

计及风电时空互补特性的互联电网有功调度与控制方案

郭晓蕊¹, 王珂¹, 杨胜春^{1,2}, 张涛³, 李亚平¹

(1. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 华北电网有限公司, 北京 100053)

摘要: 为了解决以风电为代表的大规模间歇性电源的接入给互联电网有功调度与控制带来的问题, 提出利用广域范围内风电资源的时空互补性来降低风电功率的波动性。基于某区域电网各省风功率数据, 分析风电时空互补性对系统动态备用、调峰、频率控制、联络线功率控制的影响, 提出在更大范围内利用间歇式能源互补性的多级协调调度模式。从调度计划的多级协调编制、多时间尺度协调、区域电网统一频率控制、需求响应资源充分利用等方面分析了这种调度模式的特点, 指出了这种调度模式与现有调度模式的区别。

关键词: 间歇性能源; 时空互补; 动态备用; 调峰; 频率控制; 联络线控制; 多级协调调度模式

Active power scheduling and control scheme for interconnected power grids considering time-space complementary characteristics of wind energy

GUO Xiao-ru¹, WANG Ke¹, YANG Sheng-chun^{1,2}, ZHANG Tao³, LI Ya-ping¹

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. School of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. North China Grid Company Limited, Beijing 100053, China)

Abstract: Large-scale integration of intermittent renewable energy brings great challenges to power system's operation and control. The reasonable utilization of time-space complementary characteristics of wind energy can effectively decrease the effect of wind power fluctuation. Based on the wind power output data of one regional power grid, this paper analyses the influence of complementary characteristics of wind power on dynamic reserve, peak shaving, frequency control and tie line power control. Then, a multi-level coordinated scheduling and control scheme is proposed, featured with multi-time scale coordination, multi-area resource sharing, unified frequency control and full advantage of demand response. Finally, the differences between the new scheduling scheme and the existing scheduling mode are discussed.

This work is supported by Natural Science Foundation of Beijing (No. 3132035) and National Key Basic R & D Program of China (973 Program) (No. 2013CB228206).

Key words: intermittent renewable energy; time-space complementary; dynamic reserve; peak shaving; frequency control; tie line power control; multi-level coordinated scheduling

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0139-06

0 引言

我国电网规划以发展晋、陕、蒙、宁煤电基地作为发展可再生能源的重要组成部分, 风电在中国已进入快速发展阶段^[1]。大规模风电并网后, 其随机性和间歇性给互联电网有功功率控制带来了新的

挑战^[2-4]。事实上, 处于不同地理位置风电资源的互补性将使得区域电网风电总体出力波动性相较于单个风电场或局部区域风电出力波动有削弱的趋势^[5]; 文献[6-8]从时域角度对内蒙、东北、甘肃、江苏等地区的风电出力特点进行了定性分析和定量说明; 文献[9]通过大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究验证了风电的平滑效应。文献[10]定义了平稳性、一致性和互补性指标, 实现了不同情况下风电功率变化特性的量化评估。但在广域风电时空互补特性对电网调度运行影响的定量分析以及

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3132035); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB228206); 国网公司科技项目(dz71-13-036)

计及风电时空互补特性的互联电网有功调度与控制方面还鲜有研究。华北电网是我国五大区域电网之一，在地域上涵盖内蒙、山东、河北、山西及京津唐等地。近年来，华北电网风电发展迅猛，截止到2012年年底，装机容量已达到22 443 MW。虽然地区风电场的管辖权相对独立，但从华北区域整体的角度来看其出力呈现一定的规律性。其中显著的特点之一就是广域分布的风电场出力之间存在一定的互补性，这种特性对电力系统调度运行控制具有积极的影响。然而，在当前分级调度体制下，各级电力调度中心之间缺乏必要的配合，难以充分利用风电资源的时空互补性，同时也在一定程度上制约了大电网有功调节能力和风电消纳能力的充分发挥。

本文在分析华北电网分省风电广域时空互补性的基础上，定量研究了互补性对电力系统动态备用、系统调峰、频率控制和联络线控制模式的影响。基于我国现有调度体制和支撑技术，提出了计及风电时空互补性的互联电网有功调度与控制方案。

1 广域风电的时空互补特性

受风速变化的影响，风电出力呈现明显的随机性与间歇性，定义 t 时刻时间尺度为 s 时风电的相对变化率 λ_t 为

$$\lambda_t = (P_B / P_R) \times 100\% = [(P_{(t+s)} - P_t) / P_R] \times 100\% \quad (1)$$

式中： s 可为 5 min、60 min 或其他时间尺度； P_t 为 t 时刻风电出力； $P_{(t+s)}$ 为 $(t+s)$ 时刻风电出力； P_B 为从 t 到 $(t+s)$ 时段内风电出力的变化； P_R 为风电出力的装机容量。基于 2012 年华北风电全年出力数据，根据式(1)分别统计其在 5 min 和 60 min 两个不同时间尺度下的波动特性，如表 1 所示。

表 1 不同时间尺度下风电出力波动统计

Table 1 Power fluctuations on different time scales

波动统计/%		内蒙	冀北	山东	山西	河北	华北总
5 min	正波动 MAX	3.16	1.95	7.38	3.01	4.54	2.99
	负波动 MAX	-4.36	-6.15	-6.11	-4.03	-12.3	-3.57
60 min	正波动 MIN	20.2	19.8	37.7	22.8	48.1	12.08
	负波动 MIN	-21.2	-33.8	-31.6	-20.3	-25.8	-12.5

表 1 中正波动最大值为风电的正向出力变化趋势，即风电出力增加的最大值，负波动最大值为风电的反向出力变化趋势，即风电出力减小的最大值。可见，由于华北地区覆盖面积大，各省区风电场风峰和风谷出现的时刻不同，使得全网叠加后的总出

力变化率较各省均有显著下降。

2 风电互补性对系统调度运行的影响

2.1 对系统动态备用的影响

这里仅关注由风电波动造成的动态备用需求，根据文献[11]的定义将某时刻风电引起的动态备用需求表示为

$$P_{res}(T) = P_{mean}(T) - P_{min}(T+1) \quad (2)$$

其中： $P_{mean}(T)$ 为 T 到 $T-1$ 时段内风电功率的平均值； $P_{min}(T+1)$ 为 T 到 $T+1$ 时段内风电功率预测的最小值。

以华北各省风电 2012 年 1 月 1 日 0:00 至 2012 年 12 月 31 日 24:00、时间间隔为 5 min 的实测数据为基础，以 30 min 为计算周期，以风电初始时段功率出力的平均值 $P_{mean}(T)$ 为基准，0.1 标么值为计算间隔，计算不同风电出力范围时对系统动态备用的平均需求，结果如表 2 所示，“华北-叠加”是华北各省风电所需动态备用的总和，“华北总”是将华北风电作为整体考虑时计算出的动态备用。由于多数风机难以满发，这里主要考察风机出力范围在 0~0.6 之间的情况。从纵向来看，“华北总”的动态备用需求与分省具有相同的趋势。从横向来看，在不考虑输电网安全约束的情况下，由于华北电网各省区风电之间存在互补性，“华北总”的动态备用需求较“华北-叠加”有较大程度的减少。

表 2 华北辖内各省风电动态备用的需求 (标么值)

Table 2 Dynamic reserve for wind power in North China

出力范围	河北	冀北	内蒙	山东	山西	华北-叠加	华北总
0.5-0.6	0.0174	0.0194	0.0197	0.0113	0.0115	0.0135	0.0089
0.4-0.5	0.0205	0.0088	0.0152	0.0101	0.0111	0.0123	0.0082
0.3-0.4	0.0164	0.0082	0.0116	0.0096	0.0102	0.0101	0.0062
0.2-0.3	0.0151	0.0068	0.0083	0.0084	0.0091	0.0080	0.0049
0.1-0.2	0.0110	0.0052	0.0052	0.0058	0.0067	0.0057	0.0034
0-0.1	0.0042	0.0024	0.0023	0.0022	0.0031	0.0031	0.0017

然而，由于受到气象、风速等因素的制约，特别是区域电网大范围内同时出现大风或无风的情况时，风电的相关性将更为明显，各省因风电波动造成的动态备用需求呈现一致性，此时各省间风电的互补性并不明显。表 3 选取了 2012 年出现动态备用需求最大值、最小值的 1 月 20 日和 5 月 12 日作为典型日，可见 1 月 20 日 19:00 时“华北总”和“华北-叠加”由于风电波动造成的最大动态备用需求几乎相等，这种情况也出现在了动态备用需求最小的 1 月 20 日 8:00。

表 3 某典型日动态备用需求的最值及出现时刻

Table 3 Maximum value and minimum value of dynamic

reserve and appearance time		
	华北总	华北-叠加
备用最大值	0.100 2	0.101 1
出现时刻	5 月 12 日 19:00	5 月 12 日 19:00
备用最小值	-0.042 7	-0.037 2
出现时刻	1 月 20 日 8:00	1 月 20 日 8:00

2.2 对系统调峰的影响

实际风电场的出力在日内可能出现由最大出力降至 0 或由 0 升至最大出力的情形, 造成电网的调峰需求大幅增加, 电网调峰能力成为风电发展的主要瓶颈之一。文献[12]给出了风电接入前后系统平均峰谷差率的变化以及平均峰谷差率的相对变化的计算公式, 这里将其作为比较风电接入前后华北各省及华北整体的评价指标, 结果如表 4 所示。

表 4 风电接入前后评价指标结果

Table 4 Evaluation indications with/without wind power integration

	峰谷差率		峰谷差率的变化	相对峰谷差变化率/%
	不计风电	计及风电		
河北	20.71	20.85	0.0013 8	0.667
冀北	15.62	20.6	0.049 8	31.9
内蒙	11.69	15.65	0.039 6	33.8
山东	21.39	22.07	0.0067 9	3.17
山西	20.71	21.24	0.0053 2	2.57
华北总	20.2	20.57	0.0037 2	1.84

可以看出, 计及风电影响后负荷峰谷差率均有所增长, 尤其是冀北和内蒙, 由于风电所占比例较大(分别为 41.8%和 27.8%)且为外送电源, 风电接入前后对系统峰谷差影响明显。整个华北地区风电接入后峰谷差率也有所增加, 但平均峰谷差率的变化较冀北、内蒙、山东等省小很多。

2.3 对系统频率控制的影响

风电功率波动引起电网频率的变化可表示为

$$\Delta f_* = \frac{\sigma \times \Delta P_*}{\rho K_{G_*} + K_{L_*}} \quad (3)$$

式中: σ 为风电装机容量占系统总有功负荷的比例; ΔP_* 为所选时段内风电的相对变化量; ρ 为电网的旋转备用系数; K_{G_*} 为常规发电机静态频率特性系数; K_{L_*} 为负荷静态频率特性系数。一般地, ρ 、 K_{G_*} 、 K_{L_*} 为常数, 则 Δf_* 与 $\sigma \times \Delta P_*$ 呈正比关系。为了计算的可比性, 设定风电装机容量占系统总有功负荷的比例相同, 即 σ 相同。计算不同时间尺度下某风电场与风电场群功率变化引起的频率变化范围

如表 5 所示。

表 5 功率波动引起的频率变化

Table 5 Frequency variation caused by power fluctuation

	风电场	风电场群
1 min	$[-0.00434\sigma, 0.00332\sigma]$	$[-0.00042\sigma, 0.0006\sigma]$
5 s	$[-0.00195\sigma, 0.00207\sigma]$	$[-0.00027\sigma, 0.00052\sigma]$

可见, 1 min 的频率变化范围要大于 5 s 的频率变化范围。而在相同装机容量条件下, 风电场群的频率变化范围要比风电场频率变化范围小 1 个数量级。

2.4 风电互补性对联络线控制模式的影响

为了协调互联电网区域间的功率控制, 北美电力系统可靠性委员会(NERC)先后推出了电网功率频率控制标准——A 标准和 CPS 标准, 以评估区域电网控制的性能, 这种以维持本省有功功率就地平衡为目标的控制模式限制了区域电网内各省控制区间的功率支援能力。表 6 给出了华北风电 5 min 时间尺度下的功率最大波动量与联络线考核标准 Ld (每 15 min A2 值的允许限值) 的对比。

表 6 地区风电波动量与 Ld 对比

Table 6 Comparison of regional power fluctuation and Ld

	河北	冀北	内蒙	山东	山西
波动量/MW	20.41	121.88	692.85	76.87	89.68
Ld 值/MW	80	120	60	120	80

可以看出, 内蒙、山西的风电波动量超过了 Ld 值。为满足联络线控制要求, 必须选择弃风或者为风电消纳建设相匹配的调节电源。实际上, 由统计数据可知, 内蒙、冀北两省间风电出力存在明显的互补性, 如果能够适当放宽省区联络线功率控制约束, 则可有效利用各省风电间的互补性。

3 有利于风电广域互补的有功调度与控制

3.1 总体方案

图 1 给出了有利于风电区域互补的多级协调调度模式框架图。在时间尺度上, 由于风电预测精度具有随时间尺度逐级提高的特性, 通过日前、日内、实时调度和 AGC 在多时间尺度逐级协调、逐级细化的协调调度方式是一种行之有效的方法, 也有利于精确计及风功率的广域互补特性; 计划编制层面, 从区域电网(可以是传统意义上的东北、西北、华北、华中或华东等国调分中心, 也可以是管辖范围更大的互联电网, 如“三华”互联电网、南方电网)角度整体上编制日前和日内调度计划, 对分省计划进行统一协调; 频率控制层面, 采取区域电网统一

频率控制方式；在资源调配上，除常规机组、风电机组外，还将负荷侧需求响应资源纳入调度范围。

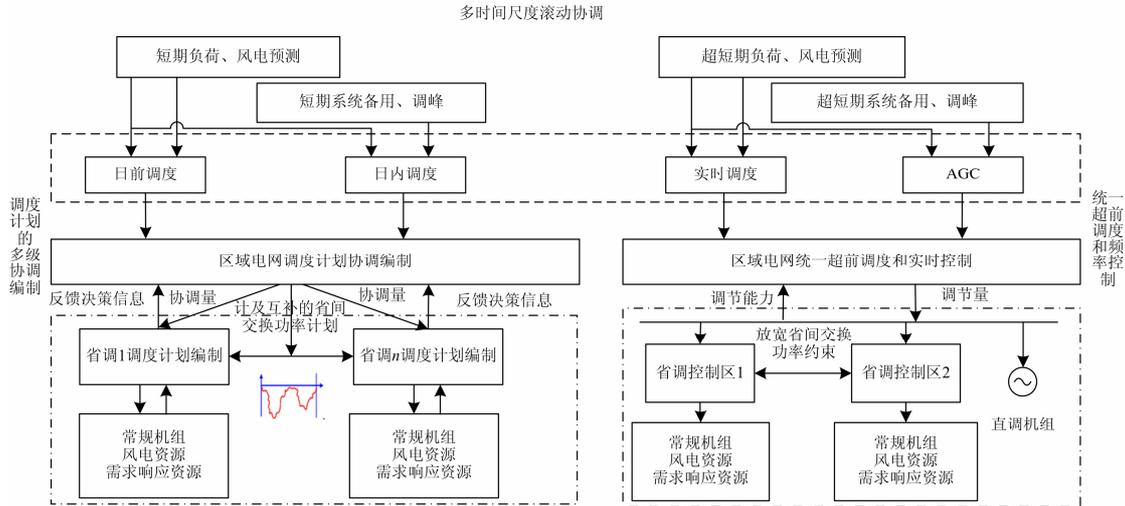


图 1 计及风电广域时空互补的互联网有功调度与控制

Fig. 1 Stratified coordinated scheduling model in favor of wind power complementary

3.2 多级协调调度与控制方案的技术内涵

1) 调度计划的多级协调编制

在省电网调度计划编制^[13-14]的基础上，在区域电网层面增加风电预测、系统备用、调峰能力等方面的协调分析，除了制定计及互补的区域内省间交换功率计划外，在计及电网安全的前提下对分省编制的调度计划进行协调和校正。

相比省调而言，网调能够全面掌握区域电网内可调度资源信息、风电波动信息、负荷预测信息，有利于进行全网统筹调度。尤其是风电大规模接入后，一方面，网调参与编制调度计划有利于充分利用风电广域时空互补特性统一安排电网的备用、调峰、调频能力以及计及互补的省间联络线交换功率计划；另一方面，针对区域电网风电出现强相关性和出力波动一致性的情况，多级调度部门调度计划的协调编制也有利于避免单省调节能力不足等问题，实现更大规模的资源优化配置。

2) 多时间尺度滚动协调的调控模式

国内传统的调度方式主要采用日前调度计划和 AGC 2 个时间尺度相结合的调度方式，对于风电大规模接入的区域，时间尺度相对跨度大、调度模式较粗放，实时控制的压力较大。可采用日前、日内、实时计划以及实时控制多时间尺度滚动协调^[15-16]的风电调控模式，并在相应时间尺度进行负荷预测、网络拓扑、检修计划等。由于风电的波动性、相关性和互补性，在较短时间尺度上，如 5~15 min 级，可由区域电网统一进行超短期超前功率平衡调度，以减小实时控制的压力，充分发挥区域电网资源的

优化配置能力，提高电网调度的精确性。

3) 区域电网统一频率控制

大规模风电并网后，尤其需要利用全网范围内的有效调节资源以及风电的广域互补性来尽快平衡风电功率的波动。区域电网作为较高层级的调度控制中心，具有快速获取全网可调度资源信息以及全网统筹调度和控制的优势。各省级电网向区域电网上报本省控制区内可调度资源的调节能力，区域电网负责平衡全网的有功不平衡功率，并在不平衡量分配过程中，综合考虑可调度资源的调节范围、响应速度、调节速率、调节成本等因素，在安全约束满足的条件下优先调用品质优良、成本较低的可调资源（可以是传统的火电或水电机组，也可以是清洁能源或虚拟电厂^[17]），实现全网可控资源的安全、有序和经济的控制。

当前分级调度的体制和控制区控制性能评价标准不利于充分利用大电网风电的广域互补特性，也限制了大规模风电的有效消纳。在电网安全约束范围内，有必要打破原有省级电网功率就地平衡的机制，放松联络线的传输功率约束。由于可能会增大省际联络线交换功率和交换电量的偏离程度，传统以消除联络线交换功率偏差为目标的电网功率频率控制标准需要进一步更新和发展^[17]。

4) 需求侧资源的充分利用

传统的调度和控制都是通过调节发电机组来实现发用电的平衡。随着负荷侧通讯和信息交互支撑设施的完善，需求响应参与电网调度运行^[18-21]能够为电网提供一种维持电力供需平衡的更为经济的

手段,特别是在风电大规模接入的区域,通过一定的电价政策和激励机制促进需求响应资源参与电网调度运行,可有效提升电网接纳风电等间歇性能源的能力,是智能电网发展的趋势之一。

3.3 与现有调度模式的区别

多级协调调度是在基于我国现有调度模式、计及风电的波动性和广域互补性的基础上提出来的,重在强调全网可调度资源的协调、有序和充分利用。与现有调度模式的区别主要在于:

目前省调主要基于本省短期负荷预测信息,对管辖范围内风电机组和常规机组的日前、日内调度计划进行统一编制,由于难以精确分析风电功率的波动范围和广域互补性的影响,往往需要常规机组留有充足甚至冗余的旋转备用、调峰容量。另外,由于各省采取维持本省有功功率就地平衡的联络线频率偏差控制(TBC),在风电渗透率较高的省区,由于受到联络线输送功率的约束,实现大规模风电的合理消纳有较大困难。

多级协调调度模式下,网调基于全网风电预测信息统一编制调度计划,协调备用、调峰安排以及计及互补后的省间交换功率计划(不再是确定值,可能是计及安全约束后的变化区间),能够计及风电广域互补性的影响。通过多个时间维度的协调调度,降低了实时控制的压力,且强调在超前调度和实时控制等较短时间尺度上,全网统一调控的重要性。控制对象中不仅考虑了发电侧机组,还考虑了负荷侧需求响应资源,有利于充分调动全网的可调节资源。另外,这一调度模式的实现还需重点关注以下两个方面的问题。

1) 风电广域时空互补虽有利于充分发挥区域电网资源的优化配置能力,促进大规模风电的消纳,但同时会造成网内潮流较大范围的转移,可能引发部分支路、联络线及稳定断面重载甚至越限。因此,一方面要加强计及互补因素的电网静态安全分析技术和安全校核技术,另一方面,要加强支撑全局的闭环实时控制决策研究^[22]。

2) 在网调统一超前控制和实时控制模式下,对数据通信的可靠性提出了更高的要求,网调控制中心需要聚集整个电网内的发电机组、风电机组、需求响应、联络线功率、稳定断面信息等等,信息交互数量大为增加,需要加强通讯和自动化相关技术的支撑。

4 结语

基于实际区域电网的实测数据,本文分析了风电广域时空互补对系统动态备用、调峰、频率控制及联络线控制等方面的影响,提出了有利于风电广域互补的多级协调调度模式的建议,强调长时间尺度的多级协调调度计划编制和短时间尺度上的全网统一超前调度和控制,以充分发挥区域电网发用电资源的整体优化配置能力。

参考文献

- [1] 徐乾耀,康重庆,江长明,等.多时空尺度风电消纳体系初探[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):28-32.
XU Qian-yao, KANG Chong-qing, JIANG Chang-ming, et al. Preliminary analysis on wind power accommodation system from multiple temporal and spatial scale perspective[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 28-32.
- [2] 余民,杨旻宸,蒋传文,等.风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(12):100-104,135.
YU Min, YANG Min-chen, JIANG Chuan-wen, et al. Study on power system reliability and reserve optimization with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 100-104, 135.
- [3] 侯婷婷,娄素华,吴耀武,等.含大型风电场的电力系统调峰运行特性分析[J].电工技术学报,2013,28(5):105-111.
HOU Ting-ting, LOU Su-hua, WU Yao-wu, et al. Analysis on peak load regulation operation characteristics of power system integrated with large-scale wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 105-111.
- [4] 胡国伟,别朝红,王锡凡.考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J].电工技术学报,2013,28(5):58-65.
HU Guo-wei, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.
- [5] MASAHIRO A, TOSHIYA N, TSUTOMU M, et al. A study on smoothing effect on output fluctuation of distributed wind power generation[C] // Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002: 938-943.
- [6] 侯佑华,房大中,齐军,等.大规模风电入网的有功功率波动特性分析及发电计划仿真[J].电网技术,2010,34(5):60-66.
HOU You-hua, FANG Da-zhong, QI Jun, et al. Large-scale grid-connected wind farm and generation scheduling simulation under different capacity power injected from wind farms into power grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 60-66.
- [7] 肖创英,汪宁渤,陟晶,等.甘肃酒泉风电出力特性分

- 析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 64-67.
XIAO Chuang-ying, WANG Ning-bo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64-67.
- [8] 杨宗麟, 朱忠烈, 李睿元, 等. 江苏省沿海典型风电场出力特性分析[J]. 华东电力, 2010, 38(3): 37-40.
YANG Zong-lin, ZHU Zhong-lie, LI Rui-yuan, et al. Analysis on output power characteristics of Jiangsu coastal typical wind farm[J]. East China Electric Power, 2010, 38(3): 37-40.
- [9] 李剑楠, 乔颖, 鲁宗相, 等. 大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 7-13.
LI Jian-nan, QIAO Ying, LU Zong-xiang, et al. Research on statistical modeling of large-scale wind farms output fluctuations in different special and temporal scales[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 7-13.
- [10] 曲直, 于继来. 风电功率变化的一致性和互补性量化评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 507-513.
QU Zhi, YU Ji-lai. Quantitative evaluation on consistency and complementarity of wind power variability[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 507-513.
- [11] SØRENSEN P, CUTULULIS N A, VIGUERAS-RODRIGUEZ A, et al. Power fluctuations from large wind farms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 958-965.
- [12] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158.
ZHANG Ning, ZHOU Tian-rui, DUAN Chang-gang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158.
- [13] 高宗和, 滕贤亮, 张小白. 互联电网 CPS 标准下自动发电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 40-44.
GAO Zong-he, TENG Xian-liang, ZHANG Xiao-bai. Automatic generation control strategy under control performance standard for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 40-44.
- [14] 高宗和, 滕贤亮, 张小白. 适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 37-42.
GAO Zong-he, TENG Xian-liang, ZHANG Xiao-bai. Solution of active power dispatch and control scheme for interconnected power grids with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 37-42.
- [15] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan, ZHENG Tai-yi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 1-6.
- [16] 王洪涛, 何成名, 房光华, 等. 计及风电预测误差带的调度计划渐进优化模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 131-135.
WANG Hong-tao, HE Cheng-ming, FANG Guang-hua, et al. A gradual optimization model of dispatching schedule taking account of wind power prediction error bands[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 131-135.
- [17] RUIZ N, COBELO I, OYARZABAL J. A direct load control model for virtual power plant management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 959-966.
- [18] 刘文霞, 赵天阳, 邱威, 等. 规模化 EV 充电与风力/火电发电系统协调运行[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 49-57.
LIU Wen-xia, ZHAO Tian-yang, QIU Wei, et al. Coordinated operation of large scale electric vehicles charging with wind-thermal power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 49-57.
- [19] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.
YAO Jian-guo, YANG Sheng-chun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [20] 张鹏, 刘继春, 田伟. 基于需求侧减排的节能调度及其改进 NSGA-II 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 42-48.
ZHANG Peng, LIU Ji-chun, TIAN Wei. Demand-side emission reduction based energy-saving dispatch and the improved NSGA - II method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 42-48.
- [21] 刘扬洋, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑需求侧响应的短期阻塞管理模型与激励机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 38-43, 64.
LIU Yang-yang, JIANG Chuan-wen, LI Lei, et al. Peak regulation right trading model considering DSM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 38-43, 64.
- [22] 姚建国, 杨胜春, 单茂华. 面向未来互联电网的调度技术支持系统架构思考[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 52-59.
YAO Jian-guo, YANG Sheng-chun, SHAN Mao-hua. Reflections on operation supporting system architecture for future interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 52-59.

收稿日期: 2014-01-22; 修回日期: 2014-07-02

作者简介:

郭晓蕊(1984-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电网优化调度与仿真、新能源接入等方面。E-mail: gxr612@163.com