

DOI: 10.7667/PSPC161738

基于 RTDS 的风力机自适应转速启动控制的仿真研究

贺文¹, 王小立¹, 王伟², 张彦兵²

(1. 国网宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001; 2. 许昌开普检测技术有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 双馈风机和永磁直驱风机等风电装置具有较大的转动惯量, 在启、停过程中存在较大机械能的储存和释放。为降低风电系统启、停阶段对电网的冲击并保护风机装置不受损害, 提出风机自适应转速启动及转速分段控制停机策略。自适应转速启动: 对应不同风速, 分别配置风力机最优转速启动值, 风力机启动过程结束后切换为最大功率跟踪(MPPT)控制策略。停机控制: 风力机停机阶段, 控制策略由 MPPT 控制切换至转速控制, 待风力机转速降低到设定值, 风电装置停机并脱网。基于 RTDS 建立了永磁直驱风机直流并网的仿真模型, 设计风电系统启动和停机仿真算例, 试验结果表明了该启停控制策略的有效性。

关键词: 自适应转速控制; 启停控制; 永磁直驱风机; RTDS

Simulation research on the adaptive speed start control of the wind turbine based on RTDS

HE Wen¹, WANG Xiaoli¹, WANG Wei², ZHANG Yanbing²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China;
2. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: The wind power device such as DFIG and PMSG has large moment of inertia because of the large mechanical energy storage and release during the process of starting and stopping. In order to reduce the negative effect on the power grid and prevent the wind turbine from damage, a new wind turbine self-adaptive rotational speed start and segment control shutdown strategy is proposed. Adaptive rotational speed start control: corresponding to different wind speed, the optimal starting speed of wind turbine is respectively configured, and the maximum power point tracking (MPPT) control strategy is switched after the start process of wind turbine. Shutdown control: during the wind turbine shutdown stage, the control strategy is switched from MPPT control to speed control. During wind turbine shutdown stage, control strategy is switched to rotation speed control from MPPT control. When the wind turbine's speed is reduced to the set value, the wind power devices stop and cut down from the power grid. Simulation model of PMSG's DC grid-connection is built based on RTDS, and the simulation tests of wind power system's startup and shutdown are designed. Simulation results demonstrate that the start/stop control strategy is effective.

Key words: adaptive speed control; start/stop control; PMSG; RTDS

0 引言

风力发电环保可再生, 规模效益显著, 近年来成为发展速度最快且技术最为成熟的新能源发电方式之一^[1-3]。双馈风机和永磁直驱风机市场占有率较高, 是风力发电的主流机型, 不同于光伏发电, 旋转类风电装置具有较大的转动惯量, 在启动和停机过程中, 风电装置存在较大机械能的存储和释放。故风电装置在启动和停机过程中对电网容易造成一

定程度的冲击。

文献[4]基于 RT-LAB 建立了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, 对于风机类装置启停等暂态过程并未作深入研究。文献[5]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控制方案, 并对各自优缺点及适用工况。重点分析了永磁风机稳态特性, 忽略了风力机启停对电网的冲击。文献[6]提出孤岛工况下 DFIG 变频器的励磁控制策略, 结合蓄电池通过切换变流器转换开关, 实现了双馈风机孤岛工况下恒压恒频运行。

仿真试验是基于 DFIG 额定转速下进行的, 对于风力机启动的暂态过程未作深入分析。

为了实现风力机装置平滑启动入网及停机脱网, 减少风电系统在启停阶段对电网的冲击, 提出风力机自适应转速启动及转速分段控制停机策略, 即通过控制启停阶段风电装置机械能的存储和释放过程, 来实现风机启停阶段对电网的冲击。以永磁直驱风机直流并网的启停控制作为研究对象, 基于风力机和 PMSM 数学模型, 绘制风力机风功率曲线, 并提出 PMSM 自适应转速启动及分段停机控制方案。在 RTDS 中建立仿真模型, 设计风电系统启停仿真算例, 对所提出的控制策略进行验证, 试验

表明了该控制策略的有效性与可行性。

1 风力机并网系统结构图

永磁直驱风机并网方式较为灵活, 可以经 AC/DC 换流器直流并网, 也可以经 AC/DC/AC 换流器交流并网。图 1 所示为永磁直驱风机并网结构图, 图示 P、N 表示换流器的正、负极直流母线。直流并网时, 风力机定子端由 AC/DC 换流器整流, 经 P、N 端进行直流并网。交流并网时, 风力机定子端由 AC/DC 换流器整流, 再由 DC/AC 逆变后进行交流并网, 红色虚线框部分为 DC/AC 环节。

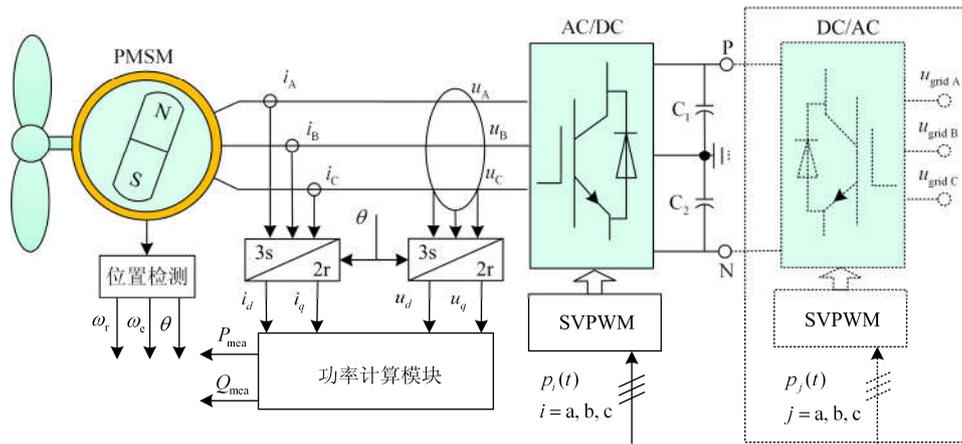


图 1 永磁直驱风机并网结构图

Fig. 1 Structure diagram of PMSM

无论双馈风机或者永磁直驱风机经交、直流并网, 风力机自适应转速启动控制及分段控制停机策略均具有适用性。选择 PMSM 直流并网进行仿真研究, 验证了控制策略的可行性及有效性。

2 风力机自适应转速启动控制原理

2.1 风力机自适应转速启动定值选取

风力机空气动力学原理及风力机输出的机械转矩表达式如式(1)所示^[7]。

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v^3 \\ C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 \lambda_i - C_3 \beta - C_4) e^{-C_5 \lambda_i} + C_6 \lambda \\ \lambda = R w_r / v \\ \lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_m 为风轮机输出机械功率; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; ρ 为空气密度; R 为风力机叶轮半径; v 为风速; λ 为叶尖速比; β 为桨距角; λ_i 为过渡

系数; w_r 为风轮机转动角速度; $C_i (i=1 \sim 6)$ 为风能利用系数的典型参量。参照某风力机相关参数进行数学建模并绘制风功率曲线图, 表 1 为模型所选取的参数值。

图 2 所示为风力机在不同风速和转速下的功率曲线图, 横坐标为风机转速, 纵坐标为风力机的机械功率输出。

表 1 风力机功率曲线相关参数

Table 1 Relevant parameters for wind turbine

| 参数名称 | 参数值 |
|--------------------|------------------------------------|
| 风力机额定容量 | 2.0 MW |
| 额定转速 | 1.8 rad/s |
| 风叶半径 R | 46.5 m |
| 桨距角 β | 0° |
| $C_i (i=1 \sim 6)$ | 0.47、0.0167、7.5、0.15、0.001 84、0.01 |
| 空气密度 ρ | 1.2 kg/m ³ |
| 切入风速 | 2.3 m/s |
| 额定风速 | 10.5 m/s |

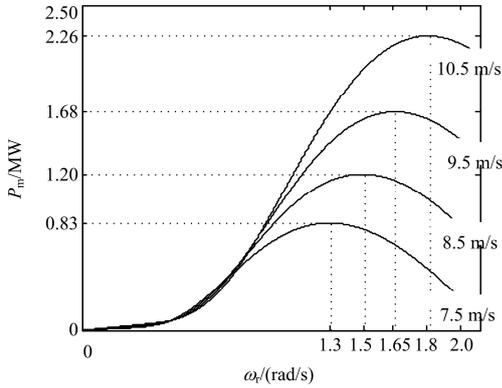


图 2 不同风速下的风功率曲线图

Fig. 2 Wind power curve for different wind speed

风力机类发电装置多采用最大功率跟踪策略，跟随风速调整风力机转速，以期捕获最大风能。风力机启动阶段，转速的启动值设置为对应风速下的最优转速值^[8-12]。即启动过程结束后，风力机转速即为最大功率捕获的转速，缩短了风力机最大功率捕获的动态调整过程。由图 2 可得不同风速下的最优转速值并设定风力机启动时刻的转速设定值函数，如式(2)所示。

$$\omega_{ref} = f(v) = \begin{cases} 0.72 & (6 \text{ m/s} \leq v < 8 \text{ m/s}) \\ 0.83 & (8 \text{ m/s} \leq v < 9 \text{ m/s}) \\ 0.92 & (9 \text{ m/s} \leq v < 10 \text{ m/s}) \\ 1.0 & (10 \text{ m/s} \leq v < 11 \text{ m/s}) \end{cases} \text{ (p.u.)} \quad (2)$$

式中， ω_{ref} 为风力机的启动转速给定值，即风力机启动过程中，采用转速控制策略，换流器从电网获取能量，驱动风力机达到实时风速下风力机的最优转速值，风电系统稳定后，切换至 MPPT 控制策略，完成风力机的启动过程。

2.2 永磁直驱风机自适应控制策略

dq 坐标系下，PMSM 的电压、电磁转矩和机械运动方程^[13-14]为式(3)，并基于式(3)建立了 PMSM 的控制策略结构图，如图 3 所示。稳态工况下永磁直驱风力机采用最大功率跟踪控制策略，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，根据不同工况， q 轴外环采用转速控制或者功率控制。 d 轴采用弱磁控制策略，提高永磁同步电机工作效率和改善调速特性^[15-17]，其中 $y = f(\omega_r)$ 为 d 轴弱磁控制函数。

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

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 分别为电磁转矩和负载转矩； 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。

在风力机系统启动和停机阶段，采用转速控制，实现风电系统机械能存储和吸收过程的稳定控制，降低对电网造成的冲击。待风力机系统达到稳态过程后，切换为最大功率跟踪控制策略。

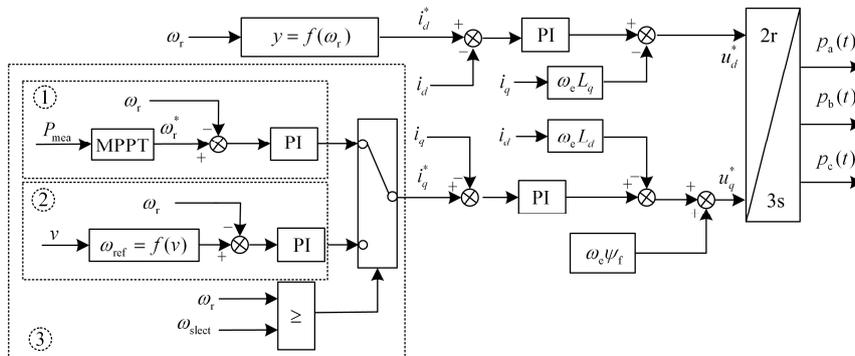


图 3 永磁直驱风力机分段控制结构图

Fig. 3 Structure of sub-control for permanent magnet direct drive wind turbine

所设计的风力机自适应启动方案如虚线框③所示，由最大功率控制、转速控制及两种控制策略自动切换共 3 部分组成。风力机启动初始阶段，风力

机转速为零，转速控制策略下，根据实时风速结合式(2)设定风力机最优转速，风力机受到风力驱动转矩及电磁转矩的共同作用，吸收风能及电能，平滑

提升风力机转速至最优转速。当风力机转速 ω_r 达到转速设定值时, 自动切换为 MPPT 控制策略。停机过程较为简单, 收到停机指令后, q 轴退出 MPPT 控制切换为转速控制, 将风力机转速降低到设定值后风机停机、脱网。

3 RTDS 仿真验证

为了验证风力机自适应转速启动和分段停机控制策略下风电系统的动态性能, 在 RTDS 仿真平台上搭建永磁直驱风机直流并网模型。具体工况如下: 直流母线侧电压为 ± 10 kV, 风速为 10.2 m/s, 永磁风力机系统初始转速为零。分别设计 PMSM 自适应转速控制直流并网启动及风力机转速分段停机控制 2 个仿真算例进行验证, 仿真建模主要参数如表 2 所示。

表 2 RTDS 关键仿真参数

Table 2 Key simulation parameters for RTDS

| 参数名称 | 数值 | 单位 |
|---------------------------|----------|---------|
| DC 母线电压值 U_{DC} | ± 10 | kV |
| PMSM 额定容量 S_{PMSM} | 2.0 | MVA |
| PMSM 线电压值 U_s | 4.0 | kV |
| PMSM 转动惯量 J | 3.5 | MWs/MVA |
| 定子绕组漏抗 L_s | 0.1 | p.u. |
| d 轴不饱和和磁化电抗 L_d | 0.65 | p.u. |
| q 轴不饱和和磁化电抗 L_q | 3.0 | p.u. |
| 转子励磁强度 ψ_f | 1.3 | p.u. |
| 转子初始转速 ω_{r_init} | 0.0 | p.u. |

3.1 算例 1: 风力机自适应转速启动直流并网

风力机自适应转速启动控制直流并网仿真波形如图 4 所示。波形自上而下依次为风力机定子侧电压和电流波形、风力机输出有功功率、风力机转速、电磁转矩及控制切换信号。

分析图 4 可知, 风力机自适应启动控制策略下, 风力机转速平稳提升并微调回落, 风力机先从电网吸收电能, 启动结束后向电网输送电能。电磁转矩、风力机有功输出均无较大振荡, 风力机启动过程中对直流电网的冲击小。

风力机自适应转速启动: 风力机初始转速为零, q 轴采用转速控制方案, 转速给定值由实时风速和式(2)计算所得, 风力机在风力机转矩和电磁转矩共同作用下平滑提升转速至 1.0 p.u., 对应图 4 的 5~8 s 时刻。

风力机切换控制模式: 如图所示, 当风力机转速达到设定值 1.0 p.u.后, 触发切换信号为高电平, q 轴切换至 MPPT 控制, 即图 3 红色虚线框①, 对

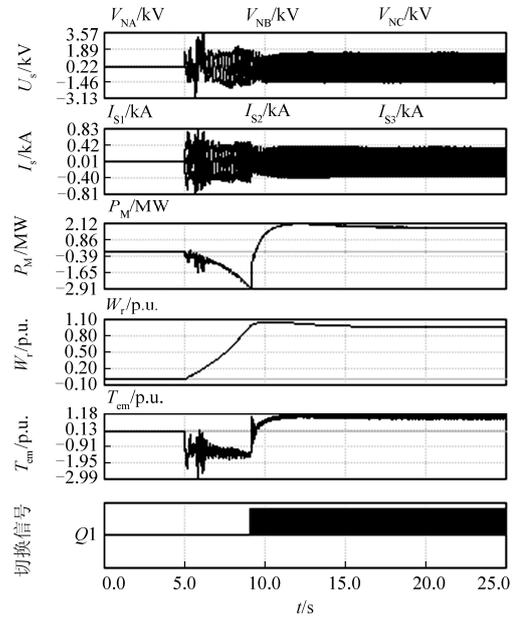


图 4 仿真算例 1 波形

Fig. 4 Waveform of simulation No.1

应图 4 的 8~20 s 时刻, 在 MPPT 控制下, 风力机进行转速微调, 达到风力机最大功率输出转速状态。由于设定风速为 10.2 m/s, 故风力机转速提升至 1.0 p.u. 后, 经 MPPT 控制策略后, 有所回落。

3.2 算例 2: 风力机分段控制停机脱网

风力机停机控制过程波行动态响应如图 5 所示, 波形参量自上而下依次为风力机有功功率、风力机转速、定子电流、电磁转矩及停机指令信号。

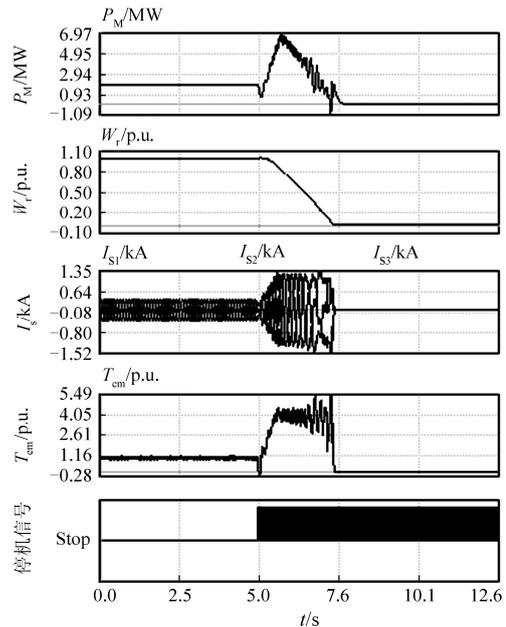


图 5 仿真算例 2 波形

Fig. 5 Waveform of simulation No. 2

分析图 5 可知, 0~5 s 时刻, 风力机处于最大功率跟踪控制状态。5 s 后系统发出停机脱网指令, 控制策略切换至转速控制, 设定风力机转速参考值为零。风力机在电磁转矩作用下迅速降低转速, 并伴随着风力机系统机械能的释放过程。风力机输出有功功率沿一定斜率提升到 6.97 MW, 之后缓慢降低到负值状态。永磁同步发电系统自身转动惯量较大, 风力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转换成电能回馈到直流电网中。同时风力机受到风力作用, 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。待风力机转速降低为设定值后, 机械制动停车, 并切除风力机同直流电网的电气连接, 停机脱网过程结束。

4 结论

1) 双馈风机和永磁直驱风机等旋转类风电装置存在较大转动惯量, 风电系统的启动和停止过程中, 存在着较大机械能的存储和释放过程, 极易对电网造成冲击影响。

2) 所提出的风力机自适应转速启动控制策略, 可以实现风力机的平滑启动和并网。结合风力机固有参数绘制不同风速下风力机的最优转速值, 风力机启动过程中, 根据实时风速, 设定对应转速启动值, 实现风电系统机械能存储过程的稳定可控。停机过程中, 风机控制由 MPPT 控制切换至转速控制, 实现了风力机系统释放机械能过程的稳定可控, 降低了对电网的冲击。仿真试验验证了该控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 李响, 韩民晓, 许东. 直流串并联海上风电机组控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 46-52.
LI Xiang, HAN Minxiao, XU Dong. Control strategy of DC parallel-series offshore wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 46-52.
- [2] 孙大南, 刘志刚, 刁利军, 等. 牵引电机矢量控制转子磁场准确定向实时校正策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 116-123.
SUN Danan, LIU Zhigang, DIAO Lijun, et al. Accurate rotor flux orientation real-time correction strategy for vector control of traction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 116-123.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 1-8.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张永昌, 杨海涛, 魏香龙. 基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 66-73.
ZHANG Yongchang, YANG Haitao, WEI Xianglong. Model predictive control of permanent magnet synchronous motors based on fast vector selection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 66-73.
- [9] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速电机发展与设计综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 1-18.
ZHANG Fengge, DU Guanghui, WANG Tianyu, et al. Review on development and design of high speed machines[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2016, 31(7): 1-18.
- [10] 田兵, 安群涛, 孙东阳, 等. 基于磁饱和效应的表贴式永磁同步电机初始位置检测方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 155-164.
TIAN Bing, AN Quntao, SUN Dongyang, et al. Initial position estimation for surface permanent magnet synchronous motors based on magnetic saturation effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 155-164.
- [11] 何健, 范晓龙, 许高俊, 等. 电力市场下含风电的电网多目标无功优化[J]. 陕西电力, 2017, 45(1): 11-16.
HE Jian, FAN Xiaolong, XU Gaojun, et al. Multi-objective reactive power optimization of power grid with wind power in electricity market[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(1): 11-16.
- [12] 陈璟华, 梁丽丽, 郭壮志, 等. 有效消纳风电的储热与储能装置热-电联合系统[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 69-74.
CHEN Jinghua, LIANG Lili, GUO Zhuangzhi, et al. Wind power accommodated electricity-heat combined system with thermal storage and energy storage device[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 69-74.
- [13] 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.
- [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.
- [15] 杜永红, 李哲峰, 刘志刚. 异步电动机间接磁场定向控制双闭环系统[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 24-28.
DU Yonghong, LI Zhefeng, LIU Zhigang. Indirect field orientation double closed loop system of induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 24-28.
- [16] 赵海岭, 王维庆, 王海云, 等. 并网永磁直驱风电机组故障穿越能力仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(7): 15-18.
ZHAO Hailing, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Fault ride-through simulation of permanent magnetic synchronous generator connected into power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(7): 15-18.
- [17] 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.

收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2016-11-26

作者简介:

贺文(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行;

王小立(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护运行管理工作;

王伟(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统仿真工作。

(编辑 魏小丽)