

基于 MPC 的 MMC-HVDC 子模块均压控制策略

张明光^{1,2,3}, 李波^{1,2,3}

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 具有效率高、谐波小、模块化设计和易级联等优点, 在高压大容量电能变换领域得到了广泛应用。为提高基于模块化多电平换流器的直流输电系统 (MMC-HVDC) 运行的动态响应速度, 提出了一种基于模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 与改进的子模块均压控制策略相结合的方法, 通过预测模型、反馈校正和滚动优化得到最优的电压控制量, 克服了传统的内环电流控制器与外环控制器中 PI 参数整定困难和动态响应慢的问题。最后, 在 PSCAD-EMTDC 软件平台搭建了 21 电平的 MMC-HVDC 系统仿真模型。仿真结果验证了控制策略的有效性和可行性。

关键词: 模型预测; MMC-HVDC; 开关频率; 子模块均压; 滚动优化; 排序算法

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2018.05.020

[中图分类号] TM46 [文献标识码] A [文章编号] 1000-3886(2018)05-0066-04

Sub-module Voltage Balanced Control Strategy of MMC-HVDC Based on Model Predictive Control

Zhang Mingguang^{1,2,3}, Li Bo^{1,2,3}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: The modular multilevel converter (MMC) has the advantages of high efficiency, low harmonic, modular design and easy cascade, has been widely used in the field of high voltage and large capacity energy conversion. In order to improve the dynamic response speed of the MMC-HVDC based on the modular multi-level converter, a novel method combining a model predictive control (MPC) of MMC-HVDC system with improved sub-module voltage balanced control strategy was proposed in this paper. The method utilized the prediction model, feedback correction and rolling optimization to obtain the optimal voltage control, and overcame the difficulties in the traditional way of setting PI parameters of the internal loop current controller and the outer loop controller and tackles the problem of low dynamic response. Finally, a 21-level MMC-HVDC system simulation model was built by PSCAD-EMTDC software platform. The simulation results show the effectiveness and feasibility of the control strategy.

Keywords: model prediction; MMC-HVDC; switching frequency; sub-module voltage balanced; rolling optimization; ordering algorithm

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 作为一种新型的电压源型换流器结构^[1], 采用子模块 SM (Sub-Module) 级联型拓扑, 其模块化结构易于扩展, 可通过增加或减少串联子模块的数量, 灵活地改变应用的电压等级^[2]。与传统两电平或三电平电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 相比, MMC 开关频率较低, 输出电流的谐波含量少, 对电力电子开关的一致性要求较低^[3-4], 在高压直流输电领域具有广阔的应用前景^[5]。通过对直流输电 MMC 不对称电网下的控制策略研究, 对于提高 MMC 在电网故障时的运行能力具有重要意义。

目前, 国内外对 MMC 开展的研究十分广泛, 对于系统的控制策略和子模块电容电压均衡问题一直是研究的重点。传统的基

于双闭环矢量控制中, 内环电流控制器通过调节换流器输出电压, 使 dq 轴电流快速跟踪其参考值, 外环控制器可依据有功和无功功率, 以及直流电压等参考值, 计算内环电流控制器的 dq 轴电流参考值^[6-7]。此方法存在 PI 参数整定困难和动态响应慢的问题。文献 [8] 推导了基于两相静止坐标系的模块化多电平换流器高压直流输电系统的数学模型。然而, 该方法的控制性能受 PR 参数影响, 只有选择恰当的 PR 参数才能达到预期的控制效果。与传统的线性控制器相比, MPC 控制具有设计简单, 易于实现多目标控制, 以及较高的动态性能指标等优点。近年来基于有限控制集 MPC 控制策略的研究被广泛应用于电力领域, 可实现对系统的变量预测和滚动优化^[9]。从已有的仿真或试验结果表明, 基于传统 MPC 的系统可以获得满意和稳定的动态性能。然而, 所有这些策略都需要在每个时间步长内进行实质的计算, 特别是对于滚动优化的数量^[10-11]。

子模块电容电压均衡控制中, 对 MMC 基本单元来说, 由于直

定稿日期: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51567016)

流侧储能是由多个子模块直流电容电压串联保持的,因此换流器直流电压控制不仅要控制总直流电压,还必须对各子模块直流电容进行均压控制。针对传统均压算法的问题,文献[12]采用质因子分解法的模块化多电平换流器电容电压平衡优化算法,通过将子模块分成不同组,从而降低了电容电压排序计算量,同时利用一种组间电压均衡算法,解决了各组间电压不均衡问题。文献[13]是在传统均压方式的基础上,通过对输入的子模块电容电压数据进行处理,在维持桥臂子模块电容电压均衡的同时,尽可能减小子模块开断状态的变化,从而实现了降低换流器开关频率的目的。

为此,本文提出了一种快速的MPC策略并结合快速排序法的子模块均压控制方法,降低了子模块的开关频率,最大程度地减少了系统的运算负担,对提高运行效率和响应速度具有重要意义。

1 MMC拓扑结构与数学模型

MMC-HVDC系统结构如图1所示,该系统由两个MMC换流站和直流线路构成。三相桥臂的结构相同,每相分别由两个臂和两个缓冲电感 L_0 构成。

每相 $j(j=a, b, c)$ 中,上桥臂由下标 p 表示,下桥臂由下标 n 表示,每个桥臂由 N 个串联的子模块SM组成。每个子模块由半桥型电路和电容 C_{SM} 组成。

在图1所示的模型中: u_{pj} 和 u_{nj} 分别为第 j 相的上桥臂和下桥臂电压; i_{pj} 和 i_{nj} 分别为第 j 相的上桥臂和下桥臂的电流; u_j 和 i_j 为 j 相的输出电压和交流侧电流。

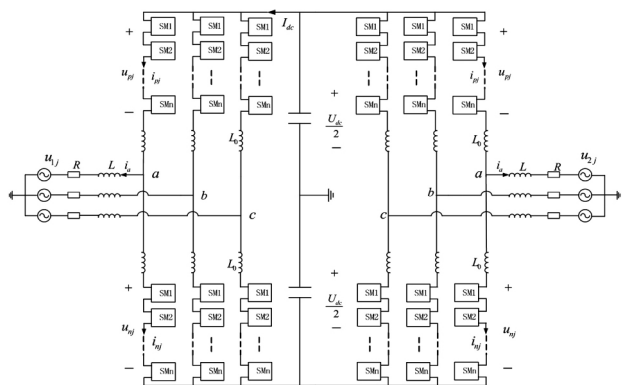


图1 MMC-HVDC结构图

可依据KVL定理对上下桥臂分别列出回路方程:

$$\frac{U_{dc}(t)}{2} - u_{pj}(t) = L_0 \frac{di_{pj}(t)}{dt} + Ri_j(t) + L \frac{di_j(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{U_{dc}(t)}{2} - u_{nj}(t) = L_0 \frac{di_{nj}(t)}{dt} - Ri_j(t) - L \frac{di_j(t)}{dt} \quad (2)$$

同理,由KCL定律可推导出 j 相的交流侧电流和环流:

$$i_j(t) = i_{nj}(t) - i_{pj}(t) \quad (3)$$

$$i_{zj}(t) = \frac{i_{pj}(t) + i_{nj}(t)}{2} - \frac{I_{dc}(t)}{3} \quad (4)$$

式中: i_{zj} 为流过 j 相的环流,其中规定与桥臂电流相同的方向为正方向。

根据式(1)~式(4)可推导出交流侧电流和环流的时域表

达式:

$$\frac{di_j(t)}{dt} = \frac{1}{L_0 + 2L} [u_{nj}(t) - u_{pj}(t) - 2Ri_j(t)] \quad (5)$$

$$\frac{di_{zj}(t)}{dt} = \frac{1}{2L_0} [U_{dc}(t) - u_{pj}(t) - u_{nj}(t)] \quad (6)$$

由以上两式可知,交流侧电流和循环电流与系统的上下桥臂电压有关。如果SM处于导通状态,则SM电容电压的动态特性由相对臂电流决定:

$$\frac{du_{C_{rj}}(t)}{dt} = \frac{i_{rj}(t)}{C_{SM}} \quad (7)$$

式中: $u_{C_{rj}}$ 为 j 相第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个子模块SM桥臂 $r(r=p, n)$ 的电容电压; i_{rj} 为相应的桥臂电流。

2 快速模型预测设计

要进行快速模型预测,首先应将上部分所述的数学模型离散化,其中 T_s 为采样周期。

欧拉中点公式如下所示:

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (8)$$

式中: $x(k+1)$ 和 $x(k)$ 分别为变量在 $k+1$ 和 k 时刻的值。

根据欧拉公式,由式(5)~式(7)可导出交流侧电流、环流以及子模块电容电压离散域表达式如下所示:

$$i_j(k+1) = \frac{T_s}{L_0 + 2L} [u_{nj}(k+1) - u_{pj}(k+1)] + \left(1 - \frac{2T_s R}{L_0 + 2L}\right) i_j(k) \quad (9)$$

$$i_{zj}(k+1) = \frac{T_s}{2L_0} [U_{dc} - u_{pj}(k+1) - u_{nj}(k+1)] + i_{zj}(k) \quad (10)$$

$$u_{C_{rj}}(k+1) = \frac{T_s}{C_{SM}} i_{rj}(k) + u_{C_{rj}}(k) \quad S_{rj}(k) = 1 \quad (11)$$

$$u_{C_{rj}}(k+1) = u_{C_{rj}}(k) \quad S_{rj}(k) = 0 \quad (12)$$

式中: $i_j(k+1)$ 和 $i_j(k)$ 分别为第 j 相交流侧电流在 $k+1$ 和 k 时刻的值; $i_{zj}(k+1)$ 和 $i_{zj}(k)$ 分别为第 j 相环流在 $k+1$ 和 k 时刻的值; $u_{C_{rj}}(k+1)$ 和 $u_{C_{rj}}(k)$ 为子模块电容电压的值; $S_{rj}(k)$ 为子模块SM在 k 时刻的运行状态,当 $S_{rj}(k) = 1$ 时为子模块处于导通状态,当 $S_{rj}(k) = 0$ 时为子模块处于关断状态。

MMC的主要控制目标分为三部分:子模块电容电压的均衡控制;使交流侧的相电流跟随其参考值;对每相的环流进行抑制。要实现减少计算量这一目标,需要对传统的MPC进行改进优化,优化控制目标,简化滚动优化的过程。

传统的模型预测每相通过AC侧电流、循环电流和 $2N$ 个SM电容器电压的一步预测来进行。上述的所有预测都是根据式(9)~式(12)的每个可用切换状态计算的。

系统的基本控制原理如图2所示。首先,通过减少变量预测过程中的计算,优化控制目标的实现。实现这一目标,通过采用改进的快速模型预测法来避免SM电容电压的大量预测。其次,通过将有限控制集从所有可用的开关状态减少到所选择的输出电压电平来简化滚动优化。

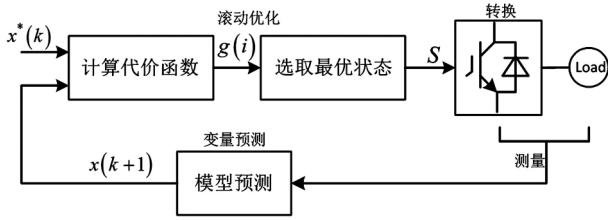


图2 基本控制原理框图

3 子模块均压控制策略

在子模块均压策略中,基于排序法的NLM均压调制算法,可以有效实现子模块电容电压的平衡。电压排序法的核心思想是:首先对各桥臂子模块电容电压进行排序,然后根据桥臂电流的充放电方向,优先投入电容电压较高或较低的子模块,从而达到子模块电容电压的平衡。针对大量子模块电容电压均衡的情况,利用基于质因子分解法提出一种混合的优化排序法,通过引入希尔排序算法大幅度降低排序次数,从而降低仿真时间,降低了对系统硬件的要求。

本文利用快速排序算法对子模块电容电压进行排序。每相桥臂导通的子模块数用 M_{ij} 表示。通过检测可以得到桥臂电流,导通的子模块数 M_{ij} 可以通过第二、三控制目标来确定。因此,将第二、三控制目标与子模块导通数 M_{ij} 结合是关键。基于式(11)和式(12)可知,在 $k+1$ 时刻子模块电容电压的总和如下:

$$\sum u_{C_{j\bar{i}}}(k+1) = \frac{M_{ij} T_s}{C_{SM}} i_{ij}(k) + \sum u_{C_{j\bar{i}}}(k) \quad (13)$$

为分析方便,假定子模块的电压已经得到良好的均衡控制,即被控制为 U_{dc}/N j 相的桥臂电压可表示为:

$$u_{ij}(k+1) = M_{ij} \frac{\sum u_{C_{j\bar{i}}}(k+1)}{N} \quad (14)$$

将式(14)代入式(9)可得系统交流侧电流和子模块导通数关系式,具体如下:

$$i_j'(k+1) = \frac{2T_s}{L_0 + 2L_s} \left[\frac{M_{nj} \sum u_{C_{n\bar{j}}}(k+1) - M_{pj} \sum u_{C_{p\bar{j}}}(k+1)}{N} \right] + \left(1 - \frac{2T_s R_s}{L_0 + 2L_s} \right) i_j(k) \quad (15)$$

同理,将式(14)代入式(10)可得系统环流和子模块导通数关系式,具体如下:

$$i_{Zj}(k+1) = \frac{T_s}{2L_0} \left[U_{dc} - \frac{M_{nj} \sum u_{C_{n\bar{j}}}(k+1) + M_{pj} \sum u_{C_{p\bar{j}}}(k+1)}{N} \right] + i_{Zj}(k) \quad (16)$$

由推导式(15)和式(16)可知,可以通过选择每相桥臂中SM导通状态的最佳数量 M_{ij} 来实现第二和第三控制目标。通过计算代价函数 g 可以确定最优的投入子模块数,利用快速排序法简化系统的计算量。尽管随着子模块数 N 的增多,计算量会增大,但是比起传统的模型预测控制还是减少了许多。

$$g = \lambda_1 |i_j^*(k+1) - i_j(k+1)| + \lambda_2 |i_{Zj}(k+1)| \quad (17)$$

式中: $i_j(k+1)$ 表示 j 相交流侧电流在 $k+1$ 时刻的参考值; λ_1 和 λ_2 是权重系数。

图3是系统控制框图。在每个采样周期,MPC算法部分和

电压排序算法部分将连续执行,从而实现三个控制目标。首先对所有必需的电量进行采样,对于MPC算法中每个选定的电压电平,时间步长 $k+1$ 处的受控变量预测值将通过式(15)和式(16)中的离散预测模型来计算。然后计算成本函数的相对值,以便在滚动优化过程中为时间步长 $k+1$ 选择最佳电压电平。同时,将获取最佳电压电平的上桥臂投入子模块数和下桥臂投入子模块数(分别由 M_{optpj} 和 M_{optnj} 表示)发送到电压排序算法部分。因此,可以得出结论,模型预测算法部分确定最佳输出相电压,而电压排序算法部分确定最佳切换状态。

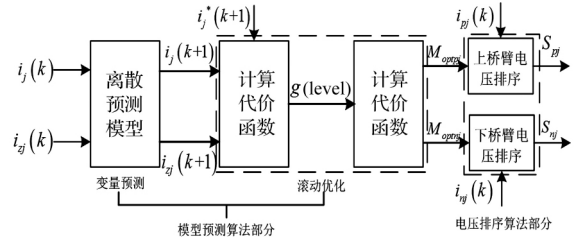


图3 系统控制策略框图

4 仿真试验及结果分析

为验证文中提出的快速模型预测设计与子模块均压控制策略的正确性和可行性,在PSCAD-EMTDC平台搭建21电平MMC-HVDC系统模型来进行仿真试验。

表1给出了系统的具体参数指标。通过仿真验证,系统有功、无功的控制效果和功率突变时的抗扰动能力和维持直流侧电压、交流侧电流稳定的能力。

表1 系统仿真参数

变量名称	数值
采样周期 $T_s / \mu s$	50
交流侧电压 U_s / kV	420
变压器变比 K	420/170
直流侧电压 U_{dc} / kV	320
子模块电容 C_0 / mF	13
子模块电容电压 U_c / kV	16
桥臂电感 L_0 / mF	12
单个桥臂的子模块数 N	20

系统的仿真结果与分析如下:

(1) 由图4可以看出,换流站1的有功功率在经过0.1s过渡到系统给定的稳定状态。同理,换流站2的有功功率也经过短暂的波动后达到系统所预期的状态。由此可知,此控制系统具有较快的响应速度,能够较快地实现预期的功率控制。

(2) 由图5可知,当系统有功功率发生变化时,无功功率经过短暂波动后能够维持在系统的参考值附近,没有出现明显的振荡,因此可以看出此系统可对有功功率和无功功率进行独立控制,可以实现单位功率因数传输。

(3) 由图6可知,通过快速模型预测与子模块均压控制策略,使得系统直流侧电压能够在较短时间内达到参考值320kV,并保持稳定,取得预期控制效果。图7(a)和图7(b)分别是逆变侧交流电压与电流,可以看出,系统逆变侧波形能够保持正弦波且谐

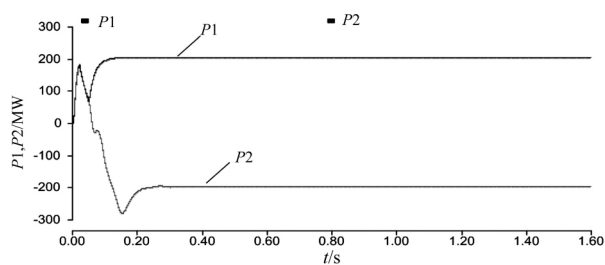


图4 有功功率响应曲线

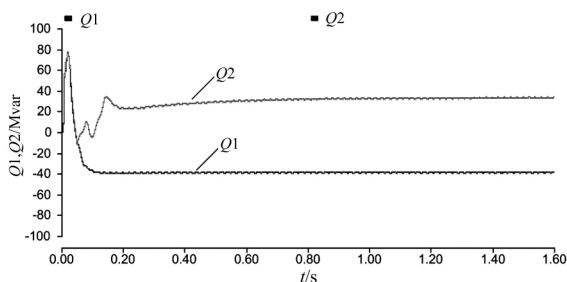


图5 无功功率响应曲线

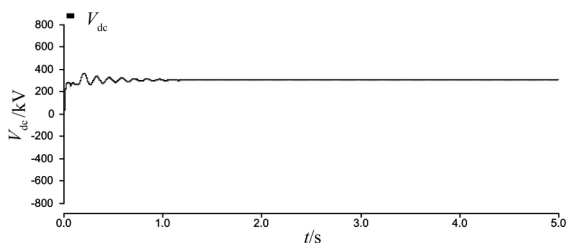


图6 直流侧电压

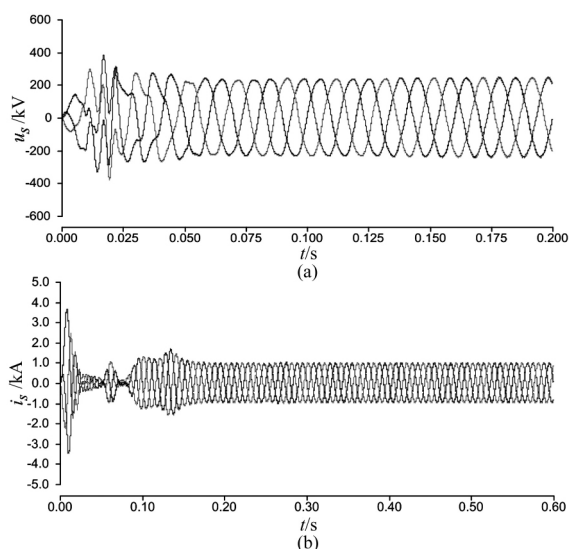


图7 交流侧电压与电流

波含量较少。

(4) 由图8的A相上桥臂子模块电容电压波形图可知,每个桥臂上的任意一个子模块电压均能够保持在16 kV附近上下波动,满足MMC-HVDC的运行控制要求。一方面可以维持子模块电容电压的动态平衡和系统直流侧电压的稳定,另一方面也可以保证系统设备和器件的稳定运行,避免因故障引起损坏。

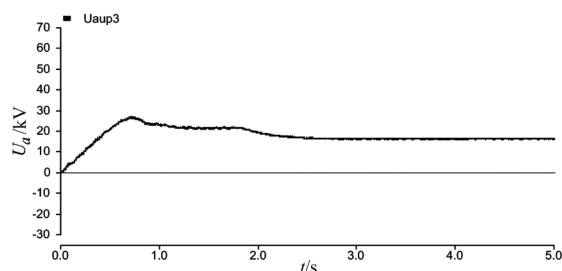


图8 A相上桥臂子模块电容电压波形

5 结束语

本文采用基于模型预测和快速排序方法的MMC-HVDC控制策略,通过利用快速模型预测的方法,对系统数学模型进行离散化预测,减少了变量预测过程中的计算,同时对优化的上下桥臂最佳子模块数进行快速排序,从而对减少整个系统的运算量具有重要意义,实现对控制目标的优化和子模块均压控制的目的。经仿真验证,该控制策略对功率波动具有良好的抗扰性,实现了有功、无功功率独立控制,也实现了直流电压、阀侧交流电流稳定的目标。

参考文献:

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]//Bologna, IEEE Bologna Power Tech Conference, Italy, 2003: 1-6.
- [2] 韦延方,卫志农,孙国强,等.一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J].电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
- [3] 张明光,于海,张兆钰.基于行波固有频率的VSC-HVDC直流输电线路双极短路故障保护与定位[J].兰州理工大学学报,2017,43(1):83-87.
- [4] 饶宏,李建国,宋强,等.模块化多电平换流器直流输电系统损耗的计算方法及其损耗特性分析[J].电力自动化设备,2014,34(6):101-106.
- [5] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- [6] 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.
- [7] 管敏渊,徐政.模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J].电力系统自动化,2010,34(19):64-68.
- [8] 孙一莹,赵成勇.基于两相静止坐标系的MMC-HVDC系统稳态控制策略[J].电网技术,2013,37(5):1384-1388.
- [9] RIAR B, GEYER T, MADAWALA U. Model predictive direct current control of modular multilevel converters: Modelling, analysis and experimental evaluation [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30(1): 431-439.
- [10] QIN J, SAEEDIFARD M. Predictive control of a three-phase DC-AC modular multilevel converter, in Proc [J]. IEEE Energy Convers. Congr. Expo., Raleigh, NC, USA, Sep. 2012, 27(4): 3500-3505.
- [11] BOCKER J, FREUDENBERG B, DIECKERHOFF S. Experimental comparison of model predictive control and cascaded control of the modular multilevel converter [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30(1): 422-430.
- [12] 彭茂兰,赵成勇.采用质因子分解法的模块化多电平换流器电容电压平衡优化算法[J].中国电机工程学报,2014,34(33):5846-5853.
- [13] 管敏渊,徐政.MMC型VSC-HVDC系统电容电压的优化平衡控制[J].中国电机工程学报,2011,31(12):9-14.

【作者简介】张明光(1971-),男,甘肃武威人,教授,主要从事混合型MMC-MTDC直流输电系统故障新型控制策略研究工作。李波(1989-),男,陕西渭南人,硕士生,主要研究方向为基于DSOGI检测的MMC-HVDC系统控制策略研究。