

# 基于模块化多电平换流器结构的柔性直流控制策略

胡兆庆,董云龙,田杰,李海英,曹冬明  
(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

**摘要:**介绍了模块化多电平换流器(MMC)在高压直流输电系统中应用,比较了各种多电平方案,推导了模块化多电平换流器结构下高压直流控制方案,在此基础上提出一种适用于MMC的高压直流系统中控制策略,利用动模系统对控制策略进行验证,并给出模拟试验结果。试验结果表明,提出的控制策略对柔性直流系统稳定运行有帮助作用,并且能满足柔性直流基本的控制功能方面的要求。

**关键词:**电压源换流器;控制;模块化多电平;动模

**中图分类号:**TM721.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2013)01-0005-04

在电压源(VSC)型高压直流换流站中,换流器扮演着交直流转换的重要角色,可关断器件则是构成这类换流站的基础。两电平或者三电平结构受单个开关器件耐压限制,需要使用大量开关器件串联,对器件开通关断一致性、串联器件均压特性要求高<sup>[1,2]</sup>,模块化多电平换流器(MMC)使用子模块串联方式其电容电压进行平衡控制<sup>[3,4]</sup>,调制方式选择的研究表明<sup>[5]</sup>,采用合适的换流器控制方式可以降低器件开关频率,减少换流器损耗。这种结构在西门子 TransBay 工程中得到应用<sup>[6]</sup>。文献[7]中对单换流器结构的换流器级和系统级控制进行研究,采用离线软件仿真方式验证控制方式可行性;基于  $dq$  坐标分解的有功和无功解耦控制方法被引入电压源型 HVDC 控制<sup>[8,9]</sup>,这种控制方式对于换流器连接有源网络或者无源网络,通过软件仿真的方式证明是一种合适的方法。目前对于模块化多电平结构换流器控制研究多集中在换流器级离线仿真方面,由于条件限制,难于进行实时仿真。文中在推导模块化多电平结构换流器数学模型基础上,提出了模块化多电平柔性直流输电的系统级控制策略,用物理模型通过按等比例缩小的方式模拟了上海南汇柔性直流输电示范工程参数,采用实际的上位机控制设备和阀控电子设备,对控制策略进行实时仿真研究。

## 1 换流器拓扑

两电平或者三电平换流器结构的共同特点是在直流母线上并联电容器,一旦出现半导体器件故障时,可能会引起最严重的直通故障。另外实际需要使用的二极管、电容数量随着电平数量增加而增加,同时需要滤除高次谐波滤波器。

H 桥串联是一种构成大功率逆变器的结构方式,

但由于这种串联方式需要独立的直流电源作为逆变电源,在进行直流功率传输应用时使用受限制。

MMC 是一种新型的电压源型的换流器结构(如图 1 所示),通过半桥子模块串连达到提高承受电压等级和功率水平的目的,交流侧不需要滤波器,直流侧没有高压电容器组,可以在半导体器件发生故障时避免桥臂直通故障。桥臂电抗器  $L$  的使用有以下优点:

- (1) 限制故障时电流,发生短路故障,可以限制电流上升速度,让半导体器件有足够的时间可靠关断;
- (2) 限制开通瞬间  $di/dt$ , 避免造成半导体器件开通瞬间过大的电流变化率损害器件;
- (3) 在各桥臂电容电压不均衡情况下产生环流,电抗器起到抑制环流作用,同时能够通过给环流的控制提供帮助。

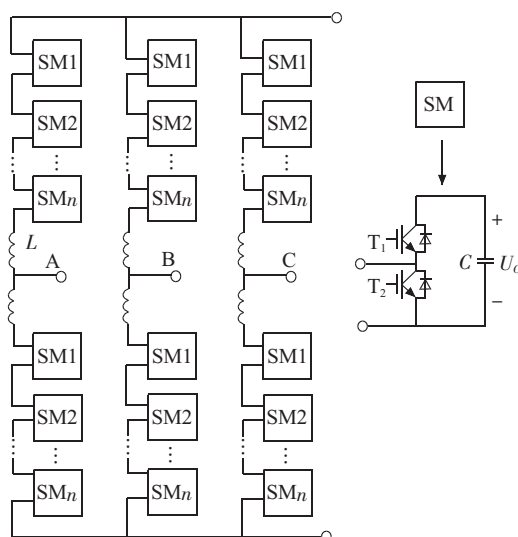


图 1 模块化多电平换流器单站结构

## 2 控制模型和策略

在推导数学模型的基础上提出适用于 MMC 结构的柔性直流输电系统的控制策略。

### 2.1 数学模型

定义单相电压电流的方向如图 2 所示, 正常运行时, 上下桥臂电流为各分阀侧电流的一半, 除此之外, 桥臂电流中还包括直流成分。上桥臂和下桥臂的所有子模块电容可以等效为可控电压源  $u_{C1}, u_{C2}$ , 其中:

$$\begin{cases} u_{C1} = \sum_{i=1}^n S_{pi} U_C \\ u_{C2} = \sum_{i=1}^n S_{ni} U_C \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $S_{pi}, S_{ni}$  分别为上、下桥臂每个 SM 模块对应的开关函数;  $U_C$  为电容电压 (假定所有子模块电容电压都相等, 为  $U_C$ );  $n$  为上或者下桥臂子模块总个数。

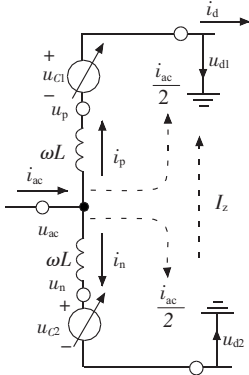


图 2 模型定义电压电流的参考方向

子模块中上下管  $T_1, T_2$  状态是互补的, 对于 1 个 SM 子模块而言, 输出电压在  $U_C$  和 0 两者之间切换, 对应开关函数如表 1 和表 2 所示。

表 1 上桥臂其中 1 个 SM 的开关函数

状态	$i_p$	$T_1$	$T_2$	输出电压	$S_{pi}$
1		ON	OFF	$U_C$	1
2	$i_p > 0$	OFF	ON	0	0
3		OFF	OFF	0	0
4	$i_p < 0$	ON	OFF	$U_C$	1
5		OFF	ON	0	0

表 2 下桥臂其中 1 个 SM 的开关函数

状态	$i_n$	$T_3$	$T_4$	输出电压	$S_{ni}$
1		ON	OFF	$U_C$	1
2	$i_n > 0$	OFF	ON	0	0
3		OFF	OFF	$U_C$	0
4		ON	OFF	$U_C$	1
5	$i_n < 0$	OFF	ON	0	0
6		OFF	OFF	0	0

正常运行时, 对于 1 个子模块而言, 不会出现上下 2 个开关管同时导通或关断的情况, 从表 1 和表 2 可以看出, 正常运行时, 不论桥臂电流的方向如何, 上管开通是将子模块投入, 下管导通是将子模块退出。

在不考虑冗余子模块情况下, 图 2 结合表 1 和表

2 可以推导出:

$$u_{ac} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (S_{ni} - S_{pi}) U_C + \frac{1}{2} L \frac{di_{ac}}{dt} \quad (2)$$

$$u_d = \sum_{i=1}^n (S_{ni} + S_{pi}) U_C - L \frac{d(i_p - i_n)}{dt} \quad (3)$$

由于桥臂电流  $i_p, i_n$  两者的差仅仅剩下直流成分, 可以认为式 (3) 右边第二项为 0, 当采用固定投入上下桥臂子模块总数方式, 可以认为:

$$u_d = NU_C \quad (4)$$

式中:  $N = \sum_{i=1}^n (S_{ni} + S_{pi})$ 。

式 (2) 右侧第一项为上下桥臂投入子模块的电压的差值, 实际为控制输出参考电压, 定义:

$$u_{ref} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (S_{ni} - S_{pi}) U_C \quad (5)$$

得到:

$$u_{ac} = u_{ref} + \frac{1}{2} L \frac{di_{ac}}{dt} \quad (6)$$

这与两电平结构下的控制模型是类似的<sup>[10,11]</sup>。以上式 (6) 在旋转  $dq$  坐标系下表达式为:

$$\frac{di_{acd}}{dt} = \omega i_{acq} + \frac{1}{L_1} u_{acd} - \frac{1}{L_1} u_{refd} \quad (7)$$

$$\frac{di_{acq}}{dt} = -\omega i_{acd} + \frac{1}{L_1} u_{acq} - \frac{1}{L_1} u_{refq} \quad (8)$$

式中:  $L_1 = 0.5L$ ;  $i_{acd}, i_{acq}$  分别为阀侧电流  $i_{ac}$  在  $dq$  轴的分量;  $u_{acd}, u_{acq}$  分别为交流电压  $u_{ac}$  在  $dq$  轴的分量;  $u_{refd}, u_{refq}$  分别为控制输出参考电压在  $dq$  轴的分量。

模块化多电平结构中实际被控制量为上、下桥臂的可控电压源, 上位机控制系统发给阀基控制部分的参考电压实际为:

$$u_{C1}^* = \frac{u_d}{2} - u_{ref} \quad (9)$$

$$u_{C2}^* = \frac{u_d}{2} + u_{ref} \quad (10)$$

式中:  $u_{C1}^*$  为上半桥电容参考电压;  $u_{C2}^*$  为下半桥电容参考电压。对于每个站而言, 三相 6 个桥臂分别需要接收六路参考电压。

## 2.2 相位检测

相位检测关系到系统控制保护检测电压相位的准确性, 采用的检测手段如图 3 所示。

DSP 将采集到的三相交流同步电压测量实时值经过  $\alpha\beta$  变换后, 变换为  $u_\alpha, u_\beta$ , 通过计算得到  $q$  轴分量  $u_q$ , 将  $u_q$  经过 PI 调节环节得到角频率误差  $\Delta\omega, \Delta\omega$  与额定角频率  $\omega_0$  相加后得到实际角频率  $\hat{\omega}$ , 最后再经过积分环节得到相位  $\hat{\theta}$ 。

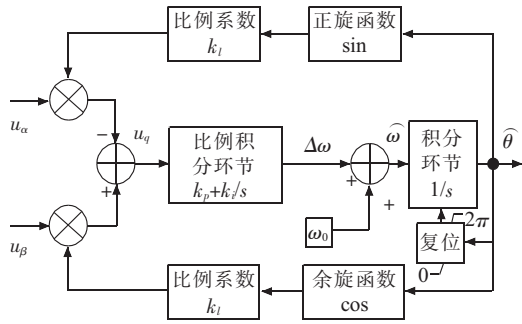


图3 锁相环

### 2.3 控制策略

在柔性直流系统中,交流侧控制策略应能满足交流电压控制以及无功功率控制方面的要求,直流侧则能够保持换流站直流电压的稳定需要<sup>[12]</sup>。实际换流站控制策略如图4所示。

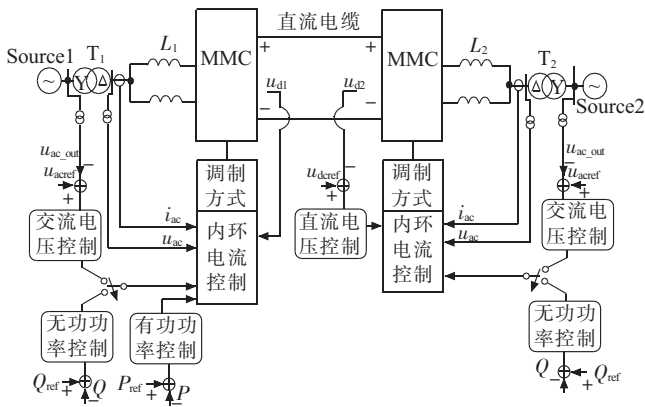


图4 柔性直流控制策略

整流侧以有功功率、交流电压以及无功功率为控制目标,逆变侧以直流电压、交流电压以及无功功率为控制目标。图中内环电流控制是根据外环控制器产生的有功功率和无功功率参考值以及三相电流实时值,通过矢量控制得到的电流参考值,该电流参考值通过参考波生成环节得到电压参考值  $u_{refi}$ , 以及  $u_{refj}$ 。

参考电压  $u_{refi}$  以及  $u_{refj}$  经过变换得到三相基波参考电压,利用三角载波对其进行调制,即可产生脉冲调制波形<sup>[13]</sup>。

### 3 动模仿真验证

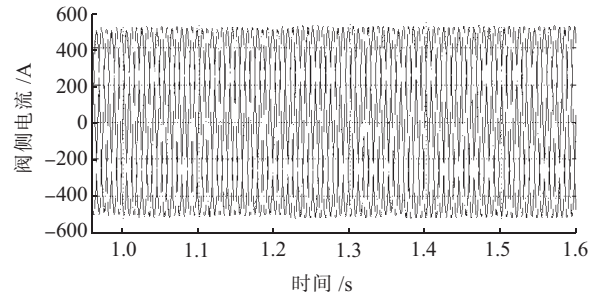
建立图4所示的两端动模系统,动模系统模型以上海柔性直流输电示范工程为依据,具体参数如表3所示。动模阀部分采用49电平MMC,其他一次设备包括变压器、桥臂电抗器物理模型,开关、刀闸用真空接触器来模拟。

利用实际的控制保护装置,与动模系统连接检测控制系统的功能,采用图4所示控制策略,图5为系统满功率运行时站1的波形图,可以看出,控制器输出稳定,交流侧电流平衡性良好,直流电压稳定,交流侧送

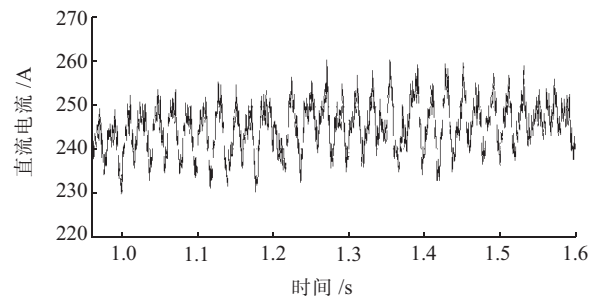
出有功功率稳定在18 MW。

表3 动模系统模拟的上海柔性直流输电系统参数

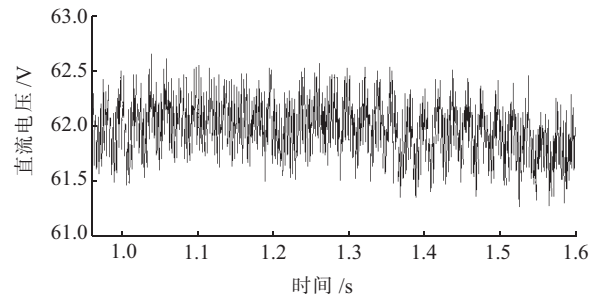
名称	南汇风电场 (送端)	书柔站(受端)
换流器额定容量/(MV·A)	19	19
额定直流功率/MW	18	18
交流系统电压/kV	35	35
额定直流电压/kV	±30	±30
额定直流电流/A	300	300



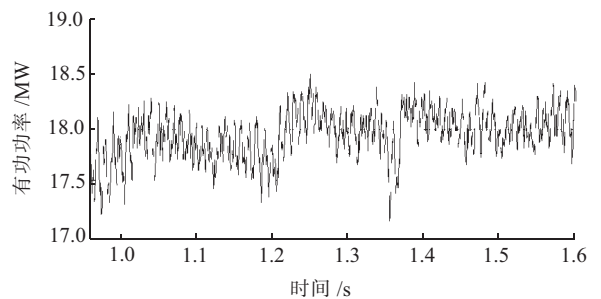
(a) 站1阀侧电流



(b) 正负极直流电流



(c) 站1直流电压



(d) 站1有功功率

图5 动模系统满功率运行

在站1交流侧正送有功功率2 MW情况下,模拟直流正极母线发生金属接地故障100 ms的波形如图6所示。可以看出,大约在0.51 s发生永久闭锁跳闸,

故障期间,正极母线电压接近 0,直流电压调节器将总直流电压控制在 60 kV 左右,直流电压不平衡保护经过一段时间闭锁跳闸。

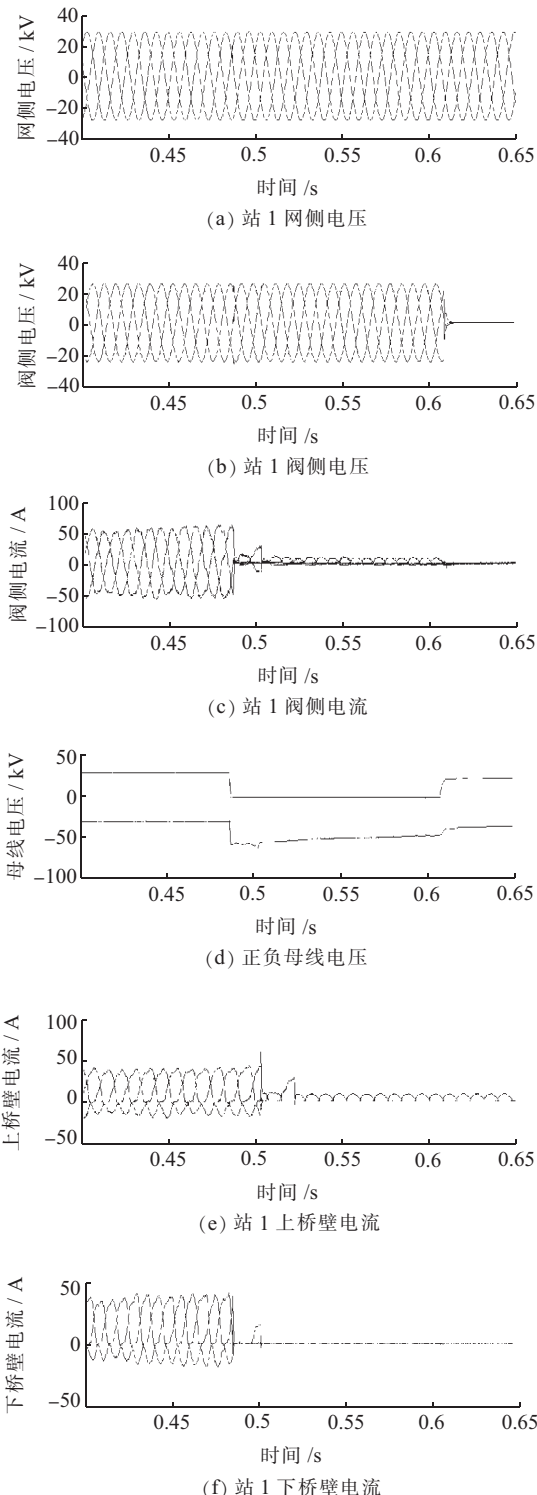


图 6 模拟直流正极母线接地故障

#### 4 结束语

在推导 MMC 模型基础上提出适用于模块化多电平柔性直流换流站的控制策略,根据上海柔性直流输

电示范工程进行了动模实验,在动模平台考察了控制系统满功率运行控制能力,以及控制器在发生系统故障时控制性能,结果表明,控制器在稳态以及暂态过程中具有良好的调节性能,证明了文中提出的柔性直流控制策略适用于实际工程。

#### 参考文献:

- [1] LIU Y H, ZHANG R H, ARRILLAGA J, et al. An Overview of Self-commutating Converters and their Application in Transmission and Distribution [C]. IEEE/PES transmission and distribution conference & exhibition: Asia and Pacific Dalian, 2005.
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
- [3] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
- [4] 李笑倩, 宋强, 刘文华, 等. 采用载波移相调制的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 49-55.
- [5] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
- [6] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. A New Multilevel Voltage-sourced Converter Topology for HVDC Application [C]. CIGRE symposium Osaka 2008.
- [7] 刘钟淇, 宋强, 刘文华, 新型模块化多电平换流器的控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 5-8.
- [8] 陈谦, 唐国庆, 胡铭. 采用  $dq0$  坐标的 VSC-HVDC 稳态模型与控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 61-66.
- [9] 梁海峰, 李庚银, 李广凯, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 45-50.
- [10] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 采用 MMC 变流器的 VSC-HVDC 系统故障态研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 69-71.
- [11] 胡兆庆, 包海龙, 刘隽, 等. 基于 MMC 换流器的高压直流控制策略及接口实现[C]. 第五届江苏省电机工程青年科技论坛文集, 2011.
- [12] OOI B T, WANG X. Voltage Angle Lock Loop Control of the Boost Type PWM Converter for HVDC Application [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 229-235.
- [13] 潘武略, 徐政, 张静. 基于电压源换流器的高压直流输电系统混合调制方式[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 54-58.

#### 作者简介:

- 胡兆庆(1976),男,湖北钟祥人,工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;  
董云龙(1977),男,安徽安庆人,工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;  
田杰(1969),男,四川秀山人,教授级高级工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;  
李海英(1972),男,河北饶阳人,高级工程师,从事超高压直流输电及柔性直流输电研究及开发工作;  
曹冬明(1972),男,江苏泰兴人,高级工程师,从事电力系统自动化工作。

(下转第 12 页)



日前计划潮流,校核出现越限后采用基于安全约束经济调度(SCED)算法的多时段安全校正算法技术。实际电网运行表明所提算法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 武亚光,邓佑满,张锐,等.发电侧电力市场中安全校核算法的研究与实现[J].中国电机工程学报,2001,21(6):49-53.
- [2] 葛朝强,汪德星,葛敏辉,等.华东网调日计划安全校核系统及其扩展[J].电力系统自动化,2008,32(10):49-52.
- [3] 丁 恰,李 鹏,杨胜春.EMS系统日计划安全校核的功能设计[J].电力系统自动化,2007,31(S).
- [4] 王 毅,侯俊贤,马世英,等.用于调度计划安全稳定校核的潮流数据自动整合调整方法[J].电网技术,2010,34(4):105-109.
- [5] 徐 田,於益军,钱玉妹.能量管理系统中发电计划安全校核功能的设计[J].电力系统自动化,2006,30(10):92-96.
- [6] 陈金富,陈海焱,段献忠,等.广西电网运行方式在线自动校核系统设计与应用[J].电力系统自动化,2004,28(14):86-88,92.

- [7] 胡世骏,陈中元,刘充许,等.华东区域电力市场省(市)发电竞价结果安全校核及优化调整系统[J].现代电力,2006,23(6):93-97.
- [8] 李 旻,凌 亮,张 蓓,等.日发电计划的安全校核与校正[J].现代电力,2008,25(2):87-92.

#### 作者简介:

- 丁 恰(1974),男,江苏徐州人,高级工程师,从事电力系统运行优化研究与系统开发工作;
- 王 岗(1978),男,浙江绍兴人,高级工程师,从事电力系统调度运行工作;
- 唐 然(1990),男,江苏南京人,本科,从事电力系统调度计划与安全校核的研究与开发工作;
- 杨乐勇(1985),男,江苏南通人,工程师,从事电力系统运行分析与系统开发工作;
- 张丙金(1987),男,重庆人,助理工程师,从事电力系统运行分析与系统开发工作。

## Security Checking System (SCS) for Daily Generation Scheduling

DING Qia<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>, TANG Ran<sup>1</sup>, ZHANG Bing-jin<sup>1</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Security is an important approach to promote delicacy management of daily dispatch scheduling. Based on analysis of the needs of security checking and design of overall function, in accordance with three master line design which includes data flow center, process control center and data display center, power balance method and plan topology analysis management method based on predictor-corrector thchenology is proposed to form daily schedule power flow, and implement security correction adjustment based on the security constrained economic dispatch (SCED) algorithm after out-of-limit. The calculation speed and accuracy of system for security checking is proved by practical example.

**Key words:** security checking; security correction; security constrained economic dispatch

(上接第8页)

## Control strategy research of VSC-HVDC based on modular multilevel converter

HU Zhao-qing, DONG Yun-long, TIAN Jie, LI Hai-ying, CAO Dong-ming

(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Application of modular multilevel converter (MMC) in VSC-HVDC is introduced, and varies of multilevel schemes are compared. This paper induces the HVDC control scheme for modular multilevel converter, and a suitable control strategy for MMC in HVDC system is proposed, which is verified by using dynamic model with test results. The results manifest that the control strategy is helpful for the stable operation and satisfy the basic control function requirements of HVDC.

**Key words:** voltage source converter; control; modular multilevel converter; dynamic model

### 下 期 要 目

- 变电站户外电气设备防火距离研究
- 换流变压器直流偏磁与饱和保护
- 换流变保护改造分析及试验技术研究
- 一种大规模智能电能表全自动检定系统设计
- 继电保护装置自动化测试系统的设计与实现
- 全光纤电流互感器现场运行误差特性研究
- 江苏省燃煤电厂脱硫石膏排放利用状况及综合利用对策
- 基于随机规划理论的含异步风机的配电网故障重构
- 继电保护装置运行失效性分析与状态检修策略