

# 含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法

郭小璇<sup>1,2</sup>, 龚仁喜<sup>1</sup>, 鲍海波<sup>1</sup>, 杭乃善<sup>1</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西电网电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 考虑到新能源发电的随机性、反调峰性和预测困难等问题, 提出了一种适用含新能源接入的电力系统的机会约束经济调度(Chance Constrained Economic Dispatch, CCED)二阶锥规划方法。该方法首先将新能源发电出力预测结果与真实值的偏差作为随机变量, 计及系统运行限制的概率约束条件, 建立以发电成本期望值最小为目标的电力系统 CCED 模型。然后根据其约束条件的特点, 构建 CCED 问题的二阶锥规划描述, 将原概率约束优化问题转化为确定性的非线性优化问题, 采用现代内点算法加以求解, 其求解过程仅需进行一次非线性规划问题的求解。通过 IEEE-30 系统的计算结果, 验证了所提模型与方法的有效性和可行性, 同时也表明该方法在保持较高计算精度的同时, 也具有较高的计算效率。

**关键词:** 新能源发电; 经济调度; 机会约束; 二阶锥规划; 内点法

## Second-order cone programming method of chance constrained economic dispatch considering renewable energy sources

GUO Xiaoxuan<sup>1,2</sup>, GONG Renxi<sup>1</sup>, BAO Haibo<sup>1</sup>, HANG Naishan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the randomness, anti-peaking and low prediction accuracy of renewable energy sources, this paper presents a method for chance constrained economic dispatch (CCED) problem in power system including renewable energy sources (RES), of which the error of the forecasting results of RES's output from the true value is taken as random variables, and the probability constraints of the operation limits is considered. A CCED model of the power system including RES is established with the minimal generation cost expectations as the objective. According to the characteristics of the probability constraints, a second-order cone programming (SOCP) description of CCED is firstly constructed, thus transforming the original probability constrained optimization problem into the deterministic optimization problem, and then, the problem is solved by interior point method. The numerical results obtained by IEEE-30 bus systems verify the feasibility and validity of the proposed model and method.

This work is supported by Guangxi Youth Fund (No. 2014GXNSFBA118277) and Science and Technology Development of Nanning (No. 20121025).

**Key words:** renewable energy sources; economic dispatch; chance constrained; second-order cone programming; interior point method

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)22-0085-07

## 0 引言

新能源发电是指诸如风力发电、太阳能发电等一类清洁、无污染、可再生的能源发电技术。随着我国能源多元化与清洁化战略的持续推进, 更多的

新能源电厂开始规模性投运并网<sup>[1-2]</sup>。然而, 新能源电厂出力受自然因素(如风速、光照时间、光照强度等)影响, 具有随机性、反调峰性和间歇性的特点, 比较成熟的常规优化调度理论和方法<sup>[3-5]</sup>在此背景下需要作一定的修正和改进。

迄今为止, 人们针对新能源接入电力系统所引发的运行与调度问题已进行了一些研究与探索。文献<sup>[6-9]</sup>从概率分析的角度深入分析了新能源发电不

基金项目: 广西青年基金资助项目(2014GXNSFBA118277); 南宁市科学研究与科技开发计划项目(20121025)

确定性对系统运行与稳定的影响。为了实现含新能源的电力系统的优化,现有文献从不同角度出發,研究了新能源发电机组与常规水、火电发电机组联合调度,建立了面向新能源接入的电力系统优化调度模型。文献[10-13]考虑了含风电场电力系统多时段的经济调度问题。文献[14-16]利用模糊变量表达风电场的不确定输出功率,构建了模糊随机调度模型。文献[17-26]将风电场输出功率表达为随机概率分布,通过引入机会约束条件,研究了电力系统优化调度的随机规划问题,确保了电力系统在一定可信度的安全运行。

综合已有含新能源电力系统优化问题的研究成果,一般基于新能源发电出力不可调、常规电源可调的假设。由于某一调度时刻新能源发电的输出功率是一个不确定量,无法给出电力系统该时刻确定的最优的潮流状态。与常规经济调度相比,含新能源的电力系统经济调度并非一个确定性的优化问题,其求解是基于“二次调整”的思路:第一步,根据新能源发电出力的随机特点(随机分布),确定一个适用于各种新能源出力场景的通用经济调度方案;第二步,根据新能源电厂出力真实值,按照一定规则调整常规电源出力,经过潮流计算得到实际的系统潮流状态。显然第一步确定面向新能源发电各个场景的通用经济调度方案非常重要,这也是本文所要解决的问题。

本文提出一种基于二阶锥规划的含新能源电力系统机会约束经济调度问题。首先,将新能源出力预测结果与真实值的偏差量作为随机变量,以常规火电发电成本期望值最小为优化目标,考虑系统运行限制的机会约束,建立了含新能源接入的电力系统机会约束经济调度(Chance Constrained Economic Dispatch, CCED)模型。然后,通过对该优化问题约束条件的变换,从而将原机会约束优化问题转化为确定性的非线性优化问题,且该非线性优化问题具有二阶锥规划形式。最后,采用现代内点算法求解该二阶锥规划问题。通过 IEEE-30 系统的计算结果,验证所提出模型与方法的有效性和可行性,同时讨论了新能源发电的渗透率、预测误差等对经济调度的影响。

## 1 二阶锥规划

二阶锥规划问题的标准形式为

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} & \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \in \mathbf{C} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $f(\mathbf{x})$  为目标函数;  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  为线性约束,  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ,  $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$ ;  $\mathbf{C}$  为二阶锥约束。锥规划的基本形式一般有二阶锥和旋转二阶锥两种,可表示为<sup>[27-28]</sup>

$$x_1^2 \geq \sum_{i=2}^n x_i^2 \quad (2)$$

$$2x_1x_2 \leq \sum_{i=3}^n x_i^2 \quad (3)$$

锥规划问题作为线性规划的推广,是半定规划的一种特例,属于凸规划问题,其求解可以避免收敛过程陷入局部最优。采用现代内点算法加以求解,可以获得多项式计算效率。

## 2 含新能源的机会约束经济调度的表征

目前,一般采用高斯分布或 Beta 分布模型<sup>[29-30]</sup>来描述新能源发电输出功率预测误差,本文采用高斯分布来描述。

假设某一时刻节点  $i$  的新能源电厂出力实际值为

$$P_{Ri} = \bar{P}_{Ri} + \omega_i, i \in S_R \quad (4)$$

式中:  $\bar{P}_{Ri}$  为节点  $i$  新能源电厂发出有功功率的预测值;  $\omega_i$  为节点  $i$  处新能源电厂有功出力的预测误差,  $\omega_i$  是服从以 0 为均值、 $\sigma_i$  为标准差的高斯分布随机变量。

系统所有新能源发电有功功率之和的预测误差为随机变量  $W = \sum_{i \in S_R} \omega_i$ , 根据随机变量和的期望、方差的计算公式,可知  $W$  的均值为 0、标准差为  $\sigma_W = \sqrt{\sum_{i \in S_R} \sigma_i^2}$ 。为了保证整个电力系统的功率平衡,所有常规发电机共同承担该预测误差,即所有常规发电机需要进行二次调整,各个常规发电机有功出力为

$$P_{Gi} = \bar{P}_{Gi} - \alpha_i W \quad (5)$$

式中:  $\bar{P}_{Gi}$  是新能源发电出力为  $\bar{P}_{Ri}$  时,也就是预测误差为 0 时,节点  $i$  处常规发电厂的有功出力;  $P_{Gi}$  为常规发电机经过二次调整后的实际发电功率;  $\alpha_i$  为节点  $i$  处常规发电机对新能源出力偏差的承担因子,那么

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \sum_{i \in S_G} \alpha_i = 1 \quad (6)$$

这里,  $P_{Gi}$  也是随机变量,其均值和标准差分别为  $\bar{P}_{Gi}$  和  $\alpha_i \sigma_W$ 。

以系统的发电成本(火电厂的煤耗成本)期望最小为优化目标,建立机会约束经济调度模型为

$$\begin{aligned}
\min f(P_{Gi}) &= E \left[ \sum_{i \in S_G} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \right] \\
\text{s.t. } \sum_{j \in i} B_{ij} \theta_j &= P_{Gi} + P_{Ri} - P_{Di}, \quad i, j \in S_B \\
\theta_{bal} &= 0 \\
\Pr(P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}) &\geq 1 - \varepsilon_{Gi}, \quad i \in S_G \\
\Pr(|P_{ij}| \leq P_{ij \max}) &\geq 1 - \varepsilon_{ij}, \quad i, j \in S_B
\end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $E(\square)$  为随机变量的期望;  $\Pr(\square)$  为事件发生的概率;  $\varepsilon_{Gi}$  和  $\varepsilon_{ij}$  是事件发生的概率, 满足  $0 \leq \varepsilon_{Gi} \leq 1$  和  $0 \leq \varepsilon_{ij} \leq 1$ ;  $S_B$  为节点集合;  $S_G$  为发电机节点集合;  $P_{Di}$  为节点  $i$  负荷有功功率;  $B_{ij}$  为支路导纳矩阵第  $i$  行第  $j$  列元素;  $\theta_i$  为节点  $i$  的电压相角;  $bal$  为平衡节点;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为节点  $i$  处发电机的发电成本参数;  $P_{ij}$  是流经节点  $i$  和  $j$  间支路的有功功率;  $P_{Gi \min}$ 、 $P_{Gi \max}$  为  $P_{Gi}$  对应上下限;  $P_{ij \max}$  为支路有功  $P_{ij}$  上限。  $B_{ij}$  和  $P_{ij}$  分别为

$$B_{ij} = \begin{cases} -1/X_{ij} & i \neq j \\ \sum_{j \in i, j \neq i} 1/X_{ij} & i = j \end{cases} \quad i, j \in S_L \quad (8)$$

$$P_{ij} = \frac{\theta_j}{X_{ij}} = \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}} \quad i, j \in S_L \quad (9)$$

这里,  $X_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  间的支路阻抗。

模型式(7)通过机会约束条件, 建立了电力系统运行安全性与新能源发电的随机性之间的联系。由该模型可获得满足一定可信度安全运行的经济调度方案。将机会约束经济调度问题考虑为一个寻求系统目标函数(发电成本、总有功出力等)期望最小的随机优化问题。其求解难点在于期望值目标函数和机会约束的处理, 需要将问题转化为确定的常规优化问题。

### 3 CCED 的二阶锥规划模型及求解

#### 3.1 随机优化问题转化

##### (1) 目标函数

由于常规发电厂出力  $P_{Gi}$  为随机变量, 结合式(4)~式(6), 发电成本期望函数为

$$\begin{aligned}
f(P_{Gi}) &= E \left[ \sum_{i \in S_G} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \right] = \\
&\sum_{i \in S_G} [a_i E(P_{Gi}^2) + b_i E(P_{Gi}) + c_i] = \\
&\sum_{i \in S_G} [a_i E(P_{Gi})^2 + a_i D(P_{Gi}) + b_i E(P_{Gi}) + c_i] = \\
&\sum_{i \in S_G} (a_i \bar{P}_{Gi}^2 + a_i \alpha_i^2 \sigma_W^2 + b_i \bar{P}_{Gi} + c_i)
\end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $D(\square)$  为随机变量的方差运算符。

##### (2) 机会约束

根据式(5)描述, 常规发电厂出力  $P_{Gi}$  是均值  $\bar{P}_{Gi}$ 、标准差为  $\alpha_i \sigma_W$  的随机变量。那么有

$$\begin{aligned}
\Pr(P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}) &\geq 1 - \varepsilon_{Gi} \\
\Rightarrow P_{Gi \min} + \Phi^{-1}(\varepsilon_{Gi}/2) \alpha_i \sigma_W &\leq \bar{P}_{Gi} \leq \\
P_{Gi \max} - \Phi^{-1}(\varepsilon_{Gi}/2) \alpha_i \sigma_W &
\end{aligned} \quad (11)$$

这里,  $\Phi^{-1}(\square)$  为标准高斯分布累积概率函数逆函数。

式(7)中的网络方程约束的矩阵形式为

$$\begin{aligned}
\mathbf{B}_M \boldsymbol{\theta} &= \mathbf{P}_G + \mathbf{P}_R - \mathbf{P}_D = \\
&(\bar{\mathbf{P}}_G + \bar{\mathbf{P}}_R - \mathbf{P}_D) + (\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\alpha}W)
\end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可得

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\theta} &= \mathbf{B}_M^{-1}(\bar{\mathbf{P}}_G + \bar{\mathbf{P}}_R - \mathbf{P}_D) + \mathbf{B}_M^{-1}(\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\alpha}W) \\
\theta_{bal} &= 0
\end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{B}_M$  是导纳矩阵  $\mathbf{B}$  除去平衡节点  $bal$  的降阶矩阵。即除平衡节点  $bal$  外, 任意节点  $i$  的相角为  $\theta_i = \mathbf{B}_M^{-1}(\bar{\mathbf{P}}_G + \bar{\mathbf{P}}_R - \mathbf{P}_L) + \mathbf{B}_M^{-1}(\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\alpha}W)|_i$ , 从而根据式

(9)可得到随机变量  $P_{ij}$  的方差为

$$\begin{aligned}
D(P_{ij}) = s_{ij}^2 &= \frac{1}{X_{ij}^2} \sum_{k \in S_R} \sigma_k^2 (\pi_{ik} - \pi_{jk} - \delta_i + \delta_j)^2 \\
\pi_{ij} &= \begin{cases} [\mathbf{B}_M^{-1}]_{ij}, & i \neq bal, i \in S_B \\ 0, & i = bal \end{cases} \\
\delta_i &= \begin{cases} [\mathbf{B}_M^{-1} \boldsymbol{\alpha}]_i, & i \neq bal, i \in S_B \\ 0, & i = bal \end{cases}
\end{aligned} \quad (14)$$

则可以将式(7)中支路功率机会约束转化为

$$\begin{aligned}
\Pr(|P_{ij}| \leq P_{ij \max}) &\geq 1 - \varepsilon_{ij} \\
\Rightarrow -P_{ij \max} + \Phi^{-1}(\varepsilon_{ij}/2) s_{ij} &\leq \bar{P}_{ij} \leq \\
P_{ij \max} - \Phi^{-1}(\varepsilon_{ij}/2) s_{ij} &
\end{aligned} \quad (15)$$

#### 3.2 CCED 的二阶锥规划描述

将等式约束条件式(14)变为不等式约束条件, 可构造旋转二阶锥, 引入原最优化问题式(7), 从而整理出 CCED 的二阶锥规划形式为

$$\begin{aligned}
\min f(P_{Gi}) &= \sum_{i \in S_G} (a_i \bar{P}_{Gi}^2 + a_i \alpha_i^2 \sigma_W^2 + b_i \bar{P}_{Gi} + c_i) \\
\text{s.t. } \sum_{j=1}^n B_{ij} \bar{\theta}_j &= \bar{P}_{Gi} + P_{Ri} - P_{Di}, \quad i, j \in S_B \\
\bar{\theta}_{bal} &= 0 \\
\sum_{i \in S_B} (\bar{P}_{Gi} + P_{Ri} - P_{Di}) &= 0
\end{aligned}$$



率限为 35 MW, 根据图 3 中 ED 和 CCED 得到的累积概率密度函数曲线, 当支路功率为 35 MW 时, ED 和 CCED 的累积概率取值分别为 0.56 和 0.80, 也就是支路功率取值小于 35 MW 的概率分别为 0.56 和 0.80, 说明 ED 模型下该支路发生功率越限概率为 0.44, 而采用 CCED 时该支路功率越限概率仅为 0.20, 满足机会约束所限定的可信度要求。

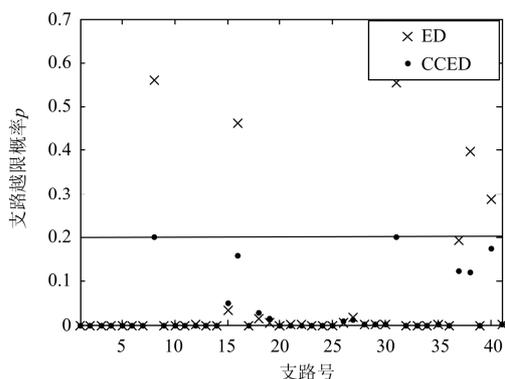


图 2 支路功率越限概率

Fig. 2 Probability of branch active power

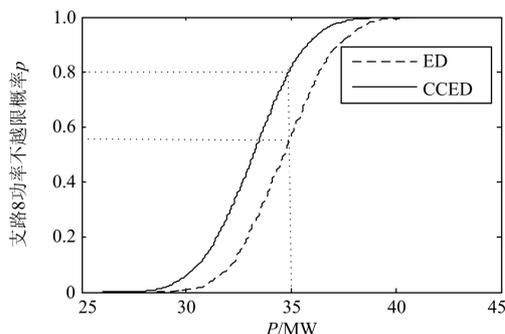


图 3 支路有功功率的累积概率分布

Fig. 3 Cumulative probability density distribution of branch active power

新能源预测误差的标准差越大, 也就是新能源预测精度越低, 经济调度方案出现越限概率过大的约束条件越多, 而采用 CCED 的发电成本期望也会越大。随着新能源预测误差的增大, CCED 发电成本期望变化情况以及经济调度方案时机会约束违反 (支路功率及常规发电厂出力约束越限概率大于 0.20) 的个数变化情况如表 2 和图 4。显然, 经济调度方案机会约束违反个数不断增多, 而考虑机会约束的 CCED 模型的约束要求更为严格, 为满足机会约束所需牺牲的发电成本也在增加。

机会约束条件可信度要求, 即所要求的概率限值变化, 对 CCED 计算结果的影响如表 3 和图 5。机会约束可信度要求的增大, 可行域逐渐变大, 因此 CCED 模型计算出的发电成本期望逐渐降低。当

$\varepsilon_{Gi}$  和  $\varepsilon_{ij}$  取 0 时, 就是要求面对任意新能源出力情况, 均不出现机会约束条件违反, 这需要牺牲较多发电成本为代价。

表 2 新能源预测误差对 ED 和 CCED 的影响

Table 2 Effect of the prediction error of RES on the ED and CCED

对比量	新能源预测误差的标准差					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
ED 机会约束违反个数/个	0	1	1	4	5	9
CCED 发电成本期望/(\$/h)	8 443.73	8 495.72	8 495.19	8 507.43	8 536.82	8 684.28

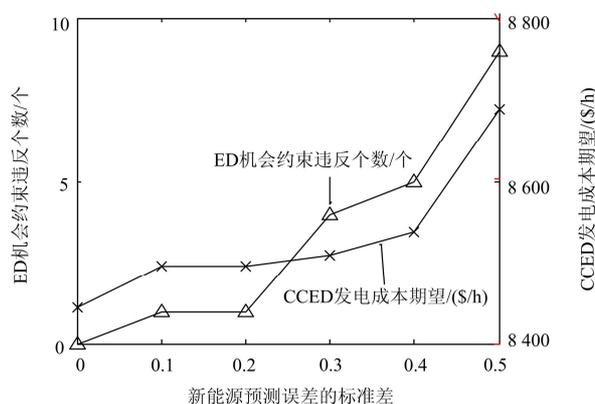


图 4 新能源预测误差对 ED 和 CCED 的影响

Fig. 4 Effect of the prediction error of RES on the ED and CCED

表 3 机会约束对 CCED 发电成本期望的影响

Table 3 Effect of the probability constraint on the expectation of generation cost in CCED

对比量	$\varepsilon_{Gi}, \varepsilon_{ij}$					
	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
发电成本期望/(\$/h)	8 763.48	8 592.75	8 595.82	8 537.66	8 536.82	8 503.48

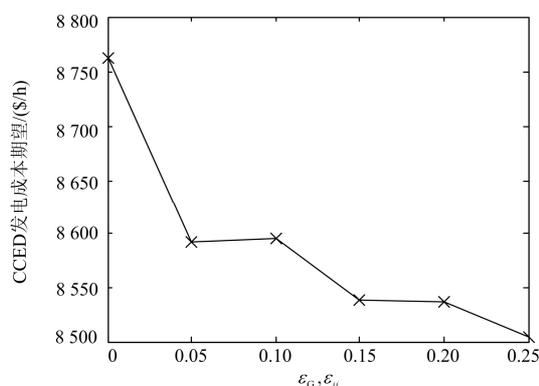


图 5 机会约束对 CCED 发电成本期望的影响

Fig. 5 Effect of the probability constraint on the expectation of generation cost in CCED

## 5 结论

本文将新能源出力预测结果与真实值的偏差量作为随机变量,计及系统运行限制的概率约束条件,建立了含新能源接入的电力系统机会约束经济调度模型。深层分析概率约束的特点,将原概率约束转化为常规确定性约束条件,从而将随机优化问题转化为确定性的优化问题。所构造的确定性优化问题具备二阶锥规划形式,采用现代内点算法求解可获得较高的收敛效率。通过 IEEE-30 系统的计算表明,所提出模型与方法行之有效并兼具计算精度和计算效率高的特点。

## 参考文献

- [1] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [2] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [3] 丁晓莺, 王锡凡. 最优潮流在电力市场环境下的最新发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 1-7, 19.  
DING Xiaoying, WANG Xifan. Recent development of optimal power flow in power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 1-7, 19.
- [4] CAPITANESCU F, GLAVIC M, ERNST D, et al. Interior-point based algorithms for the solution of optimal power flow problems[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77: 508-517.
- [5] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. Large scale hydrothermal optimal power flow problems based on interior point nonlinear programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 396-403.
- [6] 周玮, 孙辉, 顾宏, 等. 含风电场的电力系统经济调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 148-154.  
ZHOU Wei, SUN Hui, GU Hong, et al. A review on economic dispatch of power system including wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 148-154.
- [7] 鲍海波, 韦化. 基于无迹变换的含大规模风电场电力系统概率最优潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 46-53.  
BAO Haibo, WEI Hua. Probabilistically optimal power flow computation in power system including large-scale wind farms based on unscented transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 46-53.
- [8] ZHANG H, LI P. Probabilistic analysis for optimal power flow under uncertainty[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 4(5): 553-561.
- [9] 鲍海波, 韦化. 考虑风电的电压稳定概率评估的随机响应面法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 77-85.  
BAO Haibo, WEI Hua. Stochastic response surface method for probabilistic evaluation of voltage stability considering wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 77-85.
- [10] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.  
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18.
- [11] 夏澍, 周明, 李庚银. 含大规模风电场的电力系统动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 71-77.  
XIA Shu, ZHOU Ming, LI Gengyin. Dynamic economic dispatch of power system containing large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 71-77.
- [12] 游大海, 潘凯, 王科, 等. 含风电场的电力系统协调优化调度的评价技术[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 157-163.  
YOU Dahai, PAN Kai, WANG Ke, et al. Evaluation of coordination optimal dispatching in wind power integrated system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 157-163.
- [13] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 25-31.  
LU Jinling, MIAO Yuyang, ZHANG Chengxiang, et al. Power system optimal dispatch considering wind farms based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 25-31.

- [14] LIANG R H, LIAO Jianhao. A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1665-1674.
- [15] 马瑞, 康仁, 姜飞, 等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 150-156.  
MA Rui, KANG Ren, JIANG Fei, et al. Multi-objective dispatch planning of power system considering the stochastic and fuzzy wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 150-156.
- [16] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36-44.  
XIONG Hu, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Research of fuzzy chance constrained unit commitment containing large-scale intermittent power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 36-44.
- [17] 胡泽春, 王锡凡. 考虑负荷概率分布的随机最优潮流方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 14-18.  
HU Zechun, WANG Xifan. Stochastic optimal power flow approach considering load probabilistic distributions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 14-18.
- [18] SCHELLENBERG A. Probabilistic and stochastic optimal power flow[D]. Alberta, Canada: University of Calgary, 2006.
- [19] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 含风电场电力系统的有功优化潮流[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 18-21.  
LEI Yazhou, WANG Weisheng, YIN Yonghua, et al. Optimal real power flow in wind power integrated system[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 18-21.
- [20] ZHANG H, LI P. Chance constrained programming for optimal power flow under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2417-2424.
- [21] YU H, ROSEHART W D. An optimal power flow algorithm to achieve robust operation considering load and renewable generation uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1808-1817.
- [22] ZHANG H, LI P. Application of sparse-grid technique to chance constrained optimal power flow[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(5): 491-499.
- [23] 孙元章, 吴俊, 李国杰, 等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.  
SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guojie, et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-47.
- [24] 朱建全, 吴杰康. 水火电力系统短期优化调度的不确定性模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 51-54.  
ZHU Jianquan, WU Jiekang. An uncertainty model for short-term optimization scheduling of hydrothermal power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 51-54.
- [25] 黎静华, 韦化, 莫东. 含风电场最优潮流的 Wait-and-See 模型与最优渐近场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 15-23.  
LI Jinghua, WEI Hua, MO Dong. Asymptotically optimal scenario analysis and wait-and-see model for optimal power flow with wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 15-23.
- [26] BIENSTOCK D, MICHAEL C, HARNETT S. Chance constrained optimal power flow: risk-aware network control under uncertainty[EB/OL]. <http://www.columbia.edu/~dano/papers/CC-OPF3.pdf>.
- [27] ALIZADEH F, GOLDFARB D. Second-order cone programming[J]. Mathematical Programming, 2001, 95(1): 3-51.
- [28] NEMIROVSKI A, SHAPIRO A. Convex approximations of chance constrained programs[J]. SIAM Journal on Optimization, 2006, 17(4): 969-996.
- [29] DOHERTY R, O'MALLEY M. A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 587-595.
- [30] FABBRI A, ROMAN T G S, ABBAD J R, et al. Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1440-1446.

收稿日期: 2015-02-05; 修回日期: 2015-04-27

作者简介:

郭小璇(1986-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与分析; E-mail: guo\_xiaoxuan@163.com

龚仁喜(1962-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子及新能源发电技术;

鲍海波(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统随机性分析。

(编辑 魏小丽)