

电能质量

高级分析及应用

Power Quality Advanced Analysis
and Application

国网江苏省电力公司 组 编
李 群 主 编
陈 兵 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电能质量

高级分析及应用

Power Quality Advanced Analysis
and Application

国网江苏省电力公司 组 编
李 群 主 编
陈 兵 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书编者结合多年的现场试验检测经验和科技研究成果,以电能质量数据高级分析和应用为主线,系统阐述了电能质量的检测、监测、数据处理、高级分析、指标异常影响、电能质量高级治理与控制、电能质量经济性评估等的相关理论和应用技术。

本书适合从事电气工程和电力系统运行分析、电能质量分析治理、监测系统设计开发的技术人员和工程师使用,也可供高校从事电能质量专业研究的教师 and 研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

电能质量高级分析及应用/李群主编;国网江苏省电力公司
组编. —北京:中国电力出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-5198-0182-3

I. ①电… II. ①李… ②国… III. ①电能-质量-研究
IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 314087 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 [http: //www. cepp. sgcc. com. cn](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2017 年 3 月第一版 2017 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 488 千字

印数 0001—2000 册 定价 80.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



编 委 会

编委会主任 黄 清

编委会副主任 许海清 刘华伟 李 群

编委会成员 黄 强 王建明 李 杰 张 军

许杏桃 王 海 黄奇峰 袁宇波

刘建坤 袁晓冬 郭雅娟 陈 兵

主 编 李 群

副 主 编 陈 兵

编 写 组 史明明 袁晓冬 李国欣 吕振华 李 斌

柳 丹 罗珊珊 顾 伟 范 忠 费骏韬

张刘冬 方 鑫 贾萌萌 朱卫平 杨 雄

张宸宇 吴 楠 韩华春 吴盛军 柏晶晶

何 炎 陈 亮 杨龙月 黄文静 崔 林

李 强 孙 健 蔡冬阳 戴强晟

当前大量非线性和冲击性负荷的广泛应用,对供电系统电能质量造成了严重污染,恶化了电气设备的电磁环境。而以微电子技术、数字控制技术为核心的高度自动化和智能化设备因其敏感度高、抗扰度能力不足,对电能质量的要求越来越高。在此背景下,电能质量问题受到了更多的关注。

虽然在电能质量监测、数据分析、指标异常影响、综合评估及治理、定制电力技术等方面已取得了一定的成果,但基于常规分析方法和手段也暴露出了许多问题和局限性,主要表现在:①难以真实模拟现场实际波形,难以对监测装置性能实现全面检测;适用于智能变电站的数字式电能质量监测通信技术仍未能得到很好解决;因数据集成难度大,全网分层分布式电能质量监测系统的设计和建设处于起步阶段。②电能质量监测海量数据在线处理、系统响应性能受监测规模影响,电能质量数据集成技术、暂态事件在线监测分析还未得到有效的解决。③基于海量监测数据的电能质量指标趋势预测、扰动源识别与定位、谐波潮流分析与责任划分等的研究处于起步阶段,缺少实用化的技术手段。④电能质量指标异常对电力设备的影响机理仍不明确,电力设备对电能质量指标的耐受能力、电能质量扰动传播特性缺乏深入的研究和成果。⑤电能质量综合评估技术缺少实用化方法,经济性评估方面还处于起步阶段。⑥多 DFACTS 设备相互影响及协调控制技术、治理设备的自治能力分析研究还不深入,含定制电力的系统级仿真技术还不全面。

国网江苏省电力公司电力科学研究院电能质量研究团队长期从事电能质量技术研究和生产实践,近年来承担了多项省部级科研项目和工程建设,在电能质量先进技术与工程应用方面取得了丰硕的科研成果,积累了丰富的工程实践经验。鉴于此,研究团队经过一年多的努力,完成了这本系统论述电能质量高级分析与应用的书稿。希望通过本书的内容,使广大读者了解如何分析解决电能质量设备系统、数据分析、治理控制等方面的新问题,掌握相关知识和解决方法,能针对具体的电能质量问题进行分析和解决。

本书提出了电能质量高级分析的概念,基于电能质量测量、控制、治理等方面的基础理论和常规分析手段,阐述监测装置及系统开发的先进技术,从单一监测点扩展到全网系统,充分利用全网电能质量海量监测数据挖掘处理技术和系统级仿真技术,介绍电能质量指标趋势预测、暂态事件识别、扰动源定位、谐波潮流计算与责任划分等技术,电能质量指标异常对电力系统及用电设备运行影响及经济性评估,电能质量治理设备优化配置、协调控制、定制电力等先进技术。本书内容丰富,涵盖电能质量监测装置、监

测系统、数据分析、指标影响、评估技术、控制治理、定制电力七个领域，并结合电能质量实际问题给出了应用实例分析。

本书共分八章：绪论部分从电能质量基本概念、常规分析局限性入手，简要概述了电能质量设备系统、数据分析、治理控制三个层级的高级分析体系结构；第一章和第二章分别介绍了电能质量监测装置和监测系统，主要包括测量与计算方法、数据交换格式、指标检测波形库、监测系统架构设计、布点原则、通信协议、海量数据处理、系统级性能测试等先进技术；第三章着重介绍基于电能质量海量数据的指标趋势预测、扰动源识别定位、谐波潮流分析与责任划分等技术和方法，为电能质量治理、控制及评估提供实践依据及技术手段；第四章阐述了电能质量指标异常对电力系统运行、各类电力设备的影响机理和试验方法，提出了影响评估分析方法，同时阐述了各类用电设备电能质量发射特性和耐受能力；第五章介绍了几种实用化电能质量综合评估方法，以及电能质量经济性评估方法和流程，为有效开展电能质量问题经济性分析、责任界定评估提供借鉴；第六章和第七章分别阐述了多 DFACTS 设备间相互作用机理和影响、自治能力分析、设备级和系统级协调控制策略、定制电力园区设备配置与系统级建模仿真等内容，为优质电力园区的规划设计、设备配置及协调控制提供参考；第八章，针对多个实际案例进行了分析。

本书在编写过程中，得到了中国电力科学研究院康文斌、彭庆华、梅刚、查志鹏，国网电力科学研究院葛成余，国网冀北电力公司电力科学研究院蔡维，清华大学刘建政、曹军威、王森、梁营玉，东南大学顾伟、黄学良、曲小慧、柏晶晶、何炎，中国矿业大学李国欣、陈龙、陈亮、杨龙月，华北电力大学肖湘宁、陶顺，华南理工大学钟庆、谢运祥，全国电压电流等级和频率标委会张苹等教授和专家们的大力支持，特在此深表感谢！

由于我们的水平和经验有限，书中难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

编写组

2016 年 10 月

缩 写 词 表

A

ACSI	抽象通信服务接口	Abstract Communication Service Interface
APN	移动网络接入点名称	Access Point Name
APF	有源电力滤波器	Active Power Filter
ASD	可调速驱动装置	Adjustable Speed Drive
API	应用编程接口	Application Programming Interface

C

CVT	电容式电压互感器	Capacitor Voltage Transformer
COMTRADE	电力系统瞬态数据交换的通用格式	Common Format for Transient Data Exchange for Power System
CORBA	通用对象请求代理体系结构	Common Object Request Broker Architecture
CBEMA	计算机与商用设备制造协会	Computer & Business Equipment and Manufacture Association
CIM	公共数据模型	Common Information Model
CAN	控制器局域网	Controller Area Network
CIS	组件接口规范	Component Interface Specification
CT (TA)	电流互感器	Current Transformer
CRC	循环冗余校验码	Cyclic Redundancy Check

D

DFT	离散傅里叶变换	Discrete Fourier Transform
DFACTS	配电灵活交流输电系统	Distributed Flexible Alternative Current Transmission System

DVR	动态电压恢复器	Dynamic Voltage Regulator
-----	---------	---------------------------

E

EIA	电子工业协会	Electronic Industries Association
EJB	服务器端组件模型	Enterprise Java Bean
ESS	储能系统	Energy Storage System

F

FTP	文件传输协议	File Transfer Protocol
FACTS	柔性交流输电系统	Flexible Alternative Current Transmission Systems
FLOPS	浮点计算能力	Floating Point Number Operations Per Second
FC	燃料电池	Fuel Cell

G

GTO	可关断晶闸管	Gate Turn - off Thysistor
GUID	全局唯一标识符	Globally Unique Identifier

H

HVDC	高压直流输电	High Voltage Direct Current Transmission
HVC	混合型无功补偿系统	Hybrid Var Compensator

I

ITIC	信息技术工业协会	Information Technology Industry Council
IGBT	绝缘栅双极型晶体管	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	集成门极换流晶闸管	Integrated Gate Commutated Thyristor
IED	智能电子设备	Intelligent Electronic Device
ICD	智能设备能力描述文件	IED Capability Description

M

MCR	磁阀式可控电抗器	Magnetically Controllable Reactor
MMS	制造报文规范	Manufacturing Message Specification

O

ORB	对象请求代理	Object Request Broker
OLAP	联机事务分析	Online Analysis Processing
OLTP	联机事务处理	Online Transaction Processing
OSI	开放式系统互联	Open System Interconnect

P

PLL	锁相环	Phase - Lock Loop
PNP	即插即用	Plug And Play
PCC	公共连接点	Point of Common Coupling
PT (TV)	电压互感器	Potential Transformer
PQDIF	电能质量数据转换格式	Power Quality Data Interchange Format
PPP	优质电力园区	Premium Power Park
PLC	可编程逻辑控制器	Programmable Logic Controller
PWM	脉冲宽度调制	Pulse Width Modulation

S

SOAP	简单对象访问协议	Simple Object Access Protocol
SSTS	高压固态切换开关	Solid - state Transfer Switch
STATCOM	静止同步补偿器	Static Synchronous Compensator
SVC	静止无功补偿器	Static Var Compensator
SVG	静止无功发生器	Static Var Generator
SCL	变电站配置语言	Substation Configuration Language

SARFI	系统电压平均有效值变化率指标	System Average RMS Variation Frequency Index
-------	----------------	--

T

TCR	晶闸管控制电抗器	Thyristor Controlled Reactor
TSC	晶闸管投切的滤波电容器组	Thyristor Switched Capacitor
THD	总谐波畸变率	Total Harmonic Distortion

U

UML	统一建模语言	Unified Modeling Language
UPQC	统一电能质量控制器	Unified Power Quality Controller
UPS	不间断电源	Uninterruptible Power Supply

V

VPN	虚拟专用网络	Virtual Private Network
VMD	虚拟制造设备	Virtual Manufacturing Device
VSC	电压源换流器	Voltage Source Converter

W

WSDL	Web 服务定义语言	Web Services Definition Language
------	------------	----------------------------------

X

XML	可扩展标记语言	eXtensible Markup Language
-----	---------	----------------------------

目 录

前言
缩写词表

绪论	1
第 1 章 电能质量监测装置	8
1.1 装置功能与结构	8
1.2 指标测量与计算	11
1.3 电能质量数据交换格式	17
1.4 指标检测波形库	26
第 2 章 电能质量广域监测系统	40
2.1 系统架构	40
2.2 系统通信协议	43
2.3 电能质量海量数据处理	54
2.4 监测系统性能测试方法	59
2.5 电能质量广域监测系统设计实例	67
第 3 章 电能质量数据高级分析	77
3.1 电能质量趋势预测	77
3.2 扰动源识别及定位	84
3.3 谐波潮流分析及责任划分	119
第 4 章 电能质量指标异常影响分析	133
4.1 对电力系统运行的影响	133
4.2 对电力设备的影响	137
4.3 对用电设备的影响	169
第 5 章 电能质量评估技术	178
5.1 电能质量指标评估	178
5.2 电能质量经济性评估	199
第 6 章 电能质量治理设备及相互影响分析	212
6.1 典型 DFACTS 设备	212
6.2 DFACTS 设备谐波自治能力分析	216
6.3 DFACTS 设备之间相互影响	229

第 7 章 优质电力园区 DFACTS 设备配置及协调控制 249

7.1 优质电力园区概述 249

7.2 优质电力园区 DFACTS 设备配置条件..... 250

7.3 优质电力园区 DFACTS 设备配置原则..... 255

7.4 优质电力园区 DFACTS 设备的协调控制..... 257

7.5 优质电力园区系统级建模仿真 272

第 8 章 典型案例..... 281

参考文献..... 304

绪 论

理想状态的电力系统是以恒定频率、正弦波形和标准电压对用户连续供电。在三相交流系统中,还要求各相电压和电流的幅值应大小相等、相位对称且互差 120° 。但由于系统中的发电机、变压器、输电线路和各种用电设备的非线性或不对称性,以及运行操作、外来干扰和各种故障等原因,这种理想状态并不存在,因此在电网运行、电力设备和供用电环节中出现了各种问题,从而产生了电能质量的概念。围绕电能质量的含义,可以从以下两种角度进行理解:

(1) 从电能的物理属性角度考虑,电能质量可分为电压质量和电流质量。

1) 电压质量。从电网角度看,由于电网主要提供的是满足用户需要的电压,用户接入电网后,经相关阻抗表现为一定的电压值,因此,通过定义理想电压,并用实际电压与理想电压之间的偏差来度量供电系统提供给用户的电能是否合格,是较容易考虑到的直接方法,从该角度度量的电能质量问题称为电压质量问题。

电压质量主要有电压偏差、电压频率偏差、电压不平衡、电压波动与闪变、电压暂降(暂升)与中断、电压谐波与间谐波、电压陷波等。以上电压指标中,长时间、较平稳、周期性变化属于电压变化,突然发生、持续时间短、幅值变化较大的非平稳现象属于电压事件。

2) 电流质量。严格意义上讲,交流电不能以自身能量形态存储,用户设备接入电网后,从电网吸收电能的具体表现形式是汲出电流。对用户而言,用电流指标度量电能质量更合理,因此,提出了电流质量概念。电流质量与电压质量密切相关,两者间的联系主要取决于设备的用电特性,具体参数可描述为相关阻抗特征,包括系统阻抗和设备阻抗等,其值取决于所关注的问题的动力学特性和物理参数。

为提高整个系统电能传输和转换效率,除了要求用户的电流保持正弦波形外,还应尽量保持电流与电压波形同相位。电流质量主要有电流谐波、间谐波、负序电流、功率冲击、电流相位超前或滞后相位角等。

(2) 从电能的供需角度考虑,电能质量可分为供电质量和用电质量。

1) 供电质量。如果说电压质量、电流质量是分别从系统侧、用户侧出发考察电能质量,那么,供电质量则是对两者的统一。供电质量概念的外延更大,是从较全面的角度提出的概念,既包含技术含义又包含非技术含义,综合考核电压质量、电流质量、服务质量等。

供电质量的技术内涵主要有电压质量和供电可靠性,其中供电可靠性包括连续性与可靠性;非技术内涵主要涉及供电服务质量、用户满意程度、满足社会需要和可持续发展程度等,其内容随着社会进步和人们认识水平的提高而不断充实。在智能电网框架下,还涉及用户满意度、社会满意度、电能量转换与传输效率、低碳排放与低石化能源消耗等,具

体表现为用户抱怨、投诉响应速度、应对方式、计量方式、电量电费透明度、电能利用效率等。

2) 用电质量。考核供电质量的目的是考核供电企业提供的电能能否满足需要。由于电能质量是供用电的兼容性问题，不少电能质量扰动指标取决于用户设备，同时涉及供用电双方，因此，考核电能质量对用户用电设备的影响与考核用户设备、其他设备接入系统后可能产生的扰动同等重要。为此，提出了用电质量概念，包括用户设备从系统中获取电能时的电流质量和相关非技术含义，如：用户是否按时如数缴纳电费，是否按照协议容量用电，用电性质与协议是否相符等。

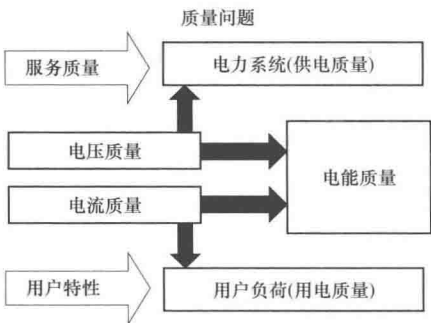


图 0.1 电能质量相关术语关系图

上述关于电能质量的定义与解释反映了供用电双方的作用和影响以及责任和义务，虽然含义较为工程化，但对理解和认识电能质量很有实用价值。电能质量相关术语之间的关系如图 0.1 所示。

国际电气工程师协会（IEEE）对电能质量的定义是：“合格的电能质量是指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统均是适合与该设备正常工作的”，并正式采用了“Power Quality”（电能质量，PQ）这一术语。在许多情况下，接地系统对电能质量的确有很大的影响，而过去并没有引起足够的重视。这个定义的缺点是不够直接和简明。

国际电工委员会（IEC）没有采用“Power Quality”这一术语，而是提出使用“EMC”（电磁兼容）的概念，它对电磁兼容的定义是：“系统或设备在所处的电磁环境中能正常工作，同时不对其他系统和设备造成干扰”。该定义强调设备与设备之间、电源与设备之间的相互作用和影响。EMC 采用“排放”反映电流质量问题，表示设备产生的电磁污染；采用“抗扰”反映电压质量问题，表示设备免除电磁污染的能力。

尽管定义不同，但电能质量已经是 21 世纪人类生产生活所必须面临的问题，它主要包括两个方面：①电压和供电可靠性问题，涉及电压暂降、三相不平衡、电压波动长时间闪变等供电侧电压问题；②电流问题，涉及谐波、间谐波等，主要来源于用户。为此，我国国标将电能质量定义为：关系到供用电设备正常工作（或运行）的电压、电流的各种指标偏离规定范围的程度。

一、电力系统对电能质量的要求

电能质量的优劣已经成为电力系统运行与管理水平高低的重要标志，控制和改善电能质量也是保证电力系统自身可持续发展的必要条件。电能质量问题已不仅仅是电力系统中电压和频率等的基本技术问题，它已被提升为关系到整个电力系统及设备的安全、稳定、经济、可靠运行，关系到电气环境工程保护，关系到整个国民经济的总体效益和发展战略的问题。为保证电能安全经济地输送、分配和使用，电力系统对电能质量的基本要求是：

- (1) 以单一恒定的电网标称频率、规定的若干电压等级和以正弦函数波形变化的交流电向用户供电，并且这些运行参数不受用电负荷特性的影响。
- (2) 始终保持三相交流电压和电流的平衡，满足功率因数要求。
- (3) 电能的供应充足，即向用户的供电不中断，始终保证系统中功率供需的平衡。

上述理想供电系统的基本特性构成了供电运行对电能质量的基本要求,概括起来就是电压、频率和波形三个基本要素。这三项质量指标相互间存在着紧密的依存和制约关系。比如,电网的各种随机性故障往往导致实际供电系统运行偏离理想状态,供电系统的频率和电压幅值不再保持恒定不变,三相电压出现不平衡,正弦波形发生畸变。

二、用户对电能质量的要求

用户对电能质量的关注在于他们能否具有以希望的方式取得和使用电能的能力,但所涉及的问题更为具体。如,传统上用户对电力系统的基本要求主要是能够高可靠性地提供电能,而这意味着供电连续性是电能质量中最重要的因素。但是,随着对电能质量敏感的电子设备的广泛应用,用户希望供给的电能除了具有高可靠性之外,同时也是清洁的。

1. 波动性、冲击性设备

随着工业的发展,像电弧炉、中频炉、轧机、电气化铁路机车等大容量冲击性、波动性、非对称性负荷越来越多,它们在运行过程中不仅给电网注入了大量的谐波,而且还会产生严重的电压波动、闪变和三相不平衡等电能质量问题,其设备自身的运行也会受到一定的干扰,同时也增大了线路和设备的损耗。

这些负荷均为中高压设备,电能质量治理需在高电压等级侧进行,用户投资较大。由于目前执行的电价政策只对无功进行奖惩,对电能质量的其他指标没有采用经济杠杆进行调节,导致用户整体治理积极性不高。用户只是在其内部易受干扰设备处进行保护,或者对装设的治理设备缺少运行维护,增加了电力系统运行的安全隐患。

2. 敏感负荷

采用微电子技术、计算机技术、数字控制的自动化生产线的运行完全依赖于数字信息。对于各种电磁干扰都极为敏感;原本对电动机负荷没有影响的微小电压波动,都可能影响到电子控制系统的正常工作,甚至导致跳闸或生产停顿。根据负荷敏感度以及经济损失、社会和政治影响等因素,可将负荷分为极敏感负荷、敏感负荷和普通负荷三级,或者分为极重要负荷、重要负荷和普通负荷三级。对于极敏感和敏感用户,提高传统定义上的供电可靠性已经远不能够满足用户需求。针对上述负荷的等级划分,可以采用 DL/T 1412—2015《优质电力园区供电技术规范》中规定的三级供电方式(A、AA和AAA级)来进一步满足不同等级负荷对电能质量的要求。

3. 可再生能源发电设备

由于太阳能和风能功率波动的自然特性,其随机波动的发电功率接入电网不可避免将对电网的电能质量产生影响。光伏电站和风电场接入系统有两种方式:集中式和分布式。大规模可再生能源集中接入电网会引起电网稳定性和调峰、调频等问题;小规模可再生能源分布接入电网会引起电压波动、谐波、间谐波、直流分量等电能质量问题。此外,可再生能源接入电网一般均采用逆变器,对电能质量要求较高,电网发生扰动时容易导致脱网。

4. 其他电力电子设备

目前,空调、冰箱、洗衣机等家用电器中广泛采用变频控制技术,计算机类设备的供电电源大量采用开关电源,其核心都是高频电力电子开关技术,给电网带来了高次谐波污染。在电力电子设备大规模应用的背景下,电力电子设备作为精密控制设备,其受控量和控制量之间互相耦合,不同电力电子接口的受控量之间又互相耦合干扰,给电能质量的研究带来了新的课题。

三、电能质量常规分析及局限性

1. 电能质量在线监测

(1) 系统架构。电能质量数据集成的难点主要在于其自治性、异构性、分布性。数据源的自治性使数据源的质量会产生差别；异构性会使数据源产生冲突；在其自身的特点以及技术条件的限制下，分布性使得集成难度比较大。建立在多数据源、海量数据基础上的电能质量监测和管理网络难以形成数据摄取的统一模式，受到这些方面的约束，目前全网的分层分布式电能质量监测系统的设计和建设还处于起步阶段。

(2) 通信接口协议。电能质量监测设备种类繁多，制造商使用各自的通信协议和数据格式，开发的监测设备和软件不尽相同，不同设备之间互不兼容；适用于智能变电站的数字式电能质量监测通信技术仍未能得到解决。因此，使用标准的协议和标准的数据文件交换格式、建立开放式的电能质量监测系统十分必要。目前，国内电能质量监测系统暂没有对外提供公共数据接口，即便是提供接口也往往是自定义的接口格式，不同厂家之间的接口差异也比较大。所以，基于公共数据标准实现电能质量监测系统的对外接口是大趋势。

(3) 检测方法。电能质量监测装置产业已具备一定规模，产品种类、生产厂家和实现功能也呈现多样化，产品质量也参差不齐。对监测装置需要进行规范化的检测，但现在电能质量监测终端功能检测仍停留在实验室由手工逐条完成，主要开展的也只是稳态指标精度检测，没有实现暂态指标检测；检测源输出的源信号设置较为单一，难以真实模拟现场实际波形，难以对被检装置实现全面检测。在监测系统方面，各地监测系统相继建成。但这些系统差异性较大，尚无监测系统性能检测装备和平台，无法判断和衡量各地所建的系统是否满足技术规范的要求。

2. 电能质量数据分析

(1) 电能质量海量数据处理。电能质量在线监测时间长、监测信息量大、监测点多、秒级记录周期，使得电能质量监测数据形成海量数据。针对庞大的电能质量监测数据，传统的集中串行数据处理方式效率低下，尤其无法适应实时性要求较高的暂态事件电能质量监测数据处理，限制了电能质量数据的高级应用。因此，如何高效存储电能质量海量监测数据，并进行可靠快速地处理，成为电能质量数据高级分析面临的重要问题。

(2) 电能质量数据高级应用。当前基于电能质量海量监测数据，开展电能质量指标趋势预测、扰动源识别与定位、谐波潮流分析与责任划分等高级分析与应用仍处于起步阶段，譬如扰动源识别与定位未能较好实现将扰动原因识别与具体的电能质量监测数据分析有效结合，不能解决精确定位问题；谐波潮流理论相对成熟，但是缺乏关于多谐波源下的谐波责任区分和量化问题的研究等。

(3) 系统级建模仿真。目前对定制电力技术的研究主要集中在单台 DFACTS 设备的拓扑、设计、仿真建模和控制策略等方面，而常用的电磁暂态仿真并不适合应用在 DFACTS 设备群、优质电力园区的系统级仿真方面，相关的仿真建模方法研究较少，有必要开展系统级仿真技术研究；为 DFACTS 设备之间的相互作用机理分析、DFACTS 设备在智能配网中高效应用、优质电力园区设计及设备优化配置提供依据。

3. 电能质量指标影响

(1) 电能质量扰动传播研究。电能质量扰动会在电网中迅速扩散，严重影响电力系统的稳定运行。目前对谐波传播的影响只是局限于实测和仿真的工作，不同的网络其结构和参数

大不相同,对各个网络进行谐波分析需要很大的工作量。此外,由于电网中有些参数是未知的,若采用估计的方法或者直接忽略不计,将导致仿真结果和实测数据之间出现很大的差异。而暂态电能质量问题的输出特性多变,多个扰动源相互交织也会放大畸变值,严重的情况会影响配电网的安全稳定运行。因此,电能质量扰动的传播特性有待开展系统性的研究,这对实现能源的高效利用和电网的稳定运行具有重要的理论和现实意义。

(2) 谐波对电力设备影响。目前,针对谐波对电网设备的影响只开展了小功率级别谐波影响分析的研究,仅限于实验室设备的电磁兼容研究,还缺乏相应的电网设备谐波影响试验平台,对电力电子设备、新能源并网设备、新能源与补偿装置等的相关试验技术不够成熟,没有对电网设备谐波影响程度进行定量分析。在 110kV 及以上电压等级电网中,计量和保护信号很多来源于电容式电压互感器(CVT),而谐波经过 CVT 时,对谐波的传递已经发生了畸变,二次侧信号已经不能真实反映一次侧的实际情况,尽管部分谐波测量装置精度可以达到很高,但也只能还原 CVT 传递畸变后的谐波情况,无法实现信号的精确测量。开展谐波对电力设备影响的研究是目前迫切需要解决的问题。

(3) 电力设备耐受能力研究。在电力设备耐受能力研究方面,较多涉及的是对发生电压暂降时设备行为和敏感曲线的分析,且对设备的电能质量敏感度测试取得了一定的成果,但所测试的设备很有限,主要局限于电机调速系统、可编程逻辑控制器等。而对于目前电网实际运行影响较大的敏感设备,如:对低压脱扣、变频器等试验研究不足,敏感度分析不够准确全面,缺乏实际耐受曲线及敏感度范围试验研究。

4. 电能质量综合治理

(1) 多 DFACTS 协调控制。多个电能质量控制装置之间由于控制目标的不同、接入方式不同,控制对象也不同,给电网电能质量治理带来了交互干扰,增大了电网电能质量治理的难度。众多电力电子接口作为受控电源,其受控量和控制量之间互相耦合,不同电力电子接口的受控量之间又互相耦合干扰,这让多 DFACTS 的建模变得异常复杂。目前,对于 DFACTS 设备的研究主要集中在单台设备的拓扑、设计和控制策略等方面,在 DFACTS 设备的协调控制方面也仅停留在单台设备先进控制策略的研究或现有控制策略的改进上,针对多种 DFACTS 设备间的协调控制策略还尚待深入。

(2) DFACTS 对配电网影响与自治能力。目前对于各种 DFACTS 设备本身综合性能指标已有一定的研究,但对于 DFACTS 设备输出谐波对配电网影响、SVC 抑制闪变能力、SVG 超调量与响应时间关系、SSTS 切换动作时间指标等方面的研究还不够深入;对于 DFACTS 设备的研究大多是关注设备的补偿能力方面,而在对 DFACTS 设备自身产生谐波的自治能力方面研究较少。

(3) 定制电力技术。优质电力园区作为一种有效的电能质量问题解决方案,是指采用定制电力等技术,获得比常规配电系统更高的供电质量,而且按照用户的不同电能质量等级要求进行供电的园区。目前,优质电力园区还没有广泛地推广,对定制电力技术的研究可为优质电力园区的建设提供重要的理论支撑,对优质电力园区的工程实践及推广具有重要作用。

5. 电能质量评估技术

(1) 电能质量综合评估。当电能质量的多个指标共同作用在一个系统中时,其不同的组合结果对电力系统运行的不利影响和对电气设备性能的降低甚至损坏都是十分复杂的问题,此外不同电气设备在不同条件下对电压干扰的敏感度也不同。如何进行电能质量综合指标的