

DOI: 10.7667/PSPC170984

MMC 柔性直流输电系统网侧故障时紧急功率支援控制

李国庆¹, 付贵¹, 王斯忱², 李江¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了解决 MMC-HVDC(Modular Multilevel Converter Based on HVDC, MMC-HVDC)交流侧系统故障时的过流问题, 以及增强 MMC 换流器的低压穿越能力, 通过对换流器功率数学模型及控制方式进行分析, 发现了换流器有功和无功功率解耦的 PI 控制方式。提出了当交流侧发生对称和不对称故障时, 通过控制 PI 值限制功率输出, 同时由交流电压偏差有效值生成正负序补偿电流的紧急功率支援控制策略。将这种控制策略添加到电磁暂态仿真系统当中, 当系统网侧发生对称或不对称故障时, 利用数值仿真技术分析了换流器阀侧的电能质量。仿真结果验证了所提出的控制方法对故障时过流抑制的有效性, 同时增强了换流器的低压穿越能力。

关键词: 模块化多电平换流器; 交流故障; 过流问题; 低压穿越能力; 功率控制

Emergency power support control for MMC flexible HVDC transmission system during AC fault

LI Guoqing¹, FU Gui¹, WANG Sichen², LI Jiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the over current problem of MMC-HVDC during AC fault, while enhance the low voltage ride through capability of the MMC converter, this paper finds that the converter active and reactive power control mode is decoupling PI control through researching converter power mathematical model and control mode. And it proposes a kind of emergency power support control strategy, which controls the PI value to limit the power output, at the same time, generates positive and negative sequence current compensation through the deviation of the AC voltage RMS when symmetric or asymmetric faults occur in AC side. The control strategy is added to the electromagnetic transient simulation system. When symmetric and asymmetric faults occur in network side, power quality of the valve side is analyzed by using numerical simulation method. Simulation results verify the validity of fault over current suppression of the proposed control method, at the same time it can enhance the low voltage converter through ability.

This work is supported by Science and Technology Development Project of State Grid Corporation of China (No. SGRIZLKJ [2015]457).

Key words: modular multilevel converter; AC fault; over current problem; low voltage ride through capability; power control

0 引言

随着我国经济的快速增长, 对能源的需求进一步提高。目前, 我国已经形成了以火电和水电为主体, 风能、太阳能等新能源和可再生能源全面发展的能源供给格局。与此同时, 我国大型煤电和风电基地主要分布在西部和西北部地区, 水电基地集中在西南地区, 发电基地距离负荷中心较远。为实现电力大规模外送和大范围优化配置, 必须发展有效的能源输送方式, 基于模块化多电平换流器的柔性

直流输电系统应运而生。

模块化多电平换流器是通过子模块级联的方式替代传统开关器件直接串联的方式, 凭借着其模块化、可自关断、低谐波含量、开关频率和损耗低、电压等级容易拓展等优点受到广泛关注, 像其他换流器一样, 同时它可以实现有功功率和无功功率单独控制, 在它能力曲线范围内, MMC 可以通过改变输出的无功功率来调节交流系统电压, 可实现静止无功补偿功能。根据其技术优点, 柔性直流输电技术适用于风电场并网、交流系统异步互联、孤岛供电、分布式发电并网、多端直流输电和城市配电网地下改造等领域^[1-2], 因此模块化多电平换流器高压直流输电技术的应用越来越受到关注。

基金项目: 国家电网公司科技发展计划项目资助 (SGRIZLKJ [2015] 457 号)

文献[3-4]分析了 MMC 的等效模型, 将传统 VSC 的矢量控制策略运用于 MMC-HVDC 当中。文献[5]指出矢量控制实质上就是电流 dq 解耦控制, 文献[6-7]分析了矢量控制包括有功功率和直流电压有功类控制以及无功功率和交流电压无功类控制。文献[8-9]分析了 MMC 内部环流的产生机理, 提出了 dq 坐标系下二倍频环流抑制策略, 文献[10]针对交流电网不平衡情况, 提出的控制补偿策略有效提高了电能质量。文献[11]针对电压不平衡情况, 通过分析计算 MMC 内部不平衡电流序分量, 提出的控制策略有效抑制了系统有功功率的波动。

模块化多电平换流器可以实现功率四象限运行, 当与直流系统互连的交流电网出现功率波动时, 通过柔性直流输电系统的快速功率调节作用, 可以提高互联的交流电网的稳定性。然而直流系统的紧急功率调节会受换流器母线电压的影响, 如果换流站母线电压恶化, 会影响直流系统在紧急功率支援时的运行状态, 造成直流系统在非正常运行状态下无法有效地提升输送功率, 非但不能对交流电网提供功率支援, 还有可能恶化电网的稳定性^[12]。

为了维持交流母线电压稳定, 一种方法是上述所讲的消除谐波分量, 另一种方法就是控制功率输出。目前, 通过 dq 解耦控制消除谐波分量方法已应用在 MMC 控制系统当中, 在没有任何控制方式的情况下, 当系统交流侧发生故障时, 由于内外环控制速率太慢, 很容易造成系统过流问题以及弱电网故障清除后过电压问题, 因此, 当发生交流故障时如何控制 MMC 换流器功率输出是解决问题的关键。此外, 电网操作人员需要每一个连接电网的换流器都具有低压穿越能力, 这对 MMC 换流器无功功率控制是另一种挑战。

针对以上问题, 本文提出一种当交流系统发生故障时 MMC 紧急功率支援控制策略, 通过限制功率 PI 参数抑制电流过流问题, 同时采取交流电压偏差有效值生成支援电流参考值 Δi_{ref} , 当三相对地故障时生成 Δi_{ref}^+ 只控制正序电流, 当单相对地故障时生成 Δi_{ref}^- 只控制负序电流, 以提升换流器低压穿越能力。最后基于电磁暂态仿真软件, 通过数值仿真技术分析添加控制前后的电能质量, 结果验证了本文所提出控制策略的合理性和可行性。

1 模型描述

1.1 主电路

如图 1 所示为模块化多电平柔性直流输电 (MMC-HVDC) 系统的简化模型^[13-14], 用于测试所提出的控制策略, 其中 MMC1 与 MMC2 为模块化多

电平换流器, 两侧交流系统由戴维南等效为交流电压源和交流阻抗, 通过变压器将交流电源和 MMC 相连, 直流侧背靠背由电缆直接连接。

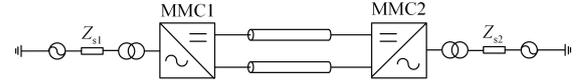


图 1 MMC-HVDC 简化模型

Fig. 1 Simplified model of MMC-HVDC

MMC-HVDC 系统具体参数由表 1 列出。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

项目	参数
额定功率 P_N	200 MW
额定直流电压 U_{DCN}	± 100 kV
联结变压器变比 K	230 kV/100 kV
变压器容量 S_N	280 MVA
桥臂电抗 L	24 mH
桥臂等效电阻 R	0.1 Ω
子模块电容器 C_0	1 000 μF
子模块额定电压 U_0	4 kV
单桥臂子模块数 N	50

1.2 功率数学模型

从交流系统输送到 MMC 换流站的有功和无功功率数学表达式为^[15]

$$\begin{cases} P = P_0 + P_1 \sin(2\omega t) + P_2 \cos(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_1 \sin(2\omega t) + Q_2 \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中, } \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_1 \\ Q_1 \\ P_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_d^+ & u_q^+ & u_d^- & u_q^- \\ u_q^+ & -u_d^+ & u_q^- & -u_d^- \\ u_q^- & -u_d^- & -u_q^+ & u_d^+ \\ u_d^- & u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \\ -u_d^- & -u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \\ u_q^- & -u_d^- & u_q^+ & -u_d^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix}.$$

稳态时 u_q 为 0, 同时为了预防 MMC 中电力电子器件过流, 控制功率参考值时负序电流设置为 0, 从而得到稳态时功率表达式为^[16]

$$\begin{cases} P_{\text{ref}} = 1.5u_d^+ i_d^+ \\ Q_{\text{ref}} = 1.5u_d^+ i_q^+ \end{cases} \quad (2)$$

根据稳态时 MMC 换流器功率表达式, 分解可以得到 dq 轴坐标系下正序电流参考值为

$$\begin{cases} i_{\text{dref}}^+ = P_{\text{ref}} / (1.5u_d^+) \\ i_{\text{qref}}^+ = Q_{\text{ref}} / (1.5u_q^+) \end{cases} \quad (3)$$

1.3 系统主控制

如图 2 所示, 对于柔性直流输电采用矢量控制, 矢量控制策略可以分解为内环电流控制器和外环功

率控制器。换流器每端同时具有对有功功率类和无功功率类两种物理量控制, 且必须有一端存在对直流电压的控制。本文 MMC1 为定直流电压和定无功功率控制, 与此同时 MMC2 为定有功功率和定无功

功率控制。控制系统采用正序和负序控制策略, 当交流系统稳态时或是发生对称故障时正序控制起作用, 负序控制仅仅是在交流系统发生不对称故障时才被激活。

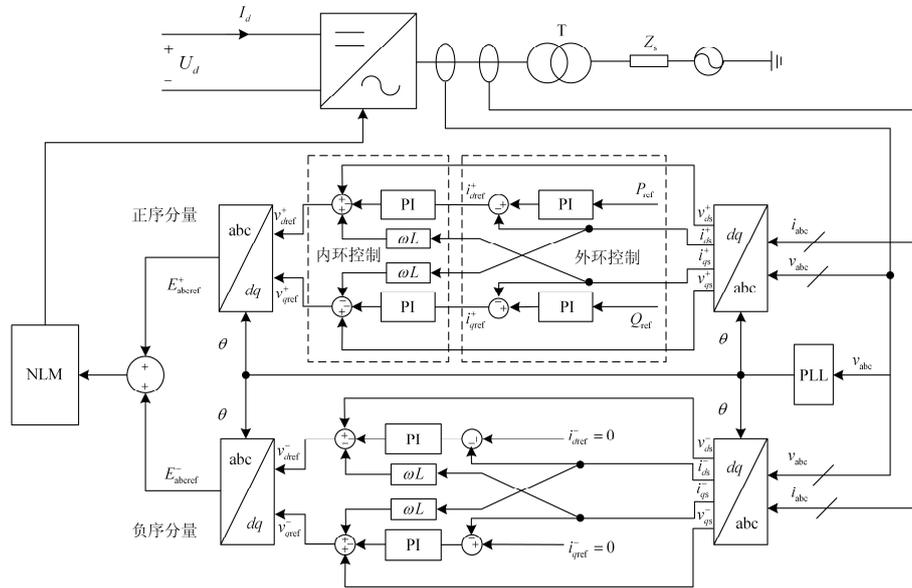


图 2 基本控制策略

Fig. 2 Basic control strategy

2 抑制故障时过流控制

在测试系统端口 2 网侧做三相短路接地故障, 图 3 展示了故障时换流站阀侧电能质量。从图中可以看出, 当只有常规的矢量控制时, 由外环 PI 控制

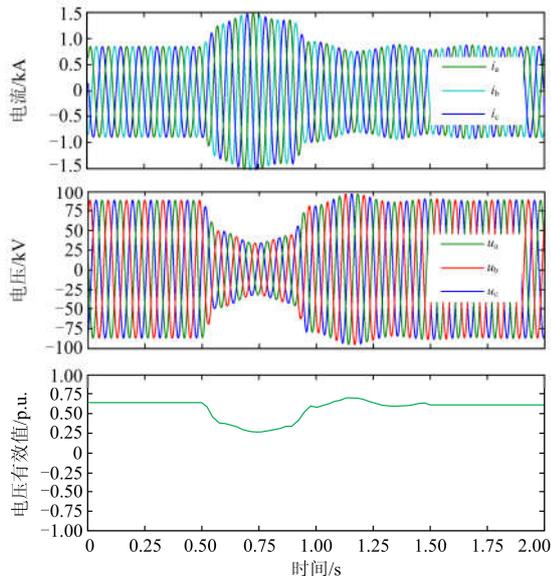


图 3 三相接地故障时电压、电流波形

Fig. 3 Waveform of voltage and current during three-phase grounding fault

生成电流参考值, 再指导内环电流控制, 控制速率太慢很难快速调节故障电流, 因此在交流故障时会引起过电流。

为了改善 MMC 的性能, 根据公式(2)稳态时功率表达式, 在稳态情况下功率输出为 ± 1.5 p.u., 通过限制外环功率 PI 值, 就可以消除故障时过流问题, 当故障时 PI 控制器的输出立刻减小到 0, 等到故障清理并加有一定的延时后, 功率输出恢复到故障之前的 1.5 p.u.。为了检测这个控制策略的有效性, 系统添加控制之后, 在端口 2 网侧在相同地点相同时刻做时长为 0.25 s 三相短路接地故障实验, 端口 2 的阀侧电流波形如图 4 所示。

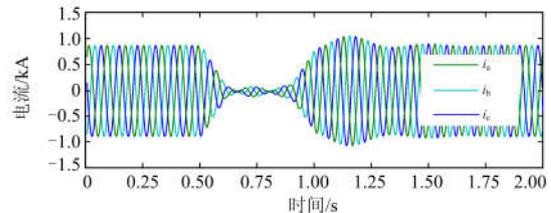


图 4 加控制后电流波形

Fig. 4 Waveform of current after adding control

通过对比加控制前后图 3 和图 4 的故障电流波形, 明显发现通过限制外环功率 PI 值, 可以很好地抑制故障时的过电流问题。

3 MMC 无功支援控制

当交流系统故障时,通过限制外环功率 PI 值为 0,从仿真结果中可以看出很好地抑制了故障时过流问题,然而,电网操作者要求 MMC 在交流故障时可以提供无功功率以支撑交流电压,而不是将功率输出变为 0。

为了进一步改善 MMC 的性能,通过检测故障时网侧母线电压幅值,要求是当网侧交流电压下垂时,换流器需要进行无功支援,根据低压穿越能力曲线,当网侧母线电压偏差超过 ΔU 限值时,高压直流换流器需要提供无功电流支援,图 5 显示了无功电流注入等级与网测母线电压偏差关系,其中控制斜率 K_{av} 表示平均比例参数,大小等于故障时母线电压跌落幅值除以故障持续时间,具体平均比例参数表达式为

$$K_{av} = \frac{U_1 - U_2}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

此外根据系统内是否出现负序分量区分是对称故障还是不对称故障,对称故障时生成正序无功电流支援参考值 Δi_{ref}^+ , 不对称故障时生成负序无功电流支援参考值 Δi_{ref}^- 。

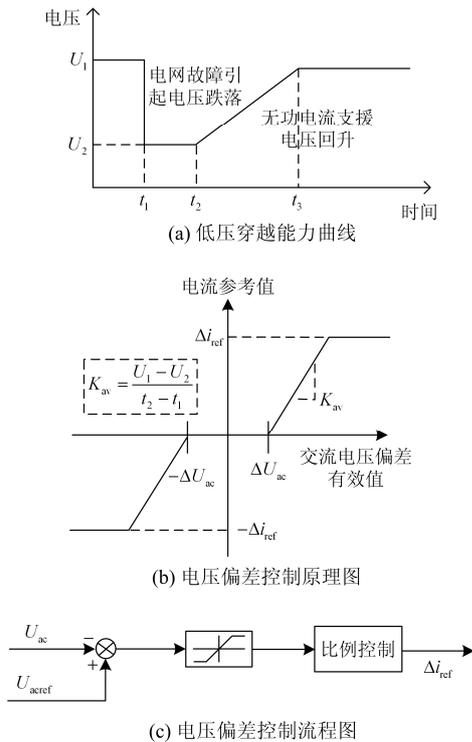


图 5 电压偏差控制

Fig. 5 Voltage deviation control

3.1 对称交流故障时正序无功电流支援

当网侧发生对称交流故障时,外环功率控制器 PI 值设定为 0,通过图 5 电压偏差控制策略和三相故障信号来生成 Δi_{qref}^+ 值,同时将正序支援电流 Δi_{qref}^+ 添加到 i_{qref}^+ 。此时只有内环电流控制和正序支援电流 Δi_{qref}^+ 起作用,网侧对称故障正序电流控制策略如图 6 所示。

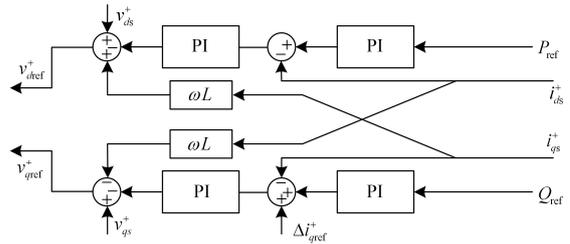


图 6 正序电流控制策略

Fig. 6 Positive sequence current control strategy

将图 5 和图 6 所示的控制策略应用在 MMC 测试系统中,在 0.5 s 时刻做时长为 0.25 s 三相短路接地故障实验,加正序控制后电压、电流波形如图 7 所示,相比于图 3 未加无功电流控制,当三相相对地故障时交流电压有效值下降至 25 kV,加控制后交流电压有效值提升至 46 kV,故障电流最大值由之前的 1.5 kA 下降至 0.7 kA,故障电流得到明显抑制。

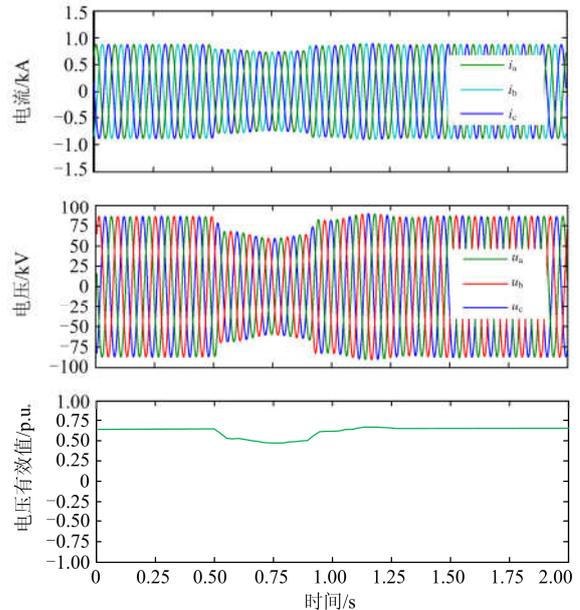


图 7 加正序控制后电压、电流波形

Fig. 7 Waveform of voltage and current under positive sequence current control

图 8 展示了端口 2 从 0 s 到 2 s 时功率变化,在

故障之前系统运行在额定水平, 有功功率为 -230 MW(换流器在端口 2 功能为逆变器, 为交流电网提供电能), 无功功率为 -40 Mvar。当发生交流故障时, 有功功率下降至 0 , 换流器开始向交流系统注入约 100 Mvar 的无功功率, 换流器本身具有自我调节能力。

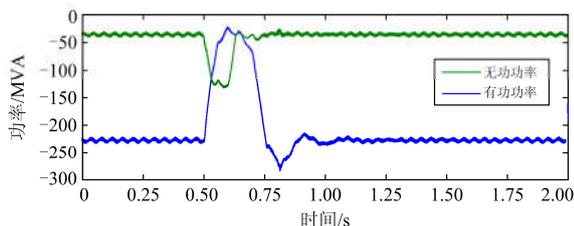


图 8 三相故障时功率变化

Fig. 8 Power change during three-phase grounding fault

3.2 不对称交流故障时负序无功电流支援

当发生不对称交流故障时, i_d 和 i_q 的正序指令设置为 0 , 如图 9 所示, 另一个调节信号 Δi_{qref}^- 添加到 i_{qref}^- 信号当中, 故障相相电压偏差有效值和故障信号用来计算 Δi_{qref}^- 。

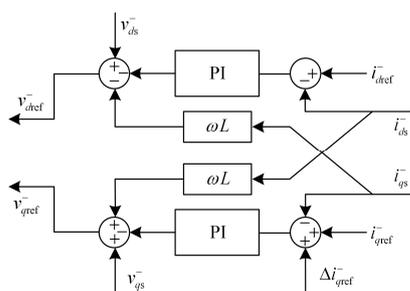


图 9 负序电流控制策略

Fig. 9 Negative sequence current control strategy

0.5 s 时刻在端口 2 交流母线上做单相接地故障, 故障时间持续 0.25 s, 用以检测负序控制的低压穿越能力。如图 10 所示, 当网侧发生 c 相故障时, 阀侧 c 相与 b 相电压瞬时跌落, 非故障相 a 相电压保持不变。负序控制提供负序电流 Δi_{qref}^- , 维持 b 与 c 两相电压保持不变, 满足低压穿越曲线要求。同时故障时故障电流不存在过流问题, 验证了负序控制很好地抑制了过流问题。

图 11 描绘了从 0 s 到 2 s 期间 i_d 的正、负序电流分量, 当发生不对称单相故障时, 正序电流 i_{qref}^+ 迅速降至 0 , 与此同时换流器负序电流控制被激发, 向故障点提供负序支援电流 Δi_{qref}^- , 提高了换流器低压穿越能力。

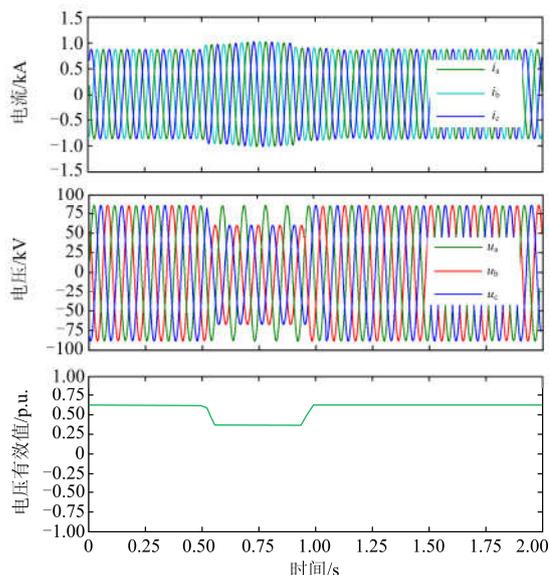
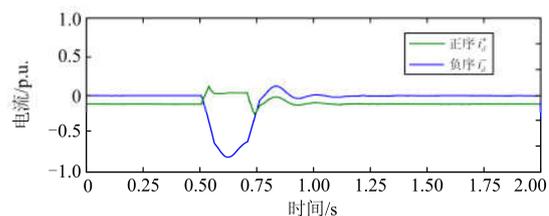


图 10 加负序控制后电压、电流波形

Fig. 10 Waveform of voltage and current under negative sequence current control

图 11 i_d 正负序电流分量Fig. 11 Positive and negative sequence current component of i_d

4 结论

传统的电压源换流器内外环控制速度太慢, 在交流系统故障时易造成电压波动和过电流问题。本文提出了限制功率外环 PI 值输出, 同时对内环正负序电流 dq 解耦的控制策略。当系统发生对称和不对称交流故障时, 根据网侧电压偏差控制, 对应单独提供正序和负序无功电流支援。最后在测试系统中做三相接地和单相对地故障实验, 结果表明在添加紧急功率支援控制策略后, MMC 换流器很好地解决了不同交流故障造成的过电流和电压波动问题, 验证了本文所提出的控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 陈海荣, 徐政. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 42-48.
CHEN Hairong, XU Zheng. Controller design for a VSC-HVDC system powered by a passive network[J].

- Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 42-48.
- [2] SOLAS E, ABAD G, BARRENA J A, et al. Modulation of modular multilevel converter for HVDC application[C] // 2010 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC 2010), September 6-8, 2010, Ohrid, Macedonia: 84-89.
- [3] 张哲任, 徐政, 薛英林. MMC-HVDC 系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Study of over-voltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 58-64.
- [4] 王朝斌. 模块化多电平换流器的控制策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2015.
WANG Zhaobin. Research on control schemes of modular multilevel converter[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2015.
- [5] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [6] 陈海荣, 张静, 屠卿瑞. 电网电压不平衡时电压源换流器型直流输电的负序电压补偿控制[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2363-2369.
CHEN Hairong, ZHANG Jing, TU Qingrui. Negative voltage compensating control of voltage source converter based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2363-2369.
- [7] 代高富, 符金伟, 周胜, 等. 基于模型预测控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 10-16.
DAI Gaofu, FU Jinwei, ZHOU Sheng, et al. Study of control strategy for MMC-HVDC system based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 10-16.
- [8] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 547-552.
TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. Mechanism analysis on the circulating current in modular multilevel converter based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 547-552.
- [9] 李国庆, 谭龙, 王振浩, 等. 单相接地故障对换流器内部环流影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 1-7.
LI Guoqing, TAN Long, WANG Zhenhao, et al. Research of the influence on the circulation for AC system single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 1-7.
- [10] 魏晓云, 孙辉, 魏晓光, 等. 改善电能质量的电压源换流器高压直流输电不平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 8-14.
WEI Xiaoyun, SUN Hui, WEI Xiaoguang, et al. Control strategy about power quality improvement for VSC-HVDC under unbalanced AC grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 8-14.
- [11] MOON J W, KIM C S, PARK J W, et al. Circulating current control in MMC under the unbalanced voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1952-1959.
- [12] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [13] 周阳, 常非. MMC 电磁暂态快速仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 1-8.
ZHOU Yang, CHANG Fei. Quick model of MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 1-8.
- [14] 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.
- [15] GUAN M Y, XU Z. Modeling and control of modular multilevel converter-based HVDC systems under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [16] 行登江, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平换流器多维度建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 108-115.
XING Dengjiang, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. Study on multi-dimension model of modular multilevel converter [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 108-115.

收稿日期: 2017-07-03; 修回日期: 2017-08-20

作者简介:

李国庆(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性分析与控制, 电力系统继电保护和配电系统自动化领域的理论与应用;

付贵(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: 329869356@qq.com

王斯忱(1995—), 男, 本科, 研究方向为电气与动力工程。

(编辑 魏小丽)