

# 基于组合赋权雷达图实现电网电能质量综合评估\*

欧阳华,李辉,乔鹏程,吴正国

(海军工程大学电气工程学院,湖北武汉 430033)

**摘要:**将改进的组合赋权雷达图方法用于电网电能质量综合评估。对主观、客观赋权法组合,基于组合权重与原权重之间的偏差尽可能小的优化思想,求取雷达图中各项指标的组合权值。利用各指标对应的扇形区域的对角线作为指标轴绘制雷达图,不仅最大限度体现各指标的独立权重,也反映了各指标之间的相互影响。利用雷达图的面积和周长两个变量完成对电能质量的综合评估。最后通过应用实例,验证了论文方法的合理性和在电能质量综合评估中的有效性。

**关键词:**电能质量;综合评估;组合赋权;雷达图

**中图分类号:**TM933 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0104-04

## Synthetic evaluation for power quality based on improved combination weighting radar chart

OUYANG Hua, LI Hui, QIAO Pengcheng, WU Zhengguo

(College of Electric Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Improved combination weighting radar chart method is provided and applied in synthetic evaluation of power quality. The optimization model was established based on minimizing the deviation between the vectors of evaluation weights before and after the combination weighting. In the method, the sector area was ranked and the angle of the sector area was distributed by the weighting. Moreover, the diagonal of sector area was employed by using the radar chart as index axes. The unattached weighting of every index was not only reflected by the whole hog, but also the interactant was incarnated. Synthetic evaluation of power quality was completed by the area and girth of the radar chart. Verification results demonstrate the reliability and validity of the method.

**Key words:** power quality; synthetic evaluation; combination weighting; radar chart

随着电力电子器件等非线性设备的广泛应用,各类电网电能质量问题日趋突出,严重影响电网的供电效率和用电设备的安全运行。围绕电能质量相关问题,国内外学者进行了大量研究,其中一个重要的基础性工作就是评估电网电能质量,获取电网供电状态的准确信息<sup>[1-4]</sup>。以国内外一系列电能质量测试标准为基础<sup>[3]</sup>,电能质量评估工作主要分为两个研究方向:一个是对电能质量的各单项指标进行独立分析;另一个是考虑电能质量各指标的相互影响及重要性划分等问题实现电能质量综合评估。单项指标评估方法较为成熟,其不足是各个评估指标内涵较为单一,无法有效反映不同指标之间的相互影响。综合评估是在分析单项指标的基础上,把电能质量的多个特征量按属性合成一个有机的整体,从而有效反映电网系统的整体运行状态。电能质量综合评估研究目前尚处于起步阶段,研究的焦点主要包括(1)

如何根据评估对象需求确定多个指标在评估过程中的重要性划分问题,也称为指标赋权问题。(2)如何合理地将多指标问题综合成单一量化指标问题,等等。

### 1 主客观结合的组合赋权方法

常用的赋权方法一般分为主观赋权法和客观赋权法两种,其中主观赋权法主要包括层次分析法、Delphi法(专家打分法)、优序图法等,客观赋权法主要包括熵权法、相关系数法、主成分分析法等<sup>[2-4]</sup>。主观赋权法可以体现用户对电能质量各指标的特殊要求,但无法体现评估指标的重要程度随时间的渐变特性;客观赋权法能够客观反映指标的数据信息与差别,但忽视了决策者经验的重要性,可能出现权重值不合理的现象。为了解决主、客观赋权法各自存在的问题,组合赋权法成为一种普遍的选择<sup>[5-9]</sup>。论文将主、客观权重合

\* 收稿日期:2012-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207164,61101206)

作者简介:欧阳华(1978—),女,湖北仙桃人,副教授,博士,E-mail:78ouyang@163.com

理结合,提出一种组合赋权方法。

设综合评估的考察指标个数为  $n$ , 提出的组合赋权法首先采用  $p$  种主观赋权法和  $q$  种客观赋权法分别对各项指标进行赋权, 基于概率统计方法对主、客观权重向量组分别处理, 得到主客观权重向量  $w'_1$  和客观权重向量  $w'_2$ , 再对两个向量进行合成, 得到最终的组合权重  $w$ 。

具体步骤如下:

(1) 指标赋权。分别选用  $p$  种主观赋权法和  $q$  种客观赋权法对各指标进行赋权, 得到主客观权重向量  $w_1, w_2, \dots, w_p$  和客观权重向量  $w_{p+1}, w_{p+2}, \dots, w_{p+q}$ , 其中  $w_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})^T$ 。

(2) 权重向量分组处理。将  $p$  个主观权重向量作为一个均匀分布随机变量的  $p$  个样本, 求取其期望并归一化, 得到主观权重向量  $w'_1$ 。同理, 得到客观权重向量  $w'_2$ 。

(3) 计算组合权重。按照式(1)求取组合权重  $w$ 。其中  $w'_1$  和  $w'_2$  的概率分别取为  $a, b$ 。

$$w = \frac{aw'_1 + bw'_2}{a + b} \quad (1)$$

步骤(3)的关键是确定合理的概率系数  $a, b$ 。如果对电网电能质量各个指标及整个系统运行状况有较可靠的数据支撑, 并有可信的经验基础和专家指导, 可通过合理分析直接确定  $a, b$ 。但一般情况下, 相关先验知识较难获得。

论文通过构建优化模型, 基于组合权重向量与原主、客观权重向量之间的偏差总和尽可能小的优化思想, 求取概率系数  $a, b$ , 如式(2)所示:

$$\begin{cases} \min [(w - w'_1)^T (w - w'_1) + (w - w'_2)^T (w - w'_2)] \\ w = aw'_1 + bw'_2, a + b = 1, a \geq 0, b \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

用 MATLAB 求解该优化模型, 得到概率系数  $a, b$ , 以及组合权重  $w$ 。

## 2 基于雷达图的综合评估模型

现有的综合评估建模方法中, 基于模糊数学、概率统计与矢量代数等数学理论的建模方法, 普遍存在计算复杂、数学要求高、评估结论不直观等不足。雷达图法作为一种多变量图形化分析方法, 较好地解决了上述不足<sup>[10-15]</sup>。该方法以图形的形式描述评估中各项指标的数量关系, 结合对图像特征的数学处理, 可以直观实现电能质量的综合评估。

假设考察指标个数  $n$  为 6, 传统的雷达图法首先做一个单位圆, 并将其等分为 6 个扇形区域。

以扇形半径作为各个指标对应的指标轴, 将指标量化数值按比例投影至指标轴。依次连接指标轴上各点, 获得的封闭多边形, 即为评估对象的雷达图, 见图 1。

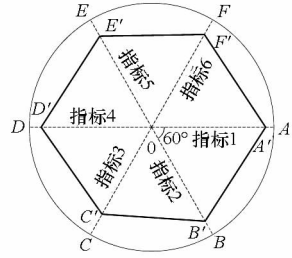


图 1 6 指标的评估雷达图

Fig. 1 Radar chart for assessment of six indices

传统雷达图法具有评估结果直观形象的优点, 但算法也存在一些不足<sup>[14-15]</sup>。例如对于同一个评价对象, 如果在绘制雷达图时指标的排列顺序不同, 雷达图的形状就不同; 各指标轴的夹角是简单的等分关系, 忽视了不同指标在综合评估中的不同重要性, 不容易准确体现各指标的权重信息等。

针对以上问题, 论文提出一种改进的雷达图方法。实现步骤如下:

(1) 根据权重不同对各个评估指标分配不等的扇形区域。假设考察指标个数  $n$  为 6, 根据组合赋权方法得到的最终组合权重  $w = (w_1, w_2, \dots, w_6)^T$ , 得到第  $i$  项指标在雷达图中对应扇形面积的角度  $\theta = 2w_i\pi$ 。

(2) 做单位圆, 从圆心  $O$  引射线  $OA$ , 与圆交于点  $A$ , 从  $OA$  出发, 依次做相邻角度  $\theta = 2w_i\pi$  的其余 5 条射线, 分别为  $OB, OC, OD, OE, OF$ 。依次做扇形  $AOB, BOC, \dots, FOA$  的对角线, 与圆交于  $P_1, P_2, \dots, P_6$ , 以  $OP_1, OP_2, \dots, OP_6$  为指标轴。

(3) 对各项电能质量指标归一化。由于各项指标的描述标准不同, 定义统一化描述方法。使用指标测量数据与国标允许量之间的比值作为评估指标。以频率偏差指标评估为例:

$$v_1 = \Delta f / \Delta f_N \quad (3)$$

指标相量定义为  $v_1$ ,  $\Delta f$  为测量频率偏差,  $\Delta f_N$  为引用标准的允许频率偏差。显然  $v_1 < 1$  表示该单项指标合格。同理, 定义并求取所有 6 项指标相量  $V = [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6]$

(4) 将各项指标量化数值  $V$  按长度在指标轴上标出相应的点, 依次得到点  $A', B', C', D', E', F'$ 。连接 6 点, 得到多边形雷达图, 如图 2 所示。

雷达图评估过程基于两条基本原则:

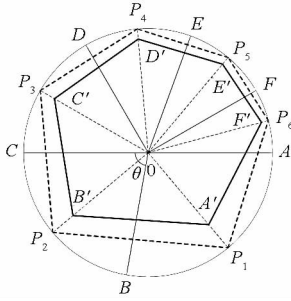


图 2 改进的综合评估雷达图

Fig. 2 Improved radar chart for synthetic evaluation

(1) 多边形雷达图的面积越小, 总体电能质量状态越好。

(2) 多边形雷达图越趋于圆, 各指标发展越均衡。

这样, 通过雷达图形就可以直观分析各个单项指标状态以及总体电能质量状态。

同时还可以根据这两条基本原则, 定义量化综合评估指标  $K$ 。

$$K = \frac{SL}{S_c L_c} \quad (4)$$

其中  $S$  为雷达图对应多边形的面积,  $L$  为多边形各边长的平方和,  $S_c$  为单位圆的面积,  $L_c$  为单位圆的周长的平方。

评估方法直接使用  $K$  值作为最终的评估值, 对电能质量进行定量评估, 根据算法原理, 如果  $K < 1$ , 可以认为综合评估结果为合格。也可以对电能质量进行定性评估, 通过分级, 比较评估结果所处的数值区间, 得到其对应的等级。

表 1 各赋权方法所求权重对比

Tab. 1 Weight comparison among different methods

	频率偏差	谐波	电压波动	电压闪变	电压偏差	电压暂降	三相不平衡
AHP	0.345 12	0.191 73	0.112 78	0.112 78	0.093 99	0.078 33	0.065 27
专家打分法	0.356 26	0.203 58	0.101 79	0.101 79	0.101 79	0.070 72	0.064 07
优先图序法	0.285 69	0.238 10	0.190 50	0.142 90	0.095 20	0.047 62	0
熵权法	0.157 09	0.213 89	0.094 42	0.052 02	0.235 05	0.057 80	0.189 73
变异系数法	0.147 78	0.192 73	0.113 68	0.081 62	0.214 82	0.082 00	0.167 37
文献[5]组合权重	0.193 44	0.150 33	0.137 18	0.158 54	0.113 67	0.142 29	0.104 54
论文组合权重	0.244 73	0.207 40	0.120 24	0.094 18	0.158 07	0.067 63	0.107 76

### 3 算例分析

为了验证论文提出的组合赋权雷达图方法的有效性, 采用文献[5]中的算例与论文方法进行对比验证。文献[5]详细分析各类赋权原理, 主要包括三种客观赋权法: AHP、专家打分法、优先图序法, 两种客观赋权法: 熵权法、变异系数法。提出一种组合赋权方法, 以评估值向量误差最小为目标建立拉格朗日函数并求解。

赋权的过程已有较多文献介绍, 论文不再赘述, 直接采用文献[5]的赋权结果。运用组合赋权方法处理五个权重样本, 得到主观权重向量  $W'_1 = [0.32902, 0.21114, 0.13502, 0.11916, 0.09699, 0.06556, 0.04311]^T$ , 和客观权重向量  $W'_2 = [0.15244, 0.20331, 0.10405, 0.06682, 0.22494, 0.06990, 0.17855]^T$ 。根据式(1)、式(2)优化求解。求得概率系数  $a = 0.52265, b = 0.47735$ , 以及组合权重  $w = [0.24473, 0.20740, 0.12024, 0.09418, 0.15807, 0.06763, 0.10776]^T$ 。组合权重  $w$ 、各赋权方法所求权重和文献[5]中求得的组合权重对比如表 1 所示。

由表 1 知, 论文方法所得的组合权重大小排

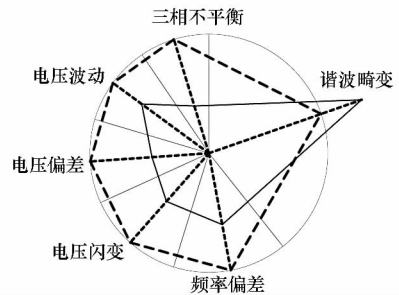


图 3 评估点 1 的雷达图

Fig. 3 Radar chart of point 1

序与文献[5]方法所得权重基本一致, 表明了本文方法的有效性。与文献[5]方法比较, 由于论文方法基于组合权重与原主、客观权重之间的偏差总和尽可能小的优化思想, 因此更能兼顾主、客观赋权方法的特性。

组合赋权雷达图方法的验证选用文献[15]的算例数据, 文献[15]也采用雷达图法完成电能质量综合评估。对比验证过程以组合权重  $w$  为基础, 针对文献[15]给出的 8 个被评估点数据, 分别绘制评估雷达图。以评估点 1 为例, 图 3 为其评估雷达图。计算得到各点的评估  $K$  值分别为 0.7395, 0.3555, 1.1896, 1.0411, 0.6397, 0.8914, 0.8036,

1.0898。指标评估主要目的是区分各评估点的电能质量,与数值具体大小无关。对评估点电能质量由好到坏的排序为:2、5、1、7、6、4、8、3,与文献[15]排序相同。但文献[15]的方法与论文提出方法比较,实现过程较为复杂、计算量较大。

### 4 监控系统实现

在理论研究基础上,建立网络化电网电能质量监测与综合评估系统,主要由数据采集和处理子系统、通信与数据传输子系统以及电能质量数据分析和评估子系统3层结构组成。

软件开发、运行环境:

(1) 软件运行平台配置

服务器操作系统:Windows 2008

客户端操作系统:Windows xp

(2) 软件开发平台配置

系统程序开发:Visual Studio 2010 + sp1

嵌入式开发:Worksbench

(3) 数据库管理系统选型

数据库服务器:Microsoft SQL 2005

图4为电网节点电能质量分析和综合评估界面。基于组合赋权雷达图的电能质量综合评估方法,从全局角度分析电网整体电能质量状态。并采用不同颜色来区别一项或若干项电能质量指标的正常与否。



图4 电能质量监测和综合评估界面

Fig.4 Operation interface for PQ monitor and evaluation

该电能质量综合评估系统可以同时满足两个不同层次使用人员的需求。一方面,电能质量综合评估结果能够以图形的形式在集控台界面上显示,直观明确,有利于非电力专业操作人员及时监控电网电力系统状况。另一方面,综合评估结果在后台提供丰富的电能质量相关参数数据,包括各项分指标的详细情况,以及各指标间的相互影响等信息,可供有相关经验的工程技术人员参考,为必要的调控提供决策支持。

### 5 结论

为了更合理地评估电网电能质量状况,论文

选用图形化的雷达图分析方法实现电网电能质量的综合评估。针对传统雷达图的不足,提出组合赋权雷达图,改进了电能质量指标赋权方式和雷达图绘制方法。基于组合赋权雷达图的综合评估方法能够较好地兼顾主观赋权法和客观赋权法的优势,得到的组合权重更贴近实际需求。评估过程中即重点突出不同评估指标的重要性程度和对整体评估结果的影响,又反映了各指标之间的相互影响和作用,避免将各指标之间割裂,具有较好的综合评估效果。

### 参考文献 (References)

[1] 陶顺,肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报,2010,25(4):171-175.  
TAO Shun, XIAO Xiangning. Infrastructure of the power quality assessment system of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175. (in Chinese)

[2] 陈磊,徐永海. 浅谈电能质量评估的方法[J]. 电气应用, 2005,24(1):58-61.  
CHEN Lei, XU Yonghai. Discussion about the methods of evaluating power quality [J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(1):58-61. (in Chinese)

[3] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量国家标准应用指南[M]. 北京: 中国标准出版社,2009.  
National Voltage and Current Levels and Frequency Standardization Technical Committee. Power quality national standard application guide [M]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[4] Yuan X P, Zhao J F, Tang G Q, et al. Multilevel fuzzy comprehensive evaluation of power quality [J]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies Hong Kong. April 2004: 290-294.

[5] 李娜娜,何正友. 组合赋权法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(16):128-134.  
LI Nana, HE Zhengyou. Combinatorial weighting method for comprehensive evaluation of power quality [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (16): 128-134. (in Chinese)

[6] 李娜娜,何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术,2009,33(06):55-61. (in Chinese)  
LI Nana, HE Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight With objective weight [J]. Power System Technology, 2009, 33(06):55-61. (in Chinese)

[7] 焦利明,杨建立. 一种确定指标权重的新方法[J]. 指挥控制与仿真,2006,28(1):94-97.  
JIAO Liming, YANG Jianli. A new method for calculating weights [J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(1): 94-97. (in Chinese)

[8] 陶菊春,吴建民. 综合加权评分法的综合权重确定新探[J]. 系统工程理论与实践,2001,(8):43-48.  
TAO Juchun, WU Jianmin. New study on determining the weight of index in synthetic weighted mark method [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2001, (8):43-48.

## 参考文献 (References)

- [1] Schleher D C. Electronic warfare in the information age [M]. London: Artech House, 1999: 201 - 292.
- [2] Skolnik M I. Radar handbook [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2008: 1201 - 1220.
- [3] Scott D B J. Digital radio frequency memory linear range gate stealer spectrum [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(2): 725 - 735.
- [4] 黄洪旭, 黄知涛, 周一宇. 对合成孔径雷达的步进移频干扰[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 463 - 468.  
HUANG Hongxu, HUANG Zhitao, ZHOU Yiyu. A Study on the Shift-frequency jamming to SAR [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 463 - 468. (in Chinese)
- [5] 刘建成, 王雪松, 刘忠, 等. 对线性调频脉压雷达的导前假目标群干扰[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1350 - 1353.  
LIU Jiancheng, WANG Xuesong, LIU Zhong, et al. Preceded false target groups jamming against LFM pulse compression radars [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(6): 1350 - 1353. (in Chinese)
- [6] 朱良, 曹鹏, 禹卫东. 基于移频干扰的成像算法抗干扰性能分析[J]. 电子学报, 2011, 39(3A): 47 - 51.  
ZHU Liang, CAO Peng, YU Weidong. The analyse of SAR imaging algorithm anti-jamming performance based on representative shift-frequency jamming [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3A): 47 - 51. (in Chinese)
- [7] 毕大平, 吴少峰. 对逆合成孔径雷达的移频干扰技术研究[J]. 电子对抗, 2011, 01: 8 - 12  
BI Daping, WU Shaofeng. Study on the shift-frequency jamming to ISAR [J]. Electronic Warfare, 2011, 01: 8 - 12. (in Chinese)
- [8] 王玉军, 赵国庆, 胡曦明. 基于延迟不变的 LFM 雷达移频干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1861 - 1863.  
WANG Yujun, ZHAO Guoqing, Hu Ximing. Method of shift-frequency jamming to LFM radar based on delay invariance [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 1861 - 1863. (in Chinese)
- [9] Wang X S, Liu J C, Zhang W M, et al. Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming (ISRJ) [J]. Science in China (Series F: Information Sciences), 2007, 50(1): 113 - 123.
- [10] Xu S K, Liu J H, Fu Y W, et al. Deception jamming method for ISAR based on sub-nyquist sampling technology [C]// ICSP2010 Proceedings, 2010. 2023 - 2026.
- [11] 潘小义, 王伟, 熊跃军, 等. 相干移频干扰幅度补偿技术研究[J]. 现代防御技术, 2010, 38(3): 90 - 93.  
PAN Xiaoyi, WANG Wei, XIONG Yuejun, et al. Amplitude compensation technique of coherent frequency-shifting jamming [J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(3): 90 - 93. (in Chinese)
- [9] 蒋慧峰, 朱文杰. 一种最优组合赋权算法[J]. 湖北工业大学学报, 2007, 22(5): 78 - 80.  
JIANG Hui Feng, ZHU Wenjie. A class of algorithm of optimal combination determining weight [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2007, 22(5): 78 - 80. (in Chinese)
- [10] 付赞, 方德英. 雷达图法在综合评价中的应用研究[J]. 统计与决策, 2007, (24): 176 - 178.  
FU Yun, FANG Deying. Research on the application of radar chart in comprehensive evaluating. Statistics and Decision, 2007, (24): 176 - 178. (in Chinese)
- [11] 王强. “雷达图”在商业银行风险监测中的应用[J]. 金融教学与研究, 2000, (2): 40 - 43.  
WANG Qiang. Application of radar chart in risk monitoring of commercial bank [J]. Finance Teaching and Research, 2000, (2): 40 - 43.
- [12] 郑惠莉, 刘陈, 翟丹妮. 基于雷达图的综合评价方法[J]. 南京邮电学院学报: 自然科学版, 2001, (2): 75 - 79.  
ZHENG Huili, LIU Chen, ZHAI Danni. Comprehensive evaluating method based on radar chart. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science, 2001, (2): 75 - 79. (in Chinese)
- [13] 庄彦, 康重庆, 胡江溢, 等. 售电市场质量及其综合评价[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 25 - 29.  
ZHUANG Yan, KANG Chongqing, HU Jiangyi, et al. Quality of power sale market and its comprehensive assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 25 - 29. (in Chinese)
- [14] 王永瑜. 雷达图定量综合评价方法中存在的问题及改进措施[J]. 统计教育, 2007, (1): 18 - 20.  
WANG Yongyu. The problem and measures for improvement on the synthetically quantitative appraisal method of radar chart [J]. Statistical Education, 2007, (1): 18 - 20. (in Chinese)
- [15] 李国栋, 李庚银, 杨晓东, 等. 基于雷达图法的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 70 - 74.  
LI Guodong, LI Gengyin, YANG Xiaodong, et al. A comprehensive power quality evaluation model based on radar chart method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 70 - 74. (in Chinese)

(上接第 107 页)