

DOI: 10.7667/PSPC160995

永磁直驱风机直流并网的启停控制

张彦兵¹, 谢文龙², 王伟¹, 李亚萍¹, 王克峰³

(1. 许昌开普检测技术有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 河南科技学院机电学院, 河南 新乡 453003;
3. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200)

摘要: 相较于交流配电网, 直流配电网供电容量大、配电损耗少、拓扑结构灵活。相较于双馈风机, 永磁直驱风机无需齿轮箱和电刷, 损耗小、维护费用低。永磁直驱风机直流并网兼具二者优势, 具有一定的市场潜力与研究价值。阐述永磁直驱风机直流并网时风机启停所面临的问题, 并基于永磁同步电机(PMSM)的数学模型和常规控制策略, 提出永磁风机分段控制方案, 确保永磁风机的启动、入网、停机等环节的平滑过渡。在 RTDS 小步长(μs)模块中建立了永磁直驱风机直流并网的仿真模型, 设计直驱风电系统直流并网启停控制仿真算例。仿真结果表明该启停控制策略的有效性。

关键词: PMSM; 直流并网; RTDS 仿真; 启停控制; 分段控制

Start/stop control of permanent magnet direct drive wind turbine on DC grid connection

ZHANG Yanbing¹, XIE Wenlong², WANG Wei¹, LI Yaping¹, WANG Kefeng³

(1. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Electromechanical School, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 3. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: DC distribution power network has bigger power supply capacity, fewer distribution loss and more flexible topology structures when compared to AC distribution network. Permanent magnet direct drive wind turbine can work well without the gear box and electric brush that has a lower cost and lower maintenance cost. So there has a certain market potential and research value when the PMSM running together with the DC grid connection. Based on the PMSM's mathematical model and the conventional control strategy, a sub-control strategy is proposed that can ensure a smooth transition during the start and stop operation for the PMSM wind turbine system. Simulation tests are built on the RTDS's micro second-level module, and the simulation results demonstrate that the start/stop control strategy is effective.

Key words: PMSM; DC grid connection; RTDS; start/stop control; sub-control

0 引言

光伏发电、风力发电以及燃料电池等新能源发电输出大多为直流电, 需经 DC-AC 变换接入交流电网传输电能。蓄电池、超级电容等储能装置及电解类工业用电、地铁供电、电动汽车和众多家用电器等直流负荷, 需经 AC-DC 变换从交流电网获取电能。变频技术的广泛使用, 也需 AC-DC-AC 多重换流器电能变换。随着 MMC 换流装置容量的提升, 以及柔性直流输电技术的日臻成熟, 相较于交流配电网, 直流配电网在提升供电容量、降低线路损耗、灵活拓扑重构、分布式能源并网及提高供电质量等方面具有更加优良的性能^[1-4]。

相比于双馈风力发电机, 永磁直驱风机结构简

单, 无需电刷和齿轮箱, 功率传输损耗小, 维护费用低。而永磁直驱风电系统接入交流电网, 需经 AC-DC-AC 环节, 多重换流变换意味着更多的功率损耗。永磁直驱风机直流并网减少了换流器变换, 更加简化了拓扑结构、降低功率损耗。以永磁直驱风电为代表的新能源直流入网, 兼具直流配电网的诸多优势, 减少换流器的使用, 降低电能损耗和运行成本, 充分发挥分布式能源的价值和效益, 具有一定的市场潜力与研究价值^[5-7]。

文献[8]基于 RT-LAB 建立的包含新能源及交直流负载的直流配电网实时数字仿真模型, 概括性地分析了直流配电网的启停时序, 针对新能源的直流并网控制环节, 未作深入研究。文献[9]阐述了永磁同步发电系统主流的拓扑结构及系统稳态时电枢绕

组的不同控制方案,并对比各自优缺点及适用工况。关于永磁风机启动、停机的机电暂态过程,并未介绍。文献[10]采用弱磁控制提高改善了永磁同步电机的效率和调速特性,该控制方案在永磁风电系统中也具有参考价值。

围绕永磁风电系统直流并网的启停控制展开研究,基于 PMSM 数学模型及常规控制策略,提出永磁风机直流入网的分段控制策略,确保风机启动入网、停机脱网环节平滑过渡。在 RTDS 中建立了包含永磁风机的直流配电网的仿真模型,设计系统启停仿真算例,对所提出的分段控制进行验证。仿真结果表明该控制策略的有效性与其可行性。

1 新能源发电直流并网系统概述

永磁直驱风机直流入网,兼具直流配电网和永

磁风机的优势,提升风电转换效率,协调大电网与分布式电源间的矛盾,减少直流负荷换流损耗。如图 1 为新能源发电直流并网结构图。交流系统 S1、S2 经 T1、T2、MMC 换流器组成直流配电网进行电能传输,结合断路器 k1—k8,可以灵活重构拓扑。风电系统经 AC/DC 直流并网,光伏系统经 DC/DC 直流并网。新能源发电中,风电系统由风力机、变桨机构、发电机等组成,其发电过程是机电暂态和电磁暂态的交互过程,相对较为复杂。风机自身又存在较大的转动惯量,风机在启停过程中存在较为剧烈的能量交换,故本文以永磁直驱风机直流入网的启停控制为研究对象,分析风电系统启停现象,提出分段控制策略,确保永磁风机启停过程中的平滑过渡。

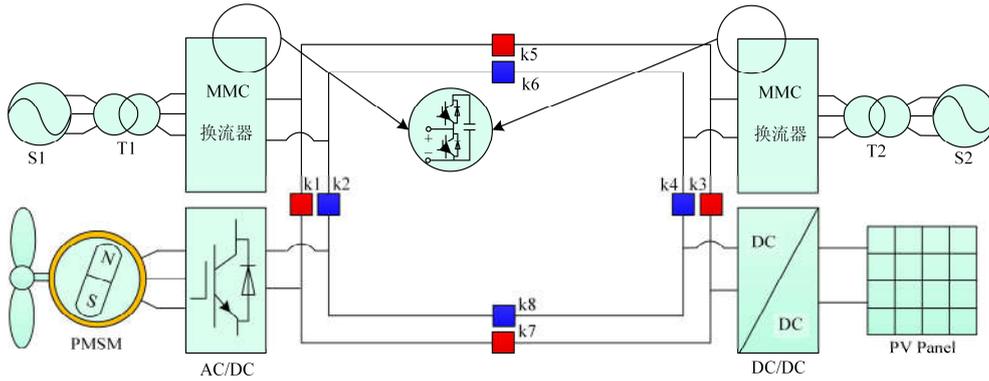


图 1 新能源发电直流并网系统结构图

Fig. 1 Structure of new energy power generation on DC grid connection

2 永磁风机数学模型及直流入网分段控制

2.1 永磁直驱风机数学模型

$d-q$ 坐标系下, PMSM 的电压、磁链、电磁转矩和机械运动方程^[11-12]为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_e i_q \\ u_{sq} = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega_e i_d + \omega_e \psi_f \\ T_{em} = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ T_{em} - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} 分别为 d, q 轴定子电压; i_d, i_q 分别为 d, q 轴电流; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感; R_s 为定

子电阻; ψ_f 为永磁体产生的磁链; T_{em}, T_L 分别为电磁转矩、负载转矩; ω_r, ω_e 分别为机械角速度、电角速度,且 $\omega_e = p_n \omega_r$, p_n 为永磁体转子极对数; B 为阻力系数; J 为转动惯量。

2.2 永磁直驱风机直流入网分段控制

图 2 所示为永磁直驱直流并网结构框图,相较于交流并网,只需经 AC/DC 换流,减少了一个换流环节。稳态工况下永磁直驱风机采用最大功率跟踪(MPPT)控制策略,经 AC/DC 换流器,向直流电网提供最大捕获风能功率。换流器采用双闭环解耦控制策略,内环控制电流,采用有功外环控制或者转速外环控制^[13]。相比于零 d 轴控制策略,采用 d 轴弱磁控制可以提高永磁同步电机工作效率和改善调速特性^[14],其中 $y = f(\omega_r)$ 为 d 轴弱磁控制函数。

风机稳态工况下,其 q 轴控制策略为图 2 中红色虚线框①所示,内环电流、外环 MPPT 控制方案。由于风机自身机械惯性系数较大,故转动中的风电系统存在较大的机械能。即 PMSM 直流入网的启

动、停机过程中, 风机系统会存在一个较大的机械能的吸收和释放过程。该启停动态过程中, 常规 MPPT 控制策略已无法满足风机系统的平滑过渡。

提出分段控制方案, 在风机系统启动和停机阶段, 采用转速控制策略, 风机稳态过程中采用最大功率跟踪控制策略。

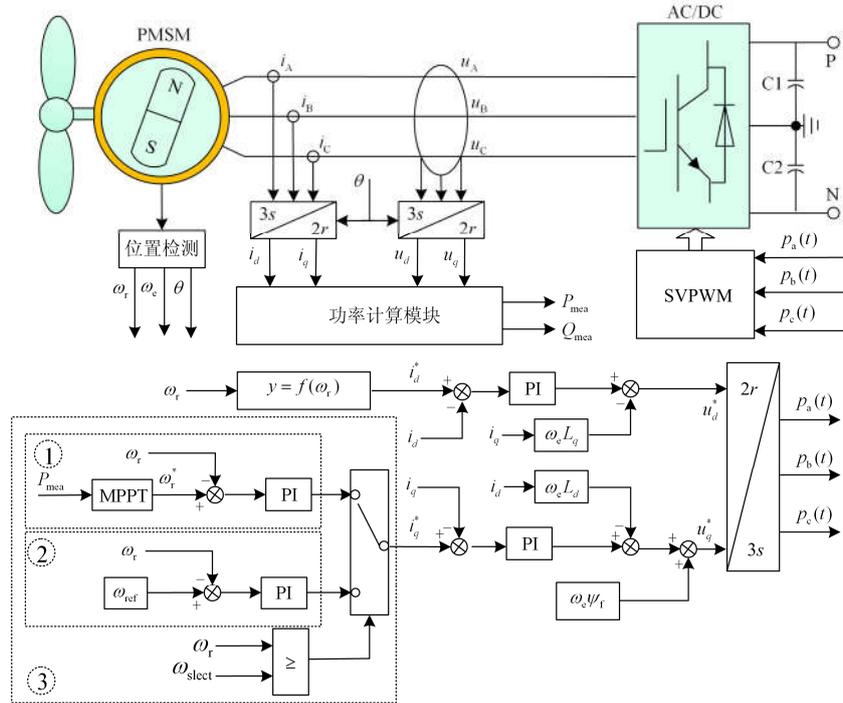


图 2 永磁直驱风机分段控制结构图

Fig. 2 Structure of sub-control for permanent magnet direct drive wind turbine

图 2 虚线框③部分为风机直流并网分段控制方框图, 由转速闭环控制、最大功率控制及转速观测切换控制 3 部分组成。风机启动阶段, 首先采用转速控制, 吸收电网能量, 平滑提升风机转速, 该过程中 PMSM 等效为电动机; 当风机转速 ω_r 达到设定值 ω_{slect} 时, q 轴控制切换到 MPPT 控制策略, 调整风机转速, 捕获最大风能, 该过程中 PMSM 等效为发电机; 收到停机指令后, 切换 MPPT 控制到转速控制, 将风机转速降低到设定值, 风机停机、脱网。

3 RTDS 仿真验证

为验证永磁风机直流入网启停分段控制策略的有效性, 及该风电系统的动态性能, 在实时仿真器 RTDS 小步长 (μs 级) 模块中, 搭建 MMC 直流配电网模型, 并搭建永磁直驱风电系统仿真模型。

永磁风机启动仿真工况: 交流系统 S2 经直流配电网向交流系统 S1 传输有功功率 50 MW, 直流配电网直流母线电压为 ± 10 kV, 风速为 12 m/s, 永磁风机系统初始转速为零。分别设计永磁直驱风机经 MPPT 控制策略直流入网启动、永磁直驱风机经

分段控制策略直流入网启动及停机 3 个仿真算例进行验证, 仿真系统主要参数如表 1 所示。

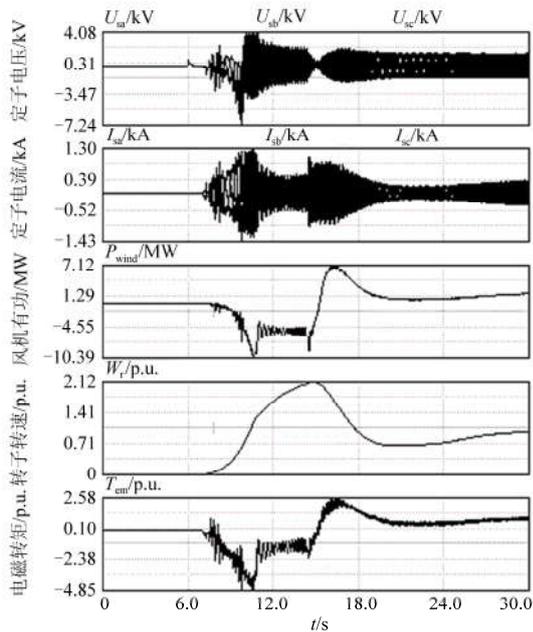
表 1 RTDS 关键仿真参数

Table 1 Key simulation parameters for RTDS

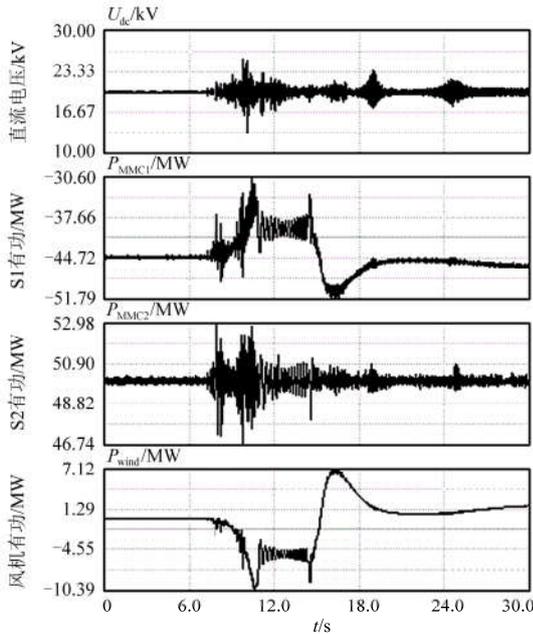
| | 名称 | 参数 | 单位 |
|--------|---------------------------|----------|----------|
| 直流配电网 | AC 母线额定值 U_{AC} | 35 | kV |
| | DC 母线电压值 U_{DC} | ± 10 | kV |
| | MMC 桥臂电抗 L_{MMC} | 3.0 | mH |
| | MMC 子模块个数 N | 100 | 个 |
| | PMSM 额定容量 S_{PMSM} | 2.0 | MVA |
| 永磁直驱风机 | PMSM 转动惯量 J | 3.5 | MW s/MVA |
| | 定子绕组漏抗 L_s | 0.1 | p.u. |
| | d 轴不饱和磁化电抗 L_d | 0.65 | p.u. |
| | q 轴不饱和磁化电抗 L_q | 3.0 | p.u. |
| | 转子励磁强度 ψ_r | 1.3 | p.u. |
| | 转子初始转速 ω_{r_init} | 0.0 | p.u. |

3.1 算例 1: MPPT 控制启动入网

永磁直驱风机经 MPPT 控制直流入网仿真波形观测如图 3 所示。图 3(a) 为永磁风机变量动态响应。图 3(b) 为直流配电网母线电压、送端、接收端有功功率的动态响应。



(a) 永磁直驱风机参量观测



(b) 直流配电网参量观测

图3 仿真算例1波形观测

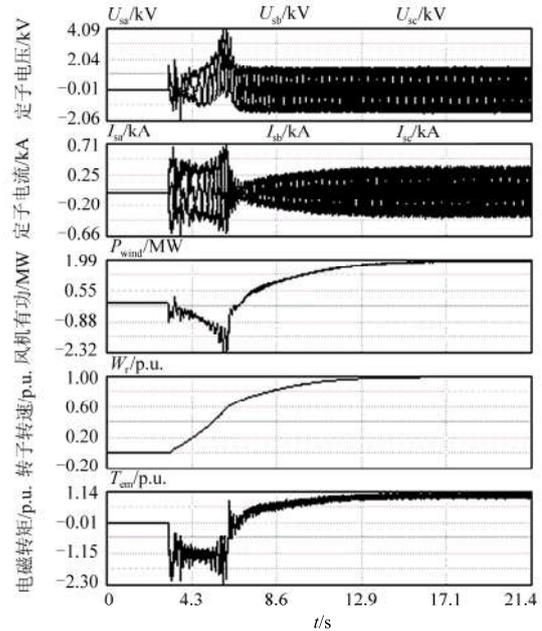
Fig. 3 Waveform of simulation No.1

仿真结果可知，永磁风机MPPT控制启动时，风机转速、电磁转矩、风机有功功率输出均存在较大的振荡。该控制方式启动下，会给风机系统造成损坏冲击，也会对直流配电网造成负面影响。究其原因，是风机启动暂态过程中，风机控制策略不匹配造成的。由式(1)机械运动方程可知，风机系统会在电磁转矩和机械转矩的共同作用下，达到转速平衡状态。而 q 轴MPPT控制的外环反馈量为风机输

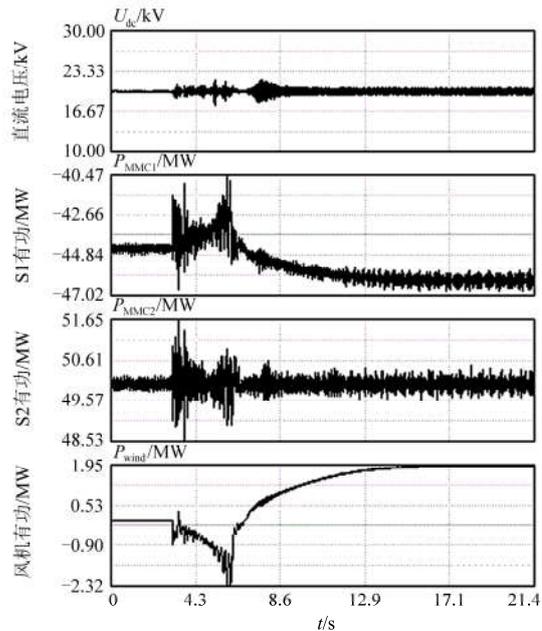
出有功功率，初始转速给定值为一个跨幅较大的动态变量，故风机系统在该控制策略下启动，会存在一个较大的冲击。

3.2 算例2：分段控制启动入网

永磁直驱风机经分段控制策略直流并网仿真波形如图4所示。图4(a)为风机直流并网时永磁风机关键变量的动态响应。风机分段控制过程：(1)风机启动状态， q 轴采用转速控制方案，即蓝色虚线



(a) 永磁直驱风机参量观测



(b) 直流配电网参量观测

图4 仿真算例2波形观测

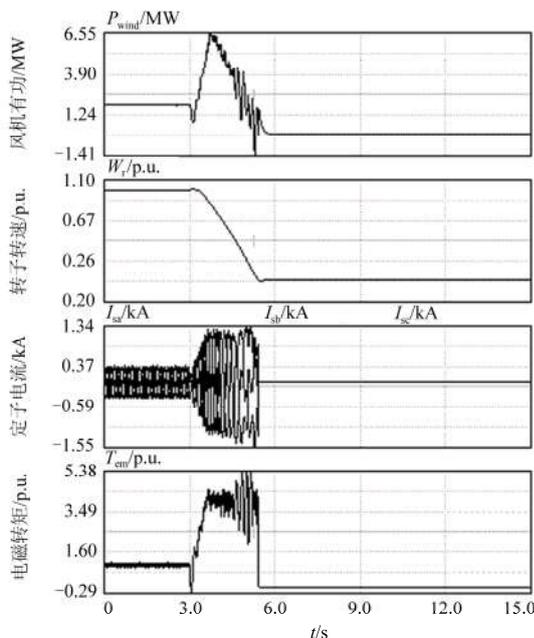
Fig. 4 Waveform of simulation No.2

框②所示,控制风机转速平滑提升到设定值(0.6 p.u.)。对应图 4(a)的 3~6 s 时刻,风机换流器从直流配电网吸收有功功率,提供电磁转矩,拖动风机平滑提升转速到 0.6 p.u.设定值。(2) 风机切换状态,当风机转速提升到设定值后,切换 q 轴控制策略到 MPPT 控制方案,即红色虚线框①所示,对应图 4(a)的 6~14 s 时刻,系统采用 MPPT 控制算法,寻找风机最大功率输出转速值,并跟随风速变动保持稳定状态。

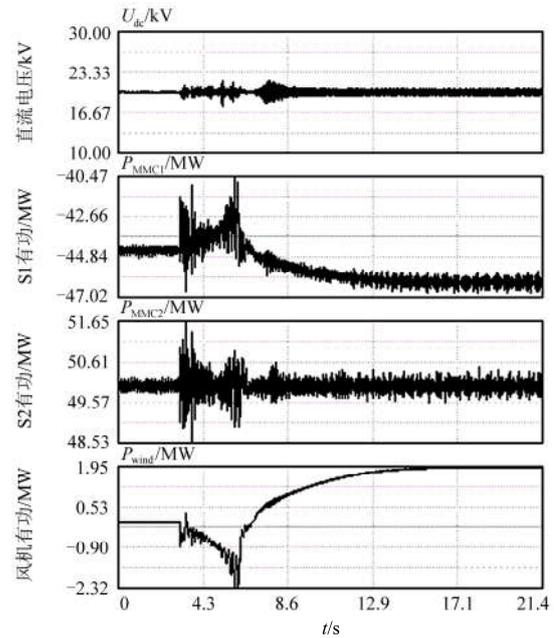
图 4(b)为风机并网过程中直流配电网关键变量的动态响应。交流系统 S2 的 MMC 换流器采用功率控制,向直流配电网输送 50 MW 有功功率。S1 换流器采用电压控制策略,风机启动过程中接收 S1 有功传输,并补偿风机功率输出,由于 RTDS 的 MMC 换流器小步长仿真存在一个固有的功率损耗,故 S1 接收有功小于 50 MW。由仿真算例 2 波形分析可知,该控制方案下,风机转速平滑提升至最大功率输出转速值,电磁转矩、风机有功输出均无较大振荡,风机启动对直流配电网的冲击较小。

3.3 算例 3: 停机脱网

图 5(a)为永磁风机动态响应,图 5(b)为直流配电网波形观测。系统停机前,风机运行于额定状态,转速 1.0 p.u.,发出有功功率 2.0 MW,电磁转矩 1.0 p.u.。下达停止指令后,风机 q 轴控制策略由 MPPT 切换至转速控制方案,控制风机转速平滑降低到设定值,并切除风机同配电网的电气连接,之后采用机械刹车使风机停车,完成风电系统停机过程。如图 5(a)所示,风机输出有功功率由 2.0 MW 沿一定斜率提升到 6.55 MW,之后缓慢降低到负值



(a) 永磁直驱风机参量观测



(b) 直流配电网参量观测

图 5 仿真算例 3 波形观测

Fig. 5 Waveform of simulation No.3

状态。永磁同步发电系统自身转动惯量较大,风机在转动时自身具有机械能,转速控制停机过程中,通过电磁转矩作用,将机械能变换成电能回馈到直流电网中。同时风机受到风力作用,停机过程中,电磁转矩也需要克服风力所造成的机械转矩作用,故停机末段,需要吸收电网功率,克服风力机械转矩做功率。

4 结论

1) 永磁直驱风机经直流入网兼具直流配电网配电容量大、运维费用低的优点以及减少风电换流器环节,降低功率传输损耗等诸多优势,具有一定的市场潜力与研究价值。

2) 启动入网和停机脱网的环节中,风机系统存在较大的机械能的吸收与释放过程,采用分段控制可实现永磁直驱风机平滑启动入网和停机脱网,对永磁风机本身及直流配电网冲击较小。

3) 采用 RTDS 小步长模块,建立直流配电网模型及永磁直驱风机仿真模型,并设定永磁风机经 MPPT 直流入网、永磁风机经分段控制直流入网及风机经分段控制停机脱网 3 个仿真算例,并对仿真结果进行了对比分析。

4) 仿真试验结果表明采用分段控制策略,风机可以稳定平滑地直流启动入网、停机脱网,验证了该控制策略的有效性及其可行性。

参考文献

[1] 张树东, 朱大为, 刘闯, 等. 交直流混合配电型通用功率变换器(UPC)研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 48-55.
ZHANG Shudong, ZHU Dawei, LIU Chuang, et al. Universal power converter (UPC) for hybrid AC and DC distribution[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 48-55.

[2] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于 RTDS 仿真的 MMC_UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 56-62.
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC_UPFC indirect current strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.

[3] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.

[4] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.

[5] 张彦兵, 郝正航, 宁媛, 等. 双馈风机孤岛模式下恒压恒频运行控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(8): 57-61.
ZHANG Yanbing, HAO Zhenghang, NING Yuan, et al. The CVCF control strategy for stand-alone doubly fed induction generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(8): 57-61.

[6] 赵彪, 赵宇明, 王一振, 等. 基于柔性中压直流配电网的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4843-4851.
ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851.

[7] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 79-85.
ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 79-85.

[8] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.

[9] 沈建新, 缪冬敏. 变速永磁同步发电机系统及控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 1-8.
SHEN Jianxin, MIAO Dongmin. Variable speed permanent magnet synchronous generator systems and control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 28(3): 1-8.

[10] 盛义发, 喻寿益, 桂卫华, 等. 轨道车辆用永磁同步电机系统弱磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 74-79.
SHENG Yifa, YU Shouyi, GUI Weihua, et al. Field weakening operation control strategies of permanent magnet synchronous motor for railway vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 74-79.

[11] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.

[12] 高峰, 周孝信, 朱宁辉, 等. 直驱式风电机组机电暂态建模及仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 29-34.
GAO Feng, ZHOU Xiaoxin, ZHU Ninghui, et al. Electromechanical transient modeling and simulation of direct-drive wind turbine system with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 29-34.

[13] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.
WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2012, 24(2): 12-20.

[14] 张鹏. 永磁同步电动机弱磁调速控制方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
ZHANG Peng. Field weakening operation control strategies of permanent magnet synchronous motor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

收稿日期: 2016-07-03; 修回日期: 2016-09-10

作者简介:

张彦兵(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 助理工程师, 从事电力系统仿真工作; E-mail: 412048431@qq.com

谢文龙(1992—), 男, 硕士, 助教, 研究方向为机电一体化技术与应用;

王伟(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统仿真试验研究。

(编辑 周金梅)