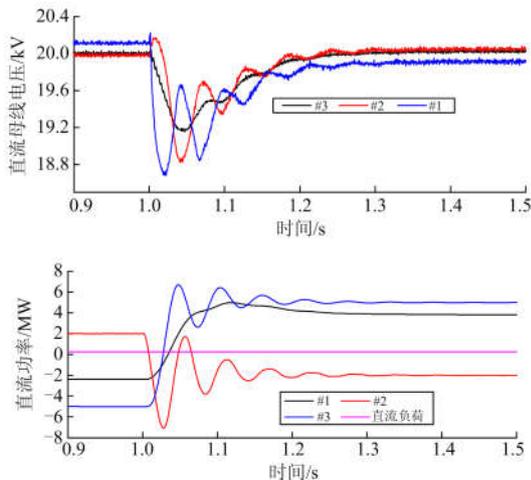


图 11 功率调整时系统的响应

Fig. 11 Response of the system during power adjusting

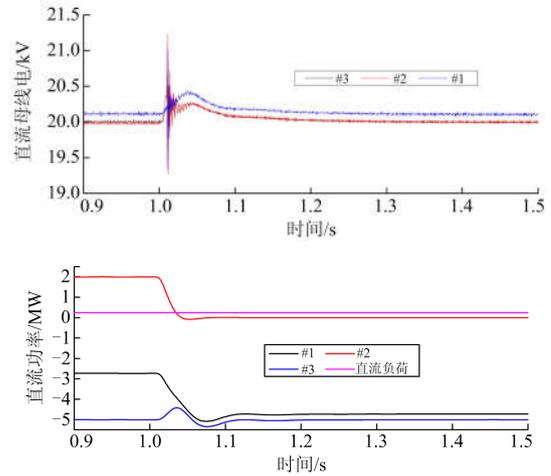
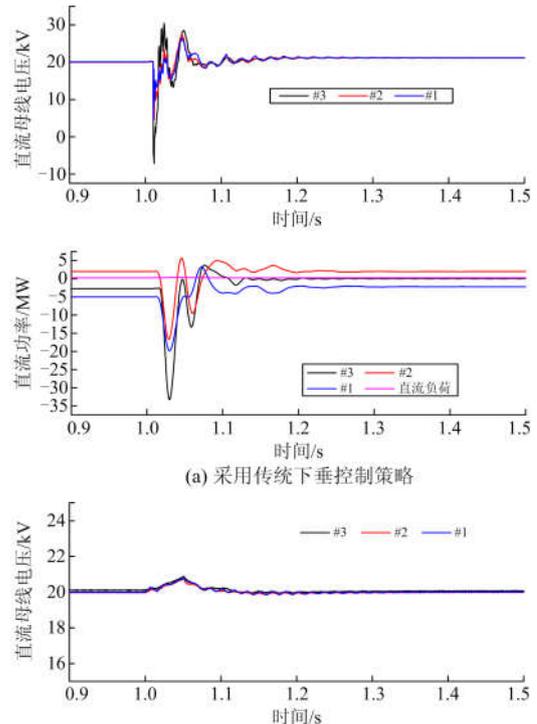


图 12 #2 站退出运行时系统的响应

Fig. 12 Response of the system when #2 station switches off

3) 为了验证在系统中大容量换流站退出运行时, 附加外环控制策略可以使系统保持稳定, 设置#3 站在 1 s 时因故障退出运行, 交流侧开关跳开, 10 ms 后装置闭锁, 观察直流电压、各站功率如图 13 所示。相较于从站(#2 站)退出运行时的情况, 若无附加外环控制环节(如图 13(a)), 此时会产生一定的功率振荡, 直流电压也有较大波动, 极有可能影响系统正常运行。作为对比, 在添加了附加外环控制环节后(如图 13(b)), 系统功率、电压均无较大波动, 在 0.2 s 内恢复了稳定, 可以保证主站退出后系统保持稳定。



(a) 采用传统下垂控制策略

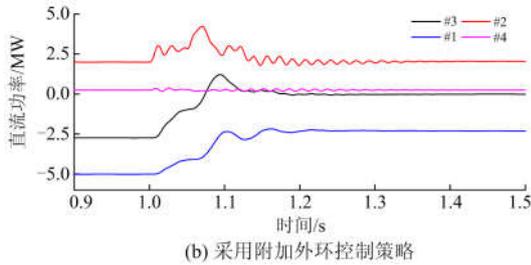


图 13 #3 站退出运行时系统的响应

Fig. 13 Response of the system when #3 station switches off

5.3 典型故障下的仿真结果分析

对于柔性直流输电系统来说，在直流故障发生时，由于高压直流断路器技术依旧不成熟，一般采用换流站闭锁来隔离故障，所有站全停，避免过流对设备造成的损害。对此策略的研究已经比较成熟，在此不再做讨论。

单相接地故障为换流站交流侧最常见的故障，在缺少换流变的情况下可能引起桥臂过电流。为了验证零序电流抑制环节在交流侧单项接地故障时的有效性，在 1 s 时#3 站 A 相发生瞬时单相接地故障，0.2 s 后故障恢复，观察#3 站交流侧电压电流如图 14 所示。由图 14(a)可见，在未采用零序电流时，

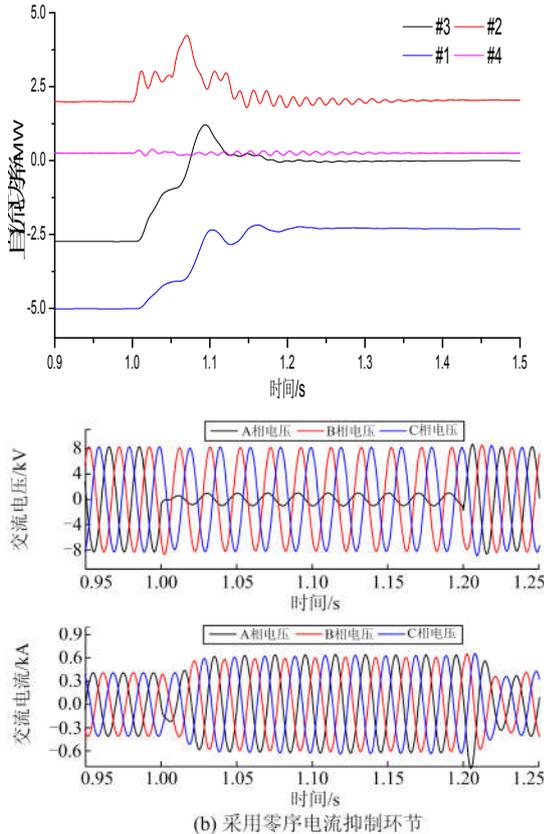


图 14 #3 换流站交流侧电压电流

Fig. 14 Voltage and current on the AC side of the #3 station

交流侧会产生较大的过电流，超过额定运行时的 2 倍，可能损坏电力电子设备。而零序电流抑制环节的加入(如图 14(b))，交流侧最大过电流被抑制在 2 倍的额定电流以下，不会出现文献[16]中所出现的较大的过流，对器件形成了很好的保护，可以使换流站摆脱对换流变的依赖。

5.4 仿真结果分析

在稳态下，系统可以正常运行，各站电压电流平稳；当功率调整时，系统可以快速响应，电压波动幅度较小；下垂控制站退出运行不会引起直流电压与功率较大的波动，调整可以迅速完成；定电压站退出运行时，虽然存在一定的功率波动与电压跌落，但是带死区的下垂控制环节可以参与调整直流电压，功率也能迅速完成调整。

在交流侧单相接地故障发生时，零序电流抑制环节可以很好地避免交流侧过流，起到保护器件的作用。

6 结论

本文参考了实际工程中应用的多端柔直配电系统络拓扑，分析了其数学模型，设计了协同控制策略，并且对没有换流变压器的情况设计了零序电流抑制环节。经过仿真分析，验证了本系统的如下特性：

- 1) 在稳态下运行良好时，功率的调整可以迅速完成，不会引起直流电流、电压的剧烈波动。
- 2) 附加外环控制环节可以在大容量的换流站故障退出运行时，辅助系统稳定功率与电压，避免较大的波动。
- 3) 零序电流抑制环节可以降低交流侧单相接地时的过电流，弥补了缺少换流变压器带来的缺陷，能够降低器件的选型成本。

参考文献

[1] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.
 XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.

[2] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
 JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015,

- 43(15): 145-153.
- [3] 涂小刚, 罗海云, 程晓绚, 等. 多端柔性直流输电工程控保系统接口设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 124-128.
TU Xiaogang, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Control and protection system interface design for multi-terminal HVDC flexible project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 124-128.
- [4] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 63-67.
YANG Liu, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. The integrated system design scheme of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 63-67.
- [5] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496.
LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.
- [6] 蒋晓娟, 姜芸, 尹毅, 等. 上海南汇风电场柔性直流输电示范工程研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1132-1139.
JIANG Xiaojuan, JIANG Yun, YIN Yi, et al. A demonstration project of flexible DC power transmission in Shanghai Nanhui wind power station[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1132-1139.
- [7] 唐庚, 徐政, 薛英林, 等. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电控制系统设计[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2773-2782.
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Control design of multi-terminal HVDC based on modular multilevel converter[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2773-2782.
- [8] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [9] 蔡新红, 赵成勇. 基于欧拉-拉格朗日模型的模块化多电平换流器的无源控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 224-232.
CAI Xinhong, ZHAO Chengyong. Euler-Lagrange model based passive control for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 224-232.
- [10] 赵成勇, 胡静, 翟晓萌, 等. 模块化多电平换流器桥臂电抗器参数设计方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 89-94.
ZHAO Chengyong, HU Jing, ZHAI Xiaomeng, et al. A parameter design method of bridge arm reactor in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 89-94.
- [11] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [12] 皇甫成, 汤广福, 阮江军, 等. VSC-HVDC 统一电磁暂态模型及其控制策略[J]. 电网技术, 2008, 34(5): 903-908.
HUANGFU Cheng, TANG Guangfu, RUAN Jiangjun, et al. Unified electromagnetic transient model and control strategy for the voltage source converter based HVDC transmission[J]. Power System Technology, 2008, 34(5): 903-908.
- [13] TANG Geng, XU Zheng, DONG Huanfeng, et al. Sliding mode robust control based active-power modulation of multi-terminal HVDC transmissions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1614-1623.
- [14] 周洋, 胡鹏飞, 江道灼, 等. 模块化多电平换流器改进最近电平调制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(8): 1522-1528.
ZHOU Yang, HU Pengfei, JIANG Daozhuo, et al. Improved nearest level modulation strategy for modular multilevel converters[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(8): 1522-1528.
- [15] 李宁, 袁旭峰, 胡晟, 等. 基于 MMC 柔性多端直流配电系统的改进协调控制研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 40-45, 69.
LI Ning, YUAN Xufeng, HU Sheng, et al. Research on improved coordinated control based on MMC flexible multipoint DC distribution system[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2017, 34(2): 40-45, 69.
- [16] GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of a modular multilevel converter based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [17] 林雪华, 洪国巍, 郭琦, 等. 基于改进 MOPSO 的 MMC 控制参数多机联合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 48-55.
LIN Xuehua, HONG Guowei, GUO Qi, et al. Multi-

- machine joint parameters optimization of MMC controller based on improved MOPSO[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(9): 48-55.
- [18] 薛花, 李杨, 王育飞, 等. MMC-HVDC 无源性 PI 稳定控制与环流抑制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(19): 78-85.
- XUE Hua, LI Yang, WANG Yufei, et al. Passivity-based PI stability control and circulating current suppression method of MMC-HVDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(19): 78-85.
- [19] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(22): 127-133.
- SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(22): 127-133.
- [20] GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of a modular multilevel converter based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [21] 刘辉昭, 陈晓霞. 分数阶同步磁阻电机的混沌与控制[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 47-52, 110.
- LIU Huizhao, CHEN Xiaoxia. Chaos in the fractional order synchronous reluctance motor and its control[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(4): 47-52, 110.
- [22] 徐雨哲, 徐政, 张哲任, 等. 基于 LCC 和混合型 MMC 的混合直流输电系统控制策略[J]. *广东电力*, 2018, 31(9): 13-25.
- XU Yuzhe, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Control strategy for hybrid HVDC transmission system based on LCC and hybrid MMC[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(9): 13-25.
- [23] 曾繁耀, 乐开平, 韩韬. MMC 低开关频率子模块均压控制策略[J]. *广东电力*, 2018, 31(6): 99-106.
- ZENG Fanyao, YUE Kaiping, HAN Tao. Voltage-sharing control strategy for MMC low switching frequency sub-module[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(6): 99-106.
- [24] 叶海智, 刘骏飞. 基于用户评论的协同过滤推荐算法[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 79-84.
- YE Haizhi, LIU Junfei. Collaborative filtering recommendation algorithm based on user comments[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(1): 79-84.

收稿日期: 2018-06-28; 修回日期: 2018-11-13

作者简介:

萧展辉(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网信息化; E-mail: xiaozhanhui@yeah.net

蔡徽(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网信息化;

黄剑文(1963—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电网信息化。

(编辑 葛艳娜)