

电网电压质量评估的概率统计分析方法应用研究

郑建辉¹, 陈钰², 孟昭勇³

(1. 福建电力试验研究院, 福建 福州 350007; 2. 德州供电公司, 山东 德州 253000;
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 电力系统运行中电压质量的分析评估是一项非常重要的任务, 通过对电压质量的分析评估可以对当前电力系统设备的运行情况、系统健康状况等一系列问题做出评价。首先分析了目前国内现行的电网电压质量统计考核方法和澳大利亚越网的统计分析方法, 并进行比较分析其优缺点, 在此基础上结合概率统计理论提出了一种新的分析电压质量指标的应用方法, 该方法运用数学期望与方差估计分析电压的时域特性及概率分布, 以期更直观更科学的评价电压质量。最后使用该方法对山东电网电压质量进行了实例评估分析。

关键词: 电力系统; 电压质量; 概率; 数理统计; 方差

Research on probability and statistics analysis application of power network voltage quality

ZHENG Jian-hui¹, CHEN Yu², MENG Zhao-yong³

(1. Fujian Power Test and Research Institute, Fuzhou 350007, China; 2. Dezhou Power Supply Company, Dezhou 253000, China;
3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Voltage quality evaluation is a very important task in the course of the electric power system. This paper analyzes the methods of the voltage quality evaluation which are used in domestic and oversea. In order to evaluate voltage quality more audio-visual and more scientific, it brings forward a new applied method to analyze the voltage quality using probability statistics. And the method analyzes the voltage time-domain attributes and probability distribution using mathematic expectation and estimate of variance. At last, the new way by using the proposed method in Shandong electric power network is illustrated.

Key words: power system; voltage quality; probability; mathematics statistics; variance

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0058-05

0 引言

我国国民经济的迅速发展, 不仅对电网运行安全性、可靠性、经济性提出了更高的要求, 同时对电网电能质量的要求也越来越高。电网电压水平的过高、过低、波动等都会对用户负荷设备、电网自身设备运行及电网的网损等产生严重影响。

我国对于电能质量先后制定并颁布了六项国家标准, 即: 供电电压允许偏差、电压波动与闪变、公用电网谐波、三相电压允许不平衡度、电力系统频率允许偏差、暂态过电压和瞬态过电压。这些标准的颁布要求电力部门严格执行这些质量指标, 特别是随着国网建设超高压目标的提出, 对提高电网电压质量的要求更加迫切。因此, 寻找一种合理、准确的电压质量分析指标体系和高效、直观的统计分析方法, 对于加强电网电压质量的管理和考核, 优化和完善提高电网电压质量的技术措施, 进一步全

面提高电网电压质量具有重要意义^[1, 2]。

目前, 对电能质量的评估已有多种方法, 这些方法中应用较多的有概率统计法、模糊数学法以及各种综合评估法^[3, 4]。文献[5]中提出基于日周期的应用概率统计和矢量代数的电能质量化和评估方法; 文献[6]采用模糊理论提出了一种利用模糊综合评价的方法对电能质量进行综合评价的二级评判法; 文献[7]则提出了一种将层次分析法和模糊方法相结合的基于可变综合权重的电能质量模糊综合评价方法。由于电能质量是由多种因素决定的, 综合上述文献中提出的各种评估方法, 可知采用概率统计的方法可以抓住电能质量分项指标中的主要特性, 而且采用了严格的计算保证了评估的客观性, 但对于那些具有模糊性质的电能质量指标而言则缺乏灵活性, 如谐波, 它需要根据需求用较好、不好这些比较模糊的语言来描述; 而采用模糊评价的方法则可以体现不同用户对电能质量各项指标要求的

不同, 描述那些存在模糊的电能质量指标, 但是采用这种方法受主观因素影响较大, 缺少客观性。

对于电网电压质量的统计分析中, 国内外都已形成了自己的指标体系和统计分析方法, 这些指标体系和统计分析方法具有一定的科学性和合理性, 但也存在一定的问题。为此, 本文在参考了目前电能质量的各种评估方法和详细的分析现有电压质量指标体系和统计方法的基础上, 指出其存在的问题和缺陷, 并应用概率与数理统计的理论提出了一套新的电压质量指标体系和统计分析方法。

1 国内外现行电压质量分析方法简介

目前, 国内的电压质量统计分析方法是按日、月、年统计每个监测点的越上限、越下限时间、日电压波动超 5% 累积时间、实际运行时间和电压合格率, 根据所有监测点的越上限、下限、日电压波动超 5% 和实际运行时间计算全网监测点电压合格率。统计方式是以 EXCEL 表格的形式列出所统计监测点的越限时间、运行时间和合格率。统计间隔是每 15 min 采一个点, 全天 96 点, 每采到一点计 15 min。

国内电力系统采用的电压质量指标体系和统计分析方法在如下几个方面体现电网电压质量水平: 电压在某一特定时段上电压的波动范围; 电压的合格率; 电压越上限、下限的严重情况 (由越限时间体现); 以及电压波动超 5% 累积时间可部分地反映电压的波动情况。但上述指标体系显然存在问题和不足, 主要包括如下几个方面:

a) 没有体现电压在合格范围内的电压分布情况。

b) 给出了电压平均值及电压波动超 5% 累积时间, 但没有给出反映电压波动程度的方差值, 这使得很大程度上失去了统计计算电压平均值意义。

c) 全部是电压 V 的一些离散统计值, 没有给出电网电压的关于时域和电压分布连续统计意义下的描述。

d) 在统计分析方法体系中, 规定电压采样间隔为 15 min, 缺乏理论依据。

国外越网公司的统计分析方法是利用事故分析越限软件收集并显示 EMS 关于事故安全分析 (按照 N-1 原则对电网进行静态安全分析) 越限的信息, 包含事故安全分析每 15 min 运行一次期间 EMS 的越限次数和持续时间, 按月度为单位统计, 用图形表示。按月统计全网不同电压段的累计时间, 每月不同电压段的累计时间以图形直观地表现出来, 各电压段累计时间包括低电压时间、高电压时间、较低电压时间和较高电压时间。同时各监测点的低电压、

高电压统计也以图形的形式直观地描述。

越网公司的统计分析方法与国内现行的统计方法相比可以更形象直观地看出电压处于不同区段所占的时间。但同时也存在与国内统计分析方法相同的问题即没有给出电网电压的关于时域和电压分布连续统计意义下地描述。

2 概率统计分析方法

由于负载的随机波动, 网上任一监测点在任一时刻的电压 $V(t)$ 应该是一个随机变量, 而电网某一监测点在两个不同时刻的电压 $V(t_1)$ 和 $V(t_2)$ 是两个随机变量, 所以从理论上讲电网电压 $V(t)$ 是一个随机过程。对于给定的一组电网某一监测点电压实测值 $V(t_1)$ 、 $V(t_2)$ 、 \dots 、 $V(t_n)$, 我们可以将这 N 个不同时刻的电压监测值 $V(t_1)$ 、 $V(t_2)$ 、 \dots 、 $V(t_n)$ 看作是对一个随机变量重复试验的 n 次观测值, 故可利用数理统计方法分析估计电压 $V(t)$ 的数字特征, 即电压质量的各评估指标, 并应用这种思想对电压 V 的概率密度曲线进行拟合, 从而可形成电网电压质量的数理统计分析评估方法体系^[11,12]。

2.1 采样间隔的确定

采样间隔是用数理统计方法研究随机变量 (或随机过程) 必须首先确定的一个量值。采样间隔过大将无法反映随机波动的所有信息, 过小则会使工作量大大增加。

为确定合理的分析评估电压质量的电压采样时间间隔, 假设 $\{V(t)\}$ 是一个严平稳随机过程, 且在 t_1, t_2, \dots, t_N 时刻, $V(t_1), \dots, V(t_N)$ 相互独立。

$$\text{此时 } E(V_k) \equiv \mu \quad D(V_k) \equiv \sigma^2$$

$$E(\bar{V}) = \mu \quad D(\bar{V}) = \frac{\sigma^2}{N}$$

由契比雪夫不等式 $P\{|\bar{V} - \mu| > \varepsilon\} \leq \frac{\sigma^2}{N\varepsilon^2}$ 知:

对于给定的置信度 $1 - \alpha$, 只要选取 N 使 $1 - \frac{\sigma^2}{N\varepsilon^2} \geq 1 - \alpha$ 即可。也就是说选择 $N \geq \frac{\sigma^2}{\alpha\varepsilon^2}$ 时就可保证 \bar{V} 偏离 μ 超过给定 ε 的概率小于 α 。

因为在实践中 σ^2 未知。可根据历史上统计资料估计给出 σ^2 的一个上界 M , 即可确定采样时间 N 。

例如, 针对每天的电压质量统计, 可取 $M = 100$ ($\sqrt{M} = 10$), 并取 $\alpha = 0.05$, $\varepsilon = 1.2$ 时, 只要选取 $N \geq 1389$ 即可。

选择 $\sigma^2 < 100$ 是基于对历史数据的分析, 大量的历史数据分析计算表明 $\sigma^2 < 100$ (满足实际要求)。

根据上述理论分析，在电网选择 $N=1440 > 1389$ ，即每天采样 1 440 个电压值，每分钟一个采样点可以保证电压统计分析的合理准确性，同时，现行的 SCADA/EMS 系统也完全可以实现上述目标。

过去使用的每 15 min 一个电压采样值进行电压质量统计分析，证明其精度较差不能准确反映电压质量的实际情况。

2.2 数学期望与方差估计值

数学期望与方差是反映电网电压变化的两个最重要的数字特征，它们分别反映了当前的理想电压和实际电压相对于理想电压的偏差量。下面给出根据采样值 $V(t_1), V(t_2), \dots, V(t_n)$ 估计其数学期望与方差的计算分析方法。

(1) 数学期望

设电网某条母线电压 $\{V(t)\}$ 为一个随机过程，若进一步作如下假设：

① $\{V(t)\}$ 是平稳随机过程

② $\{V(t)\}$ 具有各态历经性

则在采样间隔很小（例如 1 min 一个采样点）

用 $\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V(K \cdot \frac{T}{n})$ 作为 $E(V(T)) = \mu$ 的估计值是完全可以的（其中 N 为在 $[0, T]$ 时间内的采样总数， $\frac{T}{n}$ 为采样时间间隔）。这也就是目前国内

外电力系统采用日平均电压 $\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k$ 的理论依据。上述两个假设前提，在电压变化的大部分时段是基本符合的，所以在实际应用中该数学期望估计公式具有其合理性。通过对平均电压的统计，可以掌握每个监测点在统计时间段内的电压水平，通过对各监测点平均电压的对比，可以清晰地掌握电网及各供电区域的电压分布特点和差异。

(2) 方差

与(1)中讨论一样我们给出方差的如下两种估计计算公式：

$$(i) S^{*2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2$$

$$(ii) S_n^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2$$

$\therefore E(S^*)^2 = D(V) = \sigma^2, \therefore S^{*2}$ 是 σ^2 的一个无偏估计量。而 $E(S_n^2) = \frac{n-1}{n} D(V) = \frac{n-1}{n} \sigma^2 \rightarrow \sigma^2$,

所以称 S_n^2 是 σ^2 的一个渐进无偏估计量。当 n 充分大时两者估计值没有什么大区别。

在此，我们使用 S_n^2 的计算公式并定义标准差为：

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \text{ kV}$$

2.3 电压的时域特性及概率分布

基于对电压变化规律的数理统计学认识，要全面分析评估电压质量，应同时考虑其时域变化特性和概率分布特性，二者结合起来方能使得针对电网电压质量的分析与评价更全面、更客观、更深刻。下面考虑利用电压采样值 V_1, V_2, \dots, V_N 构造出电压变化的概率密度函数曲线与网上电压曲线（即样本曲线）。

(1) 电压（有效值）的时域变化特性曲线

利用采样值 V_1, V_2, \dots, V_N ，可直接绘出电压变化曲线，但为使曲线更平滑更精细，我们可应用厄米特二次插值技术绘制出电网电压的连续电压变化曲线。

根据所绘出的电压变化曲线，可非常直观地确定任一时刻电压值，及给定时间段上，电压最小值 V_{\min} 及最大值 V_{\max} 发生的时刻，以及电压越上、下限发生的时段。但由于同一电压区间段可在不同时段发生，各电压区间段所占的总比例从图上很难直接读出，为此应进一步参考电压的概率分布密度曲线。

(2) 电压概率分布密度曲线

假设 $\{V(t)\}$ 是一个具有各态历经的严平稳随机过程，且在任一时刻 t ，电压 $V(t)$ 服从相同分布。现在把 N 次采样值视为对同一随机变量 V 的 N 次抽样观察值。利用数理统计学中的曲线拟合技术可描绘出 V 的概率密度曲线 $f_v(V)$ （自变量电压的单位是 kV）， $f_v(V)$ 是随机变量 V 的密度函数值，该曲线可直观描述任意电压数值的分布密集度。 $f_v(V)$ 越大说明 V 落在 v 两边的小区间内的可能性越大。概率密度曲线上起伏能反映电网电压在 $V_{\min} \sim V_{\max}$ 分布的均匀程度。电网电压落在 $[V_1, V_2]$ 区间段上的概率应为此曲线与 $V=V_1$ 及 $V=V_2$ 和 v 轴所围的图形面积。

3 概率统计评估分析方法在山东电网的应用实例

应用上面所述的概率统计分析方法对山东电网电压质量进行了分析比较，我们发现该分析方法相比于原来的电压评估方法更能全面准确地分析电网电压质量。该分析方法不仅能统计出电压在某一特定时段上电压的波动范围；电压的合格率；电压越上限、越下限的严重情况（由越限时间体现）以及电压波动超 5% 累积时间上可部分地反映电压的波

动情况。而且能通过电压分段概率图体现出电压在合格范围内的分布情况; 可以通过电压概率密度曲线和电压有效值曲线来刻画电压在网上的波动情况; 以及通过电压标准差(或方差)反映电压在该时段上的平均波动值, 等等。下面本文列举了在山东电网下一些变电站应用标准差和概率密度分布曲线来分析电压质量的例子。

电压标准差(或方差)反映的是电压在该时段上的平均波动的数量化指标值, 它的大小直观地反映了网上电压相对于理想电压的波动严重程度。标准差(或方差)越小说明电压 V 在 \bar{V} 两边的一个小小区间上电压分布密度越大。电压落入该小区间上的概率值越大。以潍坊寒亭站和烟台竹林站的 220 kV 母线电压为例, 由现有的统计报表(如表 1 所示)可以看出, 2007 年 1 月份, 寒亭站 220 kV 母线最低电压 224 kV, 最高电压 234 kV, 平均电压 231 kV, 月电压合格率 100%; 竹林站 220 kV 母线最低电压 219 kV, 最高电压 235 kV, 平均电压 231 kV, 电压波动超 5% 的时间 225 min, 月电压合格率 99.50%。看上去两站的整体电压水平似乎相差不大, 平均电压相同, 竹林站最低电压略低、全月有 225 min 日电压波动超过 5%, 从而造成月电压合格率较寒亭站低 0.5 个百分点。

表 1 山东电网全时段电压监测月报表

Tab.1 Voltage monitoring monthly report forms of Shandong electric power network

山东电网全时段电压监测月报表											
截止日期	2007年1月31日		电压单位: kV		时间单位: 分钟						
厂站	允许偏差	最低值	最低时刻	最高值	最高时刻	平均值	越上限时间	越下限时间	波动超5%时间	运行时间	月合格率
寒亭变	213-235	224	01日 10:15	234	04日 12:00	231	0	0	0	44640	100.00%
竹林变	213-235	219	11日 16:15	235	06日 04:00	231	0	0	225	44640	99.50%

事实上, 两站的实际电压情况还是有很大差异的, 寒亭站地处潍坊地区, 两回 220 kV 出线直接接于 500 kV 潍坊站, 另两回 220 kV 出线与 220 kV 贾庄站相连, 结构较为坚强, 同时, 寒亭站 35 kV 侧所装电容器占主变容量的 13%, 负荷高峰时段有足够的无功补偿能力; 而竹林站处于烟台-威海地区的单回联络通道上, 所处电网无功支撑较弱, 而该站所装补偿电容器只占主变容量的 5%, 无功补偿容量严重不足, 负荷高峰时段不能提供足够的无功补偿。

如果增加标准差指标的统计, 则可以非常清晰地看出两站 220 kV 母线相对于平均电压的偏离情况, 如图 1、图 2 所示, 寒亭站 220 kV 母线标准差明显低于竹林站, 寒亭站最大标准差 3 kV, 全月有 20 天以上的时间标准差小于 2 kV, 而竹林站, 最大标准差到达 5.5 kV, 全月标准差小于 2 kV 的时间

只有 6 天。说明竹林站 220 kV 母线电压要比寒亭站波动程度严重。根据统计结果我们可以从改善烟台地区(竹林站所在地区)网络结构和增加竹林站无功补偿容量等手段改善竹林站电压质量。显然, 如果增加方差指标我们更能直观地掌握监测点电压在合格范围内的波动情况。

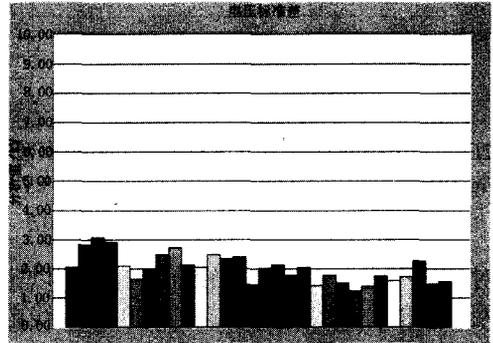


图 1 寒亭变 220 kV 母线 2007 年 1 月 1~30 日电压标准差
Fig.1 Voltage standard difference for 220 kV busbar in Hanting substation for January 1~30,2007

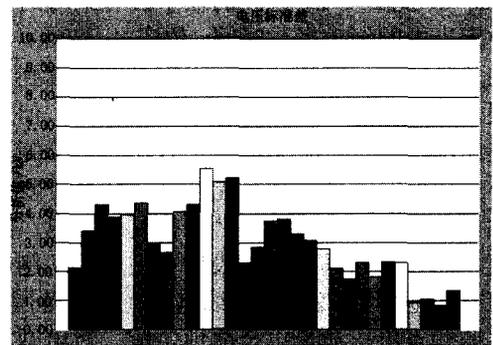


图 2 竹林变 220 kV 母线 2007 年 1 月 1~30 日电压标准差
Fig.2 Voltage standard difference for 220 kV busbar in Zhulin substation for January 1~30,2007

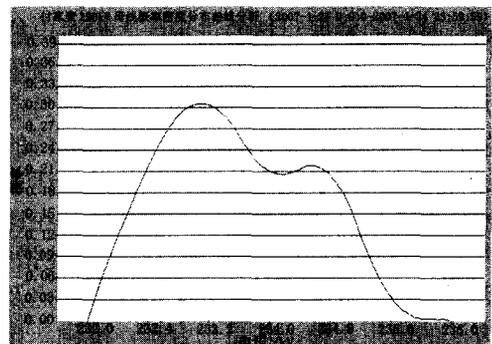


图 3 付家变 220 kV 母线 2007 年 1 月 24 日电压概率密度曲线
Fig.3 Voltage probability density curve for 220 kV busbar in Fujian substation for January 24, 2007

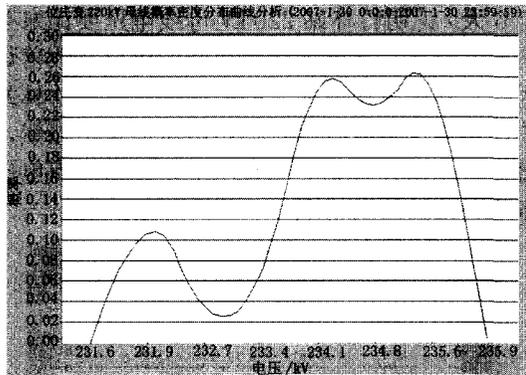


图4 位庄变 220 kV 母线 2007 年 1 月 30 日电压概率密度曲线
Fig.4 Voltage probability density curve for 220 kV busbar in Weizhuang substation for January 30, 2007

对于概率密度曲线的比较分析，我们以比较同处电网中部的位庄站和付家站的 220 kV 母线电压情况为例，从图 3，图 4 中可以看出，付家站 220 kV 母线电压在 233 kV 的概率最大，超过 30%，位庄站 220 kV 母线对应概率密度最大的电压值 235 kV，明显高于付家站，从曲线还可以看出位庄站全天电压在 233 kV 到 235 kV 之间的概率占有绝对的优势，即一天当中的绝大多数时间，位庄站 220 kV 母线电压在危险的电压较高区段，很容易就过渡到电压越上限。虽然付家站电压整体水平也较高，但远不如位庄站严重。实际情况是，位庄站 110 kV 侧接有多个小火电厂，上送有功、无功都比较多，要控制位庄站 220 kV 母线电压必须严格控制小火电厂的上网潮流，而付家站只要及时投切本站 35 kV 侧电容器即可有效地调整 220 kV 母线电压在合格范围。有了对各监测点电压质量更全面地了解，对电网规划、运行方式调整和各级变电站合理配置无功补偿容量等方面都能提出更有针对性的建议和措施。

4 总结

随着时代的发展科技的进步，人们对电能质量提出了越来越高的要求，而一套好的电能质量评估分析方法是提高电能质量的前提要求。在目前的各种评估方法中，概论统计方法显出了其独特的优越性，这种方法采用了概率统计特征值的描述方法，从而抓住电能质量各项指标的主要特征。在评估过程中严格按照数学计算，客观地反映了电能指标值，而且采用对历史数据分析计算来估计采样点及插值拟合方法的应用，使评估更加合理，准确。该评估方法以山东电网的运行数据进行了分析，证明能很好地反映出电网中的电压质量问题，能够对电压质量进行更准确更细致的分析。

参考文献

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning. Analysis and Control of Power Quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[2] 林海雪. 论电能质量标准[J]. 中国电力, 1997, 30(3):7-10.
LIN Hai-xue. A Discussion on Electric Energy Quality Standard[J]. Electric Power, 1997, 30(3):7-10.

[3] 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 Yong-hai. Discussion about the Methods of Evaluating Power Quality[J]. Electric Power Application, 2005, 24(1):58-61.

[4] 金炎, 刘颖英, 徐永海. 电能质量综合评价的分析与研究[J]. 电气技术, 2006, (1):27-30.
JIN Yan, LIU Ying-ying, XU Yong-hai. Analysis and Research on the Comprehensive Evaluation of the Power Quality[J]. Electrical Technology, 2006, (1):27-30.

[5] 江辉, 彭建春, 欧亚平. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30(1):66-70.
JIANG Hui, PENG Jian-chun, OU Ya-ping. Power Quality Unitary Quantification and Evaluation Based on Probability and Vector Algebra[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2003, 30(1):66-70.

[6] 谭家茂, 黄少先. 基于模糊理论的电能质量综合评价方法研究[J]. 继电器, 2006, 34(3):55-59.
TAN Jia-mao, HUANG Shao-xian. Research on Synthetic Evaluation Method of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J]. Relay, 2006, 34(3):55-59.

[7] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005, 29(6):11-16.
ZHAO Xia, ZHAO Cheng-yong, JIA Xiu-fang. Fuzzy Synthetic Evaluation of Power Quality Based on Changeable Weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6):11-16.

[8] 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.
TANG Hui-zhi, PENG Jian-chun. Research on Synthetic and Quantized Appraisal Index of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(12):85-88.

[9] 贾清泉, 宋家骅, 兰华. 电能质量及其模糊方法评价[J]. 电网技术, 2000, 24(6):46-49.
JIA Qing-quan, SONG Jia-hua, LAN Hua. Power Quality and Fuzzy Method Evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6):46-49.

(下转第 82 页 continued on page 82)

满足此自适应阻抗匹配系统的需要。实验在 SF960 高频保护收发信机上进行。因 SF960 的直流录波电压是在发信输出端对发信电平整流后得到的, 所以可用它来确定发信电平的大小。在正常发信时录波电压为 4 V, 可用 4 V 直流电压来代表额定发送电平值, 接至比较器的一端, 比较器的另一端直接接至 SF960 的录波电压输出端。把 SF960 转换至“本机一通道”状态, 在高频电缆接线端子上接入一个可调电阻, 当调整此电阻小于 75Ω 时, 发信电平就会小于额定发送电平 (34 dB)。此时接入并启动由 AduC812 控制的自适应阻抗匹配系统, 运行电容调整策略优化算法调整两个变容二极管, 最终发信电平升至 34 dB, 使阻抗得到了匹配。

5 结论

本文分析了电力线载波通道阻抗不匹配的原因和危害、阻抗匹配的重要性。提出了一种自适应阻抗匹配的方案。并使用遗传算法实现了此方案的优化策略。最后编制出了相应的电容调整优化策略程序, 在 AduC812 单片机上运行以控制此自适应阻抗匹配系统, 在 SF960 高频保护收发信机上进行实验, 证实了此电力线载波通信自适应阻抗匹配系统的有效性。

参考文献

- [1] LI Qi, SHE Jing-zhao, FENG Zhen-ghe. Adaptive Impedance Matching in Power Line Communication[A]. In: 4th International Conference on Microwave and Millimeterwave Technology Proceedings[C]. Beijing: 2004.887-890.
- [2] 张仁永, 陈宇辉. 电力线载波通道设备应用指南[M].

北京: 中国电力出版社, 2002.

ZHANG Ren-yong, CHEN Yu-hui. The Key to PLC Channel Device application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

- [3] 何振亚. 高频阻抗匹配网络设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1956.
- HE Zhen-ya. Design of High Frequency Impedance Matching Network[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 1956.
- [4] 程健, 张杨, 刘汉斐, 等. 基于 ARM 处理器的自动阻抗匹配器[J]. 测控技术, 2007, (5): 67-69.
- CHENG Jian, ZHANG Yang, LIU Han-fei, et al. An Automatic Impedance Matching System Based on ARM Processor[J]. Measurement & Control Technology, 2007,(5):67-69.
- [5] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 汪定伟, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2000.
- Mitsuo Gan, CHENG Run-wei. Genetic Algorithms and Engineering Design[M]. WANG Ding-wei, et al Trans. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 胡良剑, 孙晓君. MATLAB 数学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- HU Liang-jian, SUN Xiao-jun. MATLAB Maths Experimentation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

收稿日期: 2008-06-10; 修回日期: 2008-07-18

作者简介:

范 函 (1963-), 男, 工程师, 从事电力系统通信设备的调试工作; E-mail: han_21st@yahoo.com.cn

张 浩 (1961-), 男, 本科, 高级工程师, 从事输变电生产技术管理工作。

(上接第 62 页 continued from page 62)

- [10] 于庆广, 付之宝. 电能质量指标及其算法的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(1):10-12.
- YU Qing-guang, FU Zhi-bao. Research on Power Quality Specification and Arithmetic[J]. Power Electronics, 2007,41(1):10-12.
- [11] 闵华凌. 随机过程[M]. 北京: 同济大学出版社, 1987.
- MIN Hua-ling. Stochastic Process[M]. Beijing: Tongji University Press, 1987.
- [12] 樊平毅. 随机过程理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- FAN Ping-yi. The Theory and Application of Stochastic

Process[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

收稿日期: 2008-05-05; 修回日期: 2008-08-10

作者简介:

郑建辉 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: petros@163.com.

陈 钰 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

孟昭勇 (1965-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制。