

⑭  
80-86

# 不确定情况下的 电网规划多目标模糊决策方法

A MULTI-OBJECTIVE FUZZY DECISION-MAKING  
APPROACH FOR POWER NETWORK  
PLANNING UNDER UNCERTAINTY

孙洪波      徐国禹      秦翼鸿  
Sun Hongbo      Xu Guoyu      Qin Yihong  
(重庆大学电气工程系)

TM711

**摘要** 提出了一种计及不确定因素影响的电网规划多目标模糊决策方法。该方法既考虑了投资最少、网损最小、可靠性最大及对环境的影响最小等多重目标,又计及了未来负荷增长及系统所能提供投资额的不确定性对电网规划决策的影响。文中通过算例验证了所提方法的可行性和有效性。

**关键词** 电网规划;不确定性;多目标模糊决策  
中国图书资料分类法分类号 TM711

**ABSTRACT** This paper proposes a multi-objective fuzzy decision-making approach for power network planning under uncertainty, which simultaneously considers not only the least investment cost, the minimum power loss, the maximum reliability, and the least environmental impacts, but also the uncertainty about the future load growth and the capital investment availability. The validity and effectiveness of the proposed approach is verified with numerical examples.

**KEY WORDS** power network planning; uncertainty; multi-objective fuzzy decision-making

## 0 前言

电网规划是一个非常复杂的决策问题。一方面,决策时需要综合考虑多个目标,并且这些目标又常常是具有不同重要性的相互矛盾的指标;另一方面,决策是在未来信息不能准确知道的情况下进行的,决策时必须计及因预报不准而导致的不确定性因素对规划方案的影响。在现有的电网规划方法中,大多为未计及不确定因素影响的单目标优化方法。为弥补现有方法的不足,本文首次提出了一种计及不确定性因素影响的电网规划多目标模糊决策方法。

本文所提方法既考虑了规划方案的投资最少、网损最小、可靠性最大及对环境的影响最小等多重目标，又计及了未来负荷增长及系统投资额的不确定性对规划决策的影响。文中算例验证了该方法的可行性及有效性。

## 1 电网规划的多目标模糊规划模型

### 1.1 模型描述

本文所建立的数学模型形式如下：

$$M_0 \begin{cases} \text{Min} z_1 = f_1(X) & k \in \{C, D, E, F\} & (1) \\ \text{Max} z_0 = f_0(X) & & (2) \\ \text{s. t.} & f_k(X) \geq \bar{f}_k & (3) \\ & f_k(X) \leq \tilde{f}_k & (4) \\ & f_k(X) \leq \bar{f}_k & k \in \{C, D, E, F\} & (5) \\ & \sum_{j \in J_i} X_{ij} = 1 & i \in M & (6) \\ & X_{ij} = \{0, 1\} & j \in J_i, i \in M & (7) \end{cases}$$

模型  $M_0$  中， $M$  为系统中所有支路集， $J_i$  为支路  $i$  的所有线路类型集； $X_{ij}$  为代表系统中第  $i$  条支路第  $j$  个可选线路类型是否存在的 0-1 整型决策变量。

该模型中共考虑四个目标：①、使规划方案的投资  $f_1(X)$  最小；②、使规划方案的网损期望值  $f_0(X)$  最少；③、使规划方案的可靠性最大，这里采用方案的系统缺负荷期望值  $f_k(X)$  最小来表达；④、使规划方案对环境的影响最小，本文仅以方案新增线路走廊的占地面积  $f_F(X)$  最小来代表。式(5)给出各目标函数的最大允许值限制， $\bar{f}_k$  为目标函数  $f_k(X)$  的取值上限。函数  $f_0(X)$  和  $f_1(X)$  可以表示为： $f_0(X) = \sum_{i \in M} \sum_{j \in J_i} C_{ij} X_{ij}$  和  $f_F(X) = \sum_{i \in M} \sum_{j \in J_i} F_{ij} X_{ij}$ 。其中， $C_{ij}$  和  $F_{ij}$  分别为支路  $i$  线路类型  $j$  的投资及新增线路走廊占地面积。

模型引入第⑤个目标即使规划方案的载荷能力  $f_0(X)$  最大以计及负荷不确定性对规划的影响。显然，方案载荷能力越大，对于未来不确定负荷，电网输电容量不足的风险就越小。 $f_0$  为对方案载荷能力的最低要求。至于系统所能提供投资额的不确定性则作为模糊约束条件在模型中体现出来，如式(4)所示。式中， $\tilde{f}_k$  为最有可能实现的投资额。模糊不等符号“ $\leq$ ”含义为基本上小于或等于。

### 1.2 运行模拟

函数  $f_0(X)$ 、 $f_k(X)$  及  $f_1(X)$  是系统运行决策变量的函数。我们通过对系统在各种运行方式下运行行为的模拟，将其近似表达成投资决策变量  $x$  的线性函数形式，有：

$$f_k(X) = f_k^0 + \sum_{i \in M} \frac{\partial f_k}{\partial P_i} \sum_{j \in J_i} (\bar{P}_{ij} X_{ij} - \bar{P}_i) + \sum_{i \in M} \frac{\partial f_k}{\partial B_i} \sum_{j \in J_i} (B_{ij} X_{ij} - B_i) \quad k \in \{D, E, F\} \quad (8)$$

式中， $f_k^0$  为系统现存网络的  $f_k(X)$  的值； $\frac{\partial f_k}{\partial P_i}$  及  $\frac{\partial f_k}{\partial B_i}$  为现存网络  $f_k(X)$  对支路  $i$  容量  $\bar{P}_i$  及电纳  $B_i$

的灵敏度系数;  $\bar{P}_i$  及  $B_i$  为支路  $i$  支路类型  $j$  的容量及电纳。因式(8)是近似的, 需采用迭代逼近的方法以提高求解精度。

设系统运行状态集为  $T$ , 状态  $t$  发生的概率为  $p_t$ 。对于任一运行状态  $t$ , 我们采用模型  $M_1$  对该状态下系统的缺负荷及网损指标进行评估:

$$M_1 \begin{cases} \text{Min } W_1 = \sum_{i \in N} R_i & (9) \\ \text{Min } W_2 = \sum_{i \in N} r_i P_i^2 & (10) \\ \text{s. t. } P_G - B\theta = P_D & (11) \\ 0 \leq R \leq R_D & (12) \\ \underline{P_G} \leq P_G \leq \bar{P_G} & (13) \\ |P| \leq \bar{P} & (14) \end{cases}$$

其中,  $N$  为系统节点集;  $r_i$  及  $P_i$  为支路  $i$  电阻及功率;  $P_G$ 、 $\bar{P_G}$  及  $\underline{P_G}$  为节点发电出力及其上下限;  $P_D$  及  $R$  为节点负荷及缺负荷量;  $B$  和  $\theta$  为节点电纳矩阵和电压相位角;  $P$  及  $\bar{P}$  为支路传输功率及其容量。模型  $M_1$  最优解的目标函数值  $W_1$  及  $W_2$  即为状态  $t$  系统缺负荷值  $f_a^t$  及网损  $f_b^t$ , 而它们对于支路  $i$  参数  $\bar{P}_i$  及  $B_i$  的灵敏度系数可由下面式子求出(参见文献<sup>[1]</sup>):

$$\frac{\partial f_a^t}{\partial \bar{P}_i} = \alpha_{\bar{P}_i} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_b^t}{\partial B_i} = (\alpha_{a1} - \alpha_{a2})(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \quad (16)$$

$$\frac{\partial f_a^t}{\partial \bar{P}_i} = \beta_{\bar{P}_i} \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_b^t}{\partial B_i} = (\beta_{a1} - \beta_{a2})(\theta_{i1} - \theta_{i2}) \quad (18)$$

其中,  $\alpha_{\bar{P}_i}$  ( $\beta_{\bar{P}_i}$ ) 为目标  $W_1$  ( $W_2$ ) 对应于式(14)第  $i$  个约束的对偶变量值;  $\alpha_{a1}$  及  $\alpha_{a2}$  ( $\beta_{a1}$  及  $\beta_{a2}$ ) 分别为目标  $W_1$  ( $W_2$ ) 对应于式(11)第  $i_1$  及  $i_2$  个约束的对偶变量值;  $i_1$  及  $i_2$  为支路  $i$  的两个端节点。因减少网损的目标  $W_1$  优化权远低于减少缺负荷的目标  $W_2$ , 模型  $M_1$  可分成两步求解: 第一步, 只考虑目标  $W_1$  优化得到系统缺负荷最小值  $W_1^*$ ; 第二步, 将  $W_1 \leq W_1^*$  作为约束加入模型中, 优化目标  $W_2$  便可得到  $M_1$  的最优解。

同样, 对于状态  $t$  我们也可采用模型  $M_2$  对该状态下的载荷能力进行评估:

$$M_2 \begin{cases} \text{Max } W_3 = \sum_{i \in N} \tilde{P}_D & (19) \\ \text{s. t. } P_G - B\theta = \tilde{P}_D & (20) \\ \tilde{P}_D \leq \delta_i P_i^* \quad i \in N & (21) \\ \underline{P_G} \leq P_G \leq \bar{P_G} & (22) \\ |P| \leq \bar{P} & (23) \end{cases}$$

其中,  $\tilde{P}_D$  表示节点  $i$  可供负荷;  $\delta_i = P_{D_i} / \sum_{i \in N} P_{D_i}$ ;  $P_{D_i}$  为节点  $i$  预计负荷; 这里假定各节点负荷占总负荷比例保持预计值不变。  $P_i^*$  为系统正常状态下的最大载荷能力, 可由令(21)为等式约束并求解模型  $M_2$  而得到。模型  $M_2$  最优解的目标函数值  $W_3$  即为状态  $t$  系统载荷能力  $f_c^t$ , 而

其对于支路  $k$  参数的灵敏度系数为：

$$\frac{\partial f_0}{\partial P_k} = \nu_k \quad (24)$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial B_k} = (\nu_{a1} - \nu_{a2})(\theta_{i2} - \theta_{i1}) \quad (25)$$

其中,  $\nu_k$  及  $\nu_{a1}$  分别对应于式(23)第  $k$  个约束及对应于式(20)第  $i_1$  个约束的对偶变量值。

建立函数  $f_k(X)$  ( $k \in \{D, E, G\}$ ) 所必需的参数可由下列公式求出：

$$f_0^* = \sum_{i \in T} p_i f_i \quad (26)$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial P_i} = \sum_{i \in T} p_i \frac{\partial f_i}{\partial P_i} \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial B_i} = \sum_{i \in T} p_i \frac{\partial f_i}{\partial B_i} \quad (28)$$

## 2 多目标模糊规划模型的求解

对于本文的多目标模糊规划问题,可以转化成的普通的单目标规划问题进行求解：

首先,我们分别引入模糊集  $C, D, E$  和  $F$  用以表示模型  $M_0$  中目标①~④实现的令人满意程度,其隶属数为：

$$\mu_k(X) = \begin{cases} 0 & \text{当 } f_k(x) \geq \bar{f}_k \\ \frac{\bar{f}_k - f_k(X)}{\bar{f}_k - f_k^*} & \text{当 } f_k^* < f_k(X) < \bar{f}_k \\ 1 & \text{当 } f_k(X) \leq f_k^* \end{cases} \quad k \in \{C, D, E, F\} \quad (29)$$

其中,  $\bar{f}_k = \tilde{f}_k + \Delta f_k$ ,  $\Delta f_k$  为投资限额的伸缩指标;  $f_k^*$  为在式(2)~(7)约束下求得的  $f_k(X)$  最小值,其中式(4)用其清晰形式( $f_c(X) \leq \bar{f}_c$ )所代替。

其次,引入模糊集  $G$  和  $H$  来表示目标⑤的实现程度及约束(4)的满足程度,其隶属函数为：

$$\mu_G(X) = \begin{cases} 0 & \text{当 } f_G(x) \leq \underline{f}_G \\ \frac{f_G(X) - \underline{f}_G}{f_G^* - \underline{f}_G} & \text{当 } \underline{f}_G < f_G(X) < f_G^* \\ 1 & \text{当 } f_G \geq f_G^* \end{cases} \quad (30)$$

$$\mu_H(X) = \begin{cases} 0 & \text{当 } f_c(X) \geq \bar{f}_c \\ \frac{\bar{f}_c - f_c(X)}{\Delta f_c} & \text{当 } \tilde{f}_c < f_c(x) < \bar{f}_c \\ 1 & \text{当 } f_c(X) \leq \tilde{f}_c \end{cases} \quad (31)$$

这里,采用区间  $[\tilde{f}_c, \bar{f}_c]$  表示系统投资限额的不确定变化范围,  $f_G^*$  也可在式(2)~(7)约束下优化目标⑤而得到。 $\mu_G(x)$  及  $\mu_H(X)$  分别表示系统对未来负荷及投资不确定性的适应能力,该值越大,这种适应能力越强。以  $\mu_G(X)$  为例,  $\mu_G(X)$  越大,规划方案的载荷能力也越大,未来负荷变动时缺电风险也越小。

现令  $\rho_k (k \in \{C, D, E, F, G, H\})$  表示目标①~⑤及约束(4)之间的相对重要性大小,  $\rho_k \geq 1$ 。目标或约束越重要,  $\rho_k$  取值越大。若目标和约束同样重要, 则  $\rho_k$  均取为1。令模糊集  $A$  表示模型  $M_0$  中各目标实现及式(4)得到满足的总体令人满意程度, 其隶属函数定义为:  $\mu_A(X) = \min(\mu_k(X)/\rho_k, k \in \{C, D, E, F, G, H\})$ 。这样, 本文的多目标模糊规划问题可转化为: 在式(3)、式(5)~(7)约束下, 使  $u_A(X)$  取最大值, 即有下面的单目标规划问题(模型  $M_3$ ):

$$M_3 \begin{cases} \text{Max } \lambda = \mu_A(X) & (32) \\ \text{s. t. } \mu_k(X) \geq \rho_k \lambda & (33) \\ 0 < \lambda < 1 & (34) \\ \text{式(3)、式(5)~(7)} & (35) \end{cases}$$

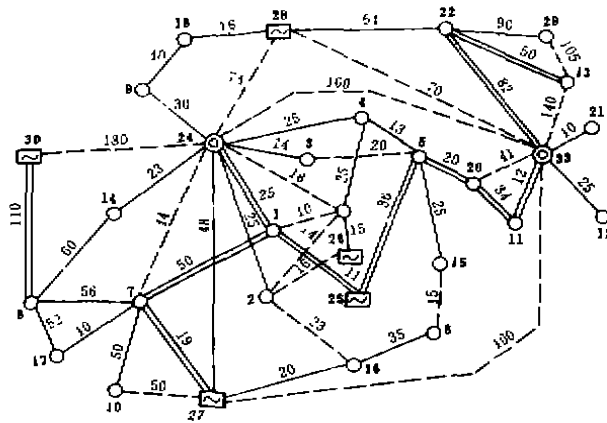
设求得的最优解为  $x_{ij}^*$  ( $j \in J, i \in M$ ) 及  $\lambda^*$ , 则  $x_{ij}^*$  ( $j \in J, i \in M$ ) 就是我们所要求的电网规划模糊最优解,  $\lambda^*$  为该最优解的总体令人满意程度。

顺便指出, 本文刻划模糊集隶属函数采用线性函数形式, 也可采用非线性函数形式, 但采用线性形式模型  $M_3$  求解最容易, 并且非线性形式也可通过线性形式的迭代逼近予以实现。

### 3 实际系统电网规划算例

我们采用本文方法对一实际系统进行了规划计算。

下面为该系统结构图。图中, 实线表示已有支路; 虚线表示可能增加的新支路; 支路上数字表示支路长度(公里数)。



系统电网结构图

表1为采用本文方法对该系统进行规划计算的结果。其中, 方案1至方案5为对模型  $M_0$  中目标①~⑤分别进行单目标优化的结果, 方案6为综合考虑多个目标及不确定性因素影响而作出的规划方案, 这里假定各目标的重要性相同。表2列出了各方案相对于初始网络所增建新线情况。

表1 规划方案的比较

	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
投资(万元)	25290	59810	58660	25290	56160	43370
网损(MW)	67.29	40.52	40.77	67.29	42.29	48.47
ENDS(MW)	26.28	0.00	0.00	26.28	0.0388	1.101
走廊占地面积 (km <sup>2</sup> )	27.20	55.23	54.31	27.20	51.24	37.66
方案荷载能力 (MW)	3541	4661	4659	3514	4667	3935
目标①	1.0000	0.0055	0.0386	1.0000	0.1106	0.4793
目标②	0.1159	1.0000	0.9917	0.1159	0.9415	0.7374
目标③	0.0102	1.0000	1.0000	0.0102	0.9985	0.9585
目标④	1.0000	0.1454	0.1734	1.0000	0.2671	0.6810
目标⑤	0.1158	0.9953	0.9939	0.1158	1.0000	0.4386
未来投资可能 实现程度	1.0000	0.0096	0.067	1.0000	0.192	0.8318
方案总体令人 满意程度	0.0102	0.0055	0.0386	0.0102	0.1106	0.4386

由表1可以看出,前五个方案由于只强调了单一目标优化,虽然能使某项目实现程度最大,但方案总体令人满意程度不佳,而方案6虽然各单项指标都不是最好的,但由于考虑了各项指标的综合平衡,使得方案总体令人满意程度最佳。由此说明了本文多目标模糊规划模型相对于单目标优化模型所具有的优越性。

表2 各规划方案新增线路情况

方案	方案增建线路情况
1	在支路2-24、4-19、10-27、16-27、19-26、22-28、23-24、23-28及24-30上各建一回线
2	在支路2-16、2-24、3-24、4-5、4-19、4-24、5-15、6-15、6-16、7-10、7-17、9-24、12-23、16-27、18-28、19-26、21-23、22-28、22-29、23-24、24-27上各建一回线,而在支路10-27、13-23、23-28及24-30上各建二回线
3	在支路2-16、2-24、3-24、4-5、4-19、4-24、5-15、6-15、6-16、7-10、7-17、9-24、12-23、16-27、19-26、21-23、22-28、22-29、23-24及24-27上各建一回线,而在支路10-27、13-23、23-28及24-30上各建二回线
4	同方案1
5	在支路2-24、3-24、4-5、4-19、4-24、5-15、6-16、9-24、12-23、16-27、18-28、19-26、21-23、22-28、22-29、23-24上各建一回线,而在支路10-27、13-23、23-28及24-30上各建二回线

续表2

方案	方案增建线路情况
6	在支路2-24、3-24、4-5、4-19、4-24、6-16、9-24、10-27、12-23、16-27、19-26、22-28、22-29、23-24及23-28上各建一回线,而在支路24-30上建二回线

## 4 结 论

本文提出的电网规划方法,考虑了电网规划的多目标性并计及了不确定性因素对规划决策的影响,克服了现有规划方法只考虑单一目标及忽略不确定因素影响和不足。所采用的算法从定义各目标实现程度及不确定性约束的满足程度的隶属函数出发,将多目标模糊规划问题转化成普通的单目标规划问题进行求解,为进行电网规划的多目标模糊决策提供了有效手段。

## 参 考 文 献

- 1 孙洪波,徐国禹,李文沅. 电网规划的多目标优化模型及其模糊算法. 全国高校电力系统及其自动化专业第六届学术年会论文集. 长沙,湖南大学出版社,1990
- 2 Pereira M et al. A decomposition approach to automated generation/transmission expansion planning. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(11), 3074~3081
- 3 Zimmermann H. Application of fuzzy set theory to mathematical programming. Information Science, 1985, 36(6), 29~58
- 4 Mongelluzzo R et al. Modelling environmental effects of EHV and UHV transmission lines. EPSR, 1981, (4), 235~245