

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191514

统一电能质量调节器的研究发展综述

倪福银^{1,2}, 李正明²

(1. 江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州 213001; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 微电网渗透率的不断提高给配电网带来了越发严重的电能质量问题。统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)作为一种综合电能质量治理装置, 成为近年来的电能质量治理研究热点之一。主要对UPQC的拓扑结构、检测方法、控制策略进行了归纳与分析。阐述了当前UPQC国内外研究发展概况, 对其技术发展趋势做了预测展望, 为后续研究提供一定的参考与借鉴。随着研究的不断推进, UPQC将会更好地治理含微电网的配电网电能质量。

关键词: UPQC; 电能质量; 电能质量检测与控制; 微电网

Overview of unified power quality conditioner research development

NI Fuyin^{1,2}, LI Zhengming²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: With the increasing permeability of micro-grids, power quality problems become more and more serious in a distribution network. The Unified Power Quality Conditioner (UPQC), as an integrated power quality control device, has been widely considered and has become one of the research hotspots of power quality enhancement. This paper mainly summarizes and analyzes the topology, detection methods and control strategies of the UPQC. The research and development of the UPQC at home and abroad is illustrated, and the trend of its technology development is forecasted. This may be of significance for follow-up research. With continuous research progress, the UPQC will have better ability to improve the power quality of distribution system in micro-grids.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477070).

Key words: UPQC; power quality; power quality detection and control; micro-grids

0 引言

近年来,大力推进的新能源发电系统以其环保、高效、分散、灵活的发电方式越来越受到世界各国的关注,多元化、清洁化的可再生能源已成为解决能源与环境之间矛盾的重要途径^[1-3]。集负荷、电源及其调节手段为一体的微电网应运而生,微电网是由分布式可再生能源、能量变换装置、储能装置、负载等组成的小型电力系统^[3-7]。微电网的接入会对电力系统造成严重的污染,产生更为严重的电能质量问题。而随着经济的发展,工业中大量高精尖设备的大量使用以及生产领域对产品质量的更加重视,使得电力用户对电能质量的要求越来越高。

作为一种综合电能质量治理装备,统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)由此产生,最先是由日本学者 Fujita, Hideaki Akagi 等在 1998 年提出^[8],它是由串联滤波器(Series Active Power Filter, SAPF)、并联滤波器(Parallel Active Power Filter, PAPF)及直流侧共享电容构成^[9]的。UPQC 最大的特点在于具有动态电压恢复器和有源电力滤波器的功能,可以解决包括供电电压突变、电压波动和闪变、电压不平衡、谐波电流和无功电流等各种电能质量问题。

UPQC 因其强大的补偿功能将是解决微电网电能质量问题的关键设备^[10-15]。文献[11]将 UPQC 应用于风能发电系统,用于对诸如电压跌落、闪变谐波的电能质量治理,取得很好的治理效果。文献[12]针对欧洲国家分布式发电系统存在的电能质量问

题,通过对UPQC进行设计、仿真与实验验证,大大提升了电能质量。文献[15]针对带有能源存储系统的UPQC进行电压跌落研究,提高了配电网的电能质量。当前UPQC的研究主要包括拓扑结构、电压检测方法与控制、谐波检测方法与控制等内容。

1 拓扑结构综述

UPQC基本拓扑结构如图1所示,电路系统为三相三线制结构,由串联有源滤波器(SAPF)、并联有源滤波器(PAPF)和直流侧电容组成,其中,SAPF通过串联变压器接入电源侧,具有谐波隔离、电压调整功能,PAPF接入负载侧,具有谐波电流补偿、无功补偿及调节直流侧电容电压等功能^[16]。另外还有一种基本结构是左并右串,主要是解决电源电流及负载电压问题^[17]。

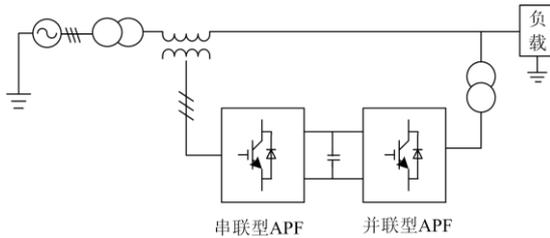


图1 UPQC基本拓扑结构

Fig.1 UPQC basic topology

近年来,根据不同的应用环境及实用性、经济性,UPQC的拓扑结构发展可按如图2进行分类。

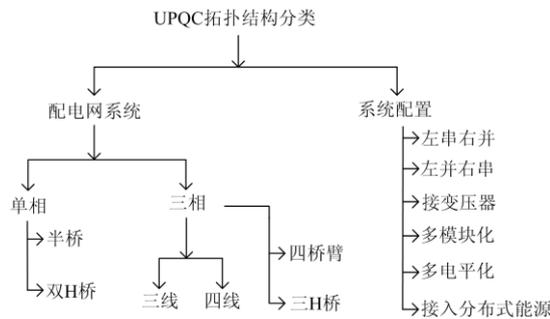


图2 UPQC拓扑结构分类

Fig.2 UPQC topological classification

UPQC按接入电力系统来分,常见可分为单相系统、三相三线制系统和三相四线制系统。从UPQC的变流器桥臂角度可分为半桥4开关,双桥8开关,3桥12开关等各种结构,如图3为单相双H桥8开关电路^[18]。

文献[19-20]提出了三相三线制系统,3H桥12开关拓扑结构,文献[21]给出了一个特殊的三相四

线制配电系统,采用单相到三相UPQC拓扑结构,如图4所示。

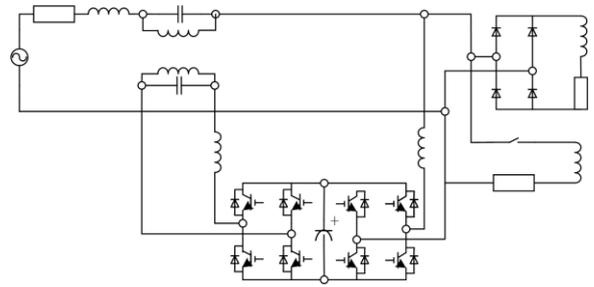


图3 UPQC单相拓扑结构

Fig.3 UPQC single phase topology

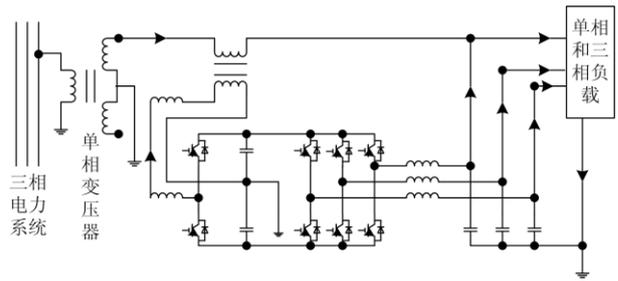


图4 单相-三相UPQC拓扑结构

Fig.4 UPQC topology of 1 phase-to-3 phase

近年来,除了基本的左串右并和左并右串拓扑结构之外,UPQC结合其他电力装置的不同还发展了多种拓扑结构。

1) 国外拓扑研究现状

针对三相四线制配电系统电能质量问题,文献[22]国外学者提出了两种拓扑结构,一种是负载侧与UPQC接有星型变压器,如图5所示,用于中性电流补偿,所接变压器二次绕组为六边形,为零序电流提供了一个循环路径。另一种是负载侧与UPQC之间接T型变压器将星型连接改成T形连接的变压器,如图6所示,用于中性电流补偿,通过仿真,验证了两种不同拓扑结构的补偿效果。

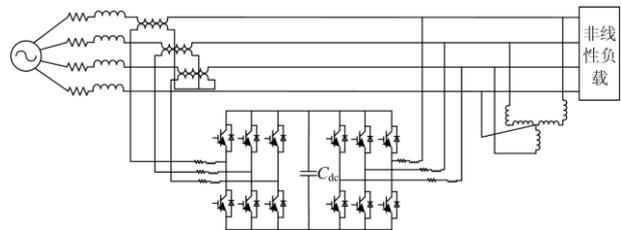


图5 负载侧接星型变压器的三相四线制UPQC

Fig.5 Three-phase four-wire UPQC with star-hexagon transformer on load side

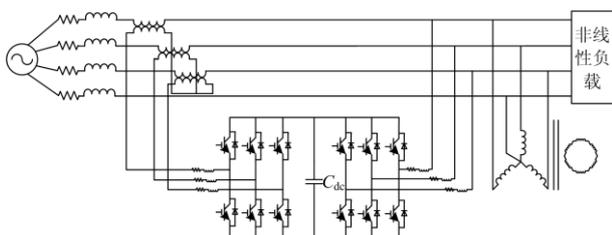


图 6 负载侧接 T 型变压器连接的三相四线制 UPQC

Fig. 6 Three-phase four-wire UPQC with T-connected transformer

由于传统 UPQC 的 PAPF 是用于补偿负载电流的受控电流源, SAPF 是用于补偿电源电压的受控电压源。文献[23]给出了 UPQC 的双重结构, 与传统的 UPQC 方法相比, 该 UPQC 的 PAPF 表现为交流电压源, SAPF 表现为交流电流源, 用于电能质量治理。

随着微电网的不断渗入, UPQC 应用于微电网的电能质量治理已成为研究热点。文献[24]提出一种改进的基于超级电容储能系统的 UPQC 结构, 如图 7 所示, 采用超级电容储能系统接入直流侧, 可以很好地解决直流侧电压不稳定问题。此外, 在其他文献中还列出了多种国外研究微电网中的 UPQC 拓扑结构[16,25-27]。

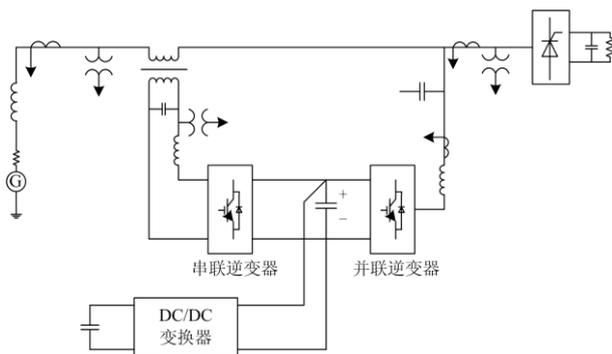


图 7 含超级电容储能系统的 UPQC 拓扑结构

Fig. 7 UPQC topology with energy storage of ultra-capacitor

2) 国内拓扑研究现状

我国对于 UPQC 研究起步较晚, 但进步很快, 取得了很好的成果。文献[28]研究出了一种基于模块化多级矩阵变换器(Modular Multilevel Matrix Converter, M3C)的单相 UPQC, 如图 8 所示。该装置由四个相同的多电平转换器臂和滤波电感器组成, 利用直流循环电流平衡各臂瞬时有功功率的综合控制方法对电能质量进行治理。

除了单相之外, 还有三相多模块 UPQC 拓扑结构, 文献[29]给出了如图 9 所示的多模块, SAPF 为

一个模块, PAPF 则由多路有源滤波器并联组成, 根据此结构可对多路 PAPF 采取不同的控制策略, 从而减轻 PAPF 的重载压力。

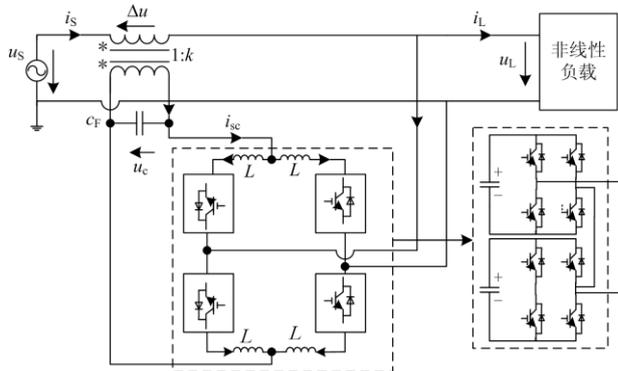


图 8 单相模块化多级矩阵式 UPQC

Fig. 8 Single-phase M3C-based UPQC

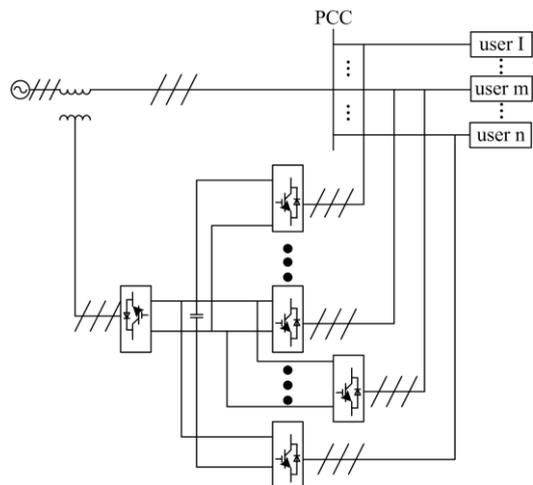


图 9 多模块 UPQC 拓扑结构

Fig. 9 Multi-modular UPQC topology

文献[30]提出了由一个并联电压源换流器和两个串联电压源换流器组成的多换流器式 UPQC, 如图 10 所示, 该装置可实现动态电压恢复、有源滤波、故障限流等功能, 提高了供电质量和可靠性。

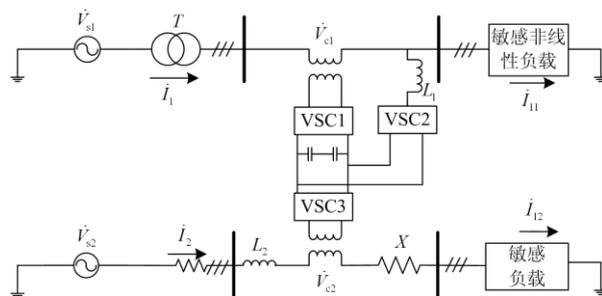


图 10 多换流器式 UPQC 拓扑结构图

Fig. 10 Multi-converter UPQC topology

近几年来,多模块多电平的 UPQC 由于其优良特性得到广泛研究。文献[31]提出将模块化多电平变流器(MMC)技术和 UPQC 相结合的拓扑结构,非常适用于大功率应用场合。文献[32]在其基础上,进一步改进了 UPQC 电能质量补偿控制策略。

除了采用多模块多电平拓扑结构,对于结合微电网的 UPQC,也拓展了不少结构^[33-34]。文献[34]在此基础上进行了改进,提出了一种由超级电容器储能模块、电压 DC/DC 变换器、并联逆变器和能量管理系统等组成的微电网 UPQC,实现对微电网中的各种电能质量问题进行治理。文献[35]提出一种应用于双馈风电系统的九开关型 UPQC 方案,应用于微电网中,可以在多种故障电压工况下实现柔性故障穿越。

2 检测方法综述

UPQC 用于电能质量治理时,电能质量的检测分析是关键环节,根据 UPQC 检测功能不同分为电压检测、谐波与无功电流检测。

2.1 电压检测方法

1) 国外电压检测技术现状

对于电压检测方法,主要是采用 Hideaki Akagi 于 1983 年提出的瞬时功率理论方法^[36],后来被广泛应用于 UPQC 研究中,并得到很多改进的方法。文献[37]采用瞬时功率理论的 pq 方法进行电压跌落和骤升检测,文献[38]对 pq 理论加以修正,利用广义级联延迟信号抵消技术提取公共连接点电压基频正序分量,应用于 UPQC 的电压补偿中。除了 pq 方法,基于瞬时理论的 dq0 方法也得到广泛研究^[39],并有多项改进方法。文献[40]采用 dq0 方法进行电压检测,对 dq 变换的值进行平方和计算,让其平方根值由低通滤波器进行滤波,实现电压检测,仿真表明提升了电压检测的精度。而文献[41]在瞬时功率理论基础上,采用鲁棒同步电路检测电网中相位角的基本正序分量电压,建立可靠的 UPQC 模型,验证了检测与补偿效果。文献[42]提出在 dq0 变换方法中运用引力搜索算法对 UPQC 控制策略进行改进,仿真验证了补偿效果。

通过对电压检测方法的比较,基于瞬时无功功率理论 pq 变换方法,该方法实现起来比较简单,但只适用于系统电压为三相正弦对称的情况,否则将存在较大检测误差。dq0 变换方法能适用于任意非正弦、非对称三相电路,故应用更广泛。除了基于瞬时无功功率理论之外,还有其他一些电压检测方法,比如文献[43]提出了一种基于自适应陷波滤波器的参考波形检测方法,利用两个耦合的滤波器生

成 UPQC 并联元件和串联元件的参考波形,与传统补偿方法相比,该算法在电压和电流畸变补偿方面具有一定的优越性。

2) 国内电压检测技术现状

国内方面,众多高校对 UPQC 进行了研究,文献[44]对 UPQC 及其控制信号检测方法探讨,提出了基于 pq 方法的瞬时电压检测新方法,除了 pq 方法,基于瞬时理论的 dq 方法也得到研究,文献[45]研究出基于 dq0 的改进方法,不使用低通滤波器,提高了检测运算速度。针对电网电压畸变和不平衡状态下采用锁相环所带来的缺陷,文献[46]给出一种无锁相环 UPQC 电压检测方法,该方法无需对电压进行锁相和对电网电流进行同步坐标变换,可以更加可靠、快速和准确地检测电压、电流补偿量。随着微电网快速发展,针对微电网的电能质量治理技术发展迅速。文献[47]在微电网中构成了包含光伏阵列的 UPQC 拓扑结构,采用基于 RBF 神经网络的 PI 控制电压检测方法,通过仿真结果表明该控制策略抗干扰能力强,可以应用于电能质量治理。

另外,除了基于瞬时功率理论的电压检测方法之外,文献[48]研究出了一种基于 Kalman 滤波的 UPQC 检测方法,采用结合线性前馈环节的模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)策略、前馈 MPC 和反馈 MPC 相结合策略和异步 MPC 策略,仿真验证了该算法。

2.2 谐波与无功电流检测方法

谐波与无功电流检测方法是 UPQC 进行电能质量治理的另一关键技术,其检测方法主要包括离散傅里叶变换方法、小波变换、自适应滤波及基于瞬时功率理论等。

1) 国外研究现状

国外方面,文献[49]基于瞬时功率理论改进了 dqz 作为参考系,采用比例积分控制器对控制信号的稳态误差调整串并联补偿器。文献[50]采用小波变换进行谐波检测,利用 PSCAD/ EMTDC 数字仿真结果验证了该控制算法的有效性。自适应控制方法除了应用于电压检测,在谐波检测中也得到应用^[51]。文献[52]采用相对简单、快速的最小二乘法检测技术,通过卡尔曼滤波的鲁棒控制技术,使得 UPQC 解决了电压暂降、骤升、谐波畸变(电压和电流)等多种电能质量问题。

运用较多的谐波与无功电流检测方法主要还是基于瞬时功率理论,文献[53]提出了一种基于改进 pq 理论的谐波综合检测算法,并将其应用于 UPQC 中,能快速地检测谐波电流、三相电压不平衡等各种电能质量问题。文献[54]进一步改进了基于 pq 理

论, 利用广义级联延迟信号抵消技术提取公共点电压的基频正序分量, 应用于 UPQC 谐波检测中, 取得了较好效果。文献[55]采用 pq 和 i_p-i_q 两种方法检测谐波电流用于 UPQC 的补偿, 并对比了补偿效果, pq 法适用于电网电压对称且无畸变情况下谐波电流的检测, 能应用于电网电压畸变或电网电压不对称的情形。文献[56]将瞬时功率理论和人工智能技术相结合, 设计了基于神经网络的电流控制器, 利用离线训练数据对比比例积分控制器参数进行优化, 通过仿真与实验验证了其可行性。文献[57]针对基于瞬时无功功率理论的二极管箝位型 UPQC 补偿量检测方法, 使用锁相环所带来的误差, 提出无锁相环的基于电网工频时钟的 $dq0$ 检测法, 设计了混合无源控制器用于检测与控制。

2) 国内研究现状

国内方面, 紧紧跟随国际前沿技术, 并不断创新, 取得了丰富成果。文献[58]提出了基于 Park 变换的 UPQC 电压电流综合检测法。随后, 文献[59]提出一种特殊情况下的简化 pqr 理论, 用于 UPQC 的检测与控制, 实现对负载谐波、无功及中线电流较好的补偿。对于 i_p-i_q 方法, 其优点是不受电压畸变的影响, 没有除法运算, 因此该方法得到深入研究。文献[60]在 i_p-i_q 的基础上, 提出基于 dq 坐标系的多目标检测方法检测谐波与无功电流。文献[61]针对 UPQC 传统的谐波检测方法计算过程复杂, 在电压畸变的情况下无法准确获得电压相位等缺陷, 研究了一种基于解耦双同步参考坐标变换的锁相环检测的检测技术。随着人工智能技术的发展, 文献[62]提出一种基于粒子群优化模糊控制的信号检测算法, 将粒子群优化的模糊控制器引入其中, 进行无功、谐波电流检测, 经验证具有计算简单、检测精度高的特点。

另外, 国内采用自适应谐波检测进行谐波检测也取得很好的成果。文献[63]研究出一种基于自适应噪声对消技术的改进自适应谐波检测方法, 提高了该方法的瞬态响应速度, 可用于时变谐波的跟踪检测。文献[64]提出了一种基于改进最小均方差算法的谐波电流检测方法, 用于谐波检测。此外, 还有小波变换法等其他方法, 文献[65]提出了一种基于小波变换的 UPQC 检测方法, 随着人工智能理论的发展, 人工智能技术也已应用到 UPQC 谐波检测中^[66]。

3 控制策略综述

UPQC 补偿控制主要包括电压补偿控制, 谐波补偿控制以及无功补偿控制等。通常控制方法包括三角波调制法 (Pulse Width Modulation, PWM)、滞

环比较法、电压空间矢量调制法 (Sector Voltage Pulse Width Modulation, SVPWM) 等。随着研究的深入, 针对具体的控制对象和复杂应用场合, 一些改进控制策略或创新方法得以研究应用。UPQC 的控制策略通常采用间接控制策略, 其控制技术主要包括:

1) 三角波调制法, 其优点是容易设计输出滤波器、动态特性良好, 缺点是高频的三角波将使逆变器始终在高频状态工作, 产生较大的开关损耗和高频失真, 因此在大功率应用中受到限制。

2) 滞环比较法, 该算法的优点在于电路简单、稳定性好, 可提高直流电压利用率, 增大逆变器的输出能力。不过由于环宽固定, 对整个控制电路中器件的损耗较大, 可加以改进应用于 UPQC 补偿策略中。

3) SVPWM 方法, 与常规 PWM 控制技术相比, 优点是电流波形畸变减小, 具有直流电压利用高、动态响应快等优点, 而且更易于数字化实现, 在实际中应用比较广泛。

此外, 还有无差拍控制等其他控制方法, 随着研究不断发展, 呈现了不少新的控制思路和控制方法^[67]。

3.1 电压补偿控制策略

1) 国外方面, 对于 UPQC 电压补偿, 文献[68]与传统的补偿策略不同, 并联负载的变换器控制为正弦电压源, 串联电网与负载的变换器控制为正弦电流源, 电压和电流控制器均采用同步旋转参照系, 变换器采用 SVPWM 技术, 通过理论与实验样机进行了验证。文献[69]提出 UPQC 采用基于功率角控制的同步参考系模型, 采用滞环电流控制和改进的空间矢量调制技术分别对 SAPF 和 PAPF 进行控制, 实现电压的补偿功能。针对常用的 PI 控制技术, 文献[70]在光伏微电网情况下, 采用模糊逻辑控制应用于 PI 控制器中, 实现 UPQC 的电压补偿, 文献[71]对此改进, 采用一种新的神经网络控制系统代替模糊逻辑控制系统, 应用于电压补偿。

2) 国内方面, 文献[72]研究出一种基于 H_∞ 控制的 UPQC 协调控制器的设计方法, 在此基础上, 文献[73]进一步提出一种基于鲁棒 H_2/H_∞ 优化理论的控制方法实现 UPQC 优化控制, 仿真验证了该方法具有响应速度快、鲁棒性强等特点。文献[74]克服传统补偿算法的缺陷, 提出了改进型最小能量电压跌落补偿法, 文献[75]将模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 控制算法应用到 UPQC 电能质量控制中, 设计了 MPC 控制器, 仿真结果表明, 该方法能够有效补偿谐波、抑制干扰。

随着人工智能技术发展, 该技术已逐渐应用于电能质量治理领域。文献[76]提出一种基于大脑情

感学习的智能控制器新型控制策略。根据大脑情感学习计算模型的结构特点和作用机理,采用大脑情感学习的智能控制方法对 UPQC 系统进行多目标控制,文献[77]提出采用一种基于混沌免疫遗传算法用于 UPQC 电压跌落的检测和补偿。

对于 UPQC 直流侧电压控制技术,文献[78]把分数阶的 PI^2D^α 控制器引进直流电压的控制中。文献[79]提出一种针对容量确定情况下 UPQC 串联侧过电流问题的协调控制设计方法,在传统定直流电压控制的基础上提出定有功电流限值控制,通过验证表明其协调控制方法可明显提高电压暂降的补偿幅值和持续时间。

3.2 谐波与无功补偿控制策略

UPQC 的谐波控制和无功补偿控制也是重点研究内容,近年来,这方面的创新成果也很多。一类是针对传统控制方法的改进,另外一类是采用全新的控制理论进行控制。

1) 国外方面,文献[80]提出了一种优化 UPQC 系统规模的广义策略,采用功率角控制方法,设计了一种基于数据驱动控制的控制器,实现了在不同补偿条件下的电能质量治理。在此研究后,文献[81]提出了一种基于同步参考系的功率角控制方法,为电压的骤升、骤降和不平衡状态下的负载无功补偿和负载电压补偿提供了有效的途径。而对于复杂的拓扑结构,也采取针对性的控制策略,文献[82]提出一种多电平三相 UPQC 的离散时间线性控制策略,采用经典的基于根迹法的设计方法来选择控制器参数,仿真和实验结果表明,该系统具有较好的稳态和瞬态特性。此外,文献[83]采用模型预测控制方法,进行 UPQC 的谐波补偿。

2) 国内方面,围绕 UPQC 谐波补偿和无功控制,成果丰硕。文献[84]针对单相 UPQC,建立伪线性系统,采用线性二次型调节器设计了满足一定性能指标的控制器,仿真与实验证明了该控制器设计的可靠性与有效性。文献[20]采用 $dq0$ 谐波检测法,并联侧引入自抗扰控制器,采用扩张状态观测器进行估计,通过非线性反馈控制律进行补偿。文献[85]利用状态反馈精确线性化方法将其解耦成线性系统,结合变结构控制理论,设计反馈控制器,仿真验证了该算法。文献[47]在 $dq0$ 变换方法基础上,研究了基于 RBF 神经网络的 PI 控制策略,利用检测补偿指令对脉冲宽度进行调制,驱动通用电桥对电能质量进行补偿。

4 技术发展趋势

考虑日趋复杂的配电网系统和精密工业设备对

电能质量的高标准要求,今后 UPQC 必将成为治理配电网电能质量的重要电力装备之一,预测 UPQC 发展趋势主要包括几个方面:

1) 拓扑结构方面,结合微电网电能质量治理,UPQC 与储能技术结合,比如超级电容器、蓄电池、超导储能等结合,实现电能质量治理与能量管理系统的结合。进一步拓展其多功能性,比如与光伏发电结合,将成为今后的研究热点^[86]。另外在中压或高压等大功率的应用场合中,基于多模块多电平结构将是未来的发展趋势。

2) 电能质量检测技术结合泛在电力物联网技术,检测涉及电能质量的更多技术参数,包括间谐波、三相电压不平衡、频率偏差、电压偏差等,探索计及微电网的电能质量评估指标体系,探索建立网络化的电能质量实时在线评估系统,为电能质量治理提供依据。

3) 电能质量控制策略方面,随着智能电网的快速发展及高渗透率微电网的接入使得配电网异常复杂,迫切需要采取新的控制方法进行电能质量治理,尤其是对于多结构多功能的 UPQC,随着人工智能理论的发展,采取人工智能技术的协调控制策略以应对复杂电网是未来发展趋势。

综合上述的 UPQC 技术研究现状及趋势,对于 UPQC 市场化从技术角度是可行的,当前系统的整体成本及复杂程度阻碍了市场化发展,但随着分布式发电容量的进一步提升,造成配电网的多种电能质量问题越发严重,UPQC 的综合电能质量治理功能优越性将得到进一步体现,必定会逐渐进入市场得到广泛应用。

5 结论

对多种微电网引起的诸如电压波动、谐波电流等电能质量问题,在含微电网的配电网中运用 UPQC 进行治理具有很好的意义和实用价值。本文主要从 UPQC 的拓扑结构、检测方法、控制策略三方面进行了归类,阐述了当前 UPQC 国内外研究发展概况,并对其技术发展趋势做了预测展望,为以后研究者提供一定的参考与借鉴作用,随着研究的不断深入,UPQC 可以更好地治理含微电网的配电网的电能质量问题。

参考文献

- [1] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.

- [2] 滕欣元, 葛雪峰, 张宸宇, 等. 基于新型统一电能质量控制器的光伏电站故障穿越技术[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 55-60, 98.
TENG Xinyuan, GE Xuefeng, ZHANG Chenyu, et al. A novel unified power quality conditioner for the fault ride-through operation of photovoltaic power station[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 55-60, 98.
- [3] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16.
LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.
- [4] 常雨芳, 蔡华洵, 曹志, 等. 考虑直流负载率的交直流混合微电网优化配置[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 31-35, 43.
CHANG Yufang, CAI Huaxun, CAO Zhi, et al. Optimal allocation of hybrid AC/DC micro-grid considering DC load rate[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 31-35, 43.
- [5] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [6] 陈其森, 汪湘晋, 池伟, 等. 多微电网互联系统能量管理方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 83-91.
CHEN Qisen, WANG Xiangjin, CHI Wei, et al. Research on energy management method of multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 83-91.
- [7] 朱永强, 唐萁. 交直流混合微电网可靠性影响因素分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 11-15, 21.
ZHU Yongqiang, TANG Qi. Analysis of factors affecting reliability of hybrid AC/DC microgrid[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 11-15, 21.
- [8] FUJITA H, AKAGI H. The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt active filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(2): 315-322.
- [9] AKAGI H, WATANABE E H, AREDES M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2017.
- [10] AGRAWAL A, AGARWAL P, JENA P. Compensation of voltage flicker using unified power quality conditioner (UPQC)[C] // 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), December 16-19, 2014, Mumbai, India: 1-5.
- [11] BHAVANI R, PRABHA N R, KANMANI C. Fuzzy controlled UPQC for power quality enhancement in a DFIG based grid connected wind power system[C] // 2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, March 19-20, 2015, Nagercoil, India: 1-7.
- [12] DANTONA G, DELLA D, FARANDA R, et al. Open UPQC power quality manager within distributed generation systems[C] // 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, September 1-4, 2015, Guarda, Portugal: 501-507.
- [13] 张少凡, 高强, 华煌圣, 等. 面向主动配电网的统一电能质量控制器补偿策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 34-41.
ZHANG Shaofan, GAO Qiang, HUA Huangsheng, et al. Compensation strategy of unified power quality controller for active distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 34-41.
- [14] KALIAPPAN S, POORNIMA M, RAJESWARI R. Improvement of source voltage and load current harmonic mitigation using UPQC: a survey[C] // 2013 7th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), January 4-5, 2013, Coimbatore, India: 110-114.
- [15] LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Coordinated power allocation and robust DC voltage control of UPQC with energy storage unit during source voltage sag[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 5-10, 2018, Portland, OR, USA: 1-5.
- [16] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [17] TEKEL A. Regular paper unified power quality conditioner: a literature survey[J]. Journal of Electrical Systems, 2011, 7(1): 122-130.
- [18] RONG Yuanjie, LI Chun, TANG Honghai, et al. Output feedback control of single-phase UPQC based on a novel model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1586-1597.
- [19] RONG Yuanjie, LI Chunwen, DING Qingqing. An adaptive harmonic detection and a novel current control

- strategy for unified power quality conditioner[J]. *Simulation Modelling Practice Theory*, 2009, 17(5): 955-966.
- [20] 程启明, 胡晓青, 吴凯, 等. 统一电能质量调节器的谐波检测与补偿策略研究[J]. *电测与仪表*, 2012, 49(3): 19-23.
- CHENG Qiming, HU Xiaoqing, WU Kai, et al. The research of harmonic detection and control strategy for unified power quality conditioner[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2012, 49(3): 19-23.
- [21] SILVA S, NEGRAO F. Single-phase to three-phase unified power quality conditioner applied in single wire earth return electric power distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(5): 3950-3960.
- [22] PAL Y, SWARUP A, SINGH B. A comparative analysis of three-phase four-wire UPQC topologies[C] // 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India, December 20-23, 2010, New Delhi, India: 1-6.
- [23] AREDES M, FERNANDES R M. A dual topology of unified power quality conditioner: the iUPQC[C] // 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, September 8-10, 2009, Barcelona, Spain: 1-10.
- [24] ONAR O C, UZUNOGLU M, ALAM M S. Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(1): 707-722.
- [25] KHADKIKAR V, CHANDRA A. A novel structure for three-phase four-wire distribution system utilizing unified power quality conditioner (UPQC)[C] // 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, December 12-15, 2006, New Delhi, India.
- [26] TURUNEN J, TUUSA H. Improvement of the voltage compensation performance of the series active power filter using a simple PI-control method[C] // 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-5, 2007, Aalborg, Denmark: 1-9.
- [27] DAVARI M, ALE-EMRAN S, YAZDANPANAHI H, et al. Modeling the combination of UPQC and photovoltaic arrays with multi-input single-output DC-DC converter[C] // 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, March 15-18, 2009, Seattle, WA, USA: 1-7.
- [28] XU Qianming, MA Fujun, LUO An, et al. Analysis and control of M3C-based UPQC for power quality improvement in medium/ high-voltage power grid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(12): 8182-8194.
- [29] ZHAO Yunhao, REN Yi, ZHOU Ming, et al. Design and simulation of multiple terminal unified power quality conditioner[C] // 2013 IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-6.
- [30] 吴峰, 郑建勇, 梅军, 等. 用于故障限流与电能补偿的多换流器式统一电能质量调节器[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(7): 32-37.
- WU Feng, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Multiconverter unified power quality conditioner for fault current limitation and power compensation[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(7): 32-37.
- [31] 王浩, 刘进军, 梅桂华. 一种串联侧三相解耦型统一电能质量控制器[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(2): 215-220.
- WANG Hao, LIU Jinjun, MEI Guihua. A unified power quality conditioner with three-phase decoupling in series section[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(2): 215-220.
- [32] 杨用春, 肖湘宁, 郭世泉, 等. 基于模块化多电平变流器的统一电能质量调节器工程实验装置研究[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(16): 3743-3755.
- YANG Yongchun, XIAO Xiangning, GUO Shixiao, et al. Research of unified power quality conditioner engineering experiment device based on modular multilevel converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(16): 3743-3755.
- [33] 冯兴田, 张丽霞, 康忠健. 基于超级电容器储能的UPQC工作条件及控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(4): 84-89.
- FENG Xingtian, ZHANG Lixia, KANG Zhongjian. Working conditions and control strategy of UPQC based on supercapacitor energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(4): 84-89.
- [34] 蒋玮, 陈武, 胡仁杰. 基于超级电容器储能的微网统一电能质量调节器[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(1): 85-90.
- JIANG Wei, CHEN Wu, HU Renjie. United power quality conditioner based on supercapacitor for microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(1): 85-90.
- [35] 胡志帅, 任永峰, 韩俊飞, 等. 适用于双馈风电系统的九开关型统一电能质量调节器[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(6): 105-112.
- HU Zhishuai, REN Yongfeng, HAN Junfei, et al. Nine-switch unified power quality conditioner based on DFIG wind power system[J]. *Automation of Electric Power*

- Systems, 2017, 41(6): 105-112.
- [36] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, IA-20(3): 625-630.
- [37] KHADKIKAR V, CHANDRA A, BARRY A O, et al. Analysis of power flow in UPQC during voltage sag and swell conditions for selection of device ratings[C] // 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 7-10, 2006, Ottawa, Canada.
- [38] DEVASSY S, SINGH B. Modified pq-theory-based control of solar-PV-integrated UPQC-S[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5031-5040.
- [39] AXENTE I, GANESH J N, BASU M, et al. A 12-kVA DSP-controlled laboratory prototype UPQC capable of mitigating unbalance in source voltage and load current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(6): 1471-1479.
- [40] TEKE A, SARIBULUT L, TUMAY M. A novel reference signal generation method for power-quality improvement of unified power-quality conditioner[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2205-2214.
- [41] MONTEIRO L, PINTO J, AFONSO J, et al. A three-phase four-wire unified power quality conditioner without series transformers[C] // IECON 2012-38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, QC, Canada: 168-173.
- [42] NAGARAJU G, SHANKAR S. Gravitational search algorithm for power quality improvement of WECS with UPQC[J]. International Journal of Intelligent Engineering & Systems, 2019, 12(1): 133-141.
- [43] ABARDEH M H, GHAZI R. A new reference waveform estimation strategy for unified power quality conditioner (UPQC)[C] // 2010 IEEE International Energy Conference, December 18-22, 2010, Manama, Bahrain: 704-709.
- [44] 李鹏, 陈志业, 尹华丽, 等. 统一电能质量控制器及其控制信号检测方法探讨[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(2): 1-5.
LI Peng, CHEN Zhiye, YIN Huali, et al. Studies of unified power quality controller and controlling signal detecting method[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(2): 1-5.
- [45] 张国荣. 电能质量综合调节器 (UPQC) 及其控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
ZHANG Guorong. Research on integrated power quality regulator (UPQC) and its control strategy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [46] 周海亮, 万健如, 李树超, 等. 电压畸变和不平衡状态下无锁相环 UPQC 补偿量检测方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 50-56.
ZHOU Hailiang, WAN Jianru, LI Shuchao, et al. Compensation detection for UPQC without PLL under voltage distortion and unbalance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 50-56.
- [47] NI Fuyin, LI Zhengming. The PI controller research of UPQC in micro-grid based on RBF neural network[J]. International Journal of Simulation--Systems, Science, Technology, 2016, 17(22): 21-26.
- [48] 张旭. 基于模型预测控制和卡尔曼滤波的统一电能质量调节器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
ZHANG Xu. Study on unified power quality conditioner based on model predictive control and Kalman filtering[D]. Tianjing: Tianjin University, 2010.
- [49] MOLINA C A, ESPINOZA J R, ESPINOSA E E, et al. Refined control of an unified power quality conditioner under nonlinear and asymmetrical loads[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010: 2581-2586.
- [50] ELNADY A, GOAUDA A, SALAMA M. Unified power quality conditioner with a novel control algorithm based on wavelet transform[C] // Conference on Electrical & Computer Engineering, May 13-16, 2001, Toronto, Ontario, Canada.
- [51] CHOUDHURY S R, DAS A, ANAND S, et al. Adaptive shunt filtering control of UPQC for increased nonlinear loads[J]. IET Power Electronics, 2018, 12(2): 330-336.
- [52] KUMAR P V, RAJESWARI R. A recursive discrete Kalman filter for the generation of reference signal to UPQC with unbalanced and distorted supply conditions[J]. International Journal of Modelling Identification and Control, 2019, 31(1): 39-52.
- [53] SHEN Silun, ZHENG Hong, LIN Yong, et al. UPQC harmonic detection algorithm based on improved pq theory and design of low-pass filter[C] // 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2018, Shenyang, China: 5156-5160.
- [54] KUMAR P K, SURESH P. Improving the performance of a solar PV integrated UPQC-S by using power control theory[J]. Suraj Punj Journal for Multi-disciplinary Research, 2018, 8(10): 75-82.
- [55] WAMANE S, BAVISKAR J R, WAGH S R, et al. Performance-based comparison of UPQC compensating signal generation algorithms under distorted supply and nonlinear load conditions[C] // Industrial Electronics &

- Applications, 2013: 38-42.
- [56] KINHAL V G, AGARWAL P, GUPTA H O. Performance investigation of neural-network-based unified power-quality conditioner[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 26(1): 431-437.
- [57] 郑成才, 王久和, 慕小斌, 等. 基于 EL 模型的 NPC-UPQC 混合无源控制方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(5): 18-24.
ZHENG Chengcai, WANG Jiuhe, MU Xiaobin, et al. Hybrid passivity-based control method for NPC-UPQC based on Euler-Lagrange model[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(5): 18-24.
- [58] 梅慧楠. 统一电能质量调节器(UPQC)检测控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
MEI Huinan. Research on detection and control method of unified power quality conditioner (UPQC)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [59] 谭智力, 李勋, 陈坚, 等. 基于简化 pqr 理论的统一电能质量调节器控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(36): 85-91.
TAN Zhili, LI Xun, CHEN Jian, et al. A new control strategy of UPQC by using simplified p-q-r theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(36): 85-91.
- [60] 姜鹏. 统一电能质量控制器的仿真及实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
JIANG Peng. Simulation and experimental study of unified power quality controller[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [61] 王浩然, 智泽英. 有效值谐波检测法在 UPQC 中的应用[J]. *电力学报*, 2017, 32(6): 454-459.
WANG Haoran, ZHI Zeying. Application of RMS harmonic detection in UPQC[J]. *Journal of Electric Power*, 2017, 32(6): 454-459.
- [62] 沈虹. UPQC 并联侧 PSO-Fuzzy 检测算法研究[J]. *电力电子技术*, 2011, 45(3): 54-56.
SHEN Hong. PSO-fuzzy detection algorithm for UPQC parallel side[J]. *Power Electronics*, 2011, 45(3): 54-56.
- [63] 盘宏斌. 综合型电能质量调节装置的理论和技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
PAN Hongbin. Research on theories and technologies of combined power quality controlling device[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [64] 刘国海, 刘颖, 陈兆岭, 等. 基于改进 VSS LMS 算法的谐波电流检测方法[J]. *江苏大学学报*, 2010, 31(3): 314-317.
LIU Guohai, LIU Ying, CHEN Zhaoling, et al. Harmonic current detecting method based on modified VSS LMS algorithm[J]. *Journal of Jiangsu University*, 2010, 31(3): 314-317.
- [65] 石国萍, 田立军. 基于小波变换的统一电能质量控制器检测方法研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2004, 16(1): 34-37.
SHI Guoping, TIAN Lijun. The detecting method based on wavelet transform of unified power quality controller[J]. *Proceedings of CSU-EPSA*, 2004, 16(1): 34-37.
- [66] NI Fuyin, LU Zheng, LI Zhengming. A harmonic detecting method of UPQC parallel active power filter in photovoltaic micro-grid[J]. *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 2016, 17(37): 11-17.
- [67] 万健如, 裴玮, 张国香. 统一电能质量调节器同步无差拍控制方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(13): 63-67.
WAN Jianru, PEI Wei, ZHANG Guoxiang. Research on synchronization deadbeat control algorithm for unified power quality conditioner[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(13): 63-67.
- [68] MODESTO R A, DA SILVA S, DE OLIVERA J. Power quality improvement using a dual unified power quality conditioner/uninterruptible power supply in three-phase four-wire systems[J]. *IET Power Electronics*, 2015, 8(9): 1595-1605.
- [69] PATNAIK N, PANDA A. Performance analysis of a 3 phase 4 wire UPQC system based on PAC based SRF controller with real time digital simulation[J]. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 2016, 74: 212-221.
- [70] RAO K, SRIKANTH K. Improvement of power quality using fuzzy logic controller in grid connected photovoltaic cell using UPQC[J]. *International Journal of Power Electronics Drive Systems*, 2014, 5(1): 101-111.
- [71] SARAVANAN R, MANOHARAN S. Intelligent controller for UPQC using combined neural network[J]. *Circuits and Systems*, 2016, 7(6): 680-691.
- [72] 李鹏, 杨以涵. 基于 H_∞ 控制理论的 UPQC 串并联单元协调控制的实现[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(20): 91-97.
LI Peng, YANG Yihan. Realization for coordinated control of UPQC series unit and shunt unit based on H_∞ control theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(20): 91-97.
- [73] 李圣清, 罗晓东, 李永安, 等. 微电网背景下 UPQC 鲁棒 H_2/H_∞ 优化控制方法研究[J]. *湖南大学学报*, 2012, 39(7): 54-59.
LI Shengqing, LUO Xiaodong, LI Yong'an, et al. Study on the robust H_2/H_∞ control method for UPQC in microgrid[J]. *Journal of Hunan University*, 2012, 39(7):

- 54-59.
- [74] 李晓亮, 夏明超, 毛彦辉, 等. 基于改进型统一电能质量调节器结构的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 22-27.
LI Xiaoliang, XIA Mingchao, MAO Yanhui, et al. A microgrid control strategy based on improved structure of UPQC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 22-27.
- [75] 张旭, 杨学友, 刘常杰. 模型预测控制在统一电能质量调节器中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 35-40.
ZHANG Xu, YANG Xueyou, LIU Changjie. Application of model predictive control in unified power quality conditioner[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 35-40.
- [76] 杨达亮, 卢子广, 杭乃善. 基于情感智能控制器的统一电能质量调节器[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 118-124.
YANG Daliang, LU Ziguang, HANG Naishan. Unified power quality conditioner using emotional intelligent controller[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 118-124.
- [77] NI Fuyin, LI Zhengming, WANG Qi, et al. UPQC voltage sag detection based on chaotic immune genetic algorithm[J]. Cluster Computing, 2017, 20(1): 321-333.
- [78] 梁祖权, 束洪春. 新型 UPQC 直流电压的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 147-151.
LIANG Zuquan, SHU Hongchun. Novel UPQC DC voltage research of $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 147-151.
- [79] 陆晶晶, 肖湘宁, 张剑, 等. 基于定有功电流限值控制的 MMC 型 UPQC 协调控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 196-204.
LU Jingjing, XIAO Xiangning, ZHANG Jian, et al. MMC-UPQC coordinated control method based on fixed active current limit value control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 196-204.
- [80] YE Jian, GOOI H B, WU Fengjiang. Optimization of the size of UPQC system based on data-driven control design[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2999-3008.
- [81] PANDA A. K, PATNAIK N. Management of reactive power sharing & power quality improvement with SRF-PAC based UPQC under unbalanced source voltage condition[J]. International Journal of Electrical Power, 2017, 84: 182-194.
- [82] MUNOZ J A, ESPINOZA J R, BAIER C R, et al. Design of a discrete-time linear control strategy for a multicell UPQC[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3797-3807.
- [83] KWAN K H, TAN K T, PING L S. An unified power quality conditioner for load sharing and power quality improvement[C] // 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 21-24, 2012, Singapore, Singapore.
- [84] 戎袁杰, 李春文, 汤洪海, 等. 单相 UPQC 的逆系统解耦控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(5): 819-822.
RONG Yuanjie, LI Chunwen, TANG Honghai, et al. Inverse system decoupling controller design of single phase UPQC[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(5): 819-822.
- [85] 常晓, 王奔, 王鹏, 等. 统一电能质量控制器的非线性控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化, 2013, 35(5): 51-57.
CHANG Xiao, WANG Ben, WANG Peng, et al. A study on nonlinear control strategy for unified power quality controller[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 35(5): 51-57.
- [86] 徐晓刚, 李兰芳, 吴国兵, 等. UPQC 在电力系统中的研究现状和挑战[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 1-9.
XU Xiaogang, LI Lanfang, WU Guobing, et al. Research and challenges of UPQC in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 1-9.

收稿日期: 2019-12-06; 修回日期: 2020-03-12

作者简介:

倪福银(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电与微电网, 电能质量分析与控制等; E-mail: 7896276@qq.com

李正明(1958—), 男, 通信作者, 教授, 博导, 研究方向为电力系统自动化、智能电网、电能质量评估等; E-mail: lzming@ujs.edu.cn

(编辑 葛艳娜)