

混合多馈入直流系统VSC-HVDC和滤波器的无功协调控制

李佳¹, 夏勇军², 严才¹, 姚伟¹, 姚兵³, 文劲宇¹

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 3. 湖北直流运检公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要:为了减少常规直流输电(LCC-HVDC)的滤波器投切,充分利用柔性直流输电(VSC-HVDC)的无功调节容量和其动态调节无功的优势,提出一种适用于LCC-HVDC和VSC-HVDC电气距离较近情况下的混合多馈入直流系统的无功协调控制策略。分别分析了LCC-HVDC和VSC-HVDC的无功控制原理及其控制特点,基于滤波器投切和VSC-HVDC两者的无功控制优势,设计了混合多馈入直流系统的无功协调两级控制模块,达到减少滤波器投切,抑制暂态低电压和过电压的目的。在PSCAD/EMTDC中搭建混合多馈入直流系统模型并进行仿真验证,仿真结果表明所提协调控制策略的控制效果优于VSC-HVDC采用定无功功率控制和定交流电压控制。

关键词:混合多馈入直流系统;滤波器投切;暂态电压;动态调节无功;无功协调控制

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102032

0 引言

国家电网建设的混合多馈入直流系统结构首次在渝鄂背靠背联网工程中出现^[1]。现有混合多馈入直流系统中常规直流输电(LCC-HVDC)和柔性直流输电(VSC-HVDC)分别独立运行,互不协调,未能充分利用VSC-HVDC的无功容量,发挥其动态调节无功的优势^[2-3]。而且当LCC-HVDC运行时滤波器投切频繁,设备损耗大,寿命短^[4]。随着西部大规模可再生能源经VSC-HVDC并网,未来我国东中部地区大容量混合多馈入直流系统的特征将更加突出^[5]。如何有机结合2种直流输电系统的技术特点,充分发挥混合系统结构的运行优势成为亟需研究的课题^[6]。

针对混合多馈入直流系统结构,国内外文献主要从2个方面展开研究:其一是分析LCC-HVDC和VSC-HVDC的耦合特性^[7-9];其二是研究LCC-HVDC和VSC-HVDC的协调控制^[10-15]。在耦合特性方面,文献[7]通过小信号模型计算基于阻抗的有效短路比,定量分析VSC-HVDC和LCC-HVDC的相互影响;文献[8]采用特征根分析方法研究了交流系统对混合多馈入直流系统小干扰稳定的影响,并提出了一种附加虚拟电阻阻尼控制策略;文献[9]构建了直流系统及两端交流系统的小信号模型,并通过小信号分析揭示了换流站间的交互作用机理,而后提出了一种抑制换流站间耦合的控制方法。在协调控制方面,通过LCC-HVDC和VSC-HVDC的协同作用改善

交直流系统的运行性能。一方面,利用VSC-HVDC无功调节速度快的特点为LCC-HVDC及时提供无功支撑:文献[10]在VSC-HVDC控制策略的内环控制与外环控制之间加入自适应动态限幅器,当电网发生故障时VSC-HVDC最大可能向LCC-HVDC提供无功功率支撑;文献[11]提出了一种基于混合多馈入直流系统中的LCC-HVDC有功和VSC-HVDC无功协调的后续换相失败抑制方法;文献[12]提出了一种将故障时基于关断角计算得到的无功功率补偿值附加至VSC-HVDC无功控制回路的方法,利用VSC-HVDC调节无功。另一方面,利用VSC-HVDC动态调节无功的特点减缓了LCC-HVDC滤波器投切时所带来的无功突变和电压波动:文献[13-14]提出在滤波器投切的过程中VSC-HVDC迅速补充相反的无功功率,减缓了滤波器投切时无功功率的突变和电压波动,但未能充分利用VSC-HVDC无功调节容量,缓解滤波器频繁投切的问题;文献[15]提出了针对LCC-HVDC在低负荷运行及交流滤波器投切瞬间2种工况的协调控制策略,但在过负荷(1.1倍负荷)和低负荷(负荷的90%)工况下存在无功波动问题。

本文提出了一种适用于混合多馈入直流系统的无功协调控制策略,针对滤波器频繁投切问题,优先利用VSC-HVDC调节无功,减少滤波器的投切;在文献[15]所提控制策略的基础上添加无功控制死区,抑制无功波动。以渝鄂背靠背联网工程为研究对象,首先分析了LCC-HVDC和VSC-HVDC的无功控制策略及其控制特性。基于二者控制特性的分析,提出无功协调控制策略。进一步对比分析了所提控制策略和VSC-HVDC采用定交流电压控制的控制性能。最后在PSCAD/EMTDC中搭建混合多馈入直流系统仿真模型,验证了所提无功协调控制策略的

收稿日期:2020-07-24;修回日期:2020-12-18

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5100-202022011A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(5100-202022011A-0-0-00)

有效性。

1 混合多馈入直流系统

渝鄂背靠背联网工程示意图见附录中图 A1。VSC-HVDC 背靠背系统的送端位于西南电网的九盘,受端位于华中电网的龙泉,从而实现西南电网和华中电网的异步互联,并且三峡水电站发出的电能通过龙政直流向华东电网的负荷中心输送。该工程的建立使得龙泉电网成为混合多馈入直流系统。由于 VSC-HVDC 背靠背系统的受端和龙政直流的整流侧间电气距离较近,可以通过调节 VSC-HVDC 背靠背系统受端换流站发出的无功来满足龙政直流整流侧的无功需求。

2 无功控制原理介绍

2.1 LCC-HVDC 的无功控制

LCC-HVDC 的基本无功控制主要包括绝对最小滤波器组控制、最小滤波器组控制、极限电压控制、最大无功功率限制以及交流滤波器组的定无功或定电压控制^[16]。其中,绝对最小滤波器组控制、最小滤波器组控制、极限电压控制和最大无功功率限制主要是为了交直流输电系统的正常运行而设置的限定条件;交流滤波器组定无功和定电压控制在实际运行中两者二选一,不能同时启动。上述无功控制的优先级和功能如表 1 所示。

表 1 LCC-HVDC 基本无功控制策略简介

Table 1 Introduction of conventional reactive power control strategy for LCC-HVDC

优先级	无功控制	功能
1	绝对最小滤波器组控制	保护滤波器安全运行,防止过负荷运行
2	极限电压控制	保证换流母线电压在所设置的最大值和最小值之间
3	最大无功功率限制	防止交直流系统交换无功功率时出现过电压
4	最小滤波器组控制	在满足交直流谐波特性的情况下,控制投入数量最少和型号合适的滤波器组
5	交流滤波器组定无功控制	控制运行中交直流系统交换的无功功率在规定范围内
	交流滤波器组定电压控制	控制换流母线电压在规定的范围内

为了满足某些特定工况,LCC-HVDC 还配有无功控制功能和 Gamma-kick 功能,其示意图分别见图 1(a)、(b)。图中, Q_s 、 Q_{ref} 分别为无功实际值及其整定值;PI 为比例积分控制环节; $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\gamma$ 、 $\Delta\gamma_{max}$ 分别为换流器的触发角、熄弧角变化量及 $\Delta\gamma$ 的最大值; t_1 和 t_2 分别为滤波器投入和切除时刻。无功控制功能是指当由于某些原因滤波器不能切除时,通过增大换流器触发角或熄弧角,消耗过补偿的无功功率。

Gamma-kick 功能是指当滤波器收到投切指令时,在滤波器投切过程中,通过短时间内调整触发角或熄弧角来快速改变换流器消耗的无功以补偿无功功率的突变,减小滤波器投切时造成的电压波动。但 2 种功能均需改变 LCC-HVDC 运行触发角,以牺牲 LCC-HVDC 的经济性为代价。因此在混合多馈入直流系统中存在进一步的优化空间。

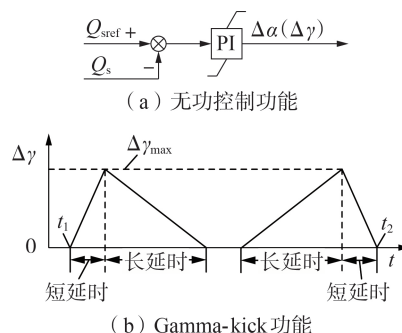


图 1 无功控制和 Gamma-kick 的功能示意图

Fig.1 Schematic diagram of reactive power control and Gamma-kick function

当交流滤波器采用定无功功率控制时,LCC-HVDC 根据交直流系统交换的无功功率进行滤波器的投切控制,实现无功就地平衡。为了避免滤波器的频繁投切,定无功功率设有死区 $[Q_{filter_L}, Q_{filter_H}]$ (Q_{filter_H} 、 Q_{filter_L} 分别为交流滤波器 Q_{filter} 定无功控制死区区间的上、下限值)。由于断路器的开关和滤波器响应需要一定时间,LCC-HVDC 的无功控制发出投切指令延时一段时间后再发出下一次投切指令。

由于存在死区和延时,通过投切滤波器调节无功的响应速度较慢,又因为滤波器的无功容量是固定值,不能连续地调节无功,无功调节响应曲线呈阶梯状,在投切瞬间还会引起无功突变和电压较大波动。另外,LCC-HVDC 以低功率(功率的 10%)运行时,受最小滤波器组控制功能的限制,将出现无功过补偿导致换流母线电压过高的现象。

2.2 VSC-HVDC 的无功控制

VSC-HVDC 的无功控制框图见附录中图 A2,采用双闭环电流矢量控制,主要包括外环控制器、内环控制器、锁相同步器和触发脉冲产生器。功率或电压指令值经外环控制器得到有功电流和无功电流整定值并输送给内环控制器,经耦合计算得到换流器出口电压的 d 轴分量和 q 轴分量,最后通过坐标系变换得到基于 abc 坐标系下的正弦调制波^[17]。

双闭环电流矢量控制实现有功电流 i_d 和无功电流 i_q 的解耦控制, Q_q 能快速跟随 Q_{ref} 的变化,所以 VSC-HVDC 系统的无功调节速度快,能连续调节。但受 VSC-HVDC 本身元件的限制,在输送有功不变的情况下所提供的无功有限,VSC-HVDC 的无功调

节容量较小。

3 无功协调控制策略

3.1 无功协调控制模块

由上述分析可知,投切滤波器可调节的无功容量大,但其响应速度慢,不能实现连续调节;VSC-HVDC调节无功速度快,能实现连续调节,但无功调节能力有限。基于此,在VSC-HVDC的受端换流站设置无功协调控制模块,充分利用滤波器投切和VSC-HVDC调节无功的优势进行无功协调控制,以合理利用VSC-HVDC的无功调节容量,减少LCC-HVDC滤波器的频繁投切,抑制滤波器投切瞬间引起的无功突变和电压波动。

图2为无功协调控制逻辑框图。图中, Q_{EX_m} 为交流电网与LCC-HVDC整流站交换的无功功率,设交流电网向LCC-HVDC整流站注入的无功为正,反之为负; $Q_{EX_ref_H}$ 、 $Q_{EX_ref_L}$ 分别为交流电网与LCC-HVDC整流站交换无功的协调控制死区区间的上、下限值; Q_{VSC_MAX} 、 Q_{VSC_MIN} 分别为VSC-HVDC逆变站调节无功功率 Q_{VSC} 的最大、最小值; Q_f 为滤波器额定无功容量; ΔQ_{VSC_ref} 为VSC-HVDC逆变站外环定无功功率控制环节的附加无功功率补偿值,其取值为正表示发出无功功率,取值为负表示吸收无功功率。实测的交直流系统交换的无功功率经过一阶惯性环节模拟VSC-HVDC和LCC-HVDC之间的通信延时,取比例常数 $G=1.0$,时间常数 $T=0.01\text{ s}$ 。

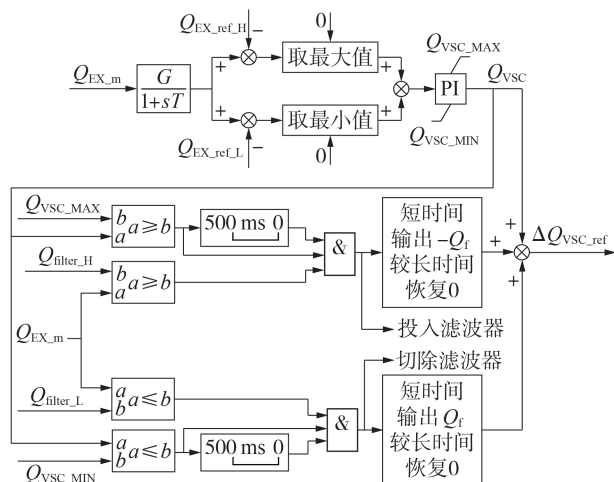


图2 无功协调控制框图

Fig.2 Block diagram of reactive coordinated control

所提无功协调控制策略分为两级。第一级以VSC-HVDC调控为主,滤波器调控为辅,VSC-HVDC优先进行无功功率调节,滤波器不动作。当 Q_{EX_m} 超出无功协调控制死区区间 $[Q_{EX_ref_L}, Q_{EX_ref_H}]$ 时,将偏差值转换为无功补偿值,加入VSC-HVDC逆变站的外环定无功功率控制环节,调节VSC-HVDC逆变站

吸收或发出无功功率。第二级以滤波器调控为主,VSC-HVDC调控为辅,通过投切滤波器来调节LCC-HVDC无功功率,并且在投切的过程中VSC-HVDC逆变站迅速补充相反的无功功率来抑制无功功率的突变和电压的波动。考虑滤波器投切周期,当VSC-HVDC逆变器补偿的无功功率达到 Q_{VSC_MAX} 或 Q_{VSC_MIN} 并持续500 ms,且 Q_{EX_m} 超出交流滤波器定无功控制死区区间 $[Q_{filter_L}, Q_{filter_H}]$ 时,发出投切滤波器的指令;在投切滤波器的同时VSC-HVDC逆变站补偿的无功功率在短时间内(30~50 ms)迅速减小到一定值,然后在较长时间内恢复到原来的状态。

相比于文献[15]所述的无功协调控制策略,本文所提控制策略只需测得 Q_{EX_m} ,由于实际运行时系统无功存在波动,同时为了避免在某个无功功率临界点发生振荡,本文添加无功控制死区。另外通过PI控制器提高了无功响应速度,且设有滤波器投切判据,避免VSC-HVDC和LCC-HVDC发生无功控制冲突。

3.2 定交流电压控制和无功协调控制对比分析

LCC-HVDC换流站在运行过程中无功功率消耗值与其传输的有功功率成正比,一般认为换流站消耗的无功功率是直流输电线路传输有功功率值的40%~60%。LCC-HVDC采用12脉动换流阀,消耗的无功功率 Q_{LCC} 可以表示为^[18]:

$$Q_{LCC} = \frac{1}{2} \frac{2\mu + \sin(2\alpha) - \sin[2(\alpha + \mu)]}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)} I_d U_{d0} \quad (1)$$

其中, μ 为换相角; I_d 为直流电流; U_{d0} 为理想空载直流电压。

图3为在LCC-HVDC输送功率变化时,VSC-HVDC逆变站采用定交流电压控制和无功协调控制的暂态无功响应过程。图中, I_{dref} 为直流电流整定值; U_r 为LCC-HVDC整流侧换流母线电压; U_{ref} 为定

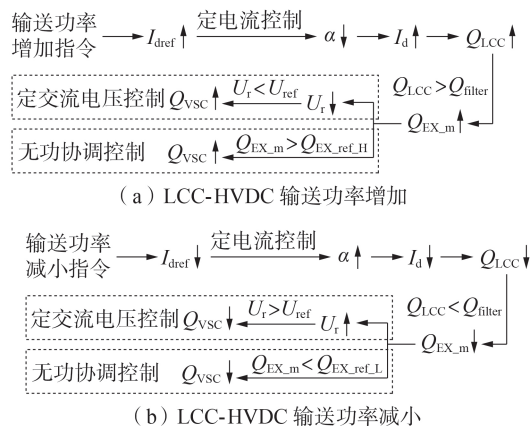


图3 定交流电压控制和无功协调控制的暂态无功响应过程

Fig.3 Transient reactive response process of constant AC voltage control and reactive coordinated control

交流电压控制的电压整定值。对于 VSC-HVDC 逆变站采用定交流电压控制,只有当整流侧换流母线电压偏离整定值才补偿无功;而采用无功协调控制时,若交直流系统交换的无功超出一定范围就立刻补偿无功,不必等到电压发生改变才补偿无功,提高了短时间内的无功响应速度,更好地抑制暂态低电压和暂态过电压。需要注意的是,上述分析没有考虑 LCC-HVDC 整流站和 VSC-HVDC 逆变站之间通信延时的影响,但是 LCC-HVDC 整流站和 VSC-HVDC 逆变站的电气距离近,延时时间不会太长。若 LCC-HVDC 整流站和 VSC-HVDC 逆变站间的电气距离较远,两者之间通信延时较长,无功协调控制的无功响应速度将低于定交流电压控制。

4 仿真验证

为了验证所提无功协调控制策略的有效性,在 PSCAD / EMTDC 中搭建如附录中图 A1 所示的混合多馈入直流系统的仿真模型,其中 VSC-HVDC 逆变站和 LCC-HVDC 整流站通过 1 条长度为 20 km 的联络线相联。VSC-HVDC 与 LCC-HVDC 主要参数见附录中表 A1。

对于无功协调控制模块,由于额定工况下交流电网向 LCC-HVDC 整流站注入的无功功率约为 10 Mvar,考虑 VSC-HVDC 无功调节速度快且有一定裕度,设 $Q_{EX_ref_H}=30$ Mvar, $Q_{EX_ref_L}=-10$ Mvar。考虑 VSC-HVDC 承受过负荷能力有限,VSC-HVDC 无功调节限值按满载功率计算,VSC-HVDC 额定满载功率为 1 250 MW,VSC-HVDC 逆变站运行输送有功功率为 1 000 MW,计算得到 VSC-HVDC 的无功调节限值为 750 Mvar,考虑一定安全裕度,设 $Q_{VSC_MAX}=600$ Mvar, $Q_{VSC_MIN}=-600$ Mvar,设额定容量为 1 250 MV·A,定无功功率和定交流电压控制的 PI 控制器限幅为 $i_{qmax}=0.48$ p.u., $i_{qmin}=-0.48$ p.u.。LCC-HVDC 整流侧每组滤波器的额定无功容量为 170 Mvar,设滤波器投切时 VSC-HVDC 逆变站发出或吸收的无功功率在 30 ms 内迅速减小 170 Mvar,然后在 470 ms 内恢复至原来的状态。

4.1 过负荷工况

设第 2 s 时 LCC-HVDC 整流站直流电流指令值从 1.0 p.u. 增加到 1.1 p.u.。当 VSC-HVDC 逆变站分别采用定无功功率控制、定交流电压控制和无功协调控制时,分析其对 LCC-HVDC 整流站的滤波器组数、VSC-HVDC 逆变站发出的无功功率、交流电网向 LCC-HVDC 整流站注入的无功和 LCC-HVDC 整流站换流母线电压的影响,仿真结果如图 4 所示。图中, U_t 为标幺值,后同; T_1 为故障发生时刻; T_2 为无功协调控制第一级控制启动时刻; T_3 为无功协调控制输出最大无功时刻; T_4 为定交流电压控制输出最大无

功时刻; T_5 为定无功功率控制投入滤波器时刻。

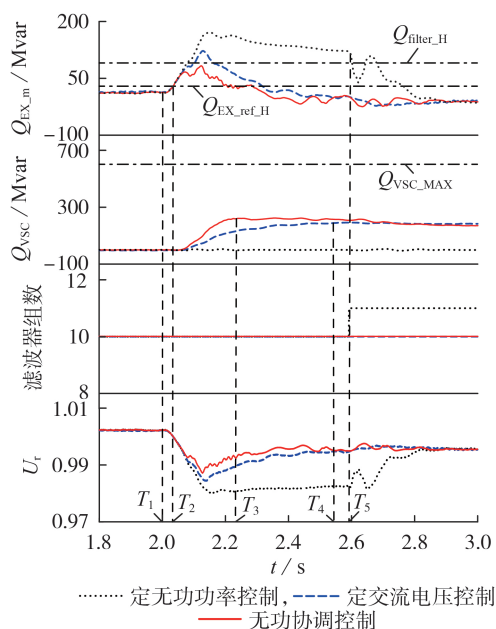


图4 过负荷工况下混合多馈入直流系统仿真波形

Fig.4 Simulative waveforms of hybrid multi-feed HVDC system under overload condition

根据图 4,当 LCC-HVDC 输送功率增大时,无功欠补偿,电网向 LCC-HVDC 整流站注入的无功功率迅速增加,电压下降。当 VSC-HVDC 逆变站采用定无功功率控制时,由于滤波器投切控制存在延时,在 $Q_{EX_m} > Q_{filter_H}$ 时滤波器投切控制启动,一段时间后 Q_{EX_m} 仍然大于 Q_{filter_H} ,在 T_5 时刻投入 1 组滤波器,在滤波器投入瞬间存在无功突变和电压波动,换流母线暂态电压最低为 0.98 p.u.;当 VSC-HVDC 逆变站采用定交流电压控制时,电压低于整定值,VSC-HVDC 逆变站发出无功功率,减小了电网向 LCC-HVDC 整流站注入的无功,抑制电压降低,无功响应时间为 T_4-T_1 ,换流母线暂态电压最低为 0.9844 p.u.;当 VSC-HVDC 逆变站采用无功协调控制时,在 T_2 时刻, $Q_{EX_m} > Q_{EX_ref_H}$ 时,无功协调控制第一级启动,VSC-HVDC 逆变站发出无功功率,无功响应时间为 T_3-T_1 ,无功响应更快,更好地抑制电压降低,换流母线暂态电压最低为 0.9871 p.u.,而 VSC-HVDC 逆变站发出的无功功率没有达到 Q_{VSC_MAX} ,故无功协调控制第二级不启动。

4.2 低功率工况

设第 2 s 时 LCC-HVDC 的直流电流指令值从 1.0 p.u. 变化到 0.5 p.u.。当 VSC-HVDC 逆变站分别采用定无功功率控制、定交流电压控制和无功协调控制时,分析其对 LCC-HVDC 整流侧的滤波器组数、VSC-HVDC 逆变站发出的无功功率、交流电网向 LCC-HVDC 整流站注入的无功和 LCC-HVDC 整流站换流母线电压的影响,仿真结果如图 5 所示。图中,

T'_1 为故障发生时刻; T'_2 为无功协调控制第一级控制启动时刻; T'_3 为无功协调控制吸收最大无功时刻; T'_4 为定交流电压控制吸收最大无功时刻; T'_5 为无功协调控制第二级控制结束时刻。

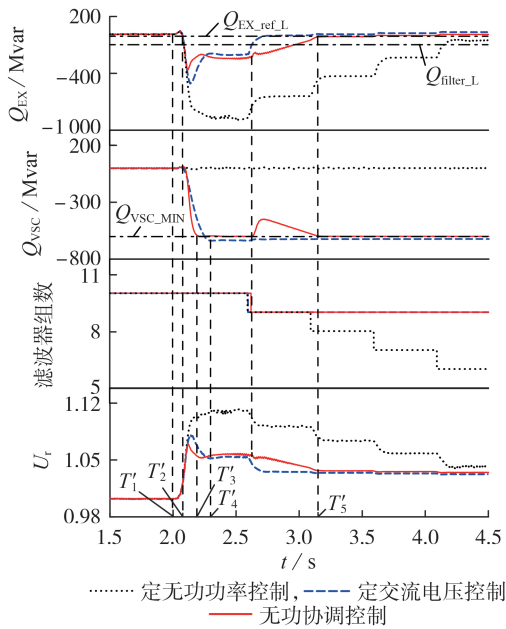


图5 低负荷工况下混合多馈入直流系统仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms of hybrid multi-feed HVDC system under low load condition

根据图5,当LCC-HVDC输送功率减小时,无功过补偿,LCC-HVDC整流站向交流电网注入无功,电压上升。当VSC-HVDC逆变站采用定无功功率控制时,需要切除4组滤波器减少无功输出,使 $Q_{EX_m} > Q_{filter.L}$,由于滤波器投切存在延时和死区,一开始不能立即调节无功,导致换流母线迅速升高,暂态电压最高为1.1124 p.u.,又因为其不能连续调节无功,在切除瞬间系统无功突变,电压波动较大;当VSC-HVDC逆变站采用定交流电压控制时,电压高于整定值,VSC-HVDC逆变站吸收无功,减小了LCC-HVDC整流站向电网注入的无功,抑制了电压的上升,无功响应时间为 $T'_4 - T'_1$,换流母线暂态电压最高为1.0814 p.u.,吸收无功达到最低值时 $Q_{EX_m} < Q_{filter.L}$,需要切除1组滤波器平衡无功,在切除瞬间同样存在无功突变和电压波动;当VSC-HVDC逆变站采用无功协调控制时,在 T'_2 时刻,当 $Q_{EX_m} < Q_{EX_ref.L}$ 时,无功协调控制第一级启动,VSC-HVDC逆变站吸收无功功率,无功响应时间为 $T'_3 - T'_1$,无功响应更快,更好地抑制电压的上升,换流母线暂态电压最高为1.0697 p.u.,在 T'_3 时刻,VSC-HVDC逆变站吸收的无功功率达到最小值 Q_{VSC_MIN} ,无功协调控制第二级启动,500 ms后 $Q_{EX_m} < Q_{filter.L}$,切除1组滤波器平衡无功,在切除滤波器的同时VSC-HVDC逆变站吸收的无功功率在短时间内迅速减小了一定值,然后在较

长时间内恢复到原来的状态,抑制了滤波器投切瞬间所引起的交换无功突变并减缓了换流母线电压波动,在 T'_5 时刻, $Q_{EX_m} > Q_{filter.L}$,不需要继续切除滤波器。

4.3 LCC-HVDC不同输送功率下的有效性验证

当LCC-HVDC过负荷(低功率)运行时,其整流站消耗的无功功率增加(减小),无功欠补偿(过补偿),需要投入(切除)无功补偿器,抑制换流母线电压降低(升高)。为了评估无功协调控制策略在LCC-HVDC不同输送功率下的有效性,除了比较滤波器的投切数量之外,还定义如式(2)所示电压最大偏移率 η ,其值越小,表示控制性能越好。

$$\eta = \frac{|U_{ac_min(max)} - U_{ac_N}|}{U_{ac_N}} \times 100\% \quad (2)$$

其中, $U_{ac_min(max)}$ 为换流母线暂态电压最低值(最高值); U_{ac_N} 为换流母线额定电压。

当LCC-HVDC的输送功率 P_{LCC} (标么值)发生变化时,VSC-HVDC逆变站采用定无功功率控制、定交流电压控制及无功协调控制时,滤波器的投切数量和 η 的变化情况见表2。

表2 不同输送功率下有效性对比

Table 2 Comparison of efficiency under different transmission power

P_{LCC}	滤波器的投切数量			$\eta / \%$		
	定无功 功率控制	定交流 电压控制	无功协调 控制	定无功 功率控制	定交流 电压控制	无功协调 控制
1.1	+1	0	0	2.00	1.56	1.29
0.9	-1	0	0	2.32	1.71	1.67
0.8	-2	0	0	4.53	3.03	3.04
0.7	-3	0	0	6.72	4.78	4.39
0.6	-3	0	0	9.08	6.40	5.79
0.5	-4	-1	-1	11.24	8.14	6.97
0.4	-5	-2	-2	13.33	9.67	8.29
0.3	-6	-3	-3	15.93	11.24	10.20
0.2	-7	-4	-4	18.46	13.10	12.86
0.1	-7	-5	-5	21.10	14.99	15.28

注:“+”和“-”分别表示投入和切除滤波器。

根据表2,相较于定无功功率控制,无功协调控制能减少滤波器投切,抑制暂态低电压和暂态高电压,同时抑制无功的突变和减缓电压波动。相较于定交流电压,无功协调控制在负荷波动范围为10%~80%时, η 较大,但在其他工况下 η 较小。总体而言,在无功响应和抑制暂态低电压和暂态高电压方面,无功协调控制略优于定交流电压控制;在抑制无功的突变和减缓电压波动方面,无功协调控制明显优于定交流电压控制。

4.4 无功波动的抑制

设计2种无功协调控制方案:方案1为在VSC-HVDC逆变站常规无功控制的基础上,加入文献[15]所述的无功协调控制策略,并调整其控制参数;方案2为在VSC-HVDC逆变站常规无功控制的基础

上,加入本文所提无功协调控制策略。在过负荷(1.1倍负荷)和低负荷(负荷的90%)工况下对比2种协调控制方案下系统响应情况。VSC-HVDC逆变站发出的无功功率 Q_{VSC} 、换流母线电压 U_{VSC} 以及LCC-HVDC整流站换流母线电压 U_L 波形见图6。图中, U_{VSC} 为标么值。

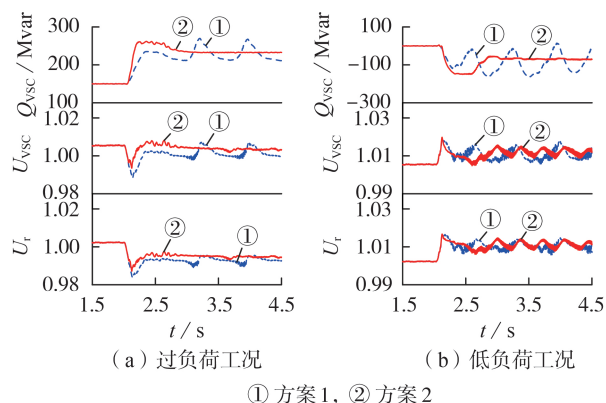


图6 2种控制方案下混合多馈入直流系统响应波形

Fig.6 Response waveforms of hybrid multi-feed HVDC system under two control schemes

根据图6,当采用文献[15]所述的无功协调控制策略,在过负荷(1.1倍负荷)和低负荷(负荷的90%)工况下VSC-HVDC逆变站补偿的无功存在明显波动,从而引起VSC-HVDC逆变站和LCC-HVDC整流站换流母线电压波动,而无功协调控制策略设有无功控制死区,避免VSC-HVDC逆变站补偿的无功在无功功率临界点发生振荡,较好地抑制了无功波动,减缓了VSC-HVDC逆变站和LCC-HVDC整流站换流母线电压的波动。

5 结论

本文在针对LCC-HVDC运行过程中滤波器频繁投切问题,基于混合多馈入系统的特点,提出一种无功协调控制策略,该策略是基于LCC-HVDC和VSC-HVDC常规的无功控制策略进行优化,并不需要增加额外的工程成本。本文以渝鄂背靠背联网工程为研究对象,在PSCAD/EMTDC中搭建了混合多馈入直流系统模型进行仿真研究,主要结论如下:

(1)所提混合多馈入直流系统的无功协调控制策略能减少滤波器的投切,缓解滤波器频繁投切问题,延长一次设备的使用寿命和降低损耗;

(2)所提混合多馈入直流系统的无功协调控制策略能抑制LCC-HVDC整流站电网的暂态低电压和暂态过电压,提高电网暂态稳定性;

(3)所提混合多馈入直流系统的无功协调控制策略能抑制滤波器投切瞬间引起的无功功率突变,减缓LCC-HVDC整流站电网暂态电压的波动;

(4)所提混合多馈入直流系统的无功协调控制

策略能较好地抑制某些工况下的无功功率波动,适用范围更广。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王晓宇,杨杰,吴亚楠,等. 渝鄂背靠背柔性直流对系统次同步振荡特性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):188-194,202.
WANG Xiaoyu, YANG Jie, WU Yanan, et al. Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 188-194, 202.
- [2] 朱益华,郭琦,李成翔,等. 柔性直流和常规直流并联系统功率调制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):130-135.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Chengxiang, et al. Power modulation strategy for parallel system of MMC-HVDC and LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 130-135.
- [3] 王曦,李兴源,魏巍,等. 柔性直流和常规直流互联输电系统协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):102-108.
WANG Xi, LI Xingyuan, WEI Wei, et al. Coordinated control strategy for interconnected transmission system of VSC-HVDC and LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 102-108.
- [4] 赵毓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:7-9.
- [5] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等. 换相失败下柔性直流与传统直流互联输电系统的暂态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):28-35.
ZENG Xueyang, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Coordinated transient reactive power control strategy for transmission system connected by VSC-HVDC and LCC-HVDC under commutation failure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 28-35.
- [6] 赵成勇,郭春义,刘文静. 混合直流输电[M]. 北京:科学出版社,2014:1-7.
- [7] NI X J, GOLE A M, ZHAO C Y, et al. An improved measure of AC system strength for performance analysis of multi-infeed HVDC systems including VSC and LCC converters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 169-178.
- [8] 郭春义,赵剑,刘伟,等. 一种适用于混合多馈入直流输电系统的附加虚拟电阻阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(12):3400-3408.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A supplementary virtual-resistor damping control for hybrid multi-infeed HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3400-3408.
- [9] 余瑜,刘开培,杨洁,等. 向无源网络供电的多端混合直流输电系统小信号模型及解耦控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):76-86.
YU Yu, LIU Kaipei, YANG Jie, et al. Small-signal modeling and decoupling control of hybrid multi-terminal HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 76-86.
- [10] LIU Y, CHEN Z. A flexible power control method of VSC-HVDC link for the enhancement of effective short-circuit ratio in a hybrid multi-infeed HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1568-1581.
- [11] 肖超,欧阳金鑫,熊小伏,等. 基于混合双馈入直流输电系统有功无功协调的后续换相失败控制方法[J]. 电网技术,2019,43(10):3523-3531.

- XIAO Chao, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Subsequent commutation failure control method based on coordination between active and reactive powers in hybrid dual-infeed HVDC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3523-2531.
- [12] 陈欢, 王振, 杨治中, 等. 并联混合直流输电系统中传统直流和柔性直流暂态无功协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1719-1725.
- CHEN Huan, WANG Zhen, YANG Zhizhong, et al. Coordinated reactive power control approach for LCC-HVDC and VSC-HVDC in hybrid parallel HVDC system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1719-1725.
- [13] 郭海平, 李猛, 黄立滨, 等. 混合直流输电系统无功协调控制策略优化[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 16-21, 27.
- GUO Haiping, LI Meng, HUANG Libin, et al. Coordinated control strategy of reactive power in parallel hybrid HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(10): 16-21, 27.
- [14] 杨明权, 刘静佳, 王雨鑫, 等. 混合双馈入直流输电系统无功协调控制研究[J]. 电气应用, 2019, 38(6): 61-69.
- YANG Mingquan, LIU Jingjia, WANG Yuxin, et al. Study on reactive power coordinated control in double-infeed HVDC system[J]. Application Research, 2019, 38(6): 61-69.
- [15] 王振, 蒋碧松, 杨治中, 等. 背靠背混合直流的无功协调控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(6): 101-107.
- WANG Zhen, JIANG Bisong, YANG Zhizhong, et al. Research on reactive power coordination control strategy for back to back hybrid-HVDC system[J]. Electric Power, 2017, 50(6): 101-107.
- [16] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72-76.
- ZHANG Wang, HAO Junfang, CAO Sen, et al. Design of reactive power control for HVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 72-76.
- [17] 曾令康, 李大虎, 姚伟, 等. 适用于背靠背柔性直流输电的双环附加频率控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 113-120, 127.
- ZENG Linggang, LI Dahu, YAO Wei, et al. Dual-loop supplementary frequency control for BTB-VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 113-120, 127.
- [18] 张啸虎, 曹国云, 陈陈. 高压直流系统低功率运行时的无功控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 118-122.
- ZHANG Xiaohu, CAO Guoyun, CHEN Chen. Proposal on reactive power control of HVDC system during low power transmission[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 118-122.

作者简介:



李 佳

李 佳(1997—),男,广东茂名人,硕士研究生,主要研究方向为特高压交直流电网稳定性分析与控制(E-mail: 318204284@qq.com);

夏勇军(1978—),男,湖北天门人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制及其应用(E-mail: 375179012@qq.com);

姚 伟(1983—),男,湖北浠水人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为含高比例新能源的交直流电力系统的稳定性分析与控制、新一代人工智能及其在电力系统中的应用等(E-mail: w.yao@hust.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Reactive power coordinated control of VSC-HVDC and filter in hybrid multi-feed HVDC system

LI Jia¹, XIA Yongjun², YAN Cai¹, YAO Wei¹, YAO Bing³, WEN Jinyu¹

- (1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China;
3. Hubei DC Transport and Inspection Company, Yichang 443000, China)

Abstract: In order to reduce the filter switching of LCC-HVDC (Line Commutated Converter based HVDC) and make full use of reactive power regulation capacity of VSC-HVDC (Voltage Source Converter based HVDC) and its advantages of dynamic regulation of reactive power, a reactive power coordination control strategy in hybrid multi-feed HVDC system in which the electrical distance between LCC-HVDC system and VSC-HVDC system is close is proposed. The reactive power control principles and characteristics of LCC-HVDC and VSC-HVDC are analyzed. Based on the reactive power control advantages of filter switching and VSC-HVDC system, a reactive power coordinated two-stage control module is designed for the hybrid multi-feed HVDC system to reduce filter switching and inhibit transient low voltage and overvoltage. A hybrid multi-feed HVDC system model is built in PSCAD/EMTDC for simulation verification. The simulative results show that the control performance of the proposed strategy is better than that of VSC-HVDC with constant reactive power control and constant AC voltage control.

Key words: hybrid multi-feed HVDC system; switching filter; transient voltage; dynamic regulation of reactive power; coordinated reactive power control

附录

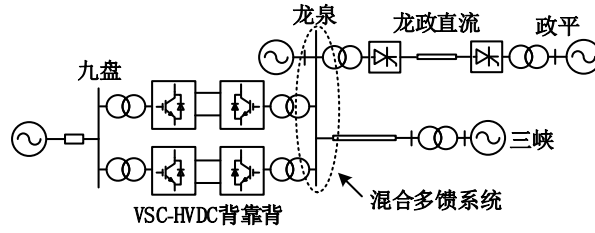


图 A1 渝鄂背靠背联网工程示意图

Fig.A1 Schematic diagram of Chongqing and Hubei back-to-back networking project

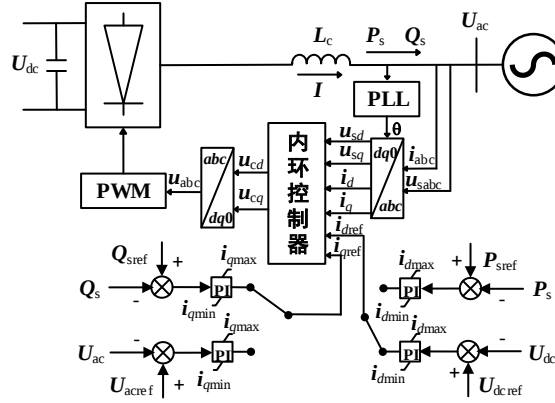


图 A2 VSC-HVDC 系统控制框图

Fig.A2 Block diagram of VSC-HVDC system control

表 A1 VSC-HVDC 与 LCC-HVDC 系统的主要参数

Table A1 Main parameters of VSC-HVDC system and LCC-HVDC system

参数名称	参数取值	
	VSC-HVDC	LCC-HVDC
额定功率	1 250 MW	3000 MW
运行功率	1 000 MW	3000 MW
额定直流电压	420 kV	±500 kV
直流线路电阻	4.56 Ω	10.56 Ω
整流侧短路容量	10 600 MV·A	10 500 MV·A
逆变侧短路容量	—	27 000 MV·A
整流侧额定变比	530kV/220kV	510 kV/200.6 kV
逆变侧额定变比	530kV/220kV	530 kV/210.4 kV
平波电抗电感值	—	150 mH
直流电容值	500 μF	—
定无功功率控制	$K_p=1.0, K_I=50$	—
定交流电压控制	$K_p=1.0, K_I=50$	—
无功协调控制	$K_p=1.0, K_I=50$	—