

电力系统电能质量分析与治理技术研究

赵江波

新地能源工程技术有限公司石家庄能源化工技术分公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着双碳目标的推进以及新型电力系统的建设,高比例的可再生能源和电力电子设备被广泛接入,电压暂降、谐波超标等问题越来越严重,治理需求也越来越高。新型电力系统中变流器装置受到暂态扰动激励时会产生稳态扰动,暂稳态扰动相互作用耦合,海量变流器控制策略的差异性造成调谐频率宽频化。统一电能质量调节器(UPQC)把串联和并联有源滤波器组合成统一结构,在微电网环境中可以应对各种电能质量问题。电能质量治理由原来的专用装置配置向现在的优化配置、协同控制和经济性优化发展。从完善监测体系、控制新能源接入、建立长效机制等角度给出治理改进意见,给新型电力系统电能质量保证给予参考。

[关键词]电力系统;电能质量;谐波治理;统一电能质量调节器

DOI: 10.33142/hst.v9i7.20248

中图分类号: TM714.2

文献标识码: A

Research on Power Quality Analysis and Governance Technology in Power System

ZHAO Jiangbo

Shijiazhuang Energy Chemical Technology Branch of Xindi Energy Engineering Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the promotion of the dual carbon target and the construction of new power systems, a high proportion of renewable energy and power electronic equipment are widely connected. The problems of voltage sag and harmonic exceeding standards are becoming increasingly serious, and the demand for governance is also increasing. When the inverter device in the new power system is excited by transient disturbances, it will generate steady-state disturbances, which are coupled with each other. The differences in control strategies of a large number of inverters result in wideband tuning frequency. The Unified Power Quality Controller (UPQC) combines series and parallel active filters into a unified structure, which can address various power quality issues in microgrid environments. The treatment of power quality has evolved from the original specialized device configuration to the current optimized configuration, collaborative control, and economic optimization. Provide governance improvement suggestions from the perspectives of improving monitoring systems, controlling new energy access, and establishing long-term mechanisms, providing reference for ensuring the quality of electricity in the new power system.

Keywords: power system; power quality; harmonic control; unified power quality regulator

引言

新型电力系统创建成为达成国家“双碳”战略目的的关键途径之一,其主要特性之一就是电网变得高度电力电子化。风光储等电力电子装置大量接入电网,直流输电技术得到广泛的应用,换流站数量不断增多,向着更高的电压等级、更大的容量、更智能的方向发展。在此情况下,各种非线性、异构化设备进入发、输、配、用各个环节,造成新型电力系统电能质量扰动源增多、随机性强、扰动特征复杂。电能质量的品质从原来的局部指标性问题变成现在的全局系统性问题,已经不能用传统的指标体系来完全描述了。另外,伴随着高端制造业智能化升级、数字新

基建加速推进,用户侧电能质量事故时有发生,电能质量改善的需求也越来越迫切。

1 电力系统电能质量概述

电能质量指的是反映电力系统供电可靠性以及用电设备正常工作能力的工程技术参数,它由电压质量、频率质量和供电可靠性这三部分组成,其中以电压质量问题最常见。按照 IEEE519 以及 IEC61000-4-30 这些国际标准,电能质量问题包含电压暂降和暂升,谐波畸变,电压闪变,三相不平衡以及频率偏差等种类。电能质量管理办法(暂行)把电能质量定义为电力系统指定点处的电特性,它与供用电设备正常工作(或运行)有关的电压、电流、频率

等各种指标偏离基准技术参数的程度。传统电力系统中电能质量问题主要是由于大型工业负荷的非线性特性以及故障工况造成的,在新型电力系统中扰动源已经扩大到换流站、中低压涉网变流器、电动汽车充电桩、新型柔性负荷等众多主体上。电能质量领域是供电质量、用电质量和电能质量治理设备三者相结合的领域,任何一个环节出现问题都会引发电能质量问题纠纷。对电能质量实施科学合理量化的评价,乃是达成电网经济运行与高效发展先决条件。

2 电力系统电能质量问题分析

2.1 电压质量问题分析

电压质量问题属于电力系统中出现得最频繁的电能质量问题,电压暂降、电压暂升、电压越限、电压闪变等都是电压质量问题的表现形式。换流站背景谐波产生的主要原因是换流器非线性特性引起的电流畸变、变压器空载合闸时励磁电流非线性引起的谐波引入、滤波器谐波消除效果与系统匹配有关等。新型电力系统中电压暂降问题比较严重。以英国 8 月 9 日大停电事件为例,线路由于雷击造成单相接地短路故障,引起分布式电源连锁脱网,系统损失功率达到总负荷的 6.5%,造成较大的频率波动,低频减载动作,造成大面积停电事件,影响人口 100 万以上^[1]。风光电源变流器的低穿能力较差,在受到严重的暂态扰动之后会引发脱网、降容量运行等响应,从而造成暂态扰动连锁的发展。除此之外,在我国某受端城市电网的某直流换流站谐波水平符合国标限值的情况下,造成该城市多个 220kV、10kV 变电站以及用户 380V 母线 11 次、13 次谐波超标,致使用户设备无法正常工作,谐波源查找困难,损失严重。

2.2 谐波及三相不平衡问题分析

谐波畸变属于新型电力系统所面对的最严峻的电能质量难题之一。新型源荷接入电力系统造成新型电力系统电能质量扰动源种类增加,除了电压等级高、容量大的换流站之外,中低压涉网变流器以及制氢、高铁等新型负荷也会成为电能质量扰动源。风光储等新型源荷的中低压涉网变流器汇集点出口电压一般为 1140V 或 690V 及以下,开关器件通断、开关器件的死区效应都会造成谐波发射。另外中低压涉网变流器谐波与电网背景谐波叠加会加重谐波污染,在多变流器并联情况下,会增大谐波幅值,产生谐振。更值得指出的是,由于电力电子变流器控制延时存在差异,多时间尺度控制环路相互影响,谐波就不再只是整数次特征频率所对应的频率,而会扩展到次同步、超同步以及高频段这些宽频域范围。宽频域谐波与传统的整数次谐波叠加之后,其传播特性以及谐振峰值都会产生较

大的变化,给传统滤波装置的设计选型带来新的难题。

三相不平衡问题也不能忽略。新型电力系统高电缆化率的时候,系统感容特性会造成高频谐波谐振放大,加重稳态扰动对用户的危害。电动汽车充电桩等单相大功率负荷的大量接入,使低压配电网三相不平衡程度加重。目前谐波源排查还存在困难,找到谐波源之后,初步分析就是谐波经高电缆化率电网传导,造成谐波放大、超标事件。另外,光伏单相接入、电动汽车 V2G 无序充放电等动态随机性行为使得低压台区三相不平衡度具有很强的时变特征,传统的以稳态数据为基础的调节策略很难及时跟踪它的快速变化,需要发展面向动态不平衡演化的实时感知和快速补偿的方法。

3 电力系统电能质量治理关键技术

3.1 无功补偿与电压调节技术

无功补偿属于保持电网电压稳定的最基本的技术手段,同时也是降低网络损耗的有力举措。近些年来,为了改善供电品质从而支持先进制造业的发展,电能质量扰动治理技术受到重视,随之而来的各种优化配置、协同控制以及经济性优化方案成了改善电能质量问题的关键手段^[2]。静止无功发生器(SVG)、静止同步补偿器(STATCOM)等动态无功补偿装置响应快、补偿精度高,已经成为新能源场站并网点标准配置。同时学者们也正在努力拓展风光储充等资源的电能质量治理功能,希望利用风光储充电力电子装置的有源器件、优化控制策略和参数,达到无功补偿、可控谐波发射等功能,用类似有源电力滤波器发出反向谐波等方式进行电能质量治理。

3.2 谐波抑制与滤波治理技术

谐波抑制技术可以分为无源滤波、有源滤波和混合滤波这三类。无源滤波器(PF)结构简单、成本低,但是滤波特性受到系统阻抗的影响较大。有源电力滤波器(APF)是实时检测谐波电流,然后向电网注入反向补偿电流,从而达到动态谐波治理的目的。统一电能质量调节器(UPQC)是把串联有源电力滤波器和并联有源电力滤波器组合成一个统一的结构中的一种混合补偿器,串联变换器用注入补偿电压的方式来缓解电压相关的扰动,而并联变换器则用来处理电流相关的问题,比如谐波和无功功率补偿等,因此它具有双动作的能力,在动态微电网环境里可以及时应对各种电能质量的考验。除传统的 UPQC 结构之外,又提出了开放式 UPQC、光伏集成 UPQC(PV-UPQC)和基于模块化多电平矩阵变换器的 UPQC 等新的结构,提高电网的灵活性以及故障穿越能力。

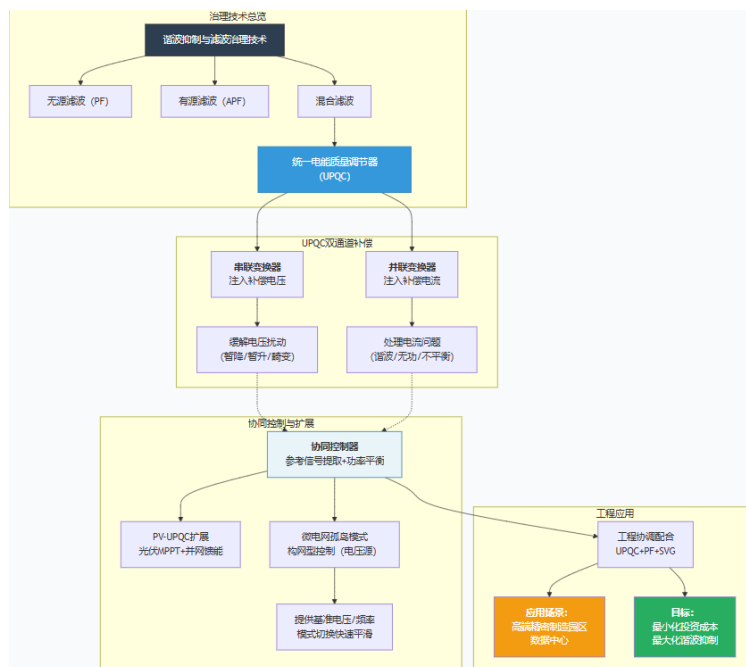


图1 UPQC 综合功能与协同控制架构图

图1从控制策略角度出发,UPQC 串联和并联变换器要协同工作来达到电压、电流扰动的同步补偿目的,主要依靠对串联侧和并联侧参考信号的准确提取以及功率平衡控制。PV-UPQC 把光伏并网发电功能集成到并联变换器里,在实现电能质量补偿的同时也可以完成光伏最大功率跟踪和并网馈能,从而达到治理功能和新能源消纳的有机统一。微电网孤岛运行模式下,UPQC 要切换到构网型控制方式,给系统提供基准电压、频率参考,模式切换的快慢、平滑性都会影响微电网的稳定运行。工程应用时要兼顾UPQC 同无源滤波器、静止无功发生器的协同配合,从而达到降低综合投资成本、提升谐波抑制水平的目的,特别适合于对电能质量有较高要求的高端精密制造园区、数据中心等场合。

3.3 三相负荷平衡优化技术

三相负荷平衡优化可以减小配电网的损耗,提高设备的利用率。治理措施有规划上合理分配单相负荷,防止负荷过分集中,在运行上使用自动换相开关装置,调节相间负荷分配,在用户侧安装三相不平衡补偿装置。目前专用、复用型电能质量治理装置的优化配置和协同运行方案,已经成为解决电能质量问题的主要方式。根据低压配电网三相不平衡和无功补偿需求耦合的特点,可以配置具有三相不平衡补偿和无功补偿功能的综合补偿装置。

3.4 电能质量在线监测与智能诊断技术

在线监测给电能质量治理赋予了数据出处。电能质量

治理要依靠治理装置,在不同的电压等级以及各种电能质量问题上,可以选择适合的专用装置来进行治理。现代监测系统采取分布式结构,在重要节点处放置符合IEC61000-4-30 标准的监测终端,从而达成对电能质量指标的实时采集、传送和保存^[3]。智能诊断技术依靠大数据分析以及人工智能算法,对监测数据展开深入探究,从而达到扰动源的精准定位,故障提前预警,并且可以对治理成果实施评价。以优化配置、协同运行为基础的电能质量扰动治理方案,正在成为电能质量治理的主要途径。

4 电力系统电能质量治理优化措施

4.1 完善电能质量监测体系

创建起包含“源-网-荷-储”全部环节的电能质量监测体系,这是达成精准治理的基础。在新能源场站及网点、重要用户接入点、关键变电站母线等处布置在线监测终端,创建统一的数据采集、传输及管理平台。《电能质量管理办法(暂行)》的出台,使我国电力供应由“量”的满足向“质”的提升转变。完善的监测体系要重视不同电压等级监测数据的相互配合,加强暂态扰动的捕捉以及谐波源的定位精度,给治理决策赋予可信的数据支撑。广东电网实践证明,配电网全景监测体系用研发的配电网电能质量监测仪来捕捉电能质量异常,从而达到电能质量问题的溯源和告警,清楚地划分出每一个超标的用户治理责任。

4.2 优化电网运行与设备配置

电网运行方式改善、设备配置科学化,从根本上降低

电能质量问题。从运行角度出发,应该合理调节系统短路容量,改善变压器分接头位置,科学安排无功补偿容量。设备配置上要按照扰动源特性及治理要求来配置治理装置。表1为主要电能质量治理装置技术特点对比表。

表1 主要电能质量治理装置技术特性对比

治理装置	适用电压等级	主要治理功能	响应速度	经济性
无源滤波器(PF)	6kV~220kV	特定次谐波滤除	毫秒级	较低
有源电力滤波器(APF)	380V~35kV	动态谐波补偿	微秒级	较高
静止无功发生器(SVG)	380V~220kV	无功补偿、电压支撑	毫秒级	中等
统一电能质量调节器(UPQC)	380V~10kV	综合补偿	微秒级	高

4.3 提升新能源接入电能质量控制水平

新能源并网属于电能质量问题的重要环节。必须对新能源场站的并网电能质量实行严格的准入制度,要求新能源发电系统有故障穿越能力以及主动谐波抑制功能。就新能源场站并网点的谐波电流发射限值、电压波动和闪变指标而言,必须符合国家有关标准的要求,风电机组和光伏逆变器要具有零电压和低电压连续穿越的能力,在电网发生故障的时候不能脱网并且能提供动态无功支撑。对于中低压涉网变流器接入时的谐波治理问题,除了用有源电力滤波器做有针对性的治理外,改进涉网变流器的控制来改变它的输出特性也是一种重要的技术方向。这包含改进变流器的调制策略来减小开关频率次谐波,加入虚拟阻抗控制来抑制谐振峰值,采用阻抗重塑型有源阻尼方法提高系统对背景谐波的鲁棒性。分布式电源大量接入使得低压、中压配电系统中电能质量面临的新问题成为亟待解决的问题之一,大多数可再生能源系统要通过逆变器等电力电子器件接入电网,容易产生电能质量问题。

4.4 建立电能质量综合治理长效机制

电能质量治理属于一项系统工程,要创建起多方协同的长效机制。从技术上讲,应该促进专用型和复用型治理装置的配合使用,创建起分层分区的综合治理架构。以优化配置、协同运行为依据的电能质量扰动治理方案,是改善电能质量问题的主要途径。从技术、管理、市场三个端

口出发,在技术上解决“能不能治”问题,管理上确定“谁来治”的责任边界,市场层面用价格信号形成“主动治”的内生动力,三者互相支撑,缺一不可。从管理角度来讲,要健全电能质量责任划分和考核机制,依照“谁干扰、谁污染、谁治理”的准则来执行治理责任。池州市推行“共识、共商、共治”的理念,创建起政企协同的服务机制,“园网共建”作为治理模式被推行开来,借助数据共享、流程再造等方式来提高治理效率。还要把电能质量考核指标纳入供电企业与用户的双向责任体系,既考核供电方的供电质量达标情况,也考核用户侧的注入污染水平,从而实现治理责任的闭环管理。从市场层面来说,对电能质量的差异化定价以及辅助服务的补偿机制进行研究,调动起各种主体参与治理的积极性。

5 结语

新型电力系统电能质量问题具有扰动源多样化、暂稳态耦合化、宽频域时变等特点,给传统的治理技术提出了更高的要求。新型电力系统电能质量扰动治理技术研究属于急需解决的问题。UPQC等具有多种功能补偿能力的综合治理装置是技术发展的方向,多治理装置协同运行、源网荷储协同互动的综合治理模式正在成为主要的实施方式。未来的研究重点应该放在新能源变流器主动支撑型控制策略、宽频域谐波谐振抑制技术、人工智能驱动的电能质量预测与诊断方法、适应高比例新能源接入的电能质量综合评价体系上,推动电能质量治理由被动应对向全链条保障转变。

[参考文献]

- [1]汪颖,钟启明,刘育权,等.新型电力系统的电能质量扰动治理关键技术综述及展望[J].中国电机工程学报,2025,45(22):8670-8691.
 - [2]本刊编辑部.电能质量治理革新[J].中国电力企业管理,2024(7):38.
 - [3]肖白,赵雪纯,董光德.电能质量综合评估方法综述与展望[J].发电技术,2024,45(4):716-733.
- 作者简介:赵江波(1998—),男,汉族,河北邯郸人,助理工程师,太原科技大学毕业,现就职于新地能源工程技术有限公司石家庄能源化工技术分公司,从事电气设计工作。