

• 电气工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201601321

VSC-HVDC互联系统电压稳定控制策略

曾 琦¹, 李兴源¹, 张立奎², 邓 旗¹

(1.四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2.国家电网九江供电公司, 江西 九江 332000)

摘 要:柔性直流输电系统具有有功无功可独立解耦控制的特点,使其不仅可以实现直流系统内有功的合理分配,还可以通过对无功的控制辅助所连接的交流系统以维持电压稳定。为充分挖掘电压源型换流站无功输出潜力,提高与之连接的交流系统的电压稳定性,作者提出一种基于VSC-HVDC互联系统的电压稳定控制策略。在两端柔性直流系统中,对整流站采用直流电压偏差斜率控制,逆变站采用定直流电压控制,按照无功优先模式设置电流限幅即以无功电流的大小决定有功电流的限幅值,分别针对整流站和逆变站设计有功电流动态限幅控制器,扩大无功电流限幅值。在不需要站间通信的情况下,将VSC-HVDC输电系统部分有功转换为无功,提高了换流站的无功输出能力,以此减轻扰动或事故端系统调整无功的负担。通过仿真软件PSCAD/EMTDC进行仿真验证,结果表明所提控制策略充分利用了VSC-HVDC互联系统的功率调整能力,提高了VSC-HVDC互联系统的交流电压稳定性。该控制策略为通过VSC-HVDC系统连接的交流系统的电压稳定问题提供了一种新的解决方案。

关键词:电压源型换流器;直流电压偏差控制;斜率控制;无功电流;动态限幅控制器;电压稳定性

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)04-0174-07

Voltage Stability Control Strategy for Interconnected Systems Through VSC-HVDC

ZENG Qi¹, LI Xingyuan¹, ZHANG Likui², DENG Qi¹

(1.School of Electrical Eng. and Info., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2.State Grid Jiujiang Power Supply Co., Jiujiang 332000, China)

Abstract: Due to the independent control of active and reactive power, voltage source converter (VSC) base on HVDC system can not only distribute power in DC system, but also improve the stability of AC system connected by VSC-HVDC. In order to fully excavate the reactive power potential of VSC, and to improve the voltage stability of AC system, a voltage stability control strategy based on VSC-HVDC interconnected system was proposed. In VSC-HVDC system, rectifier station was controlled by DC voltage margin and droop, and the inverter station was controlled by constant DC voltage. The limit value of active current was calculated based on reactive current. Then, the dynamic limiter controllers of the active current were respectively designed for rectifier and inverter stations to expand the limit value of reactive current. Without interstation communications, a part of active capacity of VSC-HVDC system was converted to reactive capacity, which increased the reactive output of the VSC stations and reduced the reactive adjustment burden of AC system in the case of disturbance or fault. Finally, simulations with PSCAD/EMTDC verified that the control strategy proposed in the paper took full use of the power adjustment ability and enhanced the voltage stability of AC system connected by VSC-HVDC. The strategy provides a new solution for voltage stability of AC system connected by VSC-HVDC.

Key words: voltage source converter(VSC); DC voltage margin control; droop control; reactive current; dynamic limiter controller; voltage stability

与基于电流源换流器(current source converter, CSC)的传统直流输电相比,基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的柔性直流输电不会出现换相失败,同时还具有可向无源网络系统供电,可独立控制有功功率和无功功率,潮流反转时电压

极性不变等诸多优势。因此,柔性直流输电在大规模可再生能源接入、孤岛供电、城市供电、电力市场交易以及电网互联等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。

柔性直流输电系统与传统直流输电系统另一不同之处是两端换流站控制系统相对独立,换流站之

收稿日期:2016-12-02

基金项目:国家电网公司科技项目资助(SGRIZLKJ[2015]457)

作者简介:曾 琦(1977—),女,博士生,讲师。研究方向:电力系统稳定和控制;柔性直流输电。E-mail: zengqi-hk@163.com

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

间不需要通信,但该技术优势给柔性直流系统的控制与保护带来了隐患。通常VSC整流站采用定有功功率控制,逆变器采用定直流电压控制。当逆变器交流侧发生故障时,一方面,交流电压下降使得逆变器输出功率减小;另一方面,因两换流站间没有通信或通信延迟,整流站仍按照参考值输送功率,此时直流系统内出现的功率不平衡,会导致直流侧电容器快速充电从而引起直流电压急速上升,危害柔性直流系统的安全运行,甚至可能迫使直流系统退出运行。

目前,VSC-HVDC系统用于风电并网已有较多研究^[4-9]。为避免因网侧交流故障导致直流电压快速上升,使得VSC-HVDC系统退出运行,通常采用两种控制措施:一种是快速降低送端换流站输送的有功功率,另一种是在换流站拓扑结构中增加制动电阻以快速消耗不平衡功率。朱瑞可等^[10-11]在定有功功率控制器中引入频率-有功和直流电压-有功斜率特性,以保证两侧交流系统在发生故障时能够进行相互功率支援,但该控制策略以牺牲另一侧交流系统频率稳定为代价。魏晓光等^[12]比较了定无功功率控制和定交流电压控制,前者能使并网系统快速进入稳定,而后者能更好地抑制电压波动。任敬国等^[13]考虑在交流系统故障时,根据直流电压信号改变定有功功率参考值。张静等^[14]针对因交流故障或其他原因导致定直流电压控制器不能继续有效维持直流电压稳定的情况,通过切换两侧换流站控制方式以减小直流电压波动幅度。何大清等^[15]指出在大扰动情况下外环参考值变化幅度很大,此时控制器的限幅会延长内环对参考值的追踪时间。但以上策略均没有继续挖掘VSC换流站通过控制无功功率的输出以支撑交流电压的能力。

作者提出在VSC整流站采用直流电压偏差斜率控制,VSC逆变器采用定直流电压控制,扩大无功控制器限值范围,动态调节有功控制器限幅值。两站之间不需要通信,在正常运行或出现小扰动情况下,VSC逆变器稳定直流电压,其有功控制器不受影响;在出现短暂大扰动情况下,优先发出无功,稳定交流电压。为避免换流器过电流,动态调节有功限幅值,使逆变器进入限功率输出状态,此时直流电压上升,整流站进入直流电压斜率控制,按比例减少有功功率输送,维持直流电压稳定;当有功减小到设定的偏差裕度时,整流站进入定直流电压控制,以减小直流电压波动幅度。仿真结果表明,该控制策略在系统小扰动时能及时减小有功输送,减小直流电压波动幅度,同时快速增加无功输出,较好地支撑交流电压稳定。

1 VSC-HVDC结构与原理

典型三相两电平电压源换流器结构如图1所示。图1中, u_s 和 u_c 分别为交流系统母线电压和VSC换流器交流侧输出电压, u_{dc} 为直流侧电压, i_{dc} 为直流电流, R 和 L 分别表示统一考虑联结变压器和相电抗器后的等效电阻和电抗, C 为逆变器直流侧电容。

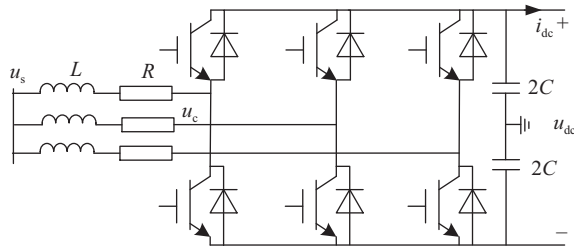


图1 电压源型换流器电路拓扑结构图

Fig.1 Circuit diagram of voltage source inverter

在d、q同步旋转坐标系下,采用基尔霍夫电压定律推导出的VSC换流器交流侧电压平衡方程为:

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{sd} - Ri_{sd} - \omega Li_{sq} - L \frac{di_{sd}}{dt} \\ u_{cq} = u_{sq} - Ri_{sq} + \omega Li_{sd} - L \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_{sd} 和 u_{sq} 分别为交流系统电网电压 u_s 的d、q轴分量, u_{cd} 和 u_{cq} 分别为换流器输出电压的基频分量 u_c 的d、q轴分量, i_{sd} 和 i_{sq} 分别为电网电流的d、q轴分量, ω 为电网电压矢量同步旋转角速度。

由式(1)可知,通过引入对电网扰动电压的前馈补偿和电压耦合补偿即可得到内环电流解耦控制器,结构如图2所示。

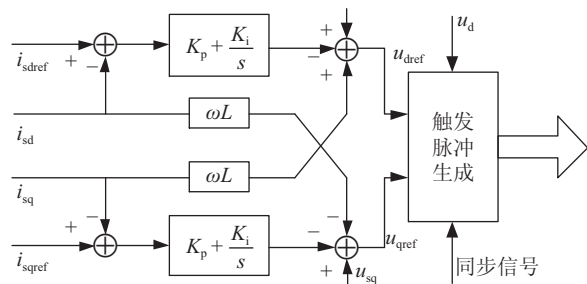


图2 VSC内环电流解耦控制器

Fig.2 Current decoupling controller at inner loop of VSC

图2中, u_{dref} 和 u_{qref} 分别为换流器期望输出的正弦基波电压d、q轴分量的参考值, i_{sdref} 和 i_{sqref} 分别为从外环控制器输出的电流d、q轴参考值, K_p 和 K_i 为PI调节器的比例和积分参数。

在d、q同步旋转坐标系下,换流站与交流系统交换的有功功率 p_s 和无功功率 q_s 可以表示为:

$$\begin{cases} p_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) \\ q_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sq} - u_{sq}i_{sd}) \end{cases} \quad (2)$$

若d轴以电网电压向量定位,即 $u_{sq} = 0$,忽略电抗器和换流器损耗时,式(2)可表示为:

$$\begin{cases} p_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd} = p_{dc} = u_{dc} i_{dc}, \\ q_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式中, p_{dc} 为直流侧有功功率。

由式(3)可知,分别控制有功电流 i_{sd} 和无功电流 i_{sq} 就可以独立调节换流站与交流系统交换的有功和无功功率。当换流站交直流两侧的有功不平衡时,有功电流将向直流侧电容充电或放电,引起直流电压波动,直至两侧有功平衡。当交直流两侧无功不平衡时,则会直接影响换流站交流侧电压,此时内环电流控制器则需要调节无功电流以维持交流侧电压稳定。

2 电压稳定控制策略

2.1 VSC-HVDC控制策略

目前,直流电压偏差控制和直流电压斜率控制是柔性直流系统中最被认可的多点直流电压控制方式。其中:直流电压偏差控制是当主导站不能继续维持直流电压稳定或退出运行时,利用后备站的电压偏差裕度保证后备站接替主导站,以继续维持直流电压稳定,但偏差控制在同一时刻只有一个换流站进行功率调节,系统动态响应差,而且影响后期系统扩展。直流电压斜率控制能保证多个换流站在同一时刻根据直流电压波动进行功率调节,系统动态响应好,但直流电压不具有良好刚性,而且不能精确控制功率输出。对于VSC-HVDC系统,通常是整流站采用定有功功率控制,逆变站采用定直流电压控制。结合直流电压偏差控制和斜率控制,在整流站采用直流电压偏差斜率控制,逆变站采用定直流电压控制,各换流站的具体工作特性如图3所示。

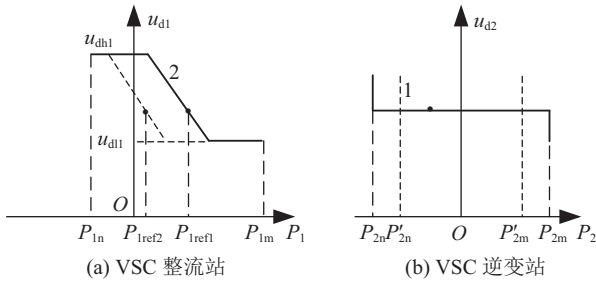


图3 换流器工作模式

Fig.3 Operating mode for converters

图3中: u_{d1} 和 u_{d2} 分别为VSC整流站和逆变站的直流电压; u_{dh1} 和 u_{dl1} 为整流站从直流电压斜率控制转换为定直流电压控制的高、低电压动作值; P_{1ref1} 和 P_{1ref2} 为整流站初始有功功率参考值,VSC整流站可通过平移斜率特性曲线改变此初始功率设定值; P_{1m} 和

P_{1n} ($i = 1, 2$)为各换流站输出功率上限值和下限值。

系统正常运行时,VSC逆变站维持直流电压恒定,整流站输出有功不变。当逆变站交流侧出现较小无功负荷波动,但该无功负荷波动尚不足以改变有功限幅值,逆变站仍能维持直流电压稳定。当逆变站交流侧出现较大无功负荷波动,则启动有功电流动态限幅方式,即通过暂时减小有功电流限幅值,增大无功电流的限幅值。由于有功电流限幅值减小后,换流站实际运行的有功电流将大于有功电流限幅值,逆变站被迫转入限制功率输出状态,即沿 P'_{2n} 或 P'_{2m} 运行,此时直流电压将上升(如图3(b)中1段所示)或下降,逆变站VSC2已不能维持直流电压稳定。由于直流电压的上升或下降,工作于电压下垂控制方式下的整流站,将沿着下垂特性曲线运行以维持直流电压。以直流电压上升为例,整流站工作如图3(a)中2段所示,随着直流电压上升,整流站会减小有功功率的输出,直至整流站和逆变站之间有功达到平衡,电压恢复稳定。电压下降的工作情况类似。当直流电压上升或下降超过VSC整流站电压裕度值 u_{dh1} 或 u_{dl1} ,整流站进入定直流电压控制,以减小直流电压波动幅度。控制策略中所有的动作过程均不需要两站之间的通信。

2.2 电流控制器设计

柔性直流输电系统本身过载能力较小,而系统运行中受到扰动或发生故障时,会产生较大的过电流,因此设计外环控制器时必须对有功电流和无功电流进行限幅。传统电流限幅方式为静态限幅,即对有功电流和无功电流给出一个恒定限幅值。而实际系统运行过程中,有功电流实际值通常小于有功限幅值,因此传统的静态限幅方式实际上限制了换流站无功功率输出的能力,以图4具体说明。

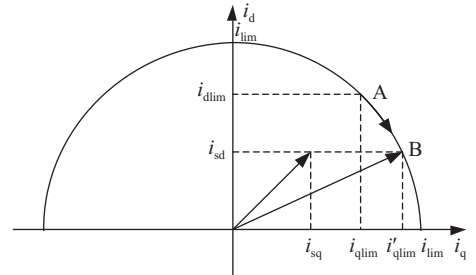


图4 换流器电流限制方式

Fig.4 Mode of current limitation for converters

图4中, i_{lim} 为电流限幅值, i_{dlim} 和 i_{qlim} 分别为有功电流和无功电流传统静态限幅值, i_{sd} 和 i_{sq} 分别为某一时刻系统运行的有功电流和无功电流实际值。假设系统换流器过载系数为 λ ,电流额定值为 i_{rated} ,则电流最大允许值为:

$$i_{lim} = \lambda i_{rated} = \sqrt{i_{dlim}^2 + i_{qlim}^2} \quad (4)$$

由图4可知,当系统实际有功电流 i_{sd} 小于有功电流限值 i_{dlim} 时,不用改变有功就可以将无功电流的限幅值从 i_{qlim} 扩大至 i'_{qlim} ,将系统电流限幅点由A动态调节至限幅点B。

为充分挖掘VSC换流站无功功率输出能力,动态调节有功电流限幅值,根据无功功率确定有功电流的限幅情况,设计外环动态限幅控制器的逻辑关系为:

$$i_{qref}^* = \begin{cases} i_{lim}, i_{sq} > i_{lim}; \\ i_{sq}, -i_{lim} < i_{sq} < i_{lim}; \\ -i_{lim}, i_{sq} < -i_{lim} \end{cases} \quad (5)$$

$$i_{dref}^* = \begin{cases} \sqrt{i_{lim}^2 - i_{sq}^2}, i_{sd} > \sqrt{i_{lim}^2 - i_{sq}^2}; \\ i_{sd}, -\sqrt{i_{lim}^2 - i_{sq}^2} < i_{sd} < \sqrt{i_{lim}^2 - i_{sq}^2}; \\ -\sqrt{i_{lim}^2 - i_{sq}^2}, i_{sd} < -\sqrt{i_{lim}^2 - i_{sq}^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, i_{dref}^* 和 i_{qref}^* 为经过外环动态限幅控制器后的有功电流和无功电流参考值。

在VSC逆变站加入动态限幅控制器后,其外环控制器结构如图5所示。图5中, u_{d2} 和 u_{dref} 分别为逆变站直流电压测量值和参考值, Q_{s2} 和 Q_{sq} 分别为无功功率测量值和传统无功功率输出限幅值, i_{dlim} 和 i_{dlim}^* 分别为传统有功电流静态限幅值和有功电流动态限幅值。

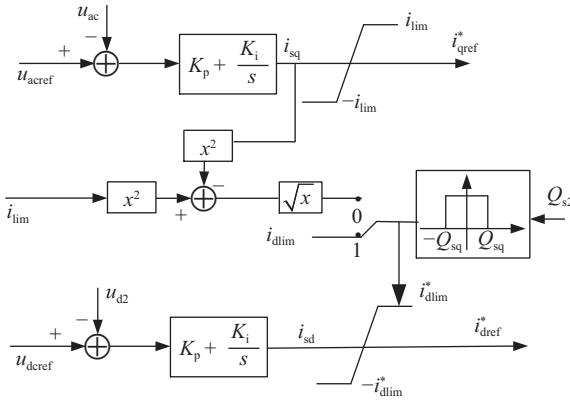


图5 逆变站电流动态限幅控制器

Fig.5 Dynamic limiter controller of active current for inverter station

由图5可知,无功电流的限幅值扩大至 i_{lim} 时,无功功率输出的大小决定有功电流是否进入动态限幅:当输出的无功功率 Q_{s2} 小于 Q_{sq} ,有功电流保持传统静态限幅值不变;当 Q_{s2} 大于 Q_{sq} ,有功电流限幅值进行相应动态调节。传统无功限幅值 Q_{sq} 为:

$$Q_{sq} = \frac{3}{2} u_s i_{qlim} \quad (7)$$

同样,为保证VSC整流站交流侧电压稳定,加入

动态限幅控制器后,其外环控制器结构如图6所示。其中, P_{s1} 和 P_{ref} 为整流站有功功率测量值和参考值, Q_{s1} 和 S_{s1} 分别为无功功率测量值和视在功率限幅值, P_{ref} 和 P_{ref}^* 分别为有功功率初始整定值和运行后动态参考值, K_1 为直流电压斜率系数, Δu_d 为附加信号限幅值。

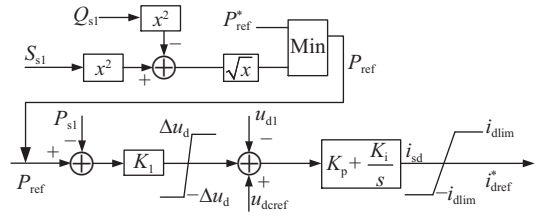


图6 整流站有功功率动态限幅控制器

Fig.6 Dynamic limiter controller of active power for rectifier station

由图6可知,系统运行后有功功率参考值可按照无功功率输出情况进行动态调节,同时为避免系统直流电压波动幅度过大,在斜率电压控制中引入限幅环节。图6中所示控制器的数学表达式为:

$$\begin{cases} u_{d1} = u_{dref} + K_1(P_{ref} - P_{s1}), \\ P_{ref} = \min(P_{ref}^*, \sqrt{S_{s1}^2 - Q_{s1}^2}), \\ u_{dh1} = u_{dref} + \Delta u_d, \\ u_{dl1} = u_{dref} - \Delta u_d \end{cases} \quad (8)$$

3 仿真分析

为验证本文所提控制策略的有效性,在仿真软件PSCAD/EMTDC中搭建如图7所示的VSC-HVDC系统。

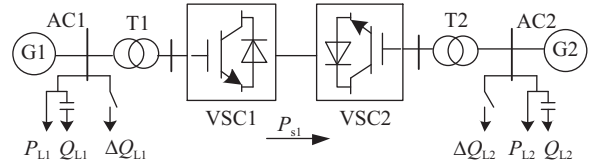


图7 VSC-HVDC系统结构

Fig.7 Structure of VSC-HVDC system

仿真模型中,交流系统AC1和AC2分别为4台带有原动机、调速器和励磁器的发电机组,VSC换流站的控制方式为外环电压控制和内环电流控制。VSC整流站的直流电压斜率系数 K_1 取为0.167;为抑制直流电压波动幅度,直流电压波动率取0.05,即 $\Delta u_d = 0.05 \times u_{dref} = 10 \text{ kV}$;换流站过载能力 λ 取为1.2,其他系统参数见表1。

本文控制策略中,VSC1换流站采用直流电压偏差控制,VSC2换流站采用定直流电压控制,在外环控制器中分别加入动态限幅控制;而传统控制策略

中,VSC1和VSC2分别采用定有功功率和定直流电压控制,外环控制的有功控制器和无功控制器均采用静态限幅控制。

表 1 VSC-HVDC系统参数
Tab.1 Parameters of VSC-HVDC system

参数名称	参数大小
直流电压指令值 u_{dcref}/kV	200
交流电压额定值 U_s/kV	110
有功电流和无功电流极限值 $i_{dlim}/\text{kA}, i_{qlim}/\text{kA}$	1.1,0.4
换流站极限容量 $P_s/\text{MW}, Q_s/\text{Mvar}$	145,50
发电机组容量 $P_{G1}/\text{MW}, P_{G2}/\text{MW}$	480
直流电容值 $C/\mu\text{F}$	750
直流线路电阻 R/Ω	40 km $\times$ 0.01 Ω/km
换流变压器变比 k	110 kV/100 kV
整流站初始功率指令值 P_{ref}^*/MW	100
AC1负荷 $P_{L1}/\text{MW}, Q_{L1}/\text{Mvar}$	300,10
AC2负荷 $P_{L2}/\text{MW}, Q_{L2}/\text{Mvar}$	280,35

算例1:系统初始状态下,换流站VSC2交流侧感性无功负荷为30 Mvar,4 s时增加80 Mvar感性无功负荷,7.5 s时减少40 Mvar。加入本文控制策略和传统控制策略的AC2无功负荷变化,仿真结果如图8所示。

由图8可知:在传统控制策略下,AC2发生较大无功负荷变化后,VSC2无功电流达到静态限幅值,换流站输出无功功率极限值50 Mvar仍不能满足需求,交流侧出现无功缺额,交流电压出现较大波动,最终稳定在105 kV;7.5 s时,无功负荷减小后仍超出VSC2无功输出能力,交流电压恢复至108 kV。该策略的调整过程中,因采用d、q轴解耦控制,无功负荷的波动不会影响有功电流的变化,有功功率输出始终保持不变。采用本文控制策略后,VSC2能根据无功需求动态调节有功输出,4 s时,因增加无功负荷过大,无功电流超出传统静态限幅值并使得动态有功电流限幅值小于此时运行的有功电流,输出的有功功率减小;之后无功需求较小,使有功电流限幅值增大,输出的有功功率恢复初始值。本文策略的调节过程中交流电压始终保持稳定。

算例2:系统初始状态下,换流站VSC1交流侧容性无功负荷为60 Mvar,4 s时增加70 Mvar容性无功负荷,12 s时减少40 Mvar。本文控制策略和传统控制策略的AC1无功负荷变化仿真结果如图9所示。

由图9可知:在传统控制策略下,有功功率不受无功负荷波动影响,而AC1较小的无功负荷波动,会导致无功电流达到静态极限值,交流侧开始出现无功缺额,交流电压出现波动,波动的程度由无功缺额的大小决定。在本文控制策略下,4 s时,出现以降低

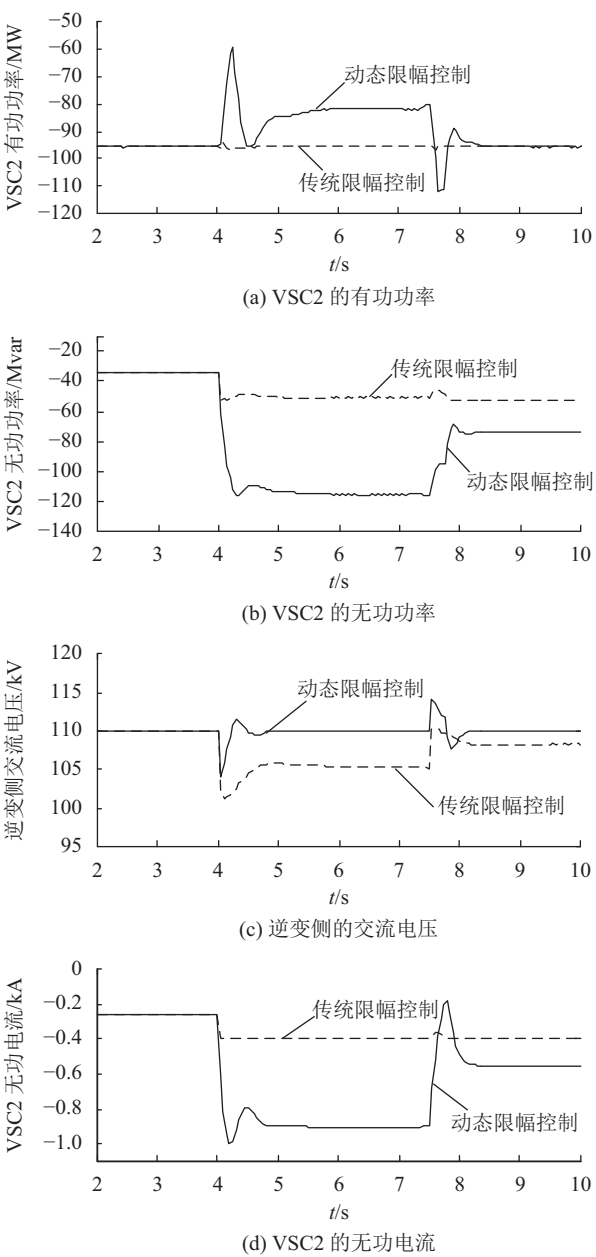
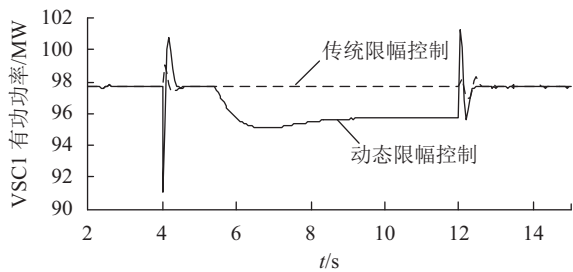


图 8 AC2无功负荷变化时的仿真结果

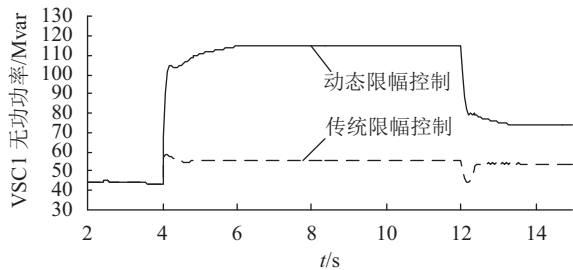
Fig.8 Simulation results under reactive load variation of AC2

很小的有功功率换取较大的无功输出现象,其实质是将运行的有功功率与极限有功功率的裕度容量暂时用作无功输出,从而扩大无功电流极限值,增加了换流站无功输出能力;12 s后,无功负荷减小,有功功率动态限幅值增大,VSC1有功功率输出恢复初始值,本文策略的调节过程中,交流电压能维持在额定值不变。

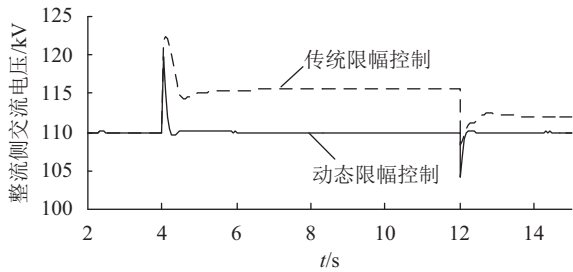
算例3:系统初始状态下,换流站VSC2交流侧感性无功负荷为30 Mvar,4 s时,VSC2交流侧发生持续时间为0.1 s的三相接地故障,接地电阻为0.05 Ω 。本文控制策略和传统控制策略的AC2三相接地故障仿真结果如图10所示。



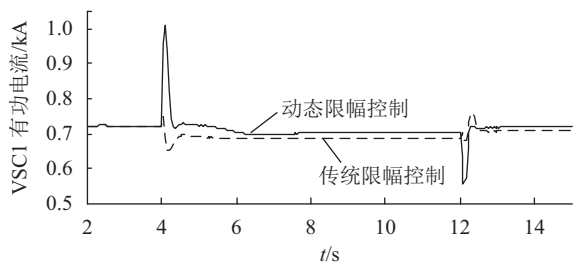
(a) VSC1 的有功功率



(b) VSC1 的无功功率



(c) 整流侧的交流电压

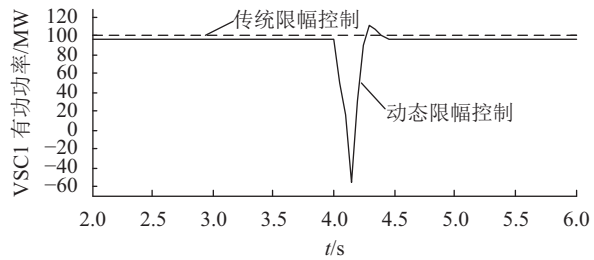


(d) VSC1 的有功电流

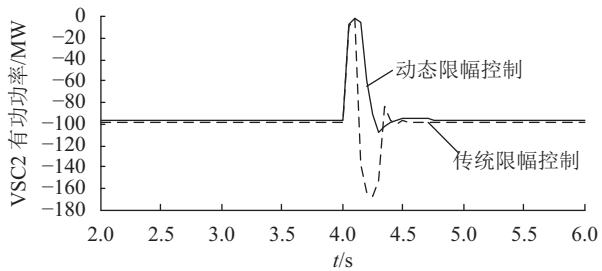
图 9 AC1无功负荷变化时的仿真结果

Fig.9 Simulation results under reactive load variation of AC1

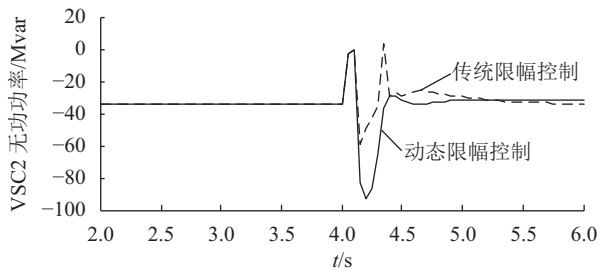
由图10可知:传统控制策略中,VSC整流站采用定有功功率控制,4 s时,逆变器交流侧发生三相接地故障,交流电压快速跌落,逆变器输出有功功率迅速降低,而整流站此时向直流线路输入的有功功率保持不变,不平衡的有功功率向逆变器直流电容器充电,直流电压快速增加,峰值达到235 kV。本文控制策略中,整流站采用直流电压偏差斜率控制,当逆变器发生接地故障,整流站能够迅速动作,减小有功功率输入,从而极大降低直流电压波动幅度。同时,因整流站采用直流电压偏差斜率控制,使得直流电压波动峰值限制在210 kV;故障清除后,VSC2能发出较大无功支撑交流电压恢复过程。



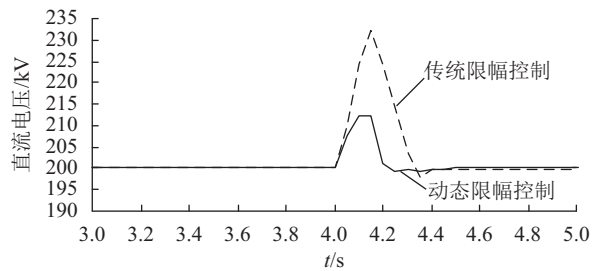
(a) VSC1 的有功功率



(b) VSC2 的有功功率



(c) VSC2 的无功功率



(d) 直流电压

图 10 AC2三相故障仿真结果

Fig.10 Simulation results under three phase fault of AC2

4 结 论

实际直流系统中,运行的有功功率与极限有功功率有一定差值,将有功功率暂时用作无功输出能够扩大传统无功电流静态限幅值,极大提高换流站无功输出能力。本文提出在基于VSC-HVDC的互联系统中,VSC整流站采用直流电压偏差斜率控制,逆变器采用定直流电压控制,同时针对整流站和逆变器分别设计有功电流动态限幅控制器。该控制策略不需要两站间通信,当交流侧出现无功负荷波动,换流站能在不改变有功或较小降低有功输出情况下维持交流电压稳定;当交流侧发生接地故障,整流站能

快速减小有功输入,降低直流电压波动幅度,故障清除后逆变站能发出较大无功支撑交流电压恢复。该控制策略为通过VSC-HVDC系统连接的交流系统的协调控制提供了一定的研究基础,针对多区域复杂交直流网络的协调控制还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Tang Guangfu, He Zhiyuan, Pang Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 8–9. [汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 8–9.]
- [2] Zou Chao, Wang Ben, Li Tai. Control strategy of VSC-HVDC system supplying power for passive networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 84–85. [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): 84–85.]
- [3] Zhu Ruike, Li Xingyuan, Wu Feng. A novel droop control strategy taking into account the available headroom VSC-MTDC system[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2015, 47(3): 137–143. [朱瑞可, 李兴源, 吴峰. 考虑功率裕度的VSC-MTDC系统改进下垂控制策略[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(3): 137–143.]
- [4] Sun Shixian, Tian Jie. Enhancement of fault ride-through capability for grid-connected wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 137–140. [孙世贤, 田杰. 提升直流并网风电故障穿越能力的新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 137–140.]
- [5] Liao Yong, Wang Guodong. Fault ride-through control for DFIG-based wind farm with VSC-HVDC grid-integration[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(23): 13–20. [廖勇, 王国栋. 双馈风电场柔性高压直流输电系统的故障穿越运行控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 13–20.]
- [6] Jia Shusen, Li Shenghu, Bao Zhengjie. Undervoltage load shedding strategy of hybrid AC/DC[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(5): 45–48. [贾树森, 李生虎, 鲍正杰. 交直流混合注入节点的低压减载策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 45–48.]
- [7] Li Qi, Song Qiang, Liu Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739–1745. [李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739–1745.]
- [8] Zhang Xinyin, Hu Minqiang, Wu Zaijun, et al. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 138–142. [章心因, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于VSC-HVDC的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 138–142.]
- [9] Liu Yan, Chen Zhe. 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, 2014, 28(2): 1568–1581.
- [10] Zhu Ruike, Wang Yuhong, Li Xingyuan, et al. An additional frequency control strategy for interconnected systems through VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(16): 81–86. [朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. 用于VSC-HVDC互联系统的附加频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 81–86.]
- [11] Zhu Ruike, Li Xingyuan, Ying Dali. A frequency stability control strategy for interconnected VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2729–2734. [朱瑞可, 李兴源, 应大力. VSC-HVDC互联系统频率稳定控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2729–2734.]
- [12] Wei Xiaoguang, Tang Guangfu. Effect of VSC-HVDC applied on improving wind farm voltage stability[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 27–31. [魏晓光, 汤广福. 电压源换相高压直流输电对改善风电场电压稳定性的作用[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 27–31.]
- [13] Ren Jingguo, Li Kejun, Niu Lin, et al. Advanced active power control strategy based on additional signal for VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 46–50. [任敬国, 李可军, 牛林, 等. 基于附加信号的VSC-HVDC系统改进有功功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 46–50.]
- [14] Zhang Jing, Xu Zheng, Pan Wulue. A novel generalized DC control strategy for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(21): 46–50. [张静, 徐政, 潘武略. VSC-HVDC系统新型广义直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 46–50.]
- [15] He Daqing, Cai Xu. Transition current limitation control of VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 135–139. [何大清, 蔡旭. 柔性直流输电的动态电流限幅控制[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 135–139.]

(编辑 赵 婧)

引用格式: Zeng Qi, Li Xingyuan, Zhang Likui, et al. Voltage stability control strategy for interconnected systems through VSC-HVDC[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(4): 174–180. [曾琦, 李兴源, 张立奎, 等. VSC-HVDC互联系统电压稳定控制策略[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4): 174–180.]