

科研成果

文章编号: 1671-251X(2009)08-0001-05

# 基于模糊层次分析法的煤矿电网 电压态势预警研究\*

王玉梅, 赵铁英

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 煤矿供电系统电压水平直接影响到电动机的启动及正常运行, 但目前电网监控系统不能利用监测的实时电网结构参数和实时潮流分布数据对电网运行状态及电压水平进行预警研究, 从而不能消除电网运行中的安全隐患。文章利用电网监控系统实时潮流分布数据, 结合层次分析法和模糊理论, 通过选取电压态势预警评判指标构建了模糊综合评判矩阵, 评估当前电网电压水平, 分析电压发展趋势, 实现了煤矿电网电压运行态势预警, 完善和提高了电力监控系统的监控功能。

**关键词:** 煤矿电网; 电压态势预警; 层次分析法; 模糊理论; AHP

**中图分类号:** TD611      **文献标识码:** B

Research of Voltage State and Tendency Forewarning in Coal Mine Power Network  
Based on Fuzzy Theory and Analysis Hierarchy Process

WANG Yumei, ZHAO Tieying

(School of Electrical Engineering and Automation of Henan Polytechnic University,  
Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Voltage levels of coal mine power supply system have direct effects on motors' start-up and normal operation, but now monitoring and control system of coal mine power supply cannot give forewarning research of running status of coal mine power network and voltage levels using real-time parameters of power network structure and real-time power flow parameters, so it cannot eliminate potential safety problems in power network. Using real-time power flow parameters of monitoring and control system in power network, and combining with analysis hierarchy process (AHP) and fuzzy theory, the paper constructed fuzzy comprehensive evaluation matrix through selecting forewarning evaluation indexes of voltage state and tendency, evaluated current voltage level, analyzed voltage tendency, so as to achieve voltage state and tendency forewarning of coal mine power network, improve and enhance monitoring and control capabilities of coal mine power monitoring and control system.

**Key words:** coal mine power network, voltage state and tendency forewarning, analysis hierarchy process, fuzzy theory, AHP

## 0 引言

收稿日期: 2009-04-15

\* 科研项目: 河南省煤炭厅豫科鉴委字[2008]第622号

作者简介: 王玉梅(1969-), 女, 硕士, 副教授, 硕士研究生导师。毕业于中国矿业大学, 现在河南理工大学电气工程与自动化学院从事变电站综合自动化与电器智能化方面的教学与研究工作, 已发表文章多篇。E-mail: wangym@hpu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

煤矿电网的供电质量和可靠性直接影响到煤矿生产的各个环节。煤矿电网的负荷多为由电动机拖动的大型旋转机械, 电网电压水平直接影响到电动机的启动及正常运行。井下大型电动机的启动会引

起煤矿电网电压的波动,对电网的安全运行产生一定的冲击;而电压作为衡量电网供电质量的主要参数之一,其稳定性对煤矿电网和生产设备的安全运行有着重要的影响<sup>[1]</sup>。

煤矿供电网络已经实现了供电的电力远程监控,可以完成煤矿电网的遥测、遥信与远程调控功能,但是,监控系统只是显示出电网各点的电压、有功、无功的大小,虽然也可以显示出系统电压偏低,但是并不能对所显示的数据进行分析,无法准确确定电压偏低水平及该电压水平对电网运行产生的影响,从而不能准确评估电网的运行状态、预测电网可能发生的故障,因而不能及时调整电网结构与参数、预防重大事故的发生。

为了防止电压波动过大对煤矿电网的安全运行构成威胁,需要及时掌握电网当前的运行状态及电压发展趋势。本文选取煤矿电网电压作为衡量电网运行状态的主要技术参数之一,利用电网监控系统提供的实时电网结构参数和实时潮流分布数据,采用模糊理论和层次分析法(AAlytical Hierarchy Process, AHP)构建模糊综合评判矩阵,综合评估当前电压水平,分析电压发展趋势,实现煤矿电网电压态势预警。

## 1 模糊层次分析法简介

AHP 是美国运筹学家 T. L. Satty 于 20 世纪 70 年代提出的一种定性与定量相结合的决策分析方法,是一种将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化的过程,适用于定性与定量相结合的问题<sup>[2]</sup>。

应用 AHP 进行系统分析时,首先将问题层次化,按问题性质和总目标将问题分解成不同层次:最高层是目标层,中间层是准则层,最低层是方案层或措施层,从而构成一个多层次的分析结构模型,确定最低层(供决策的方案、措施等)相对于最高层(总目标)的相对重要性权值或相对优劣次序的排序问题。在 AHP 中,为了使定性的判断定量化,对任意 2 个方案在同一准则下进行相对优越性(或重要性)程度的定性比较,根据定性比较结果得到定量描述数值。在同一准则下,2 个方案进行比较判断出其中的优劣。AHP 采用 1~9 标度方法,对不同比较结果评比出具体的数量标度,建立比较判断矩阵,比较判断矩阵建立规则如表 1 所示。比较判断矩阵是根据资料数据、专家的意见和系统分析人员的经验经过反复研究后确定。

表 1 比较判断矩阵建立规则表

标度	2 个因素重要性对比
1	2 个因素具有同等重要性
3	一个比另一个稍微重要
5	一个比另一个明显重要
7	一个比另一个强烈重要
9	一个比另一个极端重要
2, 4, 6, 8	2 个因素的重要程度在以上几个标度之间

由于 AHP 中比较判断矩阵是人为确定的,带有一定的主观性,其数据的客观性较差。为提高判断的准确度,采用模糊理论<sup>[3]</sup>对比较判断矩阵进行修正。先由 AHP 获得单层比较判断矩阵,再由模糊算法得到一个从因素集到评价集的模糊关系矩阵  $R$ ,应用模糊合成算法对  $R$ 、AHP 建立的比较判断矩阵进行模糊合成,得到对目标的综合判断。

## 2 基于模糊 AHP 的煤矿电网电压态势预警

本文按照 AHP 要求,分析影响电压水平的主要因素,建立多层评估等级,确定各层比较判断矩阵,并由模糊理论建立各层针对目标层的隶属度矩阵,对 AHP 建立的比较判断矩阵进行修正,分析煤矿电网电压可能的发展态势,进行电压态势预警。

### 2.1 电压态势评估指标选取

煤矿电网供电电压水平受到多种因素的影响,评估指标的选择与求取对电压预警等级有重要的作用,应选取其中能够准确、灵敏反映电网电压运行状态的因素作为电压评估指标。本文在参考参考文献[4~6]和征求现场工作人员意见的基础上,选取 14 个指标作为电压态势预警评估指标,以此构建电压态势预警分析模型,如图 1 所示。



图 1 煤矿电网电压态势预警分析模型图

## 2.2 评语集的确定

分析煤矿电网实际运行中不同电压水平对电网运行的影响, 将电压态势等级分为 6 个不同的等级, 并采用不同的颜色表示电压态势等级的不同程度, 形象直观地反映出当前电压状态。煤矿电网电压态势等级可以表示为

$$\begin{aligned} V &= \{v_1, v_2, \dots, v_6\} \\ &= \{\text{黑, 红, 橙, 黄, 蓝, 绿}\} \\ &= \{6, 5, 4, 3, 2, 1\} \end{aligned} \quad (1)$$

电压的紧张程度由高到低为黑、红、橙、黄、蓝、绿, 每个颜色代表不同的电压水平, 如下所示:

黑色(6)表示系统功率严重不平衡, 电压严重偏低, 部分负荷无法正常运行, 如不采取措施, 电网在该电压状态下运行会导致大面积停电或大量负荷的切除;

红色(5)表示电压水平较低, 系统功率出现比较严重的不平衡, 一些大功率负荷无法正常启动, 需要切除较多负荷才可以使电压恢复正常;

橙色(4)表示系统电压偏低较多, 功率出现不平衡, 如果不采取必要的措施, 将导致电压继续偏低, 进而需要切除少量不重要负荷或进行系统无功补偿, 使系统恢复正常;

黄色(3)表示电压出现不太严重的问题, 电压稍微偏低, 只需要适当调控就可以使系统电压恢复正常, 否则系统电压会进一步降低, 运行状态会进一步恶化, 使得部分线路可能出线电压过低、设备无法正常运行的情况;

蓝色(2)表示系统电压正常但负荷水平较高, 电网中如发生小的负荷扰动会影响电压水平;

绿色(1)表示系统电压完全正常, 负荷水平较低, 功率余量较大, 电网可以在该状态下继续运行。

以上 6 种颜色代表当前电压状态, 同时向电网运行人员提出报警, 显示出如果不采取必要措施, 电网可能的发展趋势, 又可作为监控系统调整电网运行参数及结构的依据。

## 2.3 层次排序及一致性检验

单个因素对目标层的影响程度不同。首先对每层进行单层排序, 根据比较判断矩阵计算对于上层某元素而言, 本层次与之相关联的元素重要性次序的权值。利用同一层次中所有元素的层次单排序结果, 可以计算针对上一层次而言本层次所有元素重要性的权重, 即层次总排序。层次总排序需要从下至上逐层进行, 对于最高层, 层次单排序即为总排序, 最后还需对层次总排序进行一致性检验。一致

性指标包括一致性检验指标  $C. I.$ 、平均随机一致性指标  $R. I.$  和随机一致性比率  $C. R.$ 。

比较判断矩阵的一致性检验指标  $C. I.$  的计算公式为

$$C. I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为比较判断矩阵的最大特征值;  $n$  为比较判断矩阵的阶数。

多级矩阵的平均随机一致性指标  $R. I.$  与矩阵的阶数  $n$  有关, 其指标值如表 2 所示。

表 2 多级矩阵平均随机一致性指标表

阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8
$R. I.$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.45

随机一致性比率  $C. R.$  的计算公式为

$$C. R. = \frac{C. I.}{R. I.} \quad (3)$$

若  $C. I. < 0.1$  且  $C. R. < 0.1$ , 则比较判断矩阵具有满意的一致性指标, 否则需重新调整比较判断矩阵。

根据 AHP 的要求及分析步骤, 分析比较图 1 中第一层(要素层)中 3 个要素对目标层的不同影响程度, 根据表 1, 建立图 1 中要素层各指标要素重要性比较判断矩阵  $A$ , 根据  $A$  计算得到要素层指标权重  $W$ , 如表 3 所示。

表 3 要素层指标要素  $X_1, X_2, X_3$  权重  $W$  的计算表

$A$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$W$
$X_1$	1	1/3	1/2	0.16
$X_2$	3	1	2	0.39
$X_3$	2	1/2	1	0.30

采用和积法计算  $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ , 进行一致性检验。

(1) 对  $A$  的每一列进行归一化处理, 得归一化矩阵  $\bar{A}$  的元素:

$$\overline{a_{ij}} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

(2) 将  $\bar{A}$  中各元素按行相加, 得:

$$\overline{w_i} = \sum_{j=1}^n \overline{a_{ij}}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

(3) 将  $\overline{w_i}$  进行正规化处理:

$$w_i = \frac{\overline{w_i}}{\sum_{j=1}^n \overline{w_j}}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

得到  $W = [w_1, w_2, w_3]^T$ , 即为所求的特征向量。

(4) 计算  $\lambda_{\max}$ :

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n \frac{A W_j}{n W_j} \quad (7)$$

根据式(4)~式(7), 计算表 3 中比较判断矩阵  $A$  的最大特征值为

$$\lambda_{\max} = 3.0837$$

则:  $C. I. = 0.0418 < 0.1$ ,  $C. R. = 0.0721 < 0.1$ , 满足一致性检验要求。

第二层(指标层)比较判断矩阵的算法与第一层相同。指标层权重向量计算值如表 4 所示。

表 4 AHP 指标层权重向量计算值表

评估要素	相对权重计算 $W_i$ ( $i = 1, 2, 3$ )
$(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15})$	(0.2, 0.15, 0.25, 0.2, 0.2)
$(x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24})$	(0.3, 0.2, 0.16, 0.34)
$(x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}, x_{35})$	(0.2, 0.16, 0.16, 0.2, 0.28)

## 2.4 隶属度函数计算

在计算从因素集到评价集的模糊关系矩阵时, 对不同的评估指标采用不同的隶属度函数。对难以用数量定量表示的指标, 采用模糊统计专家评判的方法确定其隶属度函数。对于可以定量计算的评估指标, 根据模糊数学理论, 分别设置不同的隶属度函数, 先根据电网规划及其运行的实际情况确定该指标的最优和最差临界值  $p$  和  $q$ , 再在  $(p, q)$  内插入 4 个等距离的点  $c_1, c_2, c_3$  和  $c_4$ , 得出评估指标  $x_{ij}$  隶属于等级  $V_s$  的隶属度为

$$x_{ij}^{(1)} = \begin{cases} 1, & \lambda < p \\ (c_1 - \lambda)/r, & p \leq \lambda < c_1 \\ 0, & \lambda \geq c_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$x_{ij}^{(2)} = \begin{cases} 0, & \lambda < c_{i-2} \\ (\lambda - c_{i-2})/r, & c_{i-2} \leq \lambda < c_{i-1} \\ (c_i - \lambda)/r, & c_{i-1} \leq \lambda < c_i \\ 0, & \lambda \geq c_i \end{cases} \quad (9)$$

$$x_{ij}^{(3)} = \begin{cases} 0, & \lambda < c_4 \\ (\lambda - c_4)/r, & c_4 \leq \lambda < q \\ 1, & \lambda \geq q \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $r = (q - p)/5$ ;  $\lambda$  为指标  $x_{ij}$  的实际值;  $c_0 = p$ ;  $c_5 = q$ ,  $i = 2, 3, 4, 5$ 。

由煤矿电力监控系统提供的实时潮流分布数据如表 5 所示, 结合电网结构参数, 对图 1 中的 14 个电压态势预警评判指标进行计算。对于指标层中的各个因素, 根据电网的运行结构图和电网监控系统实时电网潮流数据, 计算电网  $N-1$  故障时实时潮流分布数据及可能的电压有功、无功变化量, 进行模

糊化处理, 不能定量计算的采用模糊统计和结合运行人员的经验判断其可能的估计值。负荷监测指标及电压监测指标值可以由电网监控系统提供, 通过查询电网监控系统的实时数据库、历史数据库可以得到各个因素的历史最大值及最小值, 和当前该值进行对比, 可以得到该值的指标值。如计算系统总体负荷水平  $x_{21}$ , 查询监控系统的历史数据库, 得到系统最小负荷值  $F_{\min}$ , 然后进行煤矿负荷统计计算, 取最大的负荷同时系数和负荷需用系统, 得到最大负荷值  $F_{\max}$ , 计算系统总体负荷水平  $x_{21}$  为

$$x_{21} = \frac{F}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (11)$$

其它指标值计算类同, 电压稳定裕度计算方法见参考文献[7], 得到评判指标值, 然后对指标值进行模糊化处理。

表 5 煤矿电力监控系统实时潮流分布数据表

支路名称	母线电压幅值 / kV	有功功率 / kW	无功功率 / kvar
湾子变(s)	6.3	12 856.81	12 528.46
排矸井 II 回(1)	5.52	5 110.6	4 880
排矸井 III 回(2)	5.75	3 763.8	3 477.7
地面西变 I(3)	5.61	2 026.8	1 608
地面西变 II(4)	5.74	3 170	3 847.2
二水平变 II(5)	5.33	1 722.2	1 406.1
二水平变 III(6)	5.61	745	435.5
井下中央变 I(7)	5.65	501.5	606.6
井下中央变 II(8)	5.74	1 817.6	2 239.6
800 m 上变(9)	5.58	86.2	60.72
暗斜井变(10)	5.56	775.1	566.5
21 机头变(11)	5.34	1 162.9	1 215.7
21 底部变 I(12)	5.28	984.8	1 064.3

由表 5 及式(8)~式(11)可计算指标层各指标值及其模糊隶属度评估矩阵, 如表 6 所示。

## 2.5 模糊综合评判

对指标层应用模糊合成算法进行模糊合成,  $B_i = W_i \cdot R$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 得到对目标层的二级判断矩阵:

$$B_1 = [0.0255 \ 0.2335 \ 0.4575 \ 0.1205 \\ 0.0970 \ 0.0660]$$

$$B_2 = [0 \ 0.2244 \ 0.2086 \ 0.3010 \\ 0.1060 \ 0.1600]$$

$$B_3 = [0.1300 \ 0.0700 \ 0.0848 \ 0.1808 \\ 0.2256 \ 0.3088]$$

对  $B_1, B_2, B_3$  进行归一化处理, 得  $B'_1, B'_2, B'_3$ , 构成一级评判矩阵  $R = [B'_1, B'_2, B'_3]$ ,  $B = W \cdot R$  得到

表6 指标层模糊隶属度评估矩阵表

指标因素集	指标值	模糊评判矩阵				
		0.750 0	0.030 0	0.220 0	0.750 0	0
$R_1$	0.516 0	0.130 0	0.230 0	0.360 0	0.160 0	0.080 0
	33.926 0	0	0.140 0	0.470 0	0.290 0	0.100 0
	-10.000 0	0	0.260 0	0.430 0	0.110 0	0.100 0
	-48.400 0	0	0.340 0	0.250 0	0.010 0	0.200 0
$R_2$	84.821 0	0	0	0.310 0	0.690 0	0
	3.170 0	0	0	0	0.470 0	0.530 0
	0	0	0	0	0	1.000 0
	0.224 0	0	0.660 0	0.340 0	0	0
$R_3$	0.186 0	0.650 0	0.350 0	0	0	0
	1.333 0	0	0	0	0.660 0	0.340 0
	1.183 0	0	0	0.530 0	0.470 0	0
	1.118 0	0	0	0	0	0.310 0
	0.258 0	0	0	0	0	0.390 0
						0.610 0

一级综合评判矩阵:

$$B = [0.043 1 \ 0.145 9 \ 0.180 0 \ 0.190 9 \\ 0.124 5 \ 0.165 6]$$

## 2.6 电压态势预警等级判断

$B$  为电压等级的判断向量, 但该向量中各分量大小差别不大, 不利于作出正确判断, 需要对  $B$  进行进一步分析计算。对  $B$  进行归一化得  $B'$ :

$$B' = [0.050 7 \ 0.171 6 \ 0.211 8 \ 0.224 6 \\ 0.146 5 \ 0.194 8]$$

采用加权平均法对  $B'$  进行分析计算, 得到准确的电压等级判断, 其加权算法为

$$b = \frac{\sum_{j=1}^m b_j v_j}{\sum_{j=1}^m b_j} \quad (12)$$

根据式(12)计算得  $b = 3.171 0$ , 它介于黄色(3)和橙色(4)之间, 接近黄色, 表明该煤矿电网供电电压水平稍微偏低, 电网若在该状态下运行, 在较小的负荷波动下, 电压水平会进一步下降而无法正常运行, 电网运行状态不好, 与煤矿电力监控系统显示的煤矿电网实际电压水平一致。通过进一步分析引起电压偏低的原因, 发现该电网的功率因数偏低。运行经验表明, 若采取适当调控, 如投切无功补偿装置或调整电网结构就可以使系统恢复正常, 健康运行; 否则电网运行状态很可能进一步恶化, 会引起事故发生, 严重影响煤矿的安全生产。

## 3 结语

煤矿电网电压态势预警对保证煤矿电网的安全运行具有重要作用。并下大型电动机对电压水平的

要求较高, 当煤矿电网供电电压水平偏低时, 一些大型电动机可能无法正常启动, 启动时会对电网造成冲击, 影响电压稳定, 引起电网事故发生, 因此, 有必要对煤矿电网的电压水平进行评估。本文利用煤矿电网监控系统实时潮流分布数据进行电压态势预警等级评判, 采用不同颜色表示电压的不同评估水平, 结果与实际电压水平相符, 说明煤矿电网电压态势预警有效可行。采用电网监控与电压态势预警对煤矿电网进行监控, 可提高煤矿电网的监控水平, 在电网现有运行状态下进行电网电压未来可能状态分析与预警, 在电网出现事故之前及时调整电网结构及线路负荷配置, 提高了煤矿电网供电的安全可靠性, 具有推广应用价值。

## 参考文献:

- [1] 邹有明, 王玉梅. 现代供电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 赵换臣. 层次分析法: 一种简易的新决策方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] 彭祖赠, 孙韫玉. 模糊数学及其应用 [M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [4] 栗秋华, 周林, 张凤, 等. 基于模糊理论和层次分析法的电力系统电压态势预警等级综合评估 [J]. 电网技术, 2008, 32(4): 40~45.
- [5] 唐会智, 彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究 [J]. 电网技术, 2003, 27(12): 85~88.
- [6] 刘宝柱, 朱涛, 于继来. 电力系统电压态势预警等级的多级模糊综合评判 [J]. 电网技术, 2005, 29(24): 31~36.
- [7] 傅旭, 付翀丽. 电力系统静态电压稳定裕度的快速算法 [J]. 研究与分析, 2008, 36(6): 34~38.