

基于 MMC 的柔性直流系统控制策略研究

梁明¹ 孟鑫² 薛一鸣³ 王军成¹

(1. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 电力规划总院有限公司, 北京 100120; 3. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054)

摘要: 模块化多电平换流器作为柔性直流输电系统的常见换流器拓扑结构, 对其进行控制策略研究具有重要意义。首先介绍了 MMC 的拓扑结构和基本工作原理, 推导得到了 MMC-HVDC 的简化电路模型, 设计了 dq 坐标系下的内环电流控制器及外环控制器; 然后研究了 MMC-HVDC 系统下的有功/无功控制策略, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建了双端 MMC-HVDC 系统并进行仿真研究, 仿真结果表明了该电路模型的正确性及控制策略的有效性。

关键词: 柔性直流输电; 电路模型; 控制策略

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)01-0014-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.01.003

Research on Flexible HVDC System Control Strategy Based on MMC

Liang Ming¹, Meng Xin², Xue Yiming³, Wang Juncheng¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. Electric Power Planning & Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China;

3. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100054, China)

Abstract: Modular multilevel converter (MMC) is the preferred converter topology of flexible DC transmission system, and re-searching the control strategy of MMC is of great significance. The topology and basic working principle of MMC are introduced, and the simplified circuit model of MMC-HVDC is deduced. The inner-loop current controller and outer-loop controller in dq coordinate are designed. Moreover, the active/reactive power control strategy of MMC-HVDC system is studied. Finally, a point-to-point MMC-HVDC system is established and simulated in PSCAD/EMTDC. The results show that the proposed MMC model is correct and the control strategy is effect.

Key words: HVDC flexible; circuit model; control strategy

0 引言

电压源换流器(voltage source converter, VSC)结构简单紧凑,具有自换相能力,能有效避免换相失败问题,同时还能够对有功/无功功率进行独立控制,在直流输电领域得到了广泛的应用,已建成的柔性直流输电工程主要为两电平和三电平的 VSC。但是 VSC 也存在缺点:首先,由于换流器电平数量限制,VSC 输出特性不稳定,在工程中需要提高开关频率使用高频 PWM 调制策略来改善输出特性,造成较高的开关损耗;其次,VSC 桥臂中开关器件的串联

均压技术实现困难,严重制约了 VSC 在更高电压等级的柔性直流输电系统的应用。

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)由于具有公共的直流母线,通过增加换流器级联数就可以提高输出电压扩展到大功率输电,因此 MMC 被认为是更适合应用于柔性直流输电领域的新技术。文献[1]分析了 MMC 的拓扑结构及工作原理,得出了理论等效电路模型;文献[2]对 MMC-HVDC 系统进行了数学建模,但该模型选择了与传统 VSC 相同的控制策略,直流电压波动较大。文献[3]将空间矢量脉冲调制策略用于 MMC 中,提出了调制策略的通用算法。文献[4]采用多

电平谐波调制策略,在降低换流器开关频率的同时实现了谐波抑制。

下面通过分析 MMC 拓扑结构及其工作原理,研究 MMC-HVDC 系统的简化数学模型,并根据该模型将传统的 VSC 控制策略应用到全桥 MMC 系统中,提出有功/无功控制策略实现系统有功/无功的快速跟踪。最后在 PSCAD/EMTDC 中对有功阶跃、有功翻转及有功/无功独立控制 3 种工况进行了仿真验证。

1 MMC 的拓扑结构及其控制参数设计

图 1 为三相模块化多电平换流器的拓扑结构图。图中: u_a, u_b, u_c 和 i_a, i_b, i_c 分别表示交流系统三相输入电压和电流; U_d 和 I_d 分别表示直流侧输出电压和电流,“O”表示直流侧虚拟中性点。相比于传统 VSC, MMC 由 3 个相单元组成,在直流侧正负极之间没有直流储能电容。相单元由两个电抗 L_0 和 n 个子模块(SM_n)串联而成的桥臂组成。MMC 子模块主要有半桥子模块和全桥子模块两种,如图 2 所示。

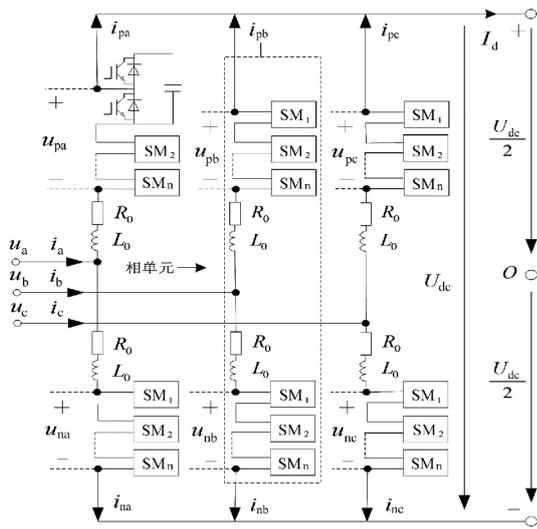


图 1 MMC 的拓扑结构

半桥子模块由一个作为开关单元的 IGBT 半桥和一个直流储能电容 C_0 组成,其中 IGBT 半桥包含两组 IGBT(T_1, T_2) 和续流二极管(D_1, D_2)。对于半桥子模块,令直流电容电压为 U_c ,子桥模块输出电压为 U_{SM} 。子模块根据内部 T_1, T_2 的开关状态及电流方向,可以分为闭锁、全电压和零电压 3 种常见运行状态。

1) 闭锁状态: T_1, T_2 均关闭。此时电流经 D_1 给

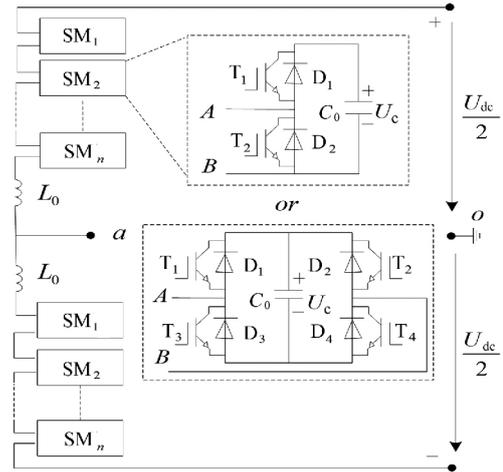


图 2 半桥及全桥子模块拓扑结构

电容充电,或经 D_2 旁路子模块。闭锁状态一般在 MMC 启动或系统发生故障时使用。

2) 全电压状态(投入状态): T_1 导通, T_2 关闭。电流经 T_1 放电或经 D_1 给电容充电,此时子模块端口电压等于电容电压,即 $U_{SM} = U_c$ 。

3) 零电压状态(切除状态): T_1 关闭, T_2 导通。此时子模块被 D_2 或 T_2 旁路,子模块端电压等于 0。

全桥子模块则是由 4 个 IGBT(T_1 至 T_4) 和 4 个反并联二极管(D_1 至 D_4) 以及一个直流储能电容 C_0 组成。定义全桥 MMC 流入子模块正端口为桥臂电流正方向,反之为负。 T_1, T_4 导通, $U_{SM} = U_c$; T_2, T_3 导通, $U_{SM} = -U_c$; T_1, T_2 或 T_3, T_4 导通, $U_{SM} = 0$ 。因此根据 IGBT 导通方式的不同,全桥子模块可分为两种工作模式: PLUS 模式和 MINUS 模式。PLUS 模式下子模块交替地输出 U_c 和 0; MINUS 模式下子模块交替地输出 $-U_c$ 和 0。同时,全桥子模块的运行状态也可分为闭锁、切除和切除 3 种。

1) 闭锁状态: T_1 至 T_4 全部关闭,电流经 D_1 和 D_4 给电容充电,或电容经 D_2 和 D_3 反极性接入电路。这种状态应用在系统故障时或在预充电不控整流阶段。

2) 投入状态: T_1 和 T_4 导通, T_2 和 T_3 关闭,正方向时,电流经 D_1 和 D_4 给电容充电;反方向时,电流经 T_1 和 T_4 放电。此时,全桥子模块电容器被接入到主电路中,输出电压为电容电压。

3) 切除状态: T_1 和 T_3 导通, T_2, T_4 关闭,正方向时,电流经 D_1 和 T_3 将子模块旁路;反方向时,电流经 D_3 和 T_1 将子模块旁路。

2 有功/无功控制

图3为典型MMC-HVDC系统的基本控制策略框图。送端及受端换流器均包含有功功率控制器及无功功率控制器,同时有一端包含直流电压控制器。具体的控制组合主要取决于交流系统情况的变化。一般对于两端有源系统网络,可以在整流侧采用有功/无功控制,逆变侧采用直流电压和无功的控制组合。典型MMC-HVDC系统的控制策略可以分为内环电流控制器与外环功率控制器两部分。内环电流控制器决定了MMC-HVDC系统的直流侧输出特性,外环控制器决定了MMC-HVDC系统的基本控制方式。内环电流控制器通过调节MMC输出电压,使坐标轴电流快速跟踪参考值;外环控制器可根据系统功率以及直流电压,计算内环电流控制器的d、q轴电流参考值。

在稳态下,电网三相平衡,系统的电压和电流均只含有正序分量。根据图4所示的MMC拓扑结

构,可得到MMC在d、q坐标系下的状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_{sd} - v_d + \omega Li_q - Ri_d \\ L \frac{di_q}{dt} = u_{sq} - v_q - \omega Li_d - Ri_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 为网侧电压的d轴和q轴分量; i_d 、 i_q 为网侧电流的d轴和q轴分量; v_d 、 v_q 为阀侧交流电压的d轴和q轴分量; ω 为电网角频率。

MMC交流侧功率和直流侧功率可分别表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_d + u_{sq}i_q) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_d - u_{sd}i_q) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{dc} = U_{dc} I_{dc} \quad (3)$$

在正常情况下, $\mu_{sq} = 0$,那么由式(2)可得交流系统送入MMC的功率的直流分量为

$$P_0 = \frac{3}{2}u_{sd}i_d, Q_0 = -\frac{3}{2}u_{sd}i_q \quad (4)$$

1) 内环电流控制器

在动态调节过程中,由于d轴电流和q轴电流

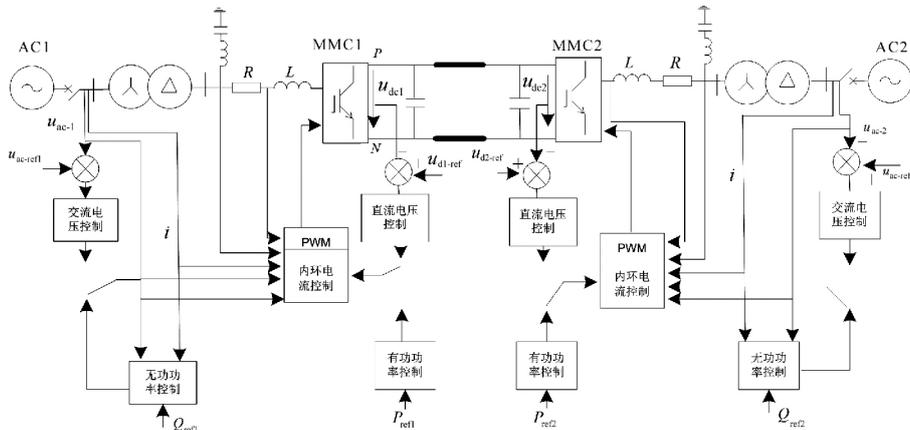


图3 双端MMC-HVDC系统控制框图

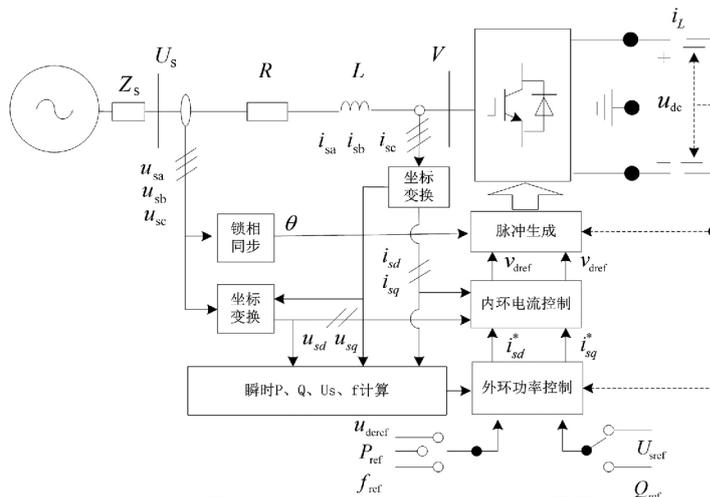


图4 MMC的基本控制策略结构框图

之间存在耦合关系,难以实现单独控制。内环电流控制器的作用就是让 d 轴和 q 轴电流分量独立解耦控制,使电流能够快速跟踪参考值。图5为内环电流控制器结构图。通过PI控制并引入电压前馈和耦合补偿,可得内环电流控制器的输入变量为

$$\begin{cases} v_d = u_{sd} + \omega L i_q - (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(i_d^* - i_d) \\ v_q = u_{sq} + \omega L i_d - (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s})(i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)可得 d 、 q 轴电流表达式为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + R i_d = (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(i_d^* - i_d) \\ L \frac{di_q}{dt} + R i_q = (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s})(i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (6)$$

可见 d 、 q 轴电流之间实现了解耦。

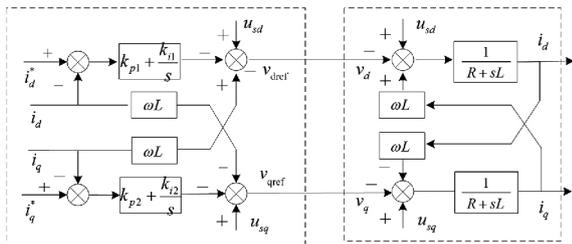


图5 内环电流控制器结构

2) 外环功率控制器

MMC 中引入了内环电流控制器和外环功率控制器。内环电流控制器使得 d 轴和 q 轴电流解耦并能快速跟踪参考值,外环功率控制器则能够根据系统

变化及系统参数来确定内环电流参考值。通过内外控制器的综合作用可以有效对系统的功率变化进行跟踪,实现系统有功/无功控制。由于实际中为了防止器件过电流,一般认为负序电流的参考值为0。由此根据式(4)可得 d 轴和 q 轴电流参考值以及定直流电压控制下 d 轴电流参考值分别为

$$i_d^* = P^* / (1.5 u_{sd}), \quad i_q^* = -Q^* / (1.5 u_{sd}) \quad (7)$$

$$i_d^* = (k_p + \frac{k_i}{s})(U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (8)$$

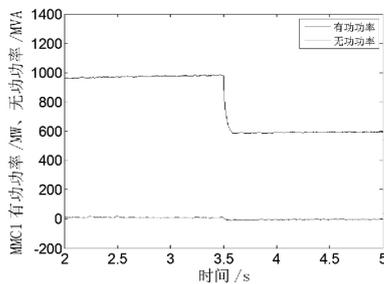
需要特别说明的是,双端 MMC - HVDC 系统正常运行时,若送端换流器采用定直流电压控制和无功控制,则受端可采用有功/无功控制,反之亦可。

3 仿真验证及分析

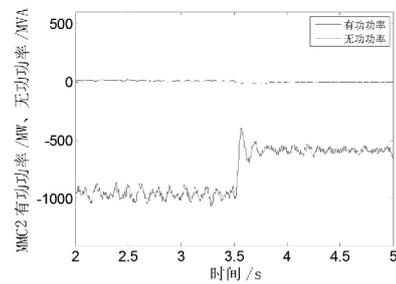
为了验证 MMC - HVDC 系统模型的正确性及有功/无功控制策略的有效性,基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件,通过搭建典型 MMC - HVDC 的双端系统,在有功功率阶跃、有功功率翻转和有功/无功独立控制3种典型情况下对前面所述控制策略进行了仿真验证。

1) 有功功率阶跃情况下的仿真

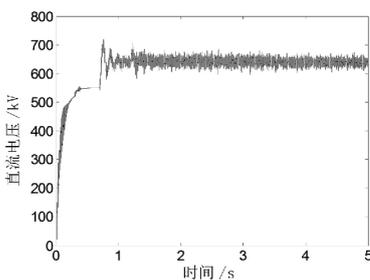
初始时,设定系统传输有功功率为 1000 MW,无功功率为 0 MVA;在 3.5 s 时,有功功率设定为 600 MW,无功功率为 0 MVA;直流电压一直保持 640 kV 不变。仿真结果如图 6 所示:其中(a)、(b)



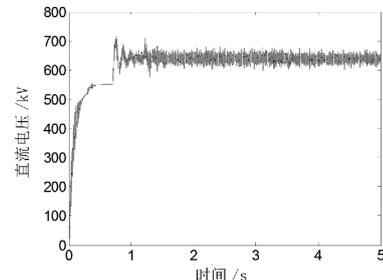
(a) 送端有功功率/无功功率



(b) 受端有功功率/无功功率



(c) 送端直流电压



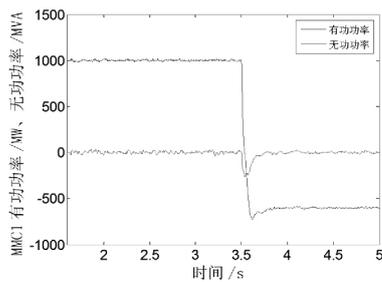
(d) 受端直流电压

图6 有功功率阶跃情况仿真结果

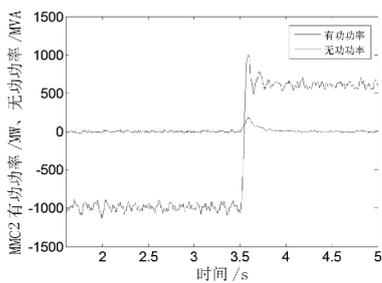
分别为送端和受端有功/无功波形,可见系统的有功、无功能够快速跟踪指令值的变化,解耦性能较好;(c)、(d)分别为送端与受端直流电压波形,可见有功功率发生阶跃时,系统直流电压波动较小,即使发生波动也能较快地恢复稳定值,保持系统稳定。

2) 有功功率翻转情况下的仿真

直流电压为 640 kV 不变,在启动完成后 MMC1 侧的有功功率设置为 1000 MW,3.5 s 时设为 -600 MW。仿真结果如图 7 所示。可见,当系统有功功率发生翻转时,系统有功和无功均有较快的响应速度,能较快恢复稳定运行,并快速实现潮流翻转。



(a) 送端有功功率/无功功率



(b) 受端有功功率/无功功率

图 7 有功功率翻转情况仿真结果

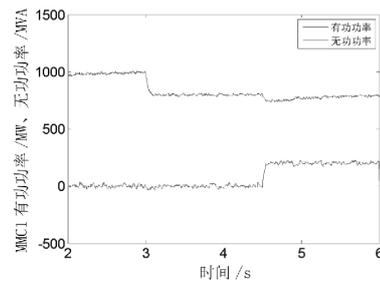
3) 有功/无功独立控制情况下的仿真

直流电压 640 kV,在启动完成后 MMC1 侧的有功功率设置为 1000 MW,3 s 时设为 800 MW。无功功率初始值为 0,4.5 s 时设为 200 MVA。

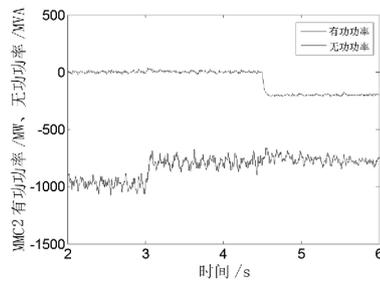
仿真结果如图 8 所示,由图可见当系统的无功功率和有功功率发生阶跃时,系统显示出良好的解耦性能,有功功率和无功功率之间相互影响较小,系统的功率能够快速跟踪系统的变化。

4 结 语

研究了 MMC-HVDC 拓扑结构及其数学模型,并简化了电路模型。将传统 VSC 的功率控制策略应用到 MMC 系统中,设计了适用于 MMC 系统的有



(a) 送端有功功率/无功功率



(b) 受端有功功率/无功功率

图 8 有功/无功独立控制情况仿真结果

功/无功控制策略。通过在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建 21 电平双端 MMC-HVDC 系统模型并进行 3 种常见工况的仿真研究,验证了所建简化数学模型的正确性和所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 肖刚,张译文,郭育华,等.基于 MMC 的同相供电潮流控制器控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):79-84.
- [2] 运奕竹,娄剑,朱天权,等.含柔性直流输电系统的故障仿真分析[J].东北电力大学学报,2017,37(2):19-23.
- [3] 刘英培,潘融融,栗然,等.不对称电网电压下 MMC-HVDC 系统功率波动抑制策略研究[J].电测与仪表,2017,54(2):18-24.
- [4] 黄守道,廖武,高剑,等.基于改进均压算法的模块化多电平变流器开关频率分析[J].电工技术学报,2016,31(13):36-45.
- [5] 王光江.基于全桥 MMC 的柔性直流输电系统控制策略与故障隔离[D].北京:北京交通大学,2016.
- [6] 张兆钰.MMC-HVDC 直流输电系统复合故障的控制策略研究[D].兰州:兰州理工大学,2016.
- [7] 辛业春,李国庆,王朝斌,等.基于状态反馈解耦控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究[J].电测与仪表,2015,52(20):65-70.
- [8] 周国威.模块化多电平变流器的环流控制策略[J].电气开关,2015,53(1):79-82. (下转第 40 页)

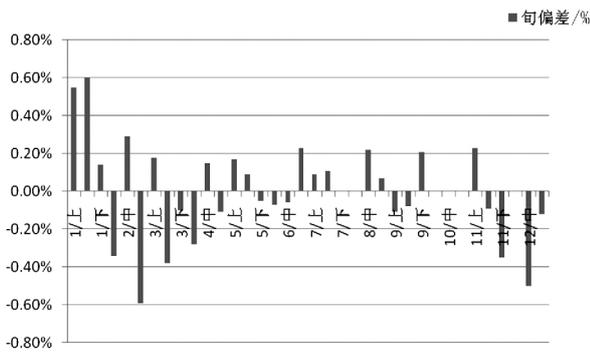


图 3 四川某电站典型年偏差分析

4 结 语

随着电力市场化改革的不断深化,中国能源结构将进一步优化,水电作为清洁可再生能源,在新电改的形势下机遇和挑战并存。传统以发电量最大为目标的水电站调度准则已不能适应电力市场发展的趋势。结合新电改对水电调度的新要求,提出了发电偏差最小化的水电中长期调度模型,通过实例分析验证,模型是有效和适用的。

对参与电力市场中长期交易的水电优化调度进行探索,对于水电企业中长期合同电量的执行具有较强的指导意义。在今后的研究中,可进一步研究水电企业参与区域电力市场中长期交易的不同交易品种组合策略。

参考文献

[1] 马科. 基于多核并行计算的水库群中长期优化调度研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2014.

[2] 汪明清, 林成, 肖燕, 等. 多种中长期发电优化调度模

[9] 李爽, 王志新, 吴杰. 采用基频零序分量注入的 MMC 换流器故障容错控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 1-7.

[10] 胡静. 基于 MMC 的多端直流输电系统控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[11] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 起动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-7.

[12] 管敏渊. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[13] 曹春刚, 赵成勇, 陈晓芳. MMC-HVDC 系统数学模

型在乌江梯级的应用[J]. 南方电网技术, 2012, 6(s1): 37-39.

[3] 卢立宇, 赵飞, 陶春华, 等. 瀑布沟水电站及下游梯级经济运行方式研究[J]. 水力发电, 2015, 41(4): 63-65.

[4] 刘方, 张粒子. 流域梯级水电优化调度模型与方法研究综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 81-90.

[5] 刘方, 张粒子, 蒋燕, 等. 电力市场环境下梯级水电站中长期调度与检修计划双层优化模型[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1541-1548.

[6] 刘方, 张粒子. 流域梯级水电站中长期调度与跨价区交易组合双层优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 444-456.

[7] 刘方, 张粒子. 计及随机和风险因素的梯级水电调度交易优化模型和方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 870-877.

[8] 罗京蕾, 黄显峰, 方国华. 电力市场交易背景下水电站优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 184-188.

作者简介:

白智丹(1985), 高级工程师, 从事调度自动化工作;
 余 熙(1963), 教授级高级工程师, 主要从事电网系统二次规划工作;
 朱燕梅(1993), 硕士研究生, 从事水电智能运行管理及电力市场研究;
 武云霞(1981), 高级工程师, 从事调度自动化和电力市场工作;
 黄天意(1990), 助理工程师, 从事调度自动化和电力市场工作;
 谢荻雅(1995), 硕士研究生, 从事水电智能运行管理及电力市场研究。

(收稿日期: 2018-10-17)

(上接第 18 页)

型及其控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 13-18.

作者简介:

梁 明(1973), 工学学士、教授级高级工程师, 主要从事输电线路设计工作;
 孟 鑫(1988), 工学博士、工程师, 主要从事输电线路设计工作;
 薛一鸣(1987), 工学硕士、工程师, 主要从事输电线路检修工作;
 王军成(1987), 工学学士、工程师, 主要从事输电线路设计工作。

(收稿日期: 2018-09-18)