

城市电网电能质量综合治理研究

胡子珩¹, 韩英铎³, 姚森敬¹, 黄志伟¹, 曹军威², 张华赢¹, 余鹏¹, 史帅彬¹, 王淼²

(1.深圳供电局有限公司, 深圳 518000, 2.清华大学信息技术研究院, 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084, 3.清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

基金资助项目: 国家 973 基础研究计划(2013CB228206); 国家自然科学基金(61233016); 中国南方电网有限责任公司科技项目 (K-SZ2012-026)。

摘要

研究目的: 研究城市电网电能质量的主要问题和对策, 为城市电网综合治理研究的示范工程和应用推广提供依据。

研究方法: 以深圳市为典型代表, 分析城市电网电能质量工作的现状、问题和紧迫性; 研究电能质量工作在机制体制、管理结构、标准规范、技术路线以及落实实施等各个层面的问题; 了解电能质量从监测、分析到治理、评估等各个环节上的相关措施与对策。

研究结果: 提出城市电网电能质量综合治理规范化、一体化、定制化、差异化解决方案, 整合调研监测、高级分析、装置研制、效果评估等城市电网电能质量综合治理相关的各个环节, 开发城市电网电能质量综合治理一体化平台, 研制中低压电网侧和用户侧电能质量综合治理装置, 产生预期的经济效益和社会效益。

结论: 电网中非线性负载、冲击性负载和不对称性负载不断增加, 电网电能质量问题日益突出。同时, 城市电网集中负荷区各种精密、敏感的生产设备对传统的电网电能质量提出了更高要求。本文全面讨论了城市电网电能质量综合治理的思路和技术方案。

关键词

城市电网; 负荷中心; 电能质量; 综合治理; 一体化平台; 电压暂降

Synthetic Control of Power Quality in a City Power Grid

HU Ziheng, HAN Yingduo³, YAO Senjing¹, HUANG Zhiwei, CAO Junwei², ZHANG Huaying¹, YU Peng¹, SHI Shuaibin¹, WANG Miao²

(1. Shenzhen Power Supply Co. Ltd., Shenzhen 518000, China. 2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China. 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

This work was supported by grants from the National 973 Basic Research Program(2013CB228206), National Natural Science Foundation of China (61233016) and China Southern Power Grid Co., Ltd (K-SZ2012-026).

Corresponding author: CAOJunwei

Tel:+86(10)62772260

E-mail: jcao@tsinghua.edu.cn

Abstract

Objective:This work is focused on power quality issues in a city power grid.Synthetic control of power quality is becoming critical in many cities in China, so a demonstrationengineering project is necessary.

Methods: Shenzhen is a typical load center in south China. This work provides the status, issues and necessity of power quality control in a city power grid. The related aspects include management structure, standard and regulations, technology roadmap, etc., which should cover all procedures from monitoring, data analysis, control, to evaluation.

Results: A complete solution to synthetic control of power quality in a city grid is proposed in this work. Key features include regulations, completeness, customization, and differential design, covering all procedures including monitoring, analysis, facility development, and effectiveness evaluation. An all-in-one platform is implemented for synthetic control of a city power grid. Power electric facilities are developed for both distribution and demand-side control. Economic and social values are finally investigated.

Conclusion:With the increasing of non-linear, burst or un-balanced load, power quality issues in the grid is becoming important. In a load center like a city power grid, many precise and sensitive facilities require higher power quality. In this work, synthetic control of power quality in a city power grid is investigated and related ideas and technology are discussed in details.

Keyword

City Power Grid; Load Center; Power Quality; Synthetic Control; All-in-one Platform; Voltage Sag

0 引言

随着近些年来我国电力事业的快速发展,装机容量的大幅度提升,供需矛盾已经逐渐不再是电力系统发展的主要矛盾。电网中非线性负载、冲击性负载和不对称性负载不断增加,同时,信息时代各种精密、敏感的生产设备对传统的电网电能质量提出了更高要求,这些都使得电能质量成为日益凸显的主要问题。

大型城市电网一般是负荷集中区域,近年来,各类微电子、半导体、生物医药、精密制造、大型金融数据中心等敏感用户对电网的供电电能质量提出了更高要求。对供电企业而言,电能质量问题既是挑战,也是机遇,电网中大量敏感负荷也是供电企业潜在的高端用户,对高品质供电有着强烈需求。

作为全国第四个负荷过千万的城市,深圳市的用电量甚至可与一个普通省份用电量相比较,全市(蛇口除外)供电面积 1952.84 平方公里,2012 年最高供电负荷达 1367.5 万千瓦,是全国供电负荷密度最大、供电可靠性领先、具有省级电网规模的特大型城市电网。深圳地区既有大量电能质量污染型负荷,同时又是全国高新技术产业最为密集的区域之一。

全面掌握电网的电能质量状况,定量分析电能质量对供电网和用户的影响,规范配电网电能质量监测和治理措施,同时提供能满足高端用户的高品质电能质量需求的优质供电服务,已成为以深圳为典型代表的大型城市电网亟待解决的问题。

本文通过对深圳电网电能质量监测数据进行定量分析,对重要敏感客户进行调查研究,提出深圳电网电能质量综合治理解决方案,对于改善深圳

电网电能质量现状具有现实意义,示范工程项目的实施具有指导意义,大型城市电网的综合治理研究具有标志示范作用,进而不断提升电力企业的服务水平,产生经济和社会效益。

1 深圳电网电能质量现状及问题

1.1 电能质量监测数据情况

深圳电网现有电能质量监测体系已经初具规模,目前已在主网 147 个变电站安装了电能质量监测终端 652 台,占变电站总体覆盖率达 70.3%。

从深圳电网电能质量监测系统 2009 年至 2011 年统计的数据来看,在反映稳态电能质量的五大类指标中,系统频率和三相电压不平衡度的合格率较好,基本都为 100%,其它三类指标则没有这样理想,具体结果如图 1~图 3 所示。

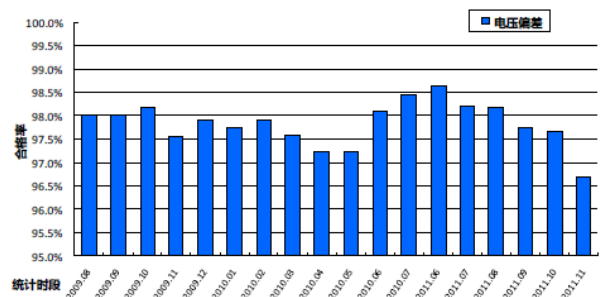


图 1 2009~2011 年深圳电网电压偏差合格率监测结果
Fig.1

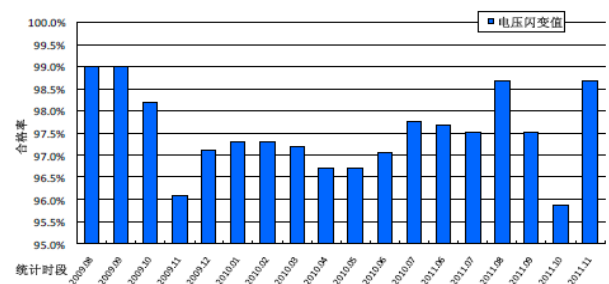


图 2 2009~2011 年深圳电网电压闪变合格率监测结果
Fig.2

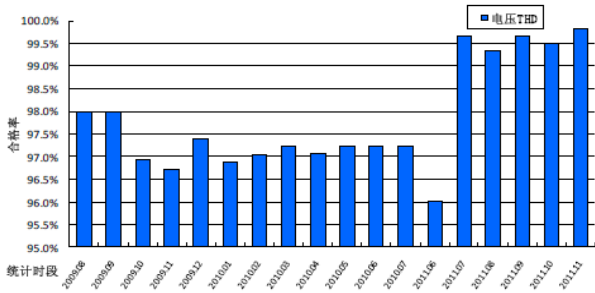


图3 2009~2011年深圳电网电压 THD 合格率监测结果
Fig.3

从稳态监测数据的统计结果来看，尽管深圳现有监测系统只监测变电站内的110kV和10kV母线，没有包含负荷侧10kV和380V进线的电能质量情况，但是电压偏差、电压闪变和谐波问题在监测结果中仍有明显的体现。

暂态电能质量事件是指供电电压有效值在短时间突然下降或上升的事件，即电压暂降（也称电压跌落）或电压暂升（也称电压骤升）；短时中断是电压暂降的一个特殊情况，是指供电电压的有效值低至0.1p.u.以下。我国颁布的7项电能质量国家标准中，GB/T18481-2001《电能质量暂时过电压和瞬态过电压》中对暂时和瞬态过电压的定义做了比较详尽的论述，但尚未有具体的暂态电能质量事件的定义和描述。^[1]

从深圳电网电能质量监测系统数据来看，暂态电能质量事件较为频繁，严重时单月可达近900次，电压暂降、电压暂升和短时中断三种暂态电能质量事件中，电压暂降发生的频率比较高，存在较为严重的暂态电能质量问题。仅以2011年7月统计表明，在135处变电站共发生819次暂态事件。图4所示为深圳某中心站2010年至2012年暂态电压事件的统计结果。

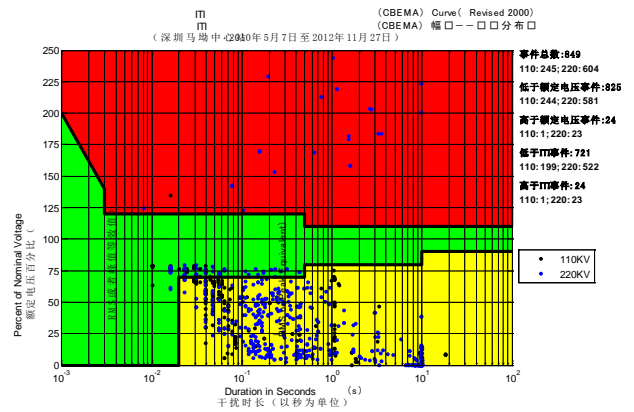


图4 深圳某中心站暂态电压事件 ITDI 分布图
Fig.4

从上述监测数据的统计和分析结果可以看到，深圳电网不仅面临一定的稳态电能质量问题（主要包括电压闪变和谐波），而且存在较为严重的暂态电能质量问题。

1.2 电能质量重要敏感用户投诉情况

作为特大型城市电网和负荷中心，深圳电网中不仅有大型工业负荷，同时各种现代化的高科技企业密集分布，这些高端工业企业越来越依赖高质量的电力供应。相对于只有停电才受影响的传统负荷，这些现代负荷对电压暂降等暂态事件非常敏感。

固然，一次电压暂降造成的损失不一定会大于一次停电损失。但现代电力系统中用户侧发生电压暂降事件的次数远大于停电次数。据统计，每年前者至少是后者的6倍以上，城市供电网络中甚至高达600多倍。^[2]

另一方面，故障引起的电压暂降虽然未造成电源与用电设备之间的电气连接中断，但敏感设备不能获得所需治理的电能，同样会影响甚至破坏用户设备或生产线的连续性工作，对用户造成的损失和危害是十分严重的。

因此，现代负荷对电能质量的要求越来越严格，对供电可靠性的需求越来越高。据国外调查：供电

质量问题中最引起人们重视的除了停电以外，电压暂降已成为主要的质量投诉原因，甚至占到相关投诉比重的 80% 以上。

从深圳供电局接到的投诉信息来看，几乎所有的大用户投诉案例都指向暂态电能质量问题，电压暂降已成为目前深圳地区用户反映最强烈的电能质量问题，造成敏感用户的生产线停运，给企业造成大量的经济损失。

1.3 暂态电能质量事件及原因分析

本文对深圳市 2010~2012 年的电能质量暂态事件分区域进行了统计分析。以深圳电网十二个中心站为单位，结合额定电压超过 IEEE 标准（500%）的电压事件、电压暂降事件发生次数、电压暂降事件低于 ITI(CBEMA)容限次数、电压暂升事件发生次数、电压暂升事件高于 ITI(CBEMA)容限次数、电压事件（含暂升、暂降和短时中断）发生次数的统计，从中找出问题最为严重的 3-4 个中心站。对重点中心站中的变电站按照电压等级等进行详细统计，找到问题较为严重的 3-4 个变电站，并分析事件原因。对重点变电站按照用户和负荷类型等进行调研，结合调度等运行数据对其中的电能质量事件进行分析，找到其中导致用户投诉的主要原因。

暂态事件的发生原因主要有短路故障、线路跳闸、雷电冲击、操作过电压等。系统内造成严重电压暂降的主要原因是短路故障，由短路引起的电压凹陷域范围大，往往可以波及几公里甚至几十公里之外的负荷正常运行^[2]。而且一起严重的短路故障可能会产生多起暂态事件，比如 2009 年 5 月 220kV 西乡站 3 号主变发生故障，当时深圳电网电能质量监测系统几乎所有终端都监测到三相电压凹陷事件，事件分布遍及公明、西乡、鹏城、欢乐

下辖所有变电站。

根据深圳电能质量监测系统记录的数据的情况来分析，暂态事件与雷电活动也有密切的关系，一次典型的案例分析如下。

2010 年 5-6 月份，深圳地区电能质量暂态事件异常增加，数量从 1-4 月平均每月 42 次，突增到 5 月的 683 次、6 月的 297 次，涉及的变电站数量从月均 23 个增加到 5 月的 104 个、6 月的 32 个，并且主要发生在宝安、龙岗两区，5 月份两区发生暂态事件的变电站数量已经占到两区变电站总数的 69.5%。

在 2010 年 5 月，深圳电网没有发生影响较大的短路故障，经过查询实时数据中心 PI SCADA WEB 系统，相应站点在暂态事件发生的时间段，并未出现跳闸事故。同时深圳电网 5 月份的停电操作次数也跟 1-4 月基本相同，可以初步排除由短路故障、线路跳闸、停电操作三种原因引起暂态事件突增的可能，考虑深圳 5 月份出现了较强烈的雷电活动，推测 5 月份发生的电能质量暂态事件与雷电活动有一定关系。通过对记录数据进行仔细的统计分析后，确认了这一推断，并得出以下结论。

1) 从日期、时段、地域、正负地闪对比结果可以看到，5 月份深圳电网暂态事件发生的原因与雷电活动有密切的关系，即雷电活动导致了暂态事件的增多。

2) 电网的暂态事件是随着地闪的次数增多的，但是不存在确定的比例关系。例如，2009 年 5 月的暂态事件次数 99 次，是 2010 年 4 月暂态事件 55 次的 2 倍左右，但是地闪次数却是 30 多倍。

3) 从 2009 年 1 月监测以来，发现龙岗、宝安两区的电能质量暂态事件占全部暂态事件的 80%

以上，而特区内暂态事件相对较少，说明采用电缆输电可以有效减少雷电活动对暂态事件的影响。

结合重点变电站主接线图、暂态事件记录信息，调度运行数据记录等，对典型暂态事件进行了进一步的详细分析，得到三种引起电压暂降事件的主要原因：由 10kV 线路问题引起；由用户侧的设备故障问题引起；由 220kV 输电线问题引起。一次典型的案例分析如下。

220kV 宏图站在 2011 年 12 月 28 日 17 点 29 分至 36 分的时间段内，其 10kV2AM 母线（A、B、C 三相）陆续发生电压暂降和短时电压中断事件多达 61 次，电压降低幅度较大，最低甚至跌至 5.614%。根据调度数据的记录，其原因为用户侧避雷器损坏。宏图站采用消弧线圈接地方式，这种接地方式允许 10kV 馈线在发生单相接地故障时继续运行一段时间（通常一小时以内）。根据调度数据中的记录，故障发生后并没有马上切除故障线路，因此在这段时间内故障线路可能发生多次暂态电弧对地放电。避雷器污闪和阀片侧闪会引起避雷器通过暂态电弧通道多次对地放电，从而引起对应 10kV 母线的多次电压暂降。

此外，大量的实践经验表明，开关操作也是造成暂态事件的一个重要原因。由此可见，暂态电能质量事件的形成原因非常复杂，且具有一定的不可避免的特性。

1.4 城市电网电能质量问题总结

结合以上对深圳电网电能质量问题的数据分析与调研结果，本文总结了一般意义下城市负荷中心电网可能存在的问题。

（1）机制、管理以及标准规范的缺失

虽然电能质量问题的治理是一个涉及到电网、

用户等多方的综合治理和协作治理的过程，电网公司的确在其中起到核心作用。目前电网公司在电能质量相关工作还没有形成行之有效、统一明确的管理架构，往往需要客户服务、生产计划、技术研发等多方面的协调配合。

从中国电能质量标准制定、修订过程及内容看，2000 年以后基本参考 IEC 相关标准，但修订速度较慢，并缺少全面完整地规范电能质量测量、统计方法的标准。目前就电能质量监测及评估方面，深圳还没有出台统一的规范标准，虽然国家标准在包括供电电压偏差、电压波动和闪变、公用电网谐波、三相电压不平衡、电力系统频率偏差、暂时过电压和瞬态过电压、监测设备通用要求以及公用电网间谐波在内的八方面都出台了相应标准，但涉及到电能质量分析与评估更多方面的内容则缺乏细致而又统一的技术规范，尚未形成可以指导实际操作的规范，使得问题的界定和评估没有可操作的指引，增加了电能质量综合治理的落实难度。

（2）重监测轻分析综合

目前国内有部分省网已陆续开始了电能质量监测系统的建设，有的已初具规模。建设模式主要分为引进成熟系统和自主研发两类，上海、华北、云南等电力公司采用了美国电科院成熟的 PQView3.2 平台并进行二次开发，已相继建立了网络化的电能质量监测平台；广东、浙江、江苏电力公司采用自主研发的方式，开发了区域电能质量监测网，监测规模已达到上千个监测点。

目前各类电能质量监测系统基本都能较好地实现基础电能质量数据的存储、展现和初步分析等功能，主要功能为巡检、远程操作、数据查询分析、报表统计等，缺乏基于数据挖掘功能支撑的高级分

析应用。在配网侧安装有电压质量监测仪等终端，能够监测电能质量，信息存储在终端中，没有与主网的监测系统有效集成。在用户侧对于重要敏感负荷没有进行有效的监测，电能质量事件主要依靠客户投诉来处理。

针对海量暂稳态监测数据的高级分析应用方面尚有所欠缺，对电网运行分析的指导性作用较为有限，难以在事故分析、风险评估中发挥更大的作用。整体而言，对于针对电能质量大数据分析技术研究还不够深入，实用性的高级分析缺乏在线实时数据和计算的支撑，阻碍了电能质量高级应用的发展。

（3）综合治理措施不足

可以结合电力系统的电能质量问题和 DFACTS 技术的最新研究进展，借助于推动新型电力电子技术在配电网中的应用来实现提高电网供电电能质量的目的，实现重要区域和用户电能质量问题的综合治理。

一方面是区域电能质量综合治理，在电能质量事件频发和敏感用户集中的区域，通过集中方案治理，提升整个区域的电能质量水平。

另一方面是对于敏感用户可以定制综合治理方案，统一解决谐波污染、无功功率、三相不平衡、电压波动、闪变、暂升、暂降等多种电能质量问题。

以上综合治理方式可以相互配合，形成既经济又高性能的差异化解决方案。下面详细介绍相关措施。

2 城市电网电能质量综合治理措施

2.1 总原则

（1）规范化

应该研究已有国家标准以及 IEEE、IEC 的组织

机构制定的监测与评估系统相关技术规范，结合城市配电网实际运行情况，利用建立的电能质量监测系统分析与评估方法，完善已有标准未规范内容，制定行业规范或地方标准。从类别上划分为基础标准、产品标准、方法标准、管理标准等几大标准，分别对几个标准进行研究。最终建立大型城市电网电能质量工作标准体系。

（2）一体化

电能质量监测、分析、治理、评估几个重要环节不是孤立分割的，需要一体化的运行管理平台做支撑，将各个环节的数据共享。监测数据是高级分析的基础，分析结果又是治理方案定制的依据，治理效果的评估也要也监测、分析、仿真等多方面的数据为基础。

同时电能质量系统也不应该是一个孤立的系统，要和电网的调度运行、客户服务等管理系统相衔接。电能质量系统与电网的调度运行关系密切，根据调度运行的数据可以深入了解问题发生的原因，同时调度运行如果能考虑对电能质量的影响，客户服务能将电能质量相关内容纳入其中，会大大提升电网公司管理服务的水平。

（3）定制化

根据之前的阐述，电能质量问题错综复杂，很难有一个统一的治理模式。往往为了经济性和高效性并存，需要根据实际情况采取定制化的解决方案。

电能质量治理装置的设计、配置和参数等可以根据治理要求的不同而差别很大。以电压暂降为例，相应治理装置的电压等级、容量和治理负荷对象的情况有密切关系，装置的储能等相关系统的配置取决于治理对暂降深度、持续时间等方面的要求，因此必须进行细致的经济性分析，在满足治理要求的

前提下最大限度的降低治理成本。

(4) 差异化

综合治理的方式是要根据实际情况进行差异化设计的，是用户侧多种电能质量问题的统一治理还是上层电网侧针对特定电能质量问题的区域化治理，也可以两者密切结合或相互配合。综合治理方案的差异化和定制化都是为了满足治理要求的前提下最大限度的降低治理成本服务的。

2.2 调研监测

要解决深圳电网当前面临的突出问题，提升全网电能质量水平，必须从监测、治理等多方面入手。在监测系统方面，深圳现有电能质量监测点的布局和选点不尽合理，现有监测终端都安装在变电站的110kV和10kV母线上，没有针对大型污染型负荷和重要的敏感负荷进行专门的监测。

一方面，布局上的不完善导致监测系统无法真实、有效的反映用户侧感受到的电能质量的实际情况，影响供电部门对于全网电能质量真实水平的判断。另一方面，由于缺乏针对大型用户（包括污染源用户和电能质量敏感用户）的监测点，既不利于分析电能质量事故的发生原因，也不利于在电能质量事故中划分供电企业和用户的责任，降低了双方开展治理工作解决电能质量问题的积极性。

此外，随着监测系统规模的日益扩大，现有系统架构在设备兼容性、网络扩展性以及上层应用方面存在的不足逐渐显现。在监测设备规范、通信协议、组网方式方面，国内尚无统一技术标准，不同厂商的设备无法相互兼容。构建符合特大型城市电网应用需求的电能质量监测网络及相应的标准体系，是深圳电网需要重点开展的工作。

2.3 高级分析

研发覆盖配电网及用户终端监测的，集合数据采集、高级应用分析、运行指导、评估预警、治理效果评估的综合一体化平台。开发基于暂降、暂升、中断等评价指标的电能质量暂态事件分析模块；基于频率偏差、电压偏差、电压波形及闪变、三相不平衡度、暂时或瞬态过电压、谐波及间谐波等评价指标的电能质量稳态分析模块。

结合海量数据挖掘技术、人工智能方法和信号处理算法等，基于大数据分析计算平台，研究电能质量评价指标的计算方法以及对电能质量的影响。研究监测点的关联规则及传递特性，为电能质量的评估预警和综合治理提供有效的解决方案。

系统总体架构设计如图10所示。

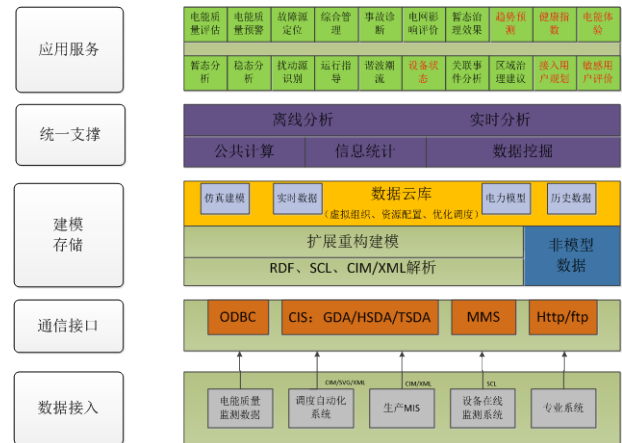


图5 一体化平台总体架构图

Fig.5

2.4 装置研制

目前，以 DFACTS 为代表的现代电力电子技术是解决配电网电能质量问题最有效的手段。典型的 DFACTS 设备包括有源滤波器（APF）、动态无功补偿器（DSTATCOM）、动态电压恢复器（DVR）以及统一电能质量控制（UPQC）等。

在 DFACTS 家族中，动态电压恢复器（DVR）主要用于解决配电网的暂态电能质量问题。动态电压恢复器串联于交流电网和敏感负荷之间，电网电

压正常运行时 DVR 的输出处于旁路状态，由电网直接给敏感负荷提供电压；当发生电网电压暂降或暂升时，DVR 可以在毫秒级的时间内对电压凹陷或凸起进行有效补偿。

由于 DVR 只在电网电压发生短时凹陷或凸起时提供负荷满足正常电压所需的功率消耗，所以效率较高，成本也低于 UPS 等装置。DVR 良好的动态性能和很高的性价比使得它成为治理暂态电能质量问题最经济、有效的手段。^[3]

1996 年，美国 Westinghouse Electric Corporation 在西部电子展览和会议（Wescon）上首次发表了 DVR 研究报告及实验结果。同年 8 月，世界上第一台 2MVA 的 DVR 在美国北卡罗来纳州 Duke 电力公司投入工业运行。自此之后，DVR 的研究及应用拉开序幕。ABB 公司于 2000 年在以色列一家著名的微处理器制造厂投入运行的两套 DVR 是当今世界上最大的，单套容量均为 22.5MVA，该 DVR 的响应时间小于 1ms，可补偿持续时间达 500ms 的三相电压凹陷的 35% 和单相电压凹陷的 50%。^[4]

根据应用场合的不同，DVR 可分为中压 DVR 和低压 DVR。低压 DVR 用于 380V 配电网，一般用于向特定的敏感负荷提供高品质的电力供应；中压 DVR 用于 10kV~35kV 电网，用于对大型负荷或重要的片区的暂态电能质量事件提供有效防护。目前，低压 DVR 国内已有相关产品，中压 DVR 在国内尚处于工业样机阶段，尚未见成熟产品的报道，清华大学等研究单位在这一领域已开展了大量的工作。

有源电力滤波器（APF）是 DFACTS 家族中专门治理谐波污染的设备。APF 通过输出与负载谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流，来使得流入

电网的电流、电压恢复为 50Hz 的纯正弦波形；有源滤波器也可以发出基波无功电流，提高负载功率因数。

1982 年日本的 Akagi 等人提出了瞬时无功功率理论，同年世界上第一台容量为 800kVA 的并联型有源滤波器投入工业应用。^[5]此后，许多国际著名公司均开发了相关 APF 产品，如 ABB、TOSHIBA、SIEMENS 等，单台容量较多的为数百 kVA 的并联 APF 和无功补偿器。这些产品主要应用于配电网、电弧炉、变频驱动、建筑物供电系统、铁路牵引、水处理等的无功电流补偿和谐波抑制，部分兼有电压快速调节目的。近年来，我国在 0.4kV 等级的低压 APF 的研究上取得较大成果，但在 10kV~35kV 等级的中压 APF 的研究和应用上仍处于起步阶段。

1990 年，Fujita H 等人提出了 APF 与无源滤波器（PF）串联后再与电网并联的混合型运行方案。APF 为电流控制电压源，产生与线路中谐波电流分量成比例的电压。由于有源滤波器串联在 Y 型联接的 PF 的中性点与地之间，便于保护和隔离，因此更适用于高电压系统。这种混合型滤波器（HAPF）集成了 APF 优良的补偿性能和 PF 价格低廉的优点，且很容易推广至 10kV 以上中压电网，因而在配电网的谐波治理中具有很好的应用前景。

配电网动态无功补偿器（DSTATCOM）是抑制冲击性负荷造成电压闪变问题的主要手段。DSTATCOM 的发展得益于动态无功补偿装置在输电领域的发展和应用。世界各国在相继研制成功大容量 STATCOM 同时，DSTATCOM 应用获得了大的发展。第一台实验性的容量为 $\pm 1\text{MVar}/13.2\text{kV}$ 的 STATCOM 装置，采用 GTO 和采用 2 重化变压器耦合的 DSTATCOM，由美国 EPRI 与西屋公司开发研

制，1989年10月在纽约州投入运行；西门子公司1995年开发 DSTATCOM、1998年在美国德州的 SMI 投运了一套 ±80MVar/138kV 的装置，与 60MVar 的 FC 并联，主要用于电弧炉负荷的闪变、谐波和功率因数校正；1998年，美洲电力公司(AEP)安装了一台 2MVA 的 DSTATCOM，使被补偿钢厂的电压闪变由过去的 8%~12%降到 4%以下；2000年2月，三菱公司安装了它在美国的第一台 5MVA/4.16kV 的 DSTATCOM 用于抑制附近废铁再生厂的电压闪变。^[6]

在国内，最早的大型 STATACOM 工程由清华大学于 1999年在河南朝阳投入运行；2006年，“上海电网黄渡分区 ±50MVA STATCOM 示范工程”标志着国内高压大容量 STATCOM 技术已经逐渐成熟。2011年，同样由清华大学参与完成的“南方电网 ±200MVA STATCOM 示范工程”在东莞正式投运，该工程是目前世界上容量最大的动态无功补偿装置。

在 DFACTS 家族中，串联型补偿装置（如 DVR 等）适合解决电压质量问题，并联型补偿装置（如 APF、DSTATCOM 等）适合解决电流问题。这两种类型的调节装置都只针对电能质量问题的一个方面进行治理。在有些条件下，单一功能的补偿装置难以满足电能质量综合治理的应用需求。

日本学者 H.Akagi 在 1998年首次提出统一电能质量调节器 UPQC (Unified Power Quality Conditioner) 的概念，^[7]结合了电压型、电流型补偿装置两者的功能，具有综合的调节功能，被公认为是极有发展前途的一种串一并补偿调节装置。^[8]

在 UPQC 的补偿策略中，通常是将串联作为电压源来补偿电网基波电压和谐波电压，而并联部分

则作为电流源来吸收负载谐波电流并调节直流母线电压。通过这样的补偿策略，负载端的电压变为标准的纯正弦电压，并且电网输入电流也变为与电网基波电压同相的纯正弦电流。对电网而言就好像给一个纯电阻负载供电一样。

UPQC 能够综合实现特定负载的串联补偿和并联补偿，因此，也能够统一调控某一片配电区域的供电方式和电能质量。例如：可通过 UPQC 的直流母线直接向配电网中的直流负荷供电，也可通过 UPQC 的交流侧向交流负荷供电；在配电电压出现暂降或是短时中断时，可维持负载端的电压为额定值；可滤除非线性负载产生的谐波电流，防止其注入系统后影响其他用电设备；还可提供负载所需要的无功支撑，提高负载的功率因数等等。

现代电力电子技术的发展为配电网电能质量治理提供了有力的技术支持，DFACTS 技术的推广应用能够为深圳电网提升全网电能质量水平提供切实有效的解决方案。

2.5 效果评估

电能质量治理效果的评估不仅仅取决于电能质量相关标准指标的提升，还有用户的敏感程度密切相关，因此治理效果评估要综合考虑两方面因素。

通常情况下，用电客户的敏感设备同时受到多种电能质量的共同影响，具有很大的不确定性。这些电能质量问题的影响结果无法直接通过叠加各单项电能质量指标影响结果来实现。因此，用电客户所属的行业类别较能客观地反映客户设备的类型、容量和工艺，以及客户负荷对于电能质量的敏感程度。

深圳电网主要的敏感设备和污染设备主要包括以下种类。

(1) 主要敏感设备

根据调研结果，深圳电网电能质量扰动敏感的负荷和行业包括以下种类：

①电能质量扰动导致半导体加工设备、数控设备需重新设置控制流程；

②电能质量扰动导致自动化控制设备出错；

③电压暂降会引起医疗器械等设备不正常工作，影响诊断、治疗、手术进行，甚至危及到病人的生命；

④电能质量扰动导致停产的更多时间是花费在整个生产线再启动上；

⑤电压暂降造成商业与民用建筑中的电梯、自动消防与报警系统中止工作；

⑥加工业、造纸业、玻璃制造业等行业，电能质量扰动导致现代化生产线突然停止意味着重启前需要数小时清除设备内的垃圾；

⑦电能质量扰动导致 IT、通讯业，计算机中心的巨大经济损失。

(2) 主要污染设备

根据调研结果，深圳电网主要的污染设备包括：

①交（直）流炼钢电弧炉（在同电压等级供电母线）；

②轧机、提升机、绞车；

③电动机的启动（特别大容量、高频度启动的电机）；

④注塑机、电焊设备、熔炉等。

敏感用户分类的主要依据是客户的敏感度和用户投诉严重程度，综合治理用户分类的主要依据是用户的敏感度级别、污染度级别和用户投诉严重程度。对以上用户分类的指标体系描述如下：

(1) 用户投诉严重程度：是指供电方的客户服

务部门收到的客户投诉信息，主要依据是用户的投诉次数和事件严重程度，评估用户对供电的不满意程度，将其作为用户治理的主要依据。用户投诉严重程度由客户服务部门根据投诉情况评估得出。

(2) 用户负荷敏感度：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。用户负荷敏感度反映了电能质量扰动可能对于客户的影响程度，一个用户可能包含多种敏感负荷。

(3) 用户负荷污染度：是指用户负荷运行时对电网注入的各种电能质量扰动的严重程度，用户可能包含多种污染性负荷。

另外效果评估的方法还因治理方案的差异化而不同，对区域整体电能质量综合评估和对单一用户电能质量提升程度的评估方法都会不同。

3 结论

结合深圳电网当前的电能质量现状以及配电网电能质量治理方面的新技术和成果，可以得出如下结论：

(1) 深圳电网现有监测系统布局以变电站为主，缺乏针对大型污染源用户和重要敏感用户的监测点，不利于全面掌握全网电能质量的真实情况，也不利于在电能质量问题中分析事故的原因，划分供电企业与用户的责任界线。

(2) 电能质量暂态事件（包括电压暂降、电压暂升和短时中断）、电压闪变和线路谐波是深圳供电局当前面临的主要电能质量问题，其中暂态电能质量问题尤为突出，是用户投诉的主要问题。

(3) 通过采用以 DFACTS 为代表的现代电力电子技术，可有效解决目前大型城市配电网面临的电压暂降、电压暂升、闪变、谐波等电能质量问题。

(4)采用定制化、差异化治理方案比较经济,中压动态电压调节器结合在低压侧采用电能质量综合治理装置进行综合治理的技术路线比较可行。

综上所述,要全面提升大型城市电网的电能质量水平,一方面,供电部门应以监测数据为依据,明确自身与用户之间,以及用户与用户之间的责任

界线,积极推动谁污染谁治理的管理措施,大力推动对电能质量污染源的综合治理工程;另一方面,电力公司应充分应用电力电子技术的发展成果,积极探索为高端敏感用户提供高品质供电服务的技术和方案,努力提升全网供电电能质量水平。

参考文献

- [1] 林海雪,徐静.电能质量国家标准介绍[J].上海电力,2005(3):221-227.
- [2] Samotyj M J, Mielczarski W, Wasiluk-Hassa M M. Electric power for the digital age[C]. 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Brazil. 2002, 1: 276-282.
- [3] 杨潮,韩英铎,黄瀚,马维新,高强,孟令宾,姜国义,徐力新.动态电压调节器串联补偿电压研究[J].电力自动化设备,2001(5):1-5.
- [4] Woodly N H. Field experience with dynamic voltage restorer system [C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000(4): 2864-2871.
- [5] 李战鹰,任震,杨泽明.有源滤波装置及其应用研究综述[J].电网技术,2004(22):40-43.
- [6] Reed G F, Greaf J E, Matsumoto T, et al. Application of a 5MVA, 4.16kV D-STATCOM system for voltage flicker compensation at Seattle Iron and Metals [C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000(3): 1605-1611.
- [7] Renz B A, Keri A, Mehraban A S, et al. AEP unified power flow controller performance. [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1999, 14(9): 1374-1381.
- [8] 姜齐荣,沈斐,韩英铎.现代电能质量控制技术[J].电力电子技术,2004,38(6):2~7.

作者简介

胡子珩



韩英铎

1938—，男，博士，教授，中国工程院院士

长期从事电力系统及其自动化以及大功率电力电子技术在电力系统中应用领域的教学与科研工作，近十余年主要致力于柔性交流输电系统技术、电能质量控制技术及广域动态安全监测与控制技术的研究

姚森敬

黄志伟



曹军威

1973—，男，博士，研究员

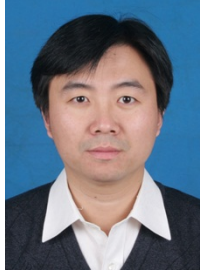
从事分布式计算技术及其在能源电力行业的应用研究

E-mail: jcao@tsinghua.edu.cn

张华赢

余鹏

史帅彬



王淼

1978—，男，硕士，工程师

从事软件工程、电能质量等方面的研究

E-mail: wangmiao@tsinghua.edu.cn