

文章编号:1000-582X(2010)08-058-06

双馈风力发电机组转子侧控制策略改进

胡雪松¹, 孙才新¹, 李 辉¹, 赵 猛¹, 唐显虎²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆大学, 重庆 400044;

2. 重庆前卫仪表厂风电控制设备分公司, 重庆 401121)

摘 要:基于现场风电机组功率转速曲线,对双馈风电机组常规功率控制策略的不足进行了分析,考虑机组转速限制条件和功率快速跟踪控制要求,对双馈风电机组转子侧变流器功率解耦控制策略以及变桨控制策略进行了改进,即转子侧有功控制环采用风力机输出转矩直接控制,并加转速外环实现对转速的准确控制;变桨控制策略采用直接功率控制。最后,应用提出的改进控制策略对双馈风电机组全程运行性能进行了仿真,并和常规控制策略进行了比较。结果验证了控制策略改进的有效性和正确性。

关键词:风力发电;风力机;双馈发电机;最大风能捕获;变桨控制

中图分类号:TM614

文献标志码:A

An improved rotor-side control strategy of double-fed wind turbine generation system

HU Xue-shong¹, SUN Cai-xin¹, LI Hui¹, ZHAO Meng¹, TANG Xian-hu²

(1. State Key Laboratory of Equipment and System Safety of Power Transmission and Distribution & New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Wind Power Control Equipment Sub-Company of Chongqing Qianwei Instrument & Meter Factory, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: Based on a on-site wind turbine's output active-power vs. generator speed curve, the shortage of conventional power control strategies of doubly-fed wind turbine generation system are analyzed. Considering the generator speed restriction and active-power fast-track control requirement, the power decoupling control strategy in the rotor-side converter and variable pitch control strategy are improved, that is, an output mechanical torque of wind turbine and the generator speed of DFIG are used in the rotor-side active power control loop in order to achieve an accurate optimal speed control, as well as a direct active-power control method is also adopted in the variable pitch control strategy. Finally, the overall operational performances of DFIG wind turbine generation system using the proposed control strategies are simulated, and also compared with the conventional control strategies. The results show that the improved control strategy is more valid and correct.

Key words: wind power; wind turbines; doubly fed induction generator; maximal wind energy capture; variable pitch control

收稿日期:2010-03-11

基金项目:重庆市科技攻关计划项目(CSTC,2008AB3050);教育部留学回国人员启动基金资助项目(2008-890-2);重庆市自然科学基金资助项目资助项目(CSTC2008BB6038)

作者简介:胡雪松(1972-),男,重庆大学博士研究生,主要从事风能发电研究,(E-mail)huxs@cqu.edu.cn。

风能是一种随机变化的能源,为提高风能的利用率,并且更好地适应电网,变速恒频双馈发电机(DFIG)的风力发电技术具有很大的优越性^[1-4]。DFIG具有良好的稳定性和较强的进相运行能力,具有在原动机转速变化情况下实现定子恒频的运行特性。目前,国内兆瓦级双馈风电机组的控制系统主要从国外引进,国内对于双馈风电机组建模和控制策略的研究大都处于原理性的理论仿真和实验室研究阶段,能否从现有风电机组运行特性出发,建立既符合理论又适合工程实际的风电机组的控制策略建模与仿真,对分析实际风电机组运行性能分析具有重要意义。

目前,对双馈风电机组的控制策略的研究已有较多文献报道,如文献[5]采用有功功率外环的控制策略对风电机组功率解耦特性进行研究,但其控制策略研究出发点是在假设风电机组转速和功率同时达到限制条件的理想情况来考虑的,在实际机组运行情况中往往是机组转速首先受到机械条件的限制,此时机组有功功率通常还没有达到额定功率,如果此时再利用查功率转速表来得到功率给定值,就不能准确的实现最大风能捕获的效果。文献[6-7]在有功功率控制中则采用转速外环输出直接作为电流内环的输入进行研究,往往存在发电机有功功率不能快速跟随风力机输出功率变化的控制问题。虽然文献[8]考虑机组转速的限制因素,在风力机的变桨控制策略采用转速和有功功率的控制方法,但是当转速达到限制条件,而功率仍然处于低于额定功率条件下也不能很好地实现机组最大风能捕获和跟踪运行。

笔者从某 2 MW 双馈风电机组实际运行的功率和转速特性出发,对现有控制策略存在的不足进行了分析,并对机组转子侧有功功率控制和变桨控制策略进行了改进,即提出了采用风力机输出转矩直接控制的方法,增加转速外环来实现对转速的准确控制,同时变桨控制策略则采用有功功率控制的方法来保证发电机输出功率维持在额定功率附近。

1 双馈风电机组常规功率控制策略分析

双馈风力发电机组的运行状况可以划分为以下几个阶段^[9-11]:

1) 起动阶段:风速在切入风速以下,不涉及发电机转速控制。

2) 额定风速以下:

a) 变速运行区,使转速跟随风速变化,保持功率系数 C_p 恒定。

b) 恒速运行区,受机械限制,转速不能再高。

3) 恒功率运行区:受电力电子器件限制。

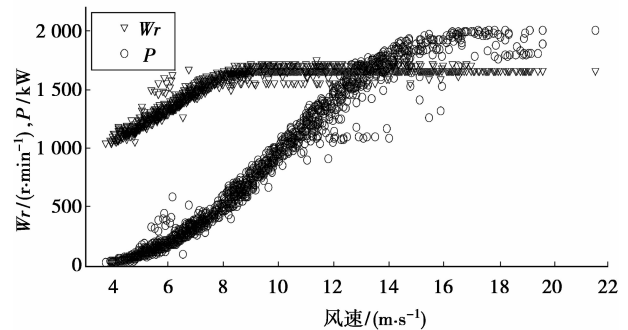
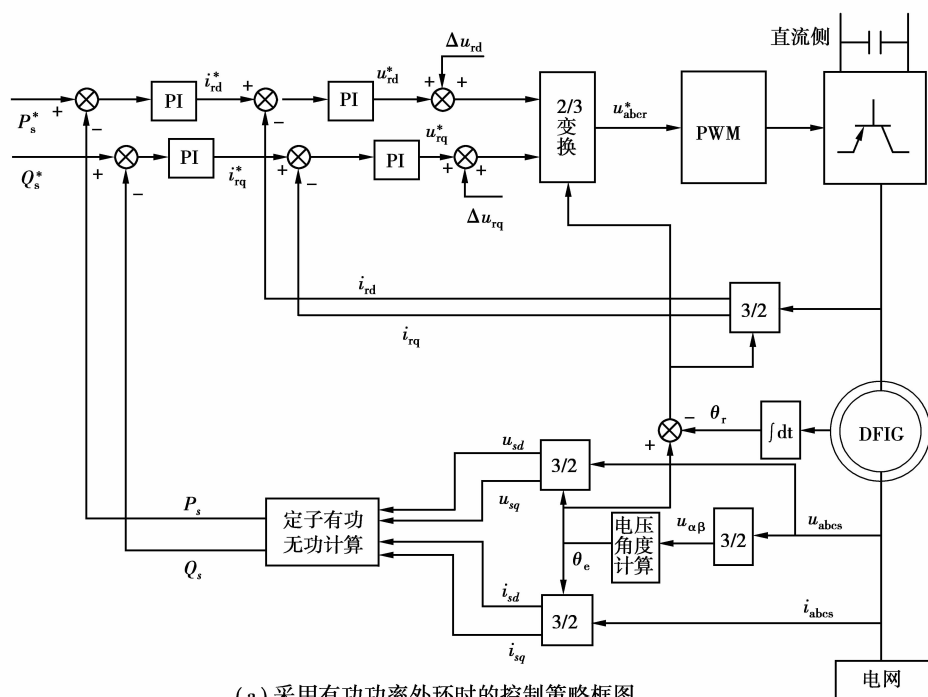


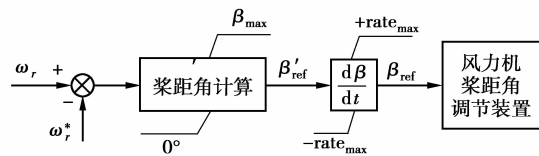
图 1 现场运行的双馈风电机组转速和功率的变化曲线

图 1 为某 2 MW 双馈风力发电机组现场运行时的转速和功率曲线^[12],从图中可以看出在风速 8 m/s 时机组转速就达到限制值 1780 r/min 附近,此时有功功率还很低,不到 800 kW。当采用常规功率控制的有功功率外环控制方法及其变桨控制策略时^[5-8],将可能导致由于机组转速的限制导致无法实现最大风能捕获的控制。图 2(a)中为采用有功功率外环时的转子侧常规控制策略框图^[13-14],图 2(b)是相应的变桨控制策略以及图 2(c)是为最大风能捕获运行特性曲线。

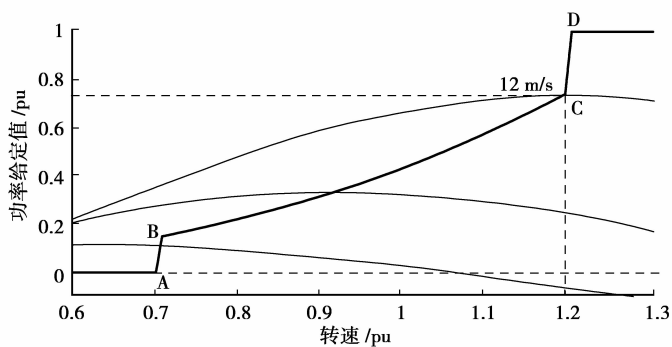
从图 2(c)中可以看出 CD 段基本是恒速段,其风力机的限制转速为 1.2 pu,与此同时机组有功功率即达到了额定功率,然而在实际运行的风电机组中,转速限制和功率限制两者并不是同时达到的,如图 1 中实际风电机组运行特性可看出,机组转速往往首先达到机械约束的条件,如果采用该常规有功功率外环控制策略时,变桨控制策略则采用转速控制环,当机组达到转速限制时,变桨控制系统工作,使得变桨距角增加,然而此时机组的有功功率并没有达到额定功率,导致机组并不能有效地实现最大风能捕获。因此,采用该常规有功功率外环控制及其对应的变桨控制策略很难适应实际风电机组转速先达到机械约束限制的情况。



(a) 采用有功功率外环时的控制策略框图



(b) 采用转速控制的变桨控制策略框图



(c) 风电机组最大风能捕获特性

图 2 采用有功功率外环时的控制策略及功率特性曲线

2 双馈风电机组改进控制策略

为了满足图 1 所示现场风电机组实际运行状况,对双馈风电机组转子侧有功功率环以及变桨控制策略进行了改进。下图为基于定子磁链定向的功率解耦控制策略改进框图。

图中,内环仍然为电流控制,考虑机组转速的限制因素,外环则采用转速控制环,利用 DFIG 有功功率(电磁转矩)和无功功率的解耦控制特点和优势,根据机组转矩平衡方程来控制机组的电磁转矩,从

而实现最优转速的控制,达到风电机组最大风能捕获和跟踪的目的。图 3 的机组转速给定信号则可通过计算输出电功率以及机组功率特性查表可得,由于考虑了机组转速限制因素,在保持转速一定的情况下,机组输出功率值可以不同。

其中,DFIG 的转子电流的给定值由电磁转矩计算式(1)计算得到。而 DFIG 的电磁转矩则根据机组的转矩平衡方程式(2)可得。

$$T_e = \frac{L_m}{L_s} n_p \psi_s i_{rd}, \quad (1)$$

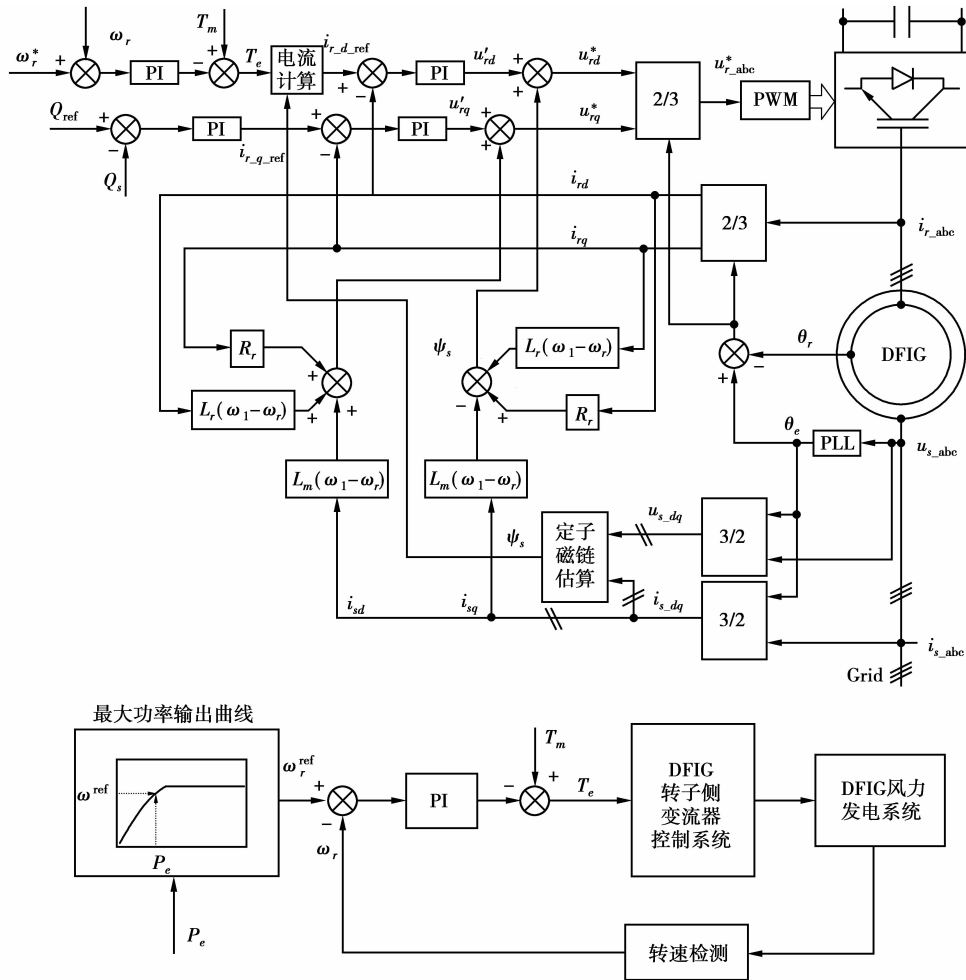


图 3 改进的功率解耦控制策略框图

$$T_L - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2)$$

式中,式中 L_s 、 L_m 分别定子绕组的自感和定、转子绕组间的互感; n_p 为电机极对数; ψ_s 为定子磁链; i_{rd} 为转子电流的 d 轴分量。 T_L 为风力机输出的机械转矩; T_e 为发电机的电磁转矩; J 为机组的转动惯量; ω_r 为发电机转速。

3 变桨距控制策略

当风速高于额定风速以上运行时,变速风力发电机组的控制策略通常通过调节风力机的功率系数,保持发电机输出恒定的功率,并使风力发电机组的传动系统具有良好的柔性^[8,15]。变桨距控制策略就是通过改变风力机桨距角,进而改变其功率系数,从而调节风力机输出的机械转矩。理想情况下,可以通过测量风速,然后根据风力机控制特性计算桨距角的给定值,再通过伺服系统实现风力机桨距角调节;但是在实际系统中,风速的精确测量是很困难的,其测量误差必将导致输出功率的波动。为了避免风速的测量,采用有功功率控制来得到桨距角的

给定值。

该控制策略的优点在于能够有效地控制 DFIG 总的输出电能功率 P 始终保持额定值不变;通过变桨距控制系统改变桨距角 β ,有效抑制风力机输出转矩 T_m 的持续上升,减小了系统的极限载荷,使传动系统具备一定的柔性。图 4 显示了该变桨距控制策略的基本原理框图:

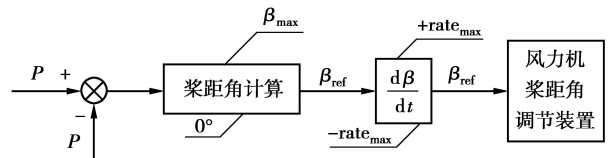


图 4 变桨距控制系统基本原理框图

图 4 中 P 为系统实时测量的 DFIG 发电机输出有功功率, P^* 为有功功率限制值, β'_{ref} 是桨距角未加限制时的参考值, K_β 是桨距角变化系数, $rate_{max}$ 是桨距角最大变化率, β_{ref} 桨距角参考值,在 $P > P^*$ 时变桨距系统开始工作;桨距角计算为采用固定增

益控制,即 $\beta'_{ref} = K_{\beta}(P - P^*)$;同时限制桨距角变化范围 ($0 \sim \beta_{max}$), 变化速度范围 ($-\text{rate}_{max} \sim +\text{rate}_{max}$);最后输出桨距角参考值 β_{ref} 至风力机桨距角调节装置。

4 双馈风电机组全程控制仿真比较

为了验证笔者提出的改进控制策略有效性,应用 Matlab/simulink 仿真平台,按照上述改进控制策略进行了建模,应用某 2 MW 双馈风电机组实际运行数据进行了全程控制策略的仿真(机组参数见附录),并和采用常规功率控制策略的结果进行了比较。图 5-6 为该双馈风电机组滤波后的风速以及功率和转速特性曲线。图 7 为 2 MW 双馈风电机组运行性能的仿真比较结果,其中图 7(a)和(b)的虚线表示为采用常规功率控制策略的仿真结果,点划线和实线分别为采用改进控制策略的仿真结果和实际机组的测试结果。图 8 为采用改进控制策略后 2 MW 双馈风电机组定、转子侧有功和无功功率以及变桨距的仿真结果。

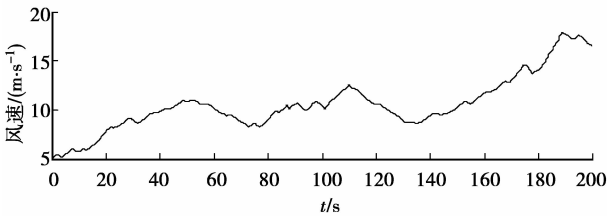


图 5 2 MW 风电机组风速变化曲线

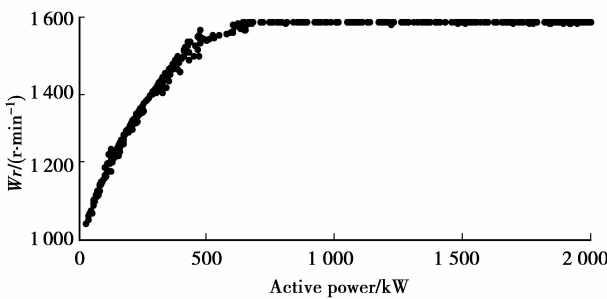
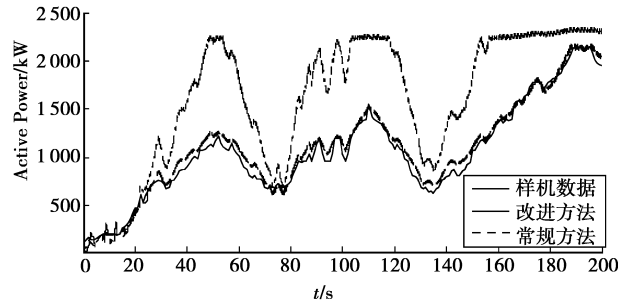
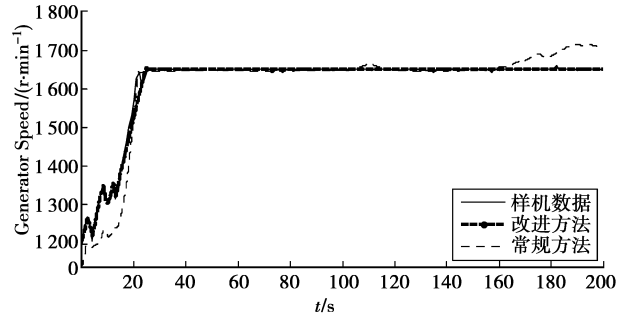


图 6 2 MW 风电机组功率—转速曲线

从图 7 的结果比较可以看出,通过应用改进控制策略后,风电机组的运行性能曲线包括有功功率和转速都与样机实际测试数据曲线基本吻合,验证了笔者提出的改进控制策略的正确性和有效性。而采用常规功率控制方法时,由于没有考虑转速的限制使得其有功功率的仿真结果与样机数据出现了很大的误差,如图 7(a)所示;在采用转速信号控制的变桨控制策略后转速仍然出现小幅的增加,如图 7(b)所示。

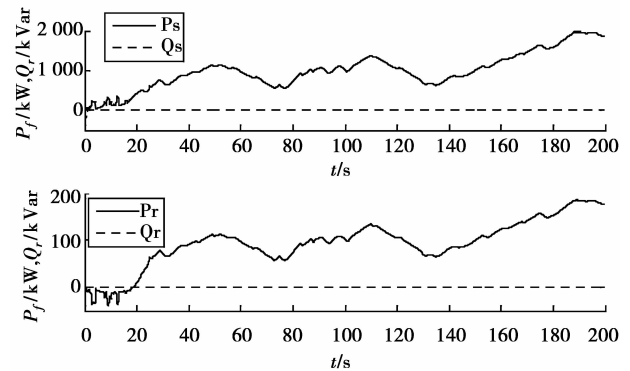


(a)风电机组有功功率仿真比较

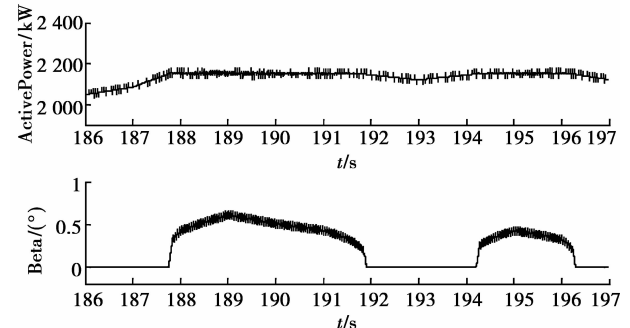


(b)双馈发电机组转速仿真比较

图 7 2 MW 风电机组全程控制运行性能结果比较



(a)定、转子侧的有功、无功功率仿真结果



(b)变桨距性能仿真结果

图 8 采用改进控制策略时 2 MW 风电机组功率和桨距角的仿真结果

此外,从图 8(a)仿真结果可以看出,采用改进的功率控制策略后,双馈风电机组仍然具有很好的稳态功率解耦控制特性,并且采用改进的控制策略后,在额定风速以上,双馈风电机组具有较好的恒定功率控制特性。

5 结 论

基于现场风电机组测试的功率转速曲线,在双馈风电机组常规功率控制策略很难满足和适应实际机组转速限制的要求的基础上,对双馈风电机组转子侧变流器功率解耦控制策略以及变桨控制策略进行了改进。即通过对转子侧有功控制环采用风力机输出转矩直接控制,并加转速外环实现对转速的准确控制,变桨控制策略采用直接功率控制。最后,应用提出的改进控制策略对双馈风电机组全程运行性能进行了仿真,并和常规功率控制策略和现场测试数据进行了比较和分析。结果验证了控制策略改进的有效性和正确性。研究结论对提高机组最大风能捕获的精确度,提高有功功率快速响应能力具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] AKHMATOV V. Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators [J]. Wind Engineering, 2002, 27(2): 197-207.
- [2] KO H S, YOON G G, KYUNG N H, et al. Modeling and control of DFIG based variable-speed wind-turbine [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1841-1849.
- [3] TAPIA A G, OSTOLAZA J X, Saenz J R. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. IEEE transactions on Energy Conversion, 2003, 8(2): 194-204.
- [4] CARTWRIGHT P, HOLDSWORTH L, EKANAYAKE J B, et al. Co-ordinated voltage control strategy for a doublyfed induction generator (DFIG)-based wind farm[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, 2004, 151(4): 495-502.
- [5] 王涛, 邹毅军, 年晓红等. 并网双馈风力发电实时仿真控制方案研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(14): 4308-4310.
WANG TAO, ZOU YI-JUN, NIAN XIAO-HONG, et al. Real-time simulation of DFIG-based wind farm connected to power grid [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(14): 4308-4310.
- [6] 马伟伟, 俞俊杰, 吴国祥等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 205-207.
MA YI-WEI, YU JUN-JIE, 无 WU GUO-XIANG, et al. MPPT control strategy for doubly-fed wind power generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 205-207.
- [7] 王荣熙, 林飞, 郝瑞祥等. 变速恒频双馈异步发电机的控制策略及仿真[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(4): 26-29.
WANG RONG-XI, LIN FEI, HAO RUI-XIANG, et al. VSCF doubly-fed asynchronous generator control strategy and simulation [J]. Electric Machines & Control Application, 2009, 36(4): 26-29.
- [8] 何青, 钟志明, 陈文福. 基于 PSCAD /EMTDC 的双馈感应风电机组变桨距控制仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 41-43.
HE QING, ZHONG ZHI-MING, CHEN WEN-FU. Simulation and analysis for pitch control of doubly fed induction wind turbine with PSCAD /EMTDC software[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(3): 41-43.
- [9] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追逐控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62-67.
LIU QI-HUI, HE YI-KANG, ZHAO REN-DE. The maximal wind energy tracing control of variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 62-67.
- [10] 朱卫平, 王秀丽, 王锡凡. 变速变频风力发电系统最优风能捕获运行方式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 94-97.
ZHU WEI-PING, WANG XIU-LI, WANG XI-FAN. Optimal wind power capturing operational mode of a variable-speed variable-frequency wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 94-97.
- [11] HU JIABING, HE YIKANG. Modeling and control of grid-connected voltage sourced converters under generalized unbalanced operation conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 903-913.
- [12] 郎斌斌, 穆钢, 严干贵, 等. 联网风电机组风速-功率特性曲线的研究[J]. 电网技术, 2008, 12(32): 70-74.
Lang Binbin, Mu Gang, Yan Gangui, etc. Research on Wind Speed VS Output Power Characteristic Curve of Wind Power Generator Interconnected With Power Grid[J]. Power System Technology, 2008, 12(32): 70-74.
- [13] BHOWMIK S, SPEE R, ENSLIN J H R. Performance optimization for doubly fed wind power generationsystems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(4): 949-958.
- [14] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU X G, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Trans Power Syst, 2003, 18(2): 803-809.
- [15] 耿华, 杨耕. 变速变桨距风电系统的功率水平控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 130-132.
Geng Hua, Yang Geng. Output Power Level Control of a Variable-speed Variable-pitch Wind Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 130-132.

(编辑 张小强)