

⑨

电网规划的多目标模糊优化方法

48-53

THE MULTI-OBJECTIVE FUZZY OPTIMIZATION METHOD FOR POWER NETWORK PLANNING

TM711

孙洪波

Sun Hongbo

徐国禹

Xu Guoyu

秦翼鸿

Qin Yihong

李文沅

Li Wenyuan

(重庆大学电气工程系)

摘要 建立了一个用于电网规划的多目标优化模型。模型中同时计及了规划方案的经济性和可靠性双重目标。通过对各目标实现程度的隶属函数进行定义,将多目标优化问题转变成模糊规划问题进行求解。最后,本文还给出了我国某城市电网规划的计算结果,证明了所提模型及算法的可行性。

关键词 电网规划;多目标优化;模糊规划

中国图书资料分类法分类号 TM711

ABSTRACT This paper presents a multi-objective optimization model for power network planning, in which the economy and reliability of the network plan are considered simultaneously. By defining the membership function of the realization extent of each objective, the multi-objective optimization problem has been turned into a fuzzy programming problem to be solved. The validity and effectiveness of the proposed model and algorithm is verified through numerical examples of a practical system.

KEY WORDS power network planning; multi-objective optimization; fuzzy programming

0 引 言

自从50年代以来,人们应用数学优化技术对电网规划问题进行了广泛的研究,并提出了许多实用的规划模型。这些模型大多是单目标优化模型。然而,电网规划实际上是一个多目标优化问题,在规划时需考虑多重目标,如规划方案的经济性、可靠性以及对环境影响最小等。由于这些目标往往是相互冲突的,并且无统一度量标准,采用单目标优化模型很难精确表达电网规划这一多目标优化问题。为此,本文提出了电网规划的一个多目标优化模型。

本文建立的电网规划模型同时考虑了规划方案的经济性最好和可靠性最大双重目标。经济性和可靠性这两个目标是相互矛盾的,任何规划方案都不可能同时满足这两个目标,本文通过对各目标实现程度这一模糊概念隶属函数的定义,提出了求解模型的模糊算法,将多

目标问题转变成模糊规划问题进行求解,所得解使各目标总体实现程度最好。通过对我国某城市电网规划的实例计算,表明本文模型和算法是切实可行的。

1 数学模型

现将本文的数学模型陈述如下:

1.1 目标函数

本文考虑下列两个目标:(1)规划方案的投资费用最小;(2)规划方案的可靠性最大。第一个目标的数学表达式为:

$$\min z_1 = \sum_{i \in M} \sum_{j \in I_i} C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

式中, C_{ij} 为支路 i 第 j 个线路类型的投资费用; X_{ij} 为0-1整型变量; M 为系统的支路集; I_i 为支路 i 的可选线路类型集(不同线路类型可代表不同导线截面、电压等级和回路数)。

第二个目标用系统缺负荷期望值最小来表达,有

$$\min z_2 = EDNS \quad (2)$$

式中, $EDNS$ 是系统缺负荷期望值,它既是系统投资决策变量的函数,也是系统运行决策变量的函数。本文采用下面的公式将其近似表达成投资决策变量的线性函数形式:

$$EDNS = EDNS_0 + \sum_{i \in M} \frac{\partial EDNS}{\partial \bar{P}_i} \left(\sum_{j \in I_i} \bar{P}_{ij} X_{ij} - \bar{P}_i \right) + \sum_{i \in M} \frac{\partial EDNS}{\partial B_i} \left(\sum_{j \in I_i} B_{ij} X_{ij} - B_i \right) \quad (3)$$

其中, $EDNS_0$ 为系统现存网络的 $EDNS$ 值; $\frac{\partial EDNS}{\partial \bar{P}_i}$ 及 $\frac{\partial EDNS}{\partial B_i}$ 为现存网络 $EDNS$ 对于支路 i 容量 \bar{P}_i 及电纳 B_i 的灵敏度系数; \bar{P}_{ij} 及 B_{ij} 分别为支路 i 第 j 个线路类型的支路容量及电纳。由于式(3)是 $EDNS$ 的近似表达式,需采用迭代逼近的方法提高精度。

1.2 约束条件

1) 投资预算约束:系统投资不能超过最大允许投资额 \bar{C} ,即:

$$\sum_{i \in M} \sum_{j \in I_i} C_{ij} X_{ij} \leq \bar{C} \quad (4)$$

2) 系统可靠性要求:系统缺负荷期望值不能大于最大允许缺负荷期望值 \overline{EDNS} ,即:

$$EDNS \leq \overline{EDNS} \quad (5)$$

3) 投资决策变量可行性约束:每第支路只能有一种线路类型存在,有:

$$\sum_{j \in I_i} X_{ij} = 1 \quad i \in M \quad (6)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad j \in I_i, i \in M \quad (7)$$

1.3 运行模拟

在上面模型中,通过式(3)将系统可靠性指标表达成投资决策的线性函数形式。而式(3)中的 $EDNS_0$ 及灵敏度 $\frac{\partial EDNS}{\partial \bar{P}_i}$ 及 $\frac{\partial EDNS}{\partial B_i}$ 则需对系统在各种运行状态下的运行行为进行模拟才能得到。

本文采用下面的最小切负荷模型对系统运行进行模拟:

$$\begin{cases} \min \sum_{i \in N} R_i & (8) \\ \text{s. t. } P_G + R - B\theta = P_D & (9) \\ |P| \leq \bar{P} & (10) \\ \underline{P}_G \leq P_G \leq \bar{P}_G & (11) \\ 0 \leq R \leq P_D & (12) \end{cases}$$

其中, N 为系统节点集; P_G 、 \bar{P}_G 、 \underline{P}_G 为节点发电出力及其上、下限; R 为节点切负荷; B 为节点电纳矩阵; θ 为节点电压相位角; P_D 为节点负荷; P 及 \bar{P} 为支路有功功率及容量。式(8)为目标函数; 式(9)为直流潮流方程; 式(10)为支路有功潮流上限约束; 式(11)及(12)为节点最大发电出力及最大切负荷量限制。

对于每一个系统运行状态 t , 求解上面模型, 目标函数值即为该状态下的系统缺负荷 $EDNS_t$, 而缺负荷 $EDNS_t$ 对于支路容量和电纳的灵敏度可由下面两式求出(参见文献[1]):

$$\frac{\partial EDNS_t}{\partial P_i} = \pi_{P_i} \quad (13)$$

$$\frac{\partial EDNS_t}{\partial B_i} = (\pi_{i_2} - \pi_{i_1})(\theta_{i_1} - \theta_{i_2}) \quad (14)$$

其中, π_{P_i} 为对应于式(10)第 i 个约束的对偶变量, π_{i_1} 及 π_{i_2} 为对应于式(9)第 i_1 个及 i_2 个约束的对偶变量, i_1 及 i_2 为支路 i 的两个端点。

设系统运行状态总数为 T , 运行状态 t 发生的概率为 p_t , 那么系统缺负荷期望值及灵敏度系数为:

$$EDNS_0 = \sum_{t=1}^T p_t EDNS_t \quad (15)$$

$$\frac{\partial EDNS_0}{\partial \bar{P}_i} = \sum_{t=1}^T p_t \frac{\partial EDNS_t}{\partial \bar{P}_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial EDNS_0}{\partial B_i} = \sum_{t=1}^T p_t \frac{\partial EDNS_t}{\partial B_i} \quad (17)$$

系统运行状态取决于电源、负荷及线路状态。本文暂不考虑电源及负荷状态, 故系统运行状态完全取决于线路状态。设系统所有线路集为 ML , 发生停运(检修停运或故障停运)的线路集为 MO , q_i 为线路 i 发生停运的概率, 则运行状态 t 的概率为:

$$p_t = \prod_{i \in MO} q_i \prod_{i \in ML-MO} (1 - q_i) \quad (18)$$

考虑到一般线路停运概率都很小, 本文在确定系统运行状态时, 对于线路停运只模拟到一阶停运事件。

2 求解方法及步骤

2.1 模糊算法

对于本文的多目标规划问题, 由于投资最小和可靠性最大这两个目标是相对矛盾的, 要想找到同时满足这两个目标的规划方案是根本不可能的。唯一可行的方法是寻找一个折衷方案, 使各目标实现的总体令人满意程度最大。

设 C^* 及 $EDNS^*$ 是目标函数(1)及目标函数(2)在约束条件(4)~(7)下所得的最小值, 分别引入模糊集 F_1 和 F_2 表示规划方案达到目标(1)和目标(2)的令人满意程度, 其隶属函数分别为:

$$\mu_{\tilde{F}_1} = \begin{cases} 0 & C \geq \bar{C} \\ \frac{\bar{C} - C}{\bar{C} - C^*} & \bar{C} \geq C \geq C^* \\ 1 & C^* \geq C \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu_{\tilde{F}_2} = \begin{cases} 0 & EDNS \geq \overline{EDNS} \\ \frac{\overline{EDNS} - EDNS}{\overline{EDNS} - EDNS^*} & \overline{EDNS} \geq EDNS \geq EDNS^* \\ 1 & EDNS^* \geq EDNS \end{cases} \quad (20)$$

其中, $C = \sum_{i \in M} \sum_{j \in I_i} C_{ij} X_{ij}$ 为规划方案的投资。这里, 隶属函数采用线性形式表达, 也可采用非线性形式, 但采用线性形式求解最容易, 且非线性形式也可转化成分段线性形式进行求解。设模糊集 \tilde{F} 表示规划方案各目标实现的总体令人满意程度, 其隶属函数 $\mu_{\tilde{F}}$ 定义为: $\mu_{\tilde{F}} = \min\{\mu_{\tilde{F}_1}/\alpha_1, \mu_{\tilde{F}_2}/\alpha_2\}$, α_1 及 α_2 为表示目标(1)及目标(2)相对重要性的加权系数, $\alpha_1, \alpha_2 \geq 1$ 。本文的多目标优化问题可转化为在满足式(4)~(7)条件下, 使 $\mu_{\tilde{F}}$ 达最大值, 即有下面的单目标优化问题:

$$\begin{cases} \max z = \mu_{\tilde{F}} = \lambda & (21) \\ \text{s. t. } (\bar{C} - \sum_{i \in M} \sum_{j \in I_i} C_{ij} X_{ij}) / (\bar{C} - C^*) \geq \alpha_1 \lambda & (22) \\ (\overline{EDNS} - EDNS) / (\overline{EDNS} - EDNS^*) \geq \alpha_2 \lambda & (23) \\ \sum_{j \in I_i} X_{ij} = 1 & i \in M & (24) \\ X_{ij} \in \{0, 1\} & j \in I_i, i \in M & (25) \\ 0 < \lambda < 1 & & (26) \end{cases}$$

设求得的最优解为: X_{ij}^* ($j \in I_i, i \in M$) 及 λ^* , 则 X_{ij}^* ($j \in I_i, i \in M$) 即为我们所要寻求的多目标优化问题的模糊最优解, λ^* 为各目标实现的总体令人满意程度。本文假定 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ 。

2.2 求解步骤

本文模型的求解包括下面三个步骤:

- 1)、求解以式(1)为目标、以式(4)~(7)为约束的单目标优化问题, 确定出投资最小值 C^* 。
- 2)、求解以式(2)为目标、以式(4)~(7)为约束的单目标优化问题, 确定出缺负荷期望值的最小值 $EDNS^*$ 。
- 3)、求解以式(21)为目标、以式(22)~(26)为约束的单目标优化问题, 所得解即为电网规划的最终解。

上面三步中的单目标优化问题均为较小规模的混合整数规划问题, 容易求解。但由于用线性函数近似代替实际的 $EDNS$ 函数, 必须通过迭代逼近的方法, 才能使所得解精度足够。仅以步骤 3) 求解为例, 有下列迭代过程:

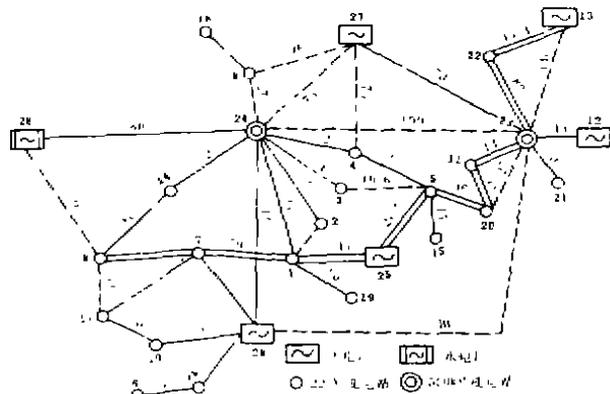
- I)、给定投资决策变量的初始取值 $X_{ij}^0 (j \in I, i \in M)$, 并令 $k = 0, \lambda^{(0)} = 0$ 。
- II)、对给定 X_{ij}^k 后形成的网络进行各种运行状态的模拟, 计算出缺负荷期望值 $EDNS^{(k)}$ 及灵敏度系数 $\frac{\partial EDNS^{(k)}}{\partial P_i}$ 及 $\frac{\partial EDNS^{(k)}}{\partial B_i} (i \in M)$ 。
- III)、利用式(3)构造函数 $EDNS^{(k+1)}$, 并由此形成如式(21)~(26)所示的模糊规划模型。
- IV)、求解该模型, 得到最优解 $X_{ij}^{(k+1)}$ 及 $\lambda^{(k+1)}$ 。
- V)、如 $|\lambda^{(k+1)} - \lambda^{(k)}| \leq \varepsilon$, 停止迭代, 此时的 $X_{ij}^{(k+1)}$ 及 $\lambda^{(k+1)}$ 即为最终解, ε 为收敛判据。否则 $k+1 \rightarrow k$, 转 II)。

3 计算实例

我们采用本文所提模型和算法对我国某城市实际电网进行了规划计算。

上图为该城市电网结构图。该系统共有28个节点, 其中电源点有6个。图中, 实际表示已有支路, 虚线表示可能增加的新支路; 支路上数字表示支路长度(单位: 公里)。除了支路23—24、23—26、23、27、24—28架设500kV线路外, 其余支路均架设220kV线路。

规划时, 任一支路上线路回数均不能超过两回, 规划方案的最大允许投资额为 \bar{C} 为 35000 万元, 最大允许缺负荷期望值 \overline{EDNS} 为 11.5MW/gr。



我国某城市电网结构图

下表为采用本文模型对该城市电网进行规划计算的结果。其中, 方案1和方案2分别为只以投资最小为目标和只以可靠性最大为目标的规划结果, 方案3为同时以投资最小和可靠性最大为目标时作出的规划方案。表中投资为规划方案相对于已有网络增建新线的投资费, $EDNS$ 为对规划方案进行运行模拟而求得的缺负荷期望值, 因本文只模拟到线路 $N-1$ 停运, 表中的 $EDNS$ 值同实际值略有差别, 但误差不大。

从表中可以看出, 方案1的经济性最好, 但可靠性最差, 方案2则恰恰相反。这两个方案由于只强调单一目标, 虽然使得某个目标实现程度最好, 但方案的总体性能不佳, 如方案1各目标总体实现程度仅为 0.003, 方案2也仅为 0.023。而方案3虽然各目标实现程度都不是最好的, 但由于考虑了各目标的拆衷平衡, 使得方案的总体性能较好, 如表中所示, 方案3各目标总体实现程度为 0.549, 远高于方案1和方案2相应的数值。

在实际计算中, 我们采取了一些有效措施以提高解算速度, 如在进行系统运行模拟时采用了线性规划的松弛技术[4]等。在 Micro VAX-1 机上, 作出表中的三个方案所用的 CPU 时间总共为 34.17 分。对于像该市这样较大规模的电网, 所需的计算时间是合适的。

不同规划方案对比表

方案	投资 (万元)	EDNS (MW/yr)	各目标实现程度			支路建线情况
			目标(1)	目标(2)	总体目标	
1	3238	11.46	1	0.003	0.003	分别在支路4-24, 7-26, 9-24 及9-27增建一回线 在支路1-19, 1-24, 2-24, 3-24, 4-24, 5-15, 6-16, 7-26, 9-18, 9-24, 12-23, 16-26, 21-23, 23-26, 24-28分别增建一回线, 而在支路9-27, 13-23上建二回线,
2	34263	0.00	0.023	1	0.023	在支路1-2, H1-9, 3-24, 4-24, 5-15, 6-16, 7-26, 9-18, 9-24, 12-23, 16-26, 21-23, 23-26 上增建一回线, 而在支路9-27上建二回线
3	14025	5.19	0.660	0.549	0.549	

顺便指出,本文电网规划结果取决于给定的 \bar{C} 和 \overline{EDNS} 值。当这两个值发生变化时,规划方案相应地也发生变化。如当保持 $\bar{C} = 3500$ 万元不变,而令 $\overline{EDNS} = 8.5\text{MW/yr}$,所作出的规划方案指标为:投资 $C = 21225$ 万元, $EDNS = 4.15\text{MW/yr}$,方案的各目标总体实现程度为0.512。

4 结 论

本文提出的电网规划模型,考虑了电网规划的多目标性,克服了现有规划模型只考虑单一目标的不足。所提的模糊算法从定义各目标实现程度的隶属函数出发,将多目标优化问题转化成模糊规划问题进行求解,为求解电网规划的多目标优化模型提供了有效手段。实际电网规划计算表明了本文模型和算法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Pereira M. A decomposition approach to automated generation/transmission expansion planning. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(11): 3074~3081
- 2 Zimmermann H. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 22(1): 45~55
- 3 邹开其等. 模糊系统与专家系统. 成都: 西南交通大学出版社, 1989
- 4 李文沅等. 大型发输电组合系统可靠性评估的 Monte-carlo 法. 重庆大学学报, 1989, 12(3): 92~98