

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.005

风电场出力特性与集群效应分析方法研究

陈雷¹, 卢斯煜²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510080)

摘要: 从时间和空间分布的角度, 提出风电场时空出力特性的分析框架, 包括单一风电场的长期出力特性和短期出力特性分析、风电场集群长期波动相关性和短期波动互补性的分析方法。利用所提分析框架和指标, 以海南文昌风电场为例, 开展风电出力特性分析; 以海南文昌(1座风电场)、儋州(2座风电场)、东方(2座风电场)以及海南全省风电集群为例, 开展风电集群效应分析, 验证分析框架和指标的实用性和有效性。

关键词: 风电; 出力特性; 集群效应

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0031-07

Research on the Analysis Method for Wind Power Generating Output Characteristic and Cluster Effects

CHEN Lei¹, LU Siyu²,

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: A framework for wind power generating output characteristic analysis has been proposed from the perspective of time and space distribution. The proposed framework includes long-term and short-term generating output characteristic analysis of a single wind farm, the relation of long-term fluctuation and the complementation of short-term fluctuation of wind farms cluster. The proposed method was applied to an analytic study of Wenchang wind farm, Danzhou wind farm, Dongfang wind farm and the Hainan wind farm cluster to reveal its rationality and feasibility.

Key words: wind power; characteristic of generating output; cluster effects

2014年11月, 国务院发布《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》^[1], 提出要大力发展风电, 计划到2020年风电装机达200 GW。相对于火电等常规能源发电, 风电具有较强的随机性、波动性、难以预测性和可调度性差等特点^[2], 并最终表现为发电功率在不同时间尺度上的波动, 大规模风电并网将影响电网的安全稳定运行^[3-7]。为了应对大规模风电并网下的电网分

析和实际运行的需求, 迫切需要对风电出力特性(包括单一风电场的出力特性和风电场集群的出力特性)形成有效的分析方法, 以进一步掌握风电场的时空发电特性, 为电力系统的规划和运行提供决策参考。

本文从时间和空间分布的角度, 提出风电场时空出力特性的分析框架, 包括单一风电场的长期出力特性和短期出力特性分析、风电场集群长期波动相关性和短期波动互补性的分析方法。利用所提分析框架和指标, 以海南文昌风电场为例, 开展风电出力特性分析; 以海南文昌(1座风电场)、儋州(2座风电场)、东方(2座风电场)以及海南全省风电集群为例, 开展风电集群效应分析, 验证分析框架和指标的实用性和有效性。

收稿日期: 2016-06-20

基金项目: 中国南方电网公司2016年重点科技项目(KYKJXM00000021)

作者简介: 陈雷(1989), 女, 江西吉安人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划与可靠性、新能源发电等研究工作(e-mail) chenlei4@gedi.com.cn。

1 总体分析框架

本文所提风电场时空出力特性的分析框架,包括单一风电场的长期出力特性和短期出力特性分析、风电场集群长期波动相关性和短期波动互补性的分析方法。具体如表1所示。

表1 风电场出力特性及集群效应分析方法
Tab. 1. Analysis method for wind farm generating output characteristic and cluster effects

分析方法	分析内容	分析指标
出力特性分析	年度出力特性	年发电量、利用小时、年持续曲线
	月度出力特性	月平均出力曲线、月最大出力曲线、出力概率分布
	日出力特性	日平均出力曲线、日最大出力曲线、保证容量、有效出力、出力波动概率
集群效应分析	出力长期波动相关性	相关系数、最大出力比、风电出力波动比、峰谷差
	出力短期波动互补性	比、波动峰值同时率

2 风电场出力特性分析方法研究

风电出力具有很强的随机性和波动性,并最终表现为发电功率在不同时间尺度上的波动。本文从不同时间的角度提出分析风电场发电出力特性的方法。

2.1 长期出力特性分析

影响风电长期出力特性的因素包括季节性变动、因气候影响等原因而造成的年际变动等,这方面的出力变化对于电网的日常运行和管理影响较小,但对电力系统的中长期规划具有重要的参考意义。本节主要从年度和月度时间层面对此进行分析。

2.1.1 年度出力特性分析

由于某一地区年度气候变化相似,风电场长期的年平均风速变动趋势也相似,可用标准差为6%的正态分布表示,以确定长期时间范围内风量的预期变化以及相应的风电场年发电出力。年度出力特性可采用年度发电量、年利用小时数等指标进行衡量。

2.1.2 月度出力特性分析

风电月度出力水平变化曲线可用于电力系统年度电力电量平衡、制定年度发电计划。

风电的季节性变动主要受季风影响,季风是大

范围盛行的、风向随季节显著变化的风系,由海陆分布、大气环流、大陆地形等因素造成的,以一年为周期的大范围对流现象^[8]。我国处于东亚季风区内,表现为:盛行风向随季节变化有很大差别,甚至相反。冬季盛行东北气流,华北—东北为西北气流。夏季盛行西南气流,东部地区盛行东南气流。

风电场的月度出力特性可具体通过月平均出力曲线、月最大出力曲线、出力概率分布等指标进行衡量。

2.1.2.1 月平均出力曲线

表征风电场月度平均发电出力,以衡量其发电量在全年各个月的分布情况,可用于电力系统电量平衡计算,分析风电对水电、火电发电量的影响。

2.1.2.2 月最大出力曲线

表征风电场在逐月出现的最大发电出力,可用于电力系统电力平衡计算。

具体计算方法是:将月内各点的风电场历史出力数据按从小到大排序,取保证率95%时对应的出力作为月最大出力,即认为该月内风电出力有95%的概率低于该值。在此处,保证率体现了规划者对于风电提供最大出力能力的信任程度,保证率越高,表明信任程度越高,具体数值可根据规划需要和风险喜好进行适当修改。本文取95%的保证率,可有效的剔除瞬时冲击出力,体现风电对系统电力平衡的最大支撑能力。

2.1.2.3 出力概率分布

表征风电场在各出力区间上的分布概率,可用于分析风电出力的分布情况。

2.2 短期出力特性分析

风电场的短期(数分钟到数小时)发电出力变化,主要取决于短时间内风的变化(包括风速、风向等)、天气类型以及风电场的地理位置。风电场短期发电出力具有较大的随机性和波动性,主要影响日常运行中发电机组的开机计划以及旋转备用容量的确定。本节主要从日出力特性和出力波动特性对此问题进行分析。

2.2.1 日出力特性

2.2.1.1 日平均出力曲线(丰、枯期)

表征丰枯期风电场一天各时段的平均出力,衡量平均意义下,电站一天之内的发电量在各个小时的分布情况,可用于分析风电场出力与负荷特性的匹配关系以及对调度运行的影响。

2.2.1.2 日最大出力曲线

表征风电场一天之内各时段分别所能达到的最大出力, 可用于分析风电对系统调峰的影响, 校核电网对风电的传输和消纳能力。

具体计算方法与月最大出力曲线类似, 分别对丰、枯期同一小时数据从小到大排序, 取保证率 95% 时所对应的出力作为该小时最大出力。

2.2.1.3 高峰保证容量

表征风电场在满足一定保证概率下的发电出力, 用于衡量其在负荷高峰时段所能提供的具有一定保障性的最小出力。该指标可应用于系统电力平衡分析。

具体计算方法是: 将负荷高峰时段对应的风电出力数据按从大到小排序, 取保证率 95% 对应的出力。在此处, 保证率同样体现了规划者对于风电提供发电能力的信任程度, 具体数值可根据规划需要和风险喜好进行适当修改。

2.2.1.4 低谷保证容量

表征风电场在满足一定保证概率下的发电出力, 用于衡量其在负荷低谷时段所可能提供的最大发电出力, 此部分出力需要系统提供相应的保证容量, 以维持系统调峰平衡。该指标可应用于系统电调峰平衡分析。

具体计算方法是: 将负荷低谷时段出力数据按从小到大排序, 取保证率 95% 对应的出力。

2.2.2 出力波动特性

表征风电场发电出力的波动性, 用于研究风电并网对系统调频的要求, 可用不同时间尺度下的出力变化率进行衡量。

具体可根据每 5 min、15 min 或 1 h 的历史出力变化值, 计算其与风电场装机容量的比值, 并按出现概率进行统计, 见式(1)。

$$\text{变化率} = \frac{P_n - P_{n-1}}{P_{\text{装机}}} \quad (1)$$

2.2.2.1 1 min 之内

通过对风电场数据的分析表明: (1) 对于大容量的单台风电机组, 由于风力在转子上的均化以及风电机组惯性效应, 数秒时间段出力变动很小; (2) 对于单个风电场, 由于风力在风电场内各台机组的均化, 其在数十秒时间段的累计出力变动较小。因此, 由于风电机组的惯性、风电场的累计效应, 因涡流或瞬时的风速快速变化造成的出力变动, 其对电力系统所造成的影响基本上可以忽略。

2.2.2.2 1 h 之内

1 h 内的风电波动对系统具有明显的影响。不同规模的风电场以及风电场地理位置上的分布状况对 1 h 内风电波动量分布有较大影响。对于地理位置分布较广的风电场, 30 min 功率波动大部分分布在装机容量的 $\pm 5\%$ 范围内, 而小时功率波动则大部分分布在装机容量的 $\pm 15\%$ 范围内。

风电出力波动的最大值一般出现在风暴前锋经过时, 风电机组因达到其风暴限制(切出风速)而失速, 导致其有功功率在几分钟内由满发降至零功率。在较小的地理区域时, 这种变动更为明显。表 2 是考虑不同区域面积的 1 h 内风电出力最大变动的参考值。

表 2 考虑不同区域面积的 1 h 内风电出力最大变动
Tab. 2 Maximal wind power output fluctuation during 1 hour in the condition of different areas

区域面积	最大变动 / %	示例
100 km × 100 km	50	英国
200 km × 200 km	30	丹麦
400 km × 400 km	20	德国、丹麦、芬兰
一组国家(欧洲)	10	/

风暴前锋可以预测, 因此可以采取适当的控制措施来尽量减少它的影响。现在已有相关技术和解决方案可以减缓风暴前锋经过时风电场出力曲线的下降陡度^[9]。

可见, 小时内的风电波动对系统影响较大, 当风电的渗透率较高时, 小时级的风电波动会对电网备用的平衡产生影响。

2.2.2.3 数小时内的波动

风电场在数小时内的最大出力变动范围基本上可达到装机容量的 80% 甚至更高, 而目前广泛研究的风电出力预测工具致力于解决这个问题^[10]。短期风电功率预测一般有很多方法, 对于提前 6 h 及以上的预测时间, 一般都采用“数值天气(NWP)”模型, 来测算未来某个时间点风电场的风速信息。

影响系统运行的极端情况是较大规模的上下变动的预测错误, 如出现风暴前锋而无法确定在其影响下出力下降多少, 此时对预测工具的准确度至为重要。

3 风电场集群效应分析方法研究

由于风电场覆盖地域较大, 处于不同区域的风

机所接受的风能会存在空间上的差异,可能导致其风速—功率曲线存在明显的差异。受各种因素的影响,单台风电机组与单个风电场乃至整个风电场群的输出功率波动特性存在较大差异。对风电场群而言,基本不会出现由于无风而使电网内风电机组同时停运的情况,也不会出现同一电网所有风电场同时满发的情况;而风电功率的波动随空间分布尺度的增大也趋于缓和。

3.1 风电出力长期波动的相关性

风电的长期波动特性取决于季节性气候类型以及年度间风的变化,这些因素影响的范围一般非常大,同一气候环境下的风能波动具有明显相似的趋势。在风资源丰富地区,地理位置比较靠近的风电场基本处于同一风带,其出力具有较强的相关性;随着距离的增加,风场间出力的相关性不断下降^[11]。此外,同样距离的风电场,不同的高度,其出力的相关性也不同。一般而言,高度越高,受地面因素影响越小,其相关性越大^[12]。因此,风电出力长期波动相关性受风电场所在地气候条件、地理条件、风电场距离、风机高度等因素的影响。

研究风电出力长期波动的相关性,可采用月度平均/最大出力曲线、日平均/最大出力曲线等开展分析。

3.2 风电出力短期波动的互补性

处于不同位置的风电场,其风峰和风谷到达时间不同,最大出力变化率出现时刻也不相同,因而可实现互补,降低风电场的出力变化率。由于一个集群内的风电场之间距离有限,因此这种互补性主要体现在小时级以下的时间尺度范围内。

大规模风电的功率波动主要由长期趋势性和短期波动性决定的。处于同一气候区域内的风电场之间,长时间尺度下,功率波动具有明显的相关性;短时间尺度下则具有很大的互补效应,这两方面共同组成了风电的集群效应。

随着并网风电范围和汇聚容量的增加,风电的集群效应将越加明显,本文以最大出力比、最大波动比、峰值同时率、峰谷差等作为研究风电集群效应的量化指标。

3.2.1 相关系数

相关系数又称积差相关系数,用来说明两变量间相关的密切程度与相关方向,以符号 r 表示(正值表示正相关,负值表示负相关;绝对值越大说明

相关关系越密切,绝对值等于1为完全相关,等于0为零相关)。

3.2.2 最大出力比 V_{PS}

最大出力比是指一段时间内,风电场集群总有功出力的最大值 $P_{\Sigma \max}$ 与区域内风电集群额定容量 ΣP_k 的比值。该指标用于描述风电集群在并网过程中相互之间削峰填谷、平抑波动的能力。一般来说,风电场位置距离越远,气候地理条件差异越大,风电集群平抑波动的效果越明显, V_{PS} 的值越小。

$$V_{PS} = \frac{P_{\Sigma \max}}{\sum P_k} \quad (2)$$

根据不同的气候或季节,同一风电场群最大功率波动比的数值也可能不同。

3.2.3 风电出力波动比 $C_{\Delta PS}$

风电出力波动比是指一段时间内,风电集群的总功率波动量 ΔP_{\max} 与总额定容量 ΣP_k 的比值,可表示如下:

$$C_{\Delta PS} = \frac{\Delta P_{\max}}{\sum P_k} \quad (3)$$

3.2.4 峰谷差比 $C_{\Delta P}$

峰谷差比是指一段时间内,风电集群出力的峰谷差与总额定容量 ΣP_k 的比值,可表示如下:

$$C_{\Delta P} = \frac{P_{\Sigma \max} - P_{\Sigma \min}}{\sum P_k} \quad (4)$$

3.2.5 波动峰值同时率 C_{oin}

波动峰值同时率是指一段时间内,风电集群总有功出力的最大值 $P_{\Sigma \max}$ 与区域内各子风电场各自最大出力之和 $\Sigma P_{i \max}$ 的比值。

$$C_{oin} = \frac{P_{\Sigma \max}}{\sum P_{i \max}} \quad (5)$$

4 算例分析

为验证本文所提风电场时空出力特性的分析框架及其指标的有效性,以海南文昌风电场为例,开展风电出力特性分析;以海南文昌(1座风电场)、儋州(2座风电场)、东方(2座风电场)以及海南全省风电集群为例,开展风电集群效应分析。

4.1 风电出力特性分析

4.1.1 长期出力特性分析

以年度出力特性为例,对2011—2012年海南

文昌等若干风电场的历史出力统计数据开展分析, 结果如图 1 所示。

2011 年海南风电场年利用小时数在 1 315 ~ 2 340 h 范围内, 平均值为 1 974 h; 2012 年海南风电场年利用小时数在 1 256 ~ 1 896 h 范围内, 平均值为 1 637 h。

4.1.2 短期出力特性分析

4.1.2.1 日出力特性分析

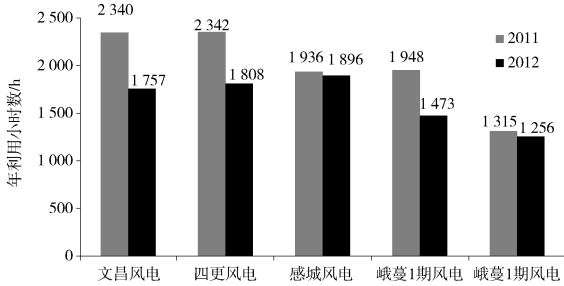


图 1 海南风电场年利用小时数

Fig. 1 Generating hours of wind farms in Hainan

以高峰保证容量为例开展分析。根据海南的负荷特性, 分别选取丰期 20 点、枯期 19 点的风电场出力进行分析, 得出风电场出力与保证率之间的关系如图 2 所示。由图 2 可见, 在海南负荷高峰时段, 取保证率为 95% 的情况下, 文昌风电场的保证出力接近为 0; 取保证率为 50% 的情况下, 丰期保证出力约为装机容量的 6%, 枯期约为 25%。可见, 在系统负荷高峰时段, 文昌风电场出力具有较大的随机性、出力得不到保证, 要充分利用风电需要系统有足够的备用和调峰能力。

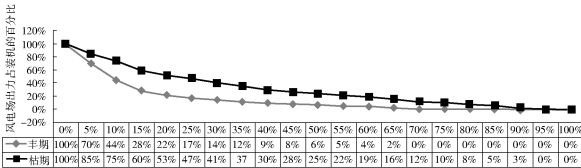


图 2 文昌风电场高峰保证容量曲线

Fig. 2 The dependable capacity curve of Wenchang wind farm during peak-load periods

4.1.2.2 出力波动特性

由图 3 可见, 在 5 min、10 min、30 min 和 60 min 时间范围内, 文昌风电场出力变化率在装机容量的 -2.5% ~ 2.5% 范围内的概率分别为约 0.8、0.7、0.55 和 0.45; 在 -7.5% ~ 7.5% 范围内的概率分别为 0.97、0.94、0.83、0.74。

5 min 和 10 min 之内风电场出力变化率基本在装机容量的 2.5% 以内, 部分出力变化也可能出现在 2.5% ~ 7.5% 之间。30 min 和 60 min 出力变化率则基本在装机容量的 7.5% 以内, 部分出力变化也可能出现在 7.5% ~ 12.5% 之间。

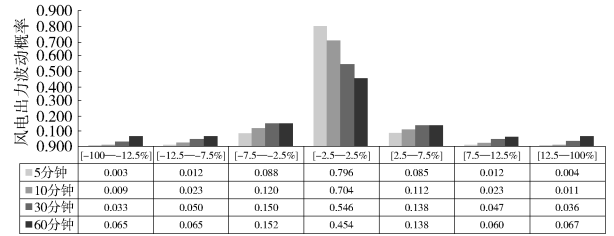


图 3 文昌风电场功率波动概率分布

Fig. 14 Fluctuation probability of Wenchang wind farm's generating output

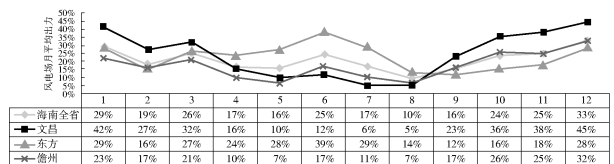
4.2 风电集群效应分析

为分析海南风电集群效应, 对分布在文昌(1 座风电场)、儋州(2 座风电场)和东方(2 座风电场)共 5 座风电场 2011—2012 年全年每隔 15 min 的历史出力数据进行综合分析, 研究风电的集群效应。

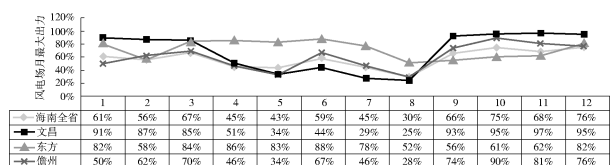
4.2.1 长期波动相关性分析

图 4 给出了考虑风电集群效应后的月平均出力和最大出力。由图中可见, 海南风电集群整体的月平均出力为 10% ~ 33%, 同样呈现出丰小枯大的特点(丰枯期发电量比为 42% : 58%)。

月最大出力方面, 海南风电集群综合月最大出力处于各风电场最大出力之间, 为 30% ~ 76%, 全年最大出力出现在 12 月。



(a) 风电场月平均出力曲线



(b) 风电场月最大出力曲线

图 4 海南全省与各片区风电月出力曲线

Fig. 4 The monthly wind generating output curve

4.2.2 短期波动互补性分析

以最大波动比和峰值同时率开展分析。

4.2.2.1 最大波动比分析

统计一天中1 h间隔的日最大功率波动,按从小到大排序,取保证率95%时对应的波动比作为总体的最大功率波动,具体如表3所示。由统计结果可见,文昌风电场的最大波动比为0.77,均值为0.32;儋州和东方风电场后最大波动比分别为0.6和0.5,均值为0.25和0.24;而海南集群的最大波动比降为0.33,均值为0.16。可见,由于风电场集群在出力波动方面存在互补效应,其最大波动比和均值均有明显下降。

表3 海南风电1 h最大波动比

Tab. 3 The proportion of maximal wind generating output fluctuation in hainan

地区	文昌	儋州	东方	海南全省
风电容量/数量	49.5/1	100/2	97.5/2	246/5
最大波动比	0.77	0.60	0.50	0.33
日最大波动比均值	0.32	0.25	0.24	0.16

4.2.2.2 峰值同时率分析

由表4的统计结果可见,文昌、儋州和东方风电场,其最大峰值同时率均为1,海南全省最大峰值同时率降低到0.94;日最大峰值同时率均值分别为1.00、0.94、0.88和0.75。可见,由于风电场集群峰谷出力在时序上的互补性,最大峰值同时率和均值有一定程度的下降。

表4 海南风电波动峰值同时率

Tab. 4 The proportion of maximal wind generating output fluctuation in hainan

地区	文昌	儋州	东方	海南全省
风电容量/数量	49.5/1	100/2	97.5/2	246/5
最大峰值同时率	1.00	1.00	1.00	0.94
日最大峰值同时率均值	1.00	0.94	0.88	0.75

5 结论

本文从时间和空间分布的角度,提出风电场时空出力特性的分析框架,包括单一风电场的长期出力特性和短期出力特性分析、风电场集群长期波动相关性和短期波动互补性的分析方法。利用所提分析框架和指标,以海南文昌风电场为例,开展风电出力特性分析;以海南文昌(1座风电场)、儋州(2

座风电场)、东方(2座风电场)以及海南全省风电集群为例,开展风电集群效应分析,验证了分析框架和指标的实用性和有效性。通过应用本文所提出的风电场时空出力特性的分析框架及其指标对海南若干风电场及集群的分析,可得到如下结论:

1) 海南文昌风电场2011—2012年发电利用小时数在1 757~2 340 h范围内,月平均出力与月最大出力具有较强的相关性,整体呈现枯多丰少的特点;日平均/最大出力水平呈现枯期大于丰期的特点。

在海南负荷高峰时段(丰期20点、枯期19点),文昌风电场在95%保证率下的出力接近为0,50%保证率下的丰期出力约为装机容量的6%,枯期约为25%,出力具有极大随机性,高峰电力支撑能力非常有限。而在海南负荷低谷时段(凌晨4点),文昌风电场在95%保证率下的丰期出力为风电装机的74%,枯期为90%,呈现明显的反调峰特性,调峰压力巨大。

波动率方面,文昌风电场在5和10 min之内的出力变化率基本在装机容量的2.5%以内,30 min和60 min出力变化率则基本在装机容量的7.5%以内,出力基本可控,对系统调频影响不大。

2) 风电集群中各风电场出力相关性一般与地理距离、纬度等因素有关,地理距离越近,出力相关性越强。

考虑风电集群后,由于各子风电场出力在时序上存在互补效应,集群整体的最大出力比(及其均值)、最大波动比(及其均值)、最大峰谷差(及其均值)、最大峰值同时率(及其均值)均存在明显下降。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014—2020年)[EB/OL]. (2014-11-20). http://news.xinhuanet.com/energy/2014-11/20/c_127231835.htm.
- [2] 张运洲, 白建华, 辛颂旭. 我国风电开发及消纳相关重大问题研究[J]. 能源经济技术, 2010, 22(1): 1-6.
ZHANG Y Z, BAI J H, XIN S X. Study on the key Issues concerning development and consumption of wind power in china [J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(1): 1-6.
- [3] SFETSOS A. A comparasion of various forecasting techniques applied to mean hourly wind speed time series [J]. Renewable Energy, 2000, 21(1): 23-35.
- [4] HADJISAID N, CANARD J, Dumas F. Dispersed generation

- impact on distribution networks [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1999, 12(2): 22-28.
- [5] PUTTGEN H, MAC GREGOR P, LAMBERT F. Distributed generation: semantic hype of the dawn of a new era [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(1): 22-29.
- [6] DRIESEN J, BELMANS R. Distributed generation: challenges and possible solutions [C]. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada: IEEE, 2006.
- [7] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源源入功率计算 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.
- HU H, WU S, XIA X, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17.
- [8] 张丽. 季风风向变化研究及其在季风模拟评估中的应用 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [9] 任双雪. 风电功率陡坡特性与预测问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 刘兴杰. 风电输出功率预测方法与系统 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [11] 范荣奇, 陈金富, 段献忠, 等. 风速相关性对概率潮流计算的影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 18-22, 76.
- FAN R Q, CHEN J F, DUAN X Z, et al. Impact of wind speed correlation on probabilistic load flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 18-22, 76.
- [12] 郑文书. 基于时空相关性的区域风电场群风速预测研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- (责任编辑 高春萌)
-
- (上接第 30 页 Continued from Page 30)
- [9] 谢磊, 张聪, 陈皓勇. 含风电系统的无功优化调度 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 76-81.
- XIE L, ZHANG C, CHEN H Y. Optimal reactive power dispatch considering wind turbine systems [J]. South Power System technology, 2015, 9(5): 76-81.
- [10] 吴大为. 分布式冷热电联产系统的多目标热力学优化理论与应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [11] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
- GU Z P, KANG C Q, CHEN X Y. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [12] 赵允新, 徐国禹. 用敏感度方法分析计算电力系统无功和电压最优控制问题 [J]. 重庆大学学报, 1985(4): 7-17.
- ZHAO Y X, XU G Y. Calculation and analysis of optimal control of system voltage and reactive power by sensitivity method [J]. Journal of Chongqing University, 1985(4): 7-17.
- [13] 李林川, 夏道止, 杨振平. 电力系统电压和网损优化计算 [J]. 电力系统自动化, 1995(7): 30-33.
- LI L C, XIA D Z, YANG Z P. An optimal calculation of voltage and loss in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995(7): 30-33.
- [14] 沈如刚. 电力系统无功功率综合优化——二次规划法 [J]. 中国电机工程学报, 1986(5): 42-50.
- SHEN R G. Reactive power optimization in power system quadratic programming method [J]. Proceedings of the CSEE, 1986(5): 42-50.
- [15] 周双喜, 杨彬. 实现无功优化的新算法——遗传算法 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19(11): 19-23.
- ZHOU S X, YANG B. A new algorithm for reactive power optimization-genetic algorithms [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(11): 19-23.
- [16] 马晋骏, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 1995(5): 347-353.
- MA J T, YANG Y H. Application of genetic algorithms in reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 1995(5): 347-353.
- [17] 陈皓勇, 王锡凡. 电力系统无功优化的退火选择遗传算法 [J]. 中国电力, 1998, 31(2): 3-6.
- CHEN H Y, WANG X F. A genetic algorithm with annealing selection for reactive power optimization [J]. Electric Power, 1998, 31(2): 3-6.
- [18] 秦绪忠, 江亿. 基于遗传算法的环形供热网可及性分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(6): 1-95.
- QIN X Z, JIANG Y. Accessibility analysis of district heating loop-networks based on genetic algorithms [J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 1999, 39(6): 1-95.
- [19] 胡学芹. 基于遗传算法的集中供热网热量分配的研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.
- [20] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence [M]. Oxford: U Michigan Press, 1975.
- [21] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002.
- (责任编辑 郑文棠)