

基于模糊综合评价方法的中压配电网中性点接地方式选择方法

中压配电网中性点接地方式选择需综合考虑继电保护、故障电流和弧光过电压等因素。目前，中压配电网中性点接地方式的选择问题在理论界和工程界一直存在着分歧，尚未形成可行性高和易操作的中性点选择方法。以故障切除准确率、单相接地故障电流以及弧光过电压倍数作为指标，运用模糊数学原理，通过构造隶属度函数和量化指标评价体系，建立了模糊综合评价向量，提出了一种基于模糊综合评价方法的中性点选择方法，该方法能够全面考虑人身安全、设备安全以及系统安全。算例验证了该方法的可行性和实用性。

马春雷¹ 龙毅² 丁健¹ 杨明波¹ 马格士^{2/1}. 贵州电网有限责任公司
贵阳供电局 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室

0 引言

电力系统中压配电网中性点接地方式的选择是一个涉及电力系统许多方面的综合性问题，它与系统的供电可靠性、电力系统过电压与绝缘配合、继电保护、通信信号系统的干扰、电气安全以及接地装置等有密切的关系^[1]。目前，我国中压配电网中性点接地方式主要包括中性点不接地方式、中性点经消弧线圈接地方式以及中性点经电阻接地方式，但每一种中性点接地方式都存在明显的优缺点^[2-3]。随着我国城市化快速发展，中压配电网的电缆化比例越来越高，同时网络拓扑结构越来越复杂，各地中压配电网面临着中性点接地方式重新选择的问题。

建国初期至20世纪80年代，我国参

照前苏联的规定，对3~66 kV电网中性点主要采用不接地或经消弧线圈接地两种方式。大部分中压配电网采用中性点经消弧线圈接地的方式，通过适当调整脱谐度，使接地残流限制在10 A以下。20世纪80年代中后期，我国城市10 kV配电网中电缆线路逐渐增多，电容电流相继增大，而且运行方式经常变化，消弧线圈调整存在困难，北京、上海、天津、深圳和珠海等城市陆续采用了中性点经小电阻接地运行方式^[4]。

实际上，关于中压配电网中性点接地方式的选择问题在我国的理论界和工程界中一直存在着分歧^[5]。各界学者对城市配电网中性点接地方式问题达成共识：配电网中性点接地方式的选择是具有综合性的技术问题，中性点不接地、谐振接地和电阻接地各有其优缺点，应结合电网具体条件，通过技术经济比较确定^[6]。文献[7]将不同中性点接地方式下配电网的可靠性评价及安全性防护与建设运行成本分析相结合，建立了计及可靠性因素的全寿命周期成本模型作为决策目标函数，但该模型所涉及参数较多，可操作性较差。文献[8]采用专家评分方式得到中性点接地方式影响因素权重，选择加权值最大者作为最优方式，该方法简单，但主观性较强。文献[9]应用模糊推理原理构建模糊关系矩阵，以单向故障率、停电修复时间、电容电流以及过电压作为输入参数，用于中性点接地方式的选择。文献[10]从可靠性角度提出了加权多指标区间数灰靶决策算



马春雷/高级工程师

关键词/Keywords

中性点接地方式·
模糊综合评价·
隶属度函数·
模糊综合评价向量·

国家自然科学基金(51407017)，配电系统中性点接地方式选择与故障保护技术研究及示范(GZKJXM20170166)。

法评价中性点接地方式在提高配电网可靠性方面的优劣。

随着对于配电网安全性的愈加重视,城市供电公司希望在选择中压配电网中性点接地方式时综合考虑人身安全、设备安全以及系统安全。本文结合模糊评价方法和层次分析法,选取了涉及人身安全、设备安全以及系统安全的指标,形成了模糊判断矩阵和综合评价向量,为中压配电网中性点接地方式选择提供了一个合理的评价选择方案。

1 模糊评价方法建立

在城市中压配电网结构和所处环境越来越复杂的情况下,为科学、合理地选择合适的中性点接地方式,提出了一种基于模糊评价方法的中压配电网中性点接地方式选择方法,选择流程如图1所示。

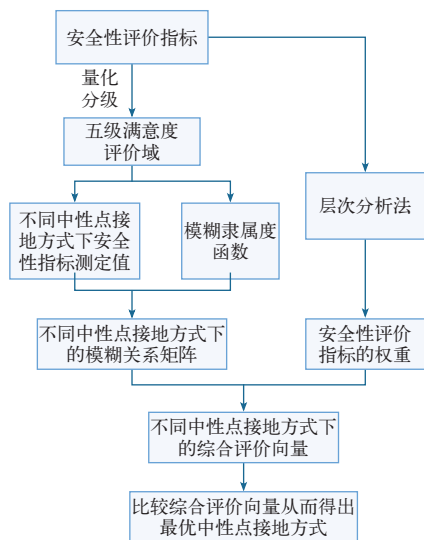


图1 基于模糊评价方法的中压配电网中性点接地方式选择流程

1.1 指标论域选择

影响中性点接地方式选择的主要因素是供电可靠性、人身安全和系统绝缘水平。各中性点接地方式均有优缺点。中性点不接地方式的最大优点就是供电连续性高,结构简单,投资较少,适用于以架空线路为主、单相接地故障电流很小的农村和中小城市城区配电网,但系统发生单相接地故障时,很难实现有选择性的接地保护。中性点经消弧线圈接地系统,可有效抑制电弧重燃,

减少间歇性电弧过电压出现的机率,但实现灵敏、有选择性的保护比较困难。中性点经小电阻接地系统中,依靠零序电流保护能将单相接地故障迅速切除,过电压较低有利于降低绝缘水平及投资,但增加了线路的跳闸次数从而影响了供电可靠性。因此,需要选择合适的指标选择体系,本文给出的指标体系如图2所示。

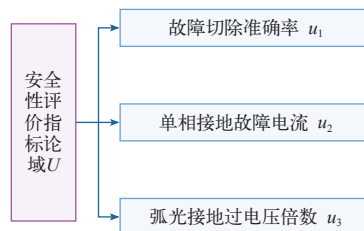


图2 指标体系的建立

(1) 故障切除准确率

故障切除准确率综合反映了配电网系统单相故障时零序保护或选线装置的正确率。对于中压配电网小电流接地系统,指单相故障时选线装置选线的正确率;对于中压配电网大电流接地系统,指零序保护动作的正确率。该指标为越大越优型指标。

(2) 单相接地故障电流

单相接地故障电流表征了配电网单相接地故障对于人身安全的影响,属于越小越优型指标。

(3) 弧光接地过电压倍数

弧光接地过电压倍数表征在不同中性点接地方式下对系统安全的影响,属于越小越优型指标。

1.2 模糊综合评价模型

模糊综合评价的基本思想是应用模糊关系合成的原理,根据被评价对象本身存在的形态或类属上的亦此亦彼性,从数量上对其所属给以刻画和描述,在电力系统中已有所应用^[11-12]。由于对中性点接地方式满意度概念本身具有模糊特性,因此用模糊数学的概念和方法建立中性点选择方式的理论与模型,比传统的评价方法更符合现象的实际情况。另外,在模糊评价中,权重的确定是一项关键的内容,对评价的结果具有重要的影响。

模糊评价方法需要根据满意度量化指标体系，其中，对满意度分成五级：高、较高、中、较低和低，具体量化结果如表1所示。

表1 评价指标及分级情况

满意度	u_1 故障切除 准确率(%)	u_2 单相接地 故障电流/A	u_3 弧光接地 过电压倍数
v_1 (低)	<60	>100	>3.0
v_2 (较低)	60~70	70~100	2.5~3.0
v_3 (中)	70~80	40~70	2.0~2.5
v_4 (较高)	80~90	10~40	1.5~2.0
v_5 (高)	≥90	≤10	≤1.5

模糊综合评价模型的关键是构造合理的隶属度函数从而得到模糊评价矩阵。根据指标体系的特点，构造了以下隶属度函数。

故障切除准确率指标为越大越优型指标，因此构造的隶属度函数为

$$\mu_{v_1}(\phi) = \begin{cases} 1 & \phi \leq a_1 \\ \frac{a_2 - \phi}{a_2 - a_1} & a_1 < \phi \leq a_2 \\ 0 & \phi > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{v_2}(\phi) = \begin{cases} \frac{\phi}{a_1} & \phi \leq a_1 \\ 1 & a_1 < \phi \leq a_2 \\ \frac{a_3 - \phi}{a_3 - a_2} & a_2 < \phi \leq a_3 \\ 0 & \phi > a_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{v_3}(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi \leq a_1 \\ \frac{\phi}{a_2} & a_1 < \phi \leq a_2 \\ 1 & a_2 < \phi \leq a_3 \\ \frac{a_4 - \phi}{a_4 - a_3} & a_3 < \phi \leq a_4 \\ 0 & \phi > a_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{v_4}(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi \leq a_2 \\ \frac{\phi}{a_3} & a_2 < \phi \leq a_3 \\ 1 & a_3 < \phi \leq a_4 \\ \frac{\phi - a_4}{a_4 - a_3} & \phi > a_4 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{v_5}(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi \leq a_3 \\ \frac{\phi - a_3}{a_4 - a_3} & a_3 < \phi \leq a_4 \\ 1 & \phi > a_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中， a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 为满意度分级所对应的数值； μ_{v_1} 、 μ_{v_2} 、 μ_{v_3} 、 μ_{v_4} 和 μ_{v_5} 为 ϕ 相对于五个满意度等级的隶属度。

类似地，对于单相故障电流和弧光接地过电压倍数指标为越小越优型，其隶属度函数为

$$\mu_{v_1}(\phi) = \begin{cases} 1 & \phi \geq a_1 \\ \frac{a_2 - \phi}{a_2 - a_1} & a_2 \leq \phi < a_1 \\ 0 & \phi < a_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{v_2}(\phi) = \begin{cases} \frac{a_1}{\phi} & \phi \geq a_1 \\ 1 & a_2 \leq \phi < a_1 \\ \frac{a_3 - \phi}{a_3 - a_2} & a_3 \leq \phi < a_2 \\ 0 & \phi < a_3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{v_3}(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi \geq a_1 \\ \frac{a_2}{\phi} & a_2 \leq \phi < a_1 \\ 1 & a_3 \leq \phi < a_2 \\ \frac{a_3 - \phi}{a_3 - a_4} & a_4 \leq \phi < a_3 \\ 0 & \phi < a_4 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{v_4}(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi \geq a_2 \\ \frac{a_3}{\phi} & a_3 \leq \phi < a_2 \\ 1 & a_4 \leq \phi < a_3 \\ \frac{\phi}{a_4} & \phi < a_4 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{v_5}(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi \geq a_3 \\ \frac{a_4}{\phi} & a_4 \leq \phi < a_3 \\ 1 & \phi < a_4 \end{cases} \quad (10)$$

对于测定的某一中性点接地方式下的指标向量 $U=(\phi_1, \phi_2, \phi_3)$ ，其模糊关系矩阵可表示为

$$R_U = \begin{pmatrix} \mu_{v_1}(\phi_1) & \mu_{v_2}(\phi_1) & \mu_{v_3}(\phi_1) & \mu_{v_4}(\phi_1) & \mu_{v_5}(\phi_1) \\ \mu_{v_1}(\phi_2) & \mu_{v_2}(\phi_2) & \mu_{v_3}(\phi_2) & \mu_{v_4}(\phi_2) & \mu_{v_5}(\phi_2) \\ \mu_{v_1}(\phi_3) & \mu_{v_2}(\phi_3) & \mu_{v_3}(\phi_3) & \mu_{v_4}(\phi_3) & \mu_{v_5}(\phi_3) \end{pmatrix} \quad (11)$$

在得到综合评价向量之前，需要通过层次分析法确定各指标的权重，引用数字1~9及其倒数作为标度来定义判断矩阵 $A = (a_{ij})_{3 \times 3}$ ，如表2所示。

表2 判断矩阵标度定义

标度	含义
1	表示两个因素相比，具有相同重要性
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因数 <i>i</i> 与因数 <i>j</i> 的重要性之比为 a_{ij} ，则因数 <i>j</i> 与因数 <i>i</i> 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

根据上述原则得到判断矩阵*A*后，计算一致性比例*CR*，当*CR*<0.1时，则判断矩阵一致性可以接受。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (12)$$

利用几何平均法，得到各个因数的权重向量 $Q = (q_1 \ q_2 \ q_3)$ ， q_i 为

$$q_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad i=1,2,3 \quad (13)$$

利用式(11)得到的模糊矩阵和式(13)得到的权重向量，则综合评价向量可以表示为

$$P = QR_U \quad (14)$$

利用上述方法，通过对不同中性点接地方式下的综合评价向量进行比较，得到最优的中性点接地方式。

1) 对于每一种中性点接地方式方案，选取与 $\max \{p_i\}$ 对应的五级满意度评价域中的 v_i 作为该中性点接地方式评价结果。

2) 选取最高的满意度评价域评语对应的中性

点接地方式作为最优方案。

2 算例

图3为某110 kV变电站10 kV段的简化主接线图，表3为线路原始参数。利用PSCAD/EMTP仿真软件，经过不同中性点接地方式的单相接地故障电流、弧光接地过电压倍数如表4所示。表4中，不同中性点接地方式的故障切除准确率由某市运行统计数据所得。

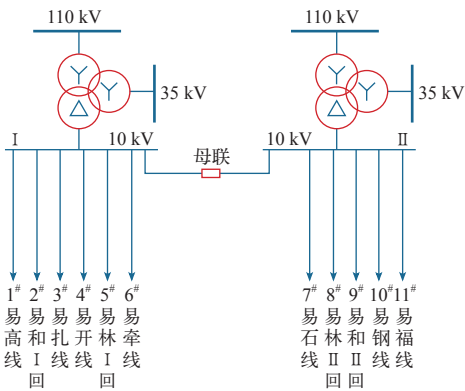


图3 某110 kV变电站一次系统图

表3 10 kV线路原始数据

线路名称	线路型号	线路长度 电缆/km	架空线 /km
易高线	电缆型号：易和I回、易扎线电缆 型号为YJV22-300/10 kV，其余线路均为YJV22-240/10 kV，架空线 型号：JKLYJ-120/10 kV	2.0	8.9
易和I回		3.2	6.8
易扎线		5.3	7.6
易开线		0.12	18.6
易林I回		2.3	16.7
易牵线		0	1.75
易石林		0.77	31.5
易林II回		1.6	12.2
易和II回		0.86	10.1
易钢线		0.12	5.6
易福线		0.06	4.5

表4 某变电站相关数据

中性点 接地方式	故障切除 准确率(%)	单相接地 故障电流/A	弧光接地 过电压倍数
小电阻	88	72	1.8
消弧线圈	62	26	2.5
不接地	72	32	2.8

根据式(1)~式(10)的隶属度函数，计算得到不同中性点接地方式下的模糊矩阵，即

$$R_{\text{电阻}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 1 & 0.8 \\ 0.067 & 1 & 0.97 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 1 & 0.83 \end{pmatrix}$$

$$R_{\text{消弧}} = \begin{pmatrix} 0.2 & 1 & 0.89 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.53 & 1 & 0.38 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_{\text{不接地}} = \begin{pmatrix} 0 & 0.2 & 1 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0.73 & 1 & 0.31 \\ 0.6 & 1 & 0.89 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

利用表2的构造原则，得到判断矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

其一致性比率 CR 为0.007 9，满足要求。然后再利用式(13)可以得到权重向量为

$$Q = \begin{pmatrix} 0.54 & 0.30 & 0.16 \end{pmatrix}$$

由式(14)所得，综合评价向量为

$$P_{\text{电阻}} = \begin{pmatrix} 0.02 & 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.56 \end{pmatrix}$$

$$P_{\text{消弧}} = \begin{pmatrix} 0.11 & 0.7 & 0.8 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$P_{\text{不接地}} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.27 & 0.98 & 0.76 & 0 \end{pmatrix}$$

表5 计算结果

中性点接地方式	$\max \{p_i\}$	对应满意度评语
小电阻	p_4	v_4 (较高)
消弧线圈	p_3	v_3 (中)
不接地	p_3	v_3 (中)

从综合评价向量可以得到，由于小电阻接地方式下，数值最大的位置与满意度等级 v_4 一致，其满意度较高，故小电阻接地方式为最优方案。

3 结束语

中压配电网中性点接地方式对电网的安全可靠性有着重要影响。根据对中性点接地方式选择的满意度存在模糊性问题，提出了一种基于模糊综合评价方法的中压配电网中性点接地方式选择方法。该方法以故障切除准确率、单相接地故障电流以及弧光接地过电压倍数作为安全性指标，通过量化分级形成五级评价域，综合模糊评价原理和层次分析法原理，形成模糊关系矩阵和权重

向量以得到综合评价向量。该方法综合考虑了中性点接地方式与配电网安全性之间的关系，较好地解决了中性点选择中多因素之间相互关联的问题，计算简单且可操作性较强，对配电网中性点接地方式选择具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013 (8): 141-148.
- [2] 曾祥君, 胡京莹, 王媛媛, 等. 基于柔性接地技术的配电网三相不平衡过电压抑制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (4): 678-684.
- [3] 代姚, 孙才新, 袁涛, 等. 采用过电压波形识别的单相接地暂态过电压抑制方法 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (5): 1136-1142.
- [4] 沈红莲. 江津10 kV电网中性点接地方式研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [5] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择 [J]. 电网技术, 2004, 28 (16): 86-89.
- [6] 王辉. 10 kV配电网中性点接地方式的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [7] 熊小伏, 刘恒勇, 欧阳金鑫, 等. 中压配电网中性点接地方式决策方法研究 [J]. 重庆大学学报, 2014, 37 (6): 1-9.
- [8] 付迎栓, 王正刚, 邝石. 中压电网接地方式的综合选取方法 [J]. 电网技术, 2006, 30 (15): 101-102.
- [9] 刘艺, 聂一雄, 彭显刚, 等. 模糊推理在中性点接地方式选择中的应用研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (7): 32-36.
- [10] 曹珍崇, 王文立, 杨学昌, 等. 中性点接地方式的加权多指标区间数灰靶决策算法 [J]. 广西电力, 2007, 30 (6): 1-5.
- [11] 彭显刚, 聂一雄, 刘艺. 模糊模式识别在绝缘子串绝缘状态检测中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14): 71-75.
- [12] 符杨, 朱兰, 曹家麟. 基于模糊贴近度理论的负荷密度指标求取新方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 46-49.

(收稿日期: 2017-12-01) EA