

# UHVDC 多信号直流调制提高系统暂态稳定性的研究

严 栋<sup>1</sup>, 蒋 平<sup>1</sup>, 刘建坤<sup>2</sup>, 赵静波<sup>2</sup>

(1.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

**摘 要:**特高压直流输电(UHVDC)输电容量大、控制灵活迅速,在我国“西电东送”战略中扮演了重要角色。在传统的直流调制基础上提出了多种信号综合调制的方法,并采用极点配置法整定控制器参数。通过 PSCAD/EMTDC 软件对锦屏-苏南特高压接入江苏电网进行了仿真研究,结果表明,多信号直流调制能进一步有效提高交流系统的暂态稳定性,取得较好的控制效果。

**关键词:**特高压直流;暂态稳定;直流调制;PSCAD/EMTDC 仿真

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2012)03-0009-04

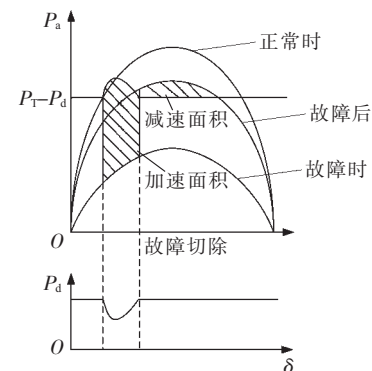
我国能源和负荷的地理分布不均,决定了我国要解决电力供应的问题,就必须充分发挥电网的互补调剂及区域负荷错峰作用<sup>[1]</sup>。特高压直流输电(UHVDC)是 $\pm 500$  kV 高压直流(HVDC)之上采用更高一级电压等级( $\pm 800$  kV)的直流输电技术。其电压等级更高、传输功率更大,能更大地降低线路损耗。但 UHVDC 的性能极大地依赖于控制系统<sup>[2]</sup>。制定一个可行、可靠的控制策略十分重要而且必要。综合目前交直流互联系统的暂态稳定控制策略,UHVDC 的直流调制得到了极大关注。文献[3]研究了交直流混联系统的直流快速调制对暂态稳定的贡献。文献[4]提出了一种 HVDC 暂态稳定控制策略参与交直流并联系统的功率调节。文献[5]研究了交直流互联电网直流功率调制相关问题,包括直流功率调制信号的选择、直流调制控制器的设计及其参数协调优化等。文献[6]采用双侧频率调制改善送端交直流系统的暂态稳定性。文献[7]研究了直流系统在一定的控制方式下,调制增益的变化对系统暂态稳定裕度及直流系统的影响。然而,传统的直流调制一般仅采用单个控制信号进行调制,网络规模较大时,调制效果可能不能令人满意。文中在 UHVDC 基本控制功能的基础上,制定附加控制策略,设计了多信号直流调制控制器并采用极点配置法整定控制器参数。通过在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立电磁暂态仿真模型,验证了 UHVDC 提高交流系统暂态稳定性的效果。

## 1 直流调制基本原理

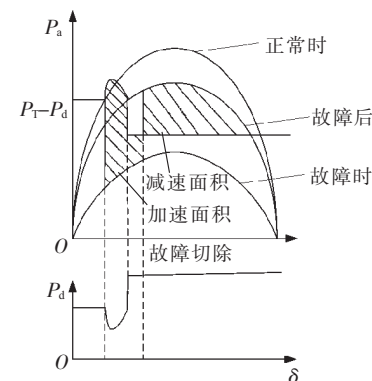
直流功率调制<sup>[8]</sup>的原理是在已有的直流输电控制系统中加入附加的直流调制器,从交流系统中提取反映系统异常的信号,调节直流输电线路传输功率,使之快速吸收或补偿其所连交流系统中的功

率过剩或缺额,起到紧急支援和阻尼振荡的作用。

UHVDC 的直流调制提高系统稳定性的作用可用图 1 所示的等面积法则说明。



(a) 未采用直流调制的交流系统功角特性



(b) 采用直流调制后的交流系统功角特性

图 1 UHVDC 直流调制提高系统稳定性的作用

未采用直流调制的交流系统功角特性如图 1(a)所示,直流功率在故障后仅恢复故障前水平,交流系统获得的减速能量无明显增加,系统有可能失稳。而采用直流功率调制后的交流系统功角特性如图 1(b)所示,直流功率在故障后通过调制功能提升了传输的直流功率,使交流系统获得的减速能量增加,交流系统保持稳定的可能性大大增加。

好的调制效果要求所选取的调制信号中必须包含系统的被控模态。在某些情况下,为获得好的调制

效果,所选取的调制信号应由反映系统实时状态的信号组成,而不应只局限于某一个信号。直流功率调制可选用下列参数作为输入信号。

(1) 发电机角频率调制。研究表明,直流功率的变化可由某台发电机的角速度变化量 $\Delta\omega$ 决定。

(2) 双侧频率功率调制。频率是表征系统有功功率是否平衡的一个关键量<sup>[6]</sup>。当系统发生故障(如短路、断线)后,有功功率将无法保持平衡,从而引起系统频率的变化。

(3) 交流线功率信号调制。正常运行时,系统的潮流一般不会发生明显变化;而当发生故障时,系统潮流会发生重新分配,交流线路上传输的功率会有剧烈变化。

以上各单信号调制各有优缺点。为充分发挥各信号的优势,取得更好的控制效果,采用多信号直流控制器,将上述单信号进行加权综合。

## 2 直流调制控制器设计

### 2.1 单信号控制器设计及参数整定

对采用不同调制信号的直流调制控制器进行设计和参数整定时,采用极点配置的方法。在交直流系统中,以直流电流整定值增量 $\Delta I$ 作为控制变量,附加控制的调制信号为被控变量 $\Delta X$ (即直流调制的调制信号)。则 $\Delta I$ 到 $\Delta X$ 的开环传递函数 $G(s)$ 框图如图2(a)所示。引入 $\Delta X$ 作为反馈变量,系统闭环传递函数 $G_c(s)$ 框图如图2(b)所示。

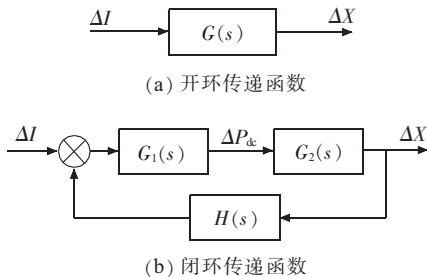


图2 系统传递函数框图

系统的闭环传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta I(s)} = \frac{G(s)}{1 - G(s)H(s)} \quad (1)$$

其中: $G(s) = G_1(s)G_2(s)$ 。

由上式可知,闭环系统的特征方程为:

$$1 - G(s)H(s) = 0 \quad (2)$$

假设加入反馈补偿环节后闭环系统的期望主导极点为 $s_d$ ,则有:

$$H(s_d) = \frac{1}{G(s_d)} \quad (3)$$

因此 $H(s)$ 在 $s = s_d$ 处的幅值和相角可通过系统开环传递函数 $G(s)$ 在 $s = s_d$ 处的幅值和相角求得。

根据该结果可求出相应于期望主导节点的直流调制器的补偿幅值与相位,整定调制器参数。

系统开环传递函数可利用测试信号法<sup>[9]</sup>来拟合。首先在电流附加控制环节上施加一系列小信号振荡电流。对系统进行机电暂态仿真直至达到稳态,提取公共周期内的数据 $\Delta I_{\text{test}}$ 和 $\Delta X$ 。进行傅里叶分解,得到不同频率下的相量 $\Delta \dot{I}_{\text{test}}(k\omega_0)$ 和 $\Delta \dot{X}(k\omega_0)$ 。对所有的 $k\omega_0$ 计算在此频率下的传递函数:

$$G(k\omega_0) = \frac{\Delta \dot{X}(k\omega_0)}{\Delta \dot{I}_{\text{test}}(k\omega_0)} \quad (4)$$

最后通过拟合得出 $G(s)$ 的解析表达式。

在求得系统开环传递函数表达式后,即可求出系统区域间振荡模式的频率和阻尼比,选择期望的主导极点。从而求出直流调制器的补偿幅值和相位,整定控制器参数。

设计的功率调制器如图3所示。包含隔直环节、比例放大环节、1~3阶的超前-滞后环节、限幅环节。

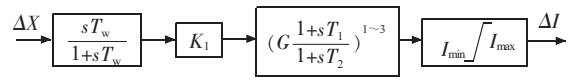


图3 功率调制器控制框图

隔直环节中, $T_w$ 通常取10s,目的是将输入信号中的直流成分滤除。比例放大环节和超前-滞后环节的参数根据前述的测试信号法进行整定,限幅环节一般取-50%~50%。

### 2.2 多信号控制器的设计

多信号控制器采用加权综合的方法。权值分配通过每组单信号控制增益调节实现。控制框图如图4所示。其中,各通道的参数可通过上节中的测试信号法进行整定, $K_1 \sim K_3$ 联合运行参数的选取可通过多次仿真确定最佳参数配置。

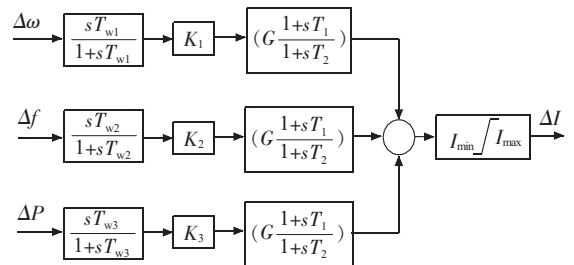


图4 多信号控制器框图

发电机的角频率信号对于发电机功角摆动具有良好的模态可观性和可靠性,因此与另2种调制信号相比,引入发电机的角频率信号对减弱功角摇摆以及防止转子失步具有更好的效果。但该调制方法仅反映局部的运行状态,具有一定的局限性。

引入换流站两侧的频差信号在提高交流稳定

性和阻尼振荡也能够收到较好的效果,且能即时反映整个网络的频率状况,对整个网络有较好的监测与控制作用。不过母线频率信号需要通过锁相环间接测量,其测量过程中会产生一定的误差,并可能会受到谐波以及电网其他扰动的影响,且测量器件的参数对调制效果也有一定的影响。

引入交流线上传输功率信号在提高交流稳定方面的作用并不如上述2种信号明显,但功率信号的测量简单,成本较低,在规模不大的网络中引入重要交流联络线的功率作为调制信号也有一定意义。

事实上,在广域测量系统中,发电机角速度信号可以取多台重要发电机的角速度,交流线功率变化量信号可以取多条重要联络线的功率变化。在发生故障时,通过系统电气量变化估算故障的距离,动态调节多信号权值,改变UHVDC的电流指令,给予系统功率支援,提高系统暂态稳定性。

### 3 直流调制控制器的仿真

锦屏—苏南特高压直流工程<sup>[10]</sup>预计将在2012年建成投运。届时将有7 200 MW电能从四川水电基地送至江苏电网,对江苏电网的运行方式和稳定性将带来重大影响。为验证直流调制控制器在实际电网中的作用,通过PSCAD/EMTDC软件建立含直流调制控制器的UHVDC仿真模型及江苏电网等值模型,进行仿真研究。

#### 3.1 模型建立

在PSCAD/EMTDC环境中建立一个双12脉动阀组串联接线的7 200 MW特高压直流输电模型。送电端采用交流电源模型,即为一无穷大电网;受电端采用江苏交流网等值模型,如图5所示。

基本控制系统采用CIGRE标准测试系统<sup>[11]</sup>,整流侧由定电流控制和最小触发角限制组成;逆变侧配有定电流控制和定关断角控制,但无定电压控制。此外,整流侧和逆变侧都配有低压限流环节(VDCOL),可以减小换相失败的可能性,并降低直流功率同时减小对交流系统无功的需求,逆变侧还配有电流偏差控制(CEC)。

该仿真系统中,附加阻尼控制系统采用三通道信号调制,分别为谏壁电厂发电机角频率信号、UHVDC两侧交流系统频率差信号和过江断面功率变化信号作为直流调制的控制信号。

#### 3.2 仿真结果分析

在江苏电网晋陵节点设置一个时长0.1 s的金属性瞬时三相短路的大扰动,对UHVDC的直流调制进行仿真比较。故障后谏壁电厂发电机功角(取对沙洲电厂发电机的相对功角)摇摆曲线图6所示。

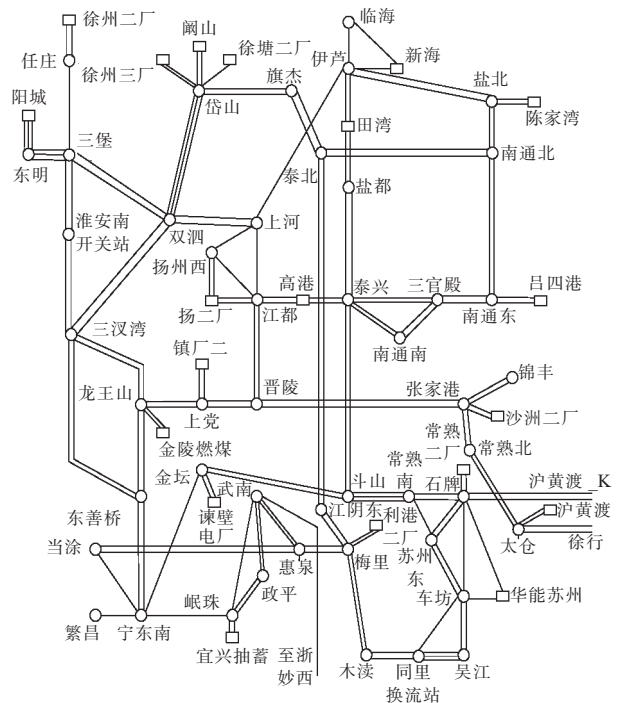
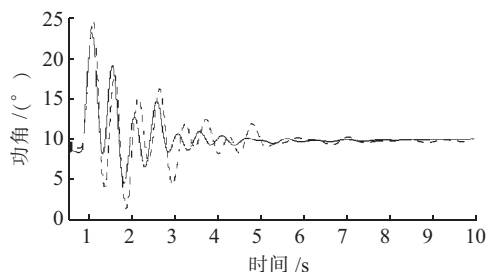
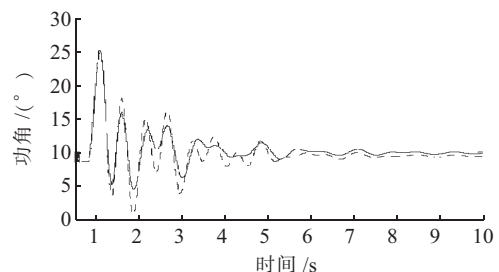


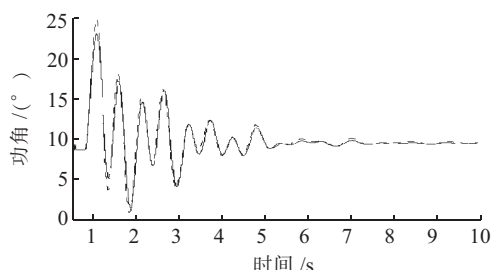
图5 等值江苏交流网



--- 无调制; — 频差调制  
(a) 频差调制效果



--- 无调制; — 角频率调制  
(b) 角频率调制效果



--- 无调制; — 交流线功率调制  
(c) 交流线功率信号调制效果

图6 江苏网直流调制下晋陵0.1 s三相短路后谏壁电厂发电机功角摇摆曲线

可见,加入直流功率调制后,谏壁电厂的发电机

功角摇摆衰减速度均有不同程度的提高。UHVDC 的直流功率调制对江苏电网暂态稳定性的提高有一定作用。

3 种调制信号各有优缺点。将 3 种调制信号进行加权综合输出的调制信号,既能反映全网的运行状况,也反映重要发电机的功角变化,具有更好的调制效果。

采用 3 种信号加权综合调制后( $K_1=1.6, K_2=0.5, K_3=0.2$ ),调制效果如图 7 所示,谏壁电厂的发电机功角第一摆有了更明显的下降,达到稳态的时间也有缩短,提高了交流系统的暂态稳定性。

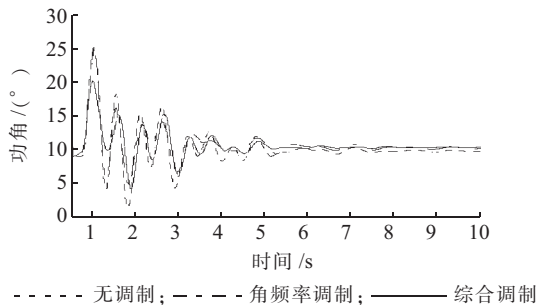


图 7 综合调制下晋陵 0.1 s 的金属性三相短路后谏壁电厂发电机功角摇摆曲线

#### 4 结束语

文中主要研究了直流调制器的设计与基于极点配置法的控制器参数整定,提出了多信号综合调制的直流调制方法。通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件,对锦屏—苏南特高压直流输电工程接入江苏交流网进行了仿真。仿真结果表明,文中设计的直流调制控制器能够有效地提高交直流互联系统中交流系统的暂态稳定性,减弱故障后发电机功角摇摆。采用多种信号综合调制的控制方法能够发挥各种信号的优势,具有更好的调制效果。

#### 参考文献:

- [1] 董凌. 特高压直流输电对受端交流系统稳定影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [2] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] RAHMAN H, KHAN B H. Stability Improvement of Power System by Simultaneous AC - DC Power Transmission [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(4): 756-764.
- [4] HAMMAD A E. Stability and Control of HVDC and AC Transmissions in Parallel [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1545-1554.
- [5] 谢惠藩, 张尧, 夏成军, 等. 交直流互联电网直流功率调制相关问题[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 43-50.
- [6] 陈汉雄, 莫骏. 双侧频率调制改善特高压直流输电系统暂态稳定性研究[J]. 中国电力, 2009, 42(2): 34-38.
- [7] 束洪春, 董俊, 孙士云, 等. 直流调制对南方电网交直流混联输电系统暂态稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 29-33.
- [8] 刘振亚. 特高压直流输电理论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [9] 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, 2005.
- [10] 朱艺颖, 芮虎, 李新年, 等. 锦屏—苏南特高压直流输电工程直流线路电磁暂态仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 1-4.
- [11] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.

#### 作者简介:

- 严栋(1987), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行控制;
- 蒋平(1954), 男, 江苏溧阳人, 博士生导师, 从事电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用方面研究;
- 刘建坤(1980), 男, 山东潍坊人, 工程师, 从事电力系统计算和分析工作;
- 赵静波(1982), 男, 重庆人, 工程师, 从事电力系统计算和分析工作。

## Research on the Multi-signal Comprehensive DC Modulation of UHVDC in Improving System Transient Stability

YAN Dong<sup>1</sup>, JIANG Ping<sup>1</sup>, LIU Jian-kun<sup>2</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 21103, China)

**Abstract:** The ultra-high voltage DC (UHVDC) transmission, which has great transmission capability and can be controlled flexibly and quickly, plays an important role in the power transmission from western china to the eastern china. Based on the traditional DC modulation methods, a comprehensive modulation method with many kinds of signals is proposed in the paper. Besides, the controller parameters are set by pole assignment. The simulation analysis of Jiangsu power grid with Jinping-Sunan UHVDC integration based on PSCAD/EMTDC is carried on, and the results show that the multi-signal comprehensive DC modulation can further improve the power system transient stability and obtain better control effect.

**Key words:** ultra-high voltage DC (HVDC); transient stability; DC modulation; PSCAD/EMTDC simulation