

文章编号: 1000-8152(2008)02-0307-04

风电场电能质量分析与评估

马艺玮¹, 陈渊睿², 曾 君²

(1. 广东明阳风电技术有限公司, 广东 中山 528437; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 在电能质量各分项指标的基础上, 针对风电场的实际情况, 引入了功率波动作为附加的电能质量指标. 运用层次分析法(AHP)求取各项指标加权向量, 提出采用概率统计与模糊数学结合的分析方法对电能质量进行综合评估, 并用实测数据验证了该方法的可行性.

关键词: 电能质量; 功率波动; 风电场; AHP; 综合评估

Analysis and evaluation on the electric power quality of wind farm

MA Yi-wei¹, CHEN Yuan-rui², ZENG Jun²

(1. Guangdong Mingyang Wind Power Technology Co., Zhongshan Guangdong 528437, China;
2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Based on indices of electric power quality, we consider power fluctuation an additive index of electric power quality for a wind farm in real conditions. We adopt analytic hierarchy process(AHP) to obtain weighted vector for every index, and introduce a synthetic evaluation which combines probability and statistics with fuzzy mathematics to evaluate the electric power quality. Finally we validate the feasibility by measured data of this method.

Key words: electric power quality; power fluctuation; wind farm; analytic hierarchy process(AHP); synthetic evaluation

1 引言(Introduction)

发展风电已成为开发利用绿色能源的重要方向, 随着风电产业的大力发展, 风电场装机容量以及在电网中所占的比例急剧增加. 风电场在向电网提供清洁能源的同时, 也给电网的运行带来一些负面影响, 诸如电网的调度和运行方式、频率控制、电压调整、电能质量和稳定性等, 这些都将成为风电并网的制约因素. 此外风力发电具有间歇性和波动性的特点, 风电并网会降低电网负荷预测的精度, 造成电网稳定性和可靠性降低, 并使运行成本增加.

为更方便的解决上述问题, 本文提出了一种基于概率统计与模糊数学结合的分析方法对风电场电能质量进行综合评估, 使风电场电能质量有一个明确的评估标准, 为改进和提高电能质量提供了一个可行性方法.

2 风电场电能质量指标(Power quality index of wind farm)

根据GB/T12325-90, GB12326-2000, GB/T14549-93, GB/T15543-1995, GB/T15544-1995中电能质量

标准以及结合风电场实况, 风电场电能质量指标主要有: 频率偏差、波动、闪变、谐波、电压偏差、三相不平衡、电压暂降. 由于风速的随机性和风机本身控制系统的不完善导致风机输出功率不稳定, 风机的功率波动和变化率过大时, 对电网造成冲击, 导致电网调度设备频繁动作, 对电网的稳定性和安全性造成不良影响, 本文将功率波动作为一附加风电场电能质量的指标, 评价风电场功率输出状况.

3 风电场电能质量的分析评估方法(Analysis and evaluation methods on power quality of wind farm)

3.1 评估方法的比较(Comparison among evaluation methods)

目前常用的电能质量分析评估方法主要有概率论与数理统计的方法和基于模糊数学的评判方法^[1,2], 前者采用概率统计特征值的描述矢量代数的方法, 可抓住电能质量各指标的主要特征, 并有效的将不同的分项指标归一量化. 但此方法严格的数学计算过程将描述各指标的模糊性具体量化了. 后者

虽然避免了这样的缺点,但在实际处理过程中,模糊数学方法很多关键的步骤很大程度上受主观因素的影响,影响评估结果的客观性和准确性.这两种方法都不能客观准确的反映风电场电能的质量,因此本文吸收二者的优点,采用概率统计与模糊数学相结合的方法对风电场电能质量进行分析与评估.

3.2 基于概率统计与模糊数学相结合方法的风电场电能质量的评估(Wind farm power quality evaluation method based on the combination of probability statistics and fuzzy math)

对电能质量中的8个主要指标在国标规定的合格范围内平均分为10级(功率波动分为12级),如表1所示.

表1 等级对应表
Table 1 Classification list

等级	优良程度
1,2	特质
3,4	优质
5,6	良好
7,8	中等
9,10	合格

超过10级的随着质量的降低,可依次称为较低、低质、较差、劣质、极劣.这是一个从定量到定性的过程,依照模糊数学的观点,就是一个模糊化的过程.同样,在后面的电能指标权重选择中,也引入了“重要程度”这一模糊概念.运用概率统计方法对各指标分级进行评估分析,得到各指标各级的概率分布 P ,将各指标的第 k 级概率分布 P_k 按顺序排

列成矩阵 $R_{8 \times m}$ (8指8个电能质量的指标, m 指各项指标都分为 m 级),将 R 与权重矢量相乘得到各级电能质量的评估结果矩阵 V ,最后对矩阵 V 应用加权平均法处理得到一个数据 V' .

本方法的数学关系式如下:

- 1) 定义评估时间: $T = t$ (t 为评估时间段);
- 2) 将各项指标在国标规定的合格范围内分为 m 级,各级跨度为: $\Delta q = x/m$ (m 为所分等级个数, $m \leq 10$, 且为整数; x 为国标对该项指标的限值);第 k 级的范围: $\Delta q \in [\frac{x}{m}k - \frac{x}{m}, \frac{x}{m}k]$.
- 3) 根据各项指标的实测数据求取其绝对值在第 i 级的时间: $\tau(k) = \sum t_i$;

其中 t_i 为各项指标绝对值在第 k 级的第 i 个时间段的时间, n 为各项指标绝对值在第 k 级的时间段个数;

- 4) 求取各项指标处于第 k 级的概率分布: $P_K = \tau(k)/T$;

- 5) 各指标在各等级的概率分布按等级顺序形成 $1 \times m$ 矩阵: $R' = [p_1, p_2, \dots, p_m]$;

- 6) 将8个指标的概率分布矩阵排列为 $8 \times m$ 矩阵 R : $R = [R_P, R_B, R_S, R_X, R_V, R_T, R_Z, R_G]$;

- 7) 给 R 各项指标乘以对应权重: $V = W \times R$, $W = [W_P, W_B, W_S, W_X, W_V, W_T, W_Z, W_G]$, 其中 W 表示8项指标的权重集;

- 8) 对 V 应用加权平均法求取评估结果: $V' = \sum kV_k / \sum V_k$.

V' 即为电能质量的唯一量化评估结果.

由上述的数学关系式,根据2006年某风电场某时间段的实测数据,可求得各项指标各个等级的评估结果如表2所示,从而可得到各个指标对应的矩阵.

表2 电能指标评估等级结果

Table 2 Evaluation result of electric power quality index

概率	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
频率偏差	0.254	0.301	0.302	0.107	0.034	0.003	0	0	0	0	0	0
波动	0	0.309	0.302	0.19	0.102	0.063	0.022	0.012	0	0	0	0
闪变	0	0	0.1	0.258	0.205	0.117	0.085	0.073	0.086	0.073	0	0
谐波	0	0	0	0.212	0.788	0	0	0	0	0	0	0
电压偏差	0	0	0.002	0.007	0.229	0.576	0.116	0	0	0	0	0
不平衡	0	0.338	0.662	0	0	0	0	0	0	0	0	0
电压暂降	0.288	0	0	0	0.192	0	0.069	0.055	0.274	0.123	0	0
功率波动	0.954	0.015	0.008	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001

3.3 指标权重的确定(Index weight determination)

3.3.1 确定指标权重的基本原理(Basic principles of determining index weight)

用AHP法^[3,4]求电能质量的权重集.

步骤1 两两比较电能质量分项指标的重要程度,按表3确定相互的比例标度 α_{ij} ;

步骤2 对 n 个分项指标来说,可得两两判断矩阵 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$,此矩阵为正反矩阵;

步骤 3 求 A 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量 W , 并对 W 进行标准化(归一化)处理;

步骤 4 依照“一致性指标” CI 进行一致性检验. 如果得到了比较满意的一致性, 则结束求取程序, 输出计算结果; 如果不能达到一致性要求, 则修改正反矩阵.

计算得其最大特征根 $\lambda_{\max} = 8.08$, 对应的特征向量(加权向量) $W = (0.6776, 0.4167, 0.4167, 0.2352, 0.2352, 0.2352, 0.1389, 0.0916)$.

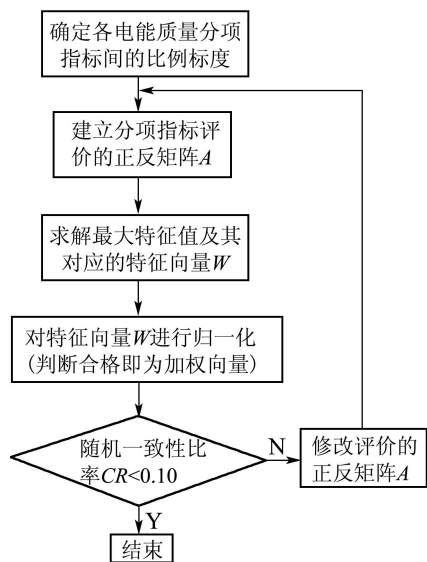


图 1 AHP流程图
Fig. 1 Flow chart of AHP

求取权重集的流程图如图1所示. 综合专家意见, 并参照表3, 可得到频率偏差、电压波动与闪

变、谐波、电压偏差、三相不平衡、电压暂降、功率波动的判断矩阵 A :

$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 4 & 5 \\ 0.5 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 4 \\ 0.5 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 4 \\ 0.333 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 0.333 & 0.5 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 0.333 & 0.5 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 0.25 & 0.333 & 0.333 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 & 2 \\ 0.2 & 0.25 & 0.25 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$.

3.3.2 一致性检验(Consistency test)

要验证通过AHP法求出的权重值是否合理, 必须进行一致性检验, 方法为

- 1) 计算“一致性指标” CI (consistency index). $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, 其中 n 为判别矩阵的阶数;
- 2) 计算“随机一致性比率” CR (consistency ratio). $CR = \frac{CI}{RI}$, 其中 RI 为判断矩阵的“随机一致性指标(random index)”. 当 $CR < 0.10$ 时, 可以认为判别矩阵具有满意的一致性. 对于1~9阶判断矩阵, RI 的取值见表4.

通过计算, 电能质量判断矩阵 A 的随机一致性比率 $CR = 0.0081 < 0.10$, 所以前面所得的判断矩阵 A 具有满意的一致性. 因此, 可以确定 W 能够作为评价电能质量的加权向量.

表 3 比例标度及含义
Table 3 Scale and its signification

标度值	含义
1	两个元素相比具有同等重要性
3	两个元素相比, 一个元素比另一个元素稍重要
5	两个元素相比, 一个元素比另一个元素明显重要
7	两个元素相比, 一个元素比另一个元素强烈重要
9	两个元素相比, 一个元素比另一个元素极端重要
2,4,6,8	如果成对事物的差别介于两者之间, 可取上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 i 与元素 j 重要性之比为 α_{ij} , 那么元素 j 与元素 i 重要性之比则为 $\alpha_{ji} = 1/\alpha_{ij}$

表 4 RI值表
Table 4 RI value

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.94	1.12	1.24	1.32	1.41

3.4 风电场电能质量的综合评估(Wind farm power quality synthetic evaluation)

将前面分析的电能质量指标的矩阵排列组成一个大矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.309 & 0.302 & 0.19 & 0.102 & 0.063 & 0.022 & 0.012 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.258 & 0.205 & 0.117 & 0.085 & 0.073 & 0.086 & 0.073 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.212 & 0.788 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.002 & 0.007 & 0.229 & 0.576 & 0.116 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.338 & 0.662 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.288 & 0 & 0 & 0 & 0.192 & 0 & 0.069 & 0.055 & 0.274 & 0.123 & 0 & 0 \\ 0.954 & 0.015 & 0.008 & 0.005 & 0.004 & 0.003 & 0.003 & 0.002 & 0.002 & 0.002 & 0.001 & 0.001 \end{bmatrix}.$$

R 与权重矢量 W 相乘, 即 $V = WR$, 则 $V = [0.1395 \ 0.3036 \ 0.4291 \ 0.2136 \ 0.3207 \ 0.1128 \ 0.0317 \ 0.0161 \ 0.0231 \ 0.0217 \ 0.0001 \ 0.0001]$ 将数据用柱状图表示, 如图2所示。

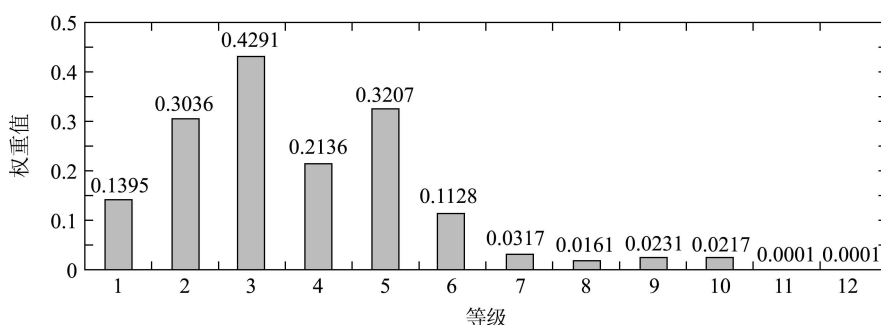


图2 电能质量各级评估结果柱状图

Fig.2 Histogram of electric power quality evaluation result

对 V 进行加权平均处理, 则 $V' = (1 \times 0.1395 + 2 \times 0.3036 + 3 \times 0.4291 + 4 \times 0.2136 + 5 \times 0.3207 + 6 \times 0.1128 + 7 \times 0.0317 + 8 \times 0.0161 + 9 \times 0.0231 + 10 \times 0.0217 + 11 \times 0.0001 + 12 \times 0.0001) = 5.97$.

可知电能质量的最终评估结果为第6级, 即电能的质量属于良好. 可见本文提出的新方法的评估结果是比较准确、客观的, 基本能够反映电能的质量.

4 结论(Conclusion)

本文方法是将概率统计与模糊数学相结合的方法, 既可对风电场电能质量进行整体的评估, 也可单独评估某项指标. 由于电能质量是由多种因素决定的, 本文提出的新方法在初始的数据采集和处理过程中应用的是概率统计的方法, 这既保证了评估过程的严谨性、客观性, 避免了人为主观因素对评估结果准确性的不良影响, 又可以有效的抓住各分项指标的主要特征. 在数据的评估阶

段, 本文提出的新方法采用了模糊综合评判方法以及加权平均法, 并在其中引入了权重矢量, 避免了对各项指标单调的“一视同仁”的缺点, 体现了电能质量指标的模糊性, 同时也能够满足电力市场对电能质量的一些特殊要求.

参考文献(References):

- [1] TANG Huizhi, PEN Janchun. Research on synthetic and quantificated appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(12): 85 – 88.
- [2] 修智宏, 任光, 张运杰. 输入采用标准模糊划分的模糊控制系统设计[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(6): 1015 – 1019. (XIU Zhihong, REN Guang, ZHANG Yunjie. Systematic design of fuzzy control systems with standard fuzzy partition inputs[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 1015 – 1019.)
- [3] LARSSON A. Flicker emission of wind turbines during continuous operation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, 17(1): 114 – 118.
- [4] DOKOPOULOS S P, DIMOULIAS S C, MANOUSARIDIS M I, et al. Improvement of power quality in a grid with wind turbines using inductive storage[J]. *Wind Engineering*, 1999, 23(4): 215 – 224.