

DOI: 10.7667/PSPC160154

大型风电机组机组层 AGC 控制策略研究

许昌¹, 魏媛^{1,2}, 李涛², 韩星星¹, Wenzhong Shen³, 王长宝⁴, 石磊⁴, 陈星莺¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007;
3. 丹麦科技大学风能系, Lyngby DK-2800; 4. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对传统控制策略下的风电机组输出波动性大、随机性强, 需其他设备协调风电场出力的缺点, 提出一种机组层 WT-AGC 控制策略, 并对该控制策略的工作原理进行了详细的分析。在考虑风电机组运行状态及风电场调度要求的基础上, 将 WT-AGC 策略下机组运行方式分为 2 种: 调度指令高于机组最大出力能力的常规运行和调度指令低于机组最大出力能力的限功率运行。通过风电机组转速调节和变桨距机构动作配合, 实现风电机组输出稳定, 满足风电场调度要求, 并对某实际双馈风电机组进行了仿真。结果表明该控制策略不但可以实现风电机组的可调度输出, 而且提高风电机组并网后的功率稳定性, 验证了所提策略的正确性。

关键词: 机组层 WT-AGC; 转速控制; 桨距角控制; 输出稳定性

Research on automatic generation turbine control strategy of large wind turbine

XU Chang¹, WEI Yuan^{1,2}, LI Tao², HAN Xingxing¹, Wenzhong SHEN³, WANG Changbao⁴, SHI Lei⁴, CHEN Xingying¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450007, China; 3. Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, Lyngby DK-2800, Denmark; 4. Nanjing Nari Group Corporation, Nanjing 210003, China)

Abstract: Wind turbine output has characters of large volatility and strong randomness, and needs other equipment to coordinate under the traditional control strategies. The paper proposes and analyzes the working principle of a unit layer WT-AGC control strategy in detail. Considering operating state of wind turbine and requirements of wind farms, unit operating modes are divided into two ones under WT-AGC control strategy, which include the traditional operation of order higher than the maximum capacity and limited power operation of order below the maximum capacity of the unit. Through controlling the rotating speed of wind turbine and pitch-regulated mechanism, the steady output of wind turbine is achieved to meet the scheduling requirements of wind farms, which has been simulated by a real double-fed wind turbine. The results show the WT-AGC control strategy not only achieves output scheduleability of wind turbine, but also improves stability of wind power integration, which verify the validity of proposed strategy.

This work is supported by the International Cooperation of Science and Technology Special Project (No. 2014DFG62530), State Grid NARI Technology Projects (the Wind Generator Intelligent Control) (No. SGTYHT/14-JS-188), and Science and Technology Project of Nantong City (No. BK2014028).

Key words: unit layer WT-AGC; rotational speed control; pitch angle control; output schedulability

0 引言

目前, 风电装机比例大幅增多, 风电渗透率不断增大。然而, 风电的间歇性、波动性及反调峰特

性对电能质量造成一定的影响, 甚至威胁到电力系统的正常运行。此外, 我国风能资源与电力负荷存在分布差异, 电网调峰能力、风电就地消纳能力和电网输送能力有限, 从 2010 年开始, “弃风限电”现象开始突显^[1-2]。如何增强风电的可调性、增加风电可控性是风电领域的研究热点之一。

当风速低于额定风速时, 基于传统风电机组控制策略(Traditional wind power control, T-WPC)下的

基金项目: 中丹国际科技合作专项项目(2014DFG62530); 国网南瑞科技项目(SGTYHT/14-JS-188); 南通市科技项目(BK2014028)

机组端出力随风速变化产生较大波动, 为保证系统安全运行, 常采用调节常规发电机组^[3-5]、预留旋转备用容量^[6]、增加风电场储能设备^[7]等方式协调配合风电场出力。上述方法不仅受限于电力系统调峰能力, 还会增加系统运行成本。

针对上述问题, 风电场应具备自动发电控制(Automatic generation control, AGC)能力, 在系统调度周期内, 以风电机组运行状态为依据, 主动控制机组输出功率, 满足系统调度要求, 减小常规发电机组的运行调度。风电场 AGC 分为两层^[8]: (1) 风电场层自动发电控制(Wind Farm Automatic generation control, WF-AGC), 负责实时监测全部机组运行状态, 依据系统调度要求对各台风电机组下发风电场层调度指令; (2) 机组层自动发电控制(Wind Turbine Automatic generation control, WT-AGC), 根据风电场层下发的有功调度指令, 通过控制转速及变桨机构使功率输出稳定, 实现风电机组 AGC 控制。目前, 不少学者对风电场层功率分配策略进行了研究。通过采用超短期风速预测信息^[9-10]、风功率预测信息^[11-13]、区间预测信息^[14]结合电网要求, 准确计算风电场可调节裕度是风电场层 AGC 的关键; 风电场内有功分配算法是风电场层 AGC 的核心^[15-18], 文献[19]对风电场功率受到限制的机组出力问题进行了研究, 采用将功率参考值按比例平均分配的策略, 实现风电场有功分配。文献[20]根据超短期风速预测结果, 采用线性规划算法, 实现风电机组的优化组合。文献[21]考虑到机组安全可靠运行, 提出以减小机组载荷、延长风机寿命的风电场有功分配策略。上述学者对风电场层分配策略的研究为实现风电场 AGC 控制奠定了重要基础。

总之, 现有研究主要集中在风电场层 AGC 调度裕度、分配策略等方面, 而对风电机组层 AGC 控制策略研究甚少。本文以 1.5 MW 双馈风力发电机组为例, 针对风电机组层提出一种新的 AGC 控制策略, 并以某实际风电机组为例, 验证该控制策略的正确性和有效性。

1 基本原理

1.1 传统风电机组控制策略 T-WPC

定义风能利用系数 C_p 为

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

风力机最大出力 P_{\max} 为

$$P_{\max} = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_{p\max} \quad (2)$$

式中: P 为风力机输出功率, W; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; S 为风轮的扫掠面积, m^2 ; v 为来流风速, m/s ; λ 为叶尖速比; β 为桨距角。 C_p 为风能利用系数, 由叶尖速比 λ 及桨距角 β 决定。 $C_{p\max}$ 为最大风能利用系数, P_{\max} 表示风力机当前最大出力能力。

对于大型双馈风力发电机组, 根据不同的风速及机组特性, 可将机组控制策略大致划分为三个阶段:

1) 启动并网控制

风速达到启动风速时, 变桨距机构迅速动作, 控制风力机叶片从顺桨旋转一定角度, 增大攻角叶片获得升力, 风力机开始转动; 当风速达到或大于切入风速, 满足并网条件, 风电机组并入电网。

2) 最大风功率追踪(MPPT)控制

风力机组处于额定风速以下, 采用最大风功率追踪(MPPT)技术控制转速, 控制结构如图 1 所示。

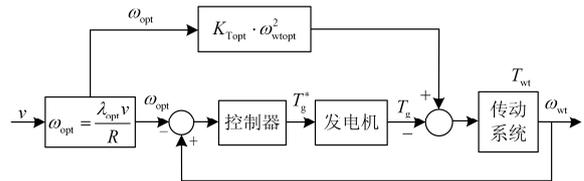


图 1 最大风功率追踪 (MPPT) 控制结构

Fig. 1 Control structures of MPPT

在桨距角固定的情况下, 风力机的最大功率 P_{opt} 与风力机转速 ω 有特定的关系曲线, 如图 2 所示。随着来流风速 v 的不断变化, 为保持叶尖速比 λ_{opt} , 通过控制转速 ω , 使风电机组出力追踪 P_{opt} 曲线。

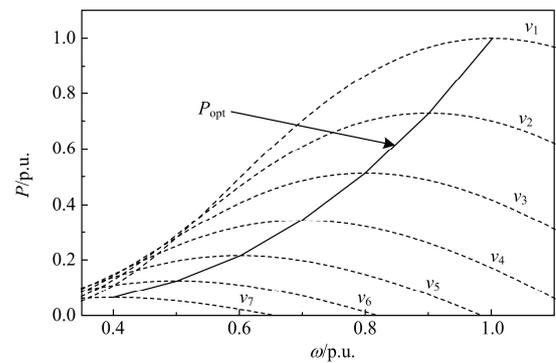


图 2 最大风功率追踪 (MPPT) 原理

Fig. 2 Principle of MPPT

3) 恒功率控制

风速高于额定风速时, 发电机及变频器达到其功率极限, 为保证风电机组安全运行, 必须限制风电机组输出, 通过改变叶片桨距角, 影响风力机气动特性, 降低风力机功率捕获, 实现风电机组恒功率控制。

1.2 机组层 AGC 控制策略 WT-AGC

风电机组运行状态及风电场层下发的有功指令 P_{set} 是影响机组层 AGC 控制策略的主要因素。机组运行状态决定风力发电机出力范围, 风电场 AGC 系统要考虑电网要求及全场状态, 也要合理为各台机组分配有功任务。

风电机组运行状态及风电场层下发的有功指令 P_{set} 是进行风电限功率控制策略的主要参考依据。风电机组在限功率控制策略下的运行可以分为调度指令高于机组最大出力能力的常规运行和调度指令低于机组最大出力能力的限功率运行。

1) 调度指令高于机组最大出力能力的常规运行

机组出力指令高于其最大出力能力时, 为尽可能使机组出力逼近设定值, 充分利用风能资源, 提高机组运行经济效益, 机组按传统控制策略运行, 如图 3 所示, 即: 当风速低于额定风速, 机组按照最大风功率追踪控制策略运行; 当风速高于额定风速, 为保护发电机及变流器安全, 通过变桨距调节限制风电机组出力。

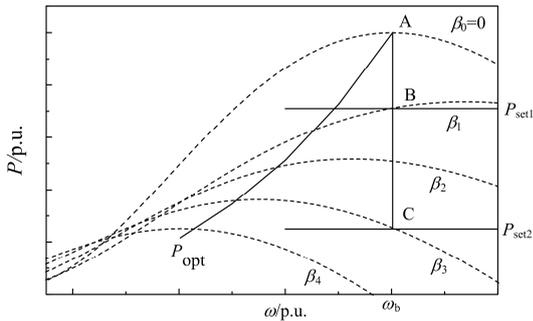


图 3 全风速下的常规运行原理

Fig. 3 Wind turbine operating under full wind speed

2) 调度指令低于机组最大出力能力的限功率运行

风电机组限功率运行原理示意图如图 4 所示。机组出力指令低于最大出力时, 可以采用桨距角和发电机转速调限制机组出力。

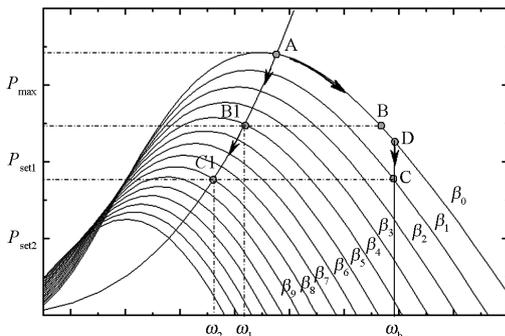


图 4 限功率运行原理示意图

Fig. 4 Principle of limited power operation

由图 4 可以看出, 风电机组最大出力为 P_{max} , 运行于 A 点。限功率要求为 P_{set2} 时, 风电机组实现限功率控制可以采用两种方式进行调节: (1)同时调节转速和桨距角, 保持风力机叶尖速比为 λ_{opt} , 风电机组出力按 P_{opt} 曲线下降, 机组减小转速至 ω_2 , 桨距角增大至 β_8 , 机组运行轨迹为 A-B1-C1, 此时, 机组出力满足限功率出力要求。(2)先采用转速调节至机组额定转速 ω_b , 机组运行轨迹为 A-B-D, 此时, D 点机组出力仍大于限功率出力要求 P_{set2} , 机组通过变桨距调节, 增大桨距角至 β_1 , 实现机组限功率出力, 机组稳定在 C 点运行。

上述两种限功率控制方式均能够实现限功率要求, 对于限功率要求为 P_{set2} 时, 同时调节转速和桨距角的控制方式桨距角由 β_0 增加至 β_8 , 变桨距机构动作幅度较大; 优先调节转速的限功率控制桨距角仅需增加至 β_2 。对于限功率要求为 P_{set1} 时, 优先调节转速的限功率控制无需变桨能够满足机组输出要求。

因此, 同时调节转速和桨距角能够保持最佳叶尖速比, 控制精度较高, 变桨距机构动作频繁, 易引起机械损伤, 是引起故障频繁的重要原因之一。优先调节转速的限功率控制, 在允许范围内采用发电机调节转速, 机组按 A-B 段运行。由于无须变桨, 发电机能够快速响应出力要求, 实现机组限功率控制, 避免了变桨距系统的频繁动作, 有效减小变桨机构的机械磨损。此外, 这种运行方式下的机组保持较高转速, 能够将部分弃风风能转化为风轮的动能, 在一定程度上提高了风能的利用效率。

2 机组层控制器设计

图 5 为实现上述控制策略的控制框图实现。

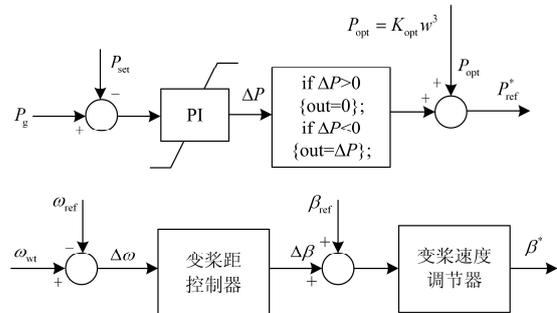


图 5 风电 AGC 机组层控制框图

Fig. 5 Control Structures of WT-AGC

其中: P_g 为机组实际出力; K_{opt} 表示实际转速所对应最佳风功率的转换系数, 变桨速度调节器为变桨执行机构。在变桨距过程中, 调节器的最高调节速

率受到一定限制。发电机有功功率参考值的计算公式为

$$P_{ref}^* = P_{max} + \Delta P, P_{max} > P_{set} \quad (3)$$

$$P_{ref}^* = P_{max}, P_{max} \leq P_{set} \quad (4)$$

式中, P_{ref}^* 为发电机有功功率参考值, W; P_{max} 为风电机组最大出力, W; P_{set} 为风电场调度指令, W。

额定风速以下, 当风电机组最大出力 P_{max} 大于调度指令 P_{set} 时, 机组降低功率参考值, 必要时配合桨距调节稳定机组出力; 额定风速以上, 当风电机组最大出力 P_{max} 大于调度指令 P_{set} 时, 为保证机组安全运行, 风电机组采用桨距调节稳定机组出力; 当风电机组最大出力 P_{max} 小于调度 P_{set} 时, 机组按照最大风功率追踪(MPPT)运行, 保证机组 C_p 最大, 机组有功功率输出值为参考值 P_{opt} 。

3 模拟结果及分析

3.1 模型背景

以陕西某风电场为例, 该风电场地质条件良好, 70 m 轮毂高度年平均风速为 6.26 m/s, 年平均等效满负荷小时数为 1 862 h。模型采用风电场内某 1.5 MW 双馈风电机组, 参数如表 1 所示。

表 1 风力机参数

Table 1 Parameters for wind turbine

风力机叶片	叶片长度 R/m	空气密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	额定功率 P/kW	额定风速 v/m·s ⁻¹	额定转速 n/r·min ⁻¹
SINOM A40.2	41	1.041	1 500	10	18.8

图 6 为该双馈风电机组输出功率随风速变化曲线, 离散点为该机组实际运行数据, 实线为理论最佳功率曲线。其中, 理论最佳功率曲线为风电机组接 T-WPC 策略的运行曲线, 能够在低于额定风速

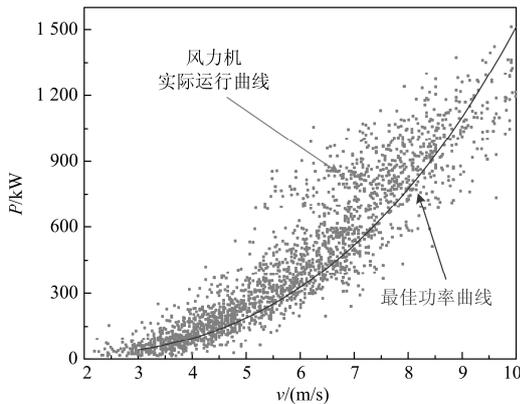


图 6 风电机组输出功率随风速变化曲线

Fig. 6 Relationship between wind turbine output power and wind speed

时跟踪 C_{Pmax} 曲线, 最大限度捕获风能; 高于额定风速时, 跟踪 C_{Pmax} 曲线, 并保持输出稳定。

由图 6 可知, 理论最佳功率曲线与实际运行数据具有一致性, 能够描述该风电机组实际运行规律。实际运行中的风电机组主要按照传统风力机组控制策略 T-WPC 运行, 输出功率波动性大, 不能自动调节有功功率, 实现风电机组 AGC 控制。

3.2 风电场调度下的 WT-AGC 策略分析

风电场实际运行过程中风况复杂, 存在较大波动性, 为分析方便, 分别选取该风电机组处于两种典型风况(低于额定风速、高于额定风速)进行分析。

图 7 为某时段内, 风速 v 低于额定风速, 该风电机组接收风电场调度 P_{set} (0.2 p.u., 0.45 p.u., 0.15 p.u.)时, 两种控制策略下机组运行状态对比曲线图。整体来看, 采用传统控制策略的出力 P_{max} , 范围为 0.2~0.9 p.u., 波动非常大, 不利于电网稳定, 需要额外措施协调配合; WT-AGC 控制策略下的风力机组出力 P , 能够实现有功功率稳定输出, 满足风电场调度要求。

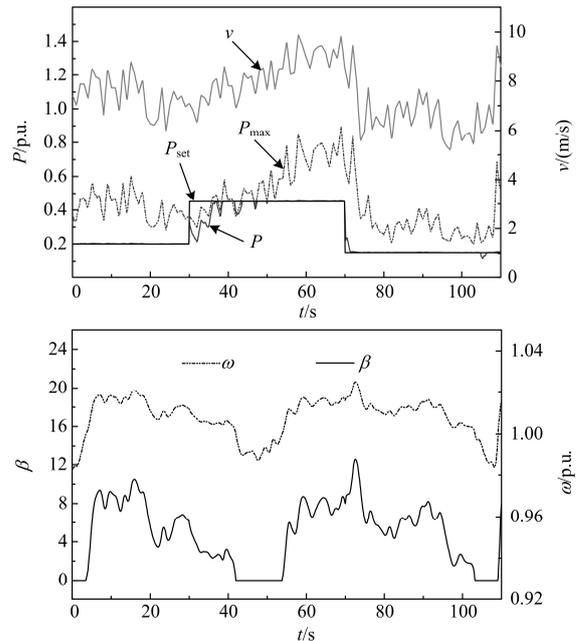


图 7 额定风速以下 AGC 控制策略的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of AGC below rated wind speed

在区间(0 s, 30 s)和(70 s, 110 s), 风速分别在 7 m/s 和 6 m/s 附近波动, 风电场调度指令 $P_{set} < P_{max}$, 即风电机组能够满足风电场调度要求。其中, WT-AGC 控制策略下机组在(0 s, 5 s)和(100 s, 110 s)时, 通过改变转速 ω , 使叶尖速比 λ 偏离最佳值 λ_{opt} , 降低风电机组出力, 满足风电场调度指令 P_{set} ; 在(5 s, 40 s)和(55 s, 100 s)时, 转速 ω 达到风机设计转速最

大值, 此时采取调节桨距角 β , 降低捕获风能至 P_{set} 。

在区间(30 s, 70 s), 风速从 7 m/s 逐渐上升至 9 m/s 附近。(30 s, 40 s)时, 风电场调度 $P_{set} > P_{max}$, 风电机组不能满足电场调度需求, 为保证出力尽可能接近风电场调度值, 按最大风功率追踪(MPPT)运行, 转速随风速变化, 保证叶尖速比 λ 为最佳值 λ_{opt} , 风力机组输出为 P_{max} ; 在区间(50 s, 70 s), 由于风速 v 增加, 机组能够满足风电场调度要求, 采用转速调节和桨距调节稳定功率输出至 P_{set} 。

图 8 为某时段内, 风速 v 高于额定风速, 风力机组接收风电场调度 P_{set} (0.8 p.u., 0.98 p.u., 0.6 p.u.) 时, 采用 WT-AGC 策略运行状态曲线图。传统控制策略下的调桨机构仅受风速变化的影响, WT-AGC 策略则需要同时兼顾风速变化和风电场调度指令, 使机组出力追踪风电场调度指令 P_{set} 变化。

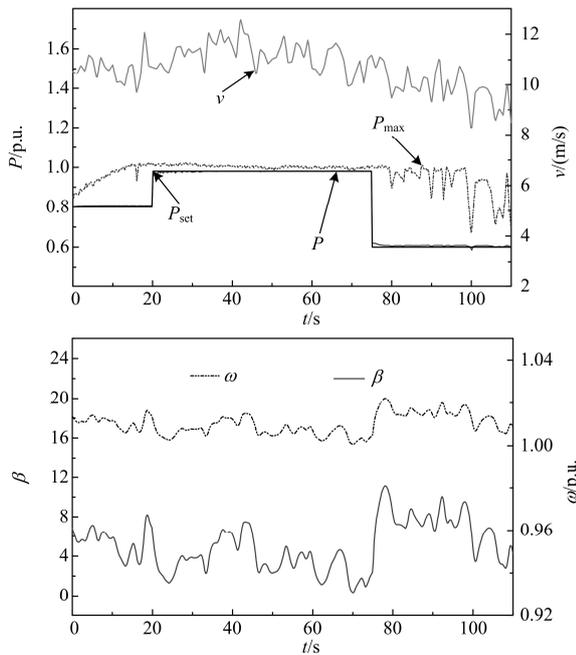


图 8 额定风速以上 AGC 控制策略的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of AGC above rated wind speed

在区间(0, 75 s), 风速 v 大于额定风速, 风电机组能够满足风电场调度要求($P_{set} < P_{max}$), 转速 ω 已达到极限转速值附近, 风电机组通过改变桨距角 β , 降低风能利用系数 C_p , 降低风能捕获。

风电机组变桨系统及时响应, 既保证风电机组按风电场调度 P_{set} 运行, 转速 ω 也能维持在安全运行范围内。

4 结论

1) 针对传统控制策略 T-WPC 下的风力机组输

出波动性大、随机性强, 需其他设备协调风电场出力的缺点, 提出一种机组层 AGC 控制策略 WT-AGC。

2) 在考虑机组运行状态和风电场调度要求的基础上, 将 WT-AGC 策略下机组运行方式分为 2 种: 调度指令高于机组最大出力能力的常规运行和调度指令低于机组最大出力能力的限功率运行。通过转速调节和变桨距机构动作, 实现风力机组输出稳定, 满足风电场调度要求。

3) 以某实际双馈风电机组为例, 对比传统控制策略与机组层 WT-AGC 控制策略, 验证了所提策略的正确性, 为实现风电自动控制和大规模接入提供一定的参考。

参考文献

- [1] 廖志刚, 何世恩, 董新洲, 等. 提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 41-46.
LIAO Zhigang, HE Shien, DONG Xinzhou, et al. Research on the system protection for enhancing the accommodation and transmission of large scale wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 41-46.
- [2] 任华, 姚秀萍, 张新燕, 等. 风电场弃风电量统计方法研究[J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2148-2152.
REN Hua, YAO Xiuping, ZHANG Xinyan, et al. Statistical method for wind farm abandoned wind power[J]. East China Electric Power, 2013, 41(10): 2148-2152.
- [3] SORENSEN P, HANSEN A, THOMSEN K, et al. Operation and control of large wind turbines and wind farms[P]. Risø National Laboratory Report, 2005.
- [4] BUENO C, CARTA J A. Wind powered pumped hydro storage system, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(4): 312-340.
- [5] SCHLUETER R A. Modification of power system operation for significant wind generation penetration[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(1): 153-161.
- [6] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. Power System Protection

- and Control, 2015, 43(5): 94-100.
- [7] MEHDI D, JAMEL B, XAVIER R. Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management experimental investigation[J]. Energy, 2010, 35(6): 2587-2595.
- [8] HANSEN A D, SØRENSEN P, IOV F, et al. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators[J]. Renewable Energy, 2006, 31: 935-951.
- [9] DE ALMEIDA R G, CASTRONUOVO E D, PECAS LOPES J A, et al. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 718-725.
- [10] 白晓磊. 风力发电功率预测及 AGC 机组调配的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
BAI Xiaolei. Research on wind power forecasting and unit dispatch of AGC[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [11] CONTAXIS G C. Short term scheduling in a wind diesel autonomous energy system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1161-1167.
- [12] MOYANO C F, LOPES J A P. An optimization approach for wind turbine commitment and dispatch in a wind park[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(1): 71-79.
- [13] 张新松, 礼晓飞, 王运, 等. 不确定性环境下考虑弃风的电力系统日前调度[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 75-82.
ZHANG Xinsong, LI Xiaofei, WANG Yun, et al. Day-ahead dispatching in consideration of wind power curtailments in uncertain environments[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 75-82.
- [14] 王彩霞, 鲁宗相. 风电功率预测信息在日前机组组合中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 13-18.
WANG Caixia, LU Zongxiang. Unit commitment based on wind power forecast[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 13-18.
- [15] CHANG L, YIN Y. Strategies for operating wind power in a similar manner of conventional power plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 926-934.
- [16] MADJIDIAN D, MARTENSSON K, RANTZER A. A distributed power coordination scheme for fatigue load reduction in wind farms[C] // American Control Conference, San Francisco, 2011: 5219-5224.
- [17] ZOU J X, YAO J P, ZOU Q Z, et al. A multi-objective optimization approach to active power control of wind farms[C] // American Control Conference, Montreal, 2012: 4381-4386.
- [18] 尹远, 卢继平, 刘钢, 等. 基于 DFIG 机组转子动能的风电场有功功率优化分配方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 127-132.
YIN Yuan, LU Jiping, LIU Gang, et al. Active power distribution optimization of wind farm based on rotational kinetic energy of DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 127-132.
- [19] FERNANDEZ L M, GARCIA C A, JURADO F. Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation[J]. Energy, 2008, 33(9): 1438-1452.
- [20] MOYANO C F, PECAS LOPES J A. An optimization approach for wind turbine commitment and dispatch in a wind park[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(1): 71-79.
- [21] SOLEIMANZADEH M, WISNIEWSKI R. Controller design for a wind farm, considering both power and load aspects[J]. Mechatronics, 2011, 21(4): 720-727.

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-07-18

作者简介:

许 昌(1972-), 男, 通信作者, 教授, 从事风电场空气动力学和优化控制方面的教学与研究; E-mail: zhufengxu@163.com

魏 媛(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为风功率预测与风电机组控制。E-mail: weiyuan3656@163.com

(编辑 葛艳娜)