

【编者按】直流输电技术因具有改善电力系统的运行性能、提高电力系统的可控性和灵活性等优点而得到了广泛的应用。目前,中国已有不少超/特高压直流输电、柔性直流输电、多端直流输电工程正在规划设计和建设中,有的已投入实际运行。因此,其运行特性和保护控制策略的研究、高压直流断路器和潮流控制器的研制正受到越来越多的关注。为此,本刊汇集了近期录用的 15 篇论文形成了“直流输电的控制与保护”专题,从控制策略设计、故障分析、保护方案、装置研发、参数优化等角度报道了这方面的最新研究进展。相信随着电力电子技术和相关学科的新发展,直流输电技术将具有更广阔的发展前景,也会带来更多新的研究课题,本刊期待广大专家、学者、工程技术人员更多的创新思维和成果!

适用于大规模风电并网的多端柔性直流输电系统控制策略

李程昊¹, 詹鹏¹, 文劲宇¹, 罗卫华², 高凯², 张忠林²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074;

2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁省沈阳市 110006)

摘要:提出了一种适用于区域大规模风电并网的六端柔性直流输电系统,设计了该系统的协调控制策略,即送端电压源型换流器(VSC)采用交流电压控制、受端 VSC 采用直流电压下垂控制。以直流网络损耗最小作为优化目标,计算了系统稳态运行点。通过在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建仿真算例,验证了所提出的系统控制策略可以自动跟踪风电功率波动并协调受端功率分配。通过设计系统启动和风电功率波动及交流侧故障和换流器停运的仿真算例,验证了该六端柔性直流输电系统具有良好的功率调控能力和运行灵活性。

关键词:风力发电;电压源型换流器;多端柔性直流输电;下垂控制

0 引言

近年来,风力发电在全球范围内高速发展^[1]。中国正在规划建设的 8 个千万千瓦级风电基地被称为“陆上三峡”^[2]。由于这些大型风电基地大多远离负荷中心,因此大部分的风电需要远距离外送。以甘肃酒泉千万千瓦级风电基地为例,现有的哈密—河西—兰州 750 kV 交流输电线路已远远不能满足数百万千瓦风电的外送需求,因此目前正在规划采用高压直流输电(HVDC)系统解决风电的大规模外送问题^[3]。

基于线电流换向变流器(LCC)的传统直流输电技术需要大量的无功补偿和较强的交流电网才能维持稳定运行^[4-5]。然而,酒泉等风电基地大多位于电网末端,网架结构比较薄弱,本地电网的同步发电和负荷容量较小,因此建设大容量的特高压直流输电系统可能会对电网造成严重的稳定性及调峰调频问题。文献^[6]提出在酒泉本地建设配套的火电机组

用于风电调峰和增强交流系统强度,但是新增大量火电机组可能会对当地脆弱的生态环境造成严重破坏。另一种解决方案是在送端换流站建设大容量的静止同步补偿器(STATCOM)为 LCC 提供交流换向电压^[7],而不与本地交流电网互联。但是这种方案的工程实用性还有待于进一步的验证。

基于电压源型换流器(VSC)的柔性直流输电系统(VSC-HVDC)能够与无源电网直接相连,所需无功补偿和换流站占地面积都相对较小,可以实现有功和无功功率的解耦控制,在新能源并网领域具有显著的技术优势^[8]。由于现有 VSC 的电压和功率等级还较低,一条点对点的 VSC-HVDC 难以满足一个区域内大量风电的输送需求,因此,将多个送端 VSC 和受端 VSC 在直流侧互联,构成一个多端直流输电系统(MTDC)能够获得更好的经济性和运行灵活性^[9]。欧洲在 2008 年提出了超级电网(Super Grid)计划,其核心就是构建基于 VSC-HVDC 技术的多端直流输电系统乃至直流电网来实现新能源发电的大规模并网和国家间电力交换^[10];中国在南澳岛和舟山群岛也规划了类似的 VSC-MTDC 系统用于海岛供电和海上风电并网^[11-12]。

相比于两端系统,VSC-MTDC 在运行灵活性

收稿日期:2014-07-17;修回日期:2014-08-05。

国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51261130484);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A112);国家电网公司科技项目(2013-304)。

增强的同时,其控制方法也变得相对复杂^[13-15]。文献[13]阐述了 VSC-MTDC 基于直流电压偏差的多点直流电压控制方法,但是其整流站的定功率控制策略难以适应风电功率的快速大范围波动。文献[14]提出了不需要快速检测和通信的风电场和换流器的自动协调控制,并通过构造三端 VSC-MTDC 系统,使用仿真和实验的方法验证了提出控制策略的有效性。但是,由于系统端数较少,无法验证整个系统的运行灵活性。文献[15]研究了一个用于海上风电并网的四端 VSC-MTDC 系统。通过设计陆上受端换流器的下垂控制,可以实现直流功率的自动分配,并讨论了稳态下直流功率的调节方法,但并未给出系统稳态运行点的确定方法。

本文提出了一种用于大规模风电并网的六端柔性直流输电系统的拓扑结构;设计了送端 VSC 的交流电压控制策略可以自动吸收波动的风电功率;设计了受端 VSC 的直流电压-电流下垂控制可以灵活调节直流功率的分配;提出了采用网损最小的优化目标确定系统稳态运行点和控制参数的方法;并通过仿真验证了控制策略的有效性和系统运行的灵活性。

1 系统结构及模型

本文提出的六端柔性直流输电系统的结构如图 1 所示,直流系统为双极性±200 kV,主要包括 3 个聚合的风电场(WF1—WF3),3 个送端换流站(VSC_S1—VSC_S3),若干直流线路(DC 线路)和 3 个受端换流站(VSC_R1—VSC_R3)连接交流电网(AC 电网 1—AC 电网 3)。

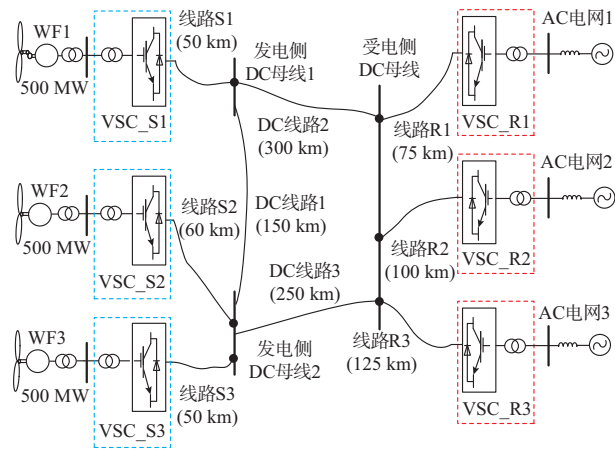


图 1 六端柔性直流输电系统结构

Fig.1 Configuration of a six-terminal VSC-HVDC system

图 1 中,WF 表示一定地理区域内的若干风电场,总容量为 500 MW,在仿真中用一台等值的双馈感应发电机(DFIG)风电机组建模。所有 6 个 VSC

均采用两电平三相桥式结构。直流输电线路采用集中参数模型,每条线路长度和连接方式见图 1。受端电网采用带内阻抗的交流电压源进行等效建模。风电场升压变压器变比为 35 kV/110 kV,送端换流变压器变比为 110 kV/235 kV,受端换流变压器变比为 110 kV/235 kV。

关于 DFIG 风电机组的建模和两电平 VSC 的模型在诸多文献中已有详细阐述^[16-17],本文不再赘述。

2 系统控制策略

2.1 系统总体控制思路

送端 VSC 应能够将波动的风电功率全部送入直流侧,并维持交流侧母线的电压频率基本恒定,以保证风电机组的稳定运行。为此,本文设计送端 VSC 的控制策略为定交流电压控制,即对交流侧呈现交流电压源的特性,能够自动吸收变化的功率,而不需要快速的风电功率检测和通信系统。

受端 VSC 的总体控制目标是维持直流系统的功率平衡和电压恒定,可以采用常见的定直流电压控制。本文在直流电压控制的基础上,引入了直流电压-电流下垂控制^[18-19],可以实现直流功率按照预定比例在不同受端 VSC 间分配。

2.2 送端换流器交流电压控制

由于电压源型换流器的同步旋转坐标变换($d-q$ 变换)和正弦脉宽调制(SPWM)已经被熟知,因此本文不再赘述。

送端 VSC 的控制框图如图 2 所示,以常见的电压外环电流内环的双闭环结构为基础,VSC_S 被控制为频率为恒定 50 Hz 的电压源。

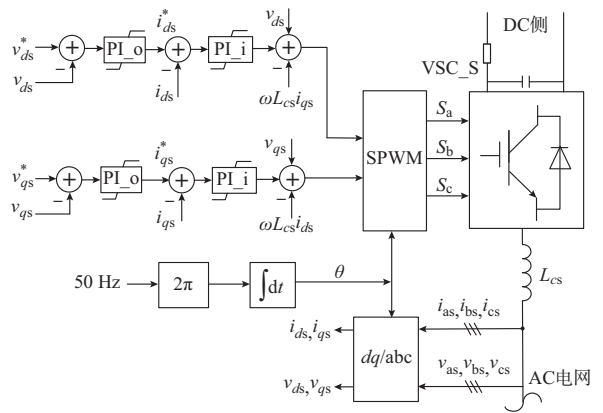


图 2 送端 VSC 交流电压控制框图

Fig.2 Control system of VSC_S to establish AC voltage

在电压外环,将同步选择坐标系的 d 轴定向于交流电压矢量,并将 d 轴电压参考值 v_{ds}^* 设置为额定值(1.0(标么值)),而令 $v_{qs}^* = 0$ 。经过比例-积分

(PI)调节器后,可以计算出内环电流控制的指令值。通过将交叉耦合项 $\omega L_c i_{qs}$ 和 $-\omega L_c i_{ds}$ 做前馈处理,可以实现 d - q 轴的解耦控制。其中 SPWM 的载波频率为 1 950 Hz。

可以看到,在图 2 所示的控制策略下,送端 VSC 可以自动吸收变动的功率,而不需要风电功率的快速检测系统及其与换流站间的快速通信系统。

2.3 受端换流器直流电压下垂控制

受端 VSC 的控制系统依然采用双闭环结构,如图 3 所示,其中 d 轴定向于交流侧电网电压矢量。

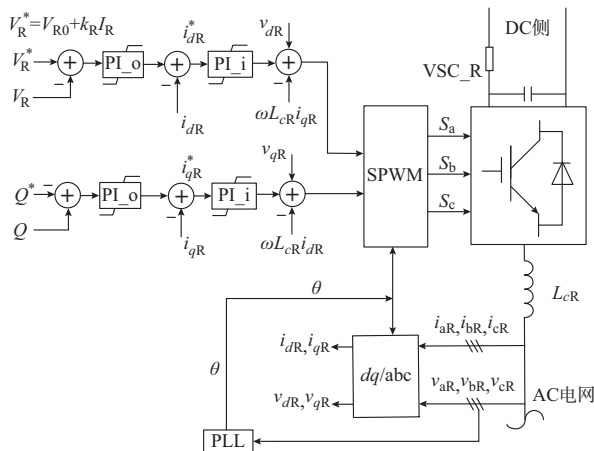


图 3 受端 VSC 直流电压下垂控制框图

Fig.3 DC voltage droop control system of the VSC_R

直流电压指令值由下式给出:

$$V_R^* = V_{R0} + k_R I_R \quad (1)$$

式中: V_{R0} 为直流电压; I_R 为零时的换流器空载直流电压; k_R 为下垂特性系数。

将直流电压指令值和测量值的偏差通过一个 PI 调节器,可以计算出 d 轴电流参考值 I_{dR}^* 用于调节 VSC 的有功功率;而 q 轴分量 I_{qR}^* 用于控制 VSC 输出的无功功率。该控制结构也是 VSC 常见的控制模式,具体可见文献[17],本文不再赘述。下面主要推导受端换流器间的功率分配关系与各自下垂系数的关系,作为下一节研究系统稳态运行点计算的基础。

假设每个受端换流器的直流电压都能快速跟踪其指令值,则三个受端 VSC 的直流电压为:

$$\begin{cases} V_{R1} = V_{R0} + k_{R1} I_{R1} \\ V_{R2} = V_{R0} + k_{R2} I_{R2} \\ V_{R3} = V_{R0} + k_{R3} I_{R3} \end{cases} \quad (2)$$

在本文中将三个受端 VSC 的直流线路连接在一个公共节点,如图 1 所示。于是三个换流器的直流电压满足关系:

$$V_{R1} + R_{R1} I_{R1} = V_{R2} + R_{R2} I_{R2} = V_{R3} + R_{R3} I_{R3} \quad (3)$$

式中: $R_{R1} \sim R_{R3}$ 为受端直流线路的电阻值。将式(2)代入式(3)可以得到:

$$k_{R1} I_{R1} + R_{R1} I_{R1} = k_{R2} I_{R2} + R_{R2} I_{R2} = k_{R3} I_{R3} + R_{R3} I_{R3} \quad (4)$$

于是可以得到受端 VSC 的直流电流的比值为:

$$I_{R1} : I_{R2} : I_{R3} = \frac{k_{R3} + R_{R3}}{k_{R1} + R_{R1}} : \frac{k_{R3} + R_{R3}}{k_{R2} + R_{R2}} : 1 \quad (5)$$

由于受端换流器的直流电压差别很小,因此直流功率的比值可以为:

$$P_{R1} : P_{R2} : P_{R3} = (V_{R1} I_{R1}) : (V_{R2} I_{R2}) : (V_{R3} I_{R3}) \approx I_{R1} : I_{R2} : I_{R3} = \frac{k_{R3} + R_{R3}}{k_{R1} + R_{R1}} : \frac{k_{R3} + R_{R3}}{k_{R2} + R_{R2}} : 1 \quad (6)$$

由式(6)可以看到,受端换流器间的功率比值只与线路电阻和下垂特性系数有关。因此,可以通过调节下垂系数改变受端功率分配,从而实现整个多端直流系统的稳态功率调节。

3 系统稳态运行点计算

对于一个多端直流输电系统,其稳态运行点是由换流器的注入功率及其直流侧电压决定的。各条线路的功率可以通过潮流计算得到。本文提出的六端系统,其送端 VSC 连接的风电场工作在最大功率捕获状态,即可认为注入直流系统的总功率是已知的。但系统中各节点电压和受端换流站的功率需要确定,这就是系统的稳态运行点确定问题。

六端系统的直流网络等效电路如图 4 所示。

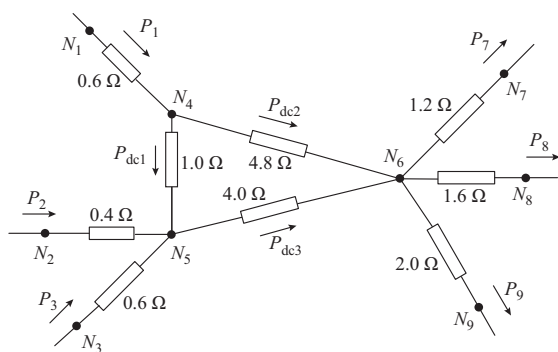


图 4 六端直流系统的稳态等效电路

Fig.4 Steady-state equivalent circuit of MTDC system

送端 VSC 分别为节点 N_1, N_2 和 N_3 , 线路连接的中间节点为 N_4, N_5 和 N_6 , 将这六个节点视为 P-型节点(类似交流潮流计算中的负荷节点)。受端 VSC 为节点 N_7, N_8 和 N_9 , 将其视为 V-型节点(类似交流潮流计算中的发电机节点)^[20]。于是可以确定系统的变量为: 状态变量 $\mathbf{X} = [V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6]^T$, 控制变量 $\mathbf{U} = [V_7, V_8, V_9]^T$, 已知常量 \mathbf{W}

$= [P_1, P_2, P_3]^T$ 。则该六端直流系统的潮流方程可以写为:

$$g_{P_i}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}) = P_{Gi} - \sum_{j=1}^6 V_i V_j Y_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

式中: P_{Gi} 为节点 i 的发电功率; V_i, V_j 分别为节点 i 和 j 的直流电压; Y_{ij} 为直流网络导纳矩阵中相应的元素。

本文以直流网络的损耗最小为优化目标来确定系统的稳态运行点。直流网损可以表达为:

$$f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) = - \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1, j \neq i}^9 (V_i - V_j)^2 Y_{ij} \quad (8)$$

约束条件为每个节点的直流电压保持在额定值 $\pm 5\%$ 的范围内:

$$h(\mathbf{X}, \mathbf{U}) : 0.95 \leq V_i \leq 1.05 \quad \forall i = 1, 2, \dots, 9 \quad (9)$$

于是确定直流系统运行点的问题就转化为直流网络损耗的最小值问题。通过 MATLAB 的 `fmincon` 函数对该最小值问题进行求解, 最优解的各节点电压和功率如表 1 所示。其中直流电压基准值 200 kV, 功率基准值 500 MW。

表 1 直流网损最小的潮流计算结果

Table 1 Optimization results of the DC power flow

节点	电压	功率	节点	电压	功率
N_1	1.049 0	1	N_6	1.028 3	0
N_2	1.049 4	1	N_7	1.023 7	-1.245 3
N_3	1.050 0	1	N_8	1.023 7	-0.933 9
N_4	1.047 2	0	N_9	1.023 7	-0.747 2
N_5	1.048 2	0			

各段直流线路的电阻值如图 4 所示。节点 $N_1 \sim N_6$ 作为功率节点, 其注入功率为已知量, 只需要计算其节点电压, 即 $N_1 \sim N_3$ 为负荷节点注入功率为 1, $N_4 \sim N_6$ 为中间节点注入功率为 0。 $N_7 \sim N_9$ 作为电压节点, 其节点电压是可控量, 需要计算注入功率。

根据上述计算结果, 三个受端换流站的功率之比为 1.66 : 1.25 : 1.00。于是, 根据式(6)可以计算出各受端换流站的下垂系数分别为: $k_{GS1} = 8.92$, $k_{GS2} = 12.46$, $k_{GS3} = 14.83$ 。

值得注意的是, 由于本文研究的六端直流系统的网络结构很简单, 系统稳态运行点也可以采用直接试凑的方法得到。对于更复杂直流网络, 本文提出的计算方法将更具有实际意义, 而且可以为换流站运行参数的选择提供依据。在实际工程运行中, 换流站功率往往需要接收调度指令, 本文提出的系统可以通过送端风电机组的桨距角调节和受端下垂系数的调整实现一定范围内的可调度能力。

4 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了图 1 所示系统的模型进行仿真实验。仿真系统的直流电压基准值为 200 kV, 功率基准值为 500 MVA。根据前文设计的下垂控制策略通过设置 $V_{R0} = 200$ kV, $k_{R1} = 8.92$, $k_{R2} = 12.46$, $k_{R3} = 14.83$, 则受端 VSC 的稳态功率分别为 637 MW : 480 MW : 384 MW = 1.66 : 1.25 : 1.00。

4.1 启动

初始时闭锁所有 VSC 的触发脉冲, 并断开交流侧断路器, 风电机组处于空载切除状态。

启动时首先闭合受端 VSC 交流断路器, 由于直流侧电压为零, 因此交流电网通过受端 VSC 的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)反并联二极管对直流系统充电。0.05 s 后, 直流电压上升至受端 VSC 交流线电压的 $2\sqrt{2}/3$; 0.2 s 时, 解锁受端 VSC 的控制系统, 其直流电压指令值和功率都逐渐上升至额定值, 如图 5(f)(h) 所示, 直流电压在控制下升高至 1.0 (标么值), 如图 5(c)(g) 所示。然后在 0.5 s 时解锁送端 VSC, 建立风电场的交流母线电压, 0.7 s 时闭合断路器将风电机组并入交流母线; 在额定风速 11.5 m/s 下, 风电机组输出功率按照斜坡上升的指令值达到额定值, 送端 VSC 的直流功率也随之上升至额定值, 如图 5(a)(b)(d) 所示。大约 1.7 s 后, 整个受端直流系统进入稳态运行。

需要指出的是, 实际直流系统和风电机组的启动过程持续时间很长。本文仿真结果是为了节省计算时间, 而提高了风电机组输出功率爬坡和直流系统充电的速率, 同时也是对系统控制能力和稳态运行的测试和验证。

4.2 交流侧故障

图 6 为受端电网出现短路故障时多端直流系统的响应。3.0 s 前系统保持稳态运行, 3.0 s 时受端电网 1 发生持续 100 ms 的瞬时三相短路故障, 如图 6(a) 所示。在故障持续期间, 功率无法送入故障电网 1, 即直流系统出现不平衡功率 ΔP_{R1} 。瞬间注入功率大于流出功率会造成直流电压上升^[18]。根据式(1), 在直流电压-电流下垂控制的作用下, 该不平衡的注入功率被另两个受端 VSC 通过增大直流电流而吸收, 从而使得直流电压能够重新回到额定电压附近, 如图 6(d) 所示。故障发生后的瞬时功率不平衡(如图 6(b)(c) 所示)造成直流电压出现短时的波动, 最高值达到 1.12(标么值), 如图 6(e)(f) 所示。在瞬时故障消失后, 受端电网 1 的功率迅速恢复到正常值, 整个多端系统也随之恢复稳态运行。

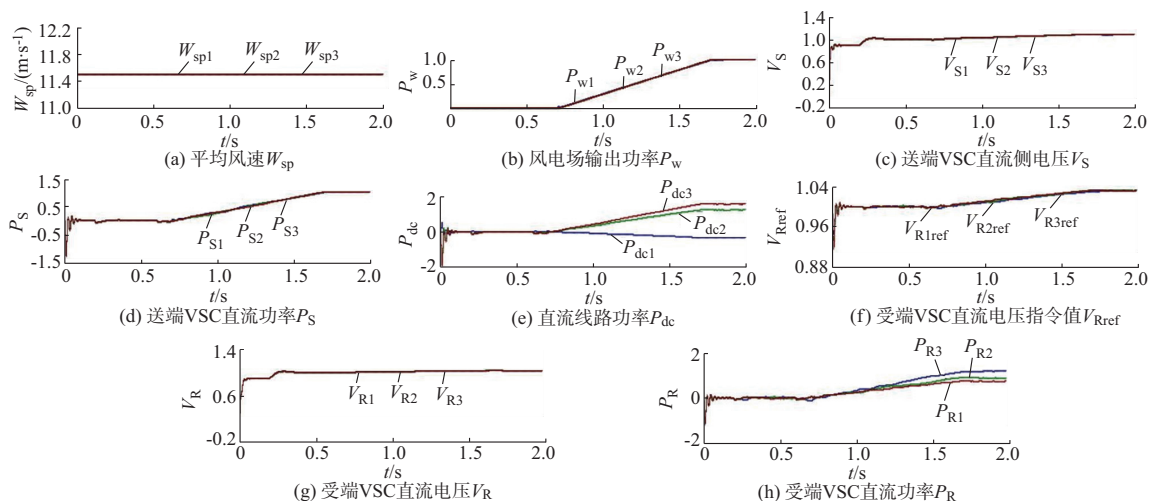


图5 系统启动仿真结果
Fig.5 Simulation results of system starting up

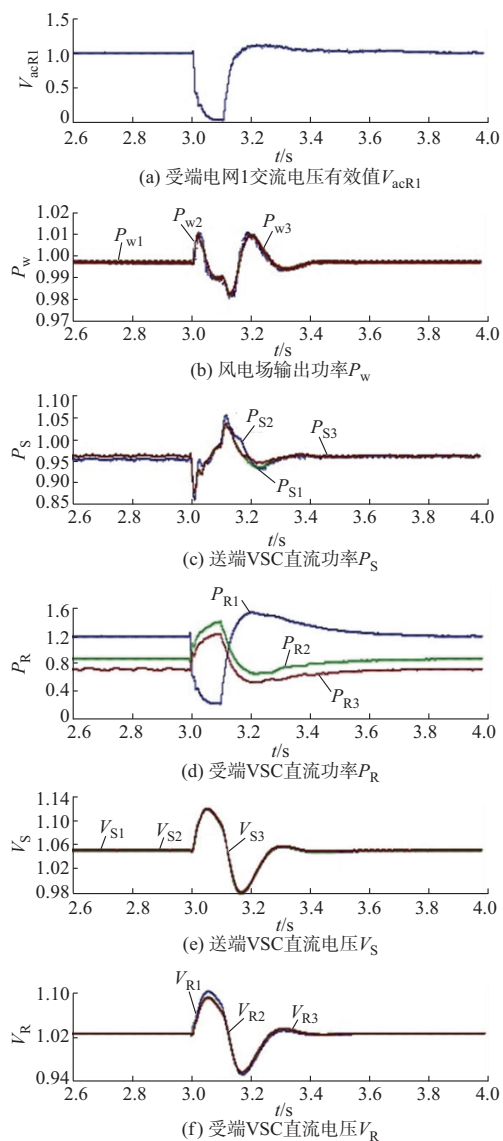


图6 受端电网1短路故障时仿真结果
Fig.6 Simulation results of SC fault at AC grid 1

4.3 换流站连续退出

图7是一个送端VSC和受端VSC连续退出运行时系统的仿真结果。8.0s时,连接风电场1的VSC突然退出运行,其直流功率迅速下降到零,如图7(b)所示。直流线路功率和受端VSC功率也随之下降,如图7(c)(d)所示,而直流电压可以保持稳定,如图7(e)(f)所示。11.0s时,连接受端电网3的VSC退出运行,不平衡的直流功率由受端VSC_R1和VSC_R2吸收,如图7(d)所示,而直流线路上功率基本保持不变,如图7(c)所示。

由仿真结果可以看到,当输送功率没有超过VSC的额定值时,多端直流输电系统可以进行灵活的运行调节,失去一个送端或一个受端VSC都不会造成整个系统停运,这也是多个VSC通过直流电压-电流下垂控制共同维持直流系统电压的技术优势。如果采用单个VSC控制系统直流电压,若电压控制站退出运行,必须将剩余的某个VSC切换至直流电压控制模式,否则整个系统必须全部停运^[21]。

5 结语

本文研究了基于电压源型换流器的柔性多端直流输电用于大规模风电并网的技术方案。重点研究了一个六端VSC-MTDC系统,介绍了系统的拓扑结构,设计了系统协调控制策略,阐述了直流电压下垂控制的原理,仿真研究了系统在启动、风电功率变化、某换流器交流侧故障和换流器连续退出运行等工况下的系统响应情况。仿真结果表明,该系统不仅可以在稳态下将大规模风电送往多个受端电网,而且具有良好的故障穿越能力和运行灵活性。

相比于现在常用的交流输电或者传统直流输电

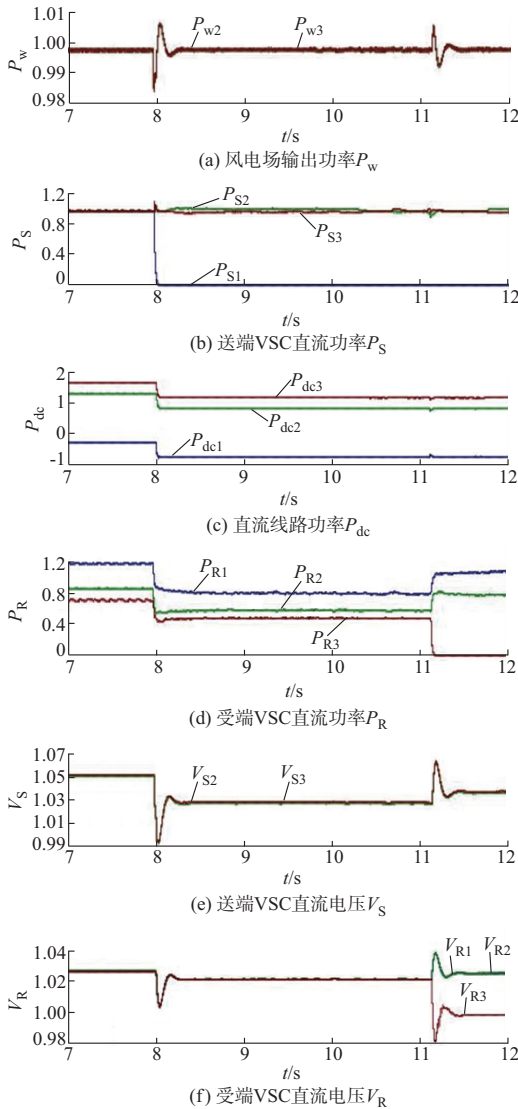


图7 换流站连续退出运行时仿真结果

Fig.7 Simulation results of successive drop of converter

并网方案,采用 VSC-MTDC 输送大规模风电可以避免很多稳定性问题而且具有良好的调控性能。随着新型电压源型换流器技术的快速发展和可关断器件、直流电缆制造水平的不断提高,多端柔性直流输电将在陆上和海上风电并网领域实现更多的工程应用。

参考文献

- [1] CHEN Zhe. Wind power in modern power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 2-13.
- [2] ZHANG J H, XU X K, FELTES J W. Development and planning of wind power in China[C]// Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, June 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 6p.
- [3] 汪宁渤,王建东,何世恩.酒泉风电跨区消纳模式及其外送方案[J].电力系统自动化,2011,35(22):82-89.

- WANG Ningbo, WANG Jiandong, HE Shien. Cross-border accommodation method and transmission scheme of Jiuquan wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 82-89.
- [4] 陈霞,林卫星,孙海顺,等.基于多端直流输电的风电并网技术[J].电工技术学报,2011,26(7):60-67.
CHEN Xia, LIN Weixing, SUN Haishun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67.
- [5] ZHAN Peng, LI Chenghao, WEN Jinyu, et al. Research on hybrid multi-terminal high-voltage DC technology for offshore wind farm integration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 34-41.
- [6] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等.甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J].中国电机工程学报,2010,30(10):1-7.
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, DING Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan Wind Power Base [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 1-7.
- [7] 林卫星,文劲宇,程时杰,等.一种将风电场和常规电厂捆绑并网的三端直流输电系统[J].中国电机工程学报,2012,32(28):16-26.
LIN Weixing, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. A three terminal HVDC system to bundle wind farms with conventional power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 16-26.
- [8] 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.
- [9] LIVEMORE L, LIANG Jun, EKANAAYAKE J. MTDC VSC technology and its applications for wind power [C]// Proceedings of the 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC'10), August 31-September 3, 2010, Cardiff, UK: 6p.
- [10] VRANA T K, FOSSO O B. Technical aspects of the North Sea super grid[J]. Electra, 2011, 11: 258.
- [11] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [12] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 1-15.
- [13] 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 based on multi-terminal HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 28-33.
- [14] LIANG Jun, JING Tianjun, GOMIS-BELLMUNT O. et al. Operation and control of multiterminal HVDC transmission for offshore wind farms[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2596-2604.

- [15] XU L, YAO L, BAZARGAN M. DC grid management of a multi-terminal HVDC transmission system for large offshore wind farms [C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN' 9), April 6-7, 2009, Nanjing, China: 7p.
- [16] 陈谦,唐国庆,胡铭.采用 $dq0$ 坐标的 VSC-HVDC 稳态模型与控制器设计[J].电力系统自动化,2004,28(16):61-66.
CHEN Qian, TANG Guoqing, HU Ming. Steady state model and controller design of a VSC-HVDC converter based on $dq0$ -axis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 61-66.
- [17] 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,2010.
- [18] 唐庚,徐政,刘昇,等.适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(15):125-132.
TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132.
- [19] XU L, YAO L. DC voltage control and power dispatch of a multi-terminal HVDC system for integrating large offshore wind farms [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(3): 223-233.
- [20] RODRIGUES S, PINTO R T, BAUER P, et al. Optimal power flow of VSC-based multi-terminal DC networks using genetic algorithm optimization [C]// Proceedings of the 4th Annual IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE' 12), September 15-20, 2012, Raleigh, NC, USA: 1453-1460.
- [21] 任敬国,李可军,刘合金,等.基于改进定有功功率控制特性的 VSC-MTDC 系统仿真[J].电力系统自动化,2013,37(15):133-139.
REN Jingguo, LI Kejun, LIU Hejin, et al. Coordinated control strategy of VSC-MTDC system based on improved DC voltage-active power characteristic [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 133-139.

李程昊(1988—),男,博士研究生,主要研究方向:多端直流输电系统控制、大规模风电并网。E-mail: chenghaoli.cn@gmail.com

詹鹏(1988—),男,硕士,主要研究方向:多端直流输电系统在风电并网中的应用。E-mail: zhanpeng_hust@163.com

文劲宇(1970—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制、储能与新能源并网、微电网与舰船电力系统。E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn

(编辑 丁琰)

A Multi-terminal VSC-HVDC System Control Strategy for Large Wind Farms Integration

LI Chenghao¹, ZHAN Peng¹, WEN Jinyu¹, LUO Weihua², GAO Kai², ZHANG Zhonglin²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Co. Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: A six-terminal voltage source converter (VSC) based HVDC (VSC-HVDC) system is proposed for connecting large wind farms to the main AC grid. A coordinated system control scheme is also presented, i. e., the sending side VSC is AC voltage controlled while the receiving side VSC is DC voltage droop controlled. It can ensure smooth system operation and proper power sharing among different receiving end grids. Simulation results using PSCAD/EMTDC demonstrate its satisfactory performance and flexible operation of the proposed VSC-HVDC system and control strategy under different conditions, including start-up, wind power variation, AC grid short circuit fault and large disturbances caused by the trip of one sending side VSC or one receiving side VSC.

This work is supported by the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (No. 51261130484), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A112) and State Grid Corporation of China (No. 2013-304).

Key words: wind power generation; voltage source converter (VSC); multi-terminal voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC) transmission; droop control