

直流系统中链式STATCOM暂态控制研究

交流侧暂态故障是导致高压直流输电系统换相失败的主要原因,为避免或减少换相失败,换流站中装设大容量H桥链式STATCOM迅速输出无功加快电压恢复。分析了换相失败下直流输电无功需求特性,解析H桥链式STATCOM在系统暂态时稳定控制机理,针对基于瞬时无功理论的解耦控制在不对称系统中的局限性,提出采用去零序瞬时电流跟踪控制方法,将正序、负序电压和电流统一控制,避免装置直流侧支撑电容过电压闭锁跳闸。通过RTDS平台搭建一次系统模型,接入真实的控制器和阀触发系统完成试验验证。当交流侧发生对称或不对称故障时,链式STATCOM迅速响应输出额定无功,加速交流电压恢复并维持系统潮流稳定。试验结果证明了该方法的正确性和可行性。

时智勇¹ 余晓鸿² 袁 蒙¹ 叶卫华¹/1.国网电力科学研究院 2.国网北京市电力公司

0 引言

随着我国多条高压直流输电(HVDC)工程的投入运行,换流阀换相失败已成为直流输电系统中最常见的故障之一。换相失败短时未恢复将进一步导致邻近换流站闭锁,多条交流线路发生功率倒向。交流侧故障特别是换流站逆变器交流系统故障是引起直流系统换相失败的主要外在因素^[1]。为抑制换相失败或换相失败后加速交流系统电压恢复,需在换流站装设大容量的动态无功补偿装置。静止无功发生器(STATCOM)因其响应速度快、输出无功电流不受接入点电压影响等特点在直流输电中已有应用,而大容量链式STATCOM在交流系统故障下维持各H桥直流电容电压稳定,且输出额定无功电

流是其控制的关键^[2-3]。本文解析了链式STATCOM内部功率分配机理,提出去零序瞬时电流跟踪方法,并基于RTDS实时数字仿真系统搭建电网模型,接入真实控制器和阀控装置进行验证,试验结果证明了该方法的正确性和可行性。

1 HVDC与STATCOM暂态特性

1.1 HVDC换相失败与无功需求特性

HVDC稳态无功需求与输送的有功功率成正比,以逆变侧为例,其无功需求为

$$Q = P \tan \varphi \quad (1)$$

$$\tan \varphi = \frac{\pi \mu / 180 - \sin \mu \cos (2\gamma + \mu)}{\sin \mu \sin (2\gamma + \mu)} \quad (2)$$

式中, Q 、 P 分别为逆变侧无功功率和有功功率; φ 、 μ 和 γ 分别为功率因数角、换相角和关断角。

交流反向电压幅值与过零点时机决定了换流阀换相能否成功。交流系统稳定运行时换流阀换相规律可控,当交流侧发生三相短路或不对称故障时,电压畸变,过零点漂移,大大增加了换相失败的风险。

换相失败时逆变器的直流电压阶段性短接为零,从功角稳定的角度而言,直流功率在故障后恢复越快,对系统有功平衡越有利,但交流故障后,交流系统的电压也处在扰动后的恢复过程。直流换流器的运行特性决定了直流功率的恢复过程中换流器本身需要消耗大量无功功率,通常换流站内装设电容器和滤波装置,用以补偿稳态时需要的无功,



时智勇/工程师

关键词/Keywords

高压直流输电 ·
换相失败 ·
静止无功发生器 ·
实时数字仿真系统 ·

国家电网公司科技项目(52094014000U)。

当交流侧故障时,传统FC、SVC等无功装置难以在几毫秒内响应,且输出无功与交流电压二次方成正比,无法满足设计容量需求。链式STATCOM具有响应速度快、输出无功电流不受接入电压限制等优越特性,在风电场以及工业用户中得到了广泛应用。

1.2 STATCOM暂态特性

直流输电系统中STATCOM稳态时处于无功储备状态,暂态下瞬间释放无功,支撑母线电压。在系统电压恢复过程中伴随着过电压,STATCOM将经历满容量的容性电流到感性电流的极端转换,同时交流系统故障必然产生电压幅值和相位的偏移,STATCOM同样面临着过电流、直流电容过电压等引起自身保护跳闸的问题。当发生对称故障时,STATCOM以最大电流输出能力进行强补,当系统发生单相接地或两相短路等不对称故障时,要求STATCOM具备一定的负序电流输出能力以补偿各相不同的无功需求,暂态下STATCOM能否稳定运行已成为衡量装置性能优劣的关键依

据^[4]。

根据暂态下交流电压和电流推导出链式STATCOM的功率分配原理,令STATCOM接入点三相电压瞬时值为 v_a 、 v_b 和 v_c ,流入装置电流瞬时值为 i_a 、 i_b 和 i_c ,可得

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_p \sin(\omega t - \varphi_p) \\ V_p \sin(\omega t - \varphi_p - \frac{2}{3}\pi) \\ V_p \sin(\omega t - \varphi_p + \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_n \sin(\omega t - \varphi_n) \\ V_n \sin(\omega t - \varphi_n + \frac{2}{3}\pi) \\ V_n \sin(\omega t - \varphi_n - \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_p \sin(\omega t - \varphi_p) \\ I_p \sin(\omega t - \varphi_p - \frac{2}{3}\pi) \\ I_p \sin(\omega t - \varphi_p + \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_n \sin(\omega t - \varphi_n) \\ I_n \sin(\omega t - \varphi_n + \frac{2}{3}\pi) \\ I_n \sin(\omega t - \varphi_n - \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中,下标为p的量为正序分量;n为负序分量。

由 $P = \frac{1}{T} \int_0^T v_i dt$, 可得

$$\begin{pmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{V_p I_p}{2} \cos(\varphi_p - \varphi_p) + \frac{V_p I_n}{2} \cos(\varphi_p - \varphi_n) + \frac{V_n I_p}{2} \cos(\varphi_n - \varphi_p) + \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \varphi_n) \\ \frac{V_p I_p}{2} \cos(\varphi_p - \varphi_p) + \frac{V_p I_n}{2} \cos(\varphi_p - \varphi_n - \frac{2}{3}\pi) + \frac{V_n I_p}{2} \cos(\varphi_n - \varphi_p + \frac{2}{3}\pi) + \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \varphi_n) \\ \frac{V_p I_p}{2} \cos(\varphi_p - \varphi_p) + \frac{V_p I_n}{2} \cos(\varphi_p - \varphi_n + \frac{2}{3}\pi) + \frac{V_n I_p}{2} \cos(\varphi_n - \varphi_p - \frac{2}{3}\pi) + \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \varphi_n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, P_a 、 P_b 和 P_c 分别为三相换流链吸收的有功功率,用以补偿换流链的有功损耗以及H桥直流电容充电电压。

通过式(5)可知,除了正序电流电压乘积外,负序电流和负序电压同样影响着每一相有功功率的大小。将式(5)三相有功功率求和,可得

$$P = \frac{3V_p I_p}{2} \cos(\varphi_p - \varphi_p) + \frac{3V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \varphi_n) \quad (6)$$

而三相之和中正序电压和负序电流以及负序电压与正序电流的乘积之和为零,说明由此产生的有功功率在三相换流链之间交换。

由此可见,当STATCOM的控制对象只针对于正序分量时,负序电压和负序电流的存在将造成

每相直流电压失控,若忽略负序有功的分配,将造成三相之间的直流电压失衡。综上所述,为维持直流电压的稳定,必须对负序电压和负序电流进行合理控制,这也是STATCOM暂态控制的关键。

2 STATCOM不平衡控制方法

H桥链式STATCOM的控制多基于三相对称坐标系下瞬时无功功率理论^[5]。将交流量由三相静止坐标系转换成两相旋转坐标系下的直流量,d轴、q轴分别表示有功和无功分量,如图1所示设计电流环,实现解耦控制,达到有功、无功独立调节。

当系统出现不对称故障时,三相电压dq变换将在直流量上叠加二倍频的负序分量,这对PI控

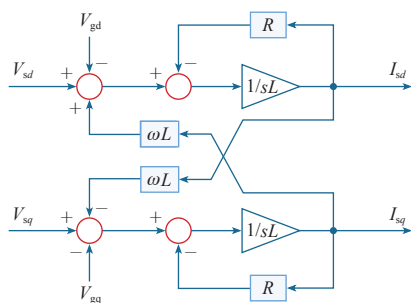


图1 解耦控制框图

制提出了很大挑战，同时为实现负序有功在三相之间的合理分配，需对各相负序有功电流进行控制，众多文献提出了针对不平衡条件下 dq 坐标系的控制方法，但其前提是实现正负序分离，通过旋转坐标系的正反转进行直流量变换，然后引入低通滤波器将需要的序分量提取，这个过程导致控制延时，很大程度上影响了实时性，控制参数难以确定，无法适应瞬时锁相和维持大容量无功电流输出下支撑电容电压不发散^[6]。

针对基于旋转坐标系下应对不平衡系统控制的局限性，提出采用去零序瞬时电流跟踪控制法。去零序包括去除零序电压和零序电流，STATCOM一般装设于主变压器第三绕组或35 kV及以下中性点不直接接地系统，STATCOM无论采用角接或者星接，其主电路无直接接地部分，零序电压分量的存在将直接影响装置控制的稳定性，在三相电压采样环节应去除零序电压。指令电流零序分量的去除如图2所示。不平衡系统三相电流在对应相电压的投影为换流链消耗的有功分量和直流电容充电功率，控制时只需维持其垂直分量不变，三相电流矢量和为 i_0 ，电流指令调节前

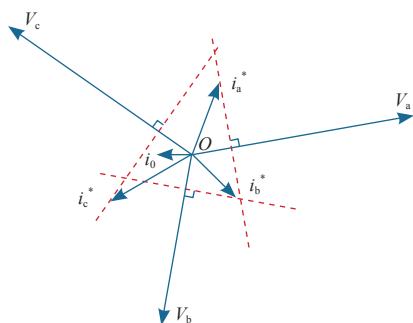


图2 零序电流指令消除相量图

需减去零序分量，确保干扰分量不进入电流环。

通过锁相得到三相电压实时相位，其中有功部分与系统电压同相，作为直流电压控制的参考相位，无功部分与系统电压垂直作为无功电流控制的参考相位，有功和无功电流二者之和作为瞬时电流跟踪给定值，通过STATCOM反馈值进行控制，为提高系统稳定性引入系统电压作为前馈，图3为STATCOM暂态控制框图。

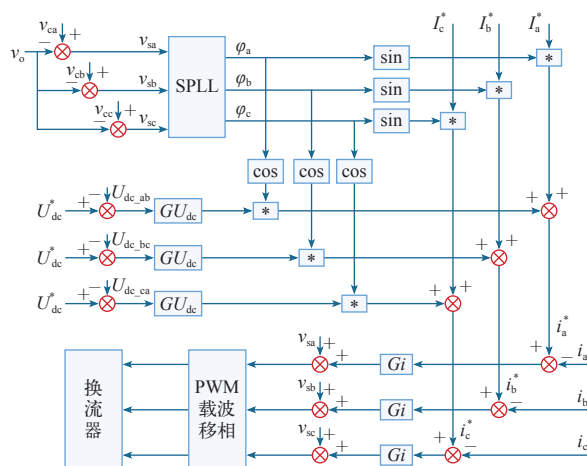


图3 去零序瞬时电流跟踪控制图

由于瞬时电流控制未引入任何滤波器，且电压和电流与系统一致未进行任何正负序分离，确保了正负序分量全部参与调节和分配，同时瞬时电流控制环节略去积分环节，对系统暂态时去积分化、提高相应速度和装置稳定性提供了很好条件。

3 试验

基于可关断器件的H桥链式STATCOM其控制实时性是暂态响应的关键，为验证控制方法的可行性，采用真实的STATCOM控制系统和阀控系统，基于实时数字仿真系统RTDS（Real Time Digital Simulator）搭建电网模型，进行半实物试验验证。其中主电路模型如图4所示。

图4中， X_s 为STATCOM的连接电抗取0.1(pu)， X_{T1} 、 X_{T2} 为变压器漏抗取0.12(pu)，STATCOM采用角接型式，额定容量为300 Mvar，直流输电容量为1 000 MV·A，逆变侧配置电容器等滤波和无功补偿装置。

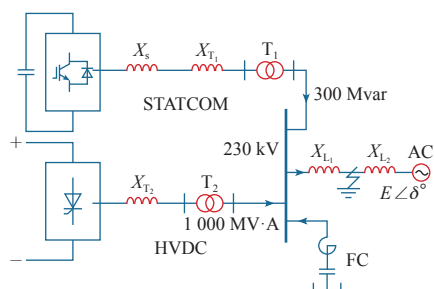


图4 RTDS主电路示意图

220 kV线路某处发生电压扰动,如图5所示。其中,第一路为220 kV电压,第二路为STATCOM输出电流,第三路为有功功率与无功功率。220 kV电压对称跌落,STATCOM启动暂态控制,输出额定容性电流支持母线电压帮助系统恢复,维持了直流系统输送有功功率维持不变,避免换相失败直流闭锁。

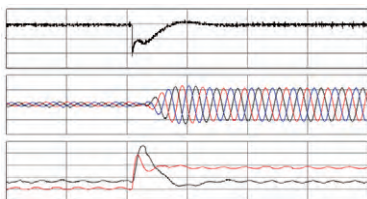


图5 对称故障波形

当220 kV发生不对称故障时,如图6所示。其中,第一路为各相链节电容直流电压平均值,第二路为STATCOM电流,第三路为STATCOM接入点电压。STATCOM针对各相无功需求输出一定负序电流,维持链节电容直流电压稳定不发散。

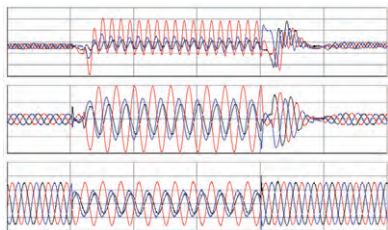


图6 不对称故障波形

4 结束语

分析了HVDC换相失败与无功需求关系,给出了H桥链式STATCOM在系统暂态下功率分配的机理,对比了基于旋转坐标系下解耦控制的局限性,提出采用去零序瞬时电流跟踪方法,通过独立调节各相电流维持H桥直流电容电压稳定并满足无功补偿要求。RTDS试验证明在母线电压发生对称和不对称故障时,STATCOM在保持自身稳定的同时仍能够输出额定无功电流支撑系统电压,抑制换流阀换相失败或加速系统恢复减小换相失败的持续时间。大容量STATCOM控制复杂,暂态锁相、响应速度性和稳定性二者之间平衡等仍需要更深入的研究。

参考文献

- [1] 欧开健,任震,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):5-8.
- [2] 陈丽兵,史丽萍,杨晓冬,等. 链式SVG直流侧电容均压控制策略的研究[J]. 电力电子技术,2013,47(12):45-47.
- [3] 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]. 电机工程学报,2013,33(25):99-106.
- [4] 刘钊. 风力发电系统中链式STATCOM关键技术[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
- [5] 王兆安,杨君,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2005.
- [6] Chan-Ki K. Dynamic coordination strategies between HVDC and STATCOM [C]. 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific Seoul, IEEE, 2009: 1-9.

(收稿日期:2015-07-23) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告