

DOI: 10.7667/PSPC160628

基于改进的RMC-分散式小型风电场并网仿真研究

王银涛^{1,2}, 何山¹, 王维庆¹, 董新胜³, 张新燕¹, 季洁¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049; 2. 国网赤峰市供电公司, 内蒙古 赤峰 024000;
3. 新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 针对分散式小型风力发电场, 提出了一种改进的RMC(Reduced matrix converter)结构。其特点为: 永磁直驱风力发电机之间进行直流并联, 母线电压经过含高频变压器的DC-DC结构进行升压。采用直流并联, 减少了风力发电的随机性和波动性, 对电网电压、频率的影响较小; 而DC-DC升压结构代替换流站, 较适用于分散式小型风力场。为有效实现发电机的切、并网, 设计了对发电机输出电压瞬时采样, 来判断发电机整流器侧是否连接到直流母线的断路器模型。基于Matlab/Simulink仿真平台搭建了一组永磁直驱风力发电机、PWM整流器、断路器及含高频变压器的DC-DC仿真模型, 并进行了1或2台发电机在母线已并有2、5或8台发电机的情况下切、并直流母线与升压的仿真分析。结果表明, 在理想状态下, 该模型可以实现1或2台的风力发电机切、并直流母线与升压, 且7台运行时效果较好。

关键词: 永磁直驱风力发电机; PWM整流器; RMC; 直流母线; 直流升压

Simulation study of distributive small wind farms integration based on an improved RMC

WANG Yintao^{1,2}, HE Shan¹, WANG Weiqing¹, DONG Xinsheng³, ZHANG Xinyan¹, JI Jie¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, China;
2. Chifeng Power Supply Company of the State Grid, Chifeng 024000, China;
3. Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China)

Abstract: For the distributed small wind farms, an improved reduced matrix converter (RMC) structure is proposed. Its features are that the connection of directly-driven permanent synchronous generators (PMSG) are DC parallel and DC-DC structure with high frequency transformer is used to rise the DC bus voltage. The use of DC parallel reduces the randomness and volatility of wind power and has the smaller impact on the power grid voltage and the frequency. While the DC-DC boost structure replaces converter station, it is more suitable for distributed small wind farm. To effectively implement the generators to separate or parallel power grid, this paper designs the instantaneous sampling of the wind generator voltage to judge whether it is connected to the DC bus. The simulation models of a set of PMSG, PWM rectifier, circuit breaker and DC-DC with high frequency transformer are established based on Matlab/Simulink simulation platform. The simulation analyses that 1 or 2 generators separate or parallel DC bus and voltage boost in the case of the bus having 2, 5 or 8 generators are carried out. The simulation results show that the proposed model can achieve 1 or 2 wind generators to separate or parallel DC bus and voltage boost under ideal conditions, and it has a better effect when 7 generators run.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51667020 and No. 51367015) and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20136501120003).

Key words: PMSG; PWM rectifier; RMC; DC bus; DC boost

0 引言

中国风资源丰富, 风能作为一种可再生清洁能源, 在常规能源日趋枯竭的情况下, 在未来必将取

代传统能源, 在能源结构和环保方面起非常关键的作用。目前, 国内主要使用的风力发电机有双馈和直驱永磁发电机, 而直驱机较双馈机具有变速运行、变桨距调节、低转速、高效率和高功率因数等优点^[1-2], 已经成为当今风力发电机研发的热点。

风力发电一般采用交流式并入电网^[3-5], 但当大规模风力发电并网时, 由于风电的随机性和波动性, 将对电网电压、功率以及频率造成较大影响, 并注

基金项目: 国家自然科学基金项目(51667020, 51367015);
高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题
(20136501120003)

入大量谐波。

国内外为降低风力发电的随机性和波动性对电网电压、频率等的影响，提出了 VSC-HVDC、MMC-HVDC 和 RMC-HVDC 的直流输电结构。其中 VSC-HVDC 和 MMC-HVDC 适用于大规模风力发电，即风力发电机通过变压器升压汇总到交流母线上，再到换流站进行整流，之后进行较远的直流传输，到网侧换流站进行逆变，并入交流电网，其优点是功率的损耗较小，传输距离较远^[6-8]。而 RMC-HVDC 的直流输电结构中，RMC 换流器是将单台风力发电机输出的三相交流电变换成高压直流电。不仅降低了建设换流站所需的投资成本和占地面积，又大大减少了因转换环节多而带来的能量损耗，较适用于分散式小型风电场^[9-10]。

本文根据 RMC 特点，提出了一种改进的结构。其特点为：1.5 MW 永磁直驱风力发电机之间采用直流并联，直流母线电压经过含高频变压器的 DC-DC 升压结构进行直流升压。并在 Matlab/Simulink 仿真平台上，进行了 1 或 2 台发电机，在母线已并有 2、5 或 8 台发电机的情况下，切、并直流母线与升压的仿真分析。表 1 为 1.5 MW 直驱永磁发电机的基本参数。

表 1 直驱永磁风力发电机基本参数

Table 1 Basic parameter of PMSG

额定功率/MW	额定电压/V	极数	相数	额定转速/(r/min)
1.5	690	88	3	17.3

1 改进 RMC-分散式风电场数学模型

1.1 系统结构框图

提出的基于改进 RMC-分散式风电场仿真系统，主要包括永磁直驱风力发电机组、整流器和含高频变压器的 DC-DC 升压结构，如图 1 所示。把距离较近的直驱永磁风力发电机作为一组，并对发电机输出电压进行测量，当符合条件时 PWM 整流器的直流端并入直流母线，并且通过 DC-DC 升压结构实现直流升压。

此结构的优点：

(1) 风力发电机交流转换成直流进行并联，解决了风力发电机交-直-交后恒频的问题，简单易行。

(2) 断路器判断系统，通过对直驱永磁发电机的输出电压进行有效值采集，当电压有效值符合断路器闭合条件时，断路器闭合，反之，断路器则自动断开，此系统不但缩短电压稳定的时间，而且促使系统尽快稳定。

(3) DC-DC 升压组相对于换流站而言虽然输电距离较短，但是造价低，比较适用于分散式小型风

力发电场短距离直流输电。

(4) 相对于传统的 RMC，其在升压之前进行直流并联，减少了 RMC 中 DC-DC 环节的使用量。

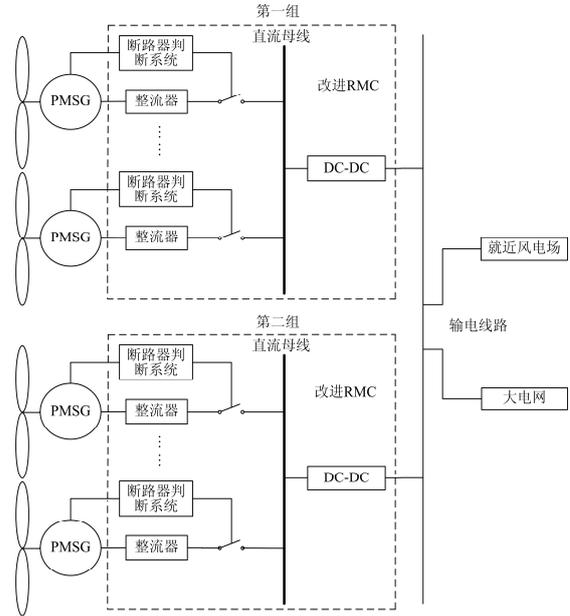


图 1 基于改进的 RMC-分散式小型风电场结构图

Fig. 1 Schematic diagram of distributive small wind farms integration based on an improved RMC

1.2 RMC 整流器控制策略

PWM 整流器主要目标：控制变转速的风力机输出恒定的直流电压。因此，要实现恒定的直流电压，就必须及时调整风力机的转速，使其始终运行在最佳叶尖速比。

为了方便分析问题，本文假设如下条件：首先，忽略电容、电感的饱和，认为其是理想元件，忽略器件的损耗。其次，整流器 IGBT 的开关频率远远大于交流电网的频率^[11]。风力发电机三相整流器拓扑如图 2 所示。

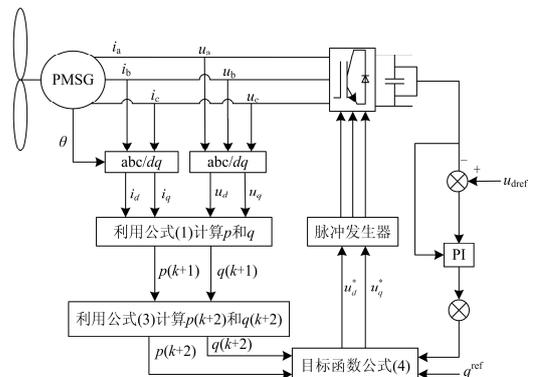


图 2 三相整流器控制系统拓扑图

Fig. 2 Topological diagram of control system of three-phase PWM rectifier

图 2 中, RMC 整流器控制系统采用的是模型预测直接功率控制策略。将 d 轴定于转子永磁体的磁链方向上, 经过 abc/dq 坐标变换之后得到 i_d 、 i_q 、 u_d 和 u_q 。

通过采用瞬时功率理论的实时控制, 间接地控制风机输出电流, 有功功率 p 、无功功率 q :

$$\begin{cases} p = u_d \times i_d + u_q \times i_q \\ q = u_q \times i_d - u_d \times i_q \end{cases} \quad (1)$$

设有功、无功功率变化量分别为

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{3}{2} [u^2 - \text{Re}(u_r \times u)] - p - \omega q \\ \frac{dq}{dt} = -\frac{3}{2} \text{Im}(u_r \times u) - q + \omega p \end{cases} \quad (2)$$

下一个控制周期的预测值为

$$\begin{cases} p(k+2) = p(k+1) + \frac{dp}{dt} \\ q(k+2) = q(k+1) + \frac{dq}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

传统数字控制系统中具有延时误差。此控制系统具有一步延时, 也就是说第 k 次得到的电压矢量直到第 $k+2$ 次才能被应用。为了消除这种延时所产生的误差, 目标函数中的瞬时功率应该使用第 $k+2$ 次得到的数值, 即需要两步预测^[12]。

预测直接功率控制根据功率变化进行判断, 以指标函数最小为准则, 使系统功率跟踪其给定值。所选目标函数如公式(4)所示。

$$F = [S^* - S(k+1)]^2 = (p^* - p(k+1))^2 + (q^* - q(k+1))^2 \quad (4)$$

这种控制策略不仅实现了交流侧电流正弦化和单位功率因数, 而且还获得了更好的稳态性能和更快的动态响应速度^[13-14]。

1.3 RMC 中 DC-DC 升压模型

DC-DC 升压结构由 DC-AC 模块、高频变压器和全桥整流器构成, 如图 3 所示。

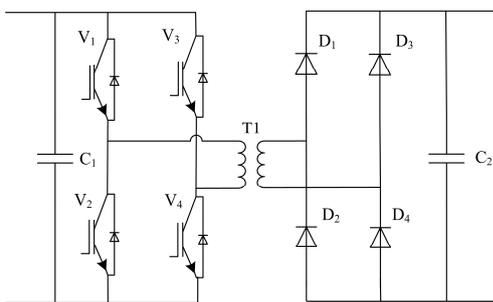


图 3 DC-DC 拓扑结构图

Fig. 3 Schematic diagram of DC-DC

相对于传统 RMC, 此结构减少了能量转换和开关数量。DC-AC 模块是将汇总母线的直流电压转换成高频交流电压, 而高频变压器起到提升电压等级、电气隔离的作用。高频变压器产生的高频脉冲电, 大大降低了变压器、滤波器等元件的体积和重量, 再由二极管全桥整流器将变压器输出的高频脉冲电转换成高压直流电。

1.4 断路器的动作判据

根据风速-电压曲线图(图 4)可知, 风机在风速 3 m/s 时开始输出电压, 在电压达到 0.465 kV(风速 6 m/s)时, 达到并入直流母线条件, 且当达到 0.76 kV(风速 25 m/s)时, 为了保护设备必须把风机切除。

由于风力发电机的整流器并联到直流母线上, 直流电压恒定, 当风速不符合并网条件时, 无法有效、快速地将风力发电机从母线上切除, 因此本文设计了对风力发电机输出电压进行瞬时采集作为动作判据的模型, 根据条件对断路器发出闭合或者断开的信号。本文假定风力发电机输出的三相电压值相同, 故只采集单相的电压瞬时值, 系统采样时间 t 为 0.0001 s, 并假定在每个采样区间 $[t_1, t_2]$, 风力发电机输出正弦电压信号, 其电压采样 U 的公式为

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_{t_1}^{t_2} \sin(2\pi ft) dx \right)} \quad (5)$$

断路器闭合和断开信号的判断公式为

$$S_n = \begin{cases} 1 & 0.465 < U < 0.76 \\ 0 & U < 0.465, U > 0.76 \end{cases} \quad (6)$$

即当断路器 S_n 信号为 1 时, 断路器闭合, 风力发电机并入直流母线; 而当断路器信号为 0 时, 风力发电机从直流母线上切除。

为了降低由于整流器输出电压过低时并网, 或者由于短暂风速变化, 造成单机间歇性切、并网, 进而引起母线电压波动的情况, 对断路器的动作时间设计了一个延迟, 时间为 0.002 s。

1.5 风力发电机风速-电压曲线

由风力发电机公式为

$$\begin{cases} n = \frac{60f}{p} \\ U = 4.44 N f \phi \\ \lambda = \frac{\omega R}{v} \end{cases} \quad (7)$$

式中: n 为风力发电机转速; f 为频率; p 为极对数 N 为匝数; ϕ 为磁通; λ 为叶尖速比; R 为叶尖半径; w 为角速度; v 为风速。

可得到风力发电机输出端电压为

$$U = \frac{4.44N\phi p\lambda v}{120\pi R} \quad (8)$$

而风力发电机捕获的风能为^[15-16]

$$P = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (9)$$

式中： $C_p(\beta, \lambda)$ 为风能利用系数，是桨距角 β 和叶尖速比 λ 的函数； ρ 为空气密度。

通过式(8)、式(9)对比：

$$\frac{U}{P} = \frac{4.44N\phi\lambda}{60\pi^2 R^3 C_p(\beta, \lambda) v^3} \quad (10)$$

当风力发电机桨距角 β 一定时，通过式(10)对比，由风力发电机最优功率曲线可得到风力发电机的风速-电压曲线如图4。

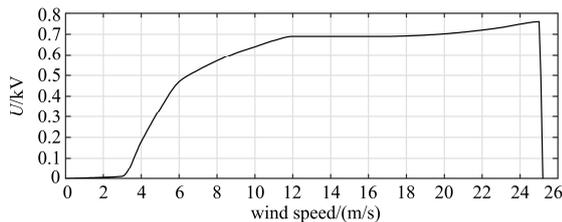


图4 风力发电机的风速-电压曲线

Fig. 4 Wind speed/voltage curve of wind generator

2 系统仿真及分析

本文在 Matlab/Simulink 中搭建了一组永磁风力发电机组、整流器、断路器和升压组模型，针对1台或2台的永磁直驱风力发电机，在母线已并有2、5或8台发电机的情况下，切、并网时，母线电压和 DC-DC 模块电压的波动情况进行仿真。系统主要参数如表2所示。

表2 仿真系统主要参数

Table 2 Main parameters of simulation system

设备名称	技术参数
风力发电机	额定风速 12 m/s, 额定功率 1.5 MW, 额定电压 0.69 kV, 风速-电压曲线见图4
整流器	直流电容值 4500 μ F, 直流电压稳定值 1.8 kV
DC-DC 组	电感值 300 mH, 电容值 3000 μ F, 直流电压稳定值 25 kV, 高频变压器额定工作频率 10 kHz

通过 Simulink 仿真得到，一台永磁直驱风力发电机，在母线已并有2、5或8台发电机的情况下，切、并网时，母线电压输出结果如图5所示，DC-DC 模块电压输出如图6所示。

由图5可知，随着已并网风力发电机台数的增多，单机并网时，其引起母线的电压波动逐渐减少，从 $\pm 0.83\%$ 降低到 $-0.56\% \sim -0.44\%$ ；切网电压波动从 -0.94% 降低到 -0.44% 。由图6可得同样结论，单机并网时，引起 DC-DC 输出电压波动降低，从1%

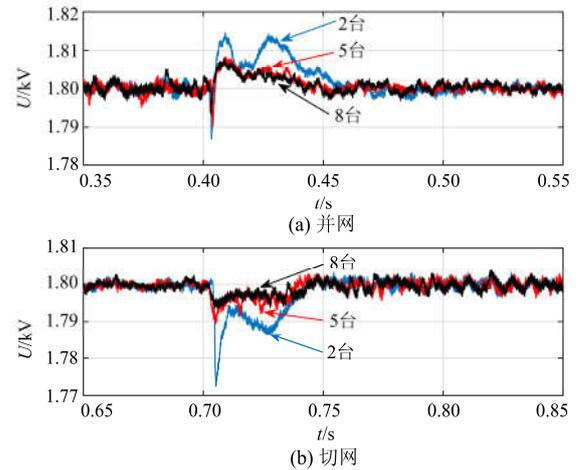


图5 单机切、并网母线电压输出曲线

Fig. 5 Voltage output curve of single generator in separate and parallel bus

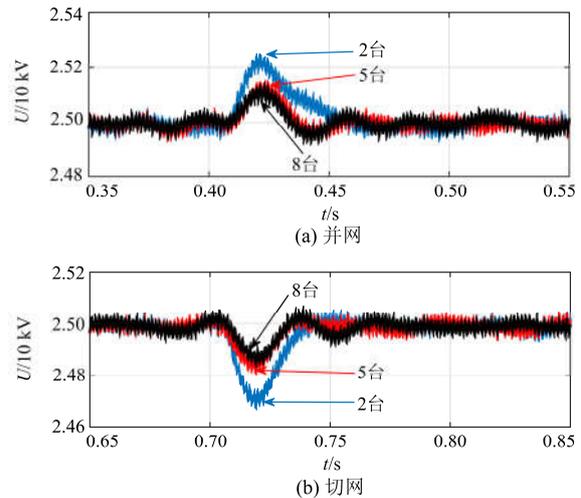


图6 单机切、并网 DC-DC 电压输出曲线

Fig. 6 DC-DC voltage output curve of single generator separating and paralleling network

降低到0.6%；切网波动从 -1.2% 降低到 -0.64% 。在已并网5或8台发电机情况下，单机切、并网时，引起的母线和 DC-DC 电压波动已无明显变化。

两台发电机切、并网时，母线电压输出结果如图7所示，DC-DC 电压输出如图8所示。

由图5至图8可知，两台永磁直驱风力发电机同时切、并网，其引起母线和 DC-DC 输出电压的波动相对于一台要大。与一台并网相似，随着已并网风力发电机台数的增多，双机并网引起母线电压波动，从 $-1.1\% \sim -1.5\%$ 降低到 $-0.67\% \sim -0.83\%$ ；切网波动从 -1.6% 降低到 -0.5% 。而由图8可得，双机并网时，引起 DC-DC 输出电压波动从2%降低到0.9%；

切网波动从-2.2%降低到-0.8%。在已并网 5 或 8 台发电机情况下, 双机并网引起的母线和 DC-DC 电压波动已无明显区别, 切网略微有区别。但从图中也可以看出 8 台情况下波动增加。

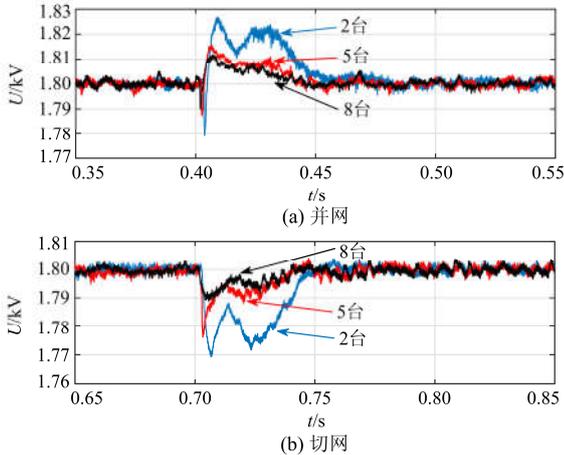


图 7 双机切、并网母线电压输出曲线

Fig. 7 Bus voltage output curve of two generators separating and paralleling network

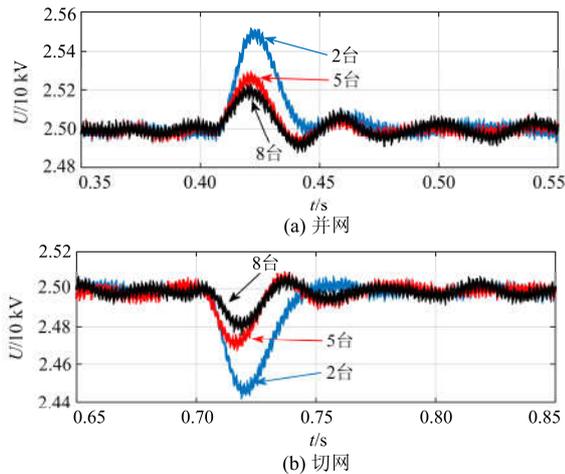


图 8 双机切、并网 DC-DC 电压输出曲线

Fig. 8 DC-DC voltage output curve of two generators separating and paralleling

3 结论

本文分析 1 或 2 台的永磁直驱风力发电机, 在母线已并有 2、5 或 8 台发电机的情况下, 切、并网时, 母线电压和 DC-DC 电压的波动情况。仿真结果表明:

(1) RMC 整流器控制系统采用的模型预测直接功率控制策略, 不但可以控制直流母线电压恒定、交流侧输入电流实现正弦化和单位功率因数运行, 而且还可以获得更好的稳态性能和更快的动态响应

速度。通过定频直接功率控制, 简化了整流器的参数设计。

(2) DC-DC 模块中高频变压器所产生的高频脉冲, 使变压器、滤波器等元器件的体积和重量大大降低, 更适合分散式小型风力发电场的风电机组升压。

(3) 随着已并网发电机台数的增多, PI 调节环节个数增多, 稳压作用增大, 再有发电机切、并网时, 其引起的电压波动逐渐减少, 且 1 台引起的电压波动小于 2 台引起的电压波动。

(4) 当电网已并网 5 或 8 台风力发电机的情况时, 单机切、并网引起母线和 DC-DC 电压波动对比, 变化较小, 而 2 台发电机在切网情况下, 波动对比, 略微有区别。

(5) 随着并网发电机台数的增多, 母线和 DC-DC 在稳定情况下波动增加, 同时考虑到电力电子器件所能承受的容量问题, 建议每组电机群以 7 台较为合适。

参考文献

- [1] 管维亚, 吴峰, 鞠平. 直驱永磁风力发电系统仿真与优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 54-60. GUAN Weiya, WU Feng, JU Ping. Simulation and optimized control of direct-drive permanent magnet wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 54-60.
- [2] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89. WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on the fault ride-through optimal control strategy of PMSG-based wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 83-89.
- [3] 党向东. 风力发电机组并网运行研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010. DANG Xiangdong. Research on operation of grid-connected wind turbine generator[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [4] 黄玲玲, 曹家麟, 符杨. 海上风电场电气系统现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 147-154. HUANG Lingling, CAO Jialin, FU Yang. Review of electrical systems for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 147-154.
- [5] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153. JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al.

- Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [6] 吕敬, 施刚, 蔡旭, 等. 大型风电场经 VSC-HVDC 交直流并联系统并网的运行控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 639-646.
- LÜ Jing, SHI Gang, CAI Xu, et al. Control strategies of large wind farms integration through AC/DC parallel transmission system based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 639-646.
- [7] 王凯, 胡晓波. 直流电网发展历程、典型拓扑及潮流控制策略综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 39-45.
- WANG Kai, HU Xiaobao. A review of development, typical topologies and power flow control strategies of DC-grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 39-45.
- [8] 何飞. 基于海上风电并网的 MMC-HVDC 控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- HE Fei. Study on control strategy of MMC-HVDC for offshore wind farm interconnection[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [9] 陈勇奇. 基于 RMC 的海上风电并联多端高压直流输电研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- CHEN Yongqi. Study on multi-terminal HVDC transmission for offshore wind power generation based on reduced matrix converter[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [10] 蒋卫龙, 邓文浪, 郭有贵, 等. 基于 RMC 的海上风电-HVDC 系统功率协调控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 1-7.
- JIANG Weilong, DENG Wenlang, GUO Yougui, et al. Coordinated control of power for direct-driven offshore wind power generation-HVDC system based on RMC[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(10): 1-7.
- [11] 张婷婷, 吴新开, 刘洋, 等. 直驱式永磁风力发电机机侧 PWM 整流器的建模与仿真[J]. 电气传动自动化, 2012, 35(1): 35-39.
- ZHANG Tingting, WU Xinkai, LIU Yang, et al. Modeling and simulation of the generator-side PWM rectifier for directly-driven wind turbine with permanent magnet generator[J]. Electric Drive Automation, 2012, 35(1): 35-39.
- [12] 左暖, 宋桂英, 梁昊天, 等. 基于模型预测的 PWM 整流器直接功率控制[J]. 电测与仪表, 2015, 52(15): 82-87.
- ZUO Nuan, SONG Guiying, LIANG Haotian, et al. Model-based predictive direct power control for PWM rectifiers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(15): 82-87.
- [13] HAO Zhenghang, LI Shaohua, ZHANG Ailing. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [14] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [15] 陈耀, 陈海龙, 曹红. 基于改进叶尖速比的永磁同步风力发电机有功功率平滑策略研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 41-45.
- CHEN Yao, CHEN Hailong, CAO Hong. Improved tip speed ratio based active power smoothing strategy for permanent-magnet synchronous wind generator[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11): 41-45.
- [16] 刘丹, 李强, 冯承超. 小型直驱式永磁同步风力发电机快速最大功率追踪仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 141-145.
- LIU Dan, LI Qiang, FENG Chengchao. A simulation study of small direct drive type permanent magnet synchronous generator fast maximum power tracking[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 141-145.

收稿日期: 2016-05-02; 修回日期: 2016-07-29

作者简介:

王银涛(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源及其控制技术; E-mail: 805769350@qq.com

何山(1974-), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为可再生能源及其控制技术; E-mail: heshanxju@sina.com

王维庆(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统及可再生能源的研究工作。

(编辑 姜新丽)