

基于模糊理论的配电网电压层级优化的应用

冯景¹, 周步祥¹, 林楠²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘要:基于模糊综合评价法提出了一种配电网电压等级序列选择方法。分析合理选择城市配电网电压等级的具体评价流程。构建配电网电压层级优化的数学模型,以年综合费用 F (包括工程建设的总投资 Z_N 、运行维护费用 Y_N 、电能损耗费用 C_L)最小为目标,并且满足网络拓扑约束、可靠性限制、电压降落限制、线路功率限制、短路电流限制等约束条件。分别构建经济评估体系和技术评估体系进行电压等级的评估和选取。以一实际的高新区A为例,对电压等级备选方案进行评估,得到了综合考虑技术性评价指标和经济性评价指标的模糊评价方案,验证了该方法的合理性和可行性。

关键词:配电网电压等级; 模糊理论; 评估指标体系; 方案选择; 20 kV

Abstract: Based on fuzzy comprehensive evaluation, a method to select voltage level of distribution network is proposed. The voltage level selecting method and processes are introduced. The optimal mathematical model for voltage level of distribution network is constructed. The minimum comprehensive cost F (including the total investment Z_N , the operation and maintenance costs Y_N , the costs of electric energy loss C_L) is taken as the optimum objective function, and the constraints such as the limits on network topology, the reliability, the voltage sags, the line power loss and the short-circuit current are all satisfied. The economic evaluation system and technical evaluation system for choosing voltage level are proposed respectively. Taking a high-tech zone A in a province for example, the options of voltage level are evaluated, and the fuzzy evaluation scheme is obtained which takes technical and economic evaluation index into account. Based on fuzzy comprehensive evaluation, the proposed method is proved reasonable and feasible.

Key words: distribution voltage level; fuzzy theory; evaluation index system; program choice; 20 kV

中图分类号: TM721 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)01-0043-05

0 引言

目前中国电网已基本形成了220 kV及以上电压等级作为输电电压和以110 kV、35 kV、10 kV作为配电网电压的电压等级序列。少数地区已采用20 kV作为中压配电网电压等级,例如苏州工业园区^[1]和辽宁本溪供电公司的南芬二次变电所。目前中国其他省市也纷纷进行20 kV的试点研究工作,并初见成效。随着中国经济的快速发展,为解决中国城市中心区及高负荷密度地区供电能力不足、农村低负荷密度地区电压降过大的问题,提高配电网智能化水平,进行电压层级优化的研究是十分必要的。从而增强电网的输电能力,为配电网的智能化夯实基础。

1 配电网电压层级优化的总体目标

配电网电压层级优化是在已确定配电网变电站

布点及供电范围、负荷分布的情况下,合理确定电压等级。使配电网在保证安全可靠供电的同时,实现经济上的优化^[2]。因此,配电网电压等级优化的模型中需要考虑的因素包括工程建设的总投资、运行费用、网损费用以及其他一些技术性约束条件。

以年综合费用 F (包括工程建设的总投资 Z_N 、运行维护费用 Y_N 、电能损耗费用 C_L)最小为目标,配电网电压层级优化的数学模型为

$$\min F = Z_N + Y_N + C_L \quad (1)$$

且满足以下约束条件。

(1) 网络拓扑结构约束

(2) 满足可靠性要求

$$R_{ASAI} \geq R_{\min} \quad (2)$$

式中 R_{\min} 为可靠性指标下限。

(3) 电压降落限制

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中 U_i 为各负荷节点电压; U_{\min} 和 U_{\max} 为节点电压

上下限; m 为负荷节点个数。

(4) 线路功率限制

$$P_k \leq P_{k,max} \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

式中 P_k 为线路 k 中流过的功率; $P_{k,max}$ 为线路 k 的最大允许传输有功功率; l 为线路的总根数。

(5) 短路电流约束

$$I_k < I_{limit} \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

式中 I_{limit} 为短路电流上限。

2 电压等级评估模型

中压配电网电压等级序列合理配置的评价指标体系非常庞大,通过分析,建立指标层次结构,确定经济性和技术性评价的核心指标和计算模型。图1即为电压等级优化的一般流程。

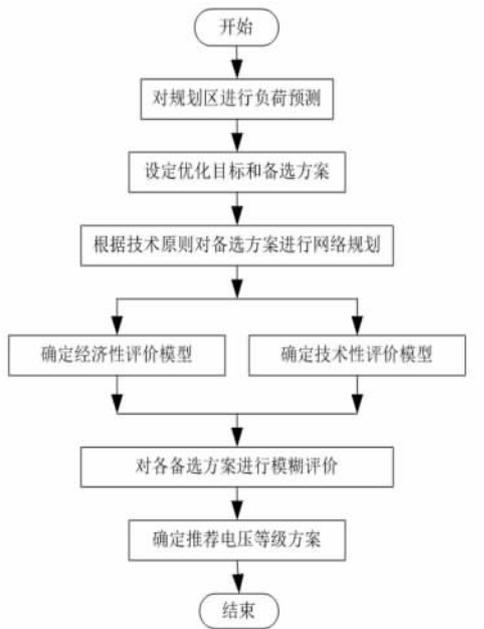


图1 电压等级优化流程图

2.1 技术性评估模型

为确保供电方案的可行性,需要对不同供电方式下配网规划方案的技术指标加以分析计算,并将技术指标分析计算的结果作为评判供电方式优劣的指标之一,主要比较的技术指标有供电可靠性、电压降落和短路电流等。

2.1.1 可靠性评估模型

供电可靠性是评价配电网电压等级优化方案的重要指标之一。一般可以从系统停电持续时间(SAIDI, system average interruption duration index)和系统平均供电可用率(ASAI, average service availability index)两个指标对不同方案进行分析比较^[3]。

(1) 系统平均停电持续时间指标 SAIDI。系统平均停电持续时间指标 SAIDI 是指每个由系统供电的用户在一年中所遭受的平均停电持续时间,可以通过一年中用户遭受的停电持续时间总和除以该年中由系统供电的用户总数来估计

$$SAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i N_i} \quad (6)$$

式中 N_i 为负荷点 i 的用户数; U_i 为年停电时间。

(2) 系统平均供电可用率指标 ASAI。系统平均供电可用率指标 ASAI 是指一年中用户经受的不停电时间总数与用户要求的总供电时间之比,可按下式计算。

$$ASAI = \frac{8760 \sum_j N_j - \sum_j U_j N_j}{8760 \sum_i N_i} \quad (7)$$

显然有

$$ASAI = 1 - \frac{SAIDI}{8760} \quad (8)$$

式中 N_i 为负荷点 i 的用户数; U_i 为年停电时间。

2.1.2 电压偏差评估模型

为确保不同供电方式下对用户供电的质量,还需对电压偏差进行分析。各级线路电压降落的计算公式为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_N} = \frac{P \cdot (r + x \tan \theta)}{U_N} \cdot l \quad (9)$$

$$\Delta U\% = \frac{P \cdot (r + x \tan \theta)}{U_N^2} \cdot l \times 100\% \quad (10)$$

式中, $\Delta U\%$ 为线路电压损失百分数; θ 为线路功率因数角; r 为单位长度线路电阻; x 为单位长度线路电抗。

根据上式可知,在负荷不变的情况下: $\Delta U_{20}\% / \Delta U_{10}\% = 1/4$ 。当中压电压等级提高至 20 kV 时,电压损失是 10 kV 的 25%。由《电能质量供电电压允许偏差》(GB/T 12325),10 kV 配电线路电压降不应超过 7%; 35 kV 配电线路供电电压正负偏差之和不应超过 10%。

2.1.3 短路电流评估模型

配电网中压配电网电压的确定,受到各种条件的制约,其中要考虑到与上下级电网电压的协调发展。采用系统中通用的典型变压器容量,依据主变压器二次侧短路容量选取主变压器,变压器二次侧三相短路电

流的计算公式为

$$I_2 = \frac{100S_N U_1 I_1}{100S_N U_2 + \sqrt{3}U_k \% U_1 U_2 I_1} \quad (11)$$

式中, S_N 为变压器的额定容量; I_1 为变压器一次侧短路电流; U_1 为变压器一次侧电压; U_2 为变压器二次侧电压; U_k 为变压器阻抗百分比。

表1 不同电压等级下变压器短路电流的比较

电压等级 /kV	最大主变压器容量 /MVA	U_k /%	I_1 /kA	I_2 /kA
110/10	50	14	31.5	18.58
110/20	50	14	31.5	9.29
220/10	120	16	50	34.71
220/20	120	16	50	17.35

由表1可知,如高压配电电压为110 kV,低压侧电压由10 kV升压为20 kV,低压侧短路电流将大约减少一半,这意味着可以采用较低遮断容量的断路器,大大减少设备费用投资和占地空间。或者可以通过增加主变压器的容量以最大限度地利用低压侧开关遮断容量以提高变电站的输配电能力。

2.2 经济性评估模型

与技术性相比,经济分析要复杂的多。涉及到现有电网的升压改造时,需要考虑现存资产规模、运行年限、改造折旧费等。经济评价主要采用年费用法。年费用法是目前电力工程项目中常用的一种动态评价方法,适用于比较效益或功能基本相同的不同方案的投资费用和运行费用。进行方案比较时,年总费用的最低方案,其经济效益为最大,年费用的计算公式为

$$N_f = Z \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + Y_N + C_L \quad (12)$$

式中, N_f 为折算到工程建设年的年费用; Z 为折算到工程建设的总投资; Y_N 为运行维护费用, Y_N 可以按照固定资产原值(近似为工程投资)乘以运行维护率 α 来实现; r_0 为电力工业基准收益率或折现率(r_0 取0.1); C_L 为电能损耗费用; n 为计算期。系统运行 n 年的电能损耗费用为

$$C_L = \sum_{i=1}^n \Delta P_i T f_i \gamma^{i-1} \quad (13)$$

式中, ΔP_i 为年度最大负荷下的功率损耗; T 为年利用小时数; f 为电价。电能损耗费用随着负荷的增长而逐年提高。

3 基于模糊理论的配电网电压层级优化模型的建立

传统对单一电网的评估主要应用解析法、模拟法

等一些经典算法^[4],这些方法侧重于分析电网的经济性或者可靠性等单一属性,没有对规划方案进行全面的综合评估。文献[5-7]采用综合评判决策理论,层次分析法可以对人为判断标量化,通过权重矩阵得出方案权重,评价供电模式的综合特性。这里应用模糊理论建立单一电网的评估体系,合理选择模糊变量,结合专家判断对指标权重进行量化和完整排序,从而建立配电网电压层级优化的评价体系。

3.1 模糊评价的基本模型

模糊评价的数学模型可以表示为

$$B = f(AR) = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n] \quad (14)$$

式中, B 为模糊评价决策的一个子集; A 为模糊权重相量; $R = [r_{ij}]_{m \times n}$ 为模糊评价矩阵; f 为模糊变换算子。对此运算符的不同定义,对应着不同的模糊评价模型。目前主要有4种不同的模糊评价模型^[8]:主因素决定型、主因素突出I型、主因素突出II型和加权平均型。在进行实际问题的模糊评价时,可根据实际评价目标的需要选用模糊变换算子。

3.2 建立等级论域和指标论域

确定评价基准及相应的价值量(即评价等级论域): $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, 选取 $E = \{优秀, 较好, 好, 一般, 差\}$, 对其赋值则 $E = \{0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1\}$ 。并且依据评定者给出的评定等级建立隶属度。

评价指标论域: $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 。主要选取的中压配电网电压等级序列合理配置的评价指标有: U_1 系统平均停电持续时间指标 SAIDI; U_2 系统平均供电可用率指标 ASAI; U_3 电压偏差评估指标; U_4 短路电流评估指标; U_5 经济性评估指标。

3.3 建立评判隶属度矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1k} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mk} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, R_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, k$) 为第 i 个评价指标对于第 j 个评价等级的隶属度,它反映了评价指标与评价等级之间用隶属度表示的模糊关系; m 表示评价指标的数目; k 表示评语集中评价等级的数目。

3.4 权重的确定

权重的确定是在专家知识和主观经验的基础上,利用具有严密逻辑性的数学方法,根据判断矩阵是否具有满意的一致性来检验权值的合理性^[9]。

3.4.1 构造模糊判断矩阵

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是全部因素的集, 对全部因素作两两之间的对比, 构造矩阵 $c = [c_{ij}]_{n \times n}$, 其中 $c_{ij} = f(x_i, x_j)$, 记 c 为判断矩阵, 即为

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.4.2 计算权值

根据判断矩阵 C , 计算其最大特征根 λ_{\max} , 并且矩阵 C 关于 λ_{\max} 的特征向量 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 经过归一化处理后的 x_i 就是各评价指标的权重, 即 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ 。

至此, 上述定型的评价指标就实现了定量化, 还可根据权重的大小对各评价指标的优先级进行排序。

3.4.3 验证判断矩阵的一致性

按照下式进行一致性检验。

$$C_R = C_I / R_I \quad (17)$$

C_R 为判断矩阵的随机一致性比率; C_I 为判断矩阵的一般一致性指标, $C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$; R_I 为判断矩阵的平均随机一致性指标, 当 $C_R < 0.1$ 时, 即认为判断矩阵具有满意的一致性, 说明权数分配合理; 否则需要调整判断矩阵到取得满意一致性为止^[10]。

3.5 确定因素集对评价集的隶属向量 S_i

根据上述方法计算出的指标权重 A 和已经建立的评价隶属矩阵 R , 运用模糊运算法则, 进行综合运算, 并作归一化处理, 得到因素集对评价集的隶属向量 S_i 。

$$S_i = A_i \cdot R_i = [a_1, a_2, \dots, a_m] \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1k} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mk} \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.6 计算各方案的可行度

$$N_i = S_i E^T \quad (19)$$

根据式(11)可依次计算出各方案的可行度 N_i , 并可按照可行度的大小排除各个备选方案的优先次序。

4 实际案例分析

4.1 规划区产业概况和电网现状

以一实际的高新区 A 为研究对象, 根据《高新区 A “十二五”电网规划》, 验证对配电电压等级的评价

方法和评估模型的合理性。高新区 A 地理位置优越, 有丰富的油气资源, 独特的政策优势和雄厚的产业基础, 具有建设大型临海资源型工业基地的诸多优势。截至 2009 年年底, 规划区内电源装机容量约为 860 MW (包括火电厂 Y 装机容量 440 MW, 企业自备电厂 J 装机容量 420 MW)。现有 220 kV 变电站 3 座, 主变压器 5 台, 总容量 620 MVA。拥有 110 kV 变电站两座, 主变压器 3 台, 总容量 120 MVA, 电源引自火电厂 Y。

该高新区 A 的规划面积为 97 km², 根据某省国民经济和高新区 A 的经济和产业发展规划, 结合经济发展和用电历史情况, 采用产值单耗法、负荷密度法和大用户法等多种负荷预测方法, 经综合比较, 得出高新区 A 远景饱和年的负荷约为 2 064.64 MW, 负荷密度约为 21.27 MW / km²。

4.2 电压等级序列备选方案

以高新区 A 目前现有的电压等级序列 220/110/10 kV 作为方案 1; 新电压等级序列 220/110/20 kV 作为方案 2; 220/20 kV 作为方案 3。对这 3 种方案进行综合比较。3 种备选方案建设规模估算见表 2。

表 2 3 种方案电网规模估算

方案名称/kV	220/110/10	220/110/20	220/20
变电规模			
220 kV 变电站 (座 × MVA × 台)	6 × 240 × 3	6 × 240 × 3	12 × 180 × 2
110 kV 变电站 (座 × MVA × 台)	17 × 80 × 3	17 × 80 × 3	0
20(10) kV 配电 变压器/台	8 224	4 134	4 134
输电规模			
220 kV 线路/km	62	62	109
110 kV 线路/km	244	210	0
20(10) kV 线路 /km	1 386	933	900

4.3 计算评价指标的权重

通过对南方电网实际运行中的数据进行分析, 同时参考专家经验, 构造判断矩阵 C , 并求出矩阵 C 关于最大特征值 λ_{\max} 的特征向量, 进一步得出各评价因素的重要性权重集合为: $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\} = \{0.126, 0.126, 0.077, 0.162, 0.104\}$ 。对权重因子进行归一化, $\sum_{i=1}^5 a_i = 1$ 。各项评价指标的最终权重因子见表 3。

4.4 模糊综合评判

表3 各项评价指标的权重因子

评价指标	U_1 (SAIDI)	U_2 (ASAI)	U_3 ($\Delta U\%$)	U_4 (I_2)	U_5 (N_f)
a_i	a_1 =0.212	a_2 =0.212	a_3 =0.130	a_4 =0.272	a_5 =0.174

分别对3个方案的技术评价指标(供电可靠性、电压降落和短路电流等)和经济评价指标 N_f 进行比较,结果见表4。不同电压等级下变压器短路电流的比较见表1。

表4 各方案的评价指标

备选电压等级/kV	SAIDI/(h/a)	ASAI/%	电压降落 $\Delta U\%$	年费用 /万元
220/110/10 kV	0.999 958 5	0.363 54	1.852 7	112 356
220/110/20 kV	0.999 955 2	0.392 448	1.597 3	99 323
220/20 kV	0.999 942 8	0.501 072	1.678 2	80 059

利用对上述模糊评价指标的分析结果,计算各评价系统的模糊综合评价矩阵 R_i 。方案1的模糊评价矩阵 R_1 为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0.56 & 0.33 & 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 \\ 0 & 0.78 & 0.22 & 0 & 0 \\ 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对模糊评价矩阵进行加权,得出各电压等级备选方案模糊综合评价结果。由 $S_i = A_i \cdot R_i$ 得

$$S_1 = (0.212 \quad 0.212 \quad 0.130 \quad 0.272 \quad 0.174)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0.56 & 0.33 & 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 \\ 0 & 1.78 & 0.22 & 0 & 0 \\ 0.44 & 0.44 & 0.12 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.195 \ 3 \quad 0.557 \ 9 \quad 0.231 \ 2 \quad 0.015 \ 6 \quad 0)$$

$$S_2 = (0.404 \ 2 \quad 0.357 \ 3 \quad 0.176 \ 6 \quad 0.062 \ 0 \quad 0)$$

$$S_3 = (0.388 \ 2 \quad 0.343 \ 6 \quad 0.214 \ 4 \quad 0.053 \ 8 \quad 0)$$

由 $N_i = S_i E^T$ 得方案1的可行度 N_1 为

$$N_1 = S_1 E^T = (0.195 \ 3 \quad 0.557 \ 9 \quad 0.231 \ 2 \quad 0.015 \ 6 \quad 0)$$

$$\begin{bmatrix} 0.9 \\ 0.7 \\ 0.5 \\ 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix} = 0.686 \ 6$$

$$N_2 = S_2 E^T = 0.720 \ 7; N_3 = S_3 E^T = 0.713 \ 2$$

根据上述结论,得到3种电压等级方案可行度排序为: $N_2 > N_3 > N_1$ 。

5 结 论

提出了一种基于模糊综合评价法配电网电压等级序列选择方法。分别构建经济评估体系和技术评估体系进行电压等级的评估和选取。得到某省高新区A的合理电压等级序列。在3种建设方案中,方案220/110/20 kV的可行度最高。将中压配电电压等级提高到20 kV可以达到简化电压等级序列、节省电网投资、降低损耗、提高输送能力和输送距离的目的。由于各地的实际情况不同,在进行配电电压选取时,还需根据城市的具体情况进行深入的可行性研究,择优选取。

参考文献

- [1] 姜祥生,汪洪业,姚国平.苏州工业园区20 kV电压等级的实践[J].供用电,2002,19(6):9-11.
- [2] 陈章潮,程浩忠.城市电网规划与改造(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 王成山,王赛一,葛少云,等.中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J].电力系统自动化,2002,26(24):34-38.
- [4] Satty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1980.
- [5] Pan J, Teklu Y, Rahman S et al. An Interval-based MADM Approach to the Identification of Candidate Alternatives in Strategic Resource Planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1441-1446.
- [6] Chen C T. A fuzzy Approach to Select the Location Of the Distribution Center [J]. Fuzzy Sets and System, 2001, 18(1): 65-73.
- [7] Noorul Faq A, Kannan G. Fuzzy Analysis Hierarchy Process for Evaluating and Selecting a Vendor in a Supply Chain Model [J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 29(7/8): 826-835.
- [8] 张焰.电网规划中的模糊可靠性评估方法[J].中国电机工程学报,2000,20(11):77-80.
- [9] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998:6-39.
- [10] 宋光兴.模糊判断矩阵的一致性检验及一致性改进方法[J].系统工程,2003,21(1):110-116.
- [11] 肖峻,高海霞,葛少云,等.城市中压配电网评估方法与实例研究[J].电网技术,2005,29(20):77-81.

(收稿日期:2011-09-30)