

DOI: 10.7667/PSPC161756

## 考虑大规模可再生能源接入的输电设备检修计划

蔡 帆<sup>1</sup>, 罗治强<sup>2</sup>, 杨军峰<sup>2</sup>, 李培军<sup>1</sup>, 张加力<sup>1</sup>, 戴 赛<sup>1</sup>, 张传成<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国家电网公司, 北京 100031)

**摘要:** 随着可再生能源的快速发展, 对于高电压等级(500 kV 及以上和部分 220/330 kV)的输电设备检修计划编制, 必须考虑可再生能源输送能力的保障。为此, 提出了一种大电网输电设备检修计划编制方法。利用等效负荷的概率密度函数和日最小开机出力计算弃风电量, 作为检修计划的优化目标之一; 针对光伏、水电的特性分别提出适合其外送通道设备检修的时段。考虑输电断面运行安全, 建立了基于多约束条件的大电网检修计划模型, 采用混合整数规划方法对该模型进行求解。以实际电网的年度检修计划编制作为算例进行了验证。

**关键词:** 检修计划; 可再生能源; 输电断面; 电网安全; 优化模型

### Transmission maintenance scheduling with large-scale renewable energy integration

CAI Zhi<sup>1</sup>, LUO Zhiqiang<sup>2</sup>, YANG Junfeng<sup>2</sup>, LI Peijun<sup>1</sup>, ZHANG Jiali<sup>1</sup>, DAI Sai<sup>1</sup>, ZHANG Chuancheng<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;  
2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

**Abstract:** With the rapid development of new energy, transmission equipment (220/330 kV, 500 kV and above) maintenance scheduling needs to ensure the capability of renewable energy transmission. A new scheduling method is proposed, and its principle is as following: equivalent load probability density function and daily minimum generation are utilized to acquire wind power curtailment quantity as one of the optimization objectives; considering the solar and hydro characteristics respectively, the appropriate renewable energy transmission equipment maintenance periods are proposed. Taking into account the tie-line section security, an integrative maintenance scheduling model is established and mixed-integer programming method is utilized to solve this problem. The validity and rationality of the method is proved by the yearly maintenance scheduling of actual power grid.

**Key words:** maintenance scheduling; renewable energy; transmission section; power grid security; optimization model

## 0 引言

为了实现发电生产结构的持续优化, 中国目前正在积极大力发展清洁可再生能源, 转变以化石能源为主的能源格局<sup>[1-2]</sup>。然而, 目前中国能源资源分布及负荷分布极为不均衡, 大规模可再生能源的发展进一步加重这一局面。根据中国的能源结构特点, 能源供应和能源需求呈逆向分布, 丰富的风电、光伏及水电等清洁能源主要集中在我国“三北”及西南等地区, 负荷中心则在华东和华中地区, 因此只有通过远距离输电, 扩大风光水等清洁能源的消纳范围, 才能实现其有效消纳。随着中国国内远距离

大功率输电网络的建设, 各区域间电气联系愈发紧密, 输电网络拓扑结构日趋复杂, 对于高电压等级的输变电设备(包括 500 kV 及以上电压等级和部分 220/330 kV 电压等级的交直流线路及相关的母线、主变和换流器等)的停电检修计划编制工作来说, 保障可再生能源的输送和充分消纳是其必须要考虑的主要因素。

目前国内外的研究在输电设备检修计划编制方面主要考虑经济性和可靠性因素<sup>[3-10]</sup>, 考虑可再生能源输送因素尚不多见; 文献[11-13]分析了大规模风电接入对机组检修计划编制所造成的影响, 考虑了机组调峰能力和失负荷期望等因素, 并提出了相应的检修计划方法, 但是这些文献都是以发电机组为研究对象, 发电机组的作用是提供电能, 而输电设备的作用是传输电能, 两者影响可再生能源消

基金项目: 国家电网公司科技项目“一体化电网调度运行智能辅助决策关键技术研究”

纳的机理存在着本质区别, 总体来说, 目前缺乏对考虑可再生能源消纳的输电设备检修计划方法研究。

通过区域功率外送能够有效提高可再生能源消纳空间, 因此, 在输电设备检修期间, 区域的可再生能源功率外送能力会大幅下降, 可能导致可再生能源的弃用, 如何合理安排跨区跨省输电设备检修计划以减少对可再生能源消纳的影响, 是电网计划编制部门关注的重点问题。为解决上述问题, 本文在分析可再生能源特性的基础上, 结合实际电网运行情况, 提出适应跨区互联输电网的检修计划方法。该方法不需要获得精确的未来中长期可再生能源功率预测曲线, 而是通过弃风电量预测分析, 利用光伏和水电的季节特性进行多约束检修模型的建立, 原理清晰, 能够适应当前实际电网的信息化和自动化水平。此外, 为了体现电网运行需求, 本文考虑了可再生能源输电断面的安全约束以及检修数量的优化分布。该方法在国家电网公司的检修计划编制系统中实现了可视化, 运行结果有效地证明了所提建模方法的正确性与有效性。

## 1 可再生能源输送因素

在编制跨省跨区的输电线路及相关设备的检修计划时, 需要考虑其承担的可再生能源输送任务。我国可再生能源的主要构成类型是风电、光伏和水电, 它们在发电特性、地理位置以及开发规模上存在着较大差异, 需要分别进行分析。

### 1.1 风电输送因素

风电是我国开发力度最大的绿色能源, 风电出力存在着随机性和波动性等特点, 而造成弃风的主要原因是风电出力夜间高白天低的反调峰特性。在电网负荷小而风速大的时段, 系统调峰能力不足导致常规机组在负荷低谷时段无法降低出力以接纳风电。

如将风电场出力看作负的负荷, 在时序负荷中减去风电场出力形成新的等效时序负荷, 则可认为弃风主要发生在等效负荷较小的时刻。

等效负荷  $P_{\text{equ}}$  的表达式如式(1)所示。

$$P_{\text{equ}} = P_{\text{d}} - P_{\text{w}} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{d}}$  为区域负荷;  $P_{\text{w}}$  为风电出力。

$P_{\text{equ}}$  一般符合 weibull 分布, 且在一年的不同季节和不同月份, 其概率分布特性曲线存在差别<sup>[14-15]</sup>。因此本文将一年按星期为单位分为 52 个时段, 可以统计拟合得到区域  $i$  在时段  $j$  的等效负荷概率密度函数如式(2)所示。

$$y_{i,j} = f(x) = \begin{cases} ba^{-b}x^{b-1}e^{-(x/a)^b} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $i$  为区域序号;  $j$  为时段序号;  $a$ 、 $b$  为 weibull 函数参数。

区域电网内可接纳的风电功率受限于常规电源出力的调整能力和联络线外送能力。常规电源出力的调整能力的下限为日最小开机出力, 当等效负荷在满足式(3)时可发生弃风。

$$P_{\text{equ}} < P_{\text{G,min}} - P_{\text{L,max}} \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{G,min}}$  为日最小开机出力;  $P_{\text{L,max}}$  为区域联络线输电断面的外送能力。 $P_{\text{G,min}}$  可根据文献[16]中所述方法进行计算: 通过各日最大发电负荷计算该日所需常规电源的尖峰可调容量, 然后通过发电调度顺序确定开机方式以及各开机机组调峰深度, 由此得到当日最小开机出力。由于各日的尖峰负荷在相邻较长一段时间跨度内变化不大, 在该时段内, 各日的机组组合情况基本保持稳定, 因此日最小开机出力也变化不大, 本文按星期为单位来进行计算。

$P_{\text{L,max}}$  为联络线通道在尖峰时段的最大可外送电力。

区域  $i$  在时段  $j$  的日弃风电量  $Q_{i,j}$  如式(4)所示。

$$Q_{i,j} = \sum_{t=1}^{T_0} \int_0^{P_{\text{G,min},ij} - P_{\text{L,max}}} y_{i,j}(P_{\text{G,min},ij} - P_{\text{L,max}} - x) dx \quad (4)$$

式中:  $T_0$  为一天的小时数,  $T_0=24$ ;  $P_{\text{G,min},ij}$  为区域  $i$  在时段  $j$  的日最小开机出力。

设在联络线通道线路  $k$  检修期间, 联络线通道的外送能力从  $P_{\text{L,max}}$  降为  $P_{\text{L,max}}^k$ , 代入式(4), 可得区域  $i$  在线路  $k$  检修时的日弃风电量。

### 1.2 光伏和水电输送因素

相对于风电, 光伏发电呈现出不同的特性:

1) 光伏发电与电力需求高峰相对一致, 一般不具有反调峰特性; 2) 太阳能的能源密度低, 出力波动更加频繁, 难以控制, 是造成弃光的主要原因。一般来说, 光伏发电在春季日最大出力最高, 夏季由于较多的阴雨天和倾角关系, 日最大出力略低, 秋冬季日最大出力最低, 考虑到目前弃光现象并不严重, 一般可安排在秋冬季节。

水电主要分布在我国西南区域, 其特征是汛期降水较为集中, 呈枯丰急转态势, 水电装机容量相比当地用电需求要大, 在丰水期需要大量外送以减少弃水。因此, 水电外送通道的检修宜安排在水电枯水期。

总体来说, 光伏和水电外送通道设备检修一般安排在其出力较低的时期, 且其适合检修的时段较为明确, 可以检修窗口的形式建模在约束条件中。

### 1.3 系统安全因素

考虑到特高压交直流互联电网的运行安全,还应考虑如下互斥约束:1) 避免同一可再生能源输电断面的多条跨省跨区线路同时停电检修,如敦哈 I、II 线和沙烟 I、II 线同属新疆外送断面,应避免同时停电检修;2) 对于某些不属于同一个输电断面的线路,但都承担着同一区域相关联的可再生能源输送任务的设备,如特高压长南 I 线、银东直流线路和高岭直流线路虽然不属于同一输电断面,但是它们都是华北区域和其他区域的能源输电断面设备,分别进行着华北与华中、西北和东北的电能输送,为了保证区域用电平衡,亦应避免同时停电检修。

在满足以上条件时,每个区域的联络线输电断面同时最多只有一条线路进行检修。在线路进行停电检修期间,与其有电气连接关系的母线、主变和直流换流器等设备应进行同停检修。

## 2 检修计划建模与求解

### 2.1 目标函数

目标函数 1: 弃风电量最小

在保障可再生能源消纳方面,如 1.2 节分析,水电和光伏适合检修的时段较为明确,可以停电窗口的形式建模在约束条件中,而风电存在显著的不确定性,并与等效负荷及调峰能力相关,难以准确定位适合检修的时段,因此,选择弃风电量最小作为目标函数之一,如式(5)所示。

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Q_{i,j} / Q_0 \quad (5)$$

式中:  $I$  为区域数;  $T$  为总天数;  $j$  为  $t$  所处的星期时段;  $Q_0$  是年度弃风电量基准值,用于目标函数的归一化处理。

目标函数 2: 检修数量分布方差最小

在人工安排时停电检修数量可能会出现分布不均匀的情况,春秋季节安排检修较多,在某些检修高峰时段容易过于密集,增加了电网运行的风险,需要合理减少密集时段的检修数目。一方面避免出现某些时段检修工作量过大的情况,另一方面降低电网的运行风险,提高电网运行的安全水平。为了避免在某些检修高峰期时段出现密集检修的情况,本文以检修数量分布方差最小为目标函数,如式(6)所示。

$$\min f_2 = \left( \sum_{t=1}^T (1 - K_t / \nu)^2 \right) / T \quad (6)$$

式中:  $K_t$  为  $t$  日停电检修设备数量,具体表达式如式(7)所示;  $\nu = E(K_t)$  是在检修周期内平均每日的

检修数量,当设备工期为定值时,  $\nu$  为常数;  $T$  为总天数。

$$K_t = \sum_{m=1}^N \varphi(t), \quad \varphi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [Start_m, End_m] \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $Start_m$  为设备  $m$  的检修开始时间;  $End_m$  为设备  $m$  的检修结束时间。

上述问题是一个多目标优化问题,本文采用目标函数数量纲归一化后加权求和的方式,将其转化为单目标优化问题。假设两个优化目标的权重分别为  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 总目标函数为

$$\min f = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 \quad (8)$$

### 2.2 约束条件

#### 1) 检修窗口期约束

设备的检修时间应满足检修窗口期约束,1.2 节、1.3 节所考虑的光伏/水电外送和断面限额因素以及保障重要负荷供电等约束均属于此类,如式(9)所示。

$$[Start_i, End_i] \in [Wstart_{ij}, Wend_{ij}] (j=1, \dots, N) \quad (9)$$

式中,  $N$  为设备  $i$  的检修窗口期个数。

#### 2) 互斥约束

某些设备应避免同停检修,1.3 节所考虑的避免同停设备属于此类,如式(10)所示。

$$[Start_i, End_i] \cap [Start_j, End_j] = \Phi \quad (10)$$

式中,设备  $i$  和设备  $j$  为互斥设备。

#### 3) 同停约束

一次停电可以进行检修的设备应该同时检修,避免重复停电,如在线路进行停电检修期间,与其有电气连接关系的相关设备应进行同停检修,如式(11)所示。

$$\begin{cases} Start_i = Start_j \\ End_i = End_j \end{cases} \quad (11)$$

式中,设备  $i$  和设备  $j$  为同停设备。

#### 4) 日检修数量约束

在某些特殊时段如夏季负荷高峰期,需要控制日检修数量,降低系统运行风险,如式(12)所示。

$$K_t < K_{tmax} \quad (12)$$

式中,  $K_{tmax}$  为  $t$  日停电检修设备数量上限。

#### 5) 工期约束

$$End_i - Start_i = D_i \quad (13)$$

式中,  $D_i$  为设备  $i$  的工期。

#### 6) 不可变更的检修约束

某些设备的检修时间不允许调整,不参与优化编排,如式(14)所示。

$$[Start_i, End_i] = [Startplan_i, Endplan_i] \quad (14)$$

式中,  $[Startplan_i, Endplan_i]$  为设备  $i$  的固定检修时间。

### 2.3 求解方法

通过以上表达, 检修计划模型形成了一个混合整数规划问题, 对此类问题可用的求解方法包括分支定界法和割平面法等, 本文采用国际上成熟的 CPLEX 规划计算软件包进行求解。

## 3 算例分析

### 3.1 算例参数

本文以存在大量可再生能源外送需求的12个省级电网为例, 以省份为区域单位, 进行2017年365天的跨省输电设备检修计划优化计算, 考虑的跨省输电线路及相关输电设备如表1所示。

表1 考虑可再生能源输送的跨省输电线路及相关设备

Table 1 Trans-provincial tie-lines and related equipment for renewable energy

主要外送能源	线路数	设备数	省份数	送端地理位置
风电	67	186	8	西北、华北和东北
光伏	23	57	4	西北
水电	42	122	3	西南、华中

注: 部分线路、设备和省份同时外送多种能源, 其数目被重复统计。

结合未来的电网规划, 采用预测工具预测未来一年的负荷预测、可再生能源出力和未来电网运行方式等数据。对于考虑风电外送的省份, 形成未来一年各星期的等效负荷分布概率密度函数和日最小开机出力数据; 对于考虑水电和光伏外送的省份, 预测未来水电或光伏出力较小的可检修窗口期。因为预测时间长, 就具体某一日而言可能会出现与实际出力有差异的情况, 然而, 由于可再生能源出力具有较小的年际波动特性<sup>[16-17]</sup>, 即相同季节出力统计特性年际间变化不大, 具有较强的稳定性, 因此在较长的参考时间尺度上, 可以满足编制输电断面设备检修计划的需要。

### 3.2 风电输送设备检修结果分析

2016年风电外送省份的弃风电量总和约为500亿 kWh, 考虑到风电规模的增长, 本文设定2017年的年度弃风电量基准值  $Q_0$  为600亿 kWh。

为了研究检修计划对弃风电量的影响, 本文建立了两个对比方案。

方案1: 在检修决策中不考虑风电消纳; 设定  $\omega_1=0$ ,  $\omega_2=1$ 。

方案2: 在检修决策中考虑风电消纳; 设定  $\omega_1=10$ ,  $\omega_2=1$ 。在该参数下, 系统以减少弃风量为首要目标, 再调整检修计划数量在时间上的分布, 优化决策检修计划。

将两个检修计划方案的弃风量进行比较, 如图1所示, 电网的总弃风量、目标函数  $f_1$  和  $f_2$  如表2所示。

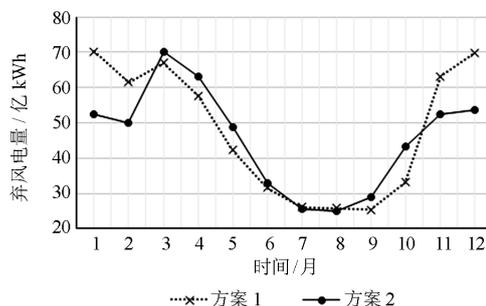


图1 不同检修计划决策方案下的弃风电量

Fig. 1 Wind power curtailment quantity under different maintenance scheduling programs

表2 权重值与目标函数的关系表

Table 2 Relationship between the weight value and the objective functions

方案	弃风量/ 亿 kWh	检修数量 分布方差	目标函数 1	目标函数 2
1	573.54	156.7	0.9559	0.429
2	546.42	194.1	0.9107	0.532

由图1和表2可知, 在检修决策中考虑风电消纳, 相比于不考虑风电的情况, 总弃风电量从573.54亿 kWh降低到546.42 kWh, 减少4.72%, 但检修数量分布方差从156.7上升到194.1。根据不同的决策者偏好, 通过权重值的设置, 可以权衡优化弃风电量和检修数量分布。通过本结果, 充分说明了输电设备的检修计划决策能够影响到电网的弃风水平, 因为有必要在跨省跨区联络线设备的中长期检修计划编制中增加对风电消纳的考虑。

### 3.3 光伏和水电输送设备检修结果分析

表3显示了采用方案2的情况下, 具有代表性的跨省特高压直、交流线路检修计划优化决策结果。

表3 输电线路检修计划优化结果

Table 3 Transmission line maintenance scheduling results

名称	送端区域	主要输送 能源类型	检修时段
天中线路	新疆	风电、光伏	10月11日—10月21日
银东线路	宁夏	风电、光伏	9月2日—9月11日
灵绍线路	宁夏	风电、光伏	9月15日—9月26日
复奉线路	四川	水电	3月19日—4月7日
葛南线路	湖北	水电	11月1日—11月12日
:			

除了丰富的风力发电, 西北地区的光伏发电量也较大, 因此检修时段以安排在光伏发电量较低的秋冬季节为主; 西南和华中地区水电丰富, 为了避免发生弃水, 把相关线路安排到枯水或少水季节。通过约束条件的限制, 使得优化决策结果符合充分利用可再生能源合理安排输电设备检修的规律, 验证了算法的合理性。

#### 4 结论

本文分析了我国高电压等级的输变电设备检修计划编制中需要重点考虑的可再生能源输送因素, 提出了考虑可再生能源接入的跨省跨区互联电网输电设备检修计划编制方法, 该方法在保障系统运行安全的基础上, 可以有效减少输电断面设备检修对风电、光伏和水电输送的影响, 更好地实现可再生能源的消纳。通过实际电网检修计划编制算例的验证, 证明了其可行性和合理性, 有利于大电网检修工作的有效开展。随着未来电力系统信息化、自动化水平的逐步提升, 下一步应提高可再生能源功率的中长期预测精度, 使依据本文模型所制定的检修方案更具指导意义。

#### 参考文献

- [1] CAI Zhi, DAI Sai, ZHAO Kun, et al. Future power grid dispatch and control mode with large-scale clean energy integration in China[C] // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference. Xi'an, China, 2016: 1874-1879.
- [2] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.  
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [3] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.  
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. A survey of condition monitoring and fault diagnosis for wind power generators[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.
- [4] 周小艺, 唐磊, 田方媛, 等. 电力系统检修计划优化问题研究[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(6): 67-74.  
ZHOU Xiaoyi, TANG Lei, TIAN Fangyuan, et al. Optimal scheduling of power system maintenance[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(6): 67-74.
- [5] LI Gaowang, SHI Dongyuan. Risk-based maintenance schedule of transmission line using multi-objective evolutionary algorithm[C] // Proceedings of 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. Wuhan, China, 2011: 413-416.
- [6] 张煦, 张向伍. 计及运行工况影响的电力设备检修策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 74-80.  
ZHANG Xu, ZHANG Xiangwu. Comparative analysis on power equipment maintenance strategies considering the effect of operating conditions[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 74-80.
- [7] 戴志辉, 张天宇, 刘譞, 等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 14-21.  
DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, et al. Research on smart substation protection system reliability for condition-based maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 14-21.
- [8] LIN Yun, DONG Ping, QIN Chuan, et al. Shorting-time transmission line maintenance scheduling method based on credibility theory[C] // International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). Hong Kong, China, 2015: 295-300.
- [9] 黄江倩, 赵舫, 程伟华, 等. 基于风险管理方法的配网检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 94-100.  
HUANG Jiangqian, ZHAO Fang, CHENG Weihua, et al. Optimization of distribution network maintenance plan based on risk management method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 94-100.
- [10] 唐燕, 刘艳. 考虑电网总风险和检修收益的设备状态检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 33-39.  
TANG Yan, LIU Yan. Optimization for maintenance schedule based on equipment condition considering the overall risk of grid operation and the maintenance revenue[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 33-39.
- [11] 王海彪, 郭瑞鹏, 姜忠民, 等. 考虑大规模风电接入的发电机组检修计划最小失负荷期望模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 26-32.  
WANG Haibiao, GUO Ruipeng, JIANG Zhongmin, et al. Generation maintenance scheduling based on minimum

- loss of load expectation considering significant wind power penetration[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(4): 26-32.
- [12] 张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 考虑大规模风电调峰要求的系统机组检修计划[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(16): 25-30.  
ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Generator maintenance scheduling of large-scale wind power integration considering peak shaving[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(16): 25-30.
- [13] 方陈, 夏清, 孙欣. 考虑大规模风电接入的发电机组检修计划[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(19): 20-24.  
FANG Chen, XIA Qing, SUN Xin. Generation maintenance scheduling with significant wind power penetration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(19): 20-24.
- [14] 刘新东, 方科, 陈焕远, 等. 利用合理弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(6): 35-39.  
LIU Xindong, FANG Ke, CHEN Huanyuan, et al. Research on rational wind power casting theory for large-scale wind power integration improvement[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(6): 35-39.
- [15] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场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 Tianrui, DUAN Changgang, 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.
- [16] 吕泉, 王伟, 韩水, 等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. *电网技术*, 2013, 37(7): 1887-1894.  
LÜ Quan, WANG Wei, HAN Shui, et al. A new evaluation method for wind power curtailment based on analysis of system regulation capability[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(7): 1887-1894.
- [17] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 水电-风电系统联合运行研究[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(2): 232-236.  
SUN Chunshun, WANG Yaonan, LI Xinran. Study on combined operation of hydro and wind power generation system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2009, 30(2): 232-236.

---

收稿日期: 2016-10-20; 修回日期: 2017-01-24

作者简介:

蔡 帜(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统优化运行。E-mail: caizhi@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)