

# 电能体验质量研究

张华赢<sup>1</sup>, 高田<sup>2</sup>, 姚森敬<sup>1</sup>, 史帅彬<sup>1</sup>, 余鹏<sup>1</sup>, 曹军威<sup>2</sup>, 许延详<sup>2</sup>, 黄志伟<sup>1</sup>, 卢旭<sup>1</sup>  
(1 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2 清华大学信息技术研究院, 清华大学信息科学与技术国家实验室, 北京 清华大学, 100084)

**摘要:** 随着信息技术和高科技企业的兴起, 我国对供电的要求已经逐渐由供电量向供电质量转化, 电能质量问题越来越得到企业和电网公司的重视。现有电能质量标准体系主要以供电质量为基础, 通过电网电压、电流稳态和暂态等方面的量化指标进行描述, 而实际工作中电能质量的好坏更多取决于用户的敏感程度和实际体验。本文提出电能体验的概念, 侧重用户敏感度的定量分析, 并以此为基础综合现有电能质量标准和相关用户信息, 提出电能体验质量的指标体系。本文结合深圳电网的具体案例, 说明电能体验质量在实际情况中更能综合供电质量和用户体验等多方面因素, 对电网实际工作更加具有指导意义。

**关键字:** 电能质量, 电能体验质量, 用户敏感度, 电能体验评价

## Power Quality of Experience

Huaying Zhang<sup>1</sup>, Tian Gao<sup>2</sup>, Senjing Yao<sup>1</sup>, Shuaibin Shi<sup>1</sup>, Peng Yu<sup>1</sup>, Junwei Cao<sup>2</sup>,  
Yanxiang Xu<sup>2</sup>, Zhiwei Huang<sup>1</sup>, Xu Lu<sup>1</sup>

(1 Shenzhen Power Supply CO., LTD, Shenzhen 518000, China, 2 Research Institute of Information Technology, State Key Laboratory of Information and Technology of Tsinghua University, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With development of information technology and high-tech companies, power requirements have turned from quantity to quality. Power quality issues are becoming more essential for power companies. Existing power quality standards are described by stable or transient states of current and voltage, from a perspective of power supply. In practice, it is up to customers' sensitivity and actual experiences for evaluation of power quality. In this work, power experience is proposed as a composite criterion of both existing power quality standard and related customers' information. From a perspective of customers' experience, the concept, features, and standards are proposed for power quality of experience. A case study from Shenzhen Power

Company is given, demonstrating that power quality of experience is more feasible in actual work for power quality evaluation.

**Keywords:** power quality, power experience, customers' sensitivity, power experience assessment

## 一、介绍

我国电力行业经过几十年的发展,终于基本上摆脱了长期供电短缺的局面,开始逐渐关注电能质量方面的问题。近年来,伴随着现代工业和经济的发展,计算机、电力电子设备等敏感负荷在各个行业广泛应用,导致电力用户对电压暂降、电压骤升、短时中断、谐波等电能质量问题非常敏感,单个设备或元件的故障可能造成极大的经济损失<sup>[1-3]</sup>。根据近年统计数据,深圳电网电能质量的主要问题有电压偏差、电压波动和闪变,其中暂态电能质量(暂升、暂降、中断)问题发生最为频繁。2010至2012年因电能质量问题引起的大客户投诉及供电公司的反馈,事故原因为电压暂降的事件数量占15/21,负荷类型大多为半导体、精密模具等敏感用户。

作为基础设施来提供服务,服务质量(Quality of Services, QoS)一直是被关注的问题。服务质量是产品生产的服务或服务行业满足规定或潜在要求(或需要)的特征和特性的总和[4]。比如在信息通信技术领域,与服务质量相关的特征量包括通信延迟、丢包率等等[5]。近年来,研究人员发现服务质量并不能在全面刻画服务的特征,尤其是从用户的角度,好的服务质量并不一定导致好的用户体验。于是提出了体验质量(Quality of Experience, QoE, QoX)的概念,是客户对服务商整体满意度的衡量。体验质量与服务质量密切相关,但又不尽相同。比如在信息技术领域服务质量体现可测量、改进和有保障的硬件及软件特征。相比而言,体验质量代表用户客观及主观满意度[6]。

本文借鉴信息技术领域的发展经验,将体验质量的理念引入电能质量研究领域并提出电能体验的概念,总结了其特征,并综合现有电能质量评价标准和相关用户敏感度分析,建立电能体验质量的指标体系。电能体验质量不单单取决于供电质量,还和用户敏感程度紧密相关,因此在实际工作中更加具有指导意义。

## 二、电能质量评价体系

当前对于电能质量评估方法的研究可以按不同视角建立如下的分类体系:按指标内容可分为单项评估、综合评估,其中综合评估又可分为单项多指标综合评估、多项综合评估;按

结果形式可分指标量化评估、等级评估；按空间层次可分监测点评估、系统评估；按应用服务可分规划评估（IEC 系列）、兼容评估（IEC 系列）。

一般地说，针对某一具体评估内容，“指标体系+评估方法=评估体系”。电能质量评估内容多，而每项的评估指标、方法又各不相同。因此应该先对各项电能质量问题分别建立评估子体系，各子体系有自己的指标和评估方法且彼此之间相对独立。同时还应该建立综合评估体系，结合各个单项指标，运用恰当的综合评估方法，作综合评估[7]。最后根据各单项指标的评估子体系的评估结果以及综合评估的结果对电能商品进行经济管理，最终实现电能的按质定价。

### 三、用户敏感度分析

在实际应用中，根据用电负荷不同的特性以及对电能质量的要求与敏感度，一般将用电负荷分为普通负荷、敏感负荷。一些电力系统用户使用了大量的敏感负荷，将其称为电能质量敏感用户。电能质量问题的客观存在和敏感负荷的敏感特性导致敏感用户的电力使用存在巨大风险。对于这类用户，即使出现轻微的电能质量问题，也会导致严重的经济损失。因此，对敏感用户进行敏感度评估和分类，有利于电力企业和敏感用户降低供用电风险、技术改造、差异化定制电力等有重要意义。

目前，我国的国家标准和行业标准均没有量化地规定敏感用户的敏感度指标，行业内也没有制定明确的敏感用户评估和分类方法。本文提出了一种电能质量敏感用户评估和分类方法，在电能质量评价体系的基础上，对敏感用户进行敏感度评估和分类。如图 1 所示，本文对用户进行负荷敏感度评估具体包括以下步骤：

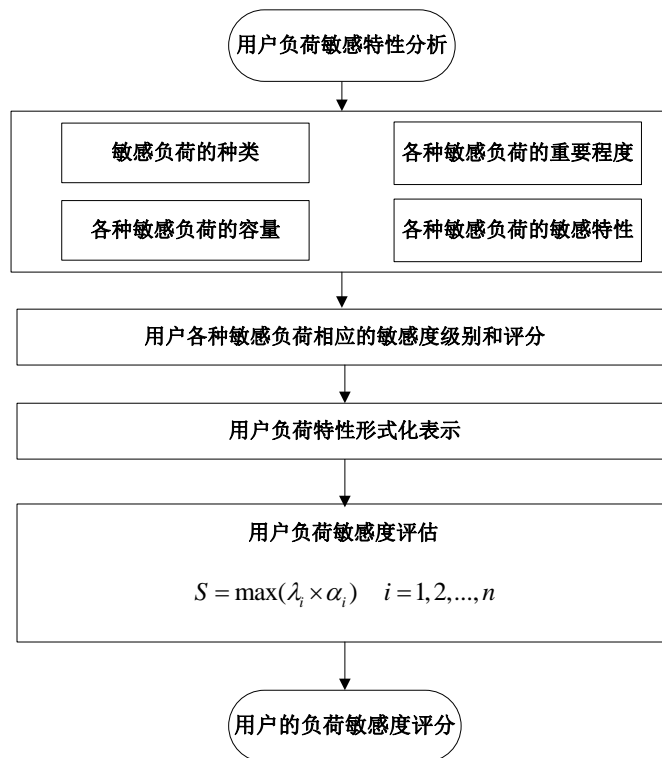


图 1 用户负荷敏感度评估

Figure 1. Customers' Load sensitivity assessment

(1) 用户负荷敏感特性分析。根据供用电合同或用户调研结果获取用电用户所有使用的敏感负荷信息，然后分析确认敏感负荷的种类、各种负荷对用户的重要程度、各种敏感负荷的敏感度等信息。

(2) 对于不同的电能质量问题，确定用户各种敏感负荷相应的敏感度级别，并转化为敏感度评分。负荷敏感度评分与敏感度级别之间的关系如下：

I 级：100%

II 级：80%

III 级：60%

IV 级：40%

V 级：20%

(3) 将以上问题形式化为以下符号： $S$  为用户负荷敏感度， $n$  为用户所包含的敏感负荷的种类数， $i$  为敏感负荷类型标识符， $\lambda_i$  为敏感负荷类型  $i$  对于用户的重要程度， $\alpha_i$  为敏感负荷类型  $i$  的敏感度评分。

(4) 根据用户敏感负荷的种类、各种敏感负荷对用户的重要程度以及各种敏感负荷的敏感特性等信息，按照如公式 (1) 所示的方法得出用户的负荷敏感度评分。

$$S = \max(\lambda_i \times \alpha_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{式 (1)}$$

根据式 (1) 可知, 用户包含多种敏感负荷, 负荷的敏感度和对于用户的重要度两者的乘积, 决定了用户的负荷敏感度评分。计算这种乘积最大的结果作为用户的负荷敏感度评分。

#### 四、电能体验及其指标体系

##### 1 什么是电能体验

体验质量 (Quality of Experience, QoE, QoX) 是客户对服务商整体满意度的衡量。体验质量与服务质量密切相关, 但又不尽相同。服务质量体现这样一种概念——可测量、改进和有保障的硬件及软件特征。相比而言, 体验质量代表用户客观及主观满意度。体验质量范例可应用于任何与消费者有关的业务或服务, 常被应用于信息技术及消费电子领域。

##### 2 电能体验质量的相关特征

某种程度而言, 电能体验是依赖用户的, 因为一些客户比另一些更敏感, 所以相同的电能质量会导致不同程度的电能体验。体验质量并非总能通过量化进行界定, 但任何企业都希望将自身的用户体验质量最大化。电能体验质量评价可以通过对大量用户进行民意测验或抽样调查得出, 但我们的研究还是希望能从中抽取可量化的特征。

信息通信领域体验质量的主要因素包括成本、可信度、效率、隐私权、安全性、用户友好界面和用户信心。这里我们提取的影响电能体验质量的量化特征主要是上节介绍的用户负荷敏感度分析的相关结果。对于电力企业, 最有意义的结果还应当包括是用户的投诉次数以及用户主观的电能体验。

##### 3 电能体验质量指标体系

现有电能质量标准体系主要以供电质量为基础, 对于电能质量好坏的判断通过电网电压、电流稳态和暂态等方面的量化指标进行描述。例如, 对于电压暂降问题, 目前供电方通常是以发生电压暂降事件的次数作为供电质量的评价标准。但是, 在实际应用中电能质量的好坏更多取决于用户的负荷敏感程度和实际使用体验。因此, 本文以对用户敏感度的定量分析为基础, 综合现有电能质量标准和相关用户敏感度信息, 建立了电能体验质量的指标体系。

本文用户电能体验质量的指标体系综合了供电质量指标和用户指标, 其中用户指标主要包含用户投诉、用户负荷敏感度和用户电能体验调研等方面。

①用户投诉次数 ( $M$ ): 是指供电方的客户服务部门收到的客户投诉信息, 分析引起客户投诉的供电质量问题。

② 用户负荷敏感度 ( $S$ ): 是指用户对于某种特定电能质量问题的敏感程度。当发生该电能质量问题时, 用户负荷敏感度越高则说明它越容易出现故障。用户负荷敏感度代表用户负荷的特性, 该特性反映了电能质量出现问题对于客户的影响程度, 如表 1 所示。

③ 用户电能体验调研得分 ( $P$ ): 通过调查问卷的形式对于敏感客户进行电能体验调研, 获取某段时间内的电能质量各单项问题的客户主观评分 (1%至 100%)。调查问卷主要指标包括: 用户电能不满意度指标、用户所处行业敏感度指标、用户敏感负荷故障的经济损失指标等。用户电能体验调研中, 得分越高说明该用户的电能体验越差。用户电能体验调研得分根据调查问卷结果进行主观评定。

以电压暂降的电能质量问题为例, 表 1 给出了单独使用供电质量指标体系和使用电能体验质量指标体系来衡量电压暂降严重度的对比。使用电能体验质量指标体系需要对上述电压暂降事件次数和用户投诉次数进行归一化处理, 如式 (2) 和式 (3) 所示。

$$N' = \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \quad \text{式 (2)}$$

$$M' = \frac{M - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} \quad \text{式 (3)}$$

其中,  $N_{\max}$  和  $N_{\min}$  分别表示一段时间内所有用户供电中发生电压暂降事件次数的最大值和最小值,  $M_{\max}$  和  $M_{\min}$  分别表示一段时间内所有用户投诉的最大值和最小值。

表 1 供电质量评估体系和用户电能体验质量指标体系对比

Table 1. The comparison of power quality assessment and Power Experience assessment

指标体系	各项指标	指标权重	电能质量问题严重度评分
供电质量评估体系	电压暂降事件次数 ( $N$ )	100%	$N'$
电能体验质量指标体系	电压暂降事件次数 ( $N$ )	$\lambda_N$	$\lambda_N \times N' \times S + \lambda_M \times M' + \lambda_P \times P$ 其中, $\lambda_N + \lambda_M + \lambda_P = 100\%$
	用户投诉次数 ( $M$ )	$\lambda_M$	
	用户负荷敏感度 ( $S$ )		
	用户电能体验调研得分 ( $P$ ):	$\lambda_P$	

在用户电能体验质量指标体系中,  $\lambda_N$ ,  $\lambda_M$ ,  $\lambda_P$  分别表示供电质量指标、用户投诉指标、以及用户电能体验调研指标在体系中的重要程度。需要说明的, 用户负荷敏感度反映了电能质量问题对于客户的影响程度, 使用  $N \times S$  表示电压暂降次数对于供电质量影响, 不仅反映了电压暂降次数的多少, 还考虑了用户敏感程度的因素对于供电质量影响。例如, 同样发生

100 次电压暂降问题，对于负荷敏感度高的用户和负荷敏感度低的用户来说，其所面临的电能质量问题的严重程度是不同的。

## 五、实验结果

本文采用深圳电网 2011 年至 2012 年两个企业用户（分别为企业 1、企业 2）的供电质量中的电压暂降事件为例，企业 1 和企业 2 相关的包括电压暂降事件次数、用户投诉次数、用户负荷敏感度、电能体验调研等各项评估指标如表 2 所示。

表 2 企业 1 和企业 2 各项评估指标对比

Table 2. The assessment parameters comparison of Enterprise1 and enterprise2

企业	电压暂降事件次数 (N)	用户投诉次数 (M)	用户负荷电压暂降敏感度 (S)	用户电能体验调研得分 (P):	供电质量评估体系评分	电能体验质量指标体系评分
企业 1	5	7	100%	0.70	0.263	0.488
企业 2	12	4	72%	0.80	0.632	0.450

根据表 2 中企业 1 和企业 2 的指标，分别使用供电质量评估体系和电能体验质量指标体系来计算供电质量，比较两者在衡量供电质量高低方面的区别，两种指标的对比结果如图 2 所示。其中， $\lambda_N$ 、 $\lambda_M$ 、 $\lambda_P$  分别取值为 30%、50%、20%。

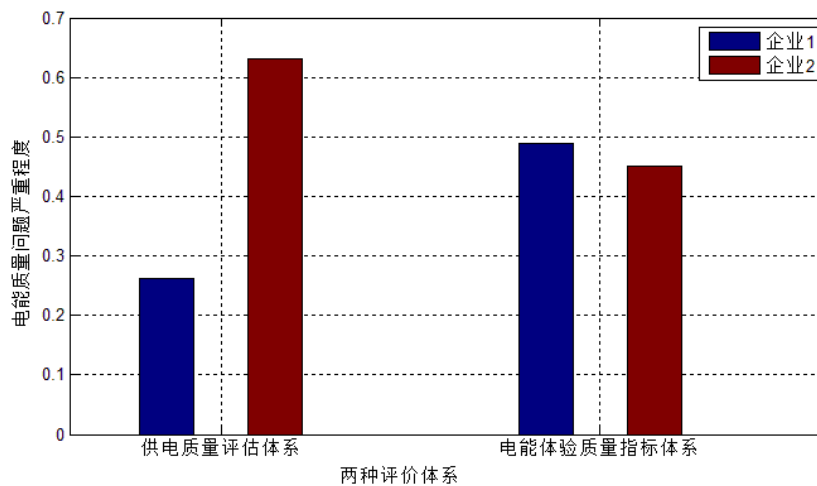


图 2 两种评价指标体系下电能质量严重程度对比

Figure 2. The result comparison of two assessment system

根据对图 2 的分析，如果只考虑供电质量的标准体系，企业 1 比企业 2 的供电质量要好。然而，使用电能体验质量指标体系，引入用户相关的各项指标信息后，企业 1 比企业 2 的电能质量评估结果反而要差。通过现场用户调研和分析结果证明，使用用户电能体验质量指标

体系来衡量电能质量的高低，能够更准确地反映供电对于用户实际工作的影响。因此，本文的用户电能体验质量指标体系能够更全面的反映供用电双方的问题和情况，在实际应用中具有较高地指导意义。

## 六、结论

本文提出电能体验的概念，并且总结其基本特征，综合现有电能质量指标体系和用户负荷敏感度分析，提出电能体验质量的评价指标体系。本文结合深圳电网电能质量监测数据和企业用户信息分析，指出使用电能体验质量指标体系能够更准确地反映供电对于用户实际工作的影响，具有较高地指导意义。

本文提出的电能体验的概念还是一个较新的领域，虽然在信息通信等领域体验质量已经成为广为关注的研究热点，在电能质量方面关注体验质量的还不多见。未来工作包括进一步提炼与电能体验质量相关的主要特征，可以包括用户内部和环境因素等多方面，以期不断健全完善电能体验质量评价指标体系。

## 致谢

国家 973 基础研究计划(2013CB228206)；国家自然科学基金(61233016)。

## 参考文献：

- [1]韩英铎,严干贵,姜齐荣,黄民聪. 信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术[J]. 电力系统自动化, 2000. 24(19): 1-7.
- [2] 肖湘宁.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社, 2004: 1-30.
- [3] 陶顺.现代电力系统电能质量评估体系的研究[D]. 华北电力大学博士论文.河北: 华北电力大学, 2008.
- [4] 胡建强, 李涓子, 廖桂平.一种基于多维服务质量的局部最优服务选择模型[J]. 计算机学报, 2010. 33(3): 526-534.
- [5]林闯, 李寅, 万剑雄.计算机网络服务质量优化方法研究综述[J]. 计算机学报, 2011. 34(1): 1-14.
- [6]林闯,胡杰,孔祥震.用户体验质量 (QoE) 的模型与评价方法综述[J]. 计算机学报, 2012. 35(1): 1-15.
- [7] 吴杨, 肖湘宁.电能质量评估初探.2003 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十九届学术年会论文集, 成都:西南交通大学, 2003:1722-1727.

收稿日期：2013-06-30

张华赢（1981），男，黑龙江大庆人，工程师，硕士，从事电能质量监测治理和高电压技术研究工作。

高田（1982），男，山东滕州人，博士后，从事数据挖掘技术、分布式计算技术及其在电能



质量领域的应用研究，(Tel) 0851-5592176 (e-mail) gaotian777@ gmail.com。

姚森敬（1969），男，广东潮州人，高级工程师，硕士，从事电能质量综合管理和高电压技术研究。

史帅彬（1983），男，山东栖霞人，工程师，硕士，从事电能质量监测治理和综合管理研究。

余鹏（1981），男，湖北咸宁人，工程师，硕士，从事电能质量检测治理技术研究。

曹军威（1973），男，河北乐亭人，博士，研究员，从事分布式计算技术及其在能源电力行业的应用研究。

许延祥（1975），男，河北抚宁人，博士后，从事数据挖掘技术及其在电能质量领域应用研究。

黄志伟（1972），男，云南大理人，博士，高级工程师，从事电能质量综合管理、配网自动化研究。

卢旭（1988），男，重庆人，本科，从事电能质量综合管理与应用研究。