

含统一潮流控制器的系统控制策略研究

蔡 晖, 祁万春, 黄俊辉, 谢珍建, 孙文涛

(江苏省电力公司电力经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

摘 要: 南京 220 kV 西环网近远期均存在潮流分布不均、存在供电瓶颈, 不能满足负荷发展需求的问题。而南京西环网地处南京中心城区, 无论是新建输电通道还是对现有通道实施增容改造, 均存在投资巨大、实施难度大的问题。统一潮流控制器 (UPFC) 的投运能够均衡南京西环网各输电通道潮流, 提升西环网的供电能力。与此同时, UPFC 等柔性输电设备接入系统也会对电力系统稳定特性产生较大的影响。因此为改善 UPFC 接入系统后系统的稳定性, 文中针对 UPFC 装置接入后的系统暂态特性及控制策略进行研究。通过对 UPFC 机电暂态模型的建立及系统级控制策略的制定, 为 UPFC 装置接入南京西环网后电网的安全稳定运行, 做好理论和应用方面的准备。

关键词: UPFC; 机电暂态建模; 系统级控制策略; 暂态响应特性

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2015)06-0046-05

随着社会经济发展和能源变革、互联网信息技术和材料科学的进步以及特高压等工程新技术的应用, 传统电力系统正面临新的变革和技术挑战^[1,2]。在电网规模扩大、电压等级升高及互联程度增加的同时, 对电网的安全可控程度及其对不同电源、负荷发展变化的适应性要求也愈加提高。柔性交流输电技术作为电力系统控制和电力电子技术相融合的产物, 由于其先进的电网控制特性、显著提高输电限额和改善电力系统暂态特性的能力以及对电网不同运行方式的广泛适应性, 引起电力系统工程界的广泛关注和青睐。它采用可靠性高的大功率可控硅元件代替机械式高压开关, 使电力系统中影响潮流分布的 3 个主要电气参数 (电压、阻抗及功率相角) 可按照系统的需要迅速调整, 大幅度提高系统稳定性、可靠性^[3-6]。

统一潮流控制器 (UPFC) 是一种先进的柔性交流输电装置, 能同时控制母线电压、线路有功和无功潮流, 具有灵活控制系统潮流、最大化电网传输能力及改善系统稳定性等多种功能, 代表着柔性交流输电技术发展的制高点^[7-12]。UPFC 的核心是基于全控器件的电压源换流器。UPFC 的变流器含有较高开关频率的电力电子器件, 因此适合采用电磁暂态仿真研究其本身的暂态特性, 但是受电磁暂态仿真速度和规模的限制, 电磁暂态仿真并不适合用于研究大规模交直流系统之间的相互作用。在对含 UPFC 的交直流输电系统进行稳定性分析时, 可以忽略谐波对系统的影响, 只需考虑柔性直流输电系统基频下的运行与控制特性。因此建立一个能够正确反映 UPFC 系统基频暂态特性的机电暂态模型即可较精确地对含有 UPFC 的交直流系统的稳定性开展研究, 并以此来建立适应该交直流系统的系统控制策略。

本文首先简要介绍 UPFC 的暂态模型; 随后针对南京西环网近况及未来发展中存在的问题, 阐述 UPFC 在南京西环网投运的可行性、必要性和必然性, 并根据南京西环网的网架特征, 对 UPFC 的系统控制策略进行讨论与研究; 最后利用建立 UPFC 暂态模型和系统控制策略对 UPFC 投运后系统暂态特性进行分析, 并得出结论: 南京西环网 UPFC 工程具有较好的暂态特性, 所设定的系统级控制策略具有较强适应性。

1 UPFC 的暂态建模

UPFC 的数学模型由 VSC 换流器及电流内环控制器模型、外环控制器模型组成。

1.1 VSC 换流器及电流内环控制器

UPFC 的 VSC 换流器及电流内环控制器的模型如图 1 所示。

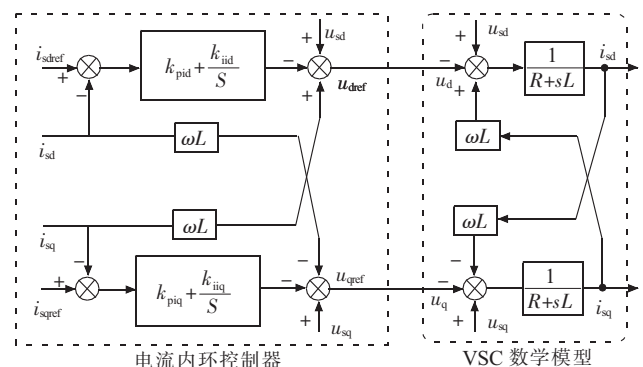


图 1 含电流内环控制器的 VSC 控制系统结构图

图 1 中电流内环控制器通过调节 VSC 换流器的输出电压参考值 u_{dref} 和 u_{qref} , 使交流侧电流的 d, q 轴分量 i_{sd} 和 i_{sq} 跟踪外环控制器输出的电流指令值 i_{sdref} 和 i_{sqref} 。为消除 d, q 轴之间的电流耦合和电网电压扰动, VSC 换流器可采用电流解耦控制, 其电流控制器的 d 轴和 q 轴成为 2 个独立的控制环。

图 1 中的 UPFC 输出电压参考值 u_{dref} 和 u_{qref} 的计算公式:

$$\begin{cases} u_{dref} = u_{sd} + \omega L i_{sq} - (k_{pid} + \frac{k_{iid}}{S})(i_{sdref} - i_{sd}) \\ u_{qref} = u_{sq} + \omega L i_{sd} - (k_{piq} + \frac{k_{iiq}}{S})(i_{sqref} - i_{sq}) \end{cases} \quad (1)$$

现引入 2 个新的状态变量:

$$\begin{cases} M_{id} = \frac{k_{iid}}{S}(i_{sdref} - i_{sd}) \\ M_{iq} = \frac{k_{iiq}}{S}(i_{sqref} - i_{sq}) \end{cases} \quad (2)$$

则可得到状态变量 M_{id} 和 M_{iq} 时域下的 2 个微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dM_{id}}{dt} = k_{iid}(i_{sdref} - i_{sd}) \\ \frac{dM_{iq}}{dt} = k_{iiq}(i_{sqref} - i_{sq}) \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(1),得:

$$\begin{cases} u_{dref} = u_{sd} + \omega L i_{sq} - [k_{pid}(i_{sdref} - i_{sd}) + M_{id}] \\ u_{qref} = u_{sq} + \omega L i_{sd} - [k_{piq}(i_{sqref} - i_{sq}) + M_{iq}] \end{cases} \quad (4)$$

1.2 外环控制器模型

外环控制器向内环电流控制器提供交流侧电流的 d, q 轴分量的指令值 i_{sdref} 和 i_{sqref} 。为达到 UPFC 的控制目标, VSC 换流器主要有定直流电压控制、定交流电压控制、定线路潮流有功分量控制、定线路潮流无功分量控制、定串联电压幅值控制、定串联电压相角控制等基本控制方式。为了保持系统有功平衡和直流电压稳定,必须有一个 VSC 换流器采用定直流电压控制。VSC 换流器所采用的控制方式及控制目标指令值由 UPFC 系统级控制策略产生。并联 VSC 换流器可采用定直流电压控制和定交流电压控制,串联 VSC 换流器可采用定线路有功潮流控制、定线路无功潮流控制或定串联电压幅值控制、定串联电压相角控制。

外环控制方式的框图如图 2 所示。 U_1 为并联 VSC 换流器接入母线电压幅值; P, Q 分别为被控线路传输的有功、无功功率; U_{se}, θ 分别为串联变压器向系统注入的电压幅值和相角。 U_{dref} 为直流母线电压幅值的指令值; U_{1ref} 为并联 VSC 换流器接入母线电压幅值的指令值; P_{ref}, Q_{ref} 分别为被控线路传输的有功、无功功率的指令值; U_{serref}, θ_{ref} 分别为串联变压器向系统注入的电压幅值和相角的指令值。

2 南京西环网 UPFC 工程简介

南京西环网系指南京主城 220 kV 环网西部是南京城网主要负荷中心。目前,该区域供电电源主要由

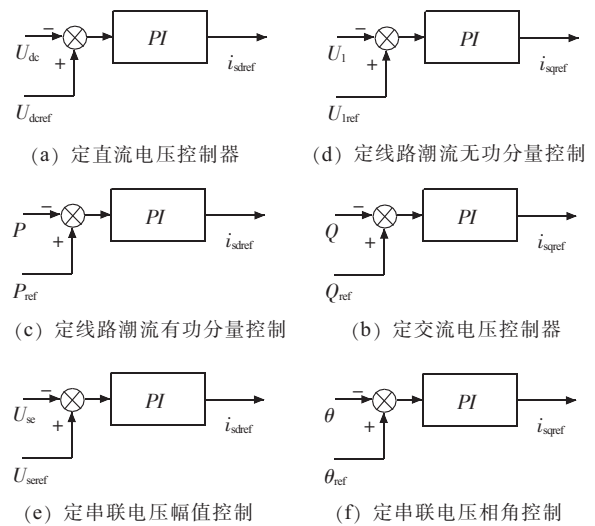


图 2 含功率外环控制器的 VSC 控制系统结构图

500 kV 东善桥变、龙王山变从南北两端共同供电,区域内还有华润板桥电厂、华能南京电厂等机组。2016 年为满足负荷的增长,南京西环网拟建设 500 kV 秦淮变向西环网中南部地区供电,同时相应配套秦淮—滨南第二通道(其中绝大部分为电缆通道)也于同期投运。2017 年至 2020 年,根据规划,南京电网还将投运 500 kV 秋藤变向西环网供电^[13,14],如图 3 所示。

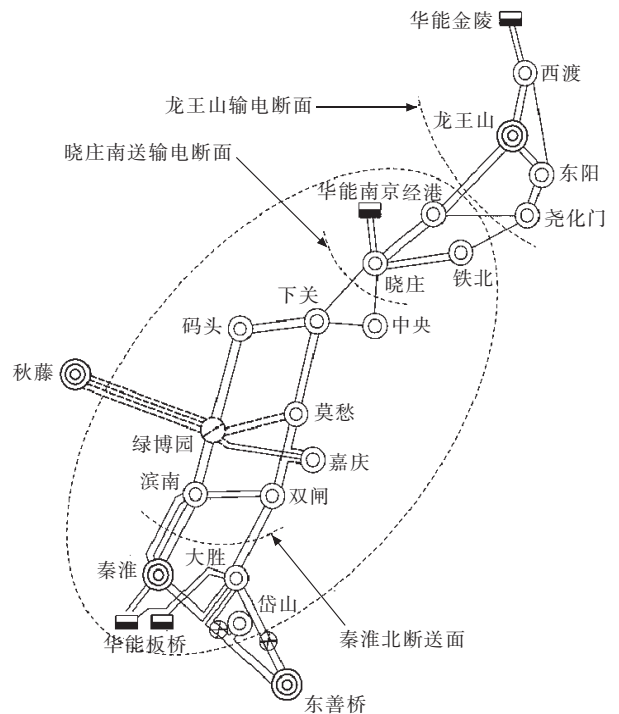


图 3 南京西环网系统接线示意图

由于南京主城环网的电网结构及电源、负荷分布特点,上述西环网供电的主要输电通道存在较严重的潮流分布不均情况,其中 500 kV 龙王山变向西环网的 220 kV 输电通道潮流偏重,尤其是西环网内 220 kV 晓庄南送下关、中央门断面潮流过重情况尤为突出,而 500 kV 东善桥变向西环网的 220 kV 输电通道潮流

较轻,从而影响了南京电网向西环网的整体供电能力和安全可靠水平。500 kV 秋藤变及配套 220 kV 送出线路投运后,虽然在一定程度上减缓了西环网北部 220 kV 送电断面的潮流,但由于负荷的增加,西环网部分输电断面(晓庄南送断面、绿博园送出断面)潮流仍无法满足 N-1 校核。因此负荷的增长迫切需要采取措施来提高西环网的供电能力和安全可靠水平。

在南京西环网采用常规规划方案来提升供电能力面临“两难”局面。一是近期和远期的“两难”,近期增加通道,代价高昂;远期不发挥作用。二是供电能力和安全可靠兼顾的“两难”,为保证潮流均衡,需开断西环网,但变电站和电网的安全可靠水平下降。同时,南京西环网又具备了适合应用柔性输电技术的如下特点:

(1) 从区外两端受电的模式不变,区内负荷增长较为平缓,电网网架结构相对稳定;

(2) 区内输电通道的开辟极为困难;

(3) 潮流分布不均,在电网总体输电能力不足的同时又有部分输电通道潮流较轻,输电能力得不到发挥。

经研究发现,近期南京西环网需要减轻晓庄南送断面的潮流,以保证其满足 N-1 校核;远景(华能南京关停后)则需要提升晓庄南送通道的潮流,减轻秋藤北送通道的输电压力。另外西环网开机方式对潮流控制的需求也有影响,当华能南京机组或华能金陵燃机停机时,可能出现潮流控制需求由减轻潮流到提升潮流的变化。

因此南京西环网装设的柔性潮流控制装置应具备暂态双向调节潮流的能力。尽管应用 UPFC 的方案在投资上略高于应用晶闸管分级投切移相器的方案,但在潮流控制能力、可靠性、技术成熟度等方面全面占优。所以在南京西环网更适合建设 UPFC 工程来解决其潮流分布不均、供电能力受限的问题。

UPFC 工程的控制目标是通过控制晓庄南送断面的功率优化南京西环网的潮流分布。为实现 UPFC 的潮流控制目标,南京西环网 UPFC 工程最终决定在铁北开关站,采用如下系统方案,如图 4 所示。在推荐的系统方案下,晓庄变仅有华能南京电厂、铁北 2 个方向的电源进线。由于电厂出力及晓庄变负荷在短时间内不会频繁突变,因此 UPFC 能够通过控制晓庄—铁北双线潮流将晓庄南送断面的潮流控制到目标值。

3 UPFC 接入系统后的控制策略

3.1 控制模式

UPFC 装置在运行时存在 2 种控制模式。

(1) 模式 1(按功率目标控制模式):UPFC 装置按系统级控制策略自动或运行人员手动确定的铁北—晓庄线路的有功、无功控制目标自动调节 UPFC 需要输

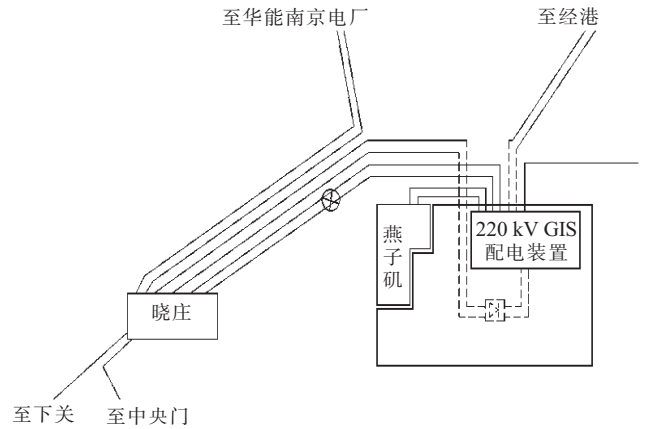


图 4 南京西环网 UPFC 接入系统方案图

出的电压幅值、相角,从而将铁北—晓庄线路功率控制到设定值。

(2) 模式 2(定串联电压模式):UPFC 装置直接按运行人员手动指定或装置在最小运行方式下自动指定的 UPFC 输出电压幅值、相角目标将 UPFC 输出电压幅值、相角控制到目标值,从而调节潮流。

上述 2 种模式中,正常情况下主要使用模式 1。在模式 2 下,UPFC 基本按固定移相角的方式调节电网潮流,控制效果与移相变压器类似。南京西环网 UPFC 系统级控制原理框架如图 5 所示。

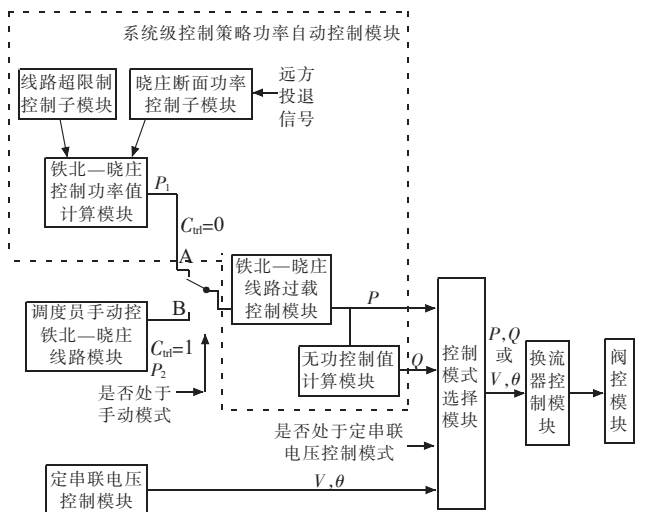


图 5 南京西环网 UPFC 系统级控制原理框图

在分析电网正常运行状态以及南京电网不同地区 N-1 故障后 UPFC 的控制目标值变化情况后,提出如图 6 所示的系统级控制策略。所制定的系统级控制策略,在电网正常运行状态下优先保证断面潮流控制目标,在系统发生故障导致线路过载时优先保证线路不超过其功率限值。

3.2 控制思路

UPFC 在运行过程中,其系统级控制思路。

(1) 系统正常运行状态下,如果监测的线路一直未过载,则 UPFC 装置控制目标由断面功率控制模块

当晓庄南送断面 1 回线发生三相永久故障时,为保证 UPFC 装置安全,在故障切除前 UPFC 换流器会退出运行,在故障切除后,UPFC 将重新投入。在预定的控制策略下,晓庄南送断面 N-1(三相故障跳开)后断面功率变化曲线如图 8 所示。

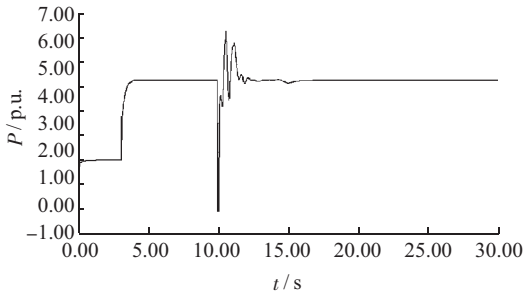


图 8 晓庄南送断面功率变化曲线

图 8 中,UPFC 在 3 s 开始调节线路功率;9.88 s 晓庄—中央线路发生三相永久故障,UPFC 退出;10 s 故障切除,UPFC 重新投入。当 220 kV 绿博园—码头 1 回线发生三相永久故障时,为保证 UPFC 装置安全,在故障切除前 UPFC 换流器会退出运行,在故障切除后,UPFC 将重新投入。在预定的控制策略下,220 kV 绿博园—码头双线 N-1(三相故障跳开)后剩下 1 回线功率变化曲线如图 9 所示。

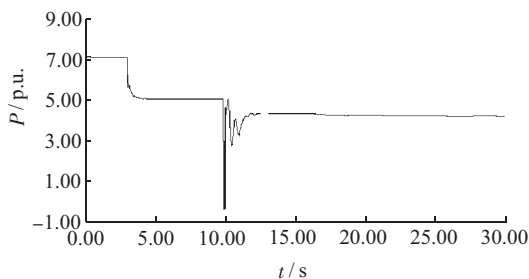


图 9 绿博园—码头断面功率变化曲线

图 9 中,UPFC 在 3 s 开始调节线路功率;9.88 s 绿博园—码头 1 回线路发生三相永久故障,UPFC 退出;10 s 故障切除,UPFC 重新投入。

由图 8、图 9 可知,在晓庄南送断面或 220 kV 绿博园—码头双线发生较严重地故障冲击(三相故障跳线路)的情况下,系统能够保持稳定,UPFC 能够控制潮流使得事故后剩下的 1 回线潮流不越限。可见 2020 年华能南京电厂关停、500 kV 秋藤变电站江南侧主变投运后,UPFC 仍具有较好的暂态特性,不仅能够在系统未发生扰动时迅速实现功率控制目标;在系统发生较轻的大扰动(无故障跳线路)及较严重的大扰动(三相故障跳线路)后,均能保持系统稳定,并实现其潮流控制目标。

仿真结果显示,本文所建立的 UPFC 机电暂态模型能够很好地描述含 UPFC 的系统在故障过程中的机电暂态过程;控制策略对电网正常运行状态以及南京电网不同地区 N-1 故障均具有较好的适应性。

5 结束语

(1) 推导了 UPFC 的机电暂态模型,实现了含 UPFC 的系统潮流计算和机电暂态仿真。

(2) 提出南京西环网 UPFC 系统级控制策略。所制定的系统级控制策略,在电网正常运行状态下优先保证断面潮流控制目标,在系统发生故障导致线路过载时优先保证线路不超过其功率限值。

(3) 选取 2020 年华能南京电厂关停、500 kV 秋藤变电站江南侧主变投运后的典型数据,研究了在所设定的系统级控制策略下,系统发生 N-1 故障时的暂态响应特性。仿真结果显示,UPFC 工程具有较好的暂态特性,不仅能够在系统未发生扰动时迅速实现功率控制目标,在系统发生较轻的大扰动(无故障跳线路)以及较严重的大扰动(三相故障跳线路)后,UPFC 均能迅速地平息振荡,实现其控制目标,优先保证了线路不过载,同时所设定的系统级控制策略也具有较好的适应性。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社,2013: 1-22.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社,2012: 1-25.
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望—试论三代电网[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):1-11.
- [4] 陈珩. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社,2007: 25-48.
- [5] 国家电网公司建设运行部,中国电力科学研究院. 灵活交流输电技术在国家骨干电网中的工程应用[M]. 北京:中国电力出版社,2008:1-20.
- [6] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003: 1-30.
- [7] GALVANI S, HAGH M T, SHARIFIAN M B. Unified Power Flow Controller Impact on Power System Predictability [J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2014, 08(5): 819-827.
- [8] GOLSHANNAVAZ S, AMINIFAR F, NAZARPOUR D. Application of UPFC to Enhancing Oscillatory Reponse of Series-Compensated Wind Farm Integrations [J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2014, 05(4): 1961-1968.
- [9] HASSAN L H, MOGHAVVEMI M, ALMURIB H A F, et al. A Coordinated Design of PSSs and UPFC-based Stabilizer Using Genetic Algorithm [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2014, 50(5): 2957-2966.
- [10] SAYED M A, TAKESHITA T. Line Loss Minimization in Isolated Substations and Multiple Loop Distribution Systems Using the UPFC [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5813-5822.
- [11] 刘新. 统一潮流控制器(UPFC)的建模与应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.

- [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