

向孤岛电网供电的柔性直流逆变站综合控制策略

陈大林, 范绪然, 赵健, 叶剑桥, 朱正谊, 周昊

(国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019)

摘要:考虑孤岛电网存在有源电网状态和无源电网状态之间的状态变化,文中提出了向孤岛电网供电的柔性直流逆变站综合控制策略,以实现在孤岛电网状态变化时保证对其可靠供电。从柔性直流的控制原理出发,分析了有源电网和无源电网下柔性直流逆变站控制方式的差别。当孤岛电网从有源电网变为无源电网,向其供电的柔性直流逆变换流站控制方式切换时,文中从稳定交流电压和快速恢复有功平衡考虑,提出了相角跟随和有功功率优先2个控制策略,以保证切换时刻孤岛电网和直流系统的各电气量波动最小。建立柔性直流输电系统的PSCAD/EMTDC仿真模型,仿真验证了文中控制策略的有效性,在孤岛状态变化时可实现持续可靠供电。

关键词:柔性直流输电系统;孤岛网络;控制方式切换;相角跟随;有功功率优先

中图分类号:TM712.2

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0057-07

0 引言

随着电力电子技术和电力系统本身的发展,基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)技术的柔性高压直流输电(VSC-high voltage direct current transmission system, VSC-HVDC)得到了研究和应用^[1-4]。VSC-HVDC能够实现电流的自行关断,且不依赖电网进行换相,因此可以向弱交流系统、无源网络供电^[5-6]。随着海上钻井平台的规模不断扩大和海岛的开发^[7-8],其内部用电负荷也随之增加,当孤岛电网内已配置的电源无法满足其负荷增加需求,由VSC-HVDC向孤岛电网供电的输电模式得到越来越多的关注。由于孤岛电网存在有源孤岛和无源孤岛2种状态^[9-10],为了保证VSC-HVDC向孤岛电网供电的可靠性,势必需要根据孤岛电网的特点对VSC-HVDC的控制策略进行研究,因此,研究孤岛电网不同运行状态时的VSC-HVDC控制策略对提高其供电可靠性有重要意义。

目前,针对向孤岛电网供电的VSC-HVDC控制策略的研究大部分限于特定孤岛电网为有源电网或者为无源电网^[11-15],少有文献研究过2种状态变化时的VSC-HVDC控制策略^[16]。

目前柔性直流输电系统主要采用双闭环控制结构,可实现有功功率和无功功率的独立控制^[17]。文献^[18]提出了柔性直流输电系统的模型预测控制,通过选择使目标函数最优的开关状态来控制换流器,该方法无需调制环节,可以进行多目标处理,

但是其计算量较大;文献^[19]设计了向无源孤岛供电的柔性直流系统控制策略,逆变侧采用定交流电压控制,无源网络无法通过锁相环(phase locked loop, PLL)来获得同步相位,通过人为设定控制器中电网同步相位,从而保证无源逆变的频率不变性;文献^[20]提出了基于模型预测控制的向无源电网供电的VSC-HVDC无源逆变控制器,无需整定PI参数,模型鲁棒性能好,能在各种情况下实现对无源网络供电。

文中通过分析柔性直流输电系统的换流站控制系统,针对VSC逆变站控制切换方式,提出相角跟随、有功功率优先控制的策略,并在PSCAD/EMTDC上建立仿真模型,经仿真分析验证文中综合控制策略的有效性,并通过算例对比验证控制策略的有效性,可在孤岛状态变化时实现持续可靠供电。

1 柔性直流换流站数学模型

图1为VSC结构,其中, U_s 为交流侧电压; U_c 为VSC输出电压; I 为交流侧电流; P_s, Q_s 为换流站VSC吸收的有功功率和无功功率; I_{dc}, U_{dc} 为VSC直流电流与直流电压; L 为VSC等效电感; R 为VSC等效电阻; C 为VSC的直流电容; δ 为交流侧系统电压相角(默认VSC输出电压相角为0)。

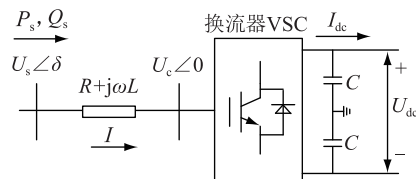


图1 VSC结构示意图

Fig.1 The structure diagram of VSC

收稿日期:2019-07-17;修回日期:2019-08-23

基金项目:国家电网有限公司科技项目“电力弹性负荷快速响应及柔性调节关键技术研究与应用”

根据该结构可以列写 VSC 在交流 abc 三相静止坐标系下的交流侧动态微分方程^[21],如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为交流侧三相电压的瞬时值; u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 为 VSC 在阀侧输出三相电压的瞬时值; i_a, i_b, i_c 为交流侧三相电流的瞬时值。

u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 可用直流电压表示为:

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \frac{mU_{dc}}{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \delta) \\ \sin(\omega t + \delta - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + \delta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\omega = 2\pi f$, f 为电网频率。

式(1)和式(2)是 VSC 在静止坐标系下的电磁暂态数学模型,但是其中的变量均为时变量,不利于进行有功功率和无功功率的独立控制,不利于进行控制器设计,因此,需要进行派克变换建立旋转坐标系下的数学模型。

式(1)整理可得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

所选取的派克变换矩阵 P 为^[22]:

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \sin\omega t & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)变换到旋转坐标系下为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{s0} \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \frac{mU_{dc}}{2L} \begin{bmatrix} \cos\delta \\ \sin\delta \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在稳态情况下,由式(5)可得 VSC 在旋转坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}u_{sd} - \frac{1}{L}u_{cd} - \frac{R}{L}i_d - \omega i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}u_{sq} - \frac{1}{L}u_{cq} - \frac{R}{L}i_q + \omega i_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_{cd} = (mU_{dc} \cos\delta)/2$; $u_{cq} = (mU_{dc} \sin\delta)/2$ 。

当采用上述派克变换进行坐标变换时,规定交

流系统三相母线电压基波相量与 d 轴同相位,因此在稳态时有 $u_{sd} = U_s$, $u_{sq} = 0$,因此 VSC 吸收的有功功率和无功功率^[23]可表示为:

$$P_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) = \frac{3}{2}u_{sd}i_{sd} \quad (7)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) = -\frac{3}{2}u_{sd}i_{sq} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知,经过 dq 坐标变换后,当交流电压幅值一定时,有功功率与无功功率分别取决于 i_d 和 i_q ,在这个意义上,有功功率和无功功率是解耦的。

2 柔性直流换流站控制

由 VSC 的数学模型可知,VSC 与交流系统交互的有功功率和无功功率主要取决于 i_d 和 i_q ,因此要实现 VSC 的有功功率和无功功率的控制,就是对 i_d 和 i_q 进行控制。VSC-HVDC 控制结构主要由外环功率控制环节、内环电流控制环节、调制模块等构成^[24],如图 2 所示。其中 U_{dref1}, U_{dref2} 为直流电压指令值; P_{ref1}, P_{ref2} 为有功功率指令值; Q_{ref1}, Q_{ref2} 为无功功率指令值; U_{sref1}, U_{sref2} 为交流电压指令值; U_{s1}, U_{s2} 为交流侧电压; U_{dc1}, U_{dc2} 为直流电压; i_s 为交流电流;调制模块采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)。

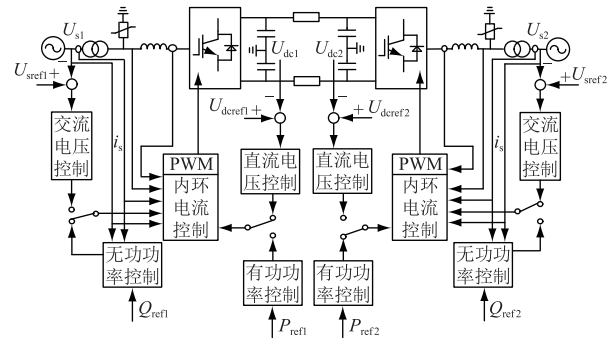


图 2 VSC-HVDC 的控制系统结构

Fig. 2 Control system structure diagram of VSC-HVDC

2.1 向有源网络供电的逆变站控制

连接有源系统的 VSC 双闭环矢量控制^[25]如图 3 所示。双闭环解耦控制思路:首先通过有功功率和无功功率的指令值与实测值的偏差进行调节控制,输出 i_d 和 i_q 的指令值 i_{dref} 和 i_{qref} ;再将 i_{dref} 和 i_{qref} 与 i_d 和 i_q 的偏差进行调节控制,最终输出交流侧电压的指令值 u_{cabref} 给调制模块。

对于两端交流系统为有源系统的情况,合理的控制变量组合可以是整流侧控制有功功率和无功功率,逆变侧控制直流电压和无功功率。合理的控制变量组合随着两端交流系统情况而定,但是两站

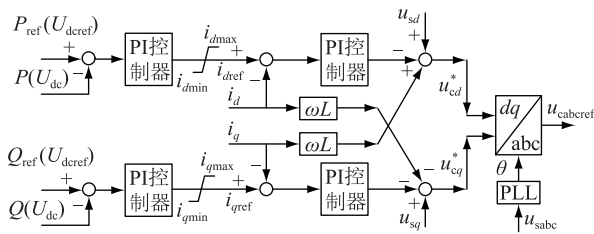


图3 连接有源系统的VSC双闭环矢量控制框图

Fig. 3 Double closed loop vector control block diagram of VSC connecting active system

之间的无功功率控制是完全独立的,所需的无功功率控制由定交流电压或者定无功功率来实现。由式(5)可知,派克变换需要知道此时的电网电压 u_{sabc} 的相位以保证实现电压定向控制,此时需要 PLL 来提供基准相位。

2.2 向无源网络供电的逆变站控制

当 VSC 与无源网络连接时,要实现无源网络的可靠供电,需要 VSC 向无源网络供应幅值和频率稳定的交流电压,通常在逆变站采用定交流电压控制^[26-27]。交流电压控制要求控制交流侧电压的幅值和频率,参考连接无源网络的 VSC 控制器,采用电压矢量定向控制策略,即 $u_{sd} = U_s$, $u_{sq} = 0$ 。功率外环的控制量为交流电压的 d 轴和 q 轴分量,即 u_{sd} 和 u_{sq} ,其指令值 $u_{sdref} = U_{sm}$, $u_{sqref} = 0$,因此,可得到如图 4 所示的定交流电压控制器。

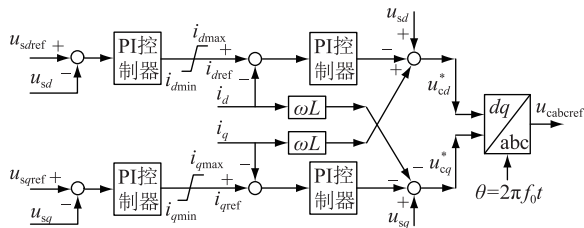


图4 定交流电压控制器

Fig. 4 Fixed AC voltage controller block diagram

由于连接无源网络,此时无法通过 PLL 来获得交流系统的同步相位信息,因此控制器和调制模块所需的相位直接给定为 $\theta = 2\pi f_0 t$,其中 f_0 为电网额定频率,以此保证换流站输出的交流电压频率不变。

3 向孤岛电网供电的逆变站综合控制策略

3.1 向孤岛电网供电的逆变站控制策略

向孤岛电网供电的柔性直流输电系统结构如图 5 所示。其中,送端交流电网视为无穷大系统,送端孤岛电网由静态负荷、动态负荷 M 和同步发电机 G 组成, R 为直流线路等效电阻。

在该系统中,根据 VSC-HVDC 的控制规律,整流站采用定直流电压控制和定无功功率控制的控

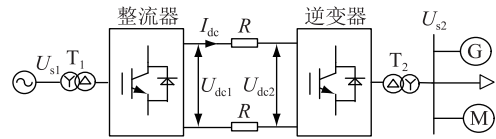


图5 向孤岛电网供电的VSC-HVDC系统结构示意图

Fig.5 Structural diagram of VSC-HVDC system supplying power to isolated power grid

制方式。当孤岛电网为有源电网时,逆变站采用有功功率控制和定交流电压控制的控制方式;当孤岛电网为无源电网时,逆变站采用无锁相环定交流电压控制的控制方式。

由于孤岛电网存在有源状态和无源状态 2 种情况,因此需要在逆变站配置图 3 和图 4 所示 2 种控制系统,以应对孤岛电网的 2 种状态,其控制切换指令来自于孤岛电网发电机退出运行的指令。

从向有源网络供电和向无源网络供电的控制方式上分析,可以看出在有源状态下,逆变换流站定有功功率和交流电压;在无源工况下,逆变换流站定交流电压。因此,有源到无源的切换实质上是逆变换流站从一个 PV(PQ)节点切换为 V δ 节点,在切换前后,因为交流电压 V 保持不变,所以切换过程的波动主要由有功功率和电网相角的不一致引起,因此可以从 2 方面来设计切换策略。

(1) 电网相角跟随。由于在向无源网络供电的定交流电压控制时, dq 变化及逆变换所采用的旋转角为人为设定,因此为了使换流站该处的电网相角在切换前后保持一致,在切换至无源控制时, dq 变换旋转角 $\theta = 2\pi f_0 t + \delta_s$, f_0 为电网工频 50 Hz, δ_s 为切换时刻的电网相角。

(2) 有功功率控制优先。由于孤岛电网变为无源网络后,换流站传输的有功功率将提高,以弥补发电机切除后的电网功率缺额。因此,在无源定交流电压的控制下,向无源电网输送的功率会逐步提高,直到全网达到有功功率平衡。而在该工程中,由于无源网络交流电压与功率的关系,交流电压呈震荡式的上升,大大加长了稳定所需时间。

因此,在切换过程中,由于功率变化较大,在切换时刻采用有功控制优先策略。即在切换中,将有功功率的指令值调至全网最大有功负荷的 95%,在功率未达到全网最大有功负荷的 95%之前,外环控制先由有功功率控制器工作,之后再采用定交流电压的控制器。

结合以上 2 个切换策略,将图 3 和图 4 的控制系统进行融合,得到的控制系统如图 6 所示。开关 s_1, s_2, s_3 实现控制的切换,其中保持器实现相角跟

随, s_1 实现有功功率控制优先。

其工作原理如下:当孤岛处于有源状态时,开关 s_1, s_2, s_3 均处于位置“1”;当孤岛电网从有源状态变为无源状态时,开关 s_2, s_3 和保持器同时动作,调到位置“0”,而开关 s_1 仍位于位置“1”,等到传输有功功率达到孤岛全网最大有功负荷的 95%,开关再调至位置“0”。

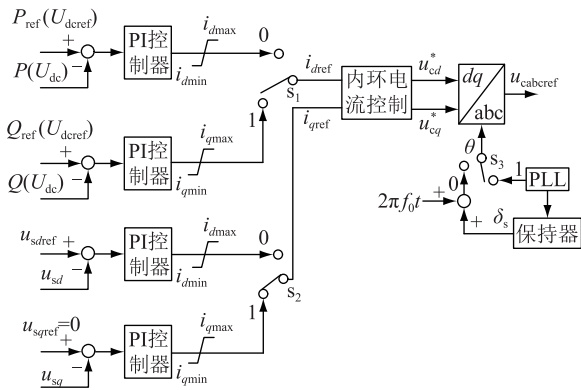


图6 综合控制策略结构

Fig.6 Structure diagram of integrated controller

3.2 算例验证

在 PSCAD 上建立如图 5 所示的仿真模型,模型参数如表 1 所示,孤岛电网的模型参考南方某实际海上钻井平台数据进行建模,负荷由 30 MW+j10 Mvar 的静态负荷和 20 MW+j10 Mvar 的感应电动机负荷组成,孤岛系统的发电机额定出力为 10 MW。

表 1 电磁暂态仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model

| 对象 | 参数名 | 整流侧 | 逆变侧 |
|-------|----------------|--------------|--------------|
| 交流系统 | 额定电压/kV | 230 | 35 |
| | 额定容量/MW | 100 | 100 |
| 换流变压器 | 额定变比/kV | 230/50 | 35/50 |
| | 接线方式 | Y_n/Δ | Y_n/Δ |
| 直流线路 | 直流电容/ μF | 200 | |
| | 直流电压/kV | 100 | |
| | 线路阻抗/ Ω | 0.01 | |
| | 直流功率/MW | 40 | |
| 控制方式 | | 定直流电压控制 | 定有功功率控制 |
| | | 定无功功率控制 | 定交流电压控制 |

直流电压基准值为 100 kV, 孤岛交流电压基准值为 35 kV, 功率基准值为 50 MW。

将设计的控制策略搭建在模型中,分别设计相角跟随对比算例和有功功率优先对比算例,以验证切换策略思路的正确性。

仿真算例如下:(1)相角跟随对比算例。切换

时刻设置在 2 s, 开关 s_1, s_2, s_3 均由位置“1”跳至位置“0”,其中无相角跟随仿真为保持器不动作,有相角跟随仿真为保持器在 2 s 时动作,仿真见图 7。

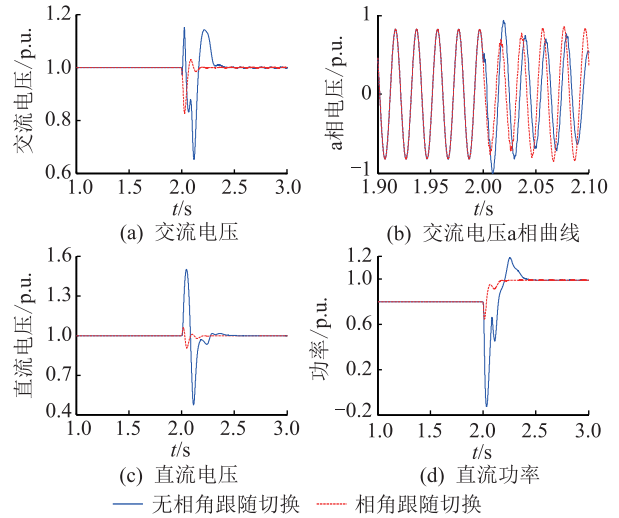


图7 相角跟随策略仿真对比

Fig.7 Comparison of phase angle following strategy simulation

由图 7 可以看出,采取了相角跟随策略后,控制切换后的各种电气量的波动显著减小,尤其是对交流电压的影响十分明显。

因为相角跟随策略是为了使换流站的电网相角在切换前后保持一致,由图 7(b)可以看出,当无相角跟随策略时,其交流电压 a 相曲线在切换时刻存在明显的截断,波形不连续,而采取了相角跟随策略后,其交流电压 a 相电压曲线在切换时刻仍保持联系,整体都是连贯的正弦波形。图 7(a)表明了采取相角跟随策略后交流电压的幅值波动范围由无相角跟随时的 0.65~1.15 p.u.减小到有相角跟随时的 0.84~1.03 p.u.,且能更快到达稳定。

图 7(c)表明了采取相角跟随策略后直流电压在切换时刻波动也明显变小,波动范围由无相角跟随时的 0.5~1.5 p.u.减小到有相角跟随时的 0.94~1.06 p.u.,而且有相角跟随策略能更快到达稳定。图 7(d)表明了采取相角跟随策略后直流传输的功率在切换时刻波动也明显变小,在切换瞬间无相角跟随时有功功率的最低点为 -0.15 p.u.,而有相角跟随时的最低点为 0.62 p.u.,且能更快到达稳定。

(2)有功功率优先对比算例。切换时刻设置在 2 s, 开关 s_2, s_3 均由位置“1”跳至位置“0”,保持器动作,无有功功率优先仿真即开关 s_1 由位置“1”跳至位置“0”,有功功率优先仿真即等到传输有功功率达到孤岛全网最大有功负荷的 95%,再由位置“1”跳至位置“0”,仿真如图 8 所示。

由图 8 可见,采取有功功率优先策略后,有功平

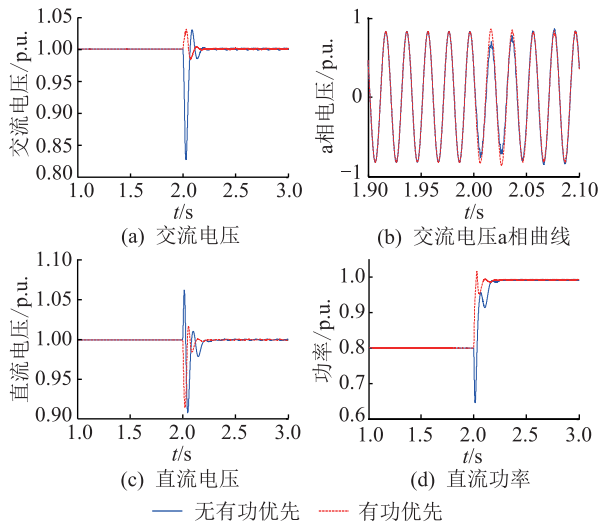


图8 有功功率优先仿真对比

Fig.8 Comparison of active power priority strategy simulation

衡得到快速恢复,整个孤岛系统快速恢复稳定,控制切换后的各种电气量的波动显著减小,影响明显。

在切换时刻采用有功控制优先策略,即在切换中,将有功功率的指令值调至全网最大负荷的95%,在功率未达到全网最大负荷的95%之前,外环控制环节先是有功功率控制器在工作,之后再采用定交流电压控制。图8(d)明显看出,采用有功功率优先策略,其传输的有功功率快速达到目标值,波动范围较小且波动时间更短。由于有功功率的快速恢复,孤岛电网的电压也能够维持较高水平。图8(a)和(b)表明了采用有功功率优先策略后交流电压的幅值在切换时刻波动明显变小,波动范围由无相角跟随时的0.84~1.03 p.u.减小到有相角跟随时的0.98~1.03 p.u.,且能更快到达稳定。

采用有功功率优先策略对直流系统的影响也十分明显。图8(c)表明采用有功功率优先策略后直流电压在切换时刻波动明显变小,更快到达稳定。

(3) 策略适应性算例。考虑孤岛电网从无源状态变为有源状态时,控制方式切换的有效性。孤岛电网以有源电网启动,发电机在2 s时被切除,电网变为无源电网,开关 s_1, s_2, s_3 均由位置“1”跳至位置“0”,并采取有功功率优先策略;其后,3 s时发电机接入电网,电网变为有源电网,开关 s_1, s_2, s_3 均由位置“0”跳至位置“1”,以实现控制切换,仿真见图9。

由图9可以看出,当孤岛电网从有源电网到无源电网变化时以及从无源电网到有源电网变化时,采取切换控制方式策略后,电网的交流电压和有功平衡都可以得到快速恢复,整个孤岛系统快速恢复稳定,有效验证了策略的适用性。

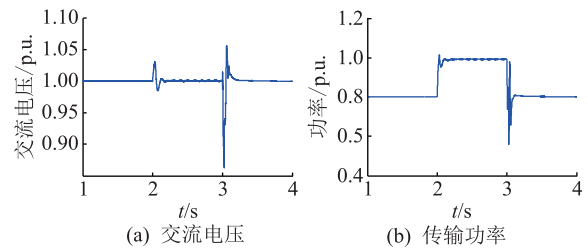


图9 控制策略适应性仿真

Fig.9 Simulation of control strategy adaptability

4 结论

针对孤岛电网从有源电网变为无源电网的情况,文中通过研究分析,得出以下结论:

(1) 当孤岛电网从有源电网变为无源电网时,从电力系统节点类型来看,柔性直流逆变站控制方式切换的实质是逆变换流站从一个PV(PQ)节点切换为V δ 节点;

(2) 从稳定孤岛电压和快速恢复有功平衡2个角度出发,文中提出的相角跟随和有功功率优先控制策略能够有效提升稳定效果和速度;

(3) 仿真验证了文中控制策略的正确性,该控制策略可保证切换时刻孤岛电网和直流系统的各电气量波动最小。

参考文献:

- [1] 陈祺炜,蒋平,仇晨光,等. 计及VSC-HVDC的交直流系统负荷恢复优化[J]. 广东电力,2018,31(1):68-73.
CHEN Qiwei,JIANG Ping,QIU Chenguang, et al. Load restoration optimization of AC/DC system considering VSC-HVDC[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(1):68-73.
- [2] 胥威汀,欧阳雪彤,苏运掣,等. 计及VSC的交直流混联电网扩展规划研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13):30-36.
XU Weiting, OUYANG Xuetong, SU Yunche, et al. Expansion planning of AC/DC power grid with VSC[J]. Power System Protection and Control,2019,47(13):30-36.
- [3] 陈宇杰,王淳,丁梦妮,等. 一种新型VSC潮流计算模型[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):1-7.
CHEN Yujie, WANG Chun, DING Mengni, et al. A new VSC power flow calculation model[J]. Power System Protection and Control,2019,47(10):1-7.
- [4] 张娜,方舟,张元明,等. 张北柔性直流保护通道传输时延研究与应用[J]. 电力信息与通信技术,2018,16(9):55-60.
ZHANG Na, FANG Zhou, ZHANG Yuanming, et al. research and application of transmission latency of line protection system of VSC-HVDC[J]. Electric Power Information and Communication Technology,2018,16(9):55-60.
- [5] 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):3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of flexible DC power transmission technology[J]. Automation of Electric Power System,2013,37(15):3-14.

- and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):3-14.
- [6] 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(4):77-81.
- LI Gengyin, LYU Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003(4):77-81.
- [7] 李雪,张安安,敬佳佳,等. 海上平台电力系统研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2):1-7.
- LI Xue, ZHANG An'an, JING Jiajia, et al. Overview of offshore electric systems [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2):1-7.
- [8] 李强,魏澈,洪毅,等. 海上油气田柔性直流输电系统关键技术及应用方案[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2):156-160.
- LI Qiang, WEI Che, HONG Yi, et al. Key technologies and application scheme of flexible HVDC system in offshore oil and gas fields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(2):156-160.
- [9] 张中丹,吕金历,赵宇洋,等. 基于双层 MPC 的多源孤岛微网经济运行控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7):168-174.
- ZHANG Zhongdan, LYU Jinli, ZHAO Yuyang, et al. Multi-source island microgrid economic operation control strategy based on double-layer MPC [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7):168-174.
- [10] 胡博,王昕,郑益慧,等. 基于萤火虫优化算法的分布式发电设备容量分配及配电网孤岛划分[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13):21-26.
- HU Bo, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Calculation of isolated island partition and distributed generator capacity based on firefly algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13):21-26.
- [11] HU Yi, WANG Xiaoru, SHEN Feng, et al. Control strategy based on sliding mode variable-structure control of VSC-MTDC transmission system [C]//Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2016:586-593.
- [12] 何志兴,罗安,熊桥坡,等. 模块化多电平变换器模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5):1366-1375.
- HE Zhixing, LUO An, XIONG Qiaopo, et al. Model predictive control of modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5):1366-1375.
- [13] WANG W, SHI X, MENG J, et al. Modeling and control of VSC-HVDC supplying passive network [J]. 2013, 45(5):213-217.
- [14] CHAI R Z, ZHANG B H, HAO Z G, et al. Control strategies of MMC-HVDC connected to passive networks [C]//Tencon 2013-2013 IEEE Region 10 Conference, IEEE, 2013:1-4.
- [15] 蔡新红,赵成勇,庞辉,等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3):405-414.
- CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hu, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC supplying passive networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3):405-414.
- [16] CHEN Dalin, HU Yi, WANG Xiaoru, et al. Control strategy of VSC-HVDC inverter supplying power to the isolated grid with induction motor [C]//2017 China International Electrical and Energy Conference, IEEE, 2017:497-503.
- [17] 吴桂良. 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- WU Guiliang. Study of HVDC system based on modular multilevel converter [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [18] 朱玲,符晓巍,胡晓波,等. 模块化多电平变流器 HVDC 系统的模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16):1-8.
- ZHU Ling, FU Xiaowei, HU Xiaobo, et al. Model predictive control of modular multilevel converter for HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16):1-8.
- [19] 管敏渊,徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2):255-263.
- GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2):255-263.
- [20] 梁莹玉,张涛,刘建政,等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11):78-89.
- LIANG Yingyu, ZHANG Tao, LIU Jianzheng, et al. Model predictive control for VSC-HVDC supplying passive networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11):78-89.
- [21] GUO Y, GAO H, WU Q, et al. Coordinated voltage control scheme for VSC-HVDC connected wind power plants [J]. IET Renewable Power Generation, 2017.
- [22] JASIM O, DANG H Q S. Advanced control method for VSC-HVDC systems connected to weak grids [C]//European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2016:1-10.
- [23] 吴明哲,陈武晖. VSC-HVDC 稳定控制研究[J]. 发电技术, 2019, 40(1):28-39.
- WU Mingzhe, CHEN Wuhui. Research on VSC-HVDC stability control [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1):28-39.
- [24] 许烽,宣晓华,陆翌,等. 向无源网络供电的 LCC-MMC 混合直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15):129-135.
- XU Feng, XUAN Xiaohua, LU Li, et al. Control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC transmission system supplying power to passive network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15):129-135.
- [25] 李向阳,刘应梅,王明东. 供电无源网络的 VSC-HVDC 系统控制器及 PI 参数研究[J]. 电力建设, 2016, 37(7):71-77.
- LI Xiangyang, LIU Yingmei, WANG Mingdong. Research on VSC-HVDC system controller and PI parameters of power supply passive network [J]. Electric Power Construction,

- 2016,37(7):71-77.
- [26] 张碧涵,赵海森. 基于 PSCAD 仿真的柔性直流输电技术研究[J]. 上海电气技术,2016,9(2):56-63.
- ZHANG Bihan,ZHAO Haisen. Research on VSC-HVDC transmission technology based on PSCAD[J]. Journal of Shanghai Electric Technology,2016,9(2):56-63.
- [27] 张汀荃,张汀荟,张海龙,等. 双端柔直输电系统的改进无差拍控制策略研究[J]. 电力工程技术,2018,37(4):84-89.
- ZHANG Tingquan,ZHANG Tinghui,ZHANG Hailong, et al. Operation characteristics of improved deadbeat flexible HVDC

transmission [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):84-89.

作者简介:



陈大林

陈大林(1992),男,硕士,助理工程师,从事柔性直流输电相关工作(E-mail:chendalin1-992@foxmail.com);

范绚然(1993),女,硕士,助理工程师,从事电力系统分析相关工作;

赵健(1993),男,硕士,助理工程师,从事电力系统分析相关工作。

Integrated control strategy of VSC inverter supplying power to the isolated grid

CHEN Dalin, FAN Xuanran, ZHAO Jian, YE Jianqiao, ZHU Zhengyi, ZHOU Hao

(State Grid Nanjing Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: Considering the isolated power grid state changing between active power grid and passive power grid, an integrated control strategy is proposed for VSC station to supply power to isolated power grid. Based on the principle of VSC control, the difference of control modes of VSC-HVDC inverter in active and passive power grids is analysed. When isolated power grid changes from active power grid to passive power grid, the control mode of VSC station changes. Considering the stabilization of AC voltage and fast restoration of active power balance, two control strategies, angle following and active power priority, are proposed in the paper. A comprehensive control system is designed to ensure the minimum fluctuation of each electrical quantity of islanded power grid and DC system at the time of switching. The PSCAD/EMTDC simulation model of VSC-HVDC transmission system is established. The simulation results verify the validity of the integrated controller and control strategy proposed in this paper. The continuous and reliable power supply can be realized when the isolated grid state changes.

Keywords: voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission system; isolated grid; control mode switching; angle following; active power priority

(编辑 方晶)

(上接第 20 页)

Review of power system reserve configuration and optimization for large-scale renewable energy integration

YANG Xiaohu^{1,2}, LUO Jianbo², YU Chen², XIE Dongliang², GE Rui³, FENG Changyou³

(1. School of NARI Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China)

Abstract: After the large-scale renewable energy is connected to the grid, the traditional reserve system has the problem of poor economy and reliability when dealing with the bilateral randomness of the power supply side and the load side of the power system. To ensure the safe and stable operation of the system, it is necessary to study the configuration and optimization methods of the system reserve. This paper expounds the impact of large-scale renewable energy grid-connected on power system reserve, fully explores various types of reserve resources of the system and expounds the three types of reserve resources of source, load and storage and their research status as cross-regional reserve of interconnected power grids, in order to deal with various long-term, large disturbance, large-capacity power shortage risk events faced by the system under large-scale renewable energy grid-connected environment. This paper analyzes in detail the various methods for configuring the reserve capacity of power systems, reserve dispatching optimization, and points out the research direction of the next stage, which provides reference for the research on the reserve configuration and optimization method of the power system in the context of large-scale renewable energy grid connection.

Keywords: renewable energy integration; power system; multiple reserve; reserve configuration; reserve optimization

(编辑 方晶)