

模糊推理在中性点接地方式选择中的应用研究

刘 艺¹, 聂一雄¹, 彭显刚¹, 陈云瑞², 苏志斌²

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 广东电网公司茂名供电局, 广东 茂名 525000)

摘要: 中性点接地方式选择是一个综合性的技术问题, 在对接地方式特性及其与电网的相互关系分析的基础上, 应用模糊推理原理, 通过合理选择接地方式决策模糊输入参数、建立模糊输入参数隶属度函数、构建输入和输出关系矩阵等过程, 采用定义的模糊逻辑运算规则将输入映射到输出, 实现了中性点接地方式定量优化抉择。实际算例验证了该方法的有效性和合理性。

关键词: 模糊推理; 中性点; 接地方式; 配电网

Application research on the mode selection of neutral grounding with fuzzy reasoning method

LIU Yi¹, NIE Yi-xiong¹, PENG Xian-gang¹, CHEN Yun-rui², SU Zhi-bin²

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Maoming Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Maoming 525000, China)

Abstract: The mode selection of distribution network neutral grounding is an integrated technique. Based on the detailed analysis of the characteristics of grounding modes and the relations between the grounding mode and the power grid, this paper proposes a fuzzy reasoning method to realize the mode optimal selection of neutral grounding. The decision processes include the selection of fuzzy input variables, the establishment of the fuzzy membership functions of the fuzzy input variables and the fuzzy logical relation matrix, and the definition of the fuzzy logical operation rules and the fuzzy logic decision method. The practical example proved the rationality and the effectiveness of the method.

This work is supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.8151009001000059) and key projects of Science Foundation of Guangdong Power Grid Co. China(No.S0701006).

Key words: fuzzy reasoning; neutral point; grounding modes; distribution network

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0032-05

0 引言

配电网中性点接地方式不仅是一个技术问题, 还是一个经济问题。从技术的角度而言, 它与整个电力系统的供电可靠性、人身安全、设备安全、绝缘水平、过电压、继电保护、资金投入、通信干扰(电磁环境)以及电网现状和接地装置等技术问题有密切的关系。农网中一般采用不接地方式, 在架空线和电缆线构成的混合网中, 可以采用电阻接地或者消弧线圈接地方式。目前电网还没有一种很好的决策算法能将接地方式的选择用数据表示出来^[1-5]。本课题研究探讨利用模糊推理理论, 通过合理选择模糊变量, 构建输入参数隶属度函数, 利用

基金项目: 广东省自然科学基金项目(8151009001000059); 广东电网公司科技攻关项目资助(S0701006)

输入和输出的关系矩阵, 尝试建立一种新的10 kV配电网中性点接地定量决策算法。

1 模糊推理方法实现中性点接地方式选择的分析

模糊逻辑方法具有多因素综合分析的特点, 因而适合于对受多种因素影响的具有不确定性结论的事物或现象作出总的评价。即对被评判事物或现象, 通过赋予每个影响它的因素一个评判指标, 再根据所给条件计算分析得出其总体的带一定倾向性的结论。

中性点接地方式的选择受多重因素, 如: 供电可靠性、过电压、绝缘配合、故障继电保护、经济性等的影响。在考虑接地方式时都是根据当地实际情况和接地方式的配合程度选择的, 并没有统一的标准。而选择接地方式时又是从多个因素考虑, 但

都很难给出一个具体定量标准, 评判参数都是带有极大模糊特征的量, 运用模糊逻辑方法对其进行分析是一种非常有效的手段。

模糊逻辑方法的应用, 包括模糊集合, 即模糊输出集、模糊关系集和模糊数据输入集等的建立; 模糊运算规则的确定, 即通过何种方法实现模糊量之间的运算、模糊判据的建立, 它包括输入数据的模糊化关系即模糊隶属度函数的建立、模糊输出量的判定等。模糊推理, 核心内容是将输入模糊量化建立隶属度函数, 根据输入和输出的关系建立模糊关系矩阵, 利用合理的隶属度函数和关系矩阵, 对各种接地方式给出一个综合评价。

模糊输出集是表征模糊诊断结果的一种表达方式, 它的元素个数和名称可根据实际问题的需要由人们主观决定。在本项目研究的模糊信号处理过程中, 针对所研究对象的特点, 我们将模糊输出集定义为配电系统中常用的三种中性点接地方式, 即: $Y = \{\text{经消弧线圈接地, 电阻接地, 中性点不接地}\}$ 。

本研究中, 模糊运算采用代数法运算规则, 模糊输出结果采用正指标输出形式, 即输出值越大, 表示对应的模糊输出方式越好。以下重点介绍模糊数据输入集和模糊关系矩阵的建立过程。

1.1 模糊输入参数选择

中性点接地在电网正常运行时对电网没有影响, 在线路故障时发挥其重要的作用, 直接影响供电可靠性、过电压水平、继电保护的動作、系统绝缘的配合及电磁兼容等。模糊输入参数的选择必须考虑诸多影响因素, 通过模糊化运算将这些因素量化, 再考虑各输入对输出的影响程度, 通过定义的逻辑运算, 得出对各接地方式选择的量化结果。

供电可靠性的衡量指标有: 平均故障率、平均修复时间、平均年停运时间等。中性点接地方式主要影响了线路故障跳闸率。不接地和消弧线圈接地方式由于故障接地电流小、电压仍然保持平衡, 故可以带故障运行一段时间, 故障可能在这段时间得以修复, 故障跳闸率低; 电阻接地故障相电流大, 电压不平衡, 故障后需立即跳闸, 所以, 电阻接地方式不适用于故障率高的线路。停电时间与线路结构和电网配置有关, 而线路结构和电网配置直接影响接地方式的选择。由于供电可靠性是电力系统的一个最重要的考核指标, 为较为全面地考虑其中性点接地方式选择中各因素的影响, 将单相故障率和停电修复时间分别作为模糊推理的输入参数。

三种接地方式故障的故障电流大小不一, 过电压水平不一。电阻接地方式可以将过电压控制在 1.8 倍相电压以下, 不接地方式过电压最高可达 3.5 倍

相电压, 消弧线圈接地方式最高为 3.2 倍相电压(若并联电阻, 最低可以控制在 1.9 倍相电压水平以下)。小电流接地方式可以带故障运行, 容易产生间歇性弧光过电压, 消弧线圈接地方式会产生铁磁谐振过电压, 对故障的消除和绝缘设备造成不利影响。若线路绝缘水平高, 电网配置高, 在一定程度上可以降低过电压带来的不利影响, 特别是随着微机选线装置和配电自动化的使用, 可以保证故障的可靠消除, 但增加了投资。综上所述, 过电压的大小直接影响到继电保护装置、系统的绝缘配合等多个与经济性密切相关参数的设计与选择, 因此, 从经济性的角度考虑, 将过电压作为模糊处理的输入的另一个参数。

架空线为主的电网电容电流不大于 10 A, 混合网中电容电流小于 30 A 时, 可以采用不接地方式; 当电容电流大于 150 A 时, 消弧线圈接地方式就很难适用了, 而要转用电阻接地方式。当电容电流介于 10 A 和 150 A 之间时, 根据实际情况选用电阻接地或者消弧线圈接地方式。由此可以看出, 电容电流是中性点接地方式选择的一个重要指标, 其必然是模糊运算的输入参数之一。

结合以上分析, 本文将模糊推理的输入参数确定为集合:

$$x = \{\text{单相故障率 } \eta, \text{ 停电修复时间 } \sigma, \text{ 电容电流 } I_c, \text{ 过电压 } U_p\} \quad (1)$$

1.2 输入参数模糊化处理

模糊决策的关键在于输入参数和模糊关系的确立, 它直接关系到模糊判断的正确与否。输入参数确定后, 其模糊化处理是实现模糊推理的一个关键, 通常处理手法是将实际参数通过数学变换的方法, 转换成在 $[0, 1]$ 区间的数作为模糊运算输入。本研究对输入参数的模糊化处理采用了如下方法:

1) 单相故障率 η 。线路单相故障率与线路参数有关, 近似于一个线性随机量。根据电网运行经验, 系统 60% 以上故障均是单相故障引起, 因此, 对该输入参数的处理思想是将单相故障率在区间 $[0.55, 0.95]$ 通过归一化处理将其变换到 $[0, 1]$ 论域, 作为模糊化输入参数参与模糊推理运算。其变换理论为:

设输入量为 \dot{x}_0 , 其变化范围为 $[\dot{x}_{\min}, \dot{x}_{\max}]$, 若要求的论域为 $[x_{\min}, x_{\max}]$, 采用线性变换, 则归一化模糊输入值 x_0 为:

$$x_0 = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} + k_1 \cdot (\dot{x}_0 - \frac{\dot{x}_{\min} + \dot{x}_{\max}}{2}) \quad (2)$$

其中: $k_1 = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\dot{x}_{\max} - \dot{x}_{\min}}$, k_1 称为比例因子。由式 (2) 即可获得故障率的模糊输入值。

2) 停电修复时间 σ 。停电修复时间的模糊化过程同样需要根据供电可靠率定义作归一化处理，将参数变换到[0, 1]论域。供电可靠率的定义为：

$$\delta = \frac{\text{总运行时间}T - \text{总停电时间}t}{\text{总运行时间}T}$$

根据文献[6]中 2007 年 10 kV 系统供电可靠性总结的统计数据：最低的供电可靠率为 99.845%，最高的可靠率为 99.988%。由于供电可靠率越高，技术难度越大，对设备等的要求也越高，故以区间 [99.845%, 99.988%] 为输入变量的参数区间，对该区间的归一化处理不宜用线性变换。研究中根据电网运行经验，采用指数函数实现归一化处理，给出供电不可靠率隶属度函数公式：

$$x_1 = e^{-\text{alg} \frac{1+k_2}{1-k_2}} \quad (3)$$

式中： k_2 为在 [0, 1] 区间的一个数，是通过供电

$$\begin{cases} I_{C1} = -5.9161 \times 10^{-7} I_C^2 + 1.1812 \times 10^{-5} I_C + 9.8350 \times 10^{-6} & 0 \leq I_C < 10 \text{ A} \\ I_{C2} = -2.7331 \times 10^{-7} I_C^3 + 6.3977 \times 10^{-5} I_C^2 + 4.2411 \times 10^{-3} I_C - 4.0185 \times 10^{-2} & 10 \leq I_C < 100 \text{ A} \\ I_{C3} = 1.3611 \times 10^{-6} I_C^3 - 5.4095 \times 10^{-4} I_C^2 + 7.3569 \times 10^{-2} I_C - 2.5547 & 100 \leq I_C < 170 \text{ A} \\ I_{C4} = 1 & I_C \geq 170 \text{ A} \end{cases} \quad (4)$$

4) 过电压 U_p 。在经济性的定义中有两个指标： $M=g+f$ 。其中： g 为维护运行成本； f 为投资成本。投资主要是继电保护和绝缘设计的投资，即和故障过电压有关。维护运行成本主要考虑停电损失，即和跳闸停电率有关。

停电损失受多重因素的影响，故障率，停电时间，停电单位电价，系统重要用户数等因素都与经济性成正比关系。我国电网经济性的公式为^[7]：

$$K(x) = \sum_{i=1}^m g_i \sum_{j=1}^h t_{ij} f(t_{ij}, j) p_j$$

式中： m 表示设备总数； h 为负荷总数； g 为设备年故障率； p_j 为负荷 j 的年故障率， t_{ij} 为设备 i 的故障造成的负荷 j 的停电时间； $f(t_{ij}, j)$ 为负荷对应于停电时间 t_{ij} 的单位负荷损失费用。可以看到，停电损失的计算是比较复杂的，因此，本研究在对经济性的模糊化处理中，主要以过电压为经济性的考虑因素。

由于过电压的大小具有区间分布特点的随机性，精确地按照其值大小划分一条曲线从实际而言没有太大的意义，因此，采取分段划分的方式较好。根据经验，将其分为 5 个区间，即经济性的模糊隶属

可靠率参数在区间 [0.99845, 0.99988] 的归一化线性变换转换得出； a 为常数，受线路结构、架空线/电缆的比例影响，计算时其取值范围可在 2~4 之间。

3) 电容电流 I_C 。如前所述，电容电流值的大小直接影响接地方式选择。当架空线电容电流在 10 A 以内，电缆线路电容电流在 30 A 以内通常采用不接地方式，超出以上范围选用消弧线圈或电阻接地，值越大越趋向于选择电阻接地方式。但根据经验，当电容电流大于 150 A 时，消弧线圈已经不能很好地发挥作用，推荐选用电阻接地方式，也有文献指出^[5]，在电缆线路电容电流在 200 A 以上时，必须要选用电阻接地。因此，在对电容电流的模糊化运算中，本研究采用了分区间模糊处理的方法，利用赋值法，通过 Matlab 的曲线拟合工具获得其模糊化方程如式 (4)。

度函数为离散型函数。

$$M = \begin{cases} 0.9 & V \leq 2.0V_p \\ 0.7 & 2.0V_p < V \leq 2.4V_p \\ 0.5 & 2.4V_p < V \leq 2.8V_p \\ 0.3 & 2.8V_p < V \leq 3.2V_p \\ 0.1 & V > 3.2V_p \end{cases} \quad (5)$$

式中： V_p 为额定相电压。若在电网规划设计当中可以预知过电压水平，可以用上面介绍的方式建立隶属度函数。对于投资和运行费用、停电损失费用则要根据当地实际情况计算，最后按照比例（一般为 6: 4）可得出经济性隶属度函数。这样得出的结果精确度更高，但在一般情况下，作为中性点接地方式决策的一个决策计算，用上面的方法在一定程度上已经可以反映出经济性的作用。

1.3 构建模糊关系矩阵

模糊关系集则是表征各模糊输入量的值对于不同输出结果的影响程度的一个集合，通常用 R 表示，它是一个 $m \times n$ 阶矩阵，其中： m 等于模糊输出集的元素个数， n 等于模糊输入集的元素个数。 R 中的各行反映了各种作用因素对该行输出结果的影响，即权重，因此，只要确定权重 R_i ，相应地就可以得到一个综合评估 Y_i 。而 R 中的各列则反映了各种作用因素在不同输出结果中所占的地位。通过建立一

个从模糊输入 X 到模糊输出 Y 的模糊变换 R , 即 $Y=R \cdot X$, 就可得出模糊推导关系式。虽然理论上, 模糊关系可通过 $R_f \in F(Y \times X)$ 诱导出, 实际中, 由于各参数对测量结果的影响程度不是很明确, 因此模糊关系矩阵的建立是在理论分析和实验经验的基础上, 用对实验结果分析的方法赋值求解并将其作归一化处理获得, 即满足 $\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1$ 条件, 本文所用方法亦不例外。

对不接地方式的选用影响最大的是电容电流值和过电压水平; 制约电阻接地方式选用的因素是供电可靠性, 其对电容电流值最不敏感; 消弧线圈在各方面表现都比较优秀, 但其带来的铁磁谐振过电压和弧光过电压会对系统的安稳运行带来影响, 同时, 消弧线圈接地方式绝缘要求高, 相应的经济投资大。

模糊关系矩阵的建立根据以上基本事实, 运用南方电网配电系统设计和运行中的大量经验数据, 在对这些数据进行模糊化处理, 得到输入和输出矩阵后, 运用最小二乘的方法获得^[8-9]。得出最后的关系矩阵:

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.05 & 0.45 & 0.40 \\ 0.05 & 0.25 & 0.35 & 0.35 \\ 0.60 & 0.25 & 0.05 & 0.10 \end{pmatrix} \quad (6)$$

(X, Y, R) 构成了一个模糊综合评估模型。

2 中性点接地方式决策算例

通过上述原则对各参数进行了模糊化处理并确定了各参数与输出结果之间的模糊关系之后, 模糊运算推理过程可表述为:

$$Y = R \cdot X \quad (7)$$

模糊运算的结果 Y 的值为一个介于 0 和 1 之间的模糊数, 它反映了配电网在各种不同中性点接地方式运行工况的有利程度。根据 Y 值的情况, 可在各种不同中性点接地方式的运行状况作一个概率性的综合评估, 从而为中性点接地方式的决策提供支持。本研究决策方案中, 当某种中性点接地方式的模糊输出值大于 0.5 时, 就认为该方式适合所对应参数的配电线路, 越大越好。表 1 是一些实际工程应用验证和计算机仿真研究算例, 其计算方法是: 利用前面的公式 (2) ~ (5), 对所给参数作模糊化处理之后得到模糊输入矩阵, 再利用公式 (7) 得出模糊输出矩阵的结果如表 1 所示。

表 1 中性点接地方式决策实际算例

Tab.1 Some practical examples of fuzzy decision method

单相故障率 /%	电容电流/A	供电可靠性 /%	故障过电压 倍数	电缆比例/%	模糊运算输出			模糊决策结 果	实际接线 方式
					消弧线圈	电阻接地	不接地		
65.0	75.0	99.952	2.4	30	0.564	0.553	0.358	消弧/电阻	消弧
85.0	8.6	99.926	3.3	0	0.208	0.206	0.541	不接地	不接地
60.0	165.0	99.976	1.9	95	0.830	0.837	0.365	消弧/电阻	电阻
83.8	44	99.940	3.1	15	0.330	0.361	0.608	不接地	不接地
94.4	42.5	99.883	3.5	15	0.253	0.214	0.661	不接地	仿真
61.2	131	99.979	1.9	90	0.806	0.846	0.449	消弧/电阻	电阻
58.7	106	99.978	2.1	80	0.690	0.747	0.385	消弧/电阻	电阻
62.5	175	99.942	1.8	100	0.752	0.809	0.390	消弧/电阻	电阻
69.1	100	99.891	2.4	80	0.664	0.583	0.377	消弧/电阻	消弧
58.4	163	99.889	2.3	95	0.711	0.710	0.243	消弧/电阻	消弧
62.1	167	99.849	2.2	95	0.740	0.698	0.226	消弧/电阻	仿真

通过对以上算例的模糊决策计算结果可以看出, 采用模糊推理的方法, 可以很好地将三种接地方式的应用场合界定开来: 对故障率不高的混合网, 电阻和消弧线圈接地方式都是可行的, 只是消弧线圈更佳, 而电阻方式的过电压倍数较低, 从经济性考虑稍好; 在对地电容电流较小的架空线或电缆比

例较低的线路而言, 不接地方式的综合性能稍优; 而电容电流较大的混合网或电缆线路, 则电阻接地方式取值上较优, 但电阻和消弧线圈接地方式均可取, 实际决策时应根据具体情况最终决定采取的接地方式。

3 结论

配电网中性点的三种接地方式在实际应用中都有其各自特点, 也有其各自的应用场合, 只是在不同的现场条件下有一个相对较好的选择。

本课题研究选择与中性点接地方式密切相关的供电可靠性、对地电容电流、故障过电压等参数作为模糊变量, 并分别建立了各参数的模糊隶属度函数及模糊关系矩阵, 明确指出利用模糊推导可实现对中性点接地方式决策提供定量分析; 并通过算例验证了模糊输入和模糊关系矩阵构建的合理性和有效性。模糊推理综合考虑了中性点接地方式自身运行特性和电网参数, 同时考虑了接地方式和电网之间相互的影响, 较好地解决了中性点决策多输入-多参数之间相互关联的问题, 为电网中性点接地方式的选择提供了一条有效的途径。

参考文献

- [1] 赵冉, 谭伟璞, 杨以涵. 配电网中性点接地方式分析[J]. 继电器, 2007, 35(4): 22-25.
ZHAO Ran, TAN Wei-pu, YANG Yi-han. Analysis of Neutral Grounding Operation Modes for Distribution Network[J]. Relay, 2007, 35(4): 22-25.
- [2] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-88.
LIU Ming-yan. Selection of Neutral Grounding Modes in Power Distribution Network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-88.
- [3] 陆国庆, 姜新宇, 等. 一种新型配电网中性点接地方式的研究与实践[J]. 电力设备, 2005, 6(4): 8-9.
LU Guo-qing, JIANG Xin-yu, et al. Study and Practice of a New Kind of Neutral Grounding Operation Mode for Distribution Network[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(4): 8-9.
- [4] 林志超. 中压电网系统中性点接地方式的选择与应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 60-61.
LIN Zhi-chao. The Selection and Application of Neutral Grounding method of MV Network[J]. High Voltage

- Engineering, 2004, 30(4): 60-61.
- [5] 要焕年, 曹梅月. 电缆网络中性点接地方式问题[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 84-89.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. On Neutral Grounding Modes of Cable Network[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 84-89.
- [6] 贾立雄, 胡小正. 2007年全国城市10 kV用户供电可靠性分析[J]. 电力设备, 2008, 9(10): 83-88.
JIA Li-xiong, HU Xiao-zheng. Analysis of Power Supply Reliability for 10 kV Users in Nation - Wide City in 2007[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(10): 83-88.
- [7] 刘立, 黄民翔. 配电网经济性和可靠性的综合评估[J]. 能源工程, 2007(3): 16-19.
LIU Li, HUANG Min-xiang. Integrated Economic and Reliability Evaluation of Distribution Network[J]. Energy Engineering, 2007(3): 16-19.
- [8] 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.
PENG Xian-gang, NIE Yi-xiong, LIU Yi. Application of Fuzzy Pattern Recognition in Insulation Detection of Insulator Strings [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 71-75.
- [9] 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.
FU Yang, ZHU Lan, CAO Jia-lin. A New Method to Obtain Load Density According to the Theory of Fuzzy Approach Degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 46-49.

收稿日期: 2009-09-09

作者简介:

刘艺(1964-), 女, 讲师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: liuyi@gdut.edu.cn

聂一雄(1964-), 男, 副教授, 研究方向为智能检测及仪表;

彭显刚(1964-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化。