

文章编号:1671-251X(2015)02-0042-05      DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.02.012  
王清亮,姚苗.煤矿电能质量综合量化评价研究[J].工矿自动化,2015,41(2):42-46.

# 煤矿电能质量综合量化评价研究

王清亮, 姚苗

(西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**根据煤矿用电负荷的特殊要求,定义了以最大负荷电流为基准的电流总畸变率,以及考虑负荷电流波形非正弦性的畸变功率因数;从电压质量、电流质量和功率因数3个方面确定电能质量分项指标,采用最小均方差法对电能分项指标进行筛选,建立了适用于煤矿供电系统的电能质量综合评价指标体系。运用熵权法计算不同指标的相对重要性,通过概率统计与模糊数学相结合的方法构建电能质量综合量化评价模型,实现对煤矿电网电能质量的分项计算和综合评价。实测数据分析结果验证了所构建的煤矿电能质量综合评价指标体系的合理性和评价方法的实用性。

**关键词:**电能质量; 指标体系; 综合评价; 量化评价  
中图分类号:TD608      文献标志码:A      网络出版时间:2015-02-03 15:17  
网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150203.1517.012.html>

Research of comprehensive quantitative evaluation of power quality of coal mine

WANG Qingliang, YAO Miao

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The current harmonic distortion reflecting the maximum load current was defined, and a distortion power factor considering non-sinusoidal current waveform was built according to special requirements of coal mine electrical load. The power quality was represented by several indexes of voltage, current and power factor showing each aspects of electric energy. The minimum mean square error method was used to screen electricity sub-index, so as to establish comprehensive evaluation index system of power quality which was suitable for power supply system of coal mine. By calculating weights of each index using entropy weight method, the comprehensive quantitative evaluation model of power quality was proposed based on probability statistics and fuzzy mathematics. Therefore, sub-index calculation and comprehensive evaluation were achieved. The analyzing results of measured data verify rationality of the constructed comprehensive quantitative evaluation index system of power quality and practicability of the evaluation method.

**Key words:** power quality; index system; comprehensive evaluation; quantitative evaluation

## 0 引言

随着煤矿自动化程度不断提高,电力电子设备大量应用,使得煤矿电网发生波形畸变、电压波动、

闪变等电能质量问题,严重影响煤矿的安全生产和供电可靠性<sup>[1-3]</sup>。为了实现对煤矿电网运行水平的全面评价,找出干扰源,有针对性地进行改造,从而达到节能减排、安全生产和提高经济效益的目的,对

收稿日期:2014-07-14;修回日期:2014-12-10;责任编辑:胡娴。  
基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(2013JK1007)。  
作者简介:王清亮(1969—),女,山西运城人,副教授,博士,硕士研究生导师,主要从事工矿企业供电安全方面的教学与科研工作,E-mail: wangxjql@163.com。

煤矿电能质量进行综合量化评价研究尤为重要。

目前对电能质量综合评价的相关研究主要集中在公共大电网系统,而对煤矿电网的电能质量评价研究较少<sup>[4]</sup>。公共大电网与煤矿供电网两者差异较大:① 公共大电网远离负荷,其电能质量问题主要表现在频率偏差等引起的系统稳定性问题,而煤矿电网远离发电动机,频率是最有保障的,稳定性问题更不存在。② 电压质量反映了系统供给用户电能质量的好坏,因而公共电网电能质量评价侧重于谐波电压;电流质量反映了用户非线性负荷的电流畸变,因此,在煤矿供电网有必要将电流质量考虑在内。③ GB/T 15459《公用电网谐波》中规定谐波计算次数为2~19次,在煤矿供电网中由于12脉动整流器的广泛应用,产生了大量的23次以上谐波。

本文在分析煤矿电压质量、电流质量及功率因数的基础上,构建了针对煤矿的电能质量评价指标体系,采用概率统计与模糊数学相结合的方法对煤矿电网电能质量进行评价,并通过实例验证指标体系的合理性和评价方法的实用性。

## 1 评价指标的选取与设计

指标体系是煤矿电网电能质量评价的基础,在设计评价指标时应遵循以下原则:① 可操作性。指标数据获取要方便、可靠;② 针对性。指标选取要能直观反映被评价电网的性能和运行状况;③ 可比性。评价指标的设计要便于进行纵横向比较<sup>[5]</sup>。根据煤矿电网特点及指标选取原则,本文从电压、电流和功率因数3个方面对评价指标进行设计与选取。

### 1.1 电压指标设计

(1) 电压偏差。煤矿负荷集中在综采工作面上。随着采区开拓范围的扩大,供电距离不断延伸,线路电压损耗增大,导致电气设备运行效率下降,严重时使设备无法正常启动,甚至烧毁设备。因此,引入电压偏差<sup>[6]</sup>作为电压质量衡量指标之一:

$$\Delta U = \frac{U_{re} - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta U$ 为电压偏差; $U_{re}$ 、 $U_N$ 分别为电压实测值和系统额定电压值。

(2) 谐波电压。为提升机供电的晶闸管变流装置及主排水泵、通风机等设备中的变频装置导致煤矿电网谐波污染日益严重,功率损耗增加,保护装置误动率增加,为煤矿通风、排水系统的正常运行埋下隐患。因此,引入谐波电压作为电压质量衡量指标之一:

$$THD_U = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^M U_h^2 / U_1} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $THD_U$ 为电压总谐波畸变率; $M$ 为考虑的谐波最高次数,取 $M \leq 50$ ;  $U_h$ 为第 $h$ 次谐波电压值; $U_1$ 为基波电压值; $HRU_h$ 为 $h$ 次谐波电压含有率。

(3) 电压波动和闪变。煤矿带式输送机、提升机等频繁启、停的大功率设备会造成公共连接点处电压波动。电压波动会使电动机转速脉动,严重时可使某些敏感设备无法正常工作<sup>[7]</sup>。因此,引入电压闪变作为衡量电压波动危害程度的评价指标:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_{stj}^3} \quad (4)$$

式中: $P_{lt}$ 为波动负荷引起的长时间闪变值; $N$ 为长时间闪变值测量时间内包含的短时闪变值个数; $P_{stj}$ 为短时闪变值,依据 GB/T 12326《电压波动和闪变》的规定进行测量和计算。

(4) 电压不平衡度。井下架线机车、机修厂的电焊机等三相不对称负荷会造成电压三相不平衡。当系统处于三相不平衡运行时,其中的负序分量会引起电动机和变压器的振动、发热和附加损耗,缩短绝缘寿命,使变压器容量利用率下降。因此,需引入三相电压不平衡指标<sup>[8]</sup>:

$$\epsilon_u = \frac{U_3}{U_2} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\epsilon_u$ 为电压不平衡度; $U_2$ 、 $U_3$ 分别为正序电压和负序电压。

### 1.2 电流指标设计

煤矿中大量非线性设备产生的谐波电流会通过线路注入到系统中,引起系统电流畸变,设备损耗增加,补偿电容器过热,还会使局部发生并联谐振,严重影响煤矿电网安全运行。

(1) 电流总畸变率。公共电网电流畸变率计算以基波电流为基准,这种计算方法在煤矿电网使用时,会出现负载电流较小时电流总畸变率计算值偏大的情况,而此时系统受到的威胁并不大。对此,参考 IEEE Std519 的规定<sup>[9]</sup>,本文提出总需量畸变率TDD的概念,在计算电流总畸变率时将所采用的基波电流改为最大负荷电流。负荷电流的测量也比基波电流简便。总需量畸变率计算公式为

$$TDD = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^M I_h^2 / I_L} \right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: $I_h$ 为第 $h$ 次谐波电流值; $I_L$ 为用户最大负荷

电流。

(2) 5 次谐波电流。由于变频调速装置的大量应用,煤矿电网中 5 次谐波电流含量较高。5 次谐波电流属负序性质,可以在煤矿电网中流通,对电动机、变压器的运行造成不利影响。因此,引入 5 次谐波电流作为评价指标:

$$\text{HRI}_5 = \frac{I_5}{I_1} \times 100\%$$

(7)

式中: $\text{HRI}_5$  为 5 次谐波电流率; $I_5$  为 5 次谐波电流值; $I_1$  为基波电流值。

1.3 功率因数指标设计

公共电网中的功率因数普遍较高,在电能质量评价时未作为评价指标,而煤矿井下存在大量感性负荷,因而矿井供电线路功率因数普遍偏低。低功率因数造成线路电压损失加大和电能损耗增加,设备绝缘下降、老化,易发生漏电、短路等故障<sup>[3]</sup>。

煤矿中非线性负载使得电流波形发生畸变,因而在计算功率因数时,不能再假设电流为正弦波,需引入非正弦条件下功率因数的概念<sup>[7]</sup>:

$$\text{PF} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD}_I)^2}} \cos \varphi_1$$

(8)

式中:PF 为非正弦电路的功率因数; $\text{THD}_I$  为电流总谐波畸变率; $\cos \varphi_1$  为正弦电路的功率因数, $\varphi_1$  为正弦电压和电流间的夹角。

2 评价指标筛选与指标体系建立

2.1 指标筛选

本文采用最小均方差法对所设计的评价指标进

行筛选。最小均方差法思想:对于  $n$  个确定的被评价对象  $s_1, s_2, \dots, s_n$ , 每个被评价对象都可以用  $m$  个指标的观测值  $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$  来表示。如果  $n$  个被评价对象关于某项指标的取值接近,对于  $n$  个被评价对象的评价结果而言,为了减少计算量就可以删掉这个指标<sup>[5]</sup>。

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$$

(9)

式中: $s_j$  为评价指标  $x_j$  按  $n$  个被评价对象取值构成的样本均方差,其中,  $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。

若存在  $k(1 \leq k \leq m)$ , 使得  $s_k \approx 0$ , 则可以删掉与  $s_k$  对应的评价指标  $x_k$ 。

2.2 指标无量纲化处理

为了消除由于各指标量纲不同以及数值数量级间的差别所带来的影响,需进行指标无量纲化处理。对于越大越优的指标,按式(10)进行无量纲化处理:

$$v_{ij} = (x_{ij} - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min})$$

(10)

对于越小越优的指标,按式(11)进行无量纲化处理:

$$v_{ij} = (x_{j\max} - x_{ij}) / (x_{j\max} - x_{j\min})$$

(11)

2.3 评价指标体系建立

为构建煤矿电能质量综合评价指标体系,本文选取 4 个典型煤矿进行指标数据实测与处理。供电电压等级为 10 kV,数据测试点选取在变压器低压侧出线及重要的 10 kV 供电支路,实测指标值及处理结果见表 1。

表 1 煤矿电网电能质量指标计算

| 煤矿               | 电压质量指标     |                |                |                 |              | 电流质量指标 |                |      |                |      |                |        |                | 功率因<br>数 PF |
|------------------|------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|--------|----------------|------|----------------|------|----------------|--------|----------------|-------------|
|                  | $\Delta U$ | $\text{HRU}_5$ | $\text{THD}_U$ | $P_{\text{lt}}$ | $\epsilon_u$ | 变压器低压侧 |                | 提升回路 |                | 下井回路 |                | 风井回路   |                |             |
|                  |            |                |                |                 |              | TDD    | $\text{HRI}_5$ | TDD  | $\text{HRI}_5$ | TDD  | $\text{HRI}_5$ | TDD    | $\text{HRI}_5$ |             |
| A 煤矿             | 9.03       | 1.03           | 4.96           | 0.49            | 0.37         | 2.63   | 2.01           | 7.96 | 1.62           | 2.11 | 1.86           | 138.10 | 67.00          | 0.83        |
| B 煤矿             | 8.96       | 3.07           | 5.31           | 0.47            | 0.39         | 1.89   | 2.21           | 6.14 | 3.02           | 3.75 | 5.02           | 49.62  | 12.05          | 0.71        |
| C 煤矿             | 8.38       | 4.88           | 5.02           | 0.43            | 0.43         | 6.14   | 1.92           | 6.43 | 5.13           | 3.01 | 3.04           | 22.81  | 8.13           | 0.83        |
| D 煤矿             | 9.15       | 2.31           | 5.63           | 0.45            | 0.41         | 3.65   | 2.01           | 6.11 | 2.89           | 2.48 | 2.90           | 56.24  | 11.56          | 0.93        |
| $\overline{x}_j$ | 8.88       | 2.82           | 5.23           | 0.46            | 0.40         | 3.65   | 2.01           | 6.66 | 3.16           | 2.84 | 3.21           | 66.69  | 24.69          | 0.84        |
| $s_j$            | 0.30       | 1.39           | 0.27           | 0.02            | 0.02         | 1.61   | 0.19           | 0.76 | 1.26           | 0.62 | 1.14           | 43.09  | 0.46           | 0.12        |

从表 1 可以看出: $s_4, s_5$  接近 0, 因此,可删除电压闪变和三相电压不平衡指标。通过指标实测处理,所建立的煤矿电能质量综合评价指标体系及对应的评价能力见表 2,共 3 类 12 个指标。

根据国标规定并结合煤矿生产特点,将煤矿电能质量各单项指标划分成 5 个等级,其中 1—3 级均为合格电能,4—5 级为不合格电能,具体划分范围见表 3。

表 2 煤矿电网电能质量评价指标体系

| 一级指标 | 二级指标           | 指标含义                               |
|------|----------------|------------------------------------|
| 电压质量 | 电压偏差           | 实际电压与系统的额定电压之差对系统额定电压有效值的百分数       |
|      | 5 次谐波电压        | 5 次电压谐波分量有效值与基波分量有效值的百分比           |
|      | 电压总畸变率         | 各次电压谐波有效值的均方根值与其基波电压有效值的百分比        |
| 电流质量 | 变压器低压侧总需量畸变率   | PCC 点各次电流谐波有效值的均方根值与额定负荷电流有效值的百分比  |
|      | 变压器低压侧 5 次谐波电流 | PCC 点 5 次电流谐波值与基波电流有效值的百分比         |
|      | 提升回路总需量畸变率     | 原煤提升回路各次电流谐波有效值的均方根值与额定负荷电流有效值的百分比 |
|      | 提升回路 5 次谐波电流   | 原煤提升回路 5 次电流谐波值与基波电流有效值的百分比        |
|      | 下井回路总需量畸变率     | 下井回路各次电流谐波有效值的均方根值与额定负荷电流有效值的百分比   |
|      | 下井回路 5 次谐波电流   | 下井回路 5 次电流谐波分量有效值与基波电流有效值的百分比      |
|      | 通风回路总需量畸变率     | 通风回路各次电流谐波有效值的均方根值与额定负荷电流有效值的百分比   |
|      | 通风回路 5 次谐波电流   | 通风回路 5 次电流谐波分量有效值与基波电流分量有效值的百分比    |
| 功率因数 | 总功率因数          | 非正弦交流输入有功功率与输入视在功率的比值              |

表 3 电能质量指标等级划分

| 指标             | 合格       |            |            | 不合格        |                |
|----------------|----------|------------|------------|------------|----------------|
|                | 1 级      | 2 级        | 3 级        | 4 级        | 5 级            |
| $\Delta U$     | (0,2)    | (2,4.5)    | (4.5,7)    | (7,8.5)    | (8.5,+\infty)  |
| $\text{HRU}_5$ | (0,1.2)  | (1.2,2.2)  | (2.2,3.2)  | (3.2,4.2)  | (4.2,+\infty)  |
| $\text{THD}_U$ | (0,2)    | (2,3)      | (3,4)      | (4,5)      | (5,+\infty)    |
| TDD            | (0,4)    | (4,8)      | (8,12)     | (12,16)    | (16,+\infty)   |
| $\text{HRI}_5$ | (0,3)    | (3,6.5)    | (6.5,10)   | (10,13.5)  | (13.5,+\infty) |
| PF             | (0.95,1) | (0.9,0.95) | (0.85,0.9) | (0.7,0.85) | (0.7,0)        |

3 电能质量综合量化评价

对煤矿电能质量进行综合评价可以反映出煤矿电网整体运行水平,便于定量考核和横向比较。

3.1 综合评价步骤

电能质量综合评价步骤:① 建立电能质量综合评价指标体系;② 指标无量纲化处理;③ 确定各指标权重值;④ 选择适当的综合评价模型,计算评价对象的电能质量综合评价值或综合评价等级。

3.2 权重确定

权重反映了评价指标的相对重要性。熵权法是利用各指标熵值所提供的信息量的大小来决定权重的客观赋权法<sup>[5]</sup>。其具体步骤:

(1) 形成决策矩阵  $F$ :

$$F = (v_{ij})_{n \times m}$$

(12)

(2) 计算第  $j$  项指标的熵值:

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

(13)

式中:  $p_{ij} = v_{ij} / \sum_{i=1}^n v_{ij}$

(3) 确定各指标熵权:

$$w_j = (1 - H_j) / (m - \sum_{j=1}^m H_j)$$

(14)

$W = [w_1, w_2, \cdots, w_m]$ , 就是各指标的权重向量。

3.3 综合评价

概率统计法可以抓住电能质量分项指标的主要特征,而模糊综合评判法可以体现不同用户对电能质量各项指标的不同要求。本文选用概率统计与模糊数学相结合的方法,对煤矿电网电能质量进行评价。其具体步骤:

(1) 将各指标划分为  $q$  个等级。

(2) 求各指标处于第  $k$  级的概率分布:

$$p_{jk} = \frac{t_{jk}}{T}$$

(15)

式中:  $p_{jk}$  为第  $j$  个指标在第  $k$  级的概率分布值;  $t_{jk}$  为第  $j$  个指标在第  $k$  级的时间;  $T$  为评价时间,一般取 24 h,即  $T = 1\,440\text{ min}$ 。

(3) 用各指标在各级的概率分布形成矩阵:

$$P = (p_{jk}) \quad (j = 1, 2, \cdots, m; k = 1, 2, \cdots, q)$$

(16)

(4) 评价结果为

$$S = W \times P$$

(17)

(5) 对  $S$  应用加权平均法求取综合评价结果:

$$Y = \sum_{k=1}^m kS_k / \sum_{k=1}^m S_k \tag{18}$$

式中:  $S_k$  为矩阵  $S$  中的第  $k$  个元素。

4 应用实例

以第 3 节中的 A 煤矿为例进行电能质量综合评价。根据式(15)、式(16)形成概率分布矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.67 & 0.25 & 0.6 & 0.01 \\ 0.94 & 0.06 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 & 0.48 & 0.46 \\ 0.82 & 0.12 & 0.06 & 0 & 0 \\ 0.87 & 0.08 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0.58 & 0.12 & 0.07 & 0 \\ 0.96 & 0.03 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0.58 & 0.39 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0.83 & 0.13 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.04 & 0.84 & 0.11 & 0.01 \end{bmatrix}$$

由式(12)一式(14)得到各指标权重:

$$W = [0.145\ 1, 0.081\ 5, 0.081, 0.075\ 7, 0.074\ 1, 0.071, 0.076\ 9, 0.081\ 9, 0.075\ 7, 0.072\ 9, 0.070\ 3, 0.093\ 8]$$

由式(17)得评价结果矩阵:

$$S = [0.418, 0.122, 0.142\ 9, 0.141\ 2, 0.182\ 8]$$

根据式(18)对评判结果进行加权平均处理,得到 A 煤矿电能质量综合评价结果为  $Y = 2.57$ 。同理,得出其余 3 个煤矿的电能质量综合评价结果,见表 4。

表 4 电能质量综合评价结果

| 煤矿   | 分项水平 |      |      | 量化结果 | 综合等级 |
|------|------|------|------|------|------|
|      | 电压质量 | 电流质量 | 功率因数 |      |      |
| A 煤矿 | 3.06 | 2.37 | 3.09 | 2.57 | 2 级  |
| B 煤矿 | 3.42 | 2.38 | 3.80 | 2.78 | 3 级  |
| C 煤矿 | 4.47 | 2.30 | 3.29 | 3.02 | 3 级  |
| D 煤矿 | 2.47 | 2.01 | 2.12 | 1.98 | 1 级  |

由表 4 可知,4 个煤矿电能质量水平的排列顺序为  $D > A > B > C$ 。A 煤矿电能质量整体水平良好,但电压水平需要进一步提高。B 煤矿电能质量

较差,功率因数和电压水平偏低,而电流水平良好,系统的无功功率不足,需投入无功补偿装置以提高功率因数,改善电压质量。C 煤矿电能质量水平与 B 煤矿相当,谐波污染严重导致电压质量在 4 个煤矿中最差,功率因数较低,需要安装滤波装置消除谐波。D 煤矿整体电能质量水平最好,分项指标良好,无需进行治理。

5 结语

在定义基于最大负荷电流的电流畸变率和考虑非正弦性影响的畸变功率因数的基础上,构建了适用于煤矿电网电能质量考核和评价的指标体系,并采用概率统计与模糊数学相结合的方法对电能质量进行综合量化评价。本文建立的考核指标体系既不与国标相冲突,又满足了煤矿电网的特殊需求,对于定量考核煤矿供电的可靠性和安全性具有一定的参考价值。管理部门可根据综合评价结果进行奖罚,技术部门可根据分项指标水平有针对性地确定治理措施。该评价体系既可用于评价运行中的煤矿电网,也可用于评价规划中的煤矿电网,但评价运行中的煤矿电网时要采用实际运行时的数据,而评价规划中的煤矿电网时应采用理论计算数据。

参考文献:

[1] 张世洪. 我国综采采煤机技术的创新研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1898-1901.

[2] 吉丽萍. 受电铁影响的煤矿电网电能质量问题研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 80-82.

[3] 任子晖, 什华科, 李伟烁, 等. 基于全相位傅里叶变换的煤矿电网电能质量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 103-106.

[4] 张学松. 煤矿电能质量分析与控制[J]. 工矿自动化, 2009, 35(9): 68-70.

[5] 何永秀. 电力综合评价方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[6] GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差[S].

[7] GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动和闪变[S].

[8] GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡[S].

[9] IEEE 519—1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems[S].