

海上风电 MMC-HVDC 联网系统控制策略

辛业春, 王威儒, 李国庆, 王朝斌, 江守其

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012)

摘 要: 该文提出提升海上风电场联网运行性能的高压柔性直流输电系统功率控制策略。采用附加频率控制保持风电机组机械功率和电磁功率的平衡, 定交流电压控制维持风电场交流侧电压幅值和相位恒定; 提出注入三次谐波调制信号的换流站功率运行区间优化方法, 有效防止风速突变引起风电机组输出功率超过额定值而导致的换流站闭锁事件, 并采用PR控制器对三次谐波调制信号所引起的高次谐波进行抑制。通过数字物理混合仿真系统, 构建8台双馈风电机组的风电场通过柔直联网的系统模型, 仿真结果表明设计的控制方法具有良好的动态、稳态特性。

关键词: 海上风电场; 柔性直流输电; 频率控制; 功率运行区间优化

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

0 引 言

海上风电联网困难^[1], 其电能汇集及远距离传送和联网, 是国内外研究的热点。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术是解决海上风电联网运行的有效途径^[2-4]。

文献[5~8]研究 MMC 的调制策略和电压平衡控制方法。文献[9]给出基于模块化多电平换流器的全直流型风电场配置方案。文献[10]研究风电交流汇集后通过传统直流输电联网的运行方法。文献[11]提出基于下垂控制的风电场构成多端直流输电系统控制方法。文献[12]提出串联直流拓扑的海上风电系统组网结构及其协调控制策略。文献[13]研究一种交直流并联运行的风电场联网方法, 通过风电场侧换流器进行交流电压-功角控制方法, 以实现对风电的输送。文献[14]设计基于虚拟磁链的直接功率控制(DPC)的风电场联网运行控制方法。文献[15]提出一种新型的多模块变压器耦合型 VSC 系统。采用柔性直流输电进行风电场联网, 需要防止风速突变引起系

统功率传输平衡受到破坏而导致的系统稳定问题^[16, 17]。

本文研究适用于风电场联网的换流站控制策略, 采用附加频率控制器, 使换流站传输功率实时跟踪风电场发出的功率。通过换流站运行功率区间优化, 提高系统稳定性。采用数字物理联合仿真的方式^[18-21]对所提出的系统和控制方法进行验证。

1 MMC 换流站与风力机组数学模型

1.1 MMC 换流站拓扑及数学模型

MMC 换流器拓扑结构如图 1 所示, 各相上下桥臂由 N 个子模块(sub module, SM)、电感 L 、等效电阻 R 串联组成, 通过对子模块投入和切除控制, 实现对交流电压的拟合, 各个子模块可以等效成可控电压源。

图 1 中, u_x 和 i_x 分别为交流侧的三相电压和电流($x \in [a, b, c]$), i_{px} 和 i_{nx} 分别为三相上、下桥臂电流, u_{px} 和 u_{nx} 分别为三相上、下桥臂子模块端口电压, U_{dc} 和 I_{dc} 分别为直流母线的电压和电流。

收稿日期: 2017-01-26

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900903); 国家自然科学基金(51607032)

通信作者: 辛业春(1982—), 男, 博士、副教授, 主要从事柔性直流输电技术、输变电设备运行状态监测与故障诊断技术等方面的研究。
xinyechun@163.com

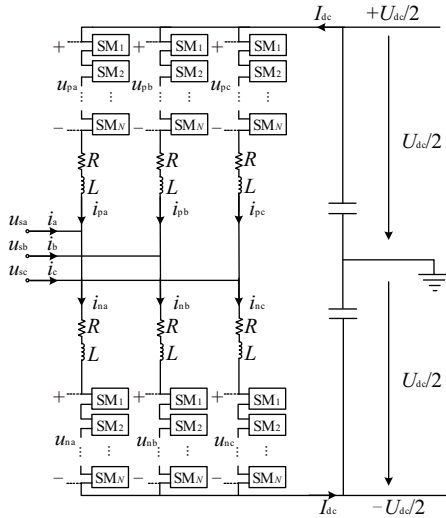


图1 MMC主电路拓扑结构图

Fig. 1 Main circuit of MMC topology structure

令:

$$u_x(t) = \frac{u_{nx}(t) - u_{px}(t)}{2} \quad (1)$$

则有:

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} + Ri_a(t) = u_{sa}(t) - u_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} + Ri_b(t) = u_{sb}(t) - u_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} + Ri_c(t) = u_{sc}(t) - u_c(t) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)进行 Park 矢量变换得出:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ \omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, i_d 、 i_q ——风电场侧换流站入口电流 i_x 在 d 、 q 轴的分量; u_{sd} 、 u_{sq} ——风电场侧换流站入口母线电压 u_{sx} 在 d 、 q 轴的分量; u_d 、 u_q ——换流站等效交流侧电压 u_x ($u_a \sim u_c$) 在 d 、 q 轴的分量; ω ——角频率。

在 d - q 坐标系下, 换流站传输的有功功率 P 和无功功率 Q 可表示为:

$$\begin{cases} P = 1.5(u_{sd}i_d + u_{sq}i_q) \\ Q = 1.5(u_{sq}i_d - u_{sd}i_q) \end{cases} \quad (4)$$

当 u_{sx} 经过锁相环(phase locked loop, PLL)对 d 轴的矢量定向后, u_{sq} 为 0, 即交流电压相量 \dot{u}_s 的相位 φ 为 0, 因此对 i_d 、 i_q 分别进行控制即可实现对有功功率和无功功率的解耦控制。忽略电阻, 从风电场流入换流站的电流为:

$$\dot{i} = \frac{\dot{u}_s - \dot{u}}{j\omega L} = \frac{u_{sd} - u_d}{j\omega L} - \frac{u_q}{\omega L} \quad (5)$$

将式(5)乘以 u_{sd} 即可得到有功功率 P 和无功功率 Q , 其表达式为:

$$\begin{cases} P = -\frac{u_{sd}u_q}{\omega L} \\ Q = \frac{u_{sd}}{\omega L}(u_{sd} - u_d) \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)可得出, 控制 MMC 交流侧电压 u_d 、 u_q 即可实现对有功功率和无功功率的控制。

1.2 风电机组数学模型

风能利用公式, 如式(7)所示:

$$P_w = 0.5\rho A_w C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (7)$$

式中, ρ ——空气密度; A_w ——风轮扫掠面积; v_w ——风速; C_p ——风能利用系数, 为叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数。在不同风速下, 最大风能利用系数近似为常量, 故风电机组最大输出功率与风速的立方近似为成正比关系。

本文对双馈式异步发电机(DFIG)的风电机组进行研究, 异步发电机的电磁转矩 T_{em} 为:

$$T_{em} = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (8)$$

式中, m_1 ——电压相数; s ——转差率; f_1 ——频率; p ——磁极对数; U_1 ——发电机机端电压; r_1 、 r_2' 和 x_1 、 x_2' ——异步发电机的定子、转子的等值电阻和电抗。

在发电机启动后, 进入稳态运行状态, 因 s 很小, 导致 r_2'/s 远大于 r_1 及 $x_1 + x_2'$, 因此 r_1 及 $x_1 + x_2'$ 可忽略, 可得:

$$T_{em} \approx \frac{m_1 p U_1^2 s}{2\pi f_1 r_2'} \quad (9)$$

异步发电机的电磁功率 P_{em} 为:

$$P_{em} = \frac{2\pi f_1 T_{em}}{p} \quad (10)$$

将风电场向换流站传输功率记为 P , 并将式(9)代入式(10), 不计定子铜耗, 可得:

$$P \approx P_{em} \approx \frac{m_1 p U_1^2 s}{r_2'} = \frac{m_1 p U_1^2}{r_2'} (1 - \frac{n_r}{n_1}) \quad (11)$$

式中, n_r ——风电机组转子转速; n_1 ——同步转速。

当风速改变时, n_r 将随之改变。由于风电场侧

换流站的控制, U_i 保持不变, 故当换流站传输功率 P 也保持不变时, 由式(11)可知, 同步转速 n_1 会发生一定的改变, 即换流器交流侧的电压电流 f_1 会发生改变。可对风电场频率进行控制, 进而控制换流站传输的功率, 使其传输功率大小与风电场输出功率大小相一致。

2 MMC 换流站控制策略设计

2.1 风电场侧换流站

风电场侧 MMC 换流器正常工作时, 需要传输海上风电场所发出的全部功率, 并且要使风电场侧交流电压幅值、相角和频率保持稳定。为简化控制系统的设计, 可以将换流站等值为平衡节点。

控制策略简化图如图 2 所示, 图中外环控制器采用了交流电压控制策略, 由于联结变压器的电感作用, 交流母线电压会随着风电场输送功率的变化而改变。采集风电场侧交流电压进行控制, 维持风电场侧交流母线上的电压幅值和相角恒定, 另附加了频率控制器, 以维持风电场侧电网频率, 并如上一节介绍, 频率控制器可以保证换流器功率大小与风电场输出功率大小相一致。图 2 中省略了内环控制的解耦环节, u_{w_abc} 为风电场三相交流电压, i_{w_abc} 为风电场三相交流电流, $u_{w_d}^*$ 为风电场交流电压 d 轴参考值, $u_{w_q}^*$ 为风电场交流电压 q 轴参考值, i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 轴和 q 轴的电流参考值。

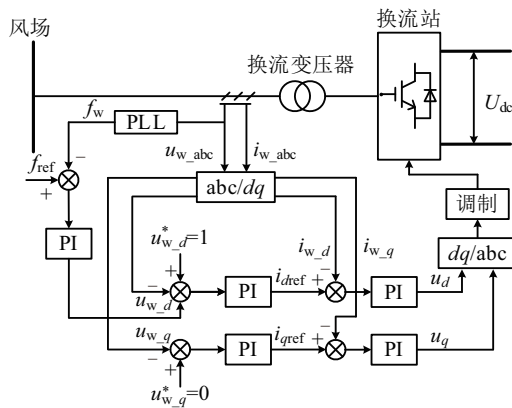


图2 风电场侧换流站控制策略

Fig. 2 control strategy of converter station at wind farm

2.2 电网侧换流站

MMC 电网侧换流站需要维持直流线路在传输

功率时的电压稳定, 网侧换流站采用定直流电压控制与定无功控制相结合的模式。控制策略结构图如图 3 所示。图 3 省略了内环控制的解耦环节, U_{dc} 为直流母线电压, U_{dc}^* 为直流母线电压参考值, Q^* 为电网传输无功功率参考值, u_{g_abc} 为电网三相交流电压, i_{g_abc} 为电网三相交流电流, i_d^* 是电压外环控制器输出的 d 轴电流参考值。

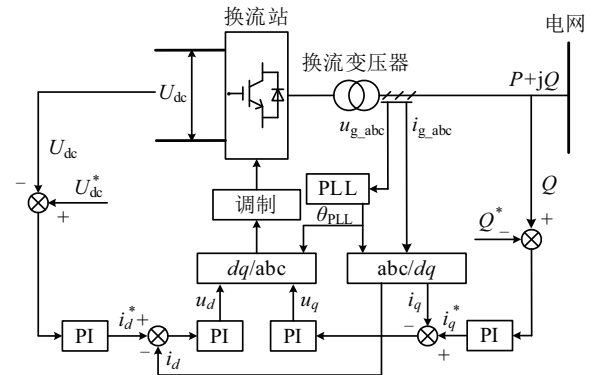


图3 电网侧换流站控制策略

Fig. 3 Control strategy of converter station at grid

3 MMC 换流站功率运行区间的优化

当风速低于额定风速时, DFIG 发出功率由最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 控制, 进行最大风能捕获; 当风速高于额定风速时, 其发出功率由桨距角控制限制在额定功率^[16, 17]。但桨距角控制启动过程较为缓慢, 在启动过程中, 换流站需传输全部有功功率, 此时系统仍为暂态过程, 换流站需大量的无功维持风电场交流电压恒定, 极易发生闭锁现象。故对功率运行区间优化有助于换流站顺利穿越此暂态过程。

换流站联接变压器一侧采用三角形接线方式, 三次谐波分量不会流到风电场侧或电网侧, 可对换流器注入三倍频调制信号, 以扩大换流器的调制裕度, 进而优化换流站的功率运行区间。注入 1/6 工频电压的三倍频调制信号, 与此对应的换流器输出电压峰值为 1.15 倍直流电压, 提高直流电压利用率和传输功率。

由瞬时功率理论可知, 三倍频电压注入后将导致瞬时功率变化以及子模块电容电压波动量的变化。但是所注入的三倍频电压远小于工频电压, 所以其对子模块电容电压波动量的影响可以忽略。

各相三倍频调制电压注入量为:

$$u_{3x} = \alpha U_{1x} \sin(3\omega t + 3\delta) \quad (12)$$

式中, α ——所注入的三倍频调制电压相对于基频电压的比例系数; δ ——基频电压相角; U_{1x} ——基频电压幅值。

以 a 相为例, a 相瞬时功率为:

$$p_a = \frac{U_{dc} I_{dc}}{3} - (u_{1a} + u_{3a}) i_a \quad (13)$$

将式(12)代入得:

$$p_a = \frac{U_{1a} I_a}{2} \cos(2\omega t + \delta - \varphi) - \frac{\alpha U_{1a} I_a}{2} \cos(2\omega t + 3\delta + \varphi) + \frac{\alpha U_{1a} I_a}{2} \cos(4\omega t + 3\delta + \varphi) \quad (14)$$

式中, φ ——基频电流相角。

由式(14)可看出三倍频调制电压注入后, 在 a 相产生了 2 次和 4 次谐波分量, 同理在 b、c 相同样会产生 2 次和 4 次谐波分量。

上述谐波分量存在于换流站交流侧, 同时也存在于换流器桥臂电流中, 可以通过上下桥臂电流相加得到, 可与桥臂二倍频环流一起, 在环流抑制机箱中对其进行抑制。关于桥臂二倍频环流的抑制方法, 文献[22~24]已有详细介绍, 此处不再赘述。本文采用陷波器除去环流中的 4 次谐波分量, 再将其与原环流做差, 从而得到环流 4 次谐波分量, 采用 PR 控制器, PR 控制器传递函数为:

$$F_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (15)$$

式中, K_p ——比例系数; K_r ——谐振系数; ω_0 ——谐振频率。

对 4 次谐波环流进行抑制框图如图 4 所示。图中 i_{zx4} 为所得到的 4 次谐波环流; i_{zx4_ref} 为 4 次谐波环流对应的参考值, 应选取为 0; u_{cc} 为 4 次谐波环流对应的参考电压补偿信号。

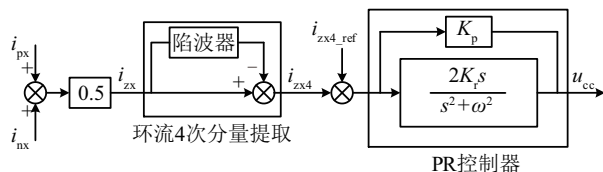


图 4 4 次谐波抑制器

Fig. 4 4th harmonic current suppressing controller

4 实验验证

表 1 为 2 kW MMC 柔性直流输电数字物理实验平台具体参数, 双端 MMC 换流站通过 Y/Δ 降压变压器接入交流系统, 实验平台如图 5 所示, 各个桥臂含有子模块数为 30 个, 阀基控制器采用最近电平逼近调制方法进行控制。

表 1 电路及实验参数

Table 1 Circuit and experimental parameters

电路参数	数值
额定直流母线电压 U_{dN}/V	± 200
额定直流母线电流 I_{dN}/A	5.0
各桥臂子模块数 N	30
子模块电容电压 U_c/V	13.3
子模块电容 $C/\mu F$	8800
桥臂电感 L/mH	16
交流侧线电压 U_{ab}/V	193
额定功率 P_N/kW	2
直流线路电感 L_d/mH	56
交流线路电阻 R/Ω	4.3
变压器变比 Y/Δ	380/193



a. 双端 MMC 主控平台



b. 实验测试平台



c. 模拟输电线路



d. 实时仿真器以及率放大器

图 5 双端 MMC 柔直输电数字物理平台

Fig. 5 Digital physical platform of double side flexible MMC-HVDC system

在上位机使用 Matlab/Simulink 搭建 8 台风电机组海上风电场模型, 通过 RT-LAB5600 实时仿真

器与四象限功率放大器连接,采用 ITM 功率接口算法通过电压、电流互感器与换流站连接。实验设备连接框图如图 6 所示。每台风电机组在风速为 7~12 m/s 时可实现最大风能捕获,当风速大于 12 m/s 时桨距角控制启动,维持风电机组功率不超过额定值。当 8 台风电机组工作在额定状态时输出的总功率为直流系统传输容量的 80%。

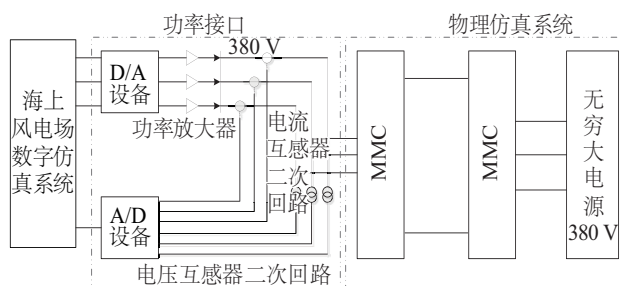


图6 海上风电场直流传输系统数字物理混合仿真框图

Fig. 6 Block diagram of digital-physical hybrid simulation of MMC-HVDC by offshore wind farm

4.1 实验验证 1

海上风电场正常运行,风速设定为 12 m/s 不变,发出额定功率,上述换流站各控制策略均投入使用。图 7 为通过上位机以及示波器采集的实验测试波形,其中图 7a 为上位机数字输出端口 a 相电压 u_a 和三相电流 i_x 的标幺值,图 7b 为功率接口输出端 a 相电压 u_a 和三相电流 i_x ,图 7c 为电容电压 u_c 波形,图 7d 为 a 相上下桥臂电流及环流 i_{pa} 、 i_{na} 、 i_{cir} 波形。实验表明,数字侧与物理侧运行良好,电压电流相位一致,满足数字侧与物理侧的比例关系,功率运行区间优化后,电容电压无较大波动,高次环流分量也被有效抑制。

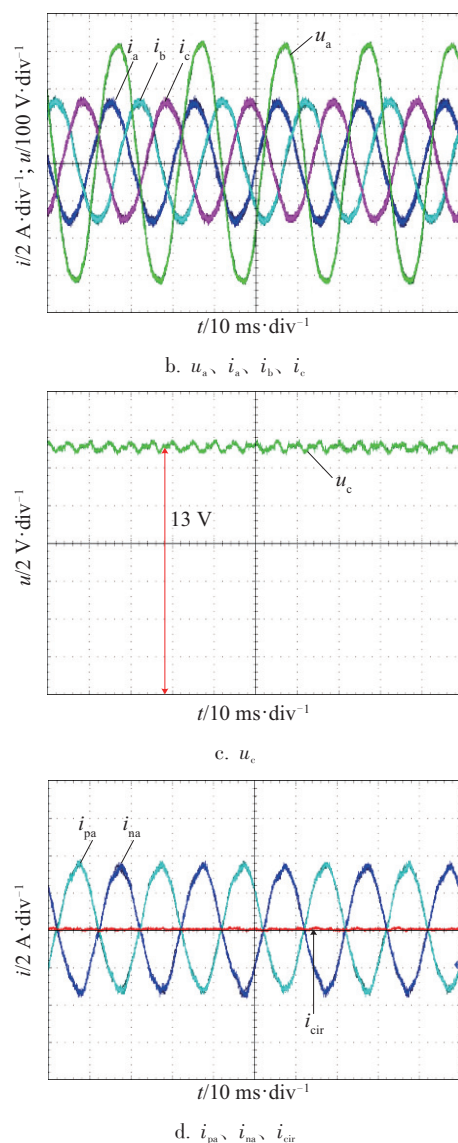
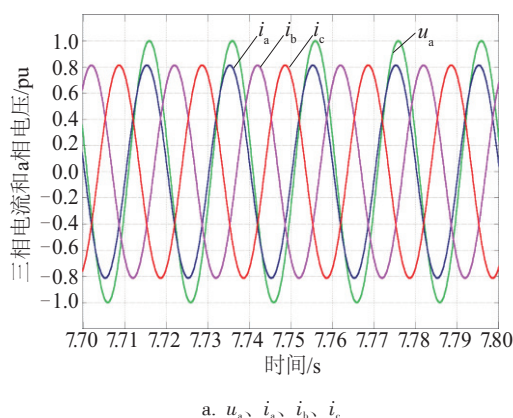


图7 系统连接及控制策略检验实验结果

Fig. 7 Experimental results of connection of system and test of control strategy

4.2 实验验证 2

风电场切机实验,风速为 12 m/s 恒定不变,8 台风电机组工作在额定状态,一段时间后切除 2 台风电机组,再过一段时间再切除 2 台风电机组。图 8 为直流电压电流波形,图 8 中 u_{dcw} 为风电场侧直流电压; u_{deg} 为电网侧直流电压; i_{dc} 为直流电流。实验表明,当风电机组退出运行时,直流电压有小幅下降(约 20 V),但很快能够恢复到参考电压值,直流电流随着风电场传输容量实时变动,保证风电场功率全部传输至电网。

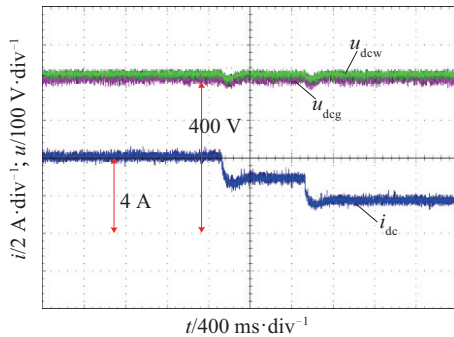


图8 风电场切机实验结果

Fig. 8 Experimental results of wind farm cutting machine

4.3 实验验证3

风速突变试验。风电场初始风速为 7 m/s, 突然增至 12 m/s, 一段时间后降至 11 m/s, 图 9a 为其直流电压电流波形。风电场初始风速为 11 m/s, 突然增至 13 m/s, 图 9b 为其直流电压电流波形。实验表明, 风速变化时, 直流电压有小幅波动, 但很快能够恢复到设定电压值, 直流电流随风速变化实时变动, 当风速超过 12 m/s 时, 在桨距角控制器完成启动用前, 风电机组输出功率短时超过额定值, 功率运行区间优化后, 可保证换流站顺利度过该暂态过程, 避免闭锁事故。

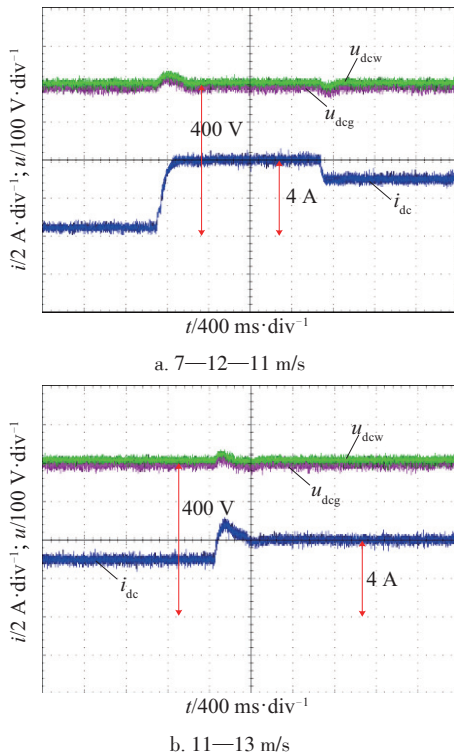


图9 风速突变实验结果

Fig. 9 Experimental results of wind speed changes abruptly

5 结 论

本文在 MMC 换流站以及风电机组的数学建模及分析的基础上, 提出一种适用于风电场侧换流站的控制策略, 采用交流电压控制使风电场侧交流电压幅值和相角恒定, 通过附加频率控制器, 使换流站传输功率实时跟踪风电场发出的功率。对两端换流站进行功率运行区间优化, 保证换流站顺利穿越桨距角控制器启动过程中的暂态过程, 避免闭锁事故, 并对因注入的三次谐波调制信号引起的高次谐波分量进行有效抑制。通过数字物理混合仿真, 进行风电场切机试验与风速突变试验, 验证了上述控制策略具有良好的动态、稳态特性。

[参考文献]

- [1] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77—81.
- [1] Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77—81.
- [2] Mao C N, Rudion K, Orth A, et al. Grid connection of offshore wind farm based DFIG with low frequency AC transmission system[C]. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting[C], San Diego, CA, USA, 2012.
- [3] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与传输方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459—5466.
- [3] Wang Xifan, Wei Xiaohui, Ning Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459—5466.
- [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): 592—602.
- [5] Pirouz H M, Bina M T, Kanzi K, et al. A new approach to the modulation and dc-link balancing strategy of modular multilevel AC/AC converters[A]. 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems, The 6th PEDS[C], Kuala Lumpur, Malaysia, 2005.
- [6] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平 VSC 子模

- 块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1—6.
- [6] Ding Guanjun, Tang Guangfu, Ding Ming, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1—6.
- [7] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48—52.
- [7] Guan Minyuan, Xu Zheng, Tu Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48—52.
- [8] Antonopoulos A, Angquist L, Nee H-P. On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter [A]. 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) [C], Barcelona Spain, 2009.
- [9] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036—2048.
- [9] Cai Xu, Shi Gang, Chi Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036—2048.
- [10] Li R, Bozhko S V, Asher G M. Grid frequency control for LCC HVDC link connected wind farms [A]. IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C], Taipei, Taiwan, 2007.
- [11] 王伟, 石新春, 付超, 等. 海上多端直流输电系统协调控制研究[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 8—15.
- [11] Wang Wei, Shi Xinchun, Fu Chao, et al. Coordinated control of multi-terminal HVDC transmission system for offshore wind farms [J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 8—15.
- [12] 李响, 韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 42—57.
- [12] Li Xiang, Han Minxiao. A coordinated control strategy of series multi-Terminal VSC-HVDC for offshore wind farm [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 42—57.
- [13] 范心明, 管霖, 夏成军, 等. 风电场交直流混合输电并网中 VSC-HVDC 的控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4781—4790.
- [13] Fan Xinming, Guan Lin, Xia Chengjun, et al. Control of VSC-HVDC in AC/DC hybrid transmission with wind farms integrated [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4781—4790.
- [14] 王国强, 王志新, 张华强, 等. 基于 DPC 的海上风场 VSC-HVDC 变流器控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 115—119.
- [14] Wang Guoqiang, Wang Zhixin, Zhang Huaqiang, et al. DPC-based control strategy of VSC-HVDC controller for offshore wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 115—119.
- [15] 王书征, 郑良广, 赵剑锋. 用于海上风电场并网的多模块变压器耦合型 VSC-HVDC 技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 101—106.
- [15] Wang Shuzheng, Zheng Liangguang, Zhao Jianfeng. VSC-HVDC technology of multi-module transformer for grid-connection of offshore wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 101—106.
- [16] 姚骏, 夏先锋, 陈西寅, 等. 风电并网用全功率变流器谐波电流抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 17—25.
- [16] Yao Jun, Xia Xianfeng, Chen Xiyin, et al. Harmonic currents suppression for full size power grid-connection converter used for wind power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 17—25.
- [17] 曾翔君, 张宏韬, 李迎, 等. 大功率直驱风电系统高效率变流器设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 15—21.
- [17] Zeng Xiangjun, Zhang Hongtao, Li Ying, et al. Design of high-efficiency converters for large direct-drive wind turbines [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 15—21.
- [18] 辛业春, 江守其, 李国庆, 等. 柔性直流输电系统数字物理混合仿真改进阻尼阻抗接口算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 90—97.
- [18] Xin Yechun, Jiang Shouqi, Li Guoqing, et al. Improved damping impedance interface algorithm if power hardware-in-the-loop simulation for flexible DC transmission systems [J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(21): 90—97.
- [19] 辛业春, 江守其, 李国庆, 等. 电力系统数字物理混合仿真接口算法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 159—167.
- [19] Xin Yechun, Jiang Shouqi, Li Guoqing, et al. Review on interface algorithms if power hardware-in-the-loop simulation for power systems [J]. Automation of Electric

- Power System, 2016, 40(15): 159—167.
- [20] 李国庆, 江守其, 辛业春, 等. 柔性高压直流输电系统数字物理混合 仿真功率接口及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1915—1924.
- [20] Li Guoqing, Jiang Shouqi, Xin Yechun, et al. A Novel interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for MMC- HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1915—1924.
- [21] 林楚乔, 江守其, 陈厚合. MMC-HVDC 数模混合仿真功率接口算法研究[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 1—6.
- [21] Lin Chuqiao, Jiang Shouqi, Chen Houhe. A improved interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for MMC- HVDC [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(2): 1—6.
- [22] 周月宾, 江道灼, 郭 捷, 等. 模块化多电平换流器子模块电容电压波动与内部环流分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 8—14.
- [22] Zhou Yuebin, Jiang Daozhao, Guo Jie, et al. Analysis of sub-module capacitor voltage ripples and circulating currents in modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 8—14.
- [23] 王鹏伍, 崔 翔. MMC-HVDC 三相解耦二次谐波环流抑制算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 47—52.
- [23] Wang Wupeng, Cui Xiang. Three phases decoupled second harmonic circulation current suppression algorithm for MMC- HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 47—52.
- [24] 李国庆, 辛业春, 吴学光. 模块化多电平换流器桥臂电流分析及其环流抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 62—67.
- [24] Li Guoqing, Xin Yechun, Wu Xueguang. Arm current analysis of modular multilevel converter and its circulating current suppressing method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 62—27.

CONTROL STRATEGY ON GRID CONNECTED OFFSHORE WIND FARM BASED ON MMC-HVDC

Xin Yechun, Wang Weiru, Li Guoqing, Wang Chaobin, Jiang Shouqi

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In this paper, the power control strategy of flexible HVDC transmission system is proposed to enhance the network operation performance of offshore wind farm. Using additional frequency control to maintain the balance of mechanical power and electromagnetic power of wind turbine, AC voltage control is used to maintain the amplitude and phase of wind farm voltage. The method of optimizing power operating range of the converter station by injecting the third harmonic modulation signal is proposed to effectively prevent the blocking event of the converter station caused by the wind turbine generator output power exceeding the rated value caused by the sudden change of wind speed, and then use the PR controller to suppress the high-order harmonics caused by the third harmonic modulation signal. Through the digital physics hybrid simulation system, the model of wind farm containing eight double-fed wind turbines that is connected with the grid by the flexible HVDC transmission system is built, and the simulation results show that the proposed control method has good dynamic and steady-state characteristics.

Keywords: offshore wind farm; flexible HVDC transmission; frequency control; power optimizing range optimization