

微电网电能质量改善与控制方法综述

吴丽珍, 王晓婷, 刘腾飞

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 微电网是利用可再生能源的有效方式, 研究微电网电能质量问题具有重大的现实意义。基于对微电网中常见电能质量问题特点分析, 该文提出了评估微电网电能质量的相关指标。根据现有涉及微电网电能质量的国家、分布式电源并网及公用电网标准等, 确定微电网中不同电能质量指标的阈值, 并提出详细计算方法。分类描述了已有对微电网产生的电能质量问题提出的改善方法和控制策略。根据未来电网将与能源和信息相结合形成综合能源网络的发展趋势, 对微电网电能质量的治理方法进行展望。

关键词: 微电网; 电能质量; 分布式电源; 智能电网

中图分类号: TM277 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0682(2018)03-0016-04

Overview of power quality improvement and control methods for microgrid

WU Lizhen, WANG Xiaoting, LIU Tengfei

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Microgrid is an effective way to use renewable energy, and to study the power quality of microgrid has great practical significance. Based on the analysis of the characteristics of the common power quality problems in microgrid, the related indexes for evaluating the power quality of microgrid are put forward. The threshold value of different power quality indexes is determined according to the existing power grid quality related countries, distributed power grid and public power grid standards, and a detailed calculation method is proposed. The classification describes the existing improvement methods and control strategies for the power quality problems of microgrid. According to the trend of distribution network becoming more and more intelligent, the power quality control method of microgrid is prospected.

Key words: microgrid; power quality; distributed generation; smart grid

0 引言

微电网是集合分布式电源、储能系统、能量转换装置、监测和保护装置以及负荷的一个小型电网, 具有自我监控和能量调配功能^[1-2]。它可采用静态隔离开关并入大电网并网运行或脱离以孤岛模式运行, 提供给消费者稳定的电能供应和满意的电能质量。随着微电网渗透率的逐步提高和微电网技术的不断发展, 可再生能源的深入、综合利用率, 电网供电可靠性和灵活性显著提高。微电网可有效合理地利用分布式电源, 通过逆变器提供给母线和负荷所需功率, 这导致了微电网结构和运行方式的独特性。

微电网与大电网并网运行时, 可根据实际负荷需求, 优化电网运行方式, 降低损耗。并网运行系统发生严重故障时, 微电网可切换至孤岛运行, 维持对关键负荷的电能供应, 提高系统供电可靠性^[3]。但是, 由于分布式电源的动静态特性及微电网中许多电力电子装置的使用, 使得微电网电能质量问题与传统配电网相比有了新的特征。所以微电网在解决其电能质量问题时采用的方法也与传统配电网有所不同^[4]。此外, 在大力推广新能源的背景下, 微电网渗透率逐步增加, 用户选择电能质量时必将“择优而用”, 电能质量的优劣显得至关重要。因此, 研究微电网主要电能质量问题及改善电能质量的控制方法对促进未来微电网的进一步发展有重大意义。

1 评价微电网电能质量指标

微电网中分布式电源(DG)由于容量有限, 形式多样, 需经逆变装置并网, 并且在并网运行模式下没有电

收稿日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51467009); 兰州市科技计划项目(2016-3-6)

作者简介: 吴丽珍(1973)女, 副教授, 博士研究生, 研究方向为分布式发电与微电网的运行与控制。

压和频率的支撑能力,故其电能质量受外界的干扰较为明显^[5]。根据有关标准,评价微电网电能质量的重要指标有电压偏差、频率波动、电压波动与闪变、三相不平衡和谐波。下面对其进行详细描述:

1) 电压偏差

DG的接入导致电网功率流向不再遵循传统的单一模式,进而电网电压调节方式产生了明显不同。当电网负荷比重发生较大变化时,由于DG补偿容量有限,仅能将分布式电源的功率因数调节在极小范围之内,导致电网产生较大电压偏差^[6]。

2) 频率偏差

微电网容量小,若存在冲击负荷而微电网不能及时向负荷提供足够的无功功率支撑其正常运行,将会造成微电网频率持续波动;并网时,微电网和配电网间功率互换也会引起频率变化,而且,对于微电网,储能装置承担了其主要的调频任务^[7]。

3) 电压闪变与波动

为满足不同负荷用电要求,微电网中分布式电源常常会不定时地投入或脱离大电网,这种做法极易引起系统电压波动与闪变。除此之外,因微电网本身容量小,其能量储备不足或无功补偿不能满足系统要求时,也会造成电压波动与闪变。

4) 三相不平衡

微电网存在许多不对称负荷,且大量分布式电源也可能是单相的,这使得微电网极易出现电压、电流不平衡问题,进而影响微电网的稳定运行;并网时,因功率流动不再是传统的单一模式,导致大电网中电压不平衡进入微电网。

5) 谐波

微电网中因使用了大量变流器,再加上一些非线性负载的影响,是其易产生谐波问题的重要原因;并网时,微电网也会经公共连接点受到来自配电网的谐波影响,即使极小的电压谐波,也会使其产生大量电流谐波^[8]。

2 微电网电能质量改善方法及控制策略

现有对治理和提高微电网电能质量,常用控制策略几乎均遵循以下思路:传统方法使用电力电子治理装置,如串/并联型有源电力滤波器、静止无功发生器、动态电压恢复器、统一潮流控制器等,在出现电能质量问题后,未对系统造成严重危害前及时地作出响应;通过提出高效、合理的微电网及分布式电源控制方法以预防并减少其电能质量问题的发生。下面在确定不同指标标准的基础上,浅析现有

微电网电能质量改善方法和控制策略^[9]。

2.1 电压偏差控制

微电网并网时,公共连接点的电压偏差应满足表1所示的电压偏差限值表。

表1 公共连接点电压偏差限值

20 kV 以下三相系统	220 V 单相系统
不超过标称电压 $\pm 7\%$	不超过标称电压 $+7\%$, -10%

文献[10]在考虑DG容量限制和各母线对电能质量需求不同的情况下,提出基于有功功率的电压分布式控制算法,协同调配邻近母线DG给予负荷足够的功率支撑,进而减小系统电压偏差。文献[11]采用以配电网电压为参考,自主参与调节电压相角和幅值,基于锁相环原理的自主同步控制方案,避免出现微电网改变运行模式时给系统带来电压偏差问题,影响系统稳定性。文献[12]针对孤岛微电网中储能单元充放电次数中荷电状态不平衡的问题,应用改进下垂控制,实现系统荷电状态平衡,并抑制了储能单元频繁充放电次数,提高了其利用效率,节约了成本;利用低带宽通信补偿因下垂控制造成的电压偏差,使输出电压稳定在额定值附近,保证负载的安全稳定运行。

2.2 频率稳定

国标GB/T 15945—2008《电能质量电力系统频率偏差》规定,电力系统电源的频率偏差应满足表2所示的频率偏差限值表,则微电网中的频率偏差限值也应满足表2所示要求。

频率合格率的计算如下式:

$$\text{频率合格率} = \left(1 - \frac{\text{频率超限时间}}{\text{总运行统计时间}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

表2 频率偏差限值表

正常运行条件下	± 0.2 Hz
系统容量较小时	可放宽到 ± 0.5 Hz
冲击负荷引起的系统频率变化	± 0.2 Hz, 可根据系统的相关条件适当变动

文献[13]采用基于频率调整的2阶段优化自主调频控制策略。其中,第1阶段为通过下垂控制实现的一次调频和以成本大小为主选择分布式电源的二次调频实现微电网功率平衡及频率稳定;第2阶段为引进机会约束规划算法将不确定量转化为确定量,实现微电网最大负荷支撑下经济运行的三次调频。文献[14]利用由一次和二次控制层组成的分布式分层协调控制方案稳定微电网频率和电压。

底层控制为一次控制层,主要采用下垂控制方法,同时增加有电压外环、电流内环和功率环。二次控制主要解决系统因下垂控制造成的电压幅值和频率偏差问题。两层控制器结合,可有效抑制微电网的频率波动。文献[15]提出采用虚拟同步发电机作为分布式电源,既有依据系统调配提供功率的不可调频发电单元,仅介入一次调频又有提供微电网参考电压,并可利用二次调频对频率进行无差控制可调频发电单元,来解决微电网频率波动问题。

2.3 电压波动与闪变

2.3.1 电压波动

目前,根据国家标准,微电网中的电压波动限值如表 3 所示。

表 3 电压波动限值

$r/(次/h)$	$d/\%$	
	LV, MV	HV
$r \leq 1$	4	3
$1 < r \leq 10$	3*	2.5*
$10 < r \leq 100$	2	1.5
$100 < r \leq 1000$	1.25	1

电压波动 d 定义为:

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \quad (2)$$

式中: ΔU 为系统电压方均根值曲线上临近极值点电压差; U_N 为系统标称电压。

当已知三相负荷的有功、无功功率偏差是 ΔP_i , ΔQ_i , d 采用下式计算:

$$d = \frac{R_L \Delta P_i + X_L \Delta Q_i}{U_N^2} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_L , X_L 分别为电网阻抗的电阻、电抗分量。

2.3.2 电压闪变

电压波动在某段时期的累积会产生电压闪变,一般有短时、长时闪变两种衡量标准。对运行在较小方式下系统公共连接点,通常的测量周期为一周(68 h),全部长时闪变值 Plt 均需处于闪变限值范围以内,如表 4 所示,微电网也遵守此规定。

表 4 闪变限值 Plt

$\leq 110 \text{ kV}$	$> 110 \text{ kV}$
1	0.8

闪变合格率计算式为:

$$\text{闪变合格率} = \left(1 - \frac{\text{闪变超限时间}}{\text{总运行统计时间}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

文献[16]采用超级电容设计控制器来治理微电网的电压波动问题,该方法可对风力发电机组由于功率的不定时波动做到及时、有效补偿,确保系统输出平稳的功率。文献[17]研究应用储能装置结合电力电子变换器构成微电网电压控制来辅助调节控制微电网电压,同时采用无功和含有功滞环模式调节电压的装置来治理并网时公共连接点引起的电压问题。文献[18]以电压控制型分布式电源为主,通过收集、分析和整合各分区控制器发出的信号,进而自主调整电压的微电网分层分区控制策略。该策略能够及时应对故障后微电网产生的电压问题,打破了以往微电网已有的控制方法只能解决局部电能质量问题且不能与配电网联合使用的局限。

2.4 不平衡控制

根据国标 GB/T 15543—2008《电能质量三相电压不平衡》规定可知微电网并网后,对电能质量要求较高的公共连接点的电压不平衡度应稳定在 2% 以内,短时不超过 4%,其中因分布式电源接入引起的公共连接点三相电压不平衡度应稳定在 1.3% 以内,短时不超过 2.6%^[19]。对于三相不平衡度,国际电工委员会给出了以下计算电压不平衡度的方法,电流不平衡度计算与此类似。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 - 6L}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $L = (U_a^4 + U_b^4 + U_c^4) / (U_a^2 + U_b^2 + U_c^2)^2$, U_a , U_b , U_c 是线电压。

文献[20]提出一种将微电网各分布式电源等效为多代理系统中的代理,采用领导节点选择性发送补偿参考信号给少部分代理的控制方法,且各代理通过单向通信的有向通信网络只需处理本地及相邻代理信息。解决由不对称负载、故障等对微电网公共连接点产生扰动,进而引起的电压不平衡问题,以此提高其电能质量。文献[21]提出一种增加了倒下垂控制位于 $d-q$ 坐标系下的瞬时无功功率理论的补偿算法,通过测量系统中非线性不对称负荷瞬时电流及分布式电源发出的电流,计算 DG 逆变器参考电流。利用补偿算法,减小微电网改变运行模式时在系统中产生的三相不平衡。文献[22]采用基于改进型多次校正并联双环控制策略消除系统动态扰动。同时,通过 PI 控制器减少系统动态响应时间,对带混合负载的微电网分布式电源中逆变器极易产生电压不平衡现象进行了有效抑制。

2.5 谐波抑制

微电网并网后,在公共连接点产生的谐波电流、

电压应满足 GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》的有关规定,确保电网的稳定运行。

电网第 h 次谐波电压含有率 HRU_h 可由下式计算:

$$HRU_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: I_h 为第 h 次谐波电流; I_1 为基波电流有效值。

计算谐波电压含有率时,将上式中对位置电流值改为电压值即可。

文献[23]采用将传统下垂三环控制策略中调整电压的装置进行相应重组的控制策略,使微电网变流器中存在的谐波阻抗变大且不增加额外控制方式和不改变基波输出阻抗。文献[24]利用协同优化调配微电网中多逆变型分布式电源主动参与系统谐波治理。首先确定其中某个分布式电源成为谐波治理目标节点,接着对测量得到的目标节点电压谐波进行相量分解,最后通过优化分配各 DG 补偿份额达到多逆变型分布式电源的协同控制治理系统谐波的目的。文献[25]提出了采用并联型有源滤波器(APF)滤除电网谐波电流,并结合装在在电网负载侧的静止无功补偿器(SVG)改善微电网电能质量。

3 结语

与传统电网相比,微电网在结构和运行方式方面有其独特性。同时,大量电力电子器件的使用,使其电能质量问题变得更加复杂。该文重点研究了评价微电网电能质量的不同指标及其特点,在此基础上,浅析了已有治理微电网电能质量的方法。未来电网的发展将与信息和能源相结合,形成综合能源网络。微电网作为智能电网的重要组成部分,可提高用户供电可靠性和电能质量。因此,微电网电能质量治理体系也将趋于智能化。智能化电能质量治理体系的功能将由从传统的单一治理某一电能质量问题,转向未来的集成化综合治理方向发展。

参考文献:

[1] 王成山,肖朝霞,王守相.微网综合控制与分析[J].电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
 [2] R H Lasseter. Smart distribution: Coupled microgrids [J]. Proc. IEEE, 2011, 99: 1074-1082.
 [3] 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(02):1-12.
 [4] 曾君,徐冬冬,郭华芳,等.面向可再生能源的微电网电能质量特点分析与综合评价方法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(19):10-16.
 [5] 唐亚迪,徐永海.微电网电能质量问题与谐波抑制措施研究[J].供用电,2014(09):55-59+4.

[6] 苏玲,张建华,王利,等.微电网相关问题及技术研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):235-239.
 [7] 孟良,段晓波,孟令明,等.微电网中电能质量问题及解决策略[J].电源学报,2015,13(05):62-68.
 [8] 潘汉广.基于运行方式分析的微电网电能质量研究[J].机电信息,2014(06):16-17.
 [9] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(01):57-70.
 [10] 殷桂梁,侯嘉怡.一种低压微电网中的分布式电压控制算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(20):75-80.
 [11] 孙孝峰,郝彦丛,王宝诚,等.微电网分布式储能单元荷电状态平衡和电压恢复[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4047-4055.
 [12] 唐芬,Josep M GUERRERO,周啸,等.一种可实现微电网系统快速平滑并网的主动同步控制策略[J].电力系统自动化,2014,38(08):15-22.
 [13] 张羽,李咸善.基于频率调整策略的微电网多目标优化自愈控制[J].电网技术,2017,41(03):831-839.
 [14] 杜威,姜齐荣,陈蛟瑞.微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(23):26-31+36.
 [15] 杨向真,苏建徽,丁明,等.微电网孤岛运行时的频率控制策略[J].电网技术,2010,34(01):164-168.
 [16] 陈秋南,韦钢,卢炜,等.基于超级电容器控制策略的含风电微电网电压波动的抑制[J].电力系统保护与控制,2014,42(16):96-102.
 [17] 朱艳萍,李昕,吕庆秋,等.低压微电网电压控制器研究[J].太阳能学报,2013,34(05):787-793.
 [18] 张玮亚,李永丽,孙广宇,等.微电网安全防御体系下电压分层分区控制[J].电力系统自动化,2015,39(13):1-7,15.
 [19] 李乐,马保慧.微电网中的电能质量问题浅析及建议[J].电气传动自动化,2016,38(02):51-54.
 [20] 陈萌,肖湘宁.孤岛微电网分布式电压不平衡补偿控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(08):45-51.
 [21] 周念成,池源,王强钢.含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(09):61-66.
 [22] 霍群海,李宁宁.微电网中微源逆变器带混合负载控制[J].电工技术学报,2013,28(S2):270-277.
 [23] 黎金英,艾欣,邓玉辉.微电网的电能质量及改善方法研究[J].电力科学与工程,2015,31(01):54-60+71.
 [24] 梁建钢,金新民,吴学智,等.基于下垂控制的微电网变流器并网运行控制方法改进[J].电力自动化设备,2014,34(04):59-65.
 [25] 王鹤,李国庆,李耀峰,等.多逆变型分布式电源协调的微电网谐波控制方法[J].电力系统自动化,2014,38(23):33-39.