

远海风电场经 VSC-HVDC 联接弱受端系统的 临界运行特性

边晓燕¹, 杜中浩¹, 魏本刚², 李东东¹

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

Critical Operation Characteristics of Offshore Wind Farm Integrated to Weak Receiving Systems by VSC-HVDC

BIAN Xiaoyan¹, DU Zhonghao¹, WEI Bengang², LI Dongdong¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

摘 要: 基于电压源变流器型的高压直流输电 (VSC-HVDC) 是远海风电场的常用并网方式, 同时可用于联接弱受端系统, 但接入后的运行特性还有待研究。该文建立了远海风电场经 VSC-HVDC 联接弱受端系统模型, 基于安全稳定运行约束条件, 以短路比 (SCR) 作为受端系统强弱的判定指标, 充分考虑了双馈风机 (DFIG) 无功控制方式和受端系统阻抗角的影响, 得出不同风电场出力对应的临界短路比 (CSCR)。在 DigSILENT/PowerFactory 软件中进行风速波动小干扰和暂态稳定性仿真, 结果表明以双馈风机作为发电机模型联接的弱受端系统短路比大于 1.6 为宜, 并给出降低临界短路比的补偿措施, 对实际工程有一定的指导作用。

关键词: 远海风电场; 弱受端系统; 电压源变流器型高压直流输电; 双馈风机; 临界短路比

Abstract: Voltage source converter HVDC (VSC-HVDC) is a commonly used grid integration scheme for the offshore wind farm, and can be used to connect weak receiving systems. It is necessary to study the operation characteristics after integration. Therefore, the simulation models are established for the offshore wind farm integrated to weak receiving systems by VSC-HVDC. Based on the steady-state and stability security constrains, the paper considers the reactive power control scheme of the doubly fed wind induction generator (DFIG) and the influence of receiving systems impedance angle, and take the short circuit ratio (SCR) as the evaluation indicator of the receiving systems.

基金项目: 上海市科委科技创新项目 (16020501000); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”基金资助项目 (15SG50)

And the critical short circuit ratio (CSCR) is obtained based on the different wind farm output. Then the the static stability with wind speed fluctuations as the disturbance and transient stability are simulated on the platform of DigSILENT/PowerFactory. The results show that the SCR should be more than 1.6 when DFIG as the generator is integrated to weak receiving systems. At last, some compensation measures are given to reduce the CSCR, which can provide the guidance to actual projects.

Keywords: offshore wind farm; weak receiving systems; voltage source converter HVDC; doubly fed wind induction generator; critical short circuit ratio

0 引 言

近年来海上风电由于具有风速高且稳定、距离负荷区域近、节地环保等优势, 受到各国的广泛关注^[1]。按照“先近海、后远海”的风电发展原则, 结合近海风电资源开发趋于饱和的现状, 海上风电走向远海将是必然趋势^[2]。文献 [3] 指出风电场距离岸边超过 50km 即可被定义为远海风电场, 其通常选用双馈风机, 经电压源变流器型的高压直流输电 (VSC-HVDC) 并网。远距离输电时 VSC-HVDC 在技术和经济上都有一定的优势, 同时 VSC 变流器的自换相能力也使得向弱交流系统供电成为可能^[4]。

目前已有风电场经 VSC-HVDC 并网的实际工程, 如德国北海的 Bard Offshore 项目已于 2012 年投运, 2016 年上海也已规划了深远海风电场并入

崇明弱受端电网项目。然而，双馈风机作为发电装置可以联接受端系统的强弱程度以及接入后的运行特性还有待深入研究。

现有文献大多关注两个问题：① VSC-HVDC 联接弱受端系统的运行特性；② VSC 变流器控制方式的不断改进。关于问题 1，文献 [5-6] 以短路比 (SCR) 作为划分受端系统强弱的依据以及影响 VSC-HVDC 运行特性的技术指标且指出直流输电方式不能联接极弱交流系统。文献 [7] 从 VSC 接入弱受端系统的小扰动特性出发，指出接入低于临界短路比 (CSCR) 的极弱交流系统时，VSC 变流器无法运行在整流模式。文献 [8] 明确了临界运行特性为交流系统同时处于临界运行状态和额定工作状态。且当直流输电系统受端是极弱交流系统时，其中设备的切换会产生很高的动态过电压，受到干扰的时候，极易发生失稳，产生诸多问题。但以上文献只是给出了临界短路比的大致范围，没有给出具体的临界值。文献 [9] 考虑了 VSC 在两种控制方式下接入弱受端系统的潮流稳定范围，并得出对应的临界短路比。文献 [10] 采用图解法深度分析了受端系统强度对变流器稳定运行的影响，同时检验了变流器在不同控制方式下的暂态特性，但这些结论能否运用在工程中还有待考量。关于问题②，文献 [11-12] 指出 VSC 经典电流矢量控制不适用于受端系统很弱的工况，即 VSC 的 dq 轴无法解耦，无法维持稳定运行状态。文献 [13-14] 分别提出了改进电流矢量控制法和功率同步控制法，可在原来的基础上有更好的控制特性。上述文献都是采用传统发电机模型来讨论 VSC 控制，还没有以双馈风机经 VSC-HVDC 联接弱受端系统的相关文献。由于双馈风机与传统发电机在运行特性和控制方式上有很多不同，需要讨论双馈风机联接弱受端系统的临界运行特性。

本文首先在 DIgSILENT/PowerFactory 下建立了经 VSC-HVDC 的远海风电场联接弱受端系统模型，距海岸距离设为 60km，通过选取双馈风机和 VSC 变流器控制方式，基于安全稳定运行方程，提出不断降低短路比以到达临界值的方法，同时考虑了在实际工况中阻抗角的影响。最后仿真得到不同风电场出力下的等效电抗和临界短路比，采用风速波动小干扰和暂态稳定性对其检验，为远海风电场并网工程提供理论技术依据。

1 远海风电经 VSC-HVDC 联接弱受端系统的数学模型

1.1 远海风电场经 VSC-HVDC 联接弱受端系统结构

本节研究的结构模型包括变流站、变流变压器、直流滤波器和电容器等。VSC-HVDC 系统的变流站采用电压源变流器，分为风电场侧变流站 (WFVSC) 和电网侧变流站 (GSVSC)，其简化结构图如图 1 所示。

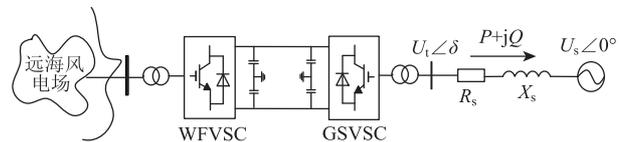


图 1 基于 VSC-HVDC 联接弱受端系统的风电场并网结构图
Fig. 1 The structure diagram of the weak receiving system connected with the wind farm based on VSC-HVDC

其中，弱受端系统采用理想电压源 U_s 与等效电阻 R_s 和等效电抗 X_s 的串联模型，以此来模拟弱受端系统的高阻抗特性； $U_t \angle \delta$ 为变流站和受端系统联接点处的电压 (δ 为 U_t 相对于 U_s 的功角差)； P 和 Q 分别表示 VSC 的有功和无功功率。

1.2 弱受端系统的特点

受端交流系统的强度直接关系到系统的稳定性，多数情况指对电压的支撑程度。判断指标通常用接入变流器的受端系统等值阻抗：其阻抗越小，系统结构的联系越紧密，电压波动越小，表明受端系统越强。

在模拟仿真时，常采用短路比表示系统的强弱，式(1)为其常用表达式：

$$S_{CR} = \frac{S_{ac}}{P_N} = \frac{U_N^2}{Z_s P_N} \quad (1)$$

式中： S_{ac} 为 VSC 的三相短路容量； P_N 为 VSC-HVDC 的额定传输功率； U_N 为直流母线的额定电压； Z_s 为受端系统的等效阻抗。

由于在理论计算中，交流线路的电阻相对于电抗可忽略，即当受端系统的等效阻抗角 $\varphi = 90^\circ$ 时，若取 U_N 为交流系统的基准电压， P_N 为额定直流功率的基准功率，再进一步将电抗标么化，可得到 S_{CR} 的简化表达式，如式(2)所示。

$$S_{CR} = \frac{1}{X_s/X_B} = \frac{1}{X_{s,pu}} \quad (2)$$

式中： X_B 为基准电抗； X_{s_pu} 为受端系统等值电抗标么值。

由(2)式可知，短路比 SCR 即为受端交流系统等值电抗标么值的倒数。从广义上说，将 $S_{CR} > 3$ 的系统定义为强交流系统， $S_{CR} < 2$ 定义为极弱交流系统^[15]。

文献 [10] 借用功率圆图，阐述了受端交流系统对变流器的影响。由图 2 可以看出，弱受端系统需要更大范围的无功功率调节能力才能使系统稳定。

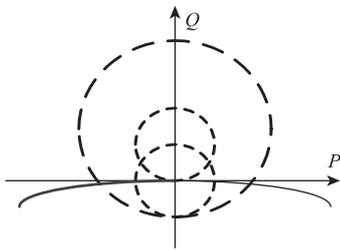


图 2 弱受端系统的 P-Q 圆图
Fig. 2 P-Q circle diagram of the weak receiving systems

1.3 双馈风机系统数学模型

图 3 为双馈风力发电系统 (DFIG)，和定速风机相比，其转子侧多加了一个背靠背的变流器控制，从而实现风机在不同风速下，和不同的转速下正常运行^[16]。

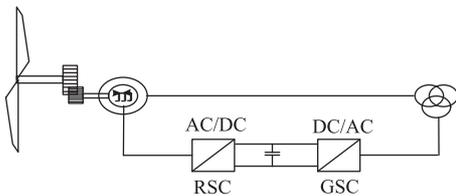


图 3 双馈风机示意图
Fig. 3 Schematic diagram of DFIG

RSC 和 GSC 的控制方式相似，都采用基于矢量的经典控制方式，本文通过控制定子磁链守恒来实现转子侧变流器的功率解耦，在 dq 轴坐标下定子侧的输出功率和定子磁链的关系式为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3u_s}{2L_s}L_m i_{qr} \\ Q_s = \frac{3u_s}{2L_s}(\psi_s - L_m i_{dr}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_s 和 Q_s 分别表示定子侧的有功和无功功率； u_s 为定子电压； ψ_s 为定子磁链； L_m 为激磁电抗； L_s 为定子自感； i_{dr} 和 i_{qr} 为转子的 dq 轴电流分量。

由式(3)可得，保持定子参数不变，通过控制 i_{dr} 和 i_{qr} 进而实现 DFIG 输出功率的解耦，其简化控制框图如图 4 所示。

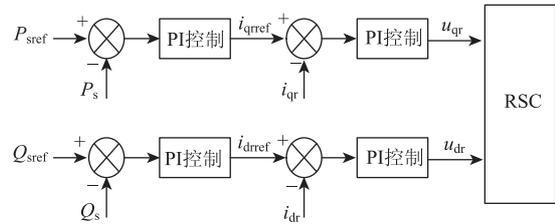


图 4 转子侧变流器控制框图
Fig. 4 Control schematic block diagram of RSC

GSC 采用电压矢量定向控制方法，其控制目标是保持直流系统电压和输出无功功率的恒定。即定义 d 轴方向与电网侧电压方向一致，即 $e_d = E$ ， $e_q = 0$ ， e_d 、 e_q 为 d 轴和 q 轴电势， E 为电网电压。则

$$\begin{cases} P_e = \frac{3}{2}e_d i_d \\ Q_e = -\frac{3}{2}e_d i_q \end{cases} \quad (4)$$

式中： P_e 和 Q_e 分别 GSC 输出的有功和无功功率，其简化控制框图如图 5 所示。

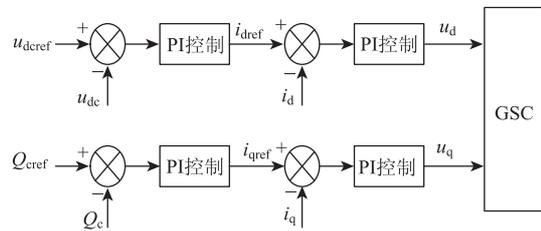


图 5 网侧变流器控制框图
Fig. 5 Control schematic block diagram of GSC

由此可知，RSC 和 GSC 均包含无功功率控制，使得 DFIG 的输出无功功率有限，相对于传统发电机，其并网后也会产生较大的无功缺额。结合在 1.2 小节中提到弱受端系统需要较大的无功调节范围，本文在不考虑系统无功缺额的情况下，对 VSC 控制和弱受端系统的临界运行特性进行研究。

2 VSC 联接弱受端系统的理论分析

2.1 VSC 采用定功率控制的稳定运行

在实际受端系统中，功率的频繁切换会产生损耗和系统不稳定的问题，结合双馈风机变流器控制，选用定功率控制方式使 VSC 的传输功率尽量

保证不变。本文使用 PWM 控制的电压源变流器，对 VSC-HVDC 岸上所输出的有功功率和无功功率实现独立解耦控制，其基础控制系统图如图 6 所示。

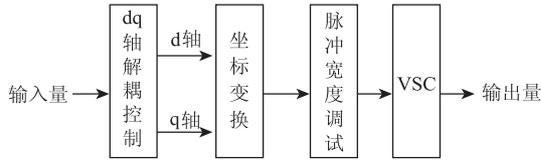


图 6 VSC-HVDC 的控制系统图

Fig. 6 Control system diagram of the VSC-HVDC system

为简化分析过程，首先以阻抗角 $\varphi=90^\circ$ 的理想情况为基础，其数学模型由式(5)、(6)表示：

$$P = \frac{U_s U_t}{X_s} \sin \delta \quad (5)$$

$$Q = \frac{U_t^2 - U_s U_t \cos \delta}{X_s} \quad (6)$$

由于 VSC 采用定有功无功的控制模型，即 VSC 的控制变量是 P 和 Q ，通过联立(7)和(8)可消除 δ ，可得到关于 U_t^2 的函数式：

$$(U_t^2)^2 - (2QX_s + U_s^2)U_t^2 + X_s^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (7)$$

为保证受端交流系统存在潮流实数解，需要满足下列条件：

$$\Delta = (2QX_s + U_s^2)^2 - 4X_s^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (8)$$

$$U_s^2 + 2QX_s \pm \sqrt{\Delta} \geq 0 \quad (9)$$

由此即可得出 U_t 的实数解为

$$U_t = \sqrt{\frac{U_s^2 + 2QX_s \pm \sqrt{\Delta}}{2}} \quad (10)$$

同时，为保证受端系统能够稳定运行并处于安全稳定运行区域，则需要满足稳定性约束条件(11)和安全约束条件(12)，即

$$\frac{dU_t}{dQ} = \frac{X_s \pm \frac{U_s X_s}{\sqrt{\Delta}}}{2U_s^2 + 4X_s Q + 4\sqrt{\Delta}} < 0 \quad (11)$$

$$U_{t,\min} \leq U_t \leq U_{t,\max} \quad (12)$$

式(11)为静态电压稳定运行判据，需满足小于零的限制条件，求出零点 $X_{s\max}=0$ ，需满足 $0 < X_s < X_{s\max}$ ，也就是 $S_{CR} > 1$ 时，VSC-HVDC 的并网才不会影响到受端系统的稳定性。

式(12)中的 $U_{t,\min}$ 通常取 0.95pu， $U_{t,\max}$ 取 1.05pu。

2.2 弱受端系统的临界短路比

VSC-HVDC 联接弱受端系统是由电压、有功

和无功判定其稳定运行点，计算临界短路比即视为不断减小 VSC 的短路比。由式(1)可看出，在保持额定电压一定的情况下，有两种降低 SCR 的方法。方法一是保持 VSC-HVDC 的传输功率不变，增大受端系统的等效阻抗，这也符合受端系统用户多，负荷大的特性；方法二是保证受端系统的等值阻抗一定，通过增加远海风电场的出力来提高 VSC-HVDC 的传输功率，这也符合远海风电机组发电的实际工况，在后文中会在仿真中验证两种方法下得到的临界短路比。

2.3 φ 对 CSCR 影响的计算值

本小节主要是在理论计算上，分析在理想工况和实际工况下的阻抗角对临界运行状态的影响，主要是观察有功和无功的参数变化^[17-18]。

当阻抗角 $\varphi=90^\circ$ 以及风机联接 VSC-HVDC 传输功率不变的理想工况下，联立与 S_{CR} 的关系式为

$$P = \frac{U_s U_t}{X_s} \sin \delta = S_{CR} \sin \delta \quad (13)$$

$$S_{CR} = \frac{3e_d i_d}{2 \sin \delta} \quad (14)$$

由于 $\sin \delta < 1$ ，则若在保证 VSC 处于额定工作状态，需要 $S_{CR} > 1.5$ 。

当阻抗角 $\varphi \neq 90^\circ$ ，即考虑阻抗角的非理想工况时，受端交流系统 P 和 Q 的函数式为

$$P = U_t^2 \frac{R_s}{|Z_s|^2} + \frac{U_t U_s}{|Z_s|} \sin(\delta + \varphi - 90^\circ) \quad (15)$$

$$Q = U_t^2 \frac{X_s}{|Z_s|^2} - \frac{U_t U_s}{|Z_s|} \cos(\delta + \varphi - 90^\circ) \quad (16)$$

由式(15)、(16)可知，VSC-HVDC 的最大传输功率 P_{\max} 和可提供的最大无功功率 Q_{\max} 分别为

$$P_{\max} = U_t^2 \frac{R_s}{|Z_s|^2} + \frac{U_t U_s}{|Z_s|} \quad (17)$$

$$Q_{\max} = U_t^2 \frac{X_s}{|Z_s|^2} \quad (18)$$

将最大值标么化，并结合电压降落公式：

$$U_s = U_t - \frac{PR_s + QX_s}{U_t} \quad (19)$$

$$U_{s,\text{pu}} = 1 - \cos \varphi - \sin \varphi \quad (20)$$

可得到 $P_{\max,\text{pu}}$ 、 $Q_{\max,\text{pu}}$ 与 S_{CR} 、 φ 相关的表达式(21)、(22)：

$$P_{\max,\text{pu}} = S_{CR} \left(\frac{U_s}{U_t} + U_t^2 \frac{R_s}{|Z_s|^2} \right) = S_{CR} (1 - \cos \varphi) \quad (21)$$

$$Q_{\max, pu} = S_{CR} \left(\frac{X_s}{|Z_s|} \right) = S_{CR} \sin\varphi \quad (22)$$

由此可得

① 取 $S_{CR}=2$ 时的广义临界短路比时, 在不同阻抗角的工况下所对应的最大传输功率 P_{\max} 和所需无功功率 Q_{\max} 的计算值见表 1。

由表中数据可知: 当无功充足时, VSC 传输的最大功率随着电阻的比重加大而减小。所以对于受端系统来说, 若提高 VSC 传输功率可以增大系统阻抗角。

② 实际工况中, 当变流器不能提供足够的无功功率时, 可通过加入无功补偿装置, 使 CSCR 达到理论值。

表 1 不同阻抗角下的最大传输功率与无功功率

Tab. 1 Maximum power and reactive power for the different impedance angles

$\Phi/(\circ)$	90	80	70	60	50
P_{\max}	2	1.633	1.326	1	0.714
Q_{\max}	2	1.970	1.897	1.732	1.532

3 VSC 联接弱受端系统的仿真分析

本文通过 DIgSILENT/Power Factory 软件搭建了远海风电场经 VSC-HVDC 联接弱受端系统的模型进行仿真, 模型的具体参数见表 2。根据 2.2 小节提出的降低 CSCR 的两种方法, 得出在不同情况下的 CSCR 和对应变量的关系图, 并通过观察风速波动和三相短路故障对并网(PCC)点电压的仿真结果, 得出结论。

表 2 模型参数

Tab. 2 The simulated system parameters

模型参数	数据值
风机/(MW/台)	5
海上母线电压/kV	35
传输线路电压/kV	150
联接方式	并联
直流输电线长/km	60
并网点电压/kV	380
理想电压源内电抗/ Ω	40
阻抗角/ (\circ)	90

3.1 不同风电场出力并网的临界短路比

本小节针对提出的方法, 以远海风电的接入为基础, 采用递增受端系统的等效电抗控制变量法,

以潮流计算存在实数解以及交流母线电压在稳定区域内波动为判断依据, 得出在不同风电场出力下对应的最大等效电抗和临界短路比见表 3 所示, 三者的图示变化情况如图 7。

表 3 不同风电出力情况下的最大传输功率和等效电抗及临界短路比

Tab. 3 Parameter change table maximum transferred power, equivalent reactance and CSCR under different wind power output

风电场功率/MW	最大传输功率/MW	等效电抗/ Ω	CSCR
100	80.8	600	2.97
90	71.2	790	2.57
80	61.7	1060	2.21
70	52.1	1460	1.90
60	42.6	2110	1.61
50	32.8	2530	1.74

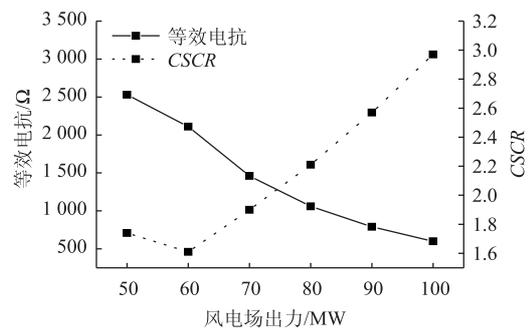


图 7 风电场出力参数变化图

Fig. 7 Variations of the equivalent reactance and CSCR under different wind power output

通过仿真的结果可以看出, 随着风电场出力的增多, CSCR 值也随之增大, 即可以接入的受端系统的强度也需要增强。其原因主要是风电场的参与会造成无功不足的情况, 导致无法达到系统所能承受的最小短路比。而当风电场出力较小时, 会出现母线过电压的情况, 影响到受端系统的稳定性。因此图 7 中风电场出力和 CSCR 存在极值点, 受端系统短路比最好大于 1.6。

在实际工程中, 可采取加串补电容、增加接地无功调相机和动态无功补偿装置来降低联接弱受端系统的最小临界短路比。

3.2 风速波动稳定性校验

风速波动是远海风电场运行过程中的普遍现象, 当初始风速 10 m/s 在 1s~2s 内下降到 7 m/s, 短路比分别取 1.5、1.6 和 1.7 时, PCC 点的电压

波动情况如图 8 所示。

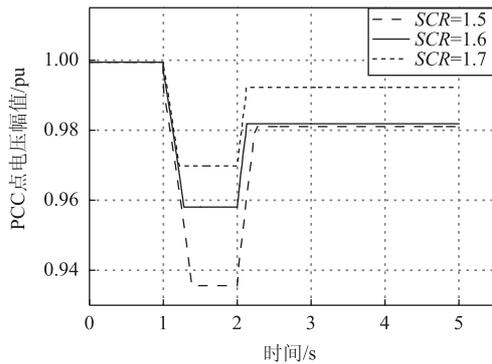


图 8 不同短路比下的并网点电压

Fig. 8 PCC voltage of different SCR

由图 8 可看出，受端系统的短路比相对较大时，电压的波动较小，稳定性较好。当受端系统很弱，如图中 $SCR = 1.5$ 时，电压降落已低于 0.95pu ，系统稳定性受风速波动的影响很大。

3.3 暂态稳定性校验

在整流变流器侧母线设置三相接地短路，并在 0.15s 后切除故障，不同短路比对应的 PCC 点母线的电压变化如图 9 所示。

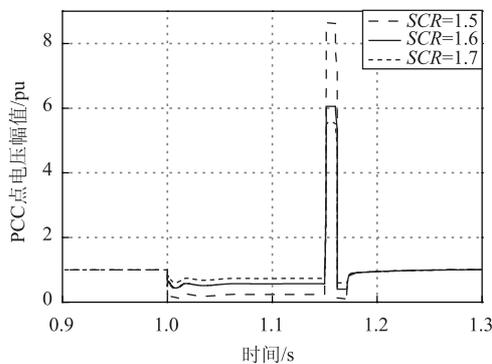


图 9 不同短路比下的母线电压

Fig. 9 Bus voltage curves under different SCRs

当受端系统 SCR 为 1.5 时，短路故障后的暂态电压过大，恢复到稳定状态经历了较大的电压波动，而越强的受端系统暂态稳定性相对越好。

4 结论与展望

本文建立了远海风电场经 VSC-HVDC 联接弱受端系统的结构模型，以变流器定功率控制方式为前提，理论上分析了降低短路比的方法和阻抗角的影响。并通过仿真得到不同风电场出力下的等效电

抗和临界短路比。具体如下：

① VSC-HVDC 不能稳定运行在 SCR 低于临界短路比的极弱受端系统，而且短路比越小，则联接的受端系统越弱，对系统的稳定性威胁越大。

② 考虑到远海风电场双馈风机和弱受端系统需要更强的无功调节能力，且由于无功不足无法达到 VSC-HVDC 可联接的受端系统的 $CSCR$ 理论值，同时考虑接入后的安全稳定运行判据，建议远海风电场经 VSC-HVDC 联接的弱受端系统的短路比要大于 1.6 。

③ 随着风电并网规模的增大，也会产生更大的无功缺额，使得系统不能提供充足的无功功率来满足弱受端系统的要求。在实际工况中，应采用无功补偿措施使该系统能够达到理论的临界短路比。

参 考 文 献

- [1] KAWAGUCHI T, SAKAZAKI T, ISOBE T, et al. Offshore wind farm configuration using diode rectifier with MERS in current link topology [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2930 - 2937.
- [2] 王仲颖, 赵勇强, 时璟丽. 中国中长期风电发展路线图 [J]. 中国能源, 2012, 34(3): 5 - 8.
WANG Zhongying, ZHAO Yongqiang, SHI Jingli. Medium and long term wind power development roadmap of China [J]. Energy of China, 2012, 34(3): 5 - 8.
- [3] 姜楠. 深海风力发电技术的发展现状与前景分析 [J]. 新能源进展, 2015(1): 21 - 24.
JIANG Nan. Status quo and analysis of the prospects of the wind power generation in deep sea [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015(1): 21 - 24.
- [4] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459 - 5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459 - 5466.
- [5] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287 - 2296.

- [6] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities. Part I: AC/DC system inter-action phenomena [R]. France: CIGRE, 1997.
- [7] 陈文翰, 顾益磊, 扶达鸿. VSC 连接弱交流电网的小扰动特性 [J]. 电力建设, 2015, 36(2): 74-79. CHEN Wenhan, GU Yilei, FU Dahong. Small disturbance characteristics analysis of VSC connecting to weak AC system [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(2): 74-79.
- [8] 王鹏飞, 张英敏, 陈虎, 等. 直流输电系统临界短路比的研究 [J]. 华东电力, 2011, 39(11): 1780-1783. WANG Pengfei, ZHANG Yingmin, CHEN Hu, et al. Critical short circuit ratio of DC transmission system [J]. East China Electric Power, 2011, 39(11): 1780-1783.
- [9] 刘昇, 徐政. 联于弱交流系统的 VSC-HVDC 稳定运行区域研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 133-144. LIU Sheng, XU Zheng. Study on stable operating region of VSC-HVDC connected to weak AC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 133-144.
- [10] 王姗姗, 周孝信, 汤广福. 交流电网强度对模块化多电平换流器 HVDC 运行特性的影响 [J]. 电网技术, 2011, 35(2): 17-24. WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu. Influence of AC system strength on operating characteristics of MMC-HVDC system [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 17-24.
- [11] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 783-793.
- [12] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power-synchronization control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 344-355.
- [13] EGEA A A, FEKRIAS S. Advanced vector control for voltage source converters connected to weak grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3074-3081.
- [14] 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.
- [15] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一: 直流输电的输送能力 [J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16. XU ZHENG. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems part 1: HVDC transmission capability [J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16.
- [16] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 98-104. YAN Gangui, WANG Maochun, MU Gang, et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 98-104.
- [17] ZHANG L D. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to weak AC systems [D]. Stockholm, Sweden: KTH, 2010.
- [18] 王银顺, 李潇潇, 张鑫. 基于临界短路比的 VSC-HVDC 接入弱交流系统的运行特性 [J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1106-1113. WANG Yinshun, LI Xiaoxiao, ZHANG Xin. Operation characteristics of VSC-HVDC links connected to weak AC systems based on critical SCR [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1106-1113.

收稿日期: 2018-02-12

作者简介:

边晓燕(1976—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、风力发电, E-mail: kuliz@163.com;

杜中浩(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海上风电场并网稳定性, E-mail: winddzh@qq.com。

(责任编辑: 林海文)