

电力系统恢复过程中过电压校正控制序列的模糊多属性决策方法

张志毅¹, 赵秀英²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 420072; 2. 法库市农电局, 辽宁 法库 110400)

摘要: 针对电力系统故障恢复初期出现的持续工频过电压问题, 文章采用模糊多属性决策的方法, 以控制变量关于电压越限节点的电压控制灵敏度, 控制变量调节裕度大小及反应控制变量性质的优先级相对大小的模糊加权组合为模糊效用函数, 用模糊集排序方法对模糊效用函数进行比较, 得到控制变量的最佳排序。利用这种方法可以有效地减少对恢复过程中的过电压进行校正时的校正控制次数。

关键词: 模糊多属性决策; 电力系统恢复控制; 过电压

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)21-0033-04

0 引言

研究电力系统发生大面积的停电事故后, 如何进行快速而有序的恢复, 是目前国内外十分关注的电力系统热点研究课题之一。在系统恢复的第二个阶段, 即系统的重构阶段为了尽快给失压厂站送电并建立一个稳定的网架, 所有的子系统均会给尽可能多的线路充电, 由于这些空载或轻载线路充电电流的作用, 这时相当于在系统内突然注入了无功, 如果系统中没有足够的无功负荷使系统的无功功率达到平衡, 就会引起系统范围内的电压升高, 即持续工频过电压^[1,2]。本文对系统重构阶段出现的持续工频过电压的控制方法进行了研究, 采用模糊多属性决策的方法, 除了考虑各控制节点对越限节点的电压控制灵敏度和各控制节点的调节裕度外, 同时考虑了各个控制节点的优先级的不同。以控制变量关于电压越限节点的电压控制灵敏度, 控制变量的调节裕度及反应控制变量性质的优先级相对大小的模糊加权组合为模糊效用函数, 用模糊集排序方法对模糊效用函数进行比较, 得到控制变量或扰动变量的最佳排序, 可以有效地减少对恢复过程中的过电压进行校正时的校正控制次数。

1 系统重构阶段过电压校正时考虑的主要因素

1.1 过电压校正时考虑的主要因素

要对系统重构阶段出现的持续工频过电压进行校正, 本文考虑的主要因素为^[3,4]:

1) 控制变量关于电压越限节点的电压控制灵敏度。当某恢复状态存在过电压现象时, 可以采取

的校正措施包括: 调节某些发电机的端电压、变压器的分接头、投入并联电抗器、投入负荷等, 通过灵敏度计算可以导出电压越限节点对上述各控制变量的灵敏度, 再由灵敏度的大小确定对该过电压节点进行校正时的最有效的控制变量。

2) 控制变量或扰动变量的调节裕度。各控制变量的调节要受到设备本身和运行条件的限制, 包括: 变压器分接头位置的调整要受到调节范围的限制; 调节某控制变量时, 要确保该控制变量所在节点的电压不能越限。发电机吸收的无功不能超出发电机进相运行时所允许吸收的最大的无功功率。利用投负荷来进行电压校正时要考虑负荷节点的有功、无功负荷的最大可调节量的限制。

3) 各控制变量或扰动变量的优先级的相对大小。变压器的分接头档位、电抗器的投入组数都是离散变量, 在实际运行中都有 24 h 内动作次数的限制。发电机的端电压是连续变量, 可以连续平滑调节。系统恢复的最终目的是尽快的恢复负荷。因此在进行过电压校正时, 可以调节的各控制变量的优先级是不一样的, 一般应优先考虑投入负荷, 其次是调节发电机端电压, 然后才是调节变压器的分接头和投入电抗器。

1.2 定量、定性指标的处理

引入 L_R 型的梯形模糊数。L_R 型的梯形模糊数通常分别简记为 $\tilde{N} = (a, b, c, d)$ 和 $\tilde{N} = (m, n, ,)$, 其中 a, b, c, d 称为 \tilde{N} 的左、右扩散。当 $a = b = c = d = m = n$ 时, L_R 型的梯形模糊数退化为普通的实数, 即 $N = (m, m; 0, 0)$ 。因素 a, b 均是定量的精确的指标值, 是实数, 要表示成 L_R 型的梯形模糊数只要写成 $N = (m, m; 0, 0)$ 的格式即可。

因素 c 为说明各控制变量优先级的相对大小的定性指标。针对电力系统恢复的最终目的和电力设备的实际运行情况,可以确定控制变量的优先级为,负荷的优先级最高,其次是发电机,然后是变压器和电抗器。要将这些表示不同的优先级的定性指标用

L_R型的梯形模糊数表示出来,可以将 MacCrimmon 提出的两极比例法 (Bipolar Scaling)修正为 L_R型的梯形模糊数的两极比例法^[5,6](见图 1),即将定性指标转换为定量的 L_R型的梯形模糊数。

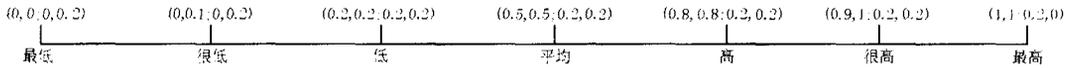


图 1 L_R型的梯形模糊数的两极比例法

Fig 1 Bipolar scaling of L_R trapezoid fuzzy number

1.3 权重分析

在模糊多属性决策中,权重信息没有数字概念,只是定性的认为某属性相对来说是“重要的”或“较重要的”或“不重要的”,所以在此用模糊数来表示各因素的权重信息。对模糊权值未知的决策情形,各个因素的权值通过模糊互逆矩阵导出,其计算方法如下:

1)形成模糊互逆矩阵;首先对 n 个指标两两比较得到模糊互逆矩阵,互逆矩阵的元素 $\tilde{w}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ 表示指标 i 对 j 指标的重要性,为一 L_R型的梯形模糊数,其中的 $b_{ij} = c_{ji}$ 且其值由 T.L. Saaty 提出的 1-9法则确定。指标 j 对指标 i 的重要性为: $\tilde{w}_{ji} = \tilde{w}_{ij}^{-1} = (\frac{1}{d_{ij}}, \frac{1}{c_{ij}}, \frac{1}{b_{ij}}, \frac{1}{a_{ij}})$ 。依次两两比较,判断 $n(n-1)/2$ 次后,得到模糊互逆矩阵 $W = (w_{ij})_{n \times n}$ 。

2) 定义 $a_i = [\prod_{j=1}^n a_{ij}]^{1/n}$, $a = \sum_{i=1}^n a_i$, $b_i = [\prod_{j=1}^n b_{ij}]^{1/n}$, $b = \sum_{i=1}^n b_i$, $c_i = [\prod_{j=1}^n c_{ij}]^{1/n}$, $c = \sum_{i=1}^n c_i$, $d_i = [\prod_{j=1}^n d_{ij}]^{1/n}$, $d = \sum_{i=1}^n d_i$ 。

则第 i 个指标的模糊权重 $\tilde{w}_i = (\frac{a_i}{d}, \frac{b_i}{c}, \frac{c_i}{b}, \frac{d_i}{a})$

按照上述的计算方法,可以确定三个因素的模糊权重矢量为: $\tilde{w} = \{\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3\} = \{(0.082, 0.1220, 0.1220, 0.1760), (0.5768, 0.6882, 0.6882, 0.7620), (0.1620, 0.2540, 0.2540, 0.2938)\}$

2 基于模糊多属性决策的过电压控制模型

设: $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 为电力系统节点集,系统故障后恢复的过程中某一个(或多个)节点的电压越限后,针对越限节点的电压恢复,存在一个控制节点的最佳调整序列。以电力系统控制节点集为目标集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$; 选取特征指标分别为:控制节点关于过电压节点的电压灵敏度,反映节点控制能

力的调节裕度,反映控制节点性质的优先级大小。由它们组成指标因素集为 $C = \{C_1, C_2, C_3\}$, 由此可得各目标对于各指标的属性值矩阵为: $X = (x_{ij})_{m \times 3}$ 。由于因素的指标值有各种类型,为了增加可比性并消除不同物理量纲对评估结果的影响,对矩阵 $(x_{ij})_{m \times 3}$ 做归一化处理,方法如下:

对于前两个因素,它们的指标值都为精确值,且为收益类指标,令归一化后的指标值 \tilde{r}_i 为: $\tilde{r}_i = \frac{x_{ij}}{x_{j \max}}$ 。写成 L_R型的梯形模糊数的形式 $(m, m; 0, 0)_{LR}$ 。

第三个因素为反映控制节点性质的优先级大小,为收益类指标且用梯形模糊数来表示。归一化后的指标值 \tilde{r}_i 为: $\tilde{r}_i = (\frac{a_i}{d_i}, \frac{b_i}{c_i}, \frac{c_i}{b_i}, \frac{d_i}{a_i}, 1)$ 。

采用适当的模糊合成算子 e 变换模糊权值矢量 \tilde{w}_i 和模糊属性值矩阵 R , 得到目标 A_i 的模糊效用函数 \tilde{D}_i , 本文选用模糊加权平均方法 (F_SAW) 中的 Bonissone 方法, 采用的模糊效用函数形式如下:

$$\tilde{D}_i = \sum_{j=1}^3 \tilde{w}_j \tilde{r}_{ij}$$

对得到的模糊效用函数值用适当的模糊集排序方法进行比较。本文采用 Lee-Li 方法, 设模糊集 \tilde{A}

$$\text{的均值记为 } m(\tilde{A}), m(\tilde{A}) = \frac{\int_{s(\tilde{A})} \mu_{\tilde{A}}(x) dx}{\int_{s(\tilde{A})} \mu_{\tilde{A}}(x) dx}$$

式子中 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 为模糊集 \tilde{A} 的隶属函数, 对于梯形模糊数 $\tilde{A} = (a, b, c, d)$, 上面的式子可以简化为

$$m(\tilde{A}) = \frac{1}{3} \frac{c^2 + d^2 + cd - a^2 - b^2 - ab}{b - a + d - c} \quad (1)$$

Lee-Li 方法的排序准则是: 均值越大, 则模糊集越大。

3 算例

以某 26 节点系统为例, 对其恢复初期的过电压进行分析和控制。假设恢复开始 30 min 后, 已恢复

系统的单线图如图 2 所示。

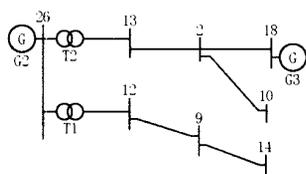


图 2 系统恢复 30 min 后的状态

Fig 2 Restored state of the test system after 30 minutes

由潮流计算结果 (见表 1) 可知,不采取校正措施时大部分节点的电压均已超出了允许范围,其中节点 14 的过电压最严重,此时选定控制变量为发电机 G_2 的电压,变压器 T_1 的变比以及节点 9 和 12 所带的负荷,节点 14 的电压对上述变量的灵敏度计算结果见表 2。对上述变量的调节裕度的计算结果也列入表 2 中。

表 1 节点电压数值

Tab 1 Bus voltage data

节点号 k	校正前电压模值 /pu
12	1.091 10
9	1.102 35
14	1.110 32
10	1.039 74
13	1.043 07
2	1.023 07

表 2 控制变量的灵敏度及调节裕度计算结果

Tab 2 Sensitivity and adjustment allowance of the control variables

控制变量 /pu	灵敏度 S_{19u}	调节裕度 K_{19u}
G_2	1.054 0	0.032 0
T_1 变比	1.116 0	0.026 0
P_{L9}	0.090 0	0.056 0
Q_{L9}	0.070 0	0.056 0
P_{L12}	0.085 0	0.063 0
Q_{L12}	0.062 0	0.063 0

按照前述的方法对控制变量的最佳调整序列进行排序,具体步骤如下:

(1) 写出各目标对于各指标的属性值矩阵 X , 如下所示。此处已将各控制变量的灵敏度 C_1 , 调节裕度 C_2 以及各控制变量的优先级 C_3 均写为 L_R 型的梯形模糊数的形式。

$X =$

$$\begin{bmatrix}
 (1.0540, 1.0540; 0, 0) & (0.0320, 0.0320; 0, 0) & (0.8, 0.8; 0.2, 0.2) \\
 (1.1160, 1.1160; 0, 0) & (0.0260, 0.0260; 0, 0) & (0.2, 0.2; 0.2, 0.2) \\
 (0.9000, 0.9000; 0, 0) & (0.0560, 0.0560; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0) \\
 (0.7000, 0.7000; 0, 0) & (0.0560, 0.0560; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0) \\
 (0.8550, 0.8550; 0, 0) & (0.0630, 0.0630; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0) \\
 (0.6200, 0.6200; 0, 0) & (0.0630, 0.0630; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0)
 \end{bmatrix}$$

(2) 对矩阵作归一化处理,得到归一化后的属

性值矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix}
 (0.9444, 0.9444; 0, 0) & (0.5079, 0.5079; 0, 0) & (0.8, 0.8; 0.2, 0.2) \\
 (1.0000, 1.0000; 0, 0) & (0.4127, 0.4127; 0, 0) & (0.2, 0.2; 0.2, 0.2) \\
 (0.8064, 0.8064; 0, 0) & (0.8889, 0.8889; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0) \\
 (0.6272, 0.6272; 0, 0) & (0.8889, 0.8889; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0) \\
 (0.7661, 0.7661; 0, 0) & (1.0000, 1.0000; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0) \\
 (0.5556, 0.5556; 0, 0) & (1.0000, 1.0000; 0, 0) & (1, 1; 0.2, 0)
 \end{bmatrix}$$

(3) 对归一化后的属性值矩阵 R 和各属性的模糊权值 \tilde{w}_i 用模糊加权平均方法 (F_SAW) 中的

Bonissone 方法,得到模糊效用函数 $\tilde{D}_i = \sum_{j=1}^3 \tilde{w}_j \tilde{r}_{ij}$ 的值如下:

$$\tilde{D}_1 = (0.6679, 0.6681; 0.2003, 0.1791)$$

$$\tilde{D}_2 = (0.4568, 0.4569; 0.1367, 0.1512)$$

$$\tilde{D}_3 = (0.9641, 0.9644; 0.2556, 0.1489)$$

$$\tilde{D}_4 = (0.9422, 0.9426; 0.2485, 0.1392)$$

$$\tilde{D}_5 = (1.0356, 1.0360; 0.2664, 0.1549)$$

$$\tilde{D}_6 = (1.0099, 1.0104; 0.2580, 0.1436)$$

(4) 对得到的模糊效用函数值用 Lee-Li 方法进行排序,用式 (1) 进行计算,求得的模糊数 \tilde{D}_i 的均值记为 $m(\tilde{D}_i)$ 分别为: $m(\tilde{D}_1) = 0.6616, m(\tilde{D}_2) = 0.4619, m(\tilde{D}_3) = 0.9301, m(\tilde{D}_4) = 0.9079, m(\tilde{D}_5) = 1.0005, m(\tilde{D}_6) = 0.9233$ 。

因此可以判断出几个控制节点的最佳调整序列为:节点 12 所带的负荷、节点 9 所带的负荷、发电机 G_2 的电压,变压器 T_1 的变比。

4 结束语

本文采用模糊多属性决策方法,对系统重构阶段出现的持续工频过电压进行校正,除了考虑各控制节点对超限节点的电压控制灵敏度和各控制节点的调节裕度外,同时考虑由于电力设备的实际运行情况和电力系统故障后系统恢复的最终目的而导致的各个控制节点的优先级的不同,可以在某些控制节点的电压控制灵敏度和调节裕度均相差不是很大时优先调节对系统的运行和恢复来说更合适的节点,更符合电力系统在恢复过程中系统的实际运行情况。把定性的指标进行模糊化处理,妥善解决了各种指标的合理表述问题。所得的结果具有综合性,不失为一种较好的处理系统重构阶段出现的持续工频过电压问题的有效方法。

参考文献:

- [1] Adibi M M, Alexander R W, Milanicz D P. Energizing High and Extra-high Voltage Lines During Restoration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1121-

- 1126
- [2] Adibi M M, Alexander R W, Avramovic B. Overvoltage Control During Restoration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4).
- [3] 李亚男,张粒子,杨以涵. 基于内点法的电压校正控制[J]. 电力系统自动化, 2002, 24(2): 28-31.
LI Ya-nan, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. Voltage Corrective Control Based on Interior Point Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 24(2): 28-31.
- [4] 程改红,徐政. 电力系统故障恢复过程中的过电压控制[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 29-34.
CHENG Gai-hong, XU Zheng. A Method to Control Sustained Overvoltage During Power System Restoration [J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 29-34.
- [5] 袁志坚,孙才新,李爱华,等. 模糊多属性决策方法评价变压器状态维修策略[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 33-35.
- YUAN Zhi-jian, SUN Cai-xin, LI Ai-hua. Assessment on Condition Based Maintenance Policy of Transformer Using Fuzzy Multiple Attribute Decision Making [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 33-35.
- [6] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LI Rong-jun. Theory and Application of Fuzzy Multi-standard Decision-making [M]. Beijing: Science Press, 2002.

收稿日期: 2006-04-17; 修回日期: 2006-06-16

作者简介:

张志毅(1972-),女,博士研究生,主要研究方向为智能优化方法及电力系统的恢复控制。E-mail: zhzy@163.com

Fuzzy multiple attribute decision making method on controlling the overvoltage during restoration

ZHANG Zhi-yi¹, ZHAO Xiu-ying²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Faku Rural Electric Power Bureau, Faku 110400, China)

Abstract: As to the overvoltage caused by the restoration of the unloaded or the lightly loaded transmission lines, the paper uses the method of fuzzy multiple attribute decision making, combines the voltage sensitivity of the control variable with relation to the node which voltage exceeds the limits, the adjustment allowance of the control variable which reflects the node control ability and the relative magnitude of the priority level of the control variable which reflects the character of the control node together as a fuzzy effective function, and employs the method for ranking fuzzy subsets to compare the values of the fuzzy effective function and got the optimal sequence of the control variables. The proposed method has good efficiency to reduce the correction times when to control the overvoltage at the early stage of the power system restoration.

Key words: fuzzy multiple attribute decision-making; power system restoration; overvoltage

许继直流电源产品中标广电集团批量招标项目

2006年10月11日,许继电源公司直流产品顺利中标2006年度广东电网公司220kV、110kV输变电工程设备材料框架协议式招标项目。此次中标是电源公司首次中标广电集团招标项目,充分展示了公司的技术实力和产品质量。

近年来,许继电源公司为保证产品质量,实时为客户提供“精品电源”,在研发、制造、物流、质量、工艺、财务、人力资源等方面不断引入先进的管理理念及管理工具,并在市场营销、科研开发、工程设计、产品制造、售后服务等环节实行了环环相扣、贯穿始终的质量控制体系。

许继电源公司将抓住此次中标的机遇,努力扩大直流电源产品在广东电网市场的影响力,并在今后取得更大的成绩。