

微型电网技术研究初探

肖宏飞, 刘士荣, 郑凌蔚, 高慧敏, 罗平, 吴茂刚

(杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 微型电网是利用新型发电技术、储能技术和电力系统控制技术为负荷供电的小型电力系统。开展微网技术的研究是推动可再生能源开发与利用的有效途径之一。诠释了微网的本质及特点, 阐述了国内外微网实证系统的开发现状, 重点对微网的运行分析、能量平衡控制、设计与规划、电能质量、故障检测等方面的研究现状进行了剖析。在此基础上对微网技术的关键问题及发展前景进行了探讨。

关键词: 微型电网; 可再生能源; 分布式发电; 独立运行; 能量平衡控制; 电能质量

A preliminary research on microgrid technology

XIAO Hong-fei, LIU Shi-rong, ZHENG Ling-wei, GAO Hui-min, LUO Ping, WU Mao-gang

(Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A microgrid is a small scale power system which satisfies demand by employing novel generation techniques and control techniques. Development of microgrid is a valid way to utilize renewable energy. The connection of a microgrid to utility can alleviate inadequacy of power supply. At the same time, reliability and economy of a hybrid power system consisting of utility and microgrid are also improved. In this paper, features of microgrid constructed by distributed sources, energy saving systems and loads are described. The recent microgrid techniques and demonstration projects are introduced systematically. At last, the key problems and prospect on microgrid research are also discussed.

This project is supported by Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.Y107191).

Key words: microgrid; renewable energy; distributed generation; independent operation; energy balance control; power quality

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0114-06

0 引言

随着世界经济的迅速发展, 对能源的需求急剧增加。然而常规能源储量有限, 化石能源正面临枯竭。因此优化能量结构、发展新型能源和扩大可再生能源利用成为解决能源问题的必然选择。

电能是一种清洁、高效的能源, 将新型能源和可再生能源转化为电能使用是能源利用的有效途径之一。微网技术就是以可再生能源发电装置为主要供电电源的能源利用技术, 它将一定区域内(一个街区或若干单位)拥有的发电资源, 例如自行供电的发电设备或备用发电机组、太阳能发电装置、风力发电设备等微型电源联结起来共同向各用户供电, 形成一个公用电网与微网联合运行的电力系统^[1]。与大型电网单独供电的方式相比, 微网与电

网联合运行可以缓解电网峰荷时期的供电压力, 充分利用电网中各种发电设备的容量, 提供多种辅助服务; 同时也可延缓建设集中输配电系统, 提高联合系统的供电可靠性及运行经济性^[2]。因此, 开展微网技术的研究不但有利于推动新能源和可再生能源的开发与利用, 对电力工业本身的发展也具有重要的现实意义。

本文首先阐述了微网的本质及特点, 在此基础上分析了国内外微网实证系统的开发现状, 重点对微网技术研究现状进行了剖析, 并对微网技术的关键问题及发展前景进行了讨论。

1 微网的本质及特点

1.1 微网的概念与本质

微网技术是最近几年兴起的。研究人员从不同的角度诠释微网的定义^[1-6]。美国电力可靠性解决方案协会 (Consortium for Electric Reliability

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (Y107191)

Technology Solutions) 认为^[2]: 微网是一个小型电力系统, 这个系统在公用电网级别之下, 通常属于配电网服务范畴, 但在一定程度上又可以脱离配电网独立运行。文献[3]认为: 微网是利用一次能源, 使用微型电源供电并配有储能装置, 实现冷、热、电三联供的电力系统。文献[4, 5]认为: 微电网是一个由负载和微型电源组成的独立可控的子系统, 可提供较高质量的电能, 能够脱离配电网独立运行。

本文认为, 目前所提的微网概念和模式虽有不同, 但所描述的微网却具有相同的特征, 我们可以从多个层面分析微网的本质。

①结构: 微网由微型电源、储能装置、负荷和电力电子功率变换系统组成。

②电源: 微网的电源属于微型分布式电源, 容量较小, 单电源容量约为 1~100 kW。

③负荷: 负荷类型较多且功率较小, 通常需要实现冷、热、电三联供。

④能源: 微网主供电电源以可再生能源发电为主(光伏发电、风力发电等), 承担微网基荷; 部分电源也消耗常规能源(微型燃气轮机、内燃机等), 通常作为参与调峰的备用电源。

⑤电力电子器件为微电源与交流微网提供接口, 实现能量的转换及控制。

⑥电能质量: 能够依靠自身调节能力保证较高的电能质量, 满足微网负荷需求并维持与配电网功率连接点的电压与频率稳定。

⑦运行方式: 能与配电网并联运行, 也可独立运行, 其运行方式的切换属于微网正常调度范畴。

⑧微网与配电网功率连接点的功率是双向流动的, 但在某一运行时段微网总体呈现出一个电源或负荷特性, 且在该时段内连接点的功率是恒定的。

1.2 与分布式发电系统的区别

从能源利用形式来看, 微网与分布式发电的基础是相同的, 两者均以新能源或可再生能源为主进行发电, 且电源均为分布式电源(DG)。两者的本质区别在于组成及运行方式的不同, 由此造成功率平衡控制、电能质量、并网、保护等一系列问题的差别。微网带有固定区域的负荷, 通常只含有容量较小的微型分布式电源, 既能与配电网并联运行, 也可独立运行, 同时依靠自身调节能力维持微网稳定运行并保证较高的供电质量。微网作为完整的电力系统, 在功率平衡控制、系统运行优化、故障检测与保护、电能质量等方面都必须依靠自身的控制及管理功能实现。换言之, 微网与配电网并联运行等价于互联电力系统间的并联运行; 而分布式发电

系统与配电网并联运行等价于分布式电源嵌入在配电网中。

1.3 运行方式

微网的运行方式十分灵活, 无论是与公用电网联合运行还是独立运行都能突显其优势。例如, 建设在高密度负荷区(商业区、经济技术开发区、学校、社区等)的微网, 在峰荷时期与配电网并联运行, 利用微网电源和配电网同时为微网负荷供电, 既可缓解配电网的供电压力, 也可降低微网购电成本; 当微网内部发生故障时可及时与电网断开, 不危害电网的安全; 当电网发生故障时, 微网可脱离电网独立为区域内负荷供电, 并为电网恢复提供后备电源; 此外, 根据电网电价、微电源发电成本、微网负荷结构和需求量等编制运行计划可降低微网总体运行成本, 这对联合电力系统的经济运行也是十分有利的。

微网作为唯一的供电系统独立运行时, 其经济性在某些情况下也可与由公用电网供电相媲美。如: 在偏远海岛或山区, 由公用电网供电必将增加时间和资金上的巨大投入(铺设海底电缆、长距离架空电线等), 此时就地利用可再生能源建设微网, 可解决当地无电问题, 为负荷提供高质量的电能, 产生良好的经济效益和社会效益。

2 微网技术研究现状及发展动态

2.1 微网实证系统的开发

在微网研究和开发领域, 美国、日本等国家走在了前列, 目前已进入实证系统的研究阶段。在2003年发生美加大停电后, 美国CERTS联合高校、研究院/所等多家机构开展了微网技术的研究, 先后进行了理论和仿真研究, 开发了分布式能源负荷应用模型(DER-CAM)进行微网的设计和运行分析。此后在Naval Base Ventura County军港进行了实证系统的开发与研究。

日本常规能源极为匮乏, 在可再生能源开发与利用上始终保持较高投入, 其微网实证系统的开发也处于世界领先水平。2005年, 东京大学、东京理科大学与日本清水建设株式会社合作, 在清水建设株式会社技术研究所建造了以10 kW 光伏电池、27 kW 微型燃气轮机、22 kW 汽轮机和20 kW 铅酸蓄电池储能系统构成的微网试验系统^[7]。此后日本新能源产业技术综合开发机构、三菱技研所、三菱电气在青森县八户市建成了总容量为710 kW 的微网, 其全部能源来自可再生能源, 可为2所小学、2所初级中学和八户市市政厅及政府部门供电。

在国内,合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心较早地开展了风-光-柴-蓄复合发电及智能控制系统的研究,这是由多种可再生能源发电装置联合构成的“微网化”可靠供电系统,适合在缺电、无电的海岛、沙漠、山区运行。该类系统是微网发展的初级模式。

2.2 微网技术研究现状

2.2.1 微网运行与能量管理

文献[7]对微网协调运行问题进行了研究,根据电网日间和夜间电价的差异、蓄电池充放电特性,提出了光伏发电、风力发电和电网购电的组合方案,其实质是对微网经济运行的探索。

文献[8]建立了包括主电源及其变换系统的微型分布式单元的稳态基频模型,提出了含有分布式电源的微网潮流计算方法。该方法首先以传统潮流分析方法为基础进行交流电网潮流计算,然后进行分布式单元内部变量的计算,根据分布式单元的稳态基频模型可以无需迭代就获得各点的电压和功率分布。

文献[9]提出了基于智能软件代理技术的微网管理系统,能够实现对微网监视、控制。文献[10]提出的微网管理系统还具有市场协调功能,可为微网内双边交易用户和联营交易用户提供报价代理界面,这种做法实质上是将经济调度和运行控制分开进行,与传统的EMS功能是类似的。

2.2.2 能量平衡控制

能量平衡控制是任何一个电力系统都必须解决的问题,微网也是如此。微网能量平衡控制的基本任务是使各微电源及储能装置的输出功率满足微网负荷的需求。但是微网电源容量较小,单一负荷的变化都可能对微网功率平衡产生显著的影响,且以可再生能源发电的电源易受天气影响,输出存在波动。因此相对配电网来讲,微网功率平衡控制更为复杂。

文献[11]构建了由内燃机、微型燃气轮机和铅酸蓄电池组成的小型微网试验系统,提出了功率混合控制方法。按该方法,负荷波动被分成若干个频段,每个类型的微型电源负责平衡某一频段的负荷波动。如,利用响应速度最慢的微型燃气轮机补偿变化较慢的负荷分量,利用蓄电池补偿瞬时变化的负荷分量。而文献[12]所构建的微网还包括光伏发电系统,通过混合控制策略,内燃机、微型燃气轮机和蓄电池机可以抑制负荷波动和光伏发电系统的输出波动,实现微网功率的自动平衡。其中,由于光伏电池输出的波动特性,将其视为不可控的负荷。文献[13]构建了由燃气轮机和风力发电机、燃料电

池组成的小型微网试验系统,通过对燃气轮机的输出进行控制能够有效地吸收风电输出和负荷的变化,在并网运行时可以将联络线功率维持在一定水平。

除了旋转式的交流发电机,微网中通常含有各种类型的直流电源,该类电源通过逆变系统(PCS)与电网连接。因此交、直流电源的混合控制是微网运行必须面对的问题。文献[14]提出了一种适用于带有功率逆变装置的直流电源和同步发电机(SG)的混合控制策略。PCS和SG在混合控制策略下可以各自独立运行,跟踪指令变化和负荷波动,通过自动电压调节和输出滤波器的合理设计可以将微网的电能质量维持在较高水平而无需从电网获取辅助服务。文献[15]针对含有PCS和SG的协调控制系统提出了“中心控制——局部控制——电源控制”的三层控制结构。其中,中心控制系统完成各子系统的协调控制;每个局部控制系统负责调节其内部各发电机出力;直流电源通过电源控制器接收局部控制系统的指令并调整输出;旋转发电机通过调速器自动跟踪功率变化。目前在部分配电网中含有容量不等的DG,PCS和SG的混合控制有利于将分散的DG联合起来形成高效运行的网络,也为微网和电网的并联运行提供了提供更多的自由度。

文献[16]针对由光伏发电系统、风力发电机、蓄电池组成的微网提出了频率与电压幅值快速控制策略,在微网并网和独立运行模式下,当负荷变动和天气变化引起自然变动电源输出波动时,均能将微网频率与电压维持在额定值附近。

文献[17]提出了直流微网的概念,其电源包括内燃机、光伏发电系统、蓄电池、超级电容器,均具有直流输出。通过功率变换系统的混合控制,可以使各电源输出恒定的直流电压,该电压通过背靠背式的直流变换系统为负荷提供所需电压等级的直流电,也可通过逆变系统与交流电网并联。该研究小组构建的直流微网系统不仅具有良好的稳态性能,在并网、脱网、交流负荷短路、投入或切除内燃机等暂态过程也能保持稳定的电压输出。

2.2.3 微网设计与规划

文献[18]提出了将含有DG的配电网改造成可独立运行的微网的方案。目前,各国电力系统中存在数量及规模不等的DG,该研究为将含有高比例DG的电网的一部分改造成能够独立运行的微网提供了一条新途径。

文献[19]研究了在自然资源相对较弱的山区建设微型水电厂和微型风电站的规划问题。如果微网建设地区水资源不丰富,可以利用山区的自然地形

开凿支流运河,这种方法不仅可以获得足够的水头,还可使水生生物免受影响。同时沿着山坡合理地选择河堤可以减少初始投资,并为微型水电厂的建设提供若干个候选地。此外,很多山区总体风力较弱,但是由于山体表面的特殊地形,不同地点的风速会有明显差别。因此,在弱风山区合理选择地点仍有很大的可能性获得较强的风能。这一研究经验为我国自然资源相对薄弱的地区建设微网提供了有利的参考依据。

2.2.4 电能质量

加拿大的多伦多大学采用PSCAD/EMTDC软件就预先制定的切换计划和故障导致的独立运行模式进行了研究^[20]。该微网含有两个分布式电源:同步发电机和带有电压型逆变器的分布式电源,对逆变器输出采用有功-无功解耦控制,即通过快速有功调节保证母线相角稳定,通过快速无功调节保证母线电压稳定。该研究通过合理的控制方式切换可以保证特定母线的电压质量,但是对全网母线电压的控制尚未进行讨论。文献[21]提出了一种三相四线电能质量补偿器,包括一个串联和一个并联四相角逆变器,能够补偿所有不对称的正序、负序和零序部分,改善微网电压和电流质量。

2.2.5 故障检测与仿真分析

英国贝斯大学提出了一种可用于微网的快速故障检测方法^[22,23],该方法利用系统电压的abc/dq变换检测短路故障,并通过比较不同测量点的电压值判断故障点区域。其中,微电源的输出电压被转换成d-q坐标系的量值,电网故障引起的微电源输出的任何变动都被作为干扰反映在d-q系统的变量中。

微网中含有大量的直流电源和逆变装置,标准的电力系统稳定分析方法不能直接用于这类含有电力电子器件的系统。文献[24]对标准稳定分析方法进行了改进,对逆变器的模型也进行了适当修改,使之能适用于无惯性(不含旋转机械)的微网系统。改进的方法能够在微网与大电网突然断开、负荷变化、微网电源输出波动等扰动情况下,对微网动态过程进行仿真。

3 微网技术研究的关键问题

目前微网技术的研究刚刚起步。而微网作为一个新型电力系统,无论是其运行与设计中的安全性、经济性和可靠性问题,还是对传统电力系统的影响,都值得电力工作者和研究人员展开广泛、深入的研究。

(1) 在微网技术发展初期,出于技术、政策等因素的制约,微网不会向配电网反送功率,从配电

网接入点来看,微网整体呈负荷特性。但是微网的接入使接入点的功率值发生改变,因此,整个配电网的潮流分布随之改变,其改变程度视接入功率值而定。随着微网技术的不断成熟和电网(电力)公司政策的改变,微网可能会向配电网输入功率,接入点及整个配电网的潮流分布将发生重大改变,从而给电网带来多方面的、深刻的影响。

(2) 优化微网运行性能的关键在于微网的设计,即根据负荷结构和需求量,合理地确定电源的类型及容量,使能源的购买、应用、转换达到最优的利用^[2]。因此对各类电源的投资及运行成本进行准确评估、建立负荷冷、热、电数学模型、开发适用于多类型电源及负荷的微网规划模型及算法都是亟待解决的问题。

(3) 能量平衡控制是微网设计与运行中最根本的问题。微电源具有独立性、多样性及输出功率随机波动性等特点^[25],在运行中应根据气象条件和负荷预测结果提前制定微电源发电计划和电网购电计划,保证微网在并网运行和独立运行两种模式下都能维持功率平衡,并使微网总体运行成本最小,实现经济运行。目前,国外某些可再生能源(如风力发电)的发电成本可与常规能源形成竞争,尤其在峰荷电价较高时更具优势。而我国多数可再生能源发电成本偏高,无法与中央电站发电形成竞争。

(4) 供电可靠性及运行稳定性仍然是微网建设与运行中应考虑的重要问题。在新型电网结构和能源结构下,这些问题被赋予了新的内涵。微网的可靠性和安全性在一定程度上是融入到经济性中来考虑。如:将微网负荷分为重要负荷和可调整负荷。当电力不足或电价较高或其它条件满足时,削减或切断可调整负荷的用电以保证对重要负荷的供电。重要负荷的供电可靠性较高。而对于被削减的负荷,其供电可靠性虽有降低,但是会得到其它方式的补偿。此外,微网可通过选择独立运行或与电网并联运行来保证其运行的稳定性。换言之,我们不能直接判断微网独立运行的稳定性高还是与电网并联运行的稳定性高。通常情况下,微网与电网并联运行的可靠性会比较高,但是当电网发生故障或供电不足时,独立运行的可靠性会更高一些。因此,微网运行分析的内涵更为丰富,其衡量指标也更为灵活。在电力市场环境,运行的可靠性、稳定性、经济性、安全性可以多种方式体现。

(5) 微网中含有高比例的直流电源和电力电子器件,且微网负荷数量有限,可能存在不对称负荷,这些将导致谐波畸变、电压闪变、电压不对称等一系列电能质量问题。传统电网的电能质量检测及控

制装置应用到微网中需要如何改进、含有PCS的电源如何维持电压与频率的稳定等都需要广泛和深入地研究。

(6) 微网的故障与保护。微网中电源与负荷电气距离较近, 直流电源通过逆变器与微网联接, 电压等级较低。网络结构、电源特性及电压等级上的差异使得微网故障电流的大小、方向及持续时间与传统闭式输电网和辐射型配电网的情形存在较大差别。如何确定微网中保护装置的整定值还需进行广泛地印证。此外, 对微电源的等值模型、快速故障检测方法、微网暂态过程等一系列问题也需进行深入研究。

(7) 微网潮流计算与传统的输电网及配电网均不相同^[26-28]。输电网含有PV节点、PQ节点和V θ 节点; 而微网中还包括P恒定、电流幅值恒定的PI节点, P恒定、U不定、Q受P、U限定的P-Q(V)节点^[29], 两者电源节点的类型差异较大。传统配电网中一般仅包含V θ 节点和PQ节点, 变电站出口母线通常视为V θ 节点, 而负荷节点和中间节点则视为PQ节点。各类微电源的接入使得传统配电网潮流计算也不适用于微网。此外, 微网负荷种类较多(冷、热、电), 容量小且分散, 负荷所呈现出的特性不仅仅是传统电网的PQ节点。因此应针对微电源、负荷及网络连接方式开发相应的潮流计算方法和分析工具。

(8) 建立能够对微网实现全面监视、控制和调度的微网能量管理系统(Microgrid EMS), MEMS应该能够完成与传统电力系统EMS类似的功能, 实现数据采集与通信、编制运行计划、接收市场报价、监视网络安全等。微网规模虽小, 但是其电源种类较多, 独立性及随机性较强, 相对于电网而言, 对微型电源实现全面监控系统将是全新的课题。

(9) 目前我国还没有建立可再生能源消费的稳定市场, 缺乏需求激励和投资市场激励; 且微网研究刚刚起步, 技术尚未成熟, 在较长一段时期内微网建设成本高, 推广速度缓慢。因此微网的发展除了需要在技术上的积极探索, 还需在能源政策、并网标准等多方面同时推进。

4 结论

微网是利用新型动力机械与新型发电技术、储能技术和电网控制技术为负荷供电的小型电力系统。微网的运行方式十分灵活, 与公用电网结合形成联合电力系统, 可实现并网运行和独立运行, 提高联合系统供电可靠性及运行经济性。在无电地区, 可以完全独立运行作为当地负荷进行供电, 产生良好

的经济效益和社会效益。此外, 多数微网具有环境兼容性和可持续发展的能力。开展微网技术的研究对可再生能源的开发和利用、推动电力工业发展具有重要的现实意义。因此, 应加大微网技术的研究力度和市场化进程, 加快相关政策、法规的建设, 为微网的研究和推广提供有力的保障。

参考文献

- [1] 沈国鏖. 微型电网和小型燃气轮机发电机[J]. 电器工业, 2004, 5(6):39-41.
SHEN Guo-liu. Microgrid and Small Gas Turbine Generation[J]. China Electrical Equipment Industry, 2004, 5(6):39-41.
- [2] Chris Marnay, Owen C. The CERTS Microgrid and the Future of the Macrogrid [DB/OL]. <http://certs.lbl.gov/pdf/55281.pdf>.
- [3] Hatziargyriou N D, Dimeas A, Tsikalakis A G, et al. Management of Microgrids in Market Environment[A]. In: International Conference on Future Power Systems[C]. 2005.1-7.
- [4] Lasseter R H, Paigi P. Microgrid: a Conceptual Solution[A]. In: 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference[C]. 2004.4285-4290.
- [5] Lasseter R H. MicroGrids[A]. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting[C]. 2002.305-308.
- [6] 盛鹏, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器, 2007, 35(12):75-81.
SHENG Kun, KONG Li, QI Zhi-ping, et al. A Survey on Research of Microgrid-a New Power System[J]. Relay, 2007, 35(12):75-81.
- [7] Toyoda J, Saitoh H, Minazawa K, et al. Security Enhancement of Multiple Distributed Generation by the Harmonized Grouping[A]. In: Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific[C]. 2005.1-5.
- [8] Nikkhajoei H, Iravani R. Steady-state Model and Power Flow Analysis of Electronically Coupled Distributed Resource Units[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1):721-728.
- [9] Oyarzabal J, Jimeno J, Ruela A, et al. Agent Based Micro Grid Management System[A]. In: International Conference on Future Power Systems[C]. 2005.1-7.
- [10] Alibhai Z, Lum R, Huster A, et al. Coordination of Distributed Energy Resources[A]. In: IEEE Annual Meeting of Fuzzy Information[C]. 2004.913-918.
- [11] Baba J, Suzuki S, Numata S, et al. Combined Power Supply Method for Micro Grid by Use of Several Types of Distributed Power Generation Systems[A]. In: European Conference on Power Electronics and Applications[C]. 2005.1-10.

- [12] Baba J, Numata S, Suzuki S, et al. Fundamental Measurements of a Small Scale Micro Grid Model System[A]. In: International Conference on Electrical Engineering[C]. 2005.1-6.
- [13] Matsubara M, Fujita G, Shinji T, et al. Supply and Demand Control of Dispersed Type Power Sources in Micro Grid[A]. In: Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems[C]. 2005.67-72.
- [14] Kusagawa S, Baba J, Ohshima M, et al. Supply Power Quality of a Micro Grid Based on Distributed Generations in Relation with Power Converter Control[A]. In: European Conference on Power Electronics and Applications[C]. 2005.1-10.
- [15] Kusagawa S, Masada E, Baba J, et al. Coordinate Control of Distributed Generations with Power Converters in a Micro Grid[A]. In: European Conference on Power Electronics and Applications[C]. 2005.1-10.
- [16] Kanellos F D, Tsouchnikas A I, Hatziargyriou N D. Micro-Grid Simulation During Grid-connected and Islanded Modes of Operation[A]. In: International Conference on Power Systems Transients[C]. 2005.1-6.
- [17] Hiroaki K, Yushi M, Toshifumi I, et al. DC Micro-grid for Super High Quality Distribution-system Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices[A]. In: 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference[C]. 2006.1-7.
- [18] Cobben J, Kling W, Myrzik J, et al. Power Quality Aspects of a Future Micro Grid[A]. In: International Conference on Future Power Systems[C]. 2005.1-5.
- [19] Litifu Z, Estoperez N, Mamun M, et al. Planning of Micro-grid Power Supply Based on the Weak Wind and Hydro Power Generation[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2006.1-8.
- [20] Katiraei F, ravani M, Lehn P W. Micro-grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1):248-257.
- [21] LI Yun-wei, Vilathgamuwa D M, Chiang P L. Microgrid Power Quality Enhancement Using a Three-phase Four-wire Grid-interfacing Compensator[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(6):1707-1719.
- [22] Al-Nasseri H, Redfern M A, Li F. A Voltage Based Protection for Micro-grids Containing Power Electronic Converters[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2006.1-7.
- [23] Al-Nasseri H, Redfern M A, O-Gorman R. Protecting Micro-grid Systems Containing Solid-state Converter generation[A]. In: International Conference on Future Power Systems[C]. 2005.1-5.
- [24] Soutlanic N L, Hatziargyriou N D. Dynamic Simulation of Power Electronics Dominated Micro-grids[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2006.1-7.
- [25] 陈琳, 钟金, 倪以信, 等. 联网分布式发电系统规划运行研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 26-31.
CHEN Lin, ZHONG Jin, NI Yin-xin, et al. A Study on Grid-connected Distributed Generation System Planning and Its Operation Performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 26-31.
- [26] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1):35-40.
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on Power Flow Calculation of Distribution System with DGS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1):35-40.
- [27] 王守相, 江兴月, 王成山. 含风力发电机组的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2006, 30(21):42-45, 61.
WANG Shou-xiang, JIANG Xing-yue, WANG Cheng-shan. Power Flow Analysis of Distribution Network Containing Wind Power Generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(21):42-45, 61.
- [28] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24):39-44.
WANG Cheng-shan, ZHENG Hai-feng, XIE Ying-hua, et al. Probabilistic Power Flow Containing Distributed Generation in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24):39-44.
- [29] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8) : 11-15.
WANG Shou-xiang, HUANG Li-juan, WANG Cheng-shan, et al. Unbalanced Three-phase Power Flow Calculation for Distributed Power Generation System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8):11-15.

收稿日期: 2008-05-20

作者简介:

肖宏飞(1976-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源发电技术、电力市场理论与应用; E-mail: xiaohf@hdu.edu.cn

刘士荣(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、智能控制在电力系统中的应用;

郑凌蔚(1978-) 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为可再生能源发电技术、电力系统运行与控制。