

微电网背景下电能质量分析与治理

周京华, 闫天乐, 郭磊轩, 章小卫

(北方工业大学北京市变频技术工程技术研究中心, 北京 100144)

摘要:随着微电网中新能源发电的高渗透率及高比例电力电子设备的应用,加之不平衡、非线性等种类繁多的负荷及储能设备的接入,微电网中电能质量问题日益严峻且具有一定的特殊性:一方面,电压波动等传统问题在微电网中更为突出;另一方面,高度电力电子化以及开关频率的提高导致间谐波和超高次谐波等新问题。首先,介绍了微电网中电能质量问题的起因、特殊性、危害及综合治理措施;其次,针对国内外研究现状,总结了新能源并网中公共耦合点电压与频率偏差的治理方案、储能设备在微电网电能质量问题治理的工程应用,同时对电力弹簧、多功能并网逆变器新技术进行了介绍;最后,结合我国智能电网发展,对微电网电能质量问题的综合治理进行展望。

关键词:微电网;新能源渗透率;电力电子;电能质量;智能电网

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23101

Analysis and Treatment of Power Quality in the Background of Microgrid

ZHOU Jinghua, YAN Tianle, GUO Leixuan, ZHANG Xiaowei

(Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: With the high penetration rate of new energy power generation in microgrids and the application of high proportion of power electronic equipment, coupled with the access of a wide variety of loads such as unbalanced and non-linear loads and energy storage device, the power quality problems in microgrids have become increasingly serious and has certain particularities: on the one hand, traditional problems such as voltage fluctuations are more prominent in the microgrid; on the other hand, the high degree of power electronics and the increase in switching frequency lead to some new problems such as inter-harmonics and ultra-high harmonics. Firstly, the causes, characteristics and hazards of traditional power quality problems in microgrids and comprehensive curing measures were introduced. Secondly, according to the current research status at home and abroad, the treatment of voltage and frequency deviations at point of common coupling in new energy grids were summarized. Moreover, new technologies such as power springs and multi-function grid-connected inverters were introduced. Finally, combined with the development of Chinese smart grid, the comprehensive management of microgrid power quality problems was prospected.

Key words: microgrid; new energy penetration; power electronics; power quality; smart grid (SG)

微电网是一种将“发、配、用”有机结合的一体化系统,结合了分布式发电(distributed generation, DG)、储能装置、监控和保护装置以及各种负荷,可以实现自我控制,具备能量管理能力,可以并网或离网运行^[1],其典型结构如图1所示。同时,作为能源互联网(energy internet, EI)中的重要组成部分,微电网可以使得DG更加灵活、高效、智能地接入^[2]。

随着微电网研究的不断深入以及微电网应

用规模的不断扩大,其电源类型、运行模式较多,加之DG间歇性与随机性的特征,使得微电网中电能质量问题与传统电力系统相比具有特殊性,因此分析微电网电能质量问题,了解其种类、特性及产生的机理,是对其进行针对性治理的重要基础,治理微电网电能质量对于保证微电网的安全可靠运行具有重要意义。

本文对在微电网中表现更为突出的电压波动等传统电能质量问题以及超高次谐波等电能

基金项目:北京市高水平创新团队建设计划(IDHT20180502)

作者简介:周京华(1974—),男,博士,教授,Email:zjh@ncut.edu.cn

质量新问题进行分类、归纳和总结,针对并网、离网条件下分别提出相应解决措施,为微电网电能质量治理提供参考。

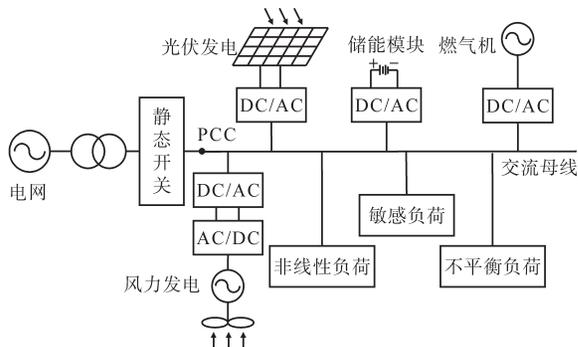


图1 微电网典型结构示意图

Fig.1 Typical structure of microgrid

1 微电网结构及运行特性分析

与传统电网相比,微电网融合了风、光、储等不同能源形式,运行方式更加灵活。微电网大量采用电力电子变换器作为接口装置,响应速度快、功率灵活可控,但大量的电力电子接口装置导致微电网惯性较弱,更容易受功率波动的影响^[3]。同时,微电网具有较小的短路比(short circuit ratio, SCR),表现出弱电网特征^[4]。微电网中公共母线与并网逆变器存在一定的电网阻抗,这会影响并网逆变器的安全稳定运行和原有并网逆变器参数,从而导致控制性能变差,也会削弱原有的阻尼效应,导致并网电流畸变。

微电网可以分别运行于并网、离网状态,并网模式下微电网通过公共耦合点(point of common coupling, PCC)接入传统电网。当微电网中电能充足时,一部分供给本地负荷,其余通过PCC传输至电网;当微电网中能量不足时,由大电网和微电网共同为微电网负荷供电。孤岛运行模式适用于大电网出现故障或独立供电情况。

相较于大电网,微电网中传统电能质量问题,如电压波动等问题更为严重,且PCC处的电能质量会影响大电网以及微电网的稳定运行^[5]。另外,微电网中新能源渗透率逐步提高,电力电子设备所占比例越来越大,电力电子技术的复杂性和多样性延伸出一些新的电能质量问题,如间谐波和超高次谐波^[6]。

目前,国内外对微电网的运行与控制,逐渐

形成了一系列标准和规范^[7]。我国“十二五”规划中明确提出加快社会主义新农村建设,而建设微电网则可以有效弥补农村电网的不足^[8-9];在“十三五”期间28个新能源微电网示范项目获批^[10];国务院办公厅2020年11月印发的《新能源汽车产业发展规划(2021年—2035年)》明确指出,鼓励“光储充放”多功能综合一体站建设,也有力推动了微电网发展^[11]。

2 微电网电能质量突出问题

2.1 电压偏差

大电网中电压偏差多利用并联电容器组和静止同步补偿器/静止无功发生器(static synchronous compensator/static var generator, STATCOM/SVG)进行无功补偿调节。微网中DG的功率因数介于超前0.98至滞后0.98之间,大规模负荷投切出现或者负荷比重发生较大变化时,微电网中更容易出现电压偏差^[12]。《微电网接入电力系统技术规定》表明,并网模式下微电网PCC处电压偏差、孤岛模式下微电网向内部负载提供电能均应满足GB/T 12325的要求^[13]:20 kV及以下PCC电压偏差应不超过标称电压的 $\pm 7\%$ 。

电压偏差可能会导致设备的供电电压偏离额定电压,设备工作在非额定状态下会出现运行性能恶化甚至损坏,电压偏差也可使一些敏感负荷停机。此外,微电网与大电网在并/离网切换过程中,PCC处电压偏差也可能导致切换失败,影响系统正常运行。

2.2 频率偏差

为保证电气设备可靠的运行,频率应维持在工频状态下。大电网中由于发电机的惯性较大,当频率偏差出现时,可以通过发电机和主调频厂进行调频。而微电网频率偏差较大的原因在于:1)微电网容量小、惯性较弱,易受冲击负荷的影响导致频率偏差;2)DG中可调节余量不足导致频率偏差;3)微电网和大电网交换功率时可能出现频率偏差^[12]。《微电网接入电力系统技术规定》表明并网模式下微电网频率响应时间要求如表1所示。频率偏差应在孤岛运行模式下满足GB/T 15945的要求^[13]:由于冲击负荷导致的系统频率偏差的允许范围应限制在 ± 0.2 Hz,不超过300 MW的小容量电力系统频率偏差的允许范围应限制在 ± 0.5 Hz。

表1 微电网的频率响应时间要求

Tab.1 Time response of microgrid frequency

频率范围/Hz	要求
$f < 48$	微电网立即由并网模式转为孤岛运行模式
$48 \leq f < 49.5$	每次低于49.5 Hz时至少能运行10 min,微电网应停止从电网吸收有功功率,并尽可能发出有功功率
$49.5 \leq f \leq 50.2$	持续运行
$50.2 < f \leq 50.5$	频率高于50.2 Hz时,微电网应停止向电网发出有功功率,并尽可能吸收有功功率
$f > 50.5$	微电网立即由并网模式转为孤岛运行

2.3 电压暂降

电压暂降通常是由电源故障或者负载短路故障引起的。微电网中DG随机性较大,在各种类型负荷和DG的共同作用下,电压暂降较为严重。电压暂降严重威胁工业园区内如数据中心等敏感性负载的正常运行。

2.4 电压波动/闪变

微电网中DG输出功率的随机性与波动性会导致电压波动/闪变,且电压波动与功率波动剧烈程度成正比^[14]。另外,惯性较小的微电网可能会受到负载投切的影响导致线路阻抗变化,进而引起电压波动^[15]。《微电网接入电力系统技术规定》表明,并网模式下微电网PCC处电压偏差、孤岛模式下微电网向内部负载提供电能均应满足GB/T 12326的要求^[13]:对于不大于35 kV的中低压系统,电压波动频度 r 分别处于 $r \leq 1$, $1 < r \leq 10$, $10 < r \leq 100$ 和 $100 < r \leq 1000$ 时,PCC电压波动限值分别为4%,3%,2%和1.25%。

2.5 三相不平衡

微电网中存在各种类型的负载,其中三相不对称负载会导致微电网出现三相不平衡问题,此外,单相微电源并入电网会向某一相单独注入功率,引起不平衡现象^[16]。《微电网接入电力系统技术规定》表明,并网模式下微电网PCC处电压偏差、孤岛模式下微电网向内部负载提供电能均应满足GB/T 15543的规定^[13]:PCC处三相电压不平衡度限制在2%以内,短时内限制在4%以内;其中分布式发电导致的PCC三相电压不平衡度应小于等于1.3%,短时内小于等于2.6%。

微电网中三相电压、电流不平衡会产生大量负序、零序电流,可能导致敏感负荷的异常运行,甚至损坏。孤岛运行模式下,三相不平衡可能会造成微电网系统失稳。

2.6 谐波、间谐波、超高次谐波

微电网谐波主要来源为大量非线性负载和电力电子设备,特别是大量并网逆变器的应用会导致在PCC处产生谐波^[17]。谐波会导致波形畸变、增大功率损耗、降低功率因数,同时微电网总负荷电流中谐波电流所占比例提高会引起公共交流母线馈线阻抗不匹配,影响系统稳定性。

间谐波的频率可能为谐波之间的某一频率分量,即基波频率的非整数次倍数的扰动分量。随着微电网中风电、光伏等新能源发电渗透率及电力电子化所占比例越来越大,间谐波引发的工程问题越来越多^[18],如我国沽源风电场出现了6~8 Hz频率时变得振荡;我国新疆某地的大型直驱风电场出现频率时变的间谐波,多次引起当地电网的电压波动与闪变。

《微电网接入电力系统技术规定》表明,并网模式下微电网PCC处孤岛模式下微电网向内部负载提供电能均应满足GB/T 14549的要求^[13]:380 V电网条件下,电压总谐波畸变率不得超过5%,奇次谐波不得超过4%,偶次谐波不得超过2%。微电网并网运行时间谐波应满足GB/T 24337的要求^[13]。

超高次谐波是指2~150 kHz范围内的谐波。随着新能源的大力推广,风电变换器、光伏逆变器、电动汽车充电桩等设备渗透率提高,再加上各种开关电源的应用以及SiC, GaN等新型开关器件的发展,微电网中电力电子设备的开关频率可高达几十kHz,甚至更高,由此导致微电网中超高次谐波问题日益严峻^[19]。超高次谐波会引起系统超高次谐振、电气设备异常(如电动汽车充电中断)以及造成通信故障等问题。

3 微电网电能质量治理措施

微电网电能质量治理可以采用无源滤波器或有载调压变压器等,除此之外,还包括基于电力电子技术的电能质量调节设备,如有源电力滤波器(active power filter, APF)、动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)、静止同步补偿器/静止无功发生器(STATCOM/SVG)等设备,此类设备多针对某一电能质量问题进行单独治理,从经济性及治理效果上不具有最优解,考虑到储能装置在调节电网有功功率时通常有容量冗余,甚至某时间段闲置,故可利用其剩余容量进行电能质量治理^[20]。另外,统一电能质量调节器(uni-

fied power quality conditioner, UPQC)、多功能并网逆变器 (multi-functional grid-connected inverter, MFGCI)等可对电能质量问题进行综合治理。

3.1 电压偏差治理

针对微电网并网中电压偏差,可利用其中已经存在的电力电子变换器,通过控制策略实现电压偏差治理。文献[21]针对孤岛运行模式下微电网中负载变化导致的电压偏差,采用基于扰动观测器的双向AC/DC换流器电压波动控制策略,对外界干扰量快速跟踪,以提高系统动态性能与稳定性,从而有效抑制电压偏差。文献[22]基于一种自适应可调模糊粒子群算法,以有功损耗、总电压偏差和电压稳定性指标为目标函数,通过无功优化的调度实现有功损耗与总电压偏差最小。

3.2 频率偏差治理

微电网中出现频率偏差的主要原因是新能源发电系统惯性较低。文献[23]在虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的基础上,采用深度神经网络算法,在不同阶段自适应选择参数,从而控制双馈感应风电机组中的虚拟惯量,减小外界干扰下的频率偏差。此外,近年来电动汽车充电系统接入电网数目越来越多,可利用电动汽车作为移动储能装置进行微电网调频,文献[24]提出一种电动汽车参与孤岛运行的微电网辅助调频充放电控制策略,利用频率差额以及目前电动汽车荷电状况调节充放电功率指令,利用VSG控制电动汽车的充放电操作,使电动汽车参与微电网调频并抑制频率偏差。

3.3 电压暂降治理

电压暂降治理通常采用固态快速切换开关(solid-state transfer switch, SSTS), DVR和STATCOM等电力电子设备。SSTS通过切换暂降线路,将敏感负载快速、可靠地切换至备用电源。DVR通过串联储能元件补偿电压,保持电压稳定,但其治理效果受负荷容量影响。针对微电网中DVR单独使用无容量受限的情况,文献[25]将配备蓄电池的储能系统通过Buck电路与DVR进行连接,通过储能系统为DVR提供足够的能量,从而抑制电压暂降现象,确保微电网电压的稳定。

3.4 电压波动治理

微电网中光伏、风电等能源并网场景下电压波动主要与电源出力引起有功功率的波动有关,因此可通过引入储能装置平抑波动或者通过对波动量快速跟踪、补偿,实现对电压波动治理。

由于风电发电、光伏发电易受外界条件影响,导致电压波动,文献[26]采用一种改进粒子群算法对蓄电池储能系统中的有功功率和无功功率进行控制,减小外界干扰对功率稳定性的影响,从而抑制微电网电压波动。对于微电网孤岛运行时,大型冲击性负载的接入引起的电压波动,文献[21]提出一种能够快速跟踪DG出力和负荷功率变化等扰动量的电压观测器,应用于双向AC/DC变流器母线,提高系统的动态响应性能和鲁棒性。文献[27]基于相位空间法,提出电压波动控制策略,其基本原理为通过快速跟踪负载电压幅值的变化,进行补偿,从而抑制PCC电压波动。

3.5 三相不平衡治理

微电网电源故障或者三相负载不平衡均可能产生三相不平衡现象,其治理主要通过拓扑结构或控制策略的优化、安装SVG等电能质量治理装置或引入储能设备实现。

针对交直流混合微网三相不平衡问题,文献[28]在直流微网内采用分段下垂的自治分布储能系统,通过相间功率交换以及直流储能调节实现三相负载功率平衡。文献[29]采用多变流器并联+z型接地变压器结构的变流器,提出一种基于正序旋转坐标系的PI+VPI控制策略,对由于不平衡负荷造成的输出电压不平衡进行补偿,进而保证设备的供电质量。由于大量不平衡负载导致微电网三相电压不平衡,文献[30]针对微电网孤岛运行模式,提出一种基于虚拟阻抗的电压不平衡补偿策略,引入虚拟负序阻抗补偿负序电流,通过解耦的控制算法分别独立控制正序和负序分量。

3.6 谐波治理

谐波治理可采用无源滤波器和APF方案,其中无源治理方案连接方式简单、成本较低,但只能对特定次谐波进行滤除,无法对变化的谐波进行针对性滤除,灵活性不好。APF实时动态性好、准确度高,且可以对特定次谐波进行滤除,灵活性高,但易受电网参数影响,易因过载而退出运行。针对微电网因电网阻抗过大以及相邻微电网距离不可忽略时传统APF的补偿性能不佳的问题,文献[31]提出一种基于谐波阻抗匹配的治理方案,通过检测线路中点的谐波电压,协调控制APF谐波阻抗,并根据谐波含量自动调节线路两端谐波阻抗相角,在电网阻抗较大时,也能对谐波进行有效补偿。文献[32]提出一种基于模糊控制的谐波放大效应抑制策略,采用mamdani

模糊模型求得电流补偿率最佳值,以解决谐波治理效果与谐波放大效应二者的矛盾。

另外,储能变流器和光伏并网变流器也可用于微电网谐波治理,由于其结构具有相似性,合理利用其剩余容量,通过控制策略的优化,无需单独配置APF即可实现有源滤波功能,可以降低谐波治理成本,经济性较好。文献[33]在光伏并网新能源发电系统中集成有源滤波控制,考虑两者结构的相似性,通过控制策略的优化,完成光伏发电并网的基础功能外,达成补偿无功及谐波电流的目的。

3.6.1 间谐波治理

间谐波的频谱分布分散,无源滤波治理方案只能对特定频段间谐波进行抑制,整体治理效果较差,而若对所有频率的间谐波进行滤除则成本较高,因此多采用APF对间谐波进行滤除。谐波电流的检测精度大大影响APF的工作性能,文献[34]针对工作时含有间谐波的APF,提出一种基于改进的滑窗离散傅里叶变换的谐波检测算法,解决了间谐波检测计算量大与数字控制器计算能力有限的矛盾。

3.6.2 超高次谐波治理

光伏逆变器等电力电子装置引起的超高次谐波频率主要与开关频率有关,因此超高次谐波的治理可从装置自身和后期治理两个方面考虑^[19]。从装置自身考虑,可以通过优化电力电子器件开关频率,减少超高次谐波的原生发射;从后期治理考虑,可通过加装超高次谐波抑制装置^[7]。文献[35]采用LCL三阶滤波器,通过此滤波器的电容支路消除并网电流中存在的谐波,通过适当的参数设计,可以减少并网系统中超高次谐波。针对变频器、开关电源等大规模接入向电网注入超高次谐波,文献[36]提供一种超高次谐波矩阵滤波器的设计方法,对超高次谐波进行滤除的同时,可避免谐波谐振放大以及超高次谐波在配网中的交互影响。

3.7 电能质量综合治理

微电网的结构及运行方式具有特殊性,故其中往往同时存在多种电能质量问题,若仅仅针对单一问题分别采取多种治理装置方案,存在多设备协调控制复杂的问题,且成本较高,因此有必要对其进行综合治理^[37]。

为解决新能源发电随机性与波动性带来的电能质量问题,近些年有学者提出电力弹簧

(electric spring, ES)的方案,其原理为将关键负载上电压波动转移到非关键负载上,通过负载的动态平衡,保证关键负载上电压满足规定值。文献[38]在非理想电网条件下,利用粒子群算法修正偏差信息,通过ES提高关键负载上电能质量。文献[39]在传统ES的基础上提出一种主动电力弹簧(active electric spring, AES),采用双极性直接式AC-AC变换器拓扑,主动调节负载电压。

针对微电网中电能质量问题的综合治理,总体上具有两种思路。其一,安装具有综合治理能力的装置,如UPQC具有串联变流器和并联型有源电力滤波器的功能,可以对大部分电能质量问题进行治理,但由于传统的UPQC自身不损耗有功功率,也不发出有功功率,无法治理与有功功率相关的电能质量问题。对此,需要对UPQC进行优化,将其与光伏、储能等其他单元结合的方案,采用储能单元的“削峰填谷”功能,实现与有功功率相关的电能质量问题的治理^[40],结合动态响应速度快的储能单元如超级电容,利用光伏等新能源发电发出的多余能量,对不同电能质量问题生成与之对应的控制指令,实现电能质量问题的统一治理。其二,进一步利用微电网大量已经存在的并网逆变器的硬件条件,无需额外配置新的硬件补偿设备,仅仅通过控制策略的优化与调整,综合治理电能质量问题。单一控制策略或治理装置仅能针对部分电能质量问题进行治理,在实际工程应用中存在不足,对此,文献[40]提出一种两相静止坐标系下基于VPI控制器的改进型APF分频电流控制策略,与其他类型的指定次谐波电流控制策略相比,参数调节容易且处理器资源占用较少,能够对各次谐波电流中的不平衡成分进行滤除,且补偿精度高、动态响应迅速。此外,实际工程应用中,为了克服DG随机性与波动性问题,并网逆变器安装容量偏大且运行时存在剩余功率,如MFGCI可以利用微电网中新能源发电的功率余量,对微电网内的谐波和无功电流等电能质量问题进行治理^[41],例如在传统的恒功率PQ控制中加入谐波抑制功能,从而得到具有有源滤波功能的MFGCI。

4 结论

本文对微电网中更加突出的传统电能质量问题以及新问题的种类、特性及产生机理进行分类总结,概述综合电能质量问题的控制策略以及

治理措施,对比分析不同策略优缺点,为微电网背景下电能质量综合治理提供参考。

目前,智能电网(smart grid,SG)不断发展,微电网作为SG的重要组成部分,将紧随其发展趋势,并结合大数据、AI和深度学习等逐步走向智能化,微电网中的电能质量治理也将从“先污染,后治理”走向“提前、主动治理”,从单一治理走向综合性、集成化的综合电能质量治理。

参考文献

- [1] Yang D, Jiang C, Cai G, *et al.* Optimal sizing of a wind/solar/battery/diesel hybrid microgrid based on typical scenarios considering meteorological variability[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(9): 1446-1455.
- [2] Tran T S, Nguyen D T, Fujita G. The analysis of technical trend in islanding operation, harmonic distortion, stabilizing frequency, and voltage of islanded entities[J]. *Resources*, 2019, 8(1): 14.
- [3] Ponnuru S, Kumar R A, Swaroopan N M J. Intelligent control and power management of wind-solar integration of renewable energy sources using microgrid[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45(2): 2323-2328.
- [4] 施荣,王涛,李宁,等. 孤岛微电网中的虚拟同步发电机并联控制策略[J]. *电气传动*, 2021, 51(6): 44-50.
Shi Rong, Wang Tao, Li Ning, *et al.* Parallel control strategy of virtual synchronous generator in isolated microgrid[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(6): 44-50.
- [5] Shin'ya O, Shoki F, Katsuki S, *et al.* Planning renewable energy introduction for a microgrid without battery storage[J]. *Energy*, 2021, 215(B): 119176.
- [6] 肖湘宁,廖坤玉,唐松浩,等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(4): 707-720.
Xiao Xiangning, Liao Kunyu, Tang Songhao, *et al.* Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonic issues[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(4): 707-720.
- [7] 张建华,史佳琪,郑德化,等. 微电网运行与控制 IEC 标准进展与分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(24): 1-10.
Zhang Jianhua, Shi Jiaqi, Zheng Dehua, *et al.* Development and analysis of microgrid operation and control standards of international electrotechnical commission[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 1-10.
- [8] 沈沉,吴翔宇,王志文,等. 微电网实践与发展思考[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(5): 1-11.
Shen Chen, Wu Xiangyu, Wang Zhiwen, *et al.* Practice and rethinking of microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(5): 1-11.
- [9] 张丹,王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 451-458.
Zhang Dan, Wang Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 451-458.
- [10] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 1-18, 369.
Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, *et al.* A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- [11] 江晓蓓. “光储充”一体化微电网将迎来大发展[J]. *新能源科技*, 2021(2): 33-34, 36.
Jiang Xiaobei. "Optical storage and charging" integrated microgrid will usher in great development[J]. *New Energy Technology*, 2021(2): 33-34, 36.
- [12] Hirase Y, Abe K, Sugimoto K, *et al.* A novel control approach for virtual synchronous generators to suppress frequency and voltage fluctuations in microgrids[J]. *Applied Energy*, 2018, 210 (jana15): 699-710.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 33589—2017 微电网接入电力系统技术规定[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 33589—2017 Technical requirements for connecting microgrid to power system[S]. Beijing: Standards Press China, 2017.
- [14] 应鸿,林琳,吴星昂,等. 新型配电网动态电压调节器拓扑结构研究[J]. *电气传动*, 2018, 48(10): 22-27.
Ying Hong, Lin Lin, Wu Xing'ang, *et al.* Research on novel topology of dynamic voltage regulator for distribution network[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(10): 22-27.
- [15] Almohaimeed S, Mamdouh A. Power quality issues and mitigation for electric grids with wind power penetration[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(24): 8852.
- [16] 余万荣,丁宇洁,李欢,等. 不平衡电网下储能系统直流纹波分析及抑制策略[J]. *电气传动*, 2021, 51(5): 31-37.
Yu Wanrong, Ding Yujie, Li Huan, *et al.* DC-side low frequency ripple analysis and active suppression strategy of energy storage inverter under unbalanced grid[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(5): 31-37.
- [17] Eddin A M A, Zakaria S, Yuri B S, *et al.* Study of a common control strategy for grid-connected shunt active photovoltaic filter without DC/DC converter[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45: 101149.
- [18] Hou C, Zhu M, Chen Y, *et al.* Pre-filter phase-locked loop: principles and effects with inter-harmonic perturbation[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(16): 3088-3096.
- [19] 汪颖,罗代军,肖先勇,等. 多逆变器并网下的超高次谐波特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 192-199.
Wang Ying, Luo Daijun, Xiao Xianyong, *et al.* Analysis on supraharmonic resonance characteristic with integration of multiple inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 192-199.

- [20] Marcin B, Kacper S, Stanislaw P. An active power filter with energy storage and double DC conversion for power surge compensation[J]. *Electronics*, 2020, 9(9): 1489.
- [21] 蔡杰, 刘子文, 苗世洪, 等. 基于扰动观测器的孤立交直流混合微电网双向AC/DC换流器电压波动控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 96-102.
- Cai Jie, Liu Ziwen, Miao Shihong, *et al.* Research on voltage fluctuation control strategy of the bidirectional AC/DC converter in islanding AC and DC hybrid microgrid based on disturbance observer[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 96-102.
- [22] Mostafa Nasouri G, Hossein J, Mojtaba Jabbari G, *et al.* A novel hybrid optimization approach for reactive power dispatch problem considering voltage stability index[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 96: 103963.
- [23] 边晓燕, 张菁娴, 丁炆, 等. 基于DFIG虚拟惯量的微电网二维自适应动态频率优化控制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5): 1476-1485.
- Bian Xiaoyan, Zhang Jingxian, Ding Yang, *et al.* Double layer adaptive dynamic frequency optimization control of microgrid based on DFIG virtual inertia[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5): 1476-1485.
- [24] 倪坤. 电动汽车参与微电网辅助调频的充放电控制策略[J]. *电气应用*, 2019, 38(11): 50-56.
- Ni Kun. Charge and discharge control strategy of electric vehicle participating in microgrid auxiliary frequency modulation[J]. *Electrotechnical Application*, 2019, 38(11): 50-56.
- [25] 程启明, 李明, 程尹曼, 等. 微网中基于储能系统的动态电压恢复器研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(2): 385-392.
- Cheng Qiming, Li Ming, Cheng Yinman, *et al.* Research of dynamic voltage restorer based on energy storage system in microgrid system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(2): 385-392.
- [26] 杨帆, 田雷, 李浩. 基于混合积分终端滑模的超级电容有限时间平抑电压波动方法[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(10): 36-40.
- Yang Fan, Tian Lei, Li Hao. Finite-time stabilizing voltage fluctuation method for super capacitors based on mixed integral terminal sliding[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(10): 36-40.
- [27] Shokri A, Shareef H, Mohamed A, *et al.* A novel controller for a voltage controlled voltage source inverter to mitigation voltage fluctuations measured at the point of common coupling[J]. *Measurement*, 2015, 59: 216-226.
- [28] 马大中, 王雪纯, 王昊, 等. 三相不平衡的单/三相交流混合微网能量协同管理策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(14): 190-204.
- Ma Dazhong, Wang Xuechun, Wang Hao, *et al.* Energy coordination management strategy for single/three-phase power imbalance in hybrid microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 190-204.
- [29] 周京华, 张荣, 陈亚爱, 等. 张北数据港柔性变电站DC/AC变流器关键控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(11): 128-134.
- Zhou Jinghua, Zhang Rong, Chen Ya'ai, *et al.* Key control strategy for DC/DC converter in flexible substation in Zhangbei data center[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(11): 128-134.
- [30] Wang Y, Zhou G, Li X. A voltage unbalance compensation strategy based on virtual impedance for DGs in island microgrid without sequence component separation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 127(7): 106641.
- [31] 梁倍华, 何晋伟, 金子开, 等. 基于谐波阻抗匹配的微电网互联线路谐振分析及抑制措施[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(14): 123-131.
- Liang Beihua, He Jinwei, Jin Zikai, *et al.* Resonance analysis and suppression measures for microgrid interconnection line based on harmonic impedance matching[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(14): 123-131.
- [32] Zhou J, Gou L, Zhang R, *et al.* Harmonic amplification suppression strategy for parallel APF[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). Nanjing, China: IEEE, 2020: 2823-2828.
- [33] 黄鹏, 戴威, 张莹, 等. 兼具有源电力滤波器功能的多功能并网逆变器控制[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(1): 107-114.
- Huang Peng, Dai Wei, Zhang Ying, *et al.* Multi-function grid-connected inverter control with APF function[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(1): 107-114.
- [34] 杨立军, 毛宇阳, 杨志, 等. 高性能谐波电流检测及控制方法[J]. *电力电子技术*, 2019, 53(8): 1-3.
- Yang Lijun, Mao Yuyang, Yang Zhi, *et al.* A high-performance harmonic current detecting method and control strategy[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(8): 1-3.
- [35] 吕佃顺, 许洪华. 并网型中压变流器高频谐振抑制策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(23): 123-129.
- Lü Dianshun, Xu Honghua. Suppression strategy of high frequency resonance for grid-connected medium-voltage converter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(23): 123-129.
- [36] 朱明星, 张晓刚. LED驱动电路超高次谐波发射机理研究[J]. *电源学报*, 2019, 19(2): 198-206.
- Zhu Mingxing, Zhang Xiaogang. Study on supraharmonics emission mechanism for LED drive circuit[J]. *Journal of Power Supply*, 2021, 19(2): 198-206.
- [37] Abdelhakim S, Azeddine H, Mourad A A, *et al.* Active resonance damping and harmonics compensation in distributed generation based islanded microgrids[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 191: 106900.
- [38] 方乐, 周建萍, 茅大钧, 等. 基于SAPF无源控制补偿的电力弹簧控制研究[J]. *可再生能源*, 2020, 38(11): 1508-1514.
- Fang Le, Zhou Jianping, Mao Dajun, *et al.* Electric spring control research based on SAPF passive control compensation[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(11): 1508-1514.

(下转第16页)

参考文献

- [1] 英国石油公司(BP). 2019年BP世界能源统计年鉴[EB/OL]. [2019-6-11]. <https://wenku.baidu.com/view/896d1430cad376eeaeaad1f34693daef5ff71377.html>.
British Petroleum. BP statistical review of world energy 2019 [EB/OL].[2019-6-11].<https://wenku.baidu.com/view/896d1430cad376eeaeaad1f34693daef5ff71377.html>.
- [2] 董振斌,刘憬奇. 中国工业电机系统节能现状与展望[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(2): 1-4, 20.
Dong Zhenbin, Liu Jingqi. Status and prospect of industrial motor system energy conservation in China[J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(2): 1-4, 20.
- [3] 工业和信息化部、国家质量监督检验检疫总局. 关于组织实施电机能效提升计划(2013—2015年)的通知[EB/OL]. [2013-06-10]. http://www.gov.cn/zhuanti/2013-06/21/content_2595294.html.
Ministry of Industry and Information Technology, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Notice on organizing the implementation of motor energy efficiency improvement plan (2013—2015) [EB/OL]. [2013-06-10]. http://www.gov.cn/zhuanti/2013-06/21/content_2595294.html.
- [4] 习近平. 推动平台经济规范健康持续发展,把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[N]. 光明日报, 2021-03-16(1).
Xi Jinping. Efforts to promote the regulated, healthy and sustainable development of the platform economy and incorporate the peaking of carbon emissions and carbon neutrality into the overall layout of building an ecological civilization[N]. Guangming Daily, 2021-03-16(1).
- [5] 祁卓娅,王志雄. 重点用能设备节能发展现状分析[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(6): 3-6.
Qi Zhuoya, Wang Zhixiong. Analysis of energy-conservation development status for energy-consuming equipment[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2017, 30(6): 3-6.
- [6] 工业和信息化部. 国家工业节能技术装备推荐目录(2020)[EB/OL].[2020-11-05].https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art_e0190e6c3c404e54a7958e863d68d6a2.html.
Ministry of Industry and Information Technology. National recommended industrial energy saving technology and equipment catalogue (2020) [EB/OL].[2020-11-05].https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art_e0190e6c3c404e54a7958e863d68d6a2.html.
- 收稿日期:2021-04-29
修改稿日期:2021-08-17
- ~~~~~
- (上接第9页)
- [39] 刘闯,陈皓楠,韩子娇,等. 用于分布式电压调控的AC-AC型主动电力弹簧[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 737-746.
Liu Chuang, Chen Haonan, Han Ziqiao, *et al.* AC-AC based active electric spring (AC-AES) for distributed voltage regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 737-746.
- [40] 周京华,张荣,章小卫,等. 基于静止坐标系的改进型APF分频电流控制策略[J]. 电气传动, 2018, 48(11): 9-14.
Zhou Jinghua, Zhang Rong, Zhang Xiaowei, *et al.* Improved APF specified frequency current control strategy based on stationary coordinate[J]. Electric Drive, 2018, 48(11): 9-14.
- [41] Sun G, Li Y, Jin W, *et al.* Multi-functional grid-connected inverter with enhanced disturbance rejection capability[J]. The Journal of Engineering, 2019(17): 3587-3591.
- 收稿日期:2021-02-22
修改稿日期:2021-04-28