

# 基于广域测量的换相失败STATCOM—HVDC协调抑制

针对交流母线电压下降和换相裕度过小引起逆变侧换相失败的问题,将STATCOM和换相失败预防控制器协调作用于多馈入交直流输电系统,使其稳定交流母线电压的同时增加系统换相裕度,更有效地抑制换相失败。进一步以广域测量信息为基础,提出以相邻换流站逆变侧交流母线电压偏差为闭环反馈量的STATCOM附加控制器,以及在换相失败预防控制器中增加检测并发换相失败故障的功能,从而预防并发换相失败的发生。最后,在PSCAD中搭建双馈入交直流输电系统模型,并将改进STATCOM与换相失败预防策略协调作用于该系统。仿真结果表明,协调控制方法能有效抑制本地和并发换相失败。

马 静 刘天琪 李兴源 付 伟 郭利娜/四川大学电气信息学院



马 静/硕士研究生

换相失败是直流输电换流站最常见的故障之一,多馈入直流输电系统的交互作用使得换相失败问题更为复杂<sup>[1]</sup>。文献[2-5]对多馈入直流输电系统换相失败的机理、影响因素和判断依据进行了详细的研究,并指出交流母线电压和系统换相裕度是直流逆变侧发生换相失败的主要影响因素。

文献[6,7]对单馈入直流输电和静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)协调配合进行了研究,并证明STATCOM能对无功的快速控制来稳定HVDC系统的交流母线电压。文献[8,9]研究证明了STATCOM对双馈入直流系统换相失败的免疫能力有一定的增强效果。

文献[10]将单相接地故障和三相故障

分开,分别利用零序电压和三相电压经 $abc-\alpha\beta$ 变换后的电压 $U_{\alpha\beta}$ 来判别换相失败。文献[11]提出了一种基于 $\sin-\cos$ 分量检测的改进方法,能有效减少多馈入直流系统发生换相失败的几率。

为同时稳定逆变侧交流母线电压、增加系统换相裕度,将STATCOM和换相失败预防控制器协调作用于多馈入交直流输电系统。考虑换流站交互作用的影响,为抑制并发换相失败,在STATCOM的控制环节新增相邻逆变侧交流母线电压偏差为闭环反馈量,提出改进附加控制器,同时,在换相失败传统的预防控制方式中增加检测引起并发换相失败故障的功能。系统间信号可通过基于GPS、北斗卫星导航系统的广域测量系统进行接收和传送。将STATCOM改进附加控制器与预防控制策略协调作用于双馈入交直流输电系统,在PSCAD中进行仿真分析。结果表明,该协调控制方法能有效抑制本地和并发换相失败。

## 含STATCOM的交直流双馈入输电系统模型

含STATCOM的交直流双馈入输电系统模型如图1所示。直流子系统的控制方式为:整流侧定电流控制和最小触发角限制;逆变侧定熄弧角控制和定电流控制。

STATCOM采用的是6脉波主控制电路,如图2所示,控制HVDC<sub>1</sub>逆变侧交流母线电压。

### 关键词/Keywords

换相失败 ·  
改进静止同步补偿器 ·  
预防控制 ·  
协调控制 ·

国家自然科学基金重点项目(51037003),国家电网公司大电网重大专项(SGCC-MPLG027-2012)。

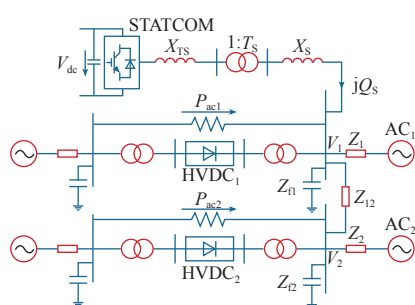


图1 含STATCOM的交直流双馈入系统模型

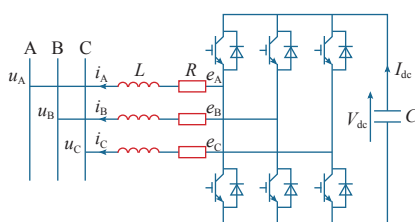


图2 STATCOM主电路结构

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} e_A - u_A \\ e_B - u_B \\ e_C - u_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} i_{dc} \quad (2)$$

式(1)、式(2)为动态数学模型,稳态时发出无功<sup>[12]</sup>

$$Q = \frac{3V_t^2}{2R} \sin 2\delta \quad (3)$$

## STATCOM改进附加控制器设计

### 1. STATCOM附加控制器设计

STATCOM采用间接电流控制方式的定电压控制方式,通过控制其输出基波电压的幅值和相位来控制其无功输出,从而控制接入点的电压,其控制原理如图3所示。

在交直流双馈入输电系统中,考虑换流站间的交互作用,为更好协调控制系统故障后的电压,选取HVDC<sub>2</sub>逆变侧处交流母线电压偏差 $\Delta V_2$ 作为反馈量, $\Delta V_2 = V_{hvd2} - V_{ref}$ ,式中 $V_{hvd2}$ 为HVDC<sub>2</sub>处实时电压, $V_{ref}$ 为参考电压(380 kV)。其控

制原理在于,控制环节加装的闭环反馈量可以对故障后电压波形提供更强的反方向阻尼,使电压波形振荡衰减。基于GPS、北斗卫星导航系统的广域测量系统能快速准确地完成信号的接收和传送,HVDC<sub>2</sub>的电压偏差 $\Delta V_2$ 可通过该系统传送到HVDC<sub>1</sub>。

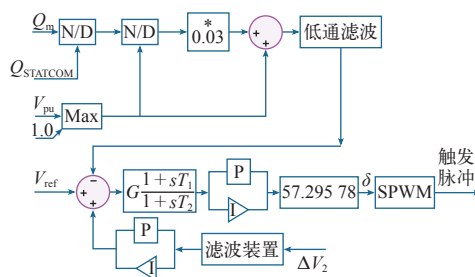


图3 改进的STATCOM控制器原理图

### 2. STATCOM附加控制器参数寻优

附加控制中的PI比例积分环节的参数为未知量,选取单纯形算法找到其最优解。单纯形算法是一种基于几何形状考虑的求多维函数极值的启发式优化算法。其基本思想为:在初始单纯形的每个顶点计算目标函数,经比较后丢弃计算结果最大的点,同时产生一个新的顶点,该新点是被丢弃点以剩余顶点的几何中心为中点的镜像对称点。重复该过程,将逐渐逼近更小的目标函数值<sup>[13]</sup>。优化的目标函数为

$$J = \int_0^t \left( \frac{V_{hvd2} - V_{ref}}{V_{ref}} \right)^2 dt \quad (4)$$

本研究采用PSCAD中的SIMPLEX模块对控制器中 $\Delta V_2$ 作为反馈量的PI环节参数寻优,寻优开始时, $K_i$ 初值设为0.5, $K_p$ 初值设为2.0,优化次数 $N$ 设为15。寻优后的参数为 $K_i = 0.74$ , $K_p = 2.28$ 。

### 换相失败预防控制策略

换相失败预防控制器检测交流系统发生故障时立刻提前触发,增大换相裕度,避免换相失败<sup>[1]</sup>。考虑多馈入直流输电系统的交互作用可能引发并发换相失败,建立改进的换相失败预防模块。假设系统中有 $k$ 回直流,图4为第 $j$ 回HVDC的换相失败预防控制模块(Commutation Failure Prevention and Control, CFPC)。

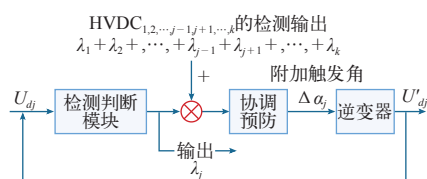


图4 CFPC的闭环控制简化框图

检测判断模块简化原理图如图5所示。其功能是检测逆变侧交流系统发生的单相或三相故障并发出信号。相较传统预防控制器的区别在于除本地换相失败外，还能检测可能引发并发换相失败的故障，并输出相应的触发信号。

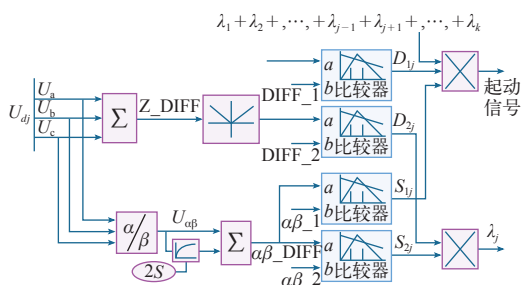


图5 检测判断模块简化原理图

单相故障通过零序电压分量进行检测，检测三相故障的是基于 $abc-\alpha\beta$ 变换的变换器，其变换方程为<sup>[9]</sup>

$$U_\alpha = \frac{2}{3}U_a - \frac{1}{3}(U_b + U_c) \quad (5)$$

$$U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(U_b - U_c) \quad (6)$$

式中， $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ 分别为矢量 $U_{\alpha\beta}$ 在 $\alpha\beta$ 平面中沿着 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴的投影，则 $U_{\alpha\beta}$ 为

$$U_{\alpha\beta} = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \quad (7)$$

当系统检测到可能引发并发换相失败的单相或三相故障时，与对应的阈值进行比较，该阈值是通过multi-run模块对系统进行大量仿真，得出相应的经验值，通常为系统稳定运行时电压的95%。比较器输出的信号 $D_{2j}$ 、 $S_{2j}$ 综合后作为预警信号 $\lambda_j$ ，通过基于GPS、北斗卫星导航系统的广域测量系统将 $\lambda_j$ 传给相邻的直流系统。同时，通过将该广域测量系统接收到的相邻直流输电系统发出的预警信号与系统检测到可能引发本地换相失败的单相或三相故障，比较器输出的信号 $D_{1j}$ 、 $S_{1j}$ 综

合后作为该条直流预防模块的起动信号，以起动换相失败预防控制器进行工作。

## 系统仿真

仿真所用的双馈入交直流输电系统模型如图1所示。重点研究在直流子系统1的逆变侧换流母线上施加单相和三相接地故障时加装控制器后对系统本地和并发换相失败的改善情况。判断换相失败的标准应该以其基本特征为准：关断角小于换流阀恢复阻断能力所对应的时间，即 $\gamma < \gamma_{\min}^{[4]}$ 。仿真结果考虑误差和安全裕度，将关断角临界值设定为 $7^\circ$ 。

在HVDC<sub>1</sub>的交流母线上施加引发换相失败的单相和三相短路故障时，加装控制器前后直流逆变侧的熄弧角对比如图6所示。在HVDC<sub>1</sub>的交流母线上施加引发本地换相失败的单相和三相短路故障时，加装控制器前后HVDC<sub>1</sub>的熄弧角对比分别如图6a、图6b所示。在HVDC<sub>1</sub>的交流母线上施加引发并发换相失败的单相和三相短路故障时，加装控制器前后HVDC<sub>2</sub>的熄弧角对比分别如图6c、图6d所示。由图6可知，加装控制器可使系统有效避免本地和并发换相失败的发生。

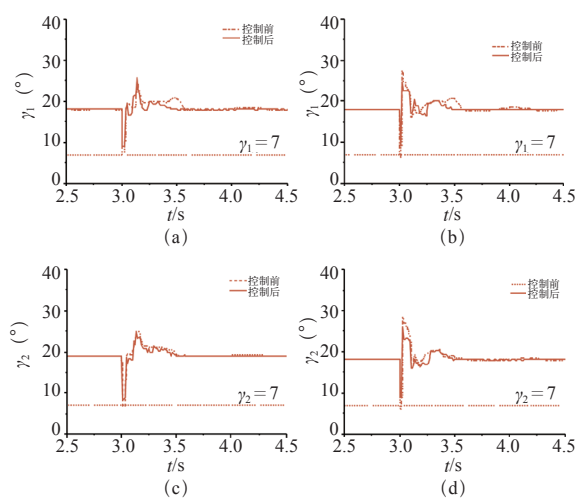


图6 单相和三相故障下的直流逆变侧熄弧角

为量化加装控制器前后系统发生本地换相失败和并发换相失败的容易程度，引入换相失败免疫指标（Commutation Failure Immunity Index, CFII）和并发换相失败免疫指标（Concurrent

CFII)。考虑最严重的干扰是三相电感故障, CFII 定义为<sup>[14]</sup>

$$CFII = \frac{U_{ac}^2}{\omega L_{min} P_{dc}} \quad (8)$$

式中,  $U_{ac}$ 为逆变侧交流母线额定线电压;  $L_{min}$ 为最小的不会导致换相失败的故障电感;  $P_{dc}$ 为直流输电线路额定输送功率。

Concurrent CFII的定义也如式(8)所示, 不过, 其中 $L_{min}$ 是指HVDC<sub>1</sub>逆变侧发生故障刚好不造成HVDC<sub>2</sub>逆变侧换相失败的故障电感值<sup>[15]</sup>。

系统加装控制器前后的换相失败免疫指标值如下表所示。CFII<sub>1</sub>为HVDC<sub>1</sub>的本地换相失败免疫指标, Con CFII为双馈入系统的并发换相失败免疫指标。由表1可知, 改进STATCOM附加控制与预防控制策略协调作用于系统后, 系统的换相失败免疫能力有一定程度的增强。可见, 该控制方法能有效减少系统本地和并发换相失败发生的概率。

表 加装控制器前后的换相失败免疫指标值

|     | CFII <sub>1</sub> | Con CFII |
|-----|-------------------|----------|
| 控制前 | 32.061            | 41.982   |
| 控制后 | 37.253            | 47.236   |

## 结束语

为同时稳定交流母线电压、增加系统换相裕度, 将STATCOM和换相失败预防控制器协调作用于双馈入交直流输电系统, 可有效抑制本地换相失败的发生。换流站间的交互作用使多馈入直流输电系统的换相失败更为复杂。基于此, 在STATCOM的控制环节新增HVDC<sub>2</sub>的逆变侧交流母线电压偏差为闭环反馈量, 同时在换相失败预防控制方式中增加检测引起并发换相失败故障的功能。系统间信号可通过基于GPS、北斗卫星导航系统的广域测量系统进行接收和传送。在PSCAD中搭建交直流双馈入输电系统模型, 进行仿真验证, 在HVDC<sub>1</sub>逆变侧换流母线上施加单相和三相接地故障时, 本地和并发换相失败均得到较好的改善, 系统的换相失败免疫能力有一定程度的增强, 表明该协调控制方法能有效抑制系统本地和并发换相失败的发生, 可为系统的实际应用提供

理论依据。

## 参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
- [3] 吴冲, 李兴源, 何朝荣. 多馈入直流交互作用因子在换相失败研究中的应用 [J]. 继电器, 2007, 35(9): 26-31.
- [4] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败的判断标准 [J]. 电网技术, 2006, 30(22): 19-23.
- [5] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
- [6] Zhuang Y, Menzies R W, Nayak O B, et al. Dynamic performance of a STATCOM at an HVDC inverter feeding a very weak ac system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 6(11): 958-964.
- [7] Chan-Ki, K. Dynamic coordination strategies between HVDC and STATCOM [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Asia and Pacific, T and D Asia 2009, Seoul, Korea, 2009: 1-9.
- [8] 郭春义, 张岩坡, 赵成勇, 等. STATCOM 对双馈入直流系统运行特性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 99-106.
- [9] 袁旭峰, 文劲宇, 程时杰. 与弱交流系统相连接的HVDC系统临界换相电压降及逆变站的运行范围 [J]. 电网技术, 2007, 31(19): 24-30.
- [10] Lidong Zhang, Lars Dofnas. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems [C]. 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings, Kunming, China, 2002: 51-56.
- [11] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检

- 测的高压直流换相失败预防方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (14): 1-6.
- [12] 史华勃, 傅闯, 刘天琪, 等. 基于Prony辨识的STATCOM附加次同步阻尼控制器设计 [J]. 华东电力, 2011, 39 (9): 1456-1461.
- [13] 郭利娜, 刘天琪, 李兴源. SVC基本控制和附加控制对交直流系统电压特性的影响 [J]. 华东电力, 2013, 40 (11): 1956-1960.
- [14] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems [C]. 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission, London, UK, 2006: 182-186.
- [15] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (1): 378-384.
- (收稿日期: 2014-04-10) **EA**

## 信息动态

### 在驶向达沃斯的火车上寻找ABB的身影

海拔2 328 m的伯尔尼纳山口位于瑞士东南部和意大利北部交界处,建有欧洲阿尔卑斯山上最高的铁路线。由瑞士最大的私营铁路公司雷蒂亚铁路 (Rhaetian Railway) 运营的电力动车组便经由此处穿梭于瑞士和意大利之间。每到冬天,途经这里的火车就会和伯尔尼纳山口恶劣的寒冷天气不期而遇。特别是在11月至3月期间,这里的平均气温会降至零度以下,铁路沿线为火车供电的高架线和接触网都被包裹上厚厚的一层冰。而雷蒂亚铁路公司运营的Allegra系列双电流制动车组由于配备了ABB牵引系统,可以在冰天雪地中畅行无阻。这些牵引变流器和变压器能够通过软件识别结冰时间并自动产生人造电弧,使电线上的冰层消融蒸发。ABB这一技术的应用确保了游客从瑞士圣莫里兹到意大利的火车旅途不会再因大雪或其他极端天气而延误。此外,为了应对该线路陡峭的地形,ABB提供的牵引系统还特别提升了列车的爬坡能力,并帮助列车实现在两个电力系统下运行:在连接瑞士城市圣莫里兹和意大利的伯尔尼纳线上使用1 kV的直流电力系统,在其他线路上使用11 kV的交流电力系统。

雷蒂亚铁路公司是瑞士领先的铁路运输公司,主要经营格劳宾登州 (Graubünden) 的铁路线路,公司旗下的冰川快车和伯尔尼纳快车是闻名于世的旅游观光列车。ABB和雷蒂亚铁路公司之间的合作关系已经超过100年,早在1913年ABB就向其交付了第一辆电力机车。为了庆贺这一长达百年的合作伙伴关系,Allegra系列电动车组中的一列火车上从内到外都涂上了ABB的色彩和标识,“换上新装”的ABB主题涂装列车将往返于雷蒂亚铁路总部所在城市兰德夸特 (Landquart) 和达沃斯之间,运送来自全球的政商界领袖参加世界经济论坛2015年年会。论坛闭幕后,它的运行范围将扩大至瑞士格劳宾登州铁路网的所有线路。

另外,向雷蒂亚铁路公司Allegra系列交付了15组电力机车的瑞士轨道车辆制造商StadlerRail也是ABB的一个长期合作伙伴。自2002年至今,StadlerRail已为其1 500多列区域火车和300多辆轻轨列车采购了ABB牵引设备。ABB也借此进一步稳固了全球最大独立轨道交通设备供应商之一的地位。

