

## LCC-FMMC 型混合直流输电系统的潮流反转控制策略

许烽, 宣晓华, 黄晓明, 陆羿, 裘鹏, 陈骞  
(浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**基于电网换相换流器(LCC)和全桥型模块化多电平换流器(FMMC),提出了一种更具有灵活性和优越性的 LCC-FMMC 型混合直流输电系统。提出了混合直流潮流反转的控制时序,分析了潮流反转期间交直流系统之间的相互影响关系。针对 LCC 侧交流电压波动和子模块电容电压平衡控制问题,分别提出了交流电压控制策略和电容电压平衡控制策略。仿真结果表明,提出的控制策略能够在保证 LCC 侧交流电压稳定和子模块电容电压平衡的情况下,有效地实现潮流反转,反转过程平滑顺利。

**关键词:**混合直流;电网换相换流器;模块化多电平换流器(MMC);潮流反转

**中图分类号:**TM721.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2015)06-0051-05

电网换相换流器(LCC)制造成本低、技术成熟度高、运行损耗小<sup>[1,2]</sup>;电压源型换流器(VSC)能够独立控制有功无功、不存在换相失败、可为无源孤岛供电,其中,模块化多电平换流器(MMC)更以开关损耗小、扩展性强等优点倍受青睐<sup>[3,4]</sup>。结合 LCC 和 VSC 两者优势,将 LCC 应用于整流站,VSC 用于逆变站的混合直流输电系统具有较为广阔的应用前景。目前,利用 VSC 各类拓扑结构,研究者提出了多种混合直流输电系统<sup>[5-7]</sup>,如 LCC-VSC,LCC-MMC 等。但这些拓扑都存在一些着一些问题,即 VSC 侧不能有效清除直流故障;LCC 侧发生较为严重的交流故障时,会出现功率传输中断;不具有大幅度直流降压运行能力;不能实现潮流反转运行。

为解决这些问题,同时使得直流系统具有更加灵活的运行能力,本文采用由全桥子模块(FBSM)级联而成的全桥型模块化多电平换流器(FMMC)来替代上述 VSC,构成 LCC-FMMC 混合直流输电系统,利用 FMMC 所具有的电压电流四象限运行能力来提升直流的运行控制性能。LCC-FMMC 在潮流反转过程中存在有功无功变化,交流电压波动,子模块电容电压不平衡等需要控制协调的问题,因此本文着重研究潮流反过程的系统相关运行特性,并提出切实可行的控制策略。

## 1 混合直流拓扑结构

单极大地接线形式的 LCC-FMMC 混合直流输电结构如图 1 所示。这是最基本的两端直流拓扑结构。整流站沿用传统直流输电系统配置,采用 12 脉动 LCC 换流器,交流侧出口接有交流滤波器和无功补偿装置,直流侧出口接有直流滤波器。逆变站由 FMMC、接线方式为 Y/Δ 的换流变压器组成。

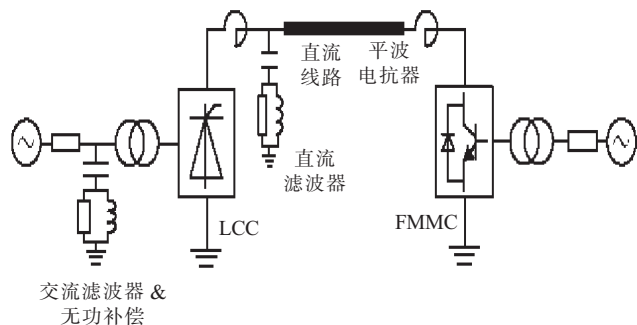


图 1 单极混合直流拓扑结构

FMMC 的拓扑结构如图 2 所示。采用三相六桥臂结构,每桥臂由  $N$  个 FBSM 级联而成,还配置有一个桥臂电抗  $L_0$  以抑制环流和故障电流上升率。FBSM 由 4 个 IGBT 管  $T_1 \sim T_4$  和 1 个电容  $C$  组成,其中  $U_c$  为电容电压。FBSM 具有 4 种运行状态:正投入状态、负投入状态、旁通状态和闭锁状态<sup>[8]</sup>。如表 1 所示。根据流入 FBSM 的电流方向和流经器件的路径,每种运行状态又可分为 2 种具体运行方式。FBSM 上述运行状态,能够使得由其级联构成的桥臂在满足交流系统电压输出要求的同时输出任意额定电压范围内的正、负电压。加之 FBSM 固有的电流双向运行能力,则 FMMC 具有电压电流四象限运行能力。

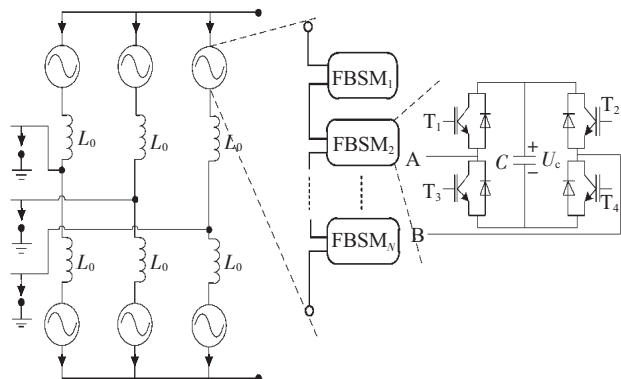


图 2 FMMC 的拓扑结构

表 1 FBSM 的运行状态

运行状态	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	桥臂电流	输出电压	电容充放电特性
正投入	1	0	0	1	A→B	+U <sub>c</sub>	充电
					B→A	+U <sub>c</sub>	放电
负投入	0	1	1	0	A→B	-U <sub>c</sub>	放电
					B→A	-U <sub>c</sub>	充电
旁通	1	1	0	0	—	0	不充电 不放电
					—	0	不充电 不放电
闭锁	0	0	0	0	A→B	+U <sub>c</sub>	充电
					B→A	-U <sub>c</sub>	充电

## 2 潮流反转策略及其影响分析

LCC 由于受晶闸管单向电流导通性的约束,具有电流不可反向电压可反向的特点,因此 LCC-FMMC 只能通过电压反向来实现潮流反转,与 LCC-HVDC 的潮流反转机理相似。通过借鉴 LCC-HVDC 的潮流反转控制时序,本文提出了适用于 LCC-FMMC 的潮流反转控制步骤:(1) 在潮流反转之前,将 LCC 的控制策略切换至定直流电流控制,将 FMMC 的控制策略切换至定直流电压和定交流电压控制;(2) LCC 维持直流电流控制,FMMC 直流电压以一定的速率变化,将其从额定值减小至 0,再从 0 变化至负额定值,同时 FMMC 控制交流侧的电压幅值维持在额定状态;(3) 直流电压反向成功后,LCC 将直流电流调整至系统指定值,然后 LCC 和 FMMC 的控制策略切换至系统指定控制状态;(4) 潮流反转过程结束。

在电压反转过程中,FMMC 由于具有交流电压(无功功率)控制能力,因而整个过渡过程对交流系统的电压影响较小,能够保证交直流系统的稳定运行。但是 LCC 不具有交流电压调节能力,直流功率将随着直流电压的变化,存在一个先降后反送的过程,无功功率由于受直流功率、触发角、换相重叠角等因素的影响,变化更为复杂,对交流系统电压的扰动十分明显。因此在整个潮流反转过程中,要考虑 LCC 对交流系统电压的影响。传统 LCC-HVDC 在直流电压反转前,通常先将直流电流降低至最小值(额定直流电流的 10%),以减小潮流反转过程对系统的扰动<sup>[2]</sup>。但此方法对交流系统无功的总扰动量并未减少。

本文所提出的 LCC-FMMC 型混合直流输电系统采用 FMMC 直流电压反向能力来实现直流电压反向运行。由于 FMMC 直流电压是由子模块堆叠而成,因此在直流电压从额定值降低至 0,再反向增大至负额定值过程中,可有 2 种途径来实现此过程。一是投入等效子模块个数(上下桥臂子模块输出电压总和)不变,子模块电容电压变化;二是子模块电容电压基本不变,

而是等效子模块个数变化。在电压反转过程中,FMMC 侧应始终维持可调制能力,即交流电压输出能力要维持一定的裕度,子模块电容电压的控制选择受其影响。

## 3 LCC 控制策略

从上一节的分析可知,LCC 在潮流反转过程中,功率变化将引起交流侧电压波动,会对交直流系统产生较大的影响。因此本文在 LCC 的定电流控制策略上,引入交流电压控制,以减少交流电压的波动。具体的控制策略如图 3 所示。其中, $U_{sref}$  和  $U_s$  分别为 LCC 交流母线电压的参考值和测量值, $I_{dref}$  和  $I_d$  为直流电压参考值和测量值, $\alpha$  为触发角, $r$  为交流电压控制投切信号,分别以 0 和 1 标识电压控制未投切和已投切。

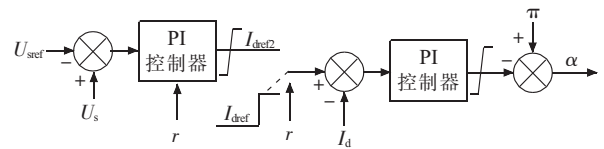


图 3 LCC 直流电流控制框图

图 3 中, $U_{sref}$  来源于控制切换前,稳态运行情况下  $U_s$  的捕捉值; $I_{dref}$  一般设置为 1 p.u.; $I_{dref2}$  为交流电压控制环限幅后的输出值,其中限幅环节需要考虑最小电流(如 0.1 p.u.)和最大电流(如 1.5 p.u.)的运行限制,因此  $I_{dref2}$  只允许在 0.1~1.5 p.u.变化。 $r$  信号一方面用于控制投切,使得直流电流控制的指令值在交流电压控制未投入情况下为  $I_{dref}$ ,投入后为  $I_{dref2}$ ;另一方面, $r$  还作为电压控制环内 PI 控制器的输出重置触发信号,当电压控制被使能时, $r$  信号突变,触发 PI 控制器的输出重置为  $I_{dref}$ ,使得控制切换前后,指令值能够平滑过渡,不至于对系统产生较大的扰动。

通过交流电压外环,直流电流内环的控制方式,不仅能够有效控制交流电压,同时还能控制直流电流在允许范围内变化,不至于出现过流或因电流过小而导致的过电压现象。无论是整流还是逆变状态,LCC 吸收的无功功率  $Q$  可通过下式粗算得到:

$$Q = U_d I_d \sqrt{\left(\frac{U_{d0}}{U_d}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

$$U_{d0} = N_L \times 1.35 U_s \quad (2)$$

式(1,2)中: $U_d$  为直流电压; $N_L$  为一个极中的 6 脉动换流器数。

在交流系统中,虽然有功和无功互相耦合,但是,基本保有“有功看功角,无功看电压”的原则,因此要维持交流母线的电压  $U_s$  不变,主要便是维持上述  $Q$  在整个潮流反向过程中维持恒定。假设直流电压  $U_d$  受 FMMC 控制以一定的斜率变化,那么从式(1)和式(2)

可以推论出:在整个潮流反转过程中,为尽量维持交流电压恒定,直流电流将出现一个先下降后上升的变化过程。

#### 4 FMMC 控制策略

根据 FMMC 内子模块的连接特征,假设每个子模块电容电压的特性相同,可以得到上、下桥臂级联子模块的输出电压分别为<sup>[9,10]</sup>:

$$\begin{cases} u_{pj} = n_{pj} \times U_c \\ u_{nj} = n_{nj} \times U_c \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} n_{pj} = \sum_{i=1}^N n_{ipj} \\ n_{nj} = \sum_{i=1}^N n_{inj} \end{cases} \quad (4)$$

式(3,4)中: $j$ 为 a,b,c 三相; $U_c$ 为子模块电容电压; $n_{ipj}$ 和  $n_{inj}$ 分别为  $j$ 相上桥臂和下桥臂第  $i$ 个子模块的开关函数,根据表 1 所述的正投入、负投入和旁通运行状态,可分别赋值为 1,-1 和 0。 $n_{pj}$ 和  $n_{nj}$ 为  $j$ 相上桥臂和下桥臂的等效开关函数。根据图 2 所示的 FMMC 电路结构,在忽略桥臂电感影响的情况下,可得:

$$\begin{cases} u_{pj} = \frac{1}{2} U_d - u_{vj} \\ u_{nj} = \frac{1}{2} U_d + u_{vj} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $u_{vj}$ 为 FMMC  $j$ 相输出的交流电压。将式(3)带入式(5),并将式(5)上下式分别做差、做和运算,得:

$$U_d = (n_{pj} + n_{nj}) \times U_c \quad (6)$$

$$u_{vj} = \frac{1}{2} (n_{nj} - n_{pj}) U_c \quad (7)$$

从式(6)可以看出,直流电压  $U_d$  的变化可以通过调节  $n_{pj}$ ,  $n_{nj}$  或电容电压  $U_c$  来实现,与第二节所述的 2 种途径相对应。但是 FMMC 交流出口处电压  $u_{vj}$  受交流系统影响,其幅值应维持在可接受范围内,从式(7)可以看出,由于  $n_{pj}$ ,  $n_{nj}$  的变化范围有限,当  $U_c$  过低时,  $u_{vj}$  将不符合运行要求。另一方面,若  $U_c$  跟随  $U_d$  变化,将伴随有大幅度的充放电现象,增加系统运行复杂性。因此应尽量维持  $U_c$  不变。

根据这个原则,提出了如图 4 所示的 FMMC 控制策略,其中  $U_{dref}$  和  $U_{di}$  为 FMMC 侧直流电压的参考值和测量值; $U_{siref}$  和  $U_{si}$  为 FMMC 交流电压的参考值和测量值, $U_{pjref}$  和  $U_{njref}$  为  $j$ 相上、下桥臂电压参考值; $U_{c0}$  为子模块电容电压额定值; $\text{round}(x)$  为最近取整函数; $k(=p, n)$  表示上、下桥臂。 $f_u$  为电压极性标识信号,  $f_u = 1$  或  $f_u = -1$  分别表示直流电压为正或负。

整个控制算法采用目前较为成熟的内外环控制策略和最近电平逼近控制<sup>[10]</sup>。根据图 4 的控制逻辑,经简单地计算后得到:

$$n_{pj} + n_{nj} \approx \text{round}\left(\frac{U_{dref}}{U_{c0}}\right) \quad (8)$$

由于  $U_{c0}$  恒定不变,因此  $(n_{pj} + n_{nj})$  项将随着直流电压  $U_{dref}$  变化。经过控制后,  $U_{dref}$  与  $U_d$  为十分相近的 2 个量,联合式(6)便可知,通过图 4 所示的控制策略,子模块电容电压能够在潮流反转过程中达到保持稳定的效果。

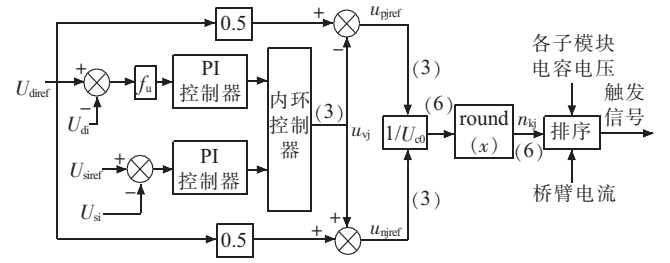


图 4 FMMC 控制框图

#### 5 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 内建立了如图 1 所示的 LCC-FMMC 仿真平台。直流额定电压为 200 kV,额定功率为 200 MW。LCC 采用 12 脉动换流器,LCC 和 FMMC 侧交流线电压有效值均为 345 kV,阻抗分别为  $119 \Omega \angle 75^\circ$  (SCR=5)和  $96 \Omega \angle 75^\circ$ ,换流变压器变比、容量和漏抗分别为 345 kV/90 kV,120 MV·A,0.15 p.u.和 345 kV/110 kV,240 MV·A,0.1 p.u.。FBSM 的电容量和额定电压设置为 6000  $\mu$ F 和 5 kV,故而有  $N=40$ 。直流线路长 250 km,采用 Bergeron 线路模型,电阻为每千米 0.02  $\Omega$ ,感抗为每千米 0.271  $\Omega$ ,容抗为每千米 242.4 M $\Omega$ 。桥臂电抗  $L_0$  为 15 mH,靠近整流站和逆变站的直流侧分别配置 0.15 H 和 0.1 H 的平波电抗器以抑制纹波,限制故障电流上升率。

$t=1.0$  s 时刻,直流系统开始潮流反转,同时在 LCC 侧投入交流电压控制作用,潮流反转速率为 2.0 p.u./s,系统的响应特性如图 5 所示。其中图 5(a)至图 5(f)分别给出了 LCC 侧交流电压有效值  $U_s$ 、直流电压  $U_d$ 、直流电流  $I_d$ 、触发角  $\alpha$ 、子模块电容电压  $U_c$ 、A 相上桥臂等效开关函数  $n_{pa}$  的响应曲线。

从图 5 可以看出,直流电压能够顺利实现反向,在直流电压变化过程中,LCC 侧交流电压能够有效控制在 0.98~1.02 p.u.,直流电流出现了一个先减小后增大的变化过程,与第三节的分析相符。随着直流电压的变化,LCC 的触发角逐渐增大,从整流状态逐渐转变为逆变状态,同时 FMMC 的子模块电压开始出现变化,

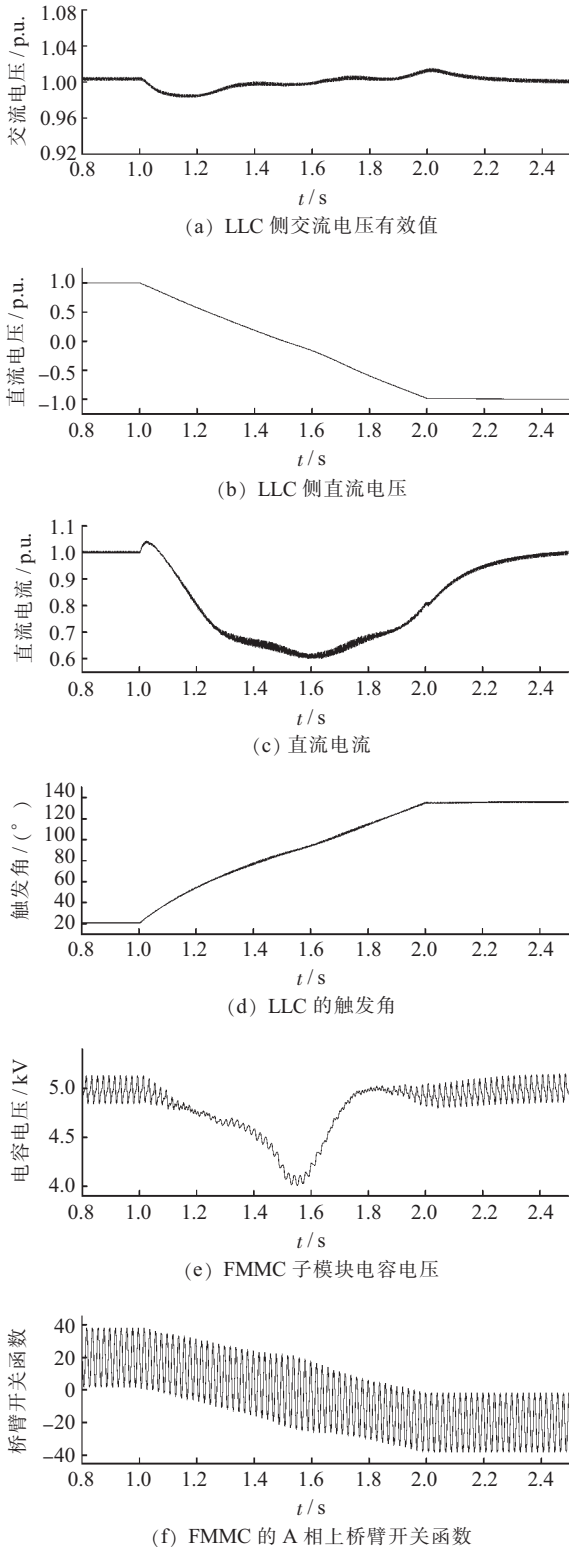


图 5 LCC 交流电压控制使能下的系统响应特性

但其能够快速恢复至额定状态。

若直流系统不投入交流电压控制功能,整个潮流反转过程始终维持直流电流为 1.0 p.u.,图 6 给出了 LCC 侧交流电压有效值和 LCC 吸收的无功功率(不包含滤波器和无功补偿器)的响应曲线。从图 6 可以看出,随着潮流反转的进行,LCC 吸收的无功功率存在一个先增大后减小的过程。稳态情况下,无功功率为

127 Mvar,潮流反转下的无功最大值为 225 Mvar,高出额定值 77%。随着无功的变化,交流电压相应的出现了一个先降后升的过程,最小电压为 0.9 p.u.。与图 5 相比,足见交流电压控制的有效性。

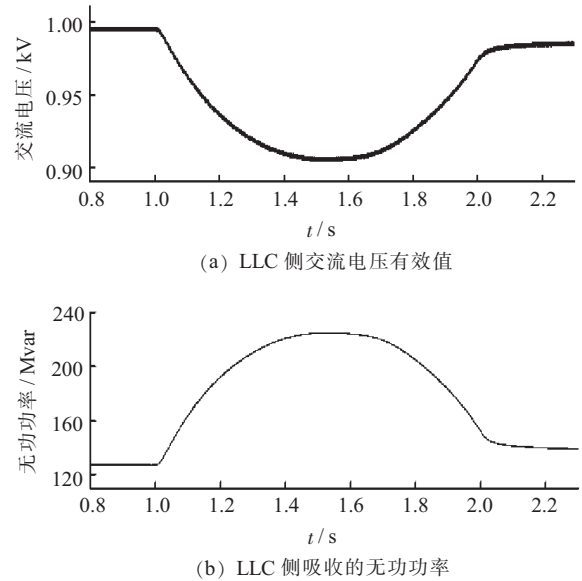


图 6 LCC 交流电压控制未使能下的系统响应特性

## 6 结束语

针对 LCC-FMMC 型混合直流输电系统的潮流反转控制,本文提出了潮流反转时序。理论推导了 LCC 侧定交流电压控制情况下,LCC 吸收的无功功率和直流电流的变化趋势,并给出相应的控制策略;推导了子模块电容电压在潮流反转期间的可能变化方式,得出电容电压需维持平衡的结论,并给出电容电压的平衡控制策略。仿真结果证明了理论分析的正确性和控制策略的有效性。

### 参考文献:

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:1-10.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:14-16.
- [3] 孔明,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平 HVDC 输电系统功率运行区间的优化方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):45-52.
- [4] 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.
- [5] 李广凯,李庚银,梁海峰,等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电网技术,2006,30(4):82-86.
- [6] KOTB O, SOOD V K. A Hybrid HVDC Transmission System Supplying a Passive Load[C]// 2010 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC). August 25-27. Halifax, CA; IEEE, 2010: 1-5.
- [7] CHEN X, SUN H, WEN J, et al. Integrating Wind Farm to the Grid Using Hybrid Multiterminal HVDC Technology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2):965-972.

- [8] ZHAO C, XU J, LI T. DC Faults Ride-through Capability Analysis of Full-bridge MMC-MTDC System [J]. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56(1): 253-261.
- [9] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(1): 1-7.
- [10] 杨晓峰. 模块组合多电平变换器(MMC)研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

作者简介:

许 烽(1988), 男, 浙江上虞人, 工程师, 研究方向为高压直流输电

和柔性直流输电及大功率电力电子技术;  
宣晓华(1965), 男, 浙江诸暨人, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护和计算机自动化;  
黄晓明(1969), 男, 浙江绍兴人, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护和计算机自动化;  
陆 羿(1979), 男, 浙江嘉善人, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术;  
裘 鹏(1985), 男, 浙江嵊州人, 工程师, 研究方向为高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术;  
陈 骞(1987), 男, 浙江金华人, 工程师, 研究方向为高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术。

## Power Flow Reversal Control Strategy for the Hybrid HVDC System Based on LCC and FMMC

XU Feng, XUAN Xiaohua, HUANG Xiaoming, LU Yi, QIU Peng, CHEN Qian  
(State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Combining the line commutated converter (LCC) and the full bridge modular multilevel converter (FMMC), the LCC-FMMC hybrid HVDC system which is more flexible and excellent is proposed. The control sequence of hybrid DC power flow is presented, and the relationship of the interaction between the AC and DC systems during power flow reversal is analyzed. The AC voltage control strategy and the capacitor voltage balancing control strategy are proposed for the problems of the AC voltage fluctuation on the LCC side and the sub-module capacitor voltage balancing. The simulation results show that the proposed control strategy can effectively realize power flow smooth reversal while guaranteeing the AC voltage on the LCC side stable and the sub-module capacitor voltage balanced.

**Key words:** hybrid HVDC; line commutated converter; modular multilevel converter (MMC); power flow reversal

(上接第 50 页)

- [12] 张 曼, 张春朋, 姜齐荣, 等. 统一潮流控制器多目标协调控制策略研究 [J]. *电网技术*, 2014, 38(4): 1008-1013.
- [13] 蔡 晖, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用 [J]. *电力建设*, 2015, 36(8): 73-78.
- [14] 王 旭, 祁万春, 黄俊辉, 等. 柔性交流输电技术在江苏电网中的应用 [J]. *电力建设*, 2014, 35(11): 92-96.

作者简介:

蔡 晖(1984), 男, 江苏盐城人, 工程师, 研究方向为电力系统规划

技术;  
祁万春(1979), 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划技术;  
黄俊辉(1965), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 研究方向为电网规划研究及管理;  
谢珍建(1980), 男, 重庆人, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划技术;  
孙文涛(1986), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 研究方向为电力系统规划技术。

## Research on the Control Strategy in UPFC-connected Power Systems

CAI Hui, QI Wanchun, HUANG Junhui, XIE Zhenjian, SUN Wentao  
(State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Some operating constraints, such as unbalanced power flow distributions and limited transfer capacities of the power imported channels, exists in the current and developing Nanjing western grids. Therefore, the power supply to the grid cannot meet load increase. However, the Nanjing western grid is located in the center of Nanjing, which makes it huge-invested and hard-implemented to build a new transmission channel or to expand the transmission capacities of the current channels. To solve this problem, UPFC (unified power flow controller) is applied to balance the power flows among the current transmission channels and to increase the power-imported capacities. Meanwhile UPFC induces large impacts to the system reliability. In order to improve operating reliability, the dynamic characteristics and control strategies for the grid have been investigated. In the end, the UPFC electromechanical dynamic model and system control strategy are proposed, which are the theoretical basis for guaranteeing system operating reliability.

**Key words:** unified power flow controller (UPFC); electromechanical transient model; system control strategy; transient response characteristics