

采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统 最大功率点跟踪研究

李咸善, 徐浩, 杜于龙

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 在风力发电机控制中采用叶尖速比法, 可以实现快速功率跟踪, 但常由于风速测量值与实际风速值不一致, 导致无法达到最大功率点。由于爬山搜索法不需要测量风速, 所以采用爬山搜索法和叶尖速比控制法相结合来实现快速最大功率跟踪。当风速变化超过 ± 1 m/s 时, 采用叶尖速比控制法, 按测量风速计算出参考转速, 迅速跟随, 达到指定转速后, 切换到爬山搜索法, 实现精确的最大功率跟踪。在 Matlab 环境下, 建立了永磁直驱式风力发电机模型, 仿真分析了风速变化时, 采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的方法能够实现最大功率快速而精确的跟踪, 且具有很好的动态特性和稳态特性。

关键词: 永磁直驱式风力发电机; 叶尖速比法; 爬山搜索法; 最大功率跟踪; 仿真

Maximum power tracking of wind power generation system using the combination of tip speed ratio method and climbing search method

LI Xianshan, XU Hao, DU Yulong

(College of Electrical Engineering & Renewable Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The tip speed ratio method can realize fast power tracking in the process of wind turbine controlling. However, the inconsistency of wind speed between the measured value and the actual value lead unable to achieve maximum power point frequently. Because the climbing search method does not require the measurement of wind speed, the combination of tip speed ratio method and climbing search method is adopted to realize fast maximum power tracking. When wind speed exceed ± 1 m/s, this paper calculates reference speed according to measured wind speed by use of tip speed ratio control method, and then follows quickly. When wind speed reaches the specified speed, it switches to climbing search method to realize accurate maximum power tracking. In the Matlab environment, the Direct Drive Permanent Magnet Wind Generator model is established, which can simulate that, when the wind speed changes, the combination of tip speed ratio method and climbing search method can realized fast and accurate maximum power tracking, and has a dynamic characteristics and steady-state characteristics.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277110).

Key words: direct drive permanent magnet wind generator; tip speed ratio method; climbing search method; maximum power point tracking; simulation

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)13-0066-06

0 引言

风力发电系统的输出特性受到外界环境影响很大^[1-3], 风的不稳定性会导致风力机输出特性出现较大的波动, 在这种状况下, 风力机的实时输出功率

往往会和预测输出功率有较大差距。因此有必要研究出一种方法能够使风力机在外界风速大幅度波动和小幅度快速波动下, 能够灵敏和有效地实现最大功率跟踪。

经典的最大功率跟踪算法有: 叶尖速比控制法^[4]、爬山搜索法^[5]和功率曲线控制法^[6]。由于叶尖速比控制法要采用风速传感器, 而且其最大功率跟踪很

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51277110)

依赖测量风速的准确度和叶尖速比曲线的准确度, 而往往实际环境无法保证这种准确度。所以目前很多新改进算法都舍弃了这种算法, 而是将目光转向外部条件需求更加简单的爬山搜索法。目前在爬山搜索法上进行改进的新型算法有如下: 引进模拟退火法的改进型爬山搜索法^[7]、模糊推理最优梯度法^[8-10]、电导法^[11]等。在爬山搜索法上进行改进各种算法采用的原理大多数将经典的爬山法中的等步长搜索改进微变步长搜索, 各种方法的目标都使这种变步长的搜索法的性能进行改进, 使在前期进行大步长快速搜索, 提高跟随的速度, 在接近最大功率点附近采用小步长进行搜索, 实现稳定输出。从而得到较好的动态特性和静态特性。

本文通过对上述改进型爬山搜索法进行对比研究后, 发现其中还略有不足, 采用变步长会使计算量变大。并对大型风力机特性进行分析, 目前大型风力机都装有风速测量传感器, 且都有出厂的叶尖速比曲线。所以本文为了充分利用风力机自身的传感器和叶尖速比曲线, 提出了叶尖速比控制法和爬山搜索法相结合的改进型算法。在风速变化较大的情况下, 采用叶尖速比控制法, 实现快速的跟随, 在接近最大功率附近切换到爬山搜索法。通过以上结合, 完全避免了叶尖速比控制法中的传感器测量和风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 的曲线不准确的缺点, 也不用考虑爬山法的变步长问题。而将叶尖速比控制法的快速跟随优点和爬山搜索法的最大功率跟踪的优点很好地结合在一起, 使得算法处理过程也变得更加简单。

通过 Matlab 仿真表明, 该方法可以使得风力机能够快速稳定的实现最大功率跟踪。

1 永磁同步风力发电机空气动力模型

由空气动力学描述可知^[12-13], 风轮输出的机械功率和机械转矩方程为

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \\ T_m = \frac{1}{2} \rho \pi C_T(\lambda, \beta) v^2 R^3 \\ C_T(\lambda, \beta) = \frac{1}{\lambda} C_p(\lambda, \beta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_m 是风轮输出机械功率, 单位 kW; T_m 是风轮输出机械转矩, 单位为 Nm; C_p 是风能利用系数; C_T 为风轮的转矩系数; β 是叶片桨距角, 单位为 ($^\circ$); λ 为叶尖速比; A 是风轮扫掠的截面积, 单位 m^2 ; ρ 表示空气密度, 单位为 kg/m^3 ; v 是风速,

单位为 m/s ; R 为风轮半径, 单位为 m 。

当给定一风速时, 风力机输出机械功率值与 C_p 的大小有关^[14]。而 C_p 与叶片桨距角 β 及叶尖速比 λ 的关系式可表示为(其中 λ_i 为过程变量)

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为风力机转速, 单位 rad/s; J 为转动惯量, 单位 kgm^2 ; T_e 是风力发电机的电磁转矩, 单位为 Nm。

图 1 所示为风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 的曲线。由图可知, 风能利用系数 C_p 随着桨距角 β 的增大而逐渐减小。所以当变速风力机运行在额定风速以上时, 可通过改变桨距角 β 来减小风力机的 C_p , 从而将风电系统输出功率保持在额定输出附近。同时根据式 (1), 当叶片桨距角 β 一定时, 风力机的输出功率有且仅有一个特定叶尖速比 λ 对应于最大风能利用效率, 此时的 λ 值即为最优叶尖速比 λ_{opt} , 如图 2 所示。

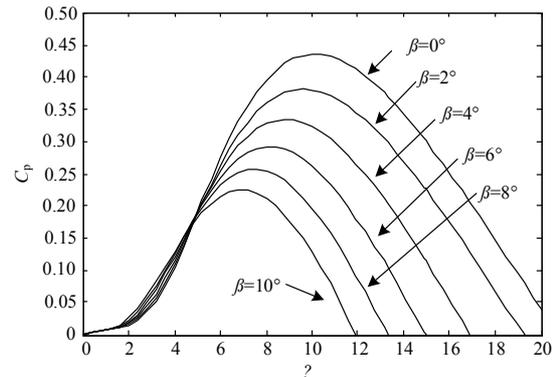


图 1 某风力机的性能曲线

Fig. 1 Characteristic performance curve of a wind turbine

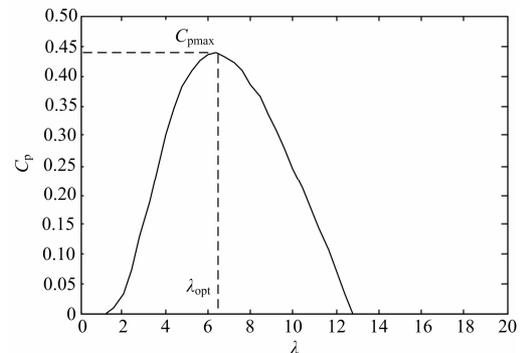


图 2 风能利用功率系数示意图

Fig. 2 Power coefficient of wind power utilization

在风速给定的情况下，风轮获得的功率将取决于功率系数。由于自然界的风速是时刻变化的，如果风力机的转速无法跟随风速的变化，则风力机的输出功率无法达到最优捕获。因此，当风速变化时，通过调节发电机转速，进而改变风力机转速，使其叶尖线速度与风速之比保持在 λ_{opt} 恒定，就可获得最佳的功率系数，获取最大功率输出。这就是额定风速下变速风力发电机组运行转速控制的基本目标。

2 结合叶尖速比法和爬山搜索法的改进型算法研究

2.1 爬山搜索法的原理

爬山搜索法不需要风力机和风速的精确参数，而是通过不断施加转速扰动，然后观察功率的变化情况，来达到最大功率跟踪。该方法通过使 $dP_w/dt = 0$ 这个条件来实现的，其中 P_w 是该时刻风力机的捕获功率。控制逻辑如表 1 和图 3 所示。

表 1 爬山法控制逻辑表

Table 1 Logic table of climbing control method

| dw/dt | $(dP_w/dt) < 0$ | $(dP_w/dt) > 0$ |
|---------|-----------------|-----------------|
| < 0 | I 区 | III 区 |
| > 0 | II 区 | IV 区 |

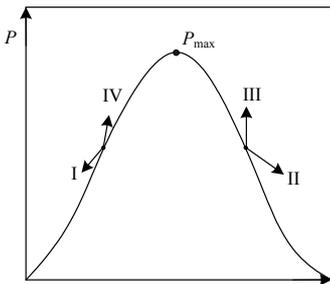


图 3 爬山法控制示意图

Fig. 3 Schematic of climbing control method

该方法存在的主要问题是：在最大功率跟踪中，由于不间断地以一定转速进行扰动，最终工作点将围绕最大功率点进行波动，但由于风速自身就是波动的，所以在最大功率点附近，扰动步长选取的足够小时，这种波动是可以接受的^[15]。但是对于恒定步长的爬山搜索法，若扰动步长选取太小，会使前期的跟踪速度变慢，不利于快速响应；若扰动步长选取的太大，会在最大功率点附近出现较大波动。所以对于一些在爬山搜索法上进行改进的算法，如：模糊推理最优梯度法、引进模拟退火法的改进型爬山搜索法，虽然改进方法不同，但是目标都是采用

变步长的扰动方式，只是在效果上略有差异。但由于引入了智能算法，所以提高了计算效率。

2.2 结合叶尖速比控制法和爬山搜索法的改进型算法

因为本方法的主要目的就是利用叶尖速比法在风力机启动或风速变化较大的情况下，快速爬升到测量风速所计算出的参考转速(这个转速与实际风速对应的参考转速，会有一定偏差，但是偏差不会很大。比如：以实际风速为 7 m/s、测量风速为 8 m/s)，然后再利用爬山搜索法以很小的固定步长进行最大功率跟踪，从而可以保证风速变化很大时，可以以最快的速度接近最大功率点，然后稳定在最大功率点；而且在风速稳定时，功率波动很小。这种算法不需要采用变步长，所以也不需要时时通过复杂算法来计算步长，优化算法结构，而且可利用风力机自带的叶尖速比曲线。本算法相比单独使用其中的一种方法，有更好的效果。

本改进型算法的控制流程如图 4 所示。该算法主要的流程可以分为三步：

1) 风力机启动后，风速变化量 $|\Delta v| \geq 1$ m/s，此时采用叶尖速比控制法计算出风力机的参考转速 ω_{ref1} (由于传感器测量精度和叶尖速比曲线的原因，该转速与实际风速所对应的参考转速有一定的误差，但是误差不会很大)；

2) 基于参考转速 ω_{ref1} ，控制风力机转速迅速跟随，当风力机转速接近 ω_{ref1} ，也就是 $|\omega_{ref1} - \omega| < \varepsilon$ ，切换到爬山搜索法进行最大功率跟踪；

3) 稳定后，风速变化量 $|\Delta v| < 1$ m/s，仍然采用爬山搜索法进行最大功率跟踪；

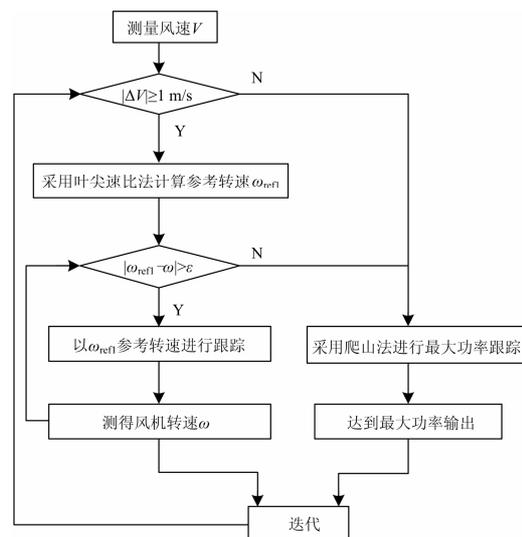


图 4 叶尖速比控制法和爬山搜索法相结合的控制流程

Fig. 4 Control flow of the combination of tip speed ratio method and climbing search method

4) 若风速变化量 $|\Delta v| \geq 1 \text{ m/s}$, 则仍然采用叶尖速比法重新计算参考转速 ω_{ref1} , 跳转到步骤 2), 进行循环。

3 仿真建模及结果

基于永磁同步风力发电机的系统结构和特性^[16-18], 建立其仿真模型, 模型包括风力机、永磁同步电机、PWM 整流器、PWM 逆变器^[19]、MPPT 最大功率跟踪器。模型参数如下: 风轮半径为 1.289 7 m, 转动惯量 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 永磁同步发电机极数为 28 极, 永磁通为 10 Wb, 定子 d 轴和 q 轴电感为 0.08 H, 电阻 0.006 Ω 。最佳叶尖速比为 0.48, 风轮桨距角为 10° 。

图 5 给出一条风速阶跃变化曲线 $v(t)=5u(t)+7u(t-6)$, $u(t)=1$, 在 6 s 之前实际风速为 5 m/s, 之后为 7 m/s; 在仿真过程中不考虑风力机启动过程, 默认为在 0~6 s 时间段内风力机在实际风速 $V=5 \text{ m/s}$ 下已经稳定地达到最大功率输出。

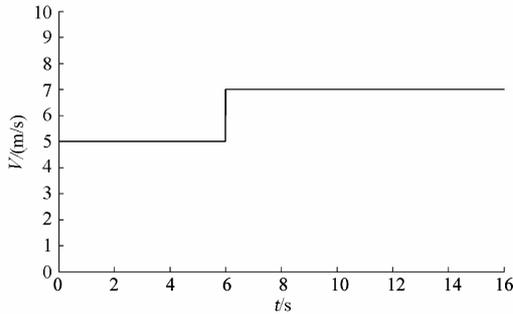


图 5 风速变化曲线

Fig. 5 Wind speed changing curve

图 6 给出风力发电机在叶尖速比控制法下的最大功率输出曲线。图中有三条曲线 P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_{e3} 。曲线 P_{e1} 是在风速传感器检测风速 $V_m=6 \text{ m/s} < 7 \text{ m/s}$ 时风力机所对应的功率输出; 曲线 P_{e2} 是在风速传感器检测风速 $V_m=8 \text{ m/s} > 7 \text{ m/s}$ 时风力机所对应的功

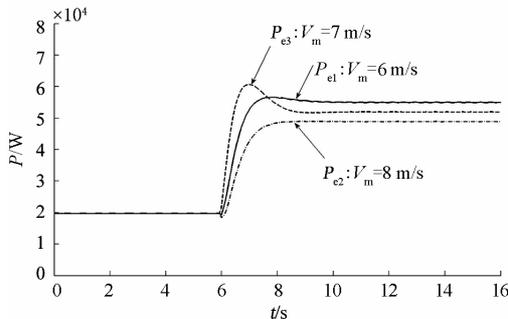


图 6 叶尖速比控制法下不同测量风速的输出功率曲线

Fig. 6 Output power curve of different measured wind speed using tip speed ratio control method

率输出; 曲线 P_{e3} 则是在风速传感器检测风速 $V_m=7 \text{ m/s} = 7 \text{ m/s}$ 时风力机所对应的功率输出。通过曲线可以分析得出以下结论。

1) 从图 6 中曲线 P_{e3} 可以得出, 当外界风速发生突变时, 采用叶尖速比法有比较好的快速跟随特性;

2) 对比曲线 P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_{e3} , 风力发电机功率输出稳定后, 有 $P_{e1} < P_{e3}$ 、 $P_{e2} < P_{e3}$ 。得出当风速传感器检测的风速与实际风速不一致, 无论是偏小还是偏大, 都会造成风力发电机的输出功率下降, 从而导致无法准确实现最大功率跟踪。

图 7 给出了风力机在叶尖速比法和爬山搜索法相结合的改进算法、爬山搜索法、叶尖速比控制法下的各对应的最大功率输出曲线。在仿真中风速传感器检测风速为 $V_m=8 \text{ m/s} > 7 \text{ m/s}$ 。通过曲线可以分析得出以下结论:

1) 风力机采用爬山搜索法进行最大功率跟踪时, 在外界风速发生突变情况下, 功率输出曲线上升相对叶尖速比法要缓慢。但是在不需要得到风速值的情况下, 依然可以达到最大功率输出。

2) 风力机采用改进算法, 在时间为 6 s 时, 风速由 5 m/s 上升到 7 m/s, 风速变化超过 1 m/s, 风力发电机采用叶尖速比法进行控制, 输出功率上升的很快, 有很好的动态特性。当快达到最大功率点时, 切换到爬山搜索法, 逐步达到最大功率。

3) 通过对三条输出功率曲线对比, 可知采用叶尖速比控制法和爬山搜索法相结合的改进算法综合了两种算法的优点, 使得风力机呈现较好地跟踪速度、动态特性和稳态特性。

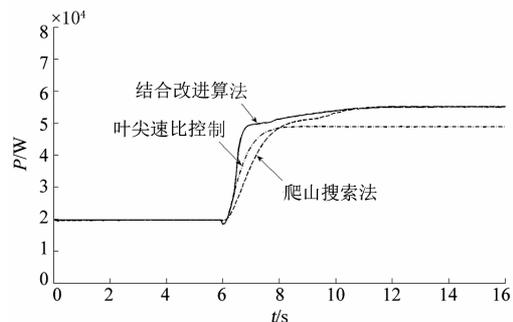


图 7 各控制算法的输出功率曲线

Fig. 7 Output power curve of the control algorithms

图 8 为图 7 中结合改进算法所对应的风力发电机的角速度随风速变化的波形图。从仿真曲线分析, 6 s 时刻, 风力机的角速度采用叶尖速比法, 风力机转速以测量风速计算出的参考转速 ω_{ref1} 快速上升; 在接近 ω_{ref1} 后, 切换到爬山搜索法, 由于其不受测量风速影响, 转速开始下降。此时对比图 7 中结合

改进算法,可以看出输出功率逐渐上升。最终转速趋向于一个稳定值,此值对应着最大输出功率。风力机转速随着风速变化而变化,超调量较少,响应速度快,在风速稳定时,角速度波动小,有很好的稳态特性。

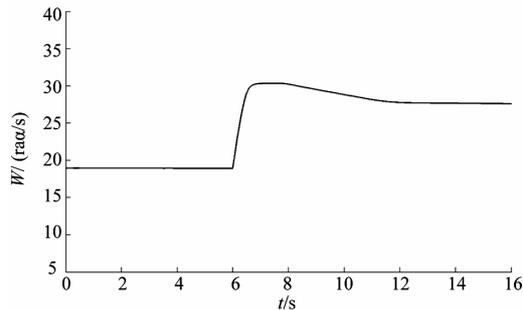


图8 叶尖速比控制法和爬山搜索法相结合的转速曲线

Fig. 8 Speed curve using the combination of tip speed ratio control method and climbing search method

4 总结

为了能够在大型风力发电机上利用其自身的风速传感器和风能利用曲线,并克服风速传感器测量值与实际风速值之间的误差,本文在叶尖速比控制算法基础上结合了爬山搜索法,利用爬山搜索法的无需知道风速值就可以实现最大功率跟踪的优点来弥补叶尖速比控制法的不准确的缺点。从而达到跟踪控制开始时利用叶尖速比控制法实现较好的跟踪速度和动态特性,然后在接近最大功率值附近时利用爬山搜索法实现准确的最大功率输出,并且具有较好的稳态特性。在 Matlab 环境下,建立了永磁直驱式风力发电机模型,仿真分析了风速变化对输出功率的影响,结果表明本文采用的叶尖速比控制和爬山搜索法相结合的改进型算法能够以较快的速度和较小的误差稳定在系统的最大功率点,提高了系统的快速性和高效性。

参考文献

- [1] 张小莲,殷明慧,周连俊,等. 风电机组最大功率点跟踪控制的影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 15-19.
ZHANG Xiaolian, YIN Minghui, ZHOU Lianjun, et al. Analysis on factors affecting performance of MPPT control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 15-19.
- [2] 张小莲,郝思鹏,李军,等. 基于灰色关联度的风机MPPT控制影响因素分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2):

- 445-449.
ZHANG Xiaolian, HAO Sipeng, LI Jun, et al. Grey correlation based analysis on impacting factors of maximum power point tracking control of wind power generating unit[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 445-449.
- [3] TANG C, SOONG W L, FREERE P, et al. Dynamic wind turbine output power reduction under varying wind speed conditions due to inertia[J]. Wind Energy, 2013, 16(4): 561-573.
- [4] LI Hui, SHI K L, MCLAREN P G. Neural network based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient[C] // Conference Record of the 39th IEEE Industry Applications Conference, Seattle, WA, USA, 2004: 2600-2608.
- [5] 钟沁宏,阮毅,赵梅花,等. 变步长爬山法在双馈风力发电系统最大风能跟踪控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 67-72.
ZHONG Qinrong, RUAN Yi, ZHAO Meihua, et al. Application of variable-step hill climbing searching in maximum power point tracking for DFIG wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 67-72.
- [6] 胡家兵,贺益康,刘其辉. 基于最佳功率给定的最大风能追踪控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 32-38.
HU Jiabing, HE Yikang, LIU Qihui. Optimized active power reference based maximum wind energy tracking control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 32-38.
- [7] 南晓强,李群湛,吴浩. 改进的最大功率跟踪算法在变速风力发电系统中的应用[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 102-105.
NAN Xiaoqiang, LI Qunzhan, WU Hao. Improved maximum power point tracking algorithms used in variable-speed wind-power generation system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 102-105.
- [8] 张秀玲,谭光忠,张少宇,等. 采用模糊推理最优梯度法的风力发电系统最大功率点跟踪研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 119-123.
ZHANG Xiuling, TAN Guangzhong, ZHANG Shaoyu,

- et al. Research on maximum power point tracking of wind power generation system based on fuzzy inference optimal gradient[J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 31(2): 119-123.
- [9] 孟克其劳, 陈虎, 钱春震, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率追踪策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(22): 83-87.
MENG Keqilao, CHEN Hu, QIAN Chunzhen, et al. Study on maximum power point tracking strategy for direct-driven permanent magnet synchronous generating system[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(22): 83-87.
- [10] 罗宇锋, 刘勇, 陈建磊. 模糊控制的爬山法在风电系统中的应用研究[J]. *控制工程*, 2014, 21(3): 378-381.
LUO Yufeng, LIU Yong, CHEN Jianlei. Climbing method of fuzzy control in the wind power system[J]. *Control Engineering of China*, 2014, 21(3): 378-381.
- [11] 王志兵. 基于恒压法结合变步长电导增量法的最大功率点跟踪[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(19): 4638-4642.
WANG Zhibing. Maximum power point tracking by using improved incond method control for photovoltaic energy generation system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(19): 4638-4642.
- [12] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 130-142.
- [13] 郭鹏. 模糊前馈与模糊 PID 结合的风力发电机组变桨距控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(8): 123-128.
GUO Peng. Variable pitch control of wind turbine generator combined with fuzzy feed forward and fuzzy PID controller[J]. *Electric Machines and Control*, 2010, 30(8): 123-128.
- [14] CONROY J F, WATSON R. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2007, 1(3): 182-189.
- [15] SIMOES M G, BOSE B K, SPIEGEL R J. Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, 12(1): 87-95.
- [16] 张明锐, 陈洁, 王之馨, 等. 一种新型的永磁同步风力发电机并网系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(14): 141-148.
ZHANG Mingrui, CHEN Jie, WANG Zhixin, et al. A new permanent magnet synchronous wind-power generation grid-connected system[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(14): 141-148.
- [17] 董淑惠, 王毅. 永磁直驱风力发电机组两种主要功率控制策略的对比研究[J]. *电网与清洁能源*, 2014, 30(4): 73-80.
DONG Shuhui, WANG Yi. Comparative Analysis on two main power control strategies of PMSG-based Wind Turbines[J]. *Power System and Clean Energy*, 2014, 30(4): 73-80.
- [18] 孙红霞, 赵彩宏. 光伏/风电并网测试装置的设计 and 开发[J]. *高压电器*, 2014, 50(5): 103-108.
SUN Hongxia, ZHAO Caihong. Design and development of testing devices for photovoltaic/wind power grid connection[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(5): 103-108.
- [19] 杨柏旺, 余阳阳, 赵德勇, 等. 直驱永磁同步风力发电系统双 PWM 控制策略[J]. *微特电机*, 2014, 42(11): 76-79.
YANG Bowang, SHE Yangyang, ZHAO Deyong, et al. Double PWM control strategy of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2014, 42(11): 76-79.

收稿日期: 2014-09-30; 修回日期: 2014-11-06

作者简介:

李咸善(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、水电站仿真与控制、微电网技术等方面的研究; E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn

徐浩(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事孤岛微网动态重构的分区理论与解列策略保护协调与定值优化、不可调度 DG 对负荷的再支撑等方面的研究; E-mail: xh446763378@163.com

杜于龙(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事风蓄联合发电、电力系统继电保护等方面研究。

(编辑 姜新丽)