

基于 $N-1$ 准则的 VSC-MTDC 输电系统稳态调控方案

任敬国¹, 李可军¹, 赵建国^{1,2}, 牛林², 梁永亮¹, 郭启伟¹

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国家电网技术学院, 山东 济南 250002)

摘要: 分析了电压源换流器型多端直流输电(VSC-MTDC)系统的安全稳定运行条件,给出了VSC-MTDC系统的控制系统分层结构和直流潮流计算方法。提出了一种基于 $N-1$ 准则的多端直流输电系统稳态运行调控方案;基于连续潮流计算和换流站的电压、功率限制,设计了应对主导站和非主导站停运的调控策略,给出了直流输电系统指令值的计算步骤,并讨论了解的存在性问题。提出了换流站停运调控策略无解情况下有功功率指令值的优化方法,定义了优化后有功功率指令值的评价指标以用于寻找最优解。以典型的五端直流输电系统为例,利用MATLAB编程验证该调控方案的可行性与准确性。计算结果表明,该调控方案能够为VSC-MTDC系统提供可靠安全的指令值。

关键词: 直流输电; 电压源换流器型直流输电; 多端直流输电; $N-1$ 准则; 稳态调控

中图分类号: TM 721.1; TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.013

0 引言

与传统直流输电技术不同,电压源换流器型直流输电 VSC-HVDC (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current) 技术在潮流翻转时电压极性保持不变,这一特点决定了它适合于构建运行灵活、可靠性高的并联多端系统^[1-4]。虽然 VSC-HVDC 技术已经广泛地应用于商业化用途,但这仅限于两端 VSC-HVDC 系统。到目前为止,电压源换流器型多端直流输电 VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) 技术还没有投入商业运行。随着可再生能源发电的发展和城市规模的扩大,VSC-MTDC 技术在多风电场并网^[5-9]、构建城市直流配电网^[10-11]、多孤岛供电^[12-13]等领域具有广阔的应用前景。

当 VSC-MTDC 系统任意一个换流站停运时,均有可能引起系统有功功率不平衡,导致直流电压失控而使系统停运。因此,国内外许多学者针对 VSC-MTDC 系统直流电压控制进行了广泛的研究。文献[14]设计了换流站紧急退出和投运情况下的控制策略,用来抑制直流侧过电压。文献[15]提出了直流电压偏差控制,即主导站停运引起的直流电压偏差大于一定值后,备用站进入直流电压控制模式。文献[16-17]提出了多点直流电压控制策略,用于维持换

流站停运故障后系统的稳定运行。以上文献均集中于直流系统受到扰动后的暂态电压稳定控制,并没有考虑到基于远程通信的换流站协调控制对 VSC-MTDC 系统稳定运行的作用。文献[18]提出了基于多代理技术的 VSC-MTDC 控制系统,并给出了一种多代理协调控制策略,但是没有进行 VSC-MTDC 系统运行状态的优化。为保证某一换流站停运故障后的直流电压安全,文献[19]提出了一种基于电压灵敏度的直流电压指令值计算方法,并分析了直流电压指令值无解情况下调整有功功率指令值的优化算法,但没有考虑主导站停运情况下的安全指令值计算方法。

实际应用中,基于远程通信的上层控制对 VSC-MTDC 系统具有重要作用,运行中心可根据系统参数、正常与 $N-1$ 运行状态确定最优指令值,并对系统运行方式进行调整。基于以上分析,本文提出了一种基于 $N-1$ 准则的 VSC-MTDC 系统稳态运行调控策略。

1 VSC-MTDC 系统结构

本文采用如图 1 所示的直流输电系统为例说明调控策略。该系统包括 5 个换流站:VSC5 作为主导站,采用带前馈解耦的矢量控制(定直流电压控制和定无功功率控制);VSC1、VSC2、VSC3 与交流电网相连接,采用带前馈解耦的矢量控制(定有功功率控制和定无功功率控制);VSC4 向无源网络供电,采用间接电流控制,控制换流器出口电压的幅值和频率恒定^[6,15-17]。为保证系统有足够的备用容量,VSC2、VSC3 的外环控制器中引入了直流电压偏差控制,作为备用站运行^[15];VSC1 需尽可能地保证各种运行工况下的供电可靠性,不能作为备用站。

收稿日期:2012-06-14;修回日期:2012-12-14

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2010EM033);山东省科技发展计划项目(2011GGX10405);山东大学自主创新基金资助项目(2012TS211);山东省科技发展计划项目(2012-GQX20115,sf003)

Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2010EM033),the Science and Technology Development Foundation of Shandong Province(2011GGX10-405),the Independent Innovation Foundation of Shandong University(2012TS211) and Shandong Scientific and Technological Project,China(2012GQX20115,sf003)

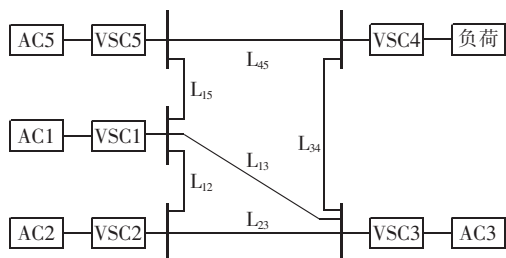


图 1 五端直流输电系统示意图

Fig.1 A five-terminal DC power transmission system

1.1 稳定运行条件

为保证 VSC-MTDC 系统能够安全稳定运行,其控制系统至少需要满足以下 3 点。

a. 换流站指令值的确定^[18]。受限于交流电网的功率需求与运行状态变化以及直流系统静态稳定性的影响,运行中心需要根据实时信息对各换流站的指令值进行计算和分发。

b. 满足 $N-1$ 准则、换流器容量限制和直流电压限制的安全指令值^[18,20]。在正常运行或一个换流站故障停运时,系统能够维持换流器容量、直流电压在安全范围内而不会引起保护动作,并能持续稳定地运行于某一工作状态,直至系统重新调整运行方式。

c. 为渡过换流站停运故障,换流站必须具有维持电压稳定的本地控制器设计,如基于直流电压偏差控制的本地控制器^[15]、实现多点直流电压控制的本地控制器^[16-17]、高级直流电压控制器^[14,20]等。

1.2 控制系统

根据研究需求,本文将 VSC-MTDC 系统的控制系统分为 2 个层次:上层控制和本地控制。上层控制位于运行中心,负责监视系统状态、发出启动指令、切换运行方式、计算与下发换流站指令值等操作;本地控制位于换流站,主要负责本地有功与无功控制、触发控制与保护控制等,并接收上层控制的调控指令。上层控制通过可靠的通信通道与本地控制器相连以用于下发调控指令,接收本地控制器上传的运行状态信息。由于上层调控指令不参与本地控制器的实时控制,该通道对实时性要求不高。

为维持暂态过程中直流电压稳定,备用站 VSC2 和 VSC3 的本地控制器采用直流电压偏差控制^[15],

因此引入了 2 个可调的指令值变量:直流电压上限指令值和下限指令值。向无源网络供电时,换流站 VSC4 的有功功率输出取决于交流侧负荷,为一个变化的范围;由于有功输出取最大值和最小值 2 种情况即可满足系统研究需求,因此,为简化研究,暂不考虑负荷特性及其波动对直流系统调控策略的影响,故该类换流站交流侧负荷采用恒定功率模型。VSC-MTDC 系统的功率控制特性如图 2 所示。

1.3 直流潮流计算

取换流器流向直流网络为正方向,定义直流母线电压向量为 $\mathbf{U}=[U_1, U_2, U_3, U_4, U_5]^T$,直流母线电流向量为 $\mathbf{I}=[I_1, I_2, I_3, I_4, I_5]^T$,则直流网络方程为:

$$\mathbf{I}=\mathbf{Y}\mathbf{U} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{Y}$ 为 5×5 阶导纳矩阵,直流母线节点 i 和 j 之间的直流线路用电阻 R_{ij} 来表示,其导纳为 $y_{ij}=1/R_{ij}$ 。潮流计算过程中,实现直流电压控制的换流站直流母线为平衡节点。

定义有功功率向量为 $\mathbf{P}=[P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]^T$,定义 5×5 阶对角阵 $\mathbf{U}_d=\text{diag}(U_1, U_2, U_3, U_4, U_5)$,则直流潮流计算方程为:

$$\mathbf{P}=\mathbf{U}_d\mathbf{Y}\mathbf{U} \quad (2)$$

该方程为二次非线性方程组,可利用牛顿-拉夫逊法迭代求解,具体求解过程不再赘述。

2 稳态调控方案

本文提出了一种基于 $N-1$ 准则的稳态运行控制方案,该方案如下:

步骤 1 调度中心根据电网需求确定相应换流站的有功功率指令值,并发送给 VSC-MTDC 系统的运行中心;

步骤 2 运行中心根据直流网络参数、有功功率指令值和非主导站停运时的安全稳定要求,计算主导站的直流电压指令值范围,并根据解的存在情况来修改相应有功功率指令值;

步骤 3 运行中心根据主导站停运时的安全稳定要求和步骤 2 的计算结果,计算直流电压指令值范围,并确定是否需要修改有功功率指令值,若没有解,则修改有功功率指令值,返回步骤 2,然后重新进行计算;

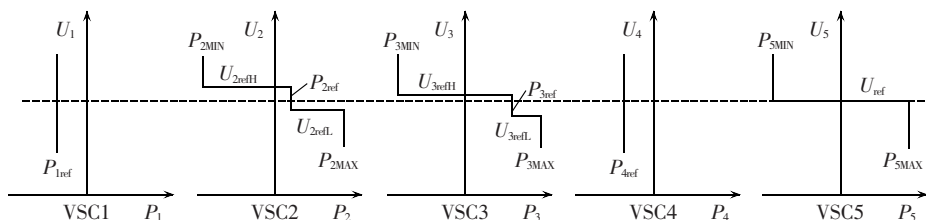


图 2 采用直流偏差控制的 VSC-MTDC 系统功率特性

Fig.2 Power characteristics of VSC-MTDC system with DC voltage margin control

步骤 4 运行中心校验优化指令值下 VSC-MTDC 系统的正常和 $N-1$ 运行状态,反馈指令值到调度中心,并下发调控指令至各换流站。

3 应对非主导站停运的调控策略

3.1 调控目标

确定主导站的直流电压指令值范围,保证任意一个非主导站换流站停运时,各换流站直流电压和换流器容量均在安全运行范围内,系统能够保持稳定运行。本文中,调控目标为求取满足上述条件的指令值 $U_{\text{ref}0}$ 。

3.2 电压和功率限制

直流电压限制:假定所有换流站电压安全范围相同,取值范围为 $U_{\text{imin}1} \leq U_i \leq U_{\text{imax}1} (i=1,2,3,4,5)$,若某一运行工况下,直流系统的直流电压控制换流站为备用站,则限制范围更改为 $U_{\text{imin}2} \leq U_i \leq U_{\text{imax}2} (i=1,2,3,4,5)$ 。

功率限制:所有换流站的有功功率均不超过其容量限制范围,即 $P_{\text{imin}} \leq P_i \leq P_{\text{imax}} (i=1,2,3,4,5)$ 。

3.3 指令计算

步骤 1 写出直流网络导纳矩阵 $\mathbf{Y}$,给出直流潮流计算方程,确定各换流站有功功率指令值。

步骤 2 正常运行状态下, U_{ref} 在电压限制范围 $U_{\text{imin}1} \sim U_{\text{imax}1}$ 内按固定步长 μ 增加,进行连续直流潮流计算,确定符合功率和电压限制的指令值 U_{ref} 范围,结果如下:

$$U_{\text{refmin}}^k \sim U_{\text{refmax}}^k \quad k=0 \quad (3)$$

其中, $k=0$ 表示正常运行状态。若直流线路过长或有功功率指令值过大,可能导致无解。

步骤 3 类似步骤 2 的方法,非主导站 VSC k 停运情况下,即有功功率指令值 $P_k=0$,计算保证直流电压和换流器容量不受限的指令值范围。若解存在,则计算结果如下:

$$U_{\text{refmin}}^k \sim U_{\text{refmax}}^k \quad k=1,2,3,4 \quad (4)$$

其中, k 表示换流站 VSC k 停运状态。

步骤 4 根据式(5)求出直流电压指令值 U_{ref} 的最终范围 $U_{\text{refmin}} \sim U_{\text{refmax}}$,并求出一个最佳值 U_{refopt} 。若 $U_{\text{refmin}} > U_{\text{refmax}}$ 成立,则解不存在。

$$\begin{cases} U_{\text{refmin}} = \max \{ U_{\text{refmin}}^k \} \\ U_{\text{refmax}} = \min \{ U_{\text{refmax}}^k \} \\ U_{\text{refopt}} = (U_{\text{refmin}} + U_{\text{refmax}}) / 2 \end{cases} \quad k=0,1,2,3,4 \quad (5)$$

3.4 解的存在性

解的存在性主要取决于有功功率指令值、主导站换流器容量,另外还与直流线路长度和电压限制范围大小相关。为了保证直流系统的可控性,一个 VSC-MTDC 系统应在设计规划阶段结合功率传输的需求进行换流器容量、网络参数与安全电压范围的

参数配合。若解不存在,则需要优化有功功率指令值以保证解的存在。

4 应对主导站停运的调控策略

4.1 调控目标

确定备用站的直流电压指令值,以保证主导站退出运行后 VSC-MTDC 系统在各换流站本地控制器的作用下仍能维持直流侧电压在一定的安全电压范围内,换流器不过载,并具有一定时间的运行能力,以等待运行中心发出调控命令重新调整系统的运行方式。本文中,调控目标为求取指令值 $U_{2\text{refH}}$ 、 $U_{2\text{refL}}$ 、 $U_{3\text{refH}}$ 和 $U_{3\text{refL}}$,使得主导站退出运行后能够满足上述条件。

4.2 调控手段

本文中备用换流站采用直流电压偏差控制,故运行中心可远程调控的指令值为备用换流站的直流电压上限指令值和下限指令值,即换流站 VSC2 和 VSC3 的指令值 $U_{2\text{refH}}$ 、 $U_{2\text{refL}}$ 、 $U_{3\text{refH}}$ 和 $U_{3\text{refL}}$ 。

若换流站向无源网络供电时,则该换流站仅能用于控制交流电网电压和频率,而无法调节直流系统电压和交换的有功功率,故换流站无法接受调控。

4.3 电压和功率限制

直流电压限制:该限制范围允许较大的电压运行范围,因为故障后系统的直流电压指令值被设为正常运行电压范围外的值,系统暂时运行于非正常运行状态以等待调度中心的调控指令进行运行方式的重调整,其取值范围为 $U_{\text{imin}2} \leq U_i \leq U_{\text{imax}2} (i=1,2,3,4)$ 。

功率限制:所有非主导换流站的有功功率均不超过其容量限制范围,即 $P_{\text{imin}} \leq P_i \leq P_{\text{imax}} (i=1,2,3,4)$ 。

4.4 指令计算

以主导站工作于整流状态为例,说明计算步骤。

步骤 1 确定哪些换流站为备用换流站,计算直流电压指令值为 U_{refopt} 时直流系统的运行状态。

步骤 2 计算各备用换流站的有功备用容量,包括整流容量 P_i^{rec} 和逆变容量 P_i^{inv} ,如下式:

$$\begin{cases} P_i^{\text{rec}} = P_{\text{imax}} - P_i \\ P_i^{\text{inv}} = P_i - P_{\text{imin}} \end{cases} \quad i=2,3 \quad (6)$$

按照 P_i^{rec} 大小对备用换流站进行排序,并分别指定为整流功率的主备用站和第二备用站。同理,按照 P_i^{inv} 进行排序,并分别指定为逆变功率的主备用站和第二备用站。

步骤 3 确定各备用换流站的直流电压上限指令值。由于主导站停运时系统会因缺少有功功率而引起直流电压下降,因此,直流电压上限指令值的改变不会影响到主导站停运时系统的安全运行,可不必考虑主导站停运时的电压和功率限制而采用简单

方法进行确定,如下式:

$$U_{\text{refH}} = \begin{cases} U_{i\text{max}1} & \text{主备用站} \\ U_{i\text{max}1} + \sigma & \text{第二备用站} \end{cases} \quad (7)$$

其中, σ 为直流电压指令值的裕度,备用站优先级按照逆变容量由大到小划分。

步骤 4 确定各备用换流站的直流电压下限指令值。直流电压下限指令值的确定方法如下式:

$$U_{\text{refL}} = \begin{cases} U_{i\text{min}1} - \Delta U & \text{主备用站} \\ U_{i\text{min}1} - \sigma - \Delta U & \text{第二备用站} \end{cases} \quad (8)$$

其中,备用站优先级按照整流容量划分。 ΔU 按固定步长 μ 增加,在 $0 \sim (U_{i\text{min}1} - U_{i\text{min}2})$ 范围内进行连续直流潮流计算,确定符合电压和功率限制的 ΔU 范围 $\Delta U_{\text{min}} \sim \Delta U_{\text{max}}$ 。为保证此种工况下不会因直流电压偏低而产生过电流现象,应选择 ΔU 的最小值,并计算各备用换流站的直流电压下限指令值,如下式:

$$U_{\text{refL}} = \begin{cases} U_{i\text{min}1} - \Delta U_{\text{min}} & \text{主备用站} \\ U_{i\text{min}1} - \sigma - \Delta U_{\text{min}} & \text{第二备用站} \end{cases} \quad (9)$$

此外,当主导站工作于逆变状态时,指令值计算过程类似,不再赘述。另外,在未确定备用站的直流电压上下限指令值前,若 $N-1$ 工况的潮流计算中出现了备用站负责直流电压控制的情况,则 U_{refH} 的选择参考式(7),将 $\Delta U=0$ 代入式(8)作为 U_{refL} 的确定方法。

4.5 解的存在性

备用容量校验通过的情况下,本节计算结果的存在性主要取决于有功功率指令值和电压限制范围。为保证主导站停运时系统能够维持直流电压,必须设计有功功率指令值的优化算法,通过牺牲有功容量提高备用容量的方法来保证系统稳定性。

5 有功功率指令值的优化

在应对非主导站和主导站停运的调控策略无解时,必须修改备用站有功功率指令值以增大系统有功备用容量,必要时需要修改换流站 VSC1 有功功率指令值,使系统在各种工况下满足有功功率平衡。以第 i 个换流站 VSC i ($i=1,2,3,4,5$) 发生故障为例说明有功功率指令值的修改方法。

a. 换流站 VSC1 有功功率指令值和换流站 VSC5 的直流电压指令值保持不变,并网运行的备用站 VSC j ($j \neq i; j=2,3$) 有功功率指令值在功率限制范围内按固定步长增加,连续计算直流潮流,确定 VSC i 停运时满足限制条件的指令值解集。若解集不存在,进入步骤 **b**; 否则,进入步骤 **c**。

b. 换流站 VSC j ($j \neq i; j=1,2,3$) 在功率限制范围内按固定步长增加,连续计算直流潮流,确定 VSC i 停运时满足限制条件的指令值解集。

c. 以初始值 ($P_{1\text{ref}}^0, P_{2\text{ref}}^0, P_{3\text{ref}}^0$) 为基准,采用加权方

法依据式(10)计算解集内所有有功功率指令值的评价指标 L ,并选取 L 最小的指令值组合作为最优指令值。

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^3 k_i (P_{i\text{ref}} - P_{i\text{ref}}^0)^2} \quad (10)$$

其中, k_i 为权重,可体现不同换流站交流侧电网的输电可靠性要求。若换流站 VSC i 交流侧电网的可靠性要求越高,则该换流站的 k_i 越大。

d. 校验在优化指令值下 VSC-MTDC 系统正常运行和其他 $N-1$ 运行工况下的容量与直流电压限制。若满足校验,则返回优化指令值;否则,相应地修改指令值解集,从解集中除去该指令值,并重复步骤 **c**,直至找到最优解。

另外,若调控策略中存在多个换流站停运工况下指令值无解情况,可按照步骤 **a**、**b** 依次求出每个换流站停运工况下有功功率指令值的解集,求取其交集作为指令值解集并进行后续计算。

6 算例验证

本文采用图 1 所示五端 VSC-MTDC 系统验证上述调控指令计算方法。线路参数为^[19]:除 L_{13} 的线路电阻为 0.070 4 p.u. 外,其他线路电阻均为 0.107 7 p.u.。换流站安全电压限制 $U_{i\text{min}1} \sim U_{i\text{max}1}$ 和 $U_{i\text{min}2} \sim U_{i\text{max}2}$ 分别为 0.92~1.08 p.u. 和 0.80~1.20 p.u.,主导站的换流器容量范围为 -1.25~1.25 p.u.,非主导站的换流器容量范围为 -1.0~1.0 p.u.,指令值裕度 σ 为 0.04 p.u.,权重 $k_1=1.0, k_2=k_3=0.8$ 。

6.1 算例 1

算例 1 中,各换流站有功功率指令值为 $P_{1\text{ref}} = -0.5$ p.u.、 $P_{2\text{ref}} = 0.6$ p.u.、 $P_{3\text{ref}} = 0.2$ p.u.、 $P_{4\text{ref}} = -0.5$ p.u.。应对非主导站停运的指令值计算结果见表 1,应对主导站停运的指令值见表 2。表 1 给出了换流站 VSC i ($i=1,2,3,4$) 停运情况下满足直流电压限制和功率限制条件的主导站 VSC5 直流电压指令值范围。表 2 给出了主导站 VSC5 停运情况下 VSC2 和 VSC3 直流电压指令值的计算结果。表 3 校验了优化指令值下正常情况和任意换流站停运时 VSC-MTDC 系统的运行状态。表 1—3 中,各数值均为标幺值。

表 1 算例 1 中应对非主导站停运时的计算结果

Tab.1 Calculated results for preventing non-leading converter from breakdown in case 1

运行状态	直流电压指令值范围
所有换流站正常运行	[0.934 7, 1.057 3]
VSC1 停运	[0.925 2, 1.036 4]
VSC2 停运	[0.951 0, 1.080 0]
VSC3 停运	[0.941 8, 1.067 0]
VSC4 停运	[0.920 0, 1.044 9]
$[U_{\text{refmin}}, U_{\text{refmax}}]$	[0.951 0, 1.036 4]
U_{refopt}	0.993 7

表 2 算例 1 中应对主导站停运时的计算结果

Tab.2 Calculated results for preventing leading converter from breakdown in case 1

变量名	变量值	变量名	变量值
U_{2refH}	1.08	U_{3refL}	0.92
U_{3refH}	1.12	U_{2refL}	0.88
$[\Delta U_{min}, \Delta U_{max}]$		$[0, 0.0832]$	

表 3 优化指令值下 VSC-MTDC 系统的各种运行状态

Tab.3 Operating statuses of VSC-MTDC system with optimal references

变量	正常运行	VSC1 停运	VSC2 停运	VSC3 停运	VSC4 停运	VSC5 停运
P_1	-0.5	0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
P_2	0.6	0.6	0	0.6	0.6	0.6
P_3	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0.4379
P_4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	-0.5
P_5	0.2239	-0.2663	0.8257	0.4236	-0.2771	0
U_1	0.9915	1.0172	0.9647	0.9842	1.0006	0.9000
U_2	1.0177	1.0389	0.9680	1.0075	1.0304	0.9327
U_3	1.0023	1.0200	0.9712	0.9888	1.0192	0.9200
U_4	0.9801	0.9890	0.9642	0.9732	1.0065	0.8869
U_5	0.9937	0.9937	0.9937	0.9937	0.9937	0.8935

由表 3 可知,主导站直流电压指令值为 0.9937 p.u. 时,其有功功率 P_5 为 0.2239 p.u.,处于整流状态,且 VSC3 为整流功率的主备用站,VSC2 为整流功率的第二备用站,则可得:

$$0 < P_5 < P_3^{rec} \tag{11}$$

基于上式成立,则主导站停运时,主备用站 VSC3 能够提供足够的有功容量进行直流电压控制,VSC2 仍为定有功功率控制站,其有功功率指令值保持不变。

算例 1 中,主导站停运时,主备用站 VSC3 作为直流电压控制站,指令值为 $U_{3refL}=0.92$ p.u.。由表 2 和表 3 可知,第二备用站 VSC2 的直流侧电压 U_2 为 0.9327 p.u.,未达到其本地控制器动作的阈值 $U_{2refL}=0.88$ p.u.,故仍运行于定有功功率控制状态,符合 VSC-MTDC 系统的运行特性。

由表 3 可知,VSC-MTDC 系统采用优化指令值时,能够保证正常状态和非主导站停运下直流电压维持在 0.92~1.08 p.u. 范围内,并且不存在换流器容量越限;在主导站停运状态下,能够维持直流电压在 0.80~1.20 p.u. 范围内且没有发生功率越限。

6.2 算例 2

算例 2 中,各换流站的有功功率指令值为 $P_{1ref}=-1.0$ p.u., $P_{2ref}=0.5$ p.u., $P_{3ref}=1.0$ p.u., $P_{4ref}=-0.9$ p.u.。应对非主导站停运时的计算结果见表 4,表中数值为标么值。

当 VSC3 停运时,主导站无法单独地承担功率平衡任务,直流电压降低使得 VSC2 进入直流电压控制模式,从而保证了系统功率平衡。由于 VSC2 的备用容量充足,该工况下系统能够维持系统功率平衡和直流电压不越限,此时,主导站不负责直流电压控制,

表 4 算例 2 中应对非主导站停运时的计算结果

Tab.4 Calculated results for preventing non-leading converter from breakdown in case 2

运行状态	直流电压指令值范围
所有换流站正常运行	$[0.9421, 1.0571]$
VSC1 停运	$[0.9235, 1.0159]$
VSC2 停运	$[0.9564, 1.0800]$
VSC3 停运	$[0.9200, 1.0800]$
VSC4 停运	$[0.9200, 1.0280]$
$[U_{ndmin}, U_{ndmax}]$	$[0.9564, 1.0159]$
U_{ndopt}	0.9862

因此,其直流电压指令值没有任何限制(见表 4)。

在应对主导站停运的调控策略中,主导站停运前处于整流状态,备用站 VSC3 运行于额定整流状态,无法提供用于直流电压控制的备用容量;VSC2 虽然处于直流电压控制模式,但是受限于换流器容量,无法实现直流电压控制,因此,直流系统失去了有功功率平衡,直流电压将持续上升直至保护装置动作切除。此时,调控策略将出现无解现象,意味着主导站停运后系统将在极短的时间内因保护动作退出运行。

按照本文提出的有功功率指令值优化方法,计算能够保证主导站停运时系统并网运行的有功功率指令值范围为:

$$P_{1ref} \in [-0.963, 1], P_{2ref} \in [-1, 1], P_{3ref} \in [-1, 1] \tag{12}$$

依式(10)选择最优指令值为 $P_{1ref}=-0.9630$ p.u., $P_{2ref}=0.5$ p.u., $P_{3ref}=1.0$ p.u.。按照优化后的有功功率指令值重新进行稳态调控计算,可得直流电压指令值见表 5。表 6 校验了优化指令值下正常情况和换流站停运时的 VSC-MTDC 系统运行状态。表 5、6 中,各数值均为标么值。

由表 6 可知,正常运行和 VSC1、VSC2、VSC4 停

表 5 直流电压指令值的计算结果

Tab.5 Results of DC voltage references

变量名	指令值	变量名	指令值
U_{ref}	0.9852	U_{2refL}	0.92
U_{3refH}	1.08	U_{3refL}	0.88
U_{2refH}	1.12	$[\Delta U_{min}, \Delta U_{max}]$	$[0, 0.0345]$

表 6 优化指令值下 VSC-MTDC 系统的各种运行状态

Tab.6 Operating statuses of VSC-MTDC system with optimal references

变量	正常运行	VSC1 停运	VSC2 停运	VSC3 停运	VSC4 停运	VSC5 停运
P_1	-0.9630	0	-0.9630	-0.9630	-0.9630	-0.9630
P_2	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5
P_3	1	1	1	0	1	1
P_4	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	0	-0.9
P_5	0.4297	-0.5098	0.9279	1.2500	-0.4665	0
U_1	0.9746	1.0245	0.9522	0.8896	0.9909	0.8596
U_2	1.0100	1.0510	0.9687	0.9200	1.0327	0.9200
U_3	1.0106	1.0440	0.9852	0.8965	1.0404	0.9039
U_4	0.9651	0.9824	0.9519	0.8776	1.0128	0.8388
U_5	0.9852	0.9852	0.9852	0.9309	0.9852	0.8492

运行时,系统直流电压均保持在0.92~1.08 p.u.范围内,并且各换流站没有容量越限。当备用站VSC3停运时,主导站VSC5和VSC2共同负责有功功率平衡;其中VSC5进入限流状态,输出额定功率1.25 p.u.,VSC2借助于直流电压偏差控制器辅助直流系统的有功平衡,系统直流电压和有功功率处于安全范围内。当VSC5停运时,VSC2负责直流电压控制,系统直流电压均保持在0.80~1.20 p.u.范围内且未发生功率越限。

综上,VSC-MTDC系统采用优化指令值后能够保证其正常运行和任意换流站停运时的持续并网运行,因此,本文提出的有功功率指令值优化方法切实可行。

7 结论

a. 本文提出了一种VSC-MTDC系统的稳态调控方案,用于保证系统在正常运行和换流站 $N-1$ 故障下的直流电压安全和有功功率平衡,对直流系统的运行与调度有一定的参考价值。

b. 本文给出了调控方案的指令值计算及其优化方法,并以五端MTDC系统为例进行分析和验证了相关方法的可行性和准确性。

c. 由于并网换流站数目、控制模式和直流网络拓扑等因素的影响,VSC-MTDC系统运行方式具有多变性的特点。为了保证VSC-MTDC系统稳定运行,直流调度必须考虑到当前运行方式及其他可能的运行方式;还应进一步地考虑到VSC-MTDC系统运行方式变化对交流电网潮流和稳定性的影响。

参考文献:

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [3] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [4] 韦延方, 卫志农, 孙国强, 等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 1-9.
WEI Yanfang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 1-9.
- [5] FELTES C, WREDE H, KOCH F W, et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1537-1546.
- [6] XU Lie, YAO Liangzhong, SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 976-984.
- [7] 吴俊宏, 艾芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 22-27.
WU Junhong, AI Qian. Research on multiterminal VSC-HVDC system for wind-farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 22-27.
- [8] 陈谦, 唐国庆, 潘诗锋. 采用多点直流电压控制方式的VSC多端直流输电系统[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 10-15.
CHEN Qian, TANG Guoqing, PAN Shifeng. VSC-MTDC using multi-terminal DC voltage control scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 10-15.
- [9] 赵成勇, 胡东良, 李广凯, 等. 多端VSC-HVDC用于风电场联网时的控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 135-140.
ZHAO Chengyong, HU Dongliang, LI Guangkai, et al. Control strategy for integration of wind farms by multi-terminal VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 135-140.
- [10] DU Cuiqing. VSC-HVDC for industrial power systems[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2007.
- [11] 李胜. 柔性直流技术在城市电网中应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
LI Sheng. Application research of VSC DC in urban power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [12] 陈海荣, 徐政. 向无源网络供电的VSC-HVDC系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 42-48.
CHEN Hairong, XU Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 42-48.
- [13] 邹超, 王奔, 李泰. 向无源网络供电的VSC-HVDC系统控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 84-88, 110.
ZOU Chao, WANG Ben, LI Tai. Control strategy of VSC-HVDC system supplying power for passive networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 84-88, 110.
- [14] LU Weixing, OOI B T. DC overvoltage control during loss of converter in Multiterminal Voltage-Source Converter-based HVDC (M-VSC-HVDC) [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 915-920.
- [15] 陈海荣, 徐政. 适用于VSC-MTDC系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 28-33.
CHEN Hairong, XU Zheng. A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 28-33.
- [16] 阮思烨, 李国杰, 孙元章. 多端电压源型直流输电系统的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 57-60, 96.
RUAN Siye, LI Guojie, SUN Yuanzhang. A control strategy for multi-infeed VSC-HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 57-60, 96.
- [17] 丁涛, 张承学, 孙元博. 基于本地信号的VSC-MTDC输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 44-48.
DING Tao, ZHANG Chengxue, SUN Yuanbo. A control strategy based on local signal measuring for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 44-48.
- [18] 吴俊宏, 艾芊, 章健, 等. 基于多代理技术的VSC-MTDC控制系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 85-89.
WU Junhong, AI Qian, ZHANG Jian, et al. A VSC-MTDC control system based on multi-agent technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 85-89.
- [19] LU Weixing, OOI B T. DC voltage limit compliance in voltage-source converter based multi-terminal HVDC [C] // IEEE

Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2005: 1322-1327.

- [20] LU Weixing. Control and application of multi-terminal HVDC based on voltage-source converter[D]. Montreal,Canada:McGill University,2003.

作者简介:

任敬国(1986-),男,山东利津人,博士研究生,主要研究

方向为基于电压源换流器的高压直流输电技术的控制与应用(E-mail: rjg@mail.sdu.edu.cn);

李可军(1972-),男,山东高密人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量、灵活交流输电及其智能控制(E-mail: lkjun@sdu.edu.cn);

赵建国(1955-),男,山东乳山人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统调度自动化、电力电子与电力传动等方面的研究工作。

***N*-1 principle based steady-state control of VSC-MTDC transmission system**

REN Jingguo¹, LI Kejun¹, ZHAO Jianguo^{1,2}, NIU Lin², LIANG Yongliang¹, GUO Qiwei¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. State Grid of China Technology College, Ji'nan 250002, China)

Abstract: The requirements for maintaining VSC-MTDC transmission system safe and stable are analyzed, and the hierarchical structure of control system and the calculation of DC power flow are outlined. An *N*-1 principle based control strategy is proposed for the steady-state operation of MTDC transmission system. Based on the continuous DC power flow calculation and the DC voltage and power limits, the control strategy coping with the single converter loss is designed, the specified steps of reference value calculation is presented and the existence of solution is discussed. When there is no solution, the way to optimize the active power reference is proposed and an evaluation index is defined for searching the optimal active power references after optimization. A typical five-terminal DC system is introduced and MATLAB programming is applied to verify the feasibility and accuracy of the proposed strategy. Results show that the proposed control strategy provides VSC-MTDC transmission system with reliable and safe references.

Key words: DC power transmission; VSC-HVDC; MTDC; *N*-1 principle; steady-state control

(上接第 73 页 continued from page 73)

Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC

LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, ZHAO Yan, PANG Hui

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A hybrid real-time simulation platform with digital and physical subsystems is proposed for the MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based HVDC). Its system structure, equivalent principle and simulation ratio calculation are introduced, as well as its first application in engineering development. Composed of the digital system model, 49-level MMC physical simulation device, digital-analog communication interface, it carries out the total functional simulation in real time to verify the actual VBC (Valve Based Controller) and converter PCP (Pole Control Protection) system. It is applied to the fault state simulation of Shanghai Nanhui HVDC pilot project and the simulative results are compared with the test results by PSCAD, which proves the effectiveness of the introduced platform in the online real-time verification of the dynamic performance and control-protection platform of MMC-HVDC.

Key words: modular multilevel converter; HVDC power transmission; computer simulation; physical simulation; equivalent principle