

柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制

文 安¹, 邓 旭², 魏承志¹, 寻斌斌¹, 邓建俊¹, 黄维芳³, 莫天文³, 田 霖³

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623)

摘要: 首先分析了系统在交直流并列运行和孤岛运行方式下的控制策略, 基于此提出了系统从交直流并列运行转为孤岛运行和从孤岛运行恢复到交直流并列运行的切换控制方法。以某实际工程参数为例在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了系统仿真模型, 对所提出的切换控制方法进行了仿真验证。结果表明, 所设计的切换控制方法能及时检测出系统的运行状态, 并自动进行相关控制方式的切换, 在切换过程中系统各电气量没有剧烈波动, 不会影响系统的安全稳定运行。

关键词: 柔性直流输电; 交直流并列运行; 孤岛运行; 模式切换; 控制; 仿真

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.017

0 引言

为了解决能源紧缺问题以及满足低能耗可持续发展的需要, 风能、太阳能等可再生的清洁能源发电得到大力开发与利用^[1-3]。新能源发电存在供电质量不稳定且远离交流主电网的特点, 将传统交流输电技术或基于电流源换流器的直流输电技术用于可再生能源并网并不经济, 而基于电压源换流器的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术能很好地解决该问题^[4-8]。电压源换流器型直流输电技术是以电压源换流器、自关断器件和脉宽调制技术为基础的新型直流输电技术, 具有有功和无功独立控制、能向无源网络供电、不会出现换相失败等诸多优势^[9-11]。近年来, 基于电压源换流器的柔性直流输电技术在新能源并网、海上孤岛送电等领域得到了广泛应用。

柔性直流输电系统主要有 3 种不同的运行方式: 交直流并列运行、孤岛运行、STATCOM 运行。在不同运行方式下柔性直流输电系统的控制策略有较大不同, 目前针对柔性直流输电系统在不同运行方式下的控制策略已有广泛研究; 文献[12-15]研究了柔性直流输电系统的建模及基本控制策略, 文献[16]研究了柔性直流输电系统在定直流电压控制端交流电网故障下的模式切换控制策略, 文献[17]研究了适用于风电场接入的柔性直流输电系统定有功功率与频率辅助控制策略。这些研究均是针对柔性直流输电系统在某种特定运行方式下的控制策略, 对于柔性直流输电系统不同运行方式之间的切换控制方法尚未见到相关文献报道。当系统运行方式发生变化

时, 如柔性直流输电系统从交直流并列运行转为孤岛运行时, 送端系统只能通过柔性直流输电线路向受端系统注入功率, 由于柔性直流输电系统在交直流并列运行时采用的是定有功功率控制, 这将导致大部分电能无法外送, 产生“窝电”现象, 若系统控制策略不进行及时调整, 系统的频率将持续上升, 最终导致频率崩溃。因此, 在系统运行方式发生变化时, 需要及时检测出系统运行状态并进行相应控制策略的自动调整, 以保证系统安全稳定运行。可见, 研究柔性直流输电系统在交直流并列与孤岛运行方式间的切换控制具有重要的现实意义。

为此, 本文分析了柔性直流输电系统在交直流并列运行与孤岛运行方式下的控制策略, 提出了 2 种运行方式之间进行切换时所采取的控制策略, 并基于实际工程参数在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了两端柔性直流输电系统的仿真模型, 仿真验证了所提方案的可行性和有效性。

1 柔性直流输电系统的控制策略

根据柔性直流输电系统与交流系统的连接关系, 柔性直流输电系统的运行方式通常可分为 3 种^[18-21]。

a. 交直流并列运行。送端系统通过柔性直流输电线路和并列的交流线路共同与受端交流系统相连。

b. 孤岛运行。送端系统仅通过柔性直流输电线路与受端交流系统相连。

c. STATCOM 运行。柔性直流输电系统不参与有功潮流传输, 仅参与交流系统的电压和无功调节。

由于运行方式 **c** 只应用于特定场合, 因此本文仅研究运行方式 **a**、**b** 间的切换控制。假设交流联络线路为 2 条, 柔性直流输电系统与交流系统联网的系统结构简化示意图如图 1 所示。

收稿日期: 2013-11-30; 修回日期: 2014-05-15

基金项目: 广东省第三批领军人才专项资金资助项目

Project supported by the Research Funds for the Third Leading Talent of Guangdong Province

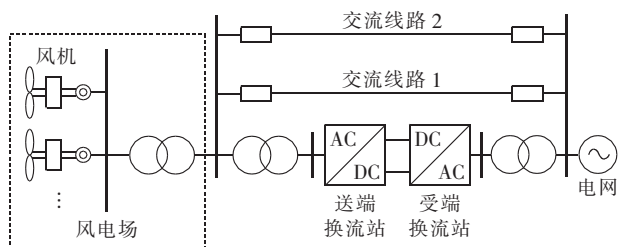


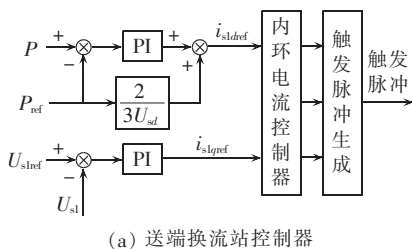
图 1 柔性直流输电系统结构简化示意图

Fig.1 Simplified structure of VSC-HVDC transmission system

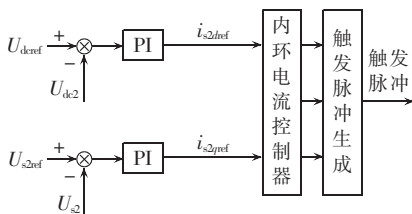
下面分别介绍柔性直流输电系统在交直流并列运行和孤岛运行方式下所采取的控制策略。

1.1 交直流并列运行方式下的控制策略

柔性直流输电系统有 2 个独立的控制量,包括有功类控制量和无功类控制量,通常每个换流器同时采用有功类控制器和无功类控制器各一种^[22-23]。柔性直流输电系统正常运行时,送端系统通过柔性直流输电线路和并列运行的交流输电线路共同向受端系统送电,即处于交直流并列运行状态。此时,为了保证系统有功平衡和直流电压的稳定,柔性直流输电系统通常至少有一个站采用定有功功率控制,另一个站采用定直流电压控制。本文研究中柔性直流输电系统交直流并列运行时采取的控制策略为:送端换流站采用定有功功率控制和定交流电压控制,受端换流站采用定直流电压控制和定交流电压控制。送、受端换流站采用的控制器结构如图 2 所示。图中, P 、 P_{ref} 分别为送端换流站直流输送功率的测量值和设定值; U_{s1} 和 U_{s1ref} 分别为送端换流站交流电压的测量值和参考值; U_{dk2} 和 U_{dkref} 分别为直流电压的测量值和参考值; U_{s2} 和 U_{s2ref} 分别为受端换流站交流电压的测量值和参考值。将直流有功功率、送端交流电压的测量值与参考值进行比较之后,通过比例积分环节得到送端电流的参考值 i_{s1dref} 和 i_{s1qref} ,再



(a) 送端换流站控制器



(b) 受端换流站控制器

图 2 柔性直流输电系统交直流并列运行时的控制器

Fig.2 Controller for AC-DC parallel operation of VSC-HVDC transmission system

将其送到送端内环电流控制器进行控制;将直流电压和受端交流电压通过比例积分环节后得到受端电流的参考值 i_{s2dref} 和 i_{s2qref} ,再分别将其送到受端内环电流控制器进行控制。

1.2 孤岛运行方式下的控制策略

柔性直流输电系统在运行过程中,与直流线路并列运行的 N 条交流线路全部跳闸或者当其中 $N-1$ 条线路处于停电检修状态下另一条线路因事故跳闸时,送端系统只能通过柔性直流线路向受端系统送电,此时柔性直流输电系统处于孤岛运行方式。该运行方式下,送端风电场发出的有功功率只能通过柔性直流线路输出,如果换流站的控制策略不进行改变,即送端换流站仍采用定有功功率控制,则送端系统将有大量的功率剩余,从而形成“窝电”现象,这将导致系统的频率持续上升。此时送端换流站处于孤岛运行状态,而受端换流站仍保持与交流大电网联络,因此为了保证系统孤岛运行方式下的稳定运行,通常让送端换流站采用定频率控制,无功类控制器仍采用定交流电压控制。控制目标是将送端交流系统的频率保持为额定值,同时保证交流电压幅值在规定范围内。频率控制器的结构如图 3 所示。图 3(a)为交流电压控制, u_{sd} 为换流变网侧交流相电压幅值, u_{sd}^* 为换流变网侧交流相电压幅值的参考值。 u_{sd} 与参考值 u_{sd}^* 比较之后,经过 PI 环节与直馈信号 E_{dc} 相加后得到换流器的交流调制电压幅值 U_m^* 。直馈信号 E_{dc} 的引入主要是为了加快电压控制的响应速度,对系统的稳态结果无影响,在本研究中取为直流极线的对地电压。换流器交流调制电压的相角由图 3(b)所示的控制决定,直接令换流站输出频率等于系统额定频率 50 Hz,从而保证了送端交流系统的频率稳定。由控制原理可知,该控制策略直接对交流系统频率进行控制。

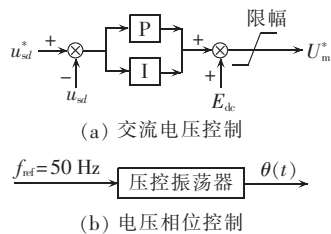


图 3 柔性直流输电系统孤岛运行时送端换流站控制器

Fig.3 Controller of rectifier station for islanded operation of VSC-HVDC transmission system

换流器三相正弦调制电压信号可由 U_m^* 和 $\theta(t)$ 得到,表示如下:

$$\begin{cases} u_a = U_m^* \cos(\theta + \delta) \\ u_b = U_m^* \cos(\theta + \delta - 120^\circ) \\ u_c = U_m^* \cos(\theta + \delta + 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

其中, δ 为电压初相位。

对于受端换流站,由于换流站仍与交流电网保持

联络,因此换流站控制系统可采取交直流并列运行方式下的控制策略,即如图 2 所示的控制器。

柔性直流输电系统在不同运行方式下所采取的控制策略的主要区别在于外环控制器,而其内环控制器均采用如图 4 所示的内环电流解耦控制器,并且送、受端换流站的内环电流控制器原理相同。图中,电流参考值 i_{sdref} 、 i_{sqref} 从外环控制输出获得; i_{sd} 和 i_{sq} 分别为交流电流测量值 i_{sabc} 经 dq 变换后得到的 d 轴分量和 q 轴分量;内环电流控制器采用电流反馈和电压前馈, u_{sd} 和 u_{sq} 为电压前馈分量;电流控制器的输出量 u_{dref} 和 u_{qref} 分别对应换流器期望输出的正弦参考基波电压的 d 轴和 q 轴分量;最后通过脉宽调制获得各桥臂的触发脉冲。

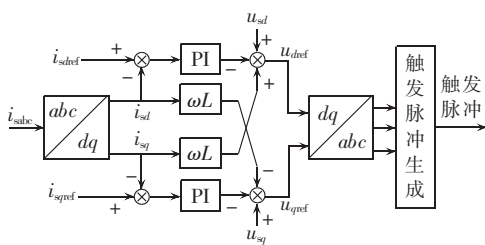


图 4 换流站内环电流控制器

Fig.4 Inner current controller of converter station

2 交直流并列与孤岛运行方式间切换控制

根据前文分析可知,当柔性直流输电系统因故障或操作等原因突然从交直流并列运行转换为孤岛运行模式时,如果控制系统不能及时检测出系统的运行状态并进行相应控制策略的切换,将导致送端交流系统的频率急剧上升,对系统造成严重影响。因此需要研究一种能检测出系统孤岛运行状态并自动将换流站控制系统进行切换的孤岛控制策略。此外,当并列运行的交流线路故障排除后,需要将柔性直流输电系统重新恢复到正常运行方式,即交直流并列运行,因此需要研究系统从孤岛运行转为并列运行的切换控制策略。

2.1 从交直流并列转为孤岛运行的控制

柔性直流输电系统从交直流并列运行转为孤岛运行时,与柔性直流输电线路并列运行的所有交流线路全部断开,送端系统只能通过柔性直流线路向受端系统送电。因此,整个切换控制的关键在于如何根据系统电气量变化特征及时准确地判断出柔性直流输电系统处于交直流并列运行还是孤岛运行模式,并在判断出系统处于孤岛运行方式后自动将控制模式切换到与之对应的控制策略,并保证整个切换过程中系统保持稳定运行。

传统的孤岛检测方法主要有主动检测法、被动检测法和基于通信技术的检测法^[24-25]3 种。主动检测法需要向系统注入检测信号,可能对系统造成不利影响,

如使系统电能质量恶化,因此在实际应用中很少采用。而基于通信技术的检测方法涉及到通信设备的投资建设以及通信可靠性问题,因此其应用也受到限制。被动检测法的优势是简便经济、便于实现,但是其检测性能受孤岛系统中功率不匹配程度的影响较大,存在灵敏性和可靠性的问题。文献[26-27]研究了微电网中基于相位偏移、相位突变等原理的孤岛检测技术。但是柔性直流输电系统和微电网中的孤岛运行模式存在较大区别,微电网中分布式电源通过逆变器直接与大电网相连,而柔性直流输电系统正常运行时通过柔性直流输电线路和并列运行的交流线路一起与受端大电网相连。因此,本文针对柔性直流输电系统的实际运行特点,提出了一种综合考虑相位偏移和频率变化的孤岛检测方法,该方法能根据交流线路输送的额定功率不同而采取不同的检测方法,从而实现快速检测。

柔性直流输电系统交直流并列运行时,送端和受端交流系统的相位偏移很小,两端系统的相位差由交流线路传输的功率决定。当系统转为孤岛运行时,失去了交流联络线路,原本通过交流线路输送的功率会累积在送端换流站,从而导致送端系统频率抬升,两端系统之间的电压相位偏移会逐渐增大。因此,可以通过检测相位偏移来判断系统是否处于孤岛运行状态。相位偏移角 $\Delta\theta$ 是频率变化 Δf 引起的累计值,其大小由频率变化的大小和检测持续的时间决定,它们之间的关系可表示如下:

$$\Delta\theta = 2\pi \int_{t_1}^{t_2} \Delta f dt \quad (2)$$

其中, t_1 、 t_2 为孤岛检测时间; Δf 为频率变化瞬时值, $\Delta f = f - f_N$, f 为系统频率瞬时值, f_N 为系统正常运行时的频率,在本文中由于受端系统始终与电网相连,故可认为 f_N 恒为 50 Hz。

系统的相位偏移通过基于滑动窗口的检测算法来实现,其主要原理是利用最新的实时采样数据来计算相位偏移,而相应剔除最早的采样数据,从而加快采样数据的更新速度。滑动窗口内存储的是最近 T 时间内采集的数据,即满足 $t_2 - t_1 = T$,如图 5 所示。

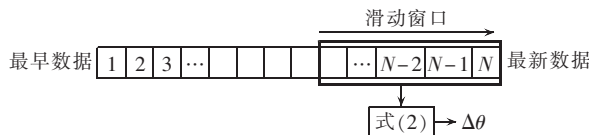


图 5 基于滑动窗口的检测算法原理

Fig.5 Principle of detection algorithm based on sliding-window

柔性直流输电系统从交直流并列转为孤岛运行的具体实现步骤如下。

a. 设置系统相位偏移的阈值 $\Delta\theta_{max}$ 。当交流线路输送的额定功率较大时,系统转为孤岛运行后送端

系统的电压相位偏移会迅速增大,因此可通过检测系统相位偏移来判断系统是否处于孤岛运行状态。当检测到相位偏移 $\Delta\theta > \Delta\theta_{\max}$,且持续一定时间 T_{set} 时,即判断系统处于孤岛运行模式,并将控制策略进行切换。考虑到系统的负荷扰动也会引起相位偏移,为了避免该情况造成误判,在本检测方法中相位偏移的门槛值 $\Delta\theta_{\max}$ 一般取得较大。

b. 当交流线路输送的功率较小时,在规定时间内仅通过相位偏移 $\Delta\theta$ 可能无法判断出系统是否处于孤岛运行状态,此时通过频率检测来进行判定,并且在检测过程中通过不断调整直流系统输送的功率定值来加速频率变化。

检测系统在一定时间内频率变化的累计值 Δf_{Σ} :

$$\Delta f_{\Sigma} = \sum \Delta f = \sum (f - f_N) \quad (3)$$

设置 2 个门槛值 $\Delta f_{\Sigma\min}$ 和 $\Delta f_{\Sigma\max}$, 并且 $\Delta f_{\Sigma\min} < \Delta f_{\Sigma\max}$ 。

① 当 $\Delta f_{\Sigma\min} < \sum |\Delta f| < \Delta f_{\Sigma\max}$ 时,此时通过不断更新功率设置定值来快速检测系统的运行状态,具体原理为:由于送端换流站采用定有功功率和定交流电压的控制策略,此时通过调整送端换流站的有功功率定值来加速系统频率变化值,以达到类似控制系统中的正反馈效果,从而使系统频率快速变化。功率定值 P_{ref} 设定公式为:

$$P_{\text{ref}} = P_{\text{ref0}} - K \Delta f_{\Sigma} \quad (4)$$

其中, P_{ref} 为新设定的功率定值; P_{ref0} 为系统交直流并列运行方式下的功率定值; K 为系数。

下面分 2 种情况进行分析。

第一种情况是当系统交流线路全部跳闸后,由于柔性直流输电系统采用定有功功率控制,送端系统发出的功率将大于柔性直流输电线路输送的功率,系统频率 f 将上升。在该检测方法中,由于设置了功率调整环节,使得柔性直流线路输送的功率定值减小,从而送端系统发出的功率和直流线路输送的功率差额将进一步增大,加速系统频率 f 的上升,当检测到 $\sum |\Delta f|$ 超过阈值 $\Delta f_{\Sigma\max}$,且持续一定时间时,判断系统处于孤岛运行状态。

第二种情况是假设系统通过 2 条交流线路与受端系统相连,当其中一条交流线路跳闸后,系统频率上升使得 $\Delta f_{\Sigma\min} < \sum |\Delta f| < \Delta f_{\Sigma\max}$,此时由于系统中仍有一条交流线路运行,系统处于交直流并列运行方式,此时系统中的潮流将重新分配,交流故障线路上的潮流将会转移到健全的交流线路上,一段时间后频率又会回降到系统稳定值,因此系统频率偏差 $\sum |\Delta f|$ 将会逐步减小直至小于 $\Delta f_{\Sigma\min}$,系统继续保持交直流并列运行方式。

② 当 $\sum |\Delta f| > \Delta f_{\Sigma\max}$,且持续一定时间时,判定系统已处于孤岛运行状态,并自动将控制策略进行切换。

③ 当 $\sum |\Delta f| < \Delta f_{\Sigma\min}$ 时,判定系统处于交直流并列运行状态,或者是因为跳闸的交流线路所输送的功

率很小,这种情况下说明交流线路的跳闸对整个柔性直流输电系统的影响并不大,因此控制策略暂时不进行切换,仍采取交直流并列运行方式的控制。如果是因为跳闸的交流线路所输送的功率很小,此时由于换流站保持为定有功功率控制,因此系统功率不平衡,随着时间的推移两端系统的相位偏移将逐步增大,待一段时间后通过相位偏移判据检测出系统处于孤岛运行,再将控制系统切换到孤岛运行方式下的控制策略。

综上所述,柔性直流输电系统从交直流并列转为孤岛运行的切换控制流程如图 6 所示。

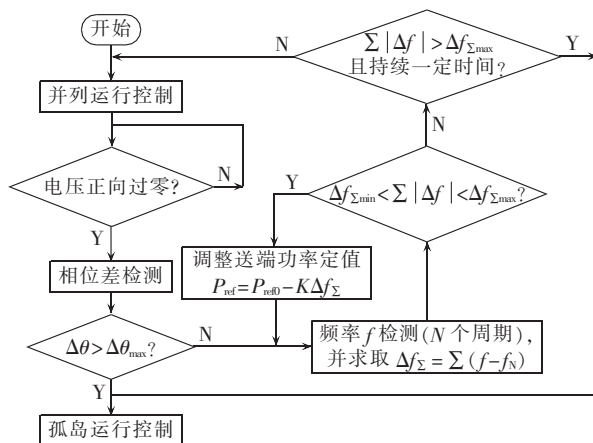


图 6 柔性直流输电系统从交直流并列转为孤岛运行的切换控制流程图

Fig.6 Flowchart of mode switching control from AC-DC parallel operation to islanded operation

2.2 从孤岛运行转为交直流并列运行的控制

在交流线路故障清除后,需要将柔性直流输电系统恢复到正常的运行模式,即交直流并列运行。从孤岛转为交直流并列运行时,需要保证送端和受端交流系统的电压幅值和相角近似一致,否则将产生严重的电磁暂态冲击,对系统造成严重冲击。柔性直流输电系统从孤岛转为交直流并列运行的切换控制原理如下。

a. 检测交流联络线是否存在故障。若交流联络线故障,则不执行并列运行操作,柔性直流输电系统的控制不进行切换,仍采用孤岛运行方式下的控制策略;若交流联络线路无故障,则执行并列运行操作。

b. 检测送端和受端交流系统的电压幅值和相角差。当检测到电压幅值和相角分别满足 $\Delta U < \Delta U_{\max}$ 和 $\Delta\theta < \Delta\theta_{\max}$ 时,执行由孤岛运行转为交直流并列运行的切换控制,同时闭合交流联络线路的断路器,并将直流换流站的控制策略进行相应切换;若检测到电压幅值和相角不满足要求,则继续保持孤岛运行。

综上所述,柔性直流输电系统从孤岛运行转为交直流并列运行的切换控制流程如图 7 所示。

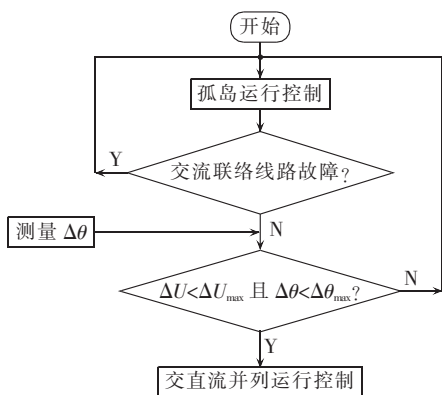


图 7 柔性直流输电系统从孤岛运行转为交直流并列运行的切换控制流程图
Fig.7 Flowchart of mode switching control from islanded operation to AC-DC parallel operation

3 仿真分析

为了验证本文所提出的柔性直流输电系统交直流并列与孤岛运行方式之间的切换控制策略的可行性和有效性,以某实际工程参数为例,利用电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 对该柔性直流输电系统的切换控制进行建模仿真。仿真所采用的系统参数为:系统额定直流电压为 ± 160 kV;送端和受端交流系统额定电压等级均为 110 kV;换流器采用基于模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 技术,每个桥臂采用 100 个子模块;交流输电线路共 2 条,交流线路 1、2 的额定输送功率均为 30 MW;柔性直流输电线路的额定输送功率为 80 MW。换流站的控制系统采用前文所提出的控制策略,系统在交直流并列运行与孤岛运行之间进行切换时采用本文第 2 节所提出的切换控制策略。其中,对于本仿真算例,从交直流并列运行转为孤岛运行的切换控制时,滑动窗口的时间 T 取为 500 ms,系统相位偏移的阈值 $\Delta\theta_{\max}$ 取为 60° 。对于其他工程,相关控制参数应根据工程实际情况确定。

3.1 从交直流并列运行转为孤岛运行仿真结果

假定系统稳态运行至 3.5 s 时,交流线路 1 突然跳闸,4.5 s 时交流线路 2 跳闸,此后系统处于孤岛运行状态,在仿真中不考虑系统频率上升对风电场风机性能的影响,即不考虑风机从系统中切除的情况。仿真结果如图 8—11 所示。

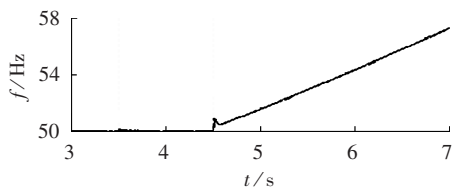


图 8 从交直流并列运行转为孤岛运行,不采取切换控制时送端系统频率变化
Fig.8 Frequency variation of rectifier system during uncontrolled mode switching from AC-DC parallel operation to islanded operation

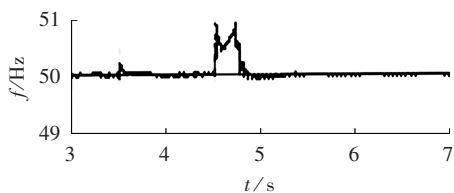


图 9 从交直流并列运行转为孤岛运行,采取切换控制时送端系统频率变化
Fig.9 Frequency variation of rectifier system during controlled mode switching from AC-DC parallel operation to islanded operation

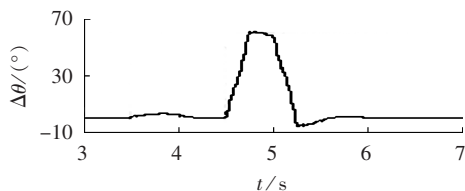


图 10 从交直流并列运行转为孤岛运行时送端交流系统的电压相位偏移
Fig.10 Voltage phase shift of rectifier AC system during mode switching from AC-DC parallel operation to islanded operation

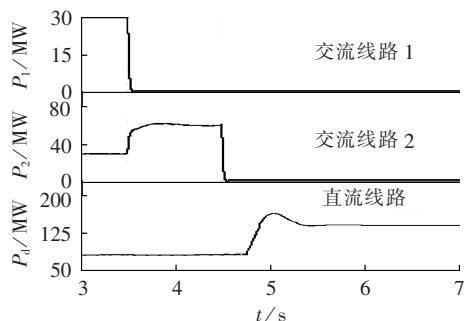


图 11 从交直流并列运行转为孤岛运行时交流线路 1、2 和直流线路有功功率
Fig.11 Active power of AC line 1,2 and DC line during mode switching from AC-DC parallel operation to islanded operation

从上述仿真计算结果可以看出,3.5 s 时刻系统切除交流线路 1,随后由于柔性直流换流站采用定有功功率控制,系统的有功潮流由交流线路 1 转移到线路 2,即如图 11 所示的功率变化情况。在转移过程中由于交流线路功率的变化,送端交流系统的频率也会有一定波动,但在持续一段时间扰动后频率又恢复到额定值。在 4.5 s 时刻,系统将另一条交流线路 2 切除,此后系统处于孤岛运行状态。由于交流联络线路全部被切断,系统只能通过柔性直流输电线路向受端系统传输有功。此时不同控制策略下的系统的仿真结果如下。

a. 当系统不采取相应的控制切换措施时,由于柔性直流输电系统采用了定有功功率的控制策略,传输的有功功率维持在 80 MW,这使得送端系统无法将电能完全送出,从而产生“窝电现象”,送端换流站交流侧系统的频率急剧上升,由于在本仿真中不考

虑因系统频率上升导致风机切除的情况,可见送端系统的频率在 7 s 时达到 56 Hz,而实际工程中当系统频率出现如图中所示的急剧上升时,系统早已崩溃。

b. 当系统采取本文所提出的控制切换措施时,4.5 s 时刻系统处于孤岛运行状态,由于失去了交流联络线路,送端换流站在控制切换前仍采用定有功功率控制,因此原本通过交流联络线路传输的功率将累积在送端交流系统,从而导致送端交流系统的相位偏移不断增大,如图 10 所示。控制系统持续进行监测,经过一段时间后检测到 $\Delta\theta > \Delta\theta_{\max}$,判断系统处于孤岛运行状态,此时将控制策略由交直流并列运行的控制切换到孤岛运行方式下的控制,即送端换流站由定有功功率控制切换为定频率控制,此后系统频率逐渐降为额定值,因此送端系统的相位偏移也随之降为 0。从仿真结果可以看到,控制策略切换后,系统的频率经过一定的波动后最终稳定在额定频率 50 Hz 左右,交流线路 1、2 的有功功率都降为 0,柔性直流输电线路输送的有功功率上升至 140 MW,即送端系统发出的有功全部通过柔性直流线路输送,从而使系统在孤岛运行时保持安全稳定运行。

从图 8—11 的仿真波形也可以看出,本文所提的控制策略能根据系统电气量变化特征及时准确地判断出柔性直流输电系统处于交直流并列运行还是孤岛运行模式,并且从交直流并列转为孤岛运行的切换过程中,系统各电气量没有剧烈的波动,从而保证了切换过程中系统的稳定运行。

此外,当送端交流系统由于风速变化引起的风电机组随机切机和投入而导致负荷波动以及送端交流系统发生母线电压跌落等工况时,也可能引起送端交流系统频率的波动。为了验证本文所提出的控制策略不存在检测死区,即便在上述故障工况下也能正确判断出系统运行状态,本文对上述典型工况也进行了仿真。仿真结果表明,当柔性直流输电线路的额定输送功率为其他值时,控制系统能正确判断出系统运行状态;当系统中一条或几条交流线路跳闸,但仍有交流线路保持两端系统相连时,检测装置不会因为交流线路的跳闸而误判为孤岛运行;当送端交流系统由于功率不平衡而导致负荷波动时,也不会误判。限于篇幅,本文对各种故障下的仿真结果不再一一列举,在此仅列出一种典型故障下的仿真结果,故障工况为假定系统稳态运行至 5 s 时,交流线路 1 发生单相接地故障(C 相),100 ms 后保护动作跳开该回线路,此时只有一回交流线路投入运行,10 s 时另外一条交流线路发生单相接地故障,100 ms 后保护动作跳开该回线路,此时系统转为孤岛运行。送端交流系统的相位偏移检测结果如图 12 所示,由图可见,当其中一回线路跳闸,但仍有交流线路保持两端系统相

连时,相位偏移小于相位偏移的门槛值 $\Delta\theta_{\max}$ (60°),且只在故障瞬间有一较大的瞬时值,故检测系统不会误判为孤岛运行状态。从仿真结果可以看见,当 2 回交流线路均从系统中切除时,送端交流系统的相位偏移持续超过门槛值 60° ,故此时检测系统可判断出系统处于孤岛运行状态,并将柔性直流输电系统的控制策略进行相应切换。

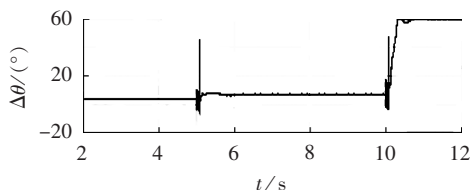


图 12 交流线路单相接地时送端交流系统的电压相位偏移

Fig.12 Voltage phase shift of rectifier AC system during single-phase grounding fault

3.2 从孤岛运行转为交直流并列运行仿真结果

按照第 2.2 节提出的系统从孤岛运行转为交直流并列运行的切换控制策略,对模型进行仿真验证。仿真时设置在 10 s 发出并列运行指令,仿真结果如图 13 所示。

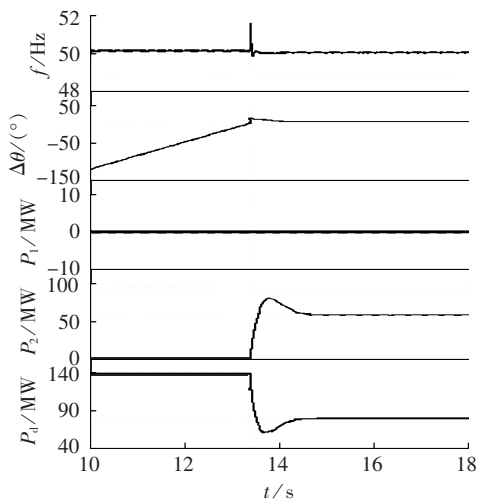


图 13 从孤岛运行转为交直流并列运行时系统电气量变化

Fig.13 Variation of electrical parameters during mode switching from islanded operation to AC-DC parallel operation

从图 13 所示的各电气量仿真波形可以看出,10 s 发出并列运行指令,随后控制系统开始不断检测送、受端系统的电压幅值和相角是否满足并列运行条件,即 $\Delta U < \Delta U_{\max}$ 且 $\Delta\theta < \Delta\theta_{\max}$ 。从图中两端系统的相位差变化波形可以看出,在 $t=13.3$ s 时满足并列运行要求,执行由孤岛运行转为交直流并列运行的切换控制,同时闭合交流联络线路的断路器,并将直流换流站的控制策略进行相应切换。切换瞬间,送端交流系统的频率会有一定波动,但随之便很快恢复到额定

值,并稳定在 50 Hz 左右。系统从孤岛运行转为交直流并列运行后,送端系统发出的电能一部分继续通过柔性直流线路输送,另一部分由交流线路输送,从图中可知,交流线路 2 的有功功率由 0 逐步升至 60 MW,柔性直流线路输送的功率则由 140 MW 降为额定输送功率 80 MW,交流线路 1 由于此时尚未合闸,因此功率一直保持为 0。系统切换为交直流并列运行后,相位差保持为一个较小的正值,这是因为系统通过交流线路传输一部分有功,从而两端系统存在相角差,且送端交流系统的相位超前于受端系统。

从仿真波形也可以看出,从孤岛运行转为交直流并列运行的切换过程中,系统各电气量没有剧烈的波动,可以保证切换过程中系统的稳定运行。

4 结语

本文对柔性直流输电系统交直流并列和孤岛 2 种运行方式之间的切换控制进行了研究,分别分析了柔性直流输电系统在交直流并列运行和孤岛运行方式下所采取的控制策略,提出了系统从交直流并列转为孤岛运行和从孤岛转为交直流并列运行的切换控制策略。基于某实际工程参数,通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件,对所提出的控制方案进行了仿真验证,结果表明所设计的切换控制策略能及时检测出系统运行状态,并自动进行相关控制方式的切换,在切换过程中系统各电气量没有剧烈的波动,可以保证系统的安全稳定运行。研究结果可为实际工程的运行控制提供指导,也可以为相关柔性直流输电系统的控制器设计提供参考。

参考文献:

- [1] 周浩,沈扬,李敏,等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 电网技术,2013,37(4):879-890.
ZHOU Hao, SHEN Yang, LI Min, et al. Research on insulation coordination for converter stations of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 879-890.
- [2] 张文亮,刘壮志,王明俊,等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术,2009,33(13):1-11.
ZHANG Wenliang, LIU Zhuangzhi, WANG Mingjun, et al. Research status and development trend of smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 1-11.
- [3] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术,2009,33(2):1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.
- [4] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 594-599.
- [5] 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):137-141.
SUN Shixian, TIAN Jie. Enhancement of fault ride-through capability for grid-connected wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 137-141.
- [6] 杨杰,郑健超,汤广福,等. 电压源换相高压直流输电系统接地方式设计[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):14-19.
YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Grounding design analysis of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 14-19.
- [7] 李响,王志新,刘文晋. 海上风电柔性直流输电变流器的研究与开发[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):10-14,20.
LI Xiang, WANG Zhixin, LIU Wenjin. Flexible direct current transmission converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 10-14, 20.
- [8] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [9] 曾丹,姚建国,杨胜春,等. 柔性直流输电不同电压等级的经济性比较[J]. 电力系统自动化,2011,35(20):98-102.
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Economy comparison of VSC-HVDC with different voltage levels[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 98-102.
- [10] 管敏渊,徐政. MMC 型柔性直流输电系统无源网络供电的直接电压控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):1-5.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Direct voltage control of MMC-based VSC-HVDC system for passive networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 1-5.
- [11] 饶宏. 南方电网大功率电力电子技术的研究和应用[J]. 南方电网技术,2013,7(1):1-5.
RAO Hong. Research and application of the high-power electronic technology in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 1-5.
- [12] 陈海荣. 基于 VSC 的多端直流输电系统的控制策略[J]. 电力建设,2011,32(8):58-63.
CHEN Hairong. Control strategy of VSC based multi-terminal HVDC transmission system[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 58-63.
- [13] 董云龙,包海龙,田杰,等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):89-92.
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.
- [14] 曹春刚,赵成勇,陈晓芳. MMC-HVDC 系统数学模型及其控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(4):13-18.
CAO Chungang, ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang. Mathematical model and control strategy for MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(4): 13-18.
- [15] 管敏渊,徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):64-68.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [16] 任敬国,赵建国,于大洋,等. VSC-HVDC 输电系统模式切换控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(6):69-73,111.
REN Jingguo, ZHAO Jianguo, YU Dayang, et al. Mode switching control strategy for VSC-HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 69-73, 111.
- [17] 范心明,管霖,何健明. 多电平柔性直流输电定有功功率与频率

- 辅助控制[J]. 电网技术,2012,36(9):182-186.
- FAN Xinming, GUAN Lin, HE Jianming. Constant active power and frequency auxiliary control for multilevel VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2012, 36(9):182-186.
- [18] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 21-37.
- [19] 赵岩, 郑斌毅, 贺之渊. 南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 6-10.
- ZHAO Yan, ZHENG Binyi, HE Zhiyuan. The control mode and operating performance of Nanhui VSC-HVDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 6-10.
- [20] 刘隽, 贺之渊, 何维国, 等. 基于模块化多电平变流器的柔性直流输电技术[J]. 电力与能源, 2011, 1(1): 33-38.
- LIU Jun, HE Zhiyuan, HE Weiguo, et al. The introduction of technology of HVDC based on modular multi-level converter [J]. Power and Energy, 2011, 1(1): 33-38.
- [21] 张东辉, 冯晓东, 孙景强, 等. 柔性直流输电应用于南方电网的研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 1-6.
- ZHANG Donghui, FENG Xiaodong, SUN Jingqiang, et al. Research of VSC HVDC application to China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 1-6.
- [22] 郭自勇, 李广凯, 李旷, 等. 中海油文昌柔性直流输电系统稳态仿真分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 15-18.
- GUO Ziyong, LI Guangkai, LI Kuang, et al. Simulation analysis on the steady states of CNOOC Wenchang VSC-HVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 15-18.
- [23] 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.
- [24] 郭小强, 赵清林, 郭伟扬. 光伏并网发电系统孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 157-162.
- GUO Xiaoqiang, ZHAO Qinglin, WU Weiyang. Islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 157-162.
- [25] 侯梅毅. 分布式同步发电机的孤岛检测原理与实现[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- HOU Meiyi. Islanding detection principle and implementation for distributed synchronous generators [D]. Ji'nan: Shandong University, 2010.
- [26] 侯梅毅, 高厚磊, 刘炳旭, 等. 基于相位偏移的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 22-26.
- HOU Meiyi, GAO Houlei, LIU Bingxu, et al. Islanding detection method based on phase shift [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 22-26.
- [27] 刘传洋, 何礼高. 基于相位突变与电流扰动结合的并网孤岛检测[J]. 通信电源技术, 2009, 26(6): 6-9.
- LIU Chuanyang, HE Ligao. Islanding detection based on phase jump and the current active perturbation combination of photovoltaic grid-connected system[J]. Telecom Power Technology, 2009, 26(6): 6-9.

作者简介:



文 安

文 安(1965-),男,四川南充人,高级技术专家,博士,主要从事电网控制保护和柔性直流输电等方面的研究工作;

邓 旭(1990-),男,湖南永州人,硕士研究生,研究方向为高压/特高压直流输电、柔性直流输电等(E-mail: dengxu926@163.com);

魏承志(1984-),男,福建三明人,工程师,硕士,主要从事直流输电技术、电能质量分析与控制等方面的研究工作。

Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system

WEN An¹, DENG Xu², WEI Chengzhi¹, XUN Binbin¹, DENG Jianjun¹,
HUANG Weifang³, MO Tianwen³, TIAN Lin³

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. CSG Power Dispatching Control Centre, Guangzhou 510623, China)

Abstract: The control strategy of VSC-HVDC transmission system is analyzed respectively in AC-DC parallel operating mode and islanded operating mode, based on which, the strategy of mode switching control is proposed. Based on the parameters of an actual project, a system simulation model is established on PSCAD/EMTDC platform and the proposed control strategy is verified by simulation. Results show that, it detects the operating conditions of VSC-HVDC transmission system timely and switches the corresponding control strategy automatically. The electrical parameter fluctuation during mode switching is slight and the stable system operation is not affected.

Key words: VSC-HVDC power transmission; AC-DC parallel operation; islanded operation; mode switching; control; computer simulation