

# 考虑相关因子的基于可信性理论的厂网协调规划

钟嘉庆<sup>1</sup>, 贺 勇<sup>1</sup>, 陈 冰<sup>1</sup>, 靳国臣<sup>2</sup>, 张晓辉<sup>1</sup>

(1. 燕山大学河北省电力电子节能与传动控制重点实验室, 秦皇岛 066004; 2. 国网安徽省电力公司利辛县供电公司, 利辛 236802)

**摘 要:** 当今, 清洁能源在整个发电环节中越来越占有举足轻重的地位, 如何对涉及清洁能源的电厂和电网进行协调规划成为关键。部分专家提出协调因子补偿成本, 通过价格因素指导厂网的协调规划, 该文在此基础上提出相关因子, 即将所有机组供电系数的标准差作为相关因子, 更加促进厂网规划的协调性。基于可信性理论, 对负荷预测与风电出力的进行不确定性分析, 根据模糊集合理论建立模糊机会约束, 并通过模糊机会约束条件的清晰化处理, 最终利用细菌群体趋药性算法对规划模型求解。通过对3种规划方案的对比, 得出所提方案更具有经济性与合理性。

**关键词:** 成本; 不确定性分析; 模糊集合理论; 厂网协调规划; 可信性理论; 协调因子补偿成本; 相关因子

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

## 0 引 言

电力系统规划是电力系统中一项必不可少的前期工作, 其主旨是依据对某区域在某时期内负荷预测的结果, 在满足一定可靠性水平的条件下, 寻求最经济的电力建设方案。长期以来, 由于电源建设和电网建设的主体具有多样性<sup>[1-2]</sup>, 电源规划与电网规划在研究与实践中常被分开进行。目前已有专家从不同角度将电源和电网综合起来分析, 但大多数研究只是根据传统的电源或者电网的规划模型, 在其中加入了对风电场或者调节机组的考虑<sup>[3]</sup>。文献[4]虽然分析了各层间的相互关系, 用于协调“源”、“网”、“荷”三方利益以及促进资源的优化利用, 却未考虑到负荷预测的不确定性问题, 虽依托于传统的电源规划或者电网规划将风电并入系统中, 但电厂和电网的协调性仍不是很强, 因此将协调因子补偿成本与相关因子引入到本文中, 以进一步提高电厂和电网的协调性。本文所考虑的不确定性因素为风电出力的不确定性和负荷预测的不确定性。文献[5]研究大用户的短期电力负荷预测问题, 给出一种基于变权综合模糊推理的多模型综合预测方法。

针对规划过程中的不确定性问题, 一些专家利用多场景技术进行处理<sup>[6]</sup>。有专家利用燃煤机组和抽水蓄能的方式来应对风电的不确定性<sup>[7]</sup>。本文利用可信性理论处理不确定性问题。可信性理论是一种处理模糊不确定的方法<sup>[8]</sup>。文献[9]在可信性理论的基础上, 对模糊多目标规划问题进行了研究。文献[10]针对风电等新能源发电给电力系统带来的不确定性等问题, 从随机性和模糊性2个角度予以分析和建模, 并在源网荷协同规划模型中计及双重不确定性。

本文将含有不确定性变量的约束条件修改为基于可信性理论的模糊机会约束, 并根据模糊机会约束的清晰化等价形式对该约束条件进一步处理, 得到最简单的计算公式。最终解决风电出力与负荷预测不确定性问题。

## 1 可信性理论与模糊机会约束

可信性理论建立在5条公理基础上, 可得出可信性测度定义及模糊变量等重要概念<sup>[11]</sup>。基于可信性理论的模糊机会约束规划模型可表示为:

$$\min f(X) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } Cr(g_j(X, \xi) \leq 0) \geq \gamma, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

收稿日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(6187023566); 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2016049)

通信作者: 贺 勇(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统规划及优化分析方面的研究。heyonghyhy@163.com

式中,  $Cr\{\cdot\}$  ——  $\{\cdot\}$  发生的可信性;  $X$  ——决策变量;  
 $\xi$  ——模糊变量;  $g_j(X, \xi) \leq 0$  ——约束条件;  $\gamma$  ——预先设定的置信水平;  $j$  ——常数,  $j=1, 2, \dots, n$ 。

## 2 厂-网协调规划的协调因子补偿成本和相关因子

### 2.1 协调因子补偿成本

利用协调因子补偿成本对电源规划的指导作用可实现优化资源结构布局并从根本上减少输电阻塞发生的概率。电网对于发电容量过剩的电厂或者是输电容量不足的输电网络收取一定的费用,利用收费的方式来缓解大量建厂和产能过剩的情况,以促进电网平稳输电,同时也可降低该地区出现电阻塞的可能性。当电网发生输电阻塞时,电网应当给予电厂(发电商)一定的补偿。在本文中,厂-网协调因子补偿成本可采用输电阻塞费用  $cc_{ab}$  的形式出现,故可定义为:

$$cc_{ab} = \beta_{ab} |p_{\text{imp},a} - p_{\text{imp},b}| \times P_{ab} \quad (3)$$

式中,  $\beta_{ab}$  ——变量(下标 a、b 分别代表线路节点),  $\beta_{ab}$  取值为  $\pm 1$ ,  $\beta_{ab} = +1$  时表示线路 a—b 发生输电阻塞,  $\beta_{ab} = -1$  时,线路 a—b 为未发生阻塞;  $p_{\text{imp},a}$ 、 $p_{\text{imp},b}$  ——节点 a、节点 b 的影子价格<sup>[12]</sup>, 元;  $P_{ab}$  ——节点 a—b 支路的功率, MW。

### 2.2 相关因子

在 2.1 节中,协调因子补偿成本作为价格因素对电厂和电网规划进行协调,本文提出一种基于厂-网拓扑结构的协调因子——相关因子,表示电厂和电网在拓扑结构上的相关性,从而进一步对电厂和电网进行协调规划。标准差是一组数据平均值分散程度的一种度量,在厂-网协调规划中定义所有机组供电系数的标准差  $F_i$  作为相关因子,即:

$$F_i = \frac{1}{M+N} \sqrt{\sum_{i=1}^{M+N} (k_i - \frac{1}{M+N} \sum_{i=1}^{M+N} k_i)^2} \quad (4)$$

式中,  $k_i$  ——第  $i$  台发电机组的供电系数;  $M$  ——已有机组数量;  $N$  ——候选机组数量。

供电系数  $k$  表示发电机组的出力情况与机组的供电范围,可定义为:

$$k = \lambda \eta + (1 - \lambda) d \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  ——发电机组的权重;  $\eta$  ——发电机组容量系数;  $d$  ——电厂与电网的相关度。

根据不同地区及不同的优化方式来选取不同的  $\lambda$  值,如在工业负荷密度较大处取  $\lambda = 0.8$ ; 在负荷较为分散的地区取  $\lambda = 0.6$  或更小,以适当增加电厂与电网的相关度。供电系数中的  $\eta$  是对发电机自身的出力情况进行描述的,而  $d$  涉及到电厂外部的输电网络。发电机组容量系数为:

$$\eta = \frac{P_s}{S_N} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $P_s$  ——发电机组的实际功率, MW;  $S_N$  ——发电机组的额定装机容量, MWh。

发电机组的容量系数  $\eta$  体现了机组的容量裕度问题,即容量系数越大则机组的满载程度越高,发电机组的容量裕度越小。电厂和电网的相关度为:

$$d = \frac{\delta_i}{\delta_m} \quad (7)$$

式中,  $\delta_i$  ——电厂和电网的相关维数;  $\delta_m$  ——最大相关维数,即可用机组所在节点的最大回路建设数来表示。

电厂和电网的相关维数为:

$$\delta_i = \sum_{n_{i1} \in \Omega_{n_i}} \sum_{j=1}^{L_{\max}} \gamma_{n_{i1}, j} \quad (8)$$

式中,  $n_{i1}$  ——第  $i$  台发电机组所在的节点;  $\Omega_{n_i}$  ——发电机组  $i$  所在节点集合;  $j$  ——单条新建线路的回路建设数;  $\gamma_{n_{i1}, j}$  ——与  $n_{i1}$  节点相连接的单条候选线路回路建设情况。

电厂和电网的相关维数和相关度表征发电机组对外部输电网络的拓扑结构,对厂-网协调规划具有指导作用,相关度越高其规划的协调性越强。由此可知厂-网协调规划的相关因子越小,各发电机组的出力分配越平均,电网输电水平越高,发电资源和输电资源的浪费情况越少,厂-网协调能力越强。

## 3 基于可信性理论的厂网协调规划模型

### 3.1 目标函数

在本文中厂-网规划的成本最小为目标,其成本包括:电源投资成本、电网投资成本、机组(包括原有机组和新建机组)运行维护成本、协调因子补偿成本、碳排放成本,可表示为:

$$T = \text{Min}(T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5) \quad (9)$$

式中,  $T$  ——综合成本, 元;  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$  ——机

组投资成本、电网投资成本、运行维护成本、协调因子补偿成本、碳排放成本,元。

### 3.1.1 机组投资成本

不同种类的机组所对应的使用寿命不同,通过贴现率和机组的使用寿命可将新建机组投资成本换算成等年值成本。新建机组投资成本可表示为:

$$T_1 = \sum_{i=M+1}^{M+N} x_i G_i \frac{r(1+r)^{Y_i}}{(1+r)^{Y_i} - 1} \quad (10)$$

式中,  $x_i$  ——第  $i$  台候选机组建设状态变量,  $x_i=0$  时不投建,  $x_i=1$  时为投建;  $G_i$  ——第  $i$  台候选机组单位投资成本,元/台;  $r$  ——贴现率;  $Y_i$  ——第  $i$  台候选机组使用年限, a。

### 3.1.2 电网投资成本

根据单条线路的建设成本、使用寿命及贴现率,将新建输电线路投资成本换算成等年值成本。电网建设成本  $T_2$  为:

$$T_2 = \sum_{j=1}^Z y_j L_j \frac{r(1+r)^{Y_j}}{(1+r)^{Y_j} - 1} \quad (11)$$

式中,  $Z$  ——候选线路数量;  $y_j$  ——第  $j$  条候选线路的建设状态变量,  $y_j=0$  不投建,  $y_j=1$  时为投建;  $L_j$  ——候选线路的单位成本,元/条;  $Y_j$  ——第  $j$  条候选线路使用年限, a。

### 3.1.3 运行维护费用

规划期内的运行维护费用指原有机组与新建机组运行维护费用之和,即:

$$T_3 = \sum_{i=1}^M O_i C_i + \sum_{i=M+1}^{M+N} x_i O_i C_i \quad (12)$$

式中,  $O_i$  ——单位发电量运行维护成本,元/MWh;  $C_i$  ——第  $i$  台发电机组的发电量, MWh。

### 3.1.4 协调因子补偿成本

根据 2.1 节及式(3)的相关描述,系统的协调因子补偿成本可表示为系统所有支路发生阻塞和未发生阻塞时的费用,即:

$$T_4 = \sum_{a \in \Omega_{a-b}} \sum_{b \in \Omega_{a-b}, a \neq b} cc_{a-b} \quad (13)$$

式中,  $\Omega_{ab}$  ——节点系统支路集合。

### 3.1.5 碳排放成本

考虑到原有燃煤机组的存在,同时又因候选机组中燃气机组的存在,需计及机组  $\text{CO}_2$  排放成本,即:

$$T_5 = c_{\text{CO}_2} \left( \sum_{i=1}^M E_i C_i + \sum_{i=M+1}^{M+N} x_i E_i C_i \right) \quad (14)$$

式中,  $E_i$  ——第  $i$  台发电机组的碳排放强度, t/MWh;  $c_{\text{CO}_2}$  ——碳排放价格,元/t。

## 3.2 约束条件

1) 相关因子约束,由式(4)~式(8)可计算得出  $F_i$  数值:

$$F_i \leq F_{\max} \quad (15)$$

式中,  $F_{\max}$  ——相关因子上限,取值为 0.1。

2) 电力约束,即系统在规划目标年内所有机组总容量不小于目标年实际最大负荷:

$$\sum_{i=1}^M P_i + \sum_{i=M+1}^{M+N} x_i P_i \geq P_t \quad (16)$$

式中,  $P_i$  ——第  $i$  台机组的出力, MW;  $P_t$  ——目标年实际最大负荷, MW。

本文利用可信性理论来处理风电机组出力不确定性问题,对上述约束条件进行不确定性处理,建立基于可信性测度的不等式约束条件:

$$Cr(\sum_{i=1}^M P_i + \sum_{j \in \Omega_N} x_j P_j + \sum_{w \in \Omega_w} \tau P_w \geq P_t) \geq \gamma \quad (17)$$

式中,  $Cr$  ——可信性测度;  $\Omega_N$  ——除风电以外的候选机组的集合;  $P_j$  ——除风电以外的候选机组的出力, MW;  $\Omega_w$  ——候选风电场的集合;  $\tau$  ——模糊变量;  $P_w$  ——风电场的出力, MW;  $\gamma$  ——置信水平。

3) 电量约束,即系统在规划目标年内所有发电机组的总发电量不小于目标年预测电量:

$$\sum_{i=1}^M C_i + \sum_{i=M+1}^{M+N} x_i C_i \geq e_t \quad (18)$$

式中,  $e_t$  ——规划年实际最大用电量, MWh。

考虑到风电出力的不确定性,对其进行不确定性处理,建立基于可信性测度的不等式约束条件:

$$Cr(\sum_{i=1}^M C_i + \sum_{j \in \Omega_N} x_j C_j + \sum_{w \in \Omega_w} s C_w \geq e_t) \geq \gamma \quad (19)$$

式中,  $C_j$  ——除风电以外的候选机组的发电量, MWh;  $C_w$  ——风电场的发电量, MWh。

4) 新建机组投资成本约束,即在整个规划期内要求新建机组总投资成本不超过其上限:

$$\sum_{i=M+1}^{M+N} x_i G_i \frac{r(1+r)^{Y_i}}{(1+r)^{Y_i} - 1} \leq I_{\max} \quad (20)$$

式中,  $I_{\max}$  ——机组投资上限,元;  $Y_i$  ——第  $i$  台待建机组使用年限, a。

5) 电网规划投资成本约束,即在整个规划期内要求新建输电线路总投资成本不超过其上限:

$$\sum_{j=1}^Z x_j L_j \frac{r(1+r)^{y_j}}{(1+r)^{y_j} - 1} \leq L_{\max} \quad (21)$$

式中,  $L_{\max}$  ——线路投资上限。

6) 单条新建线路最大回路约束, 即单条新建线路的回路数一般控制在某一个范围内:

$$0 \leq y_j \leq L_{\max} \quad (22)$$

式中,  $L_{\max}$  ——单条新建线路最大回路建设数量。

7) 发电机组出力上限约束, 即发电机组在运行过程中, 要求不得长时间超过额定功率运行, 否则将对发电机组产生影响, 因此规定每台发电机的实际出力不大于该发电机的装机容量:

$$P_{gi} \leq P_i \quad (23)$$

式中,  $P_{gi}$  ——第  $i$  台机组的实际出力, MW。

8) 线路潮流上限约束, 即 2 个节点之间输电线路上的传输功率不大于该条输电线路的最大允许传输功率:

$$U_m U_n (G_{m-n} \cos \theta_{m-n} + B_{m-n} \sin \theta_{m-n}) \leq P_{m-n, \max} \quad (24)$$

式中,  $P_{m-n, \max}$  ——节点  $m$  和节点  $n$  间线路功率传输上限, MW。

## 4 不确定性的处理

### 4.1 不确定变量及其可信性分布函数

本文中的不确定变量——模糊变量, 为风电场的出力及规划年最大负荷预测值。风电场的出力可由梯形模糊数  $(P_{w1}, P_{w2}, P_{w3}, P_{w4})$  表示, 实际应用的最大负荷预测值可用梯形模糊数  $(P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, P_{i4})$  表示, 则模糊变量的可信性分布函数为:

$$Cr(\xi \leq x) = \begin{cases} \frac{x - P_{r1}}{2(P_{r2} - P_{r1})}, & P_{r1} \leq x \leq P_{r2} \\ \frac{1}{2}, & P_{r2} \leq x \leq P_{r3} \\ \frac{P_{i4} - 2P_{r3} + x}{2(P_{r4} - P_{r3})}, & P_{r3} \leq x \leq P_{i4} \\ 1, & P_{i4} \leq x \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}, P_{r4}$  ——风电场出力的实际预测值, MW, 可根据预测数据得到, 即  $r=t$  或者  $r=w$ ,  $r, t, w$  均为常数, 当  $r=t$  时, 表示风电场的实际出力预测值; 当  $r=w$  时, 表示风电场实际应用的最大负荷预测值。

设实际预测值为  $(P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}, P_{r4})$ , 且设比例系数为  $\varphi_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ , 且  $m \in \mathbf{R}$ ), 由数据可得:

$$(P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}, P_{r4}) = (\varphi_1 P'_{r1}, \varphi_2 P'_{r2}, \varphi_3 P'_{r3}, \varphi_4 P'_{r4}) \quad (26)$$

式中,  $\varphi_1 \sim \varphi_4$  ——比例系数。

### 4.2 清晰等价处理

在模糊机会规划过程中, 最重要的步骤是模糊约束条件的处理, 目前有 2 种方法: 1) 通过模糊模拟, 即通过计算机随机抽取样本, 文献[13]利用模糊模拟技术求解目标函数中的相关量, 经过反复迭代得出与待求问题的近似解, 其缺点是采用这种方法求得的解不精确且计算量过大; 2) 将约束条件进行清晰化处理 (本文利用此方法进行求解), 文献[11]中给出了多模糊参量的清晰等价形式。

若函数  $g_j(X, \xi)$  有如式(27)所示形式:

$$g_j(X, \xi) = h_1(X)\xi_1 + h_2(X)\xi_2 + \dots + h_m(X)\xi_m + h_0(X) \quad (27)$$

式中,  $\xi_k$  ——梯形模糊变量  $(\xi_{k1}, \xi_{k2}, \xi_{k3}, \xi_{k4})$ , 其中,  $k=1, 2, \dots, m$ , 且  $m \in \mathbf{R}$ ,  $\xi_{k1} \sim \xi_{k4}$  表示隶属度参量。

构造 2 个函数:

$$h_k^+(X) = \begin{cases} h_k(X), & h_k(X) \geq 0 \\ 0, & h_k(X) < 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$h_k^-(X) = \begin{cases} 0, & h_k(X) \geq 0 \\ -h_k(X), & h_k(X) < 0 \end{cases} \quad (29)$$

式(28)和式(29)需满足式(30)所示条件:

$$h_k(X) = h_k^+(X) - h_k^-(X) \quad (30)$$

$h_k^+(X) = 1$  时,  $h_k^-(X) = 0$ ;  $h_k^+(X) = 0$  时,  $h_k^-(X) = -1$ 。  $\gamma \geq 0.5$  时,  $Cr\{g(X, \xi) \leq 0\} \geq \gamma$  等价于:

$$(2\gamma - 1) \sum_{k=1}^m [\xi_{k4} h_k^+(X) - \xi_{k1} h_k^-(X)] + (2 - 2\gamma) \sum_{k=1}^m [\xi_{k3} h_k^+(X) - \xi_{k2} h_k^-(X)] + h_0(X) \leq 0 \quad (31)$$

为便于计算, 将电力约束和电量约束进一步处理。根据式(26)负荷预测值如式(32)所示, 风电出力的预测值如(33)所示:

$$(P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, P_{i4}) = (\varphi_1 P'_{i1}, \varphi_2 P'_{i2}, \varphi_3 P'_{i3}, \varphi_4 P'_{i4}) \quad (32)$$

$$(P_{w1}, P_{w2}, P_{w3}, P_{w4}) = (\varphi_1 P'_{w1}, \varphi_2 P'_{w2}, \varphi_3 P'_{w3}, \varphi_4 P'_{w4}) \quad (33)$$

式中,  $P'_{w1} \sim P'_{w4}$  ——风电出力的预测数据, MW。

根据式(33), 可将式(17)等价于式(34):

$$(2 - 2\gamma) \left[ \varphi_3 P'_{i3} - \sum_{w \in \Omega_w} \varphi_2 P'_{w2} \right] + (2\gamma - 1) \cdot \left[ \varphi_4 P'_{i4} - \sum_{w \in \Omega_w} \varphi_1 P'_{w1} \right] - \sum_{i=1}^M P_i - \sum_{j \in \Omega_N} x_j P_j \leq 0 \quad (34)$$

同理, 可将式(19)等价于如式(35)所示:

$$(2 - 2\gamma) \left[ \varphi_3 C_{i3} - \sum_{w \in \Omega_w} \varphi_2 C_{w2} \right] + (2\gamma - 1) \cdot \left[ \varphi_4 C_{i4} - \sum_{w \in \Omega_w} \varphi_1 C_{w1} \right] - \sum_{i=1}^M C_i - \sum_{j \in \Omega_N} x_j C_j \leq 0 \quad (35)$$



式中,  $C_{t_3}$  ——预测电量  $t_3$ , MWh;  $C_{t_4}$  ——预测电量  $t_4$ , MWh。

5 算例分析

5.1 优化算法

细菌群体趋药性(BCC)算法是一种智能优化算法。有专家将该算法应用于电力系统的经济调度<sup>[14]</sup>及无功优化<sup>[15]</sup>等方面并取得了一定成果。考虑到厂-网协调规划问题属于多时段离散优化问题,因此采用离散细菌群体趋药性(discrete bacterial colony chemotaxis, DBCC)算法对其进行优化,具体过程参见

文献[17]。

5.2 基本参数

本文选择 IEEE 30 节点系统进行研究,IEEE 30 节点系统图及节点编号详见文献[16]。选择节点 1 为平衡节点,设原有的系统仅存在燃煤机组,如表 1 所示。规定候选线路为 27 条,根据实际情况,规定单条候选线路最大建设回路数量为 4<sup>[16]</sup>。候选线路起始位置、线路容量、建设成本见文献[16]。本文设定的规划期为 5 a,折现率为 0.05,目标年各节点的负荷预测值比原始负荷增长 40%,年总用电量预测值为 1900 GWh。待建机组基本数据如表 2 所示。

表 1 原有机组参数

Table 1 Parameters of existed units

节点位置	机组类型	单机容量/MW	运行成本/元·MWh <sup>-1</sup>	碳排放强度/t·MWh <sup>-1</sup>	年利用小时数/h	数量	最小技术出力/MW
1	燃煤机组 A	300	285.6	0.746	6000	1	0.75
2	燃煤机组 B	100	317.5	0.905	6000	1	0.75
5	燃煤机组 C	100	317.5	0.905	6000	1	0.75
8	燃煤机组 D	100	317.5	0.905	6000	1	0.75
11	燃煤机组 E	100	317.5	0.905	6000	1	0.75
13	燃煤机组 F	100	317.5	0.905	6000	1	0.75

表 2 待建机组参数

Table 2 Parameters of generator set that to be built

节点位置	1	1	2	2	13	13	23	23	22
机组类型	燃煤机组 A	燃煤机组 B	燃煤机组 C	燃煤机组 D	风电场 A	风电场 B	风电场 C	风电场 D	燃气机组
单机容量/MW	300	100	300	100	100	50	100	50	400
运行成本/元·MWh <sup>-1</sup>	285.6	317.5	285.6	317.5	100.5	100.5	100.5	100.5	658.4
碳排放强度/t·MWh <sup>-1</sup>	0.746	0.905	0.746	0.905	0	0	0	0	0.426
投资成本/亿元	12.9	4.2	12.9	4.2	8	5	8	5	12.88
年利用小时数/h	6000	6000	6000	6000	2500	2500	2500	2500	7000
使用年限/a	25	25	25	25	20	20	20	20	25
数量	1	1	1	1	1	1	1	1	1
最小技术出力	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0	0	0	0.75

表 3 为负荷以及各风电场的梯形模糊参量。模型中碳排放价格取 52 元/t,新建发电机组投资总成本最大为 10 亿元;新建线路投资总额上限为 20 万元,置信水平取 0.8。

5.3 模型对比和仿真结果

将算例分为 4 种方案来验证本文所提出模型的合理性与优越性:1)方案 1 为传统的规划模型,即先根据负荷预测和电量预测数据进行电源规划,之后再进

表3 梯形模糊参量				
Table 3 Trapezoidal fuzzy parameters				
梯形模糊参量 (比例系数)	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$
负荷	0.9	0.95	1.05	1.1
风电场A	0.7	0.85	1.15	1.3
风电场B	0.5	0.75	1.25	1.5
风电场C	0.7	0.85	1.15	1.3
风电场D	0.5	0.75	1.25	1.5

行电网规划;2)方案2为电源和电网的协调规划模型,但不考虑本文所提出的协调因子补偿成本、相关因子以及可信性理论的一般协调规划;3)方案3为考虑协调因子补偿成本和相关因子,但不考虑可信性理论的厂网协调规划模型;4)方案4为本文所提出的规划模型,即考虑协调因子补偿成本、相关因子以及可信性理论的厂网协调规划。上述的4种方案所得出的新建机组与新建输电线路的结果如表4所示,各方案的规划成本如表5所示,方案1~方案4成本的曲线图如图1所示。

表4 各方案仿真结果			
Table 4 Results of each program			
方案	新建机组 节点位置	新建机组	新建输电线路
1	13	风电场A	1—2(3)、1—3、2—4、3—4(2)、2—6(2)、6—8、6—9(2)、6—10(3)、4—12、
	23	风电场C	12—13、12—15、12—16(3)、16—17(2)、15—18、10—21(3)、10—22(3)、
	22	燃气机组	22—24、28—27(2)、6—28(2)
2	13	风电场A	2—4、3—4、2—5、4—6、5—7(2)、6—7、6—8、6—10、9—11、9—10、12—16、
	23	风电场C	15—18、10—21、10—22(2)、22—24(2)、28—27(3)
3	13	风电场A	1—2、2—4(2)、2—5(3)、4—6、5—7、9—11、12—13(2)、12—16(2)、16—17(2)、
	23	风电场C	18—19、10—21(2)、10—22(2)、28—27(2)、6—28
4	13	风电场A	2—5、5—7(2)、6—10、9—11、4—12、12—13、12—16(2)、22—24(2)、28—27、
	23	风电场C	6—28(2)

注:各方案的新建线路中的*i—j(m)*,表示在节点*i*和节点*j*之间建设*m*回线路<sup>[10]</sup>。

表5 各方案规划期内各项成本						
Table 5 Each cost of each program in planning period						
方案	运行成本/ 亿元	电源投资 成本/亿元	电网投资 成本/万元	碳排放 成本/亿元	协调因子补偿 成本/元	合计/亿元
1	28.7660	2.1977	10.0800	2.3000	0	33.2647
2	11.8290	1.2839	9.1896	1.6281	0	14.7418
3	11.6500	1.2839	6.2589	1.6381	128.7239	14.5726
4	11.1630	1.2839	7.7033	1.5839	-2052.0000	14.0313

从表4、表5可得出无论是从新建机组、新建输电线路投建方面,还是各方案规划期内各项成本方面,都能体现出传统的电源和电网的规划(方案1)相较方案2~方案4,综合成本较高,体现出电源电网协调规划的重要意义。表4中,方案2~方案4分别只建设有2个风电场,并未投建燃煤机组和燃气机组,这是因为在整个系统中,原有机组均为燃煤机组,在尽可能满足电力负荷需求的前提下,为使综合成本尽可能减小,因此选

择建设碳排放强度为零的风电场,以减少碳排放成本。方案1根据负荷预测与用电量的预测情况,先进行电源规划,之后根据发电机组发电情况及负荷和用电量的情况进行电网规划。在整个过程中,为满足负荷与低碳的要求,运行成本较低且低碳的风电场A和风电场C被选中投建,方案1中共投建风电场A、风电场C容量为200MW。但在随后的电网建设中,建设有较多线路,相应的线路建设的成本较高,为10.08万元,原因是

未考虑已有机组和新建机组的出力情况,不能与机组出力进行协调,因此在规划电网时,仅仅是在所有机组的装机容量(即最大出力)为基准条件下进行的规划,所以建设有较多的输电线路。即使是选择了低碳且运行成本较低的风电场,但是也新建了 1 台运行成本较高同时投资成本较高的燃气机组,因此该方案的总成本在所有方案中仍最高,如图 1 所示。方案 2 在节点 13、节点 23 分别投建风电场 A 和风电场 C,输电线路建设了 16 条,相对于方案 1 来说,电源部分与电网部分都有所减少。

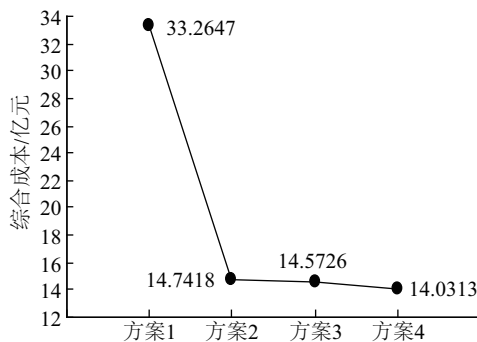


图1 方案1~方案4综合成本曲线图

Fig. 1 Trend of total cost of program 1-4

在表 5 中,方案 2 的各项成本较方案 1 都有所降低,其中运行成本降幅较大,降低了 16.937 亿元,原因是在整个发电以及传输的过程,考虑到了机组发电出力与电网的协调性,规划年的所有机组的实际出力均能够得到充分的利用,不需要以机组的装机容量(机组最大出力)为基准条件来进行规划。图 1 可明显的看出方案 1 到方案 2 规划总成本有较大的降幅,降低了 18.5229 亿元。方案 3 则是在方案 2 的基础上考虑了本文所提出的协调因子补偿成本与相关因子。从表 4 可看出电源部分较方案 2 并未出现变化,但电网部分较方案 2 新建线路数量减少了 2 条,原因是规划时考虑了协调因子补偿成本与相关因子,使电源和电网更加地协调,最终使电网投资成本降低了 2.9307 万元。机组运行成本降低了 0.197 亿元,如表 5 所示。方案 4 实则为本文所提模型,即在方案 3 的基础上考虑了风电出力的不确定性及负荷预测的不确定性问题,并且利用可信性理论处理该不确定性问题。从表 4、表 5 可看出,电源部分与方案 3 相比未发生变化,但电网部分线路的投建与线路的投资成本都进一步减少。这是因为考虑到风电出力的不确定性,仍是以燃煤机组的出力为主要供电方,因此关于风电场所在节点的输电线路投建有所减少。综上,通过方案 1~方案 4 的对比可得出,将相关因子和协调

因子补偿成本引入到厂网协调规划模型中能够减少规划成本,具有一定的经济性,最终可证明本文所提模型合理且更具有优势。

## 6 结 论

针对传统电厂和电网规划中所体现出的劣势,本文将电厂和电网进行了协调规划,进一步提出了协调因子补偿成本和相关因子,使所提出的模型更加符合实际,更具备优势。另外电源中涉及到风电场,因此有必要考虑到风电出力的不确定的问题。在本文中建立基于可信性理论的规划模型,最后应用 BCC 算法进行相关验证。仿真结果表明,通过 4 种方案的对比得出本文所提出的规划模型能够很好地确保电源和电网规划的协调性,并可实现厂-网投资、运行等综合成本的最小化。该模型利用可信性理论处理了风电场出力不确定性因素,可合理确定风电开发规模,协调风电场与送出线路的建设,保证能源优化利用。同时协调因子补偿成本与相关因子的提出,更加确保了电厂和电网在价格方面和拓扑结构方面的协调性,使得本文所提模型更加合理。

### [参考文献]

- [1] MARÍ L, NABONA N. Renewable energies in medium-term power planning [J]. IEEE transactions on power systems, 2015, 30(1): 88-97.
- [2] JING Q, ZHAO Y D, ZHAO J H, et al. A risk-based approach to multi-stage probabilistic transmission network planning[J]. IEEE Transactions on power systems, 2016, 31(6): 4867-4876.
- [3] GU Y, MCCALLEY J D, NI M. Coordinating large-scale wind integration and transmission planning[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2012, 3(4): 652-659.
- [4] 李逐云, 雷霞, 邱少引, 等. 考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 378-387.  
LI Z Y, LEI X, QIU S Y, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” benefits [J]. Power system technology, 2017, 41(2): 378-387.
- [5] 谷云东, 张素杰, 冯君淑. 大用户电力负荷的多模型模糊综合预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 110-115.  
GU Y D, ZHANG S J, FENG J S. Multi-model fuzzy synthesis forecasting of electric power loads for larger

- consumers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 110-115.
- [6] 张晓花, 谢俊, 赵晋泉, 等. 考虑风电和电动汽车等不确定性负荷的电力系统节能减排调度[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2408-2414.
- ZHANG X H, XIE J, ZHAO J Q, et al. Energy-saving emission- reduction dispatching of electrical power system considering uncertainty of load with wind power and plug-in hybrid electric vehicles [J]. High voltage engineering, 2015, 41(7): 2408-2414.
- [7] 吕翔, 刘国静, 周莹. 含抽水蓄能的风水火联合机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 35-43.
- LYU X, LIU G J, ZHOU Y. Research on combined unit commitment of wind power-hydro power-thermal power for the power system with pumped hydro storage[J]. Power system protection and control, 2017, 45(12): 35-43.
- [8] LI X. A numerical-integration-based simulation algorithm for expected values of strictly monotone functions of ordinary fuzzy variables [J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2015, 23(4): 964-972.
- [9] WANG Z T, GUO J S, ZHENG M F, et al. A new hybrid intelligent algorithm for fuzzy multi objective programming problem based on credibility theory [J]. Mathematical problems in engineering, 2014, 1: 1-11.
- [10] 张宁, 胡兆光, 周渝慧, 等. 计及随机模糊双重不确定性的源网荷协同规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 39-44.
- ZHANG N, HU Z G, ZHOU Y H, et al. Simultaneous programming model of source and net based on random fuzzy and double uncertainty [J]. Automation of electric systems, 2016, 40(1): 39-44.
- [11] 刘宝碇, 彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- LIU B D, PENG J. Uncertain theory tutorial [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [12] 陈志文, 杜松怀. 基于影子价格的可中断负荷经济性分析[J]. 华东电力, 2006, 34(9): 50-53.
- CHEN Z W, DU S H. Analysis of economy of interruptible loads based on shadow price [J]. East China electric power, 2006, 34(9): 50-53.
- [13] 赵书强, 李勇, 王春丽. 基于可信性理论的输电网规划[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 166-171.
- ZHAO S Q, LI Y, WANG C L. Transmission network expansion planning based on credibility theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 166-171.
- [14] 冯涛, 卢志刚, 李学平, 等. 考虑大用户直购电的动态环境经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 151-159.
- FENG T, LU Z G, LI X P, et al. Dynamic emission economic dispatch considering large consumers direct purchasing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 151-159.
- [15] 陈继明, 祁丽志, 孙名好, 等. 多场景下含风电机组的配电网无功优化的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 129-134.
- CHEN J M, QI L Z, SUN M Y, et al. Reactive power optimization for distribution network with multi-scenario wind power generator [J]. Power system protection and control, 2016, 44(9): 129-134.
- [16] 丁伟, 胡兆光. 智能工程理论扩展及其在电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 15-21.
- DING W, HU Z G. Intelligent engineering theory expanding and its application in transmission planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 15-21.
- [17] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 等. 可再生能源激励制度下的低碳经济电源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 655-662.
- ZHANG X H, YAN P D, ZHONG J Q, et al. Research on generation expansion planning in low- carbon economy environment under incentive mechanism of renewable energy sources [J]. Power system technology, 2015, 39(3): 655-662.



## COORDINATED DESIGN OF PLANT NETWORK BASED ON CREDIBILITY THEORY CONSIDERING RELEVANT FACTORS

Zhong Jiaqing<sup>1</sup>, He Yong<sup>1</sup>, Chen Bing<sup>1</sup>, Jin Guochen<sup>2</sup>, Zhang Xiaohui<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Lixin County Power Supply Company, Anhui Electric Power Company of State Grid, Lixin 236802, China)

**Abstract:** In today's society, clean energy plays a more and more important role in the whole power generation process. How to coordinate the planning of power plants and power grids involving clean energy becomes the key. Some experts put forward the coordination factor compensation cost programme, so as to guide the coordinated planning of plant network through price factors. Based on this, a relevant factor method is put forward in this paper, in which the standard deviation of the power supply coefficient of all units is considered as the correlation factors. The method further promotes the coordination of the plant network planning. Based on the credibility theory, this paper analyzes the uncertainty of load forecasting and wind power output, and establishes the fuzzy chance constraints according to the fuzzy set theory. Finally, using the bacterial colony chemotaxis algorithm solves the model. Through the comparison of the three planning programs, it is concluded that the proposed program is more economical and reasonable.

**Keywords:** cost; uncertainty analysis; fuzzy set theory; plant network coordination planning; credibility theory; compensation cost of coordination factor; relevant factor