

计及电网调峰约束的风电接纳调度方法研究

张涛¹, 李家珏², 张延峰³, 王洋², 徐建源²

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 2. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;
3. 大连供电公司, 辽宁 大连 116000)

摘要: 传统的风电接纳能力计算方法没有考虑实际电网的调度运行方式, 缺乏普遍的实用性。在考虑电网调峰约束的前提下, 对影响风电接纳能力的重要边界条件进行敏感性分析, 依托 D5000 智能电网调度技术支持系统, 读取电网短时开机方式的运行数据。提出省级电网风电接纳能力的计算原理与算法, 求解出接纳能力指标值, 进而构建协调电网调度计划制定与接纳风电能力的优化调度模型, 实现了常规电源与风电的协调运行, 降低风电功率对电网运行的冲击, 使计算得出的结果能够更加准确地反映电网实际接纳风电能力。现场运行数据验证了所提出的风电接纳能力计算方法的有效性。

关键词: 风电接纳; D5000 系统; 电网调峰; 敏感性分析; 开机方式

Research of scheduling method for the wind power acceptance considering peak regulation

ZHANG Tao¹, LI Jia-jue², ZHANG Yan-feng³, WANG Yang², XU Jian-yuan²

(1. Electrical Power Research Institute of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;
2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
3. State Grid Dalian Electric Power Supply Company, Dalian 116000, China)

Abstract: Traditional calculation method of the ability to wind acceptance, without considering the scheduling operation mode of actual power grid, is lack of common practicability. Under the premise of considering peak regulation constraints, this paper makes sensitivity analysis on the important boundary conditions which affect the ability to wind acceptance, and relying on the D5000 technical support system, reads operation data of the generator mode in power grid. The theory and method are proposed, by which wind acceptance index of provincial grid can be calculated, and then the optimization scheduling model which coordinates power grid scheduling plan with acceptance ability of wind power is constructed, thus realizing the coordinated operation of the conventional power and wind power, reducing the impact of wind power to the grid, and making the calculated results more accurately reflect the actual acceptance of wind power. The run data proves the calculation method of the ability to wind acceptance is effective.

Key words: wind acceptance; D5000 system; peak regulation; sensitivity analysis; generator model

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0074-07

0 引言

在国家扶持可再生能源产业政策的调控和激励下, 我国风力发电得到了快速发展^[1-3]。2012年, 我国风电并网容量达到 60 830 MW, 发电量达 1 004 亿 kWh, 新增风电装机容量达 14 000 MW, 风电已超过核电成为继煤电和水电之后的第三大主力电源^[4-9]。随着风电装机容量的快速增长, 大规模风电并网消纳问题越来越突出, 各地区均出现了不同程度的风电限电现象, 引发了业内对电网风电接纳能力的研究。传统风电接纳能力的计算方法, 主要是根据影响系统调峰的各方面因素, 并结合风电调峰特性来定义的^[10-16]。由此确定的计算方法在理论分

析方面具有很好的适应性, 但在确定实际电网的风电接纳能力方面, 没有考虑实际电网的调度运行方式, 因而缺乏普遍的实用性。

目前已有文献对风电接纳能力的计算方法进行了研究: 文献[17]建立了以风电接纳能力最大为目标函数的调峰模型, 在风电接纳能力的计算过程中考虑了间歇式能源的不确定性, 但未考虑电源侧因素对其的影响; 文献[18]提出了以电网调峰能力为约束的风电接纳能力计算方法, 量化研究了风电接入对电网调峰的影响, 但未涉及实际电网的调度运行方式; 文献[19]在考虑电网安全稳定约束的基础上, 研究了提高风电接纳能力的风电优化调度方法, 但该方法仅适用于优化风电运行策略, 而不适用于

安排电网中其他机组的短期开机方式;文献[20]搭建了基于 Delphi 的时序分析仿真平台,在联络线传输功率固定的情景下,对负荷曲线进行调整,在新的负荷时序曲线下定量分析系统风电接纳能力的提升程度,但由于没有考虑调度计划中的机组开机方式,其计算精度受到影响。因此,为满足风电快速发展的要求,在加强电网建设的同时,需要研究一种计及电网实际调度运行方式的风电接纳能力计算方法,既能满足电网的调峰约束,又能最大限度地反映电网实际的风电接纳能力。

本文在上述文献研究的基础上,提出了基于调度运行方式的风电接纳能力计算方法。该方法依托 D5000 智能电网调度技术支持系统,读取电网短时开机方式的运行数据,考虑电平衡方程、联络线调整系数、机组调峰能力的综合约束,对实际电网的开机方式进行适量修正,实现常规电源与风电的协调运行,降低风电功率对电网运行的冲击,使计算得出的结果能够更加准确地反映电网实际接纳风电能力。

1 风电接纳能力原理分析

1.1 调峰约束下的风电接纳空间

在分析电网有功功率平衡时,一方面要考虑满足尖峰负荷时电源容量的需求,另一方面还要考虑低谷负荷时段电网中机组所能达到的最小技术出力。在考虑负荷低谷时段电网调峰约束的基础上,负荷值和系统中所有机组最小技术出力之间的差值电力可以由风电提供,这个差值电力即为风电的接纳空间。电网调峰约束下的风电最大接纳空间与负荷预测值、联络线计划、机组最小技术出力和备用容量相关,计算公式为

$$P_{\max} = P_{\text{pre}} + P_{\text{line}} - P_{\text{Gmin}} - P_{\text{R}} \quad (1)$$

式中: P_{\max} 代表调峰能力约束下的风电最大接纳空间; P_{pre} 代表最大负荷; P_{line} 代表联络线计划; P_{Gmin} 代表常规机组的最小出力; P_{R} 代表旋转备用容量。

由式(1)可以看出,当常规机组调峰能力较小而供电负荷需求也很小时,风电接纳空间就越小,当调峰约束下风电接纳空间为负值时,则需限制风电出力以满足系统调峰约束。

本文考虑调峰约束中多变量关联,提出风电接纳空间的形成原理。为突出调峰约束的最低裕量,文中选取当月最大峰谷差日作为典型日展开分析,所计及的时间尺度以典型日中 96 个时间节点为基准。以省级电网某典型日电网运行情况为例,调峰

约束下电网接纳风电空间的原理如图 1 所示。

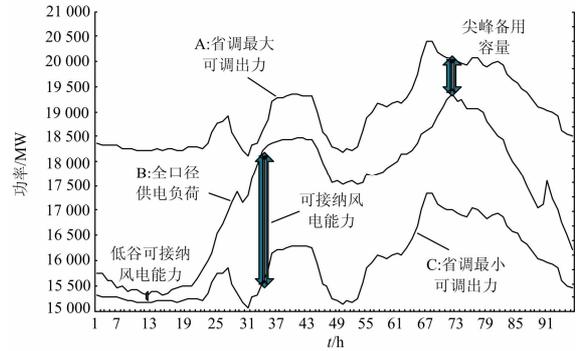


图 1 调峰约束下风电接纳空间原理图

Fig. 1 Schematic diagram of wind power acceptance under peak regulating constraint

图 1 为省级电网某典型日省调最大可调出力、全口径供电负荷和省调最小可调出力曲线。图中, A 曲线是省调最大可调出力曲线, C 曲线是省调最小可调出力曲线, B 曲线是全口径供电负荷曲线。

其中: 省调最大可调出力曲线由计划的该时刻最大直调水、火、核电机组出力, 联络线受电电力(均折算到供电侧)及最大地方电厂上网电力及旋转备用相加得到; 省调最小可调出力曲线由计划的该时刻最小直调水、火、核电机组出力, 联络线受电电力(均折算到供电侧)及最小地方电厂上网电力相加得到; 全口径供电负荷曲线由全口径负荷统计得到。

从电网运行的角度, 风电随风速变化是多变的, 然而这种随机变化是否能被电网所接纳取决于当前电网的调峰方式下风电上网空间大小, 其中包括负荷与常规电源最小出力之差等。求取风电上网空间的精确指标值, 即为本文所建模计算的目标。如图 1 中 B 曲线与 C 曲线所夹的空间为风电上网空间。其中计及负荷峰谷变化的机组最大/最小出力已由式(1)体现。由图 1 可以看出, 负荷低谷时段是一天中电网接纳风电能力最小的时段, 这同时也是风电弃风的主要时段。

1.2 超出调峰约束的风电调度

实际电网的风电接纳能力, 本质上反映为风电的弃风数额。当风电预测功率超过风电最大接纳空间时, 需要采用限制风电出力的措施。下面列出两种典型的风电弃风情况。

(1) 负荷低谷时段的弃风电力

当电网中火电机组由于供暖或系统稳定运行等约束导致负荷低谷时段出力很大时, 为保证系统有功功率的平衡, 必须切除机组最小可调出力曲线(包

含风电机组出力) 高于负荷低谷曲线的部分, 以保证系统安全稳定运行。图 2 中的阴影部分即为负荷低谷时段电网的弃风出力。

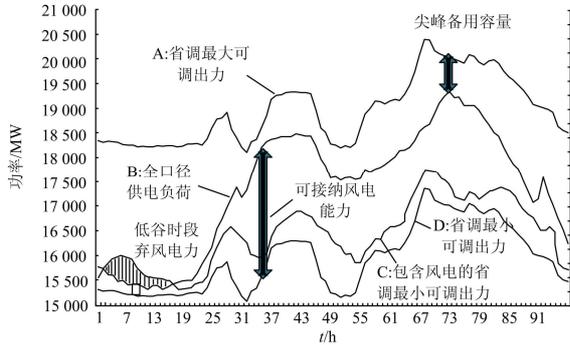


图 2 负荷低谷时段弃风电力及相关曲线

Fig. 2 Curves of abandon wind power and others during low load period

(2) 负荷尖峰时段的弃风电力

当负荷尖峰时段风电出力很大时, 也存在机组最小可调出力曲线 (包含风电机组出力) 高于负荷尖峰曲线可能性。如图 3 所示, 若机组最小可调出力高于此时刻全口径负荷, 为保证系统有功功率的平衡, 必须切除机组最小可调出力曲线 (包含风电机组出力) 高于负荷尖峰曲线的部分, 以保证系统安全稳定运行, 如图 3 中的阴影部分即为负荷尖峰时段电网的弃风出力。

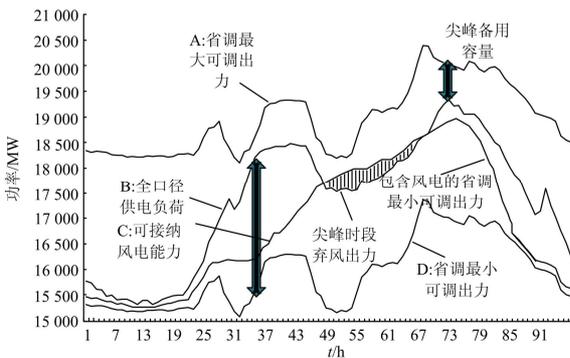


图 3 负荷尖峰时段弃风出力及其相关曲线

Fig. 3 Curves of abandon wind power and others during peak load period

2 基于调度运行方式的风电接纳能力计算方法

2.1 计算流程设计

基于调度运行方式的风电接纳能力计算方法是综合考虑机组出力影响、联络线调整系数、系统旋备容量、地方水火电上网电力等因素, 根据电网实

际调度的运行方式, 通过尖峰预测负荷确定合理的尖峰开机方式。进而在考虑网损和厂用电的前提下得出尖峰负荷时刻的上网电力, 其中网损率依据行业内标准选取。在各类电源参与调峰能力分析 & 满足电监局核定的最小开机方式的基础上, 确定负荷低谷时刻最小开机方式, 从而得到最小网供电力, 并结合低谷负荷, 求取电网的调峰盈余。以风电场集群效应研究为依据, 给出电网的安全风电接纳能力, 从而为合理安排风电规划和调度策略提供技术支持。

基于调度运行方式的风电接纳能力计算流程如图 4 所示。

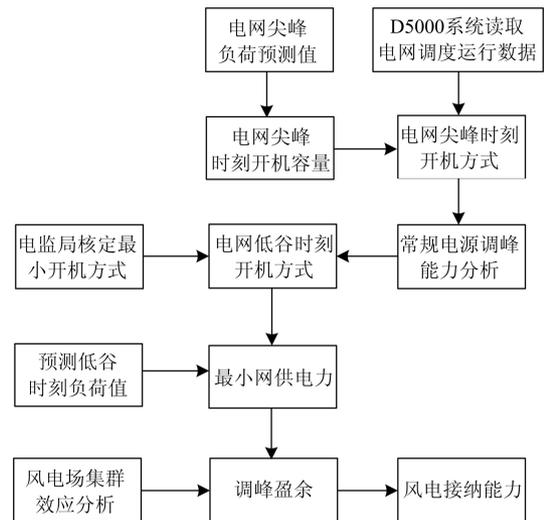


图 4 计算流程设计图

Fig. 4 Design drawing of calculation process

2.2 计算方法建立

2.2.1 计算原则

- 1) 根据当月的最大负荷、最小负荷、火电机组最小开机方式、直调水电开机方式和直调核电开机方式, 按月计算风电接纳能力;
- 2) 根据实际电网电力平衡规律, 负荷低谷时段调峰压力大, 易出现弃风现象, 所以采用基于负荷低谷调峰原则, 计算风电接纳能力;
- 3) 在负荷尖峰时段, 按实际电网调度负荷统计口径, 各电源电力参与电力平衡;
- 4) 在负荷低谷时段, 直调火电、核电、水电、风电, 联络线输送电力, 地方上网电力参与调峰;
- 5) 根据低谷时段电网的调峰容量计算当月风电接纳容量。

2.2.2 计算步骤

- 1) 直调机组尖峰出力计算

直调开机上网电力等于火电、核电和水电的上网电力之和, 通过式 (2) 计算。

$$P_{G\text{直调上网max}} = P_{G\text{火max}}(1-\beta_{\text{火}}) + P_{G\text{核max}}(1-\beta_{\text{核}}) + P_{G\text{水max}}(1-\beta_{\text{水}}) \quad (2)$$

式中: $P_{G\text{直调上网max}}$ 为直调开机上网电力总和 (不考虑旋转备用和机组出力受限); $P_{G\text{火max}}$ 为直调火电开机总和 (不考虑旋转备用和机组出力受限); $\beta_{\text{火}}$ 为火电厂厂用电率; $P_{G\text{核max}}$ 为直调核电开机总和; $\beta_{\text{核}}$ 为核电厂厂用电率; $P_{G\text{水max}}$ 为直调水厂开机总和; $\beta_{\text{水}}$ 为电厂厂用电率。

根据网供电力等于联络线出力与直调开机上网电力之和, 得式 (3)。

$$P_{\text{网供max}} = (P_{\text{联络线max}} + P_{G\text{直调上网max}})(1-\alpha) \quad (3)$$

式中: $P_{\text{网供max}}$ 为尖峰网供电力; $P_{\text{联络线max}}$ 为联络线出力; α 为网损率。

根据电力平衡, 尖峰时刻全口径负荷等于网供电力与地方水火电上网电力之和, 得式 (4)。

$$P_{L\text{max}} = P_{\text{网供max}} + P_{G\text{地方上网max}} \quad (4)$$

式中: $P_{L\text{max}}$ 为尖峰负荷; $P_{G\text{地方上网max}}$ 为地方水火电上网尖峰电力。

考虑旋转备用和机组出力受限, 使用式 (5) 计算直调开机容量。

$$P_{G\text{火max}} = P_{G\text{火max}} + P_{G\text{备用}} + P_{G\text{出力受限}} \quad (5)$$

式中: $P_{G\text{备用}}$ 为旋转备用; $P_{G\text{出力受限}}$ 为机组出力受影响容量。

由式 (2)~式 (5) 整理可得直调火电开机容量 $P_{G\text{火max}}$, 如式 (6) 所示。

$$P_{G\text{火max}} = \frac{P_{L\text{max}} - P_{G\text{地方上网max}} - (P_{\text{联络线max}} + P_{G\text{核max}}(1-\beta_{\text{核}}) + P_{G\text{水max}}(1-\beta_{\text{水}}))(1-\alpha)}{(1-\alpha)(1-\beta_{\text{火}})} + P_{G\text{备用}} + P_{G\text{受限}} \quad (6)$$

2) 直调机组低谷出力计算

根据火电机组最小开机方式, 确定尖峰时刻热电机组开机容量 $P_{G\text{热max}}$ 和低谷时刻热电机组开机容量 $P_{G\text{热min}}$ 。

$$P_{G\text{风}} = \frac{P_{\text{调峰}}}{(1-\beta_{\text{风}})(1-\alpha)\varepsilon} =$$

$$\frac{P_{L\text{min}} - P_{G\text{地方上网min}} - (P_{\text{联络线min}} + (P_{G\text{热min}} + P_{G\text{火max}}(1-\delta))(1-\beta_{\text{火}}) + P_{G\text{核min}}(1-\beta_{\text{核}}) + P_{G\text{水min}}(1-\beta_{\text{水}}))(1-\alpha)}{(1-\beta_{\text{风}})(1-\alpha)\varepsilon} \quad (14)$$

根据式 (7) 计算尖峰时刻其他火电机组的开机容量 $P_{G\text{火其他max}}$ 。

$$P_{G\text{火其他max}} = P_{G\text{火max}} - P_{G\text{热max}} \quad (7)$$

依据尖峰时刻其他火电机组的开机容量和调峰率, 按照式 (8) 计算低谷时刻其他火电机组的开机容量 $P_{G\text{火其他min}}$ 。

$$P_{G\text{火其他min}} = P_{G\text{火其他max}}(1-\delta) \quad (8)$$

式中, δ 为其他火电机组的调峰率。

因此, 低谷时刻直调火电机组的总容量 $P_{G\text{火min}}$ 为

$$P_{G\text{火min}} = P_{G\text{热min}} + P_{G\text{火其他min}} = P_{G\text{热min}} + P_{G\text{火其他max}}(1-\delta) \quad (9)$$

3) 电网调峰能力计算

低谷时刻的直调开机上网电力等于火电、核电和水电的上网电力之和, 通过式 (10) 计算。

$$P_{G\text{直调上网min}} = P_{G\text{火min}}(1-\beta_{\text{火}}) + P_{G\text{核min}}(1-\beta_{\text{核}}) + P_{G\text{水min}}(1-\beta_{\text{水}}) \quad (10)$$

式中: $P_{G\text{直调上网min}}$ 为直调开机上网电力总和; $P_{G\text{火min}}$ 为直调火电开机总和; $P_{G\text{核min}}$ 为直调核电开机总和; $P_{G\text{水min}}$ 为直调水厂开机总和。

根据网供电力等于联络线出力与直调开机上网电力之和, 得式 (11)。

$$P_{\text{网供min}} = (P_{\text{联络线min}} + P_{G\text{直调上网min}})(1-\alpha) \quad (11)$$

式中: $P_{\text{网供min}}$ 为低谷网供电力; $P_{\text{联络线min}}$ 为联络线出力。

负荷低谷时的调峰能力 $P_{\text{调峰}}$ 使用式 (12) 计算。

$$P_{\text{调峰}} = P_{L\text{min}} - P_{\text{网供min}} - P_{G\text{地方上网min}} = P_{L\text{min}} - P_{G\text{地方上网min}} - (P_{\text{联络线min}} + P_{G\text{火min}}(1-\beta_{\text{火}}) + P_{G\text{核min}}(1-\beta_{\text{核}}) + P_{G\text{水min}}(1-\beta_{\text{水}}))(1-\alpha) \quad (12)$$

4) 风电接纳能力计算

根据风电装机提供的网供电力等于调峰能力得式 (13)。

$$P_{G\text{风}}(1-\beta_{\text{风}})(1-\alpha)\varepsilon = P_{\text{调峰}} \quad (13)$$

式中, ε 为风电的同时率。

由式 (9)、式 (12)、式 (13) 得风电装机消纳能力如式 (14) 所示。

3 辽宁电网风电接纳能力实例分析

3.1 辽宁电网调峰现状

辽宁电网是以燃煤火电机组为主的电网，其水电机组较少，且没有燃气、燃油等发电机组，电网快速调峰能力相对较弱。同时，辽宁电网火电机组因煤质差及设备缺陷影响出力情况仍将始终存在，给电网低谷调峰造成巨大压力。此外，辽宁电网供热机组较多，在冬季供热期，供热机组需以热定电，出力可调范围有限，因此，冬季是辽宁省电网调峰最困难的时期，加之冬季风电出力呈现的反调峰性更加大了电网调峰难度。

3.2 计算边界条件

在系统电源结构一定的情况下，全网风电消纳能力受负荷大小、丰水期/枯水期、供热期/非供热期等多重因素的影响，系统的风电消纳能力具有明显的季节性特征。因此，本文考虑各水平年不同月份的开机方式、负荷特性变化等因素，对 2013~2015

年辽宁电网进行分月调峰平衡，根据调峰盈余计算出各月电网消纳风电的能力。在进行调峰平衡过程中，综合考虑了全口径负荷、地方水火电上网电力、联络线受电能力、系统旋转备用容量以及新增机组参与调峰等因素。

3.3 辽宁电网风电接纳能力分析

依据 2.2 节提出的基于调度运行方式的风电接纳能力计算方法，参考调度日常安排机组出力的原则，在满足最小开机方式的基础上，结合各水平年负荷预测及峰谷差情况，得出了辽宁风电消纳能力结论。计算结果如表 1 所示。

(1) 从风电装机各季节平均消纳角度来看，2013~2015 年各年平均风电装机消纳能力为：2 810 MW、2 750 MW、2 290 MW。

(2) 从平衡结果可以看出，2013~2015 年辽宁电网冬季风电装机消纳能力不足，夏季则能够消纳大量风电。其中，1、2 月份风电装机消纳能力几乎为 0，若要强行接纳风电，则需突破机组的最小开机方式；9、10 月份电网接纳风电能力达到最大。

表 1 2013~2015 年辽宁电网调峰能力平衡结果

Table 1 Liaoning grid balance results of peak regulation capacity in 2013~2015

基于最大峰谷差/MW	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2013 年	120	-610	360	1 610	1 270	1 360	1 000	430	1 870	1 490	-120	-100
2014 年	-240	-940	150	1 730	1 440	1 470	940	450	1 960	1 580	-610	-680
2015 年	-820	-1580	30	1 710	1 410	1 020	490	-50	1 510	1 120	-720	-760
基于平均峰谷差/MW	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2013 年	940	90	1 090	2 360	1 980	2 090	1 950	1 600	2 720	2 510	920	680
2014 年	620	290	930	2 540	2 220	2 260	1 940	1 700	2 870	2 670	520	150
2015 年	80	-280	850	2 580	2 240	1 860	1 550	1 290	2 470	2 280	470	120

4 结论

为准确指导与规划电网调峰约束下的风电接纳调度，本文考虑全局运行参数变化，给出电网调峰方式下的风电接纳能力的求解原理，并相应建立风电接纳调度指标的计算模型与方法，求解过程中对调峰参量中的常规火电机组出力与备用、当月典型日的负荷峰谷值以及风电可接纳容量等关键参数量进行建模计算，准确分析出调峰方式与风电接纳调度的数值关系。通过对某省级电网的实际算例分析，采用本文模型方法分析计算，得出风电接纳能力指标值即电网调峰能力，实例结果验证了该指标对电网调峰方式评价的合理性，并指导了间歇式风电接入模式下电网调度的安全稳定运行。

参考文献

[1] 冯利民, 范国英, 郑太一, 等. 吉林电网风电调度自动化系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 39-42.
FENG Li-min, FAN Guo-ying, ZHENG Tai-yi, et al. Design of wind power dispatch automation system in Jilin power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 39-42.

[2] 谢国辉, 李琼慧, 高长征. 基于 Balmorel 模型的风电消纳能力研究[J]. 能源技术经济, 2011, 23(5): 29-33.
XIE Guo-hui, LI Qiong-hui, GAO Chang-zheng. The research of wind dissolve ability based on Balmorel model[J]. Energy Technology and Economics, 2011, 23(5): 29-33.

- [3] 张明理, 李青春, 张楠. 基于多目标经济调峰模型的区域电网风电接纳能力评估方法研究[J]. 东北电力技术, 2011, 22(9): 23-25.
ZHANG Ming-li, LI Qing-chun, ZHANG Nan. The evaluation method research of wind dissolve ability based on multi-objective economics peak shaving model[J]. Northeast Electric Power Technology, 2011, 22(9): 23-25.
- [4] 谢俊, 张晓花, 吴复霞, 等. 基于合作博弈论和工程方法的调峰费用分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 16-22.
XIE Jun, ZHANG Xiao-hua, WU Fu-xia, et al. Peaking cost allocation using cooperative game theory and engineering concept[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 16-22.
- [5] 侯婷婷, 娄素华, 张滋华, 等. 协调大规模风电汇聚外送的火电容量优化[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 255-260.
HOU Ting-ting, LOU Su-hua, ZHANG Zi-hua, et al. Capacity optimization of corollary thermal sources transmitted with large-scale clustering wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 255-260.
- [6] 耿静, 严正, 蒋传文, 等. 考虑环境成本的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 111-114.
GENG Jing, YAN Zheng, JIANG Chuan-wen, et al. The studies of peak regulation transaction considering environment costs[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 111-114.
- [7] 刘扬洋, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑需求侧管理的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 38-43.
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.
- [8] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 236-240.
ZHANG Kun, WU Jian-dong, MAO Cheng-xiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 236-240.
- [9] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-150.
HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-150.
- [10] 张粒子, 凡鹏飞, 麻秀范, 等. 考虑调峰适应性风险的风电场群时序规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 14-18.
ZHANG Li-zi, FAN Peng-fei, MA Xiu-fan, et al. Timing planning method for investment of clustering wind farms considering risk of peak load regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 14-18.
- [11] 王锐, 顾伟, 孙蓉, 等. 基于概率最优潮流的风电接入能力分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 214-217.
WANG Rui, GU Wei, SUN Rong, et al. Analysis on wind power penetration limit based on probabilistically optimal power flow[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 214-217.
- [12] 王芝茗, 苏安龙, 鲁顺. 基于电力平衡的辽宁电网接纳风电能力分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 86-88.
WANG Zhi-ming, SU An-long, LU Shun. Analysis on capacity of wind power integrated into Liaoning power grid based on power balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 86-88.
- [13] 姚金雄, 张世强. 基于调峰能力分析的电网风电接纳能力研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 27(7): 25-28.
YAO Jin-xiong, ZHANG Shi-qiang. Analysis on capacity of wind power integration into grid based on peak load regulation[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 27(7): 25-28.
- [14] 鲁顺, 全成浩, 刘剑, 等. 电网接纳风电能力技术支持系统分析[C] // 第三届电能质量及柔性输电技术研讨会论文集.
LU Shun, QUAN Cheng-hao, LIU Jian, et al. The analysis of wind dissolve technical support system[C] // proceedings of the Third Term of Power Quality and

- Flexible Transmission.
- [15] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 70-74.
SUN Rong-fu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 70-74.
- [16] 李晓明, 戎士洋, 李晓龙, 等. 电网风电接纳能力分析[J]. 河北电力技术, 2011, 30(1): 31-35.
LI Xiao-ming, RONG Shi-yang, LI Xiao-long, et al. Analysis on maximum wind power penetration into power grid[J]. Hebei Electric Power, 2011, 30(1): 31-35.
- [17] 李智, 韩学山, 杨明, 等. 计及接纳风电能力的电网调度模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 15-18.
LI Zhi, HAN Xue-shan, YANG Ming, et al. Power system dispatch considering wind power grid integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 15-18.
- [18] 韩自奋, 陈启卷. 考虑约束的风电调度模式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 89-92.
HAN Zi-fen, CHEN Qi-juan. Wind power dispatch model based on constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 89-92.
- [19] 郑太一, 冯利民, 王绍然, 等. 一种计及电网安全约束的风电优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 71-75.
ZHENG Tai-yi, FENG Li-min, WANG Shao-ran, et al. An optimized wind power dispatching method considering security constraints in the power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 71-75.
- [20] 查浩, 石文辉. 协调电网接纳风电能力的概率优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 14-17.
ZHA Hao, SHI Wen-hui. The research of probability optimization coordinating wind dissolve ability[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 14-17.

收稿日期: 2014-01-03; 修回日期: 2014-04-19

作者简介:

张涛(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制。E-mail: lobsterzt@163.com