

可再生能源发电对配电系统安全的影响及对策

李睿^{1,2}, 王玮^{1,2}, 吴学智^{1,2}, 何永菁^{1,2}

1. 北京交通大学, 国家能源主动配电网研发中心, 北京 100044

2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100081

摘要 可再生能源发电出力所具有的随机性、波动性给配电系统的安全、稳定运行带来严峻影响。为了保障可再生能源发电并网的安全、稳定,分析了以可再生能源发电为主的分布式电源并网对配电系统安全运行产生的功率传输、电能质量、频率稳定、孤岛效应、保护控制及规划设计等方面的问题。针对涉及的问题,分别从制定全面规范的并网导则与标准,可再生能源发电出力稳定性与可控水平的提升,优化配电系统网络结构,制定协调的保护与控制策略,研究源、网、荷协调规划方法等5个方面给出了相应解决建议。对面向可再生能源并网的源、网、荷协调规划理念与方法进行了深入探讨,并对规划模型的研究重点与难点进行了分析。

关键词 可再生能源发电;分布式电源;配电系统;安全运行;配电网规划

近年来许多国家大力发展分布式可再生能源发电技术,随着其发电成本的不断下降以及政策层面的有力支持,分布式可再生能源发电技术作为集中式发电的有效补充已日趋成熟并正得到越来越广泛的应用。

可再生能源发电(renewable energy generation, REG)大量并网,对节能减排及电力系统的可持续发展具有显著意义,但也将传统的配电系统变成了一个含分布式电源(distributed generation, DG)、储能系统(energy storage system, ESS)和柔性负荷(flexible load, FL)的主动配电系统,规模越来越大,运行特性更加复杂,如果没有一定的政策、技术和经济的保证,配电系统安全、稳定运行将面临越来越大的压力^[1-4]。

本文拟从功率传输、电能质量、频率稳定、孤岛效应、保护控制以及规划设计6个方面,分析具有随机性、波动性特点的REG并网给配电网安全运行带来的问题及对策。

1 可再生能源发电并网对配电系统的安全影响因素分析

以REG为主的DG一般接入到配电网中,DG比例增大,给配电系统安全稳定运行带来的不利影响主要集中在功率传输、电能质量、频率稳定、孤岛效应、保护与控制、规划设计等方面。

1.1 功率传输

传统电力系统被设计为从输电网向配电网自上而下的单向动态功率流动。在DG接入配电网后,当DG输出功率超出当地负荷所需时,多余的功率将会反向送至高电压等级电网中,这会导致双向潮流流过配电系统的设备^[5]。

由于配电网中的现有设备是严格按照系统的安全性、运行质量和水平来选择的,大量DG在配电网并网运行所引起的双向潮流和线路传输功率改变,将可能导致配电网中配电设备超出热稳定极限值,增加配电网设备安全隐患,对配电系统的安全稳定运行造成影响。

1.2 电能质量

1) 电压偏差。DG向配电网注入有功功率或无功功率,会使并网公共连接节点(point of common coupling, PCC)的电压升高明显,并将改变配电线路上沿既有线路电压分布情况,这可能造成电压偏差超过安全运行的技术指标^[6,7]。

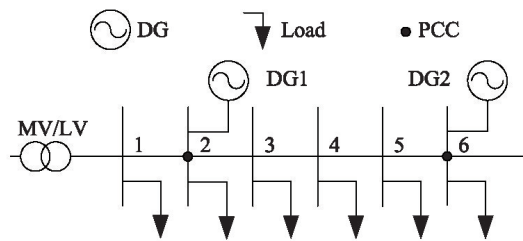
如图1所示,在没有DG接入时,线路各节点的电压沿功率流动方向逐渐下降;若DG在节点2处并网,则会使节点2电压升高,甚至导致电压偏差越界情况的发生;若并网点在线路末端节点6处,当出现功率倒流时,则可能导致多个节点电压偏差越界情况的发生。可见,DG的接入将改变沿线电压分布,甚至造成电压越界情况发生,影响程度的大小则与容量和安装位置有关。

收稿日期:2015-08-20;修回日期:2015-12-21

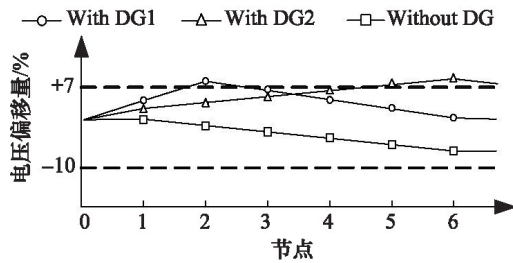
基金项目:国家能源应用技术研究及工程示范项目(NY20150301)

作者简介:李睿,博士研究生,研究方向为主动配电网规划技术,电子信箱:13117378@bjtu.edu.cn

引用格式:李睿,王玮,吴学智,等.可再生能源发电对配电系统安全的影响及对策[J].科技导报,2016,34(2):53-58;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.007



(a) DG接入示意



(b) 线路电压分布曲线

图1 DG对线路电压分布的影响

Fig. 1 Impacts of DG on system voltage distribution

此外,还存在DG输出功率波动与负荷用电波动之间的叠加影响。若DG的输出功率波动与负荷波动方向相反,则会加重线路电压偏差越界的程度。

2) 谐波、电压波动及闪变。光伏发电、微型燃气轮机等逆变型DG的电力电子设备将会向配电网注入大量的谐波污染^[8],引起设备的额外发热,缩短设备的使用寿命,并扰乱电子型控制设备的正常工作以及功率开关的正常切换。

同时,大量REG并网还可能会引起节点电压的快速波动与闪变^[9]。一般来说,电压的快速变化是由炼钢电弧炉、电气化铁路等具有冲击性功率的负荷所引起,但一些REG的并网,尤其是光伏发电、风力发电的输出功率的波动变化也会引起电压的快速波动甚至闪变,若加上负荷的动态变化,则可能会对电能质量产生严重的不良影响。

3) 三相电压不平衡。连接到低压电网上的光伏发电系统很大一部分是由单相逆变器并网接入,其在三相电网的无序接入将显著增加系统电压的三相不平衡度,加上并网节点的单相负荷不对称情况,将会在不同程度上对不平衡度产生不良影响^[10,11]。

这种情况下,三相电压的幅值、相位差不相等,产生电压的负序/零序分量,这将增加线路和变压器损耗,降低配电变压器的出力,并加速配电变压器的老化。此外,还可能引起系统中以负序分量为起动元件的保护和自动装置误动作,严重影响配电系统运行安全。

1.3 电网频率稳定性

正常状态下,有功功率的供需平衡确保了系统频率的稳定性,而大量间歇性REG出力的随机性和波动性对系统的频率稳定产生了负面影响。

当系统频率升高越限时,为了保持系统运行的稳定,风力发电场、光伏电站等DG被自动断开,这使得系统频率回落。随着系统频率下降到允许范围内,DG将自动再次并网。但当大量DG集中脱网时,系统的频率调整可能无法满足其引起的出力损失。同时,由于整个过程不易由配电网运行人员监视与控制,这使得频率回到额定值存在一定难度,进而引起频率偏移时间过长,影响系统频率稳定。

1.4 孤岛效应

所谓孤岛效应是指,当与DG连接的电网发生故障或停电检修时,DG向停电线路与周围负载继续供电,从而形成供电公司无法管理的自给供电孤岛。由于非计划孤岛效应的发生往往是一种未知的供电状态,并随着DG的增多,将对配电系统与电力用户造成一系列不利影响。

1) 对人身安全的危害。这主要是由于发生故障后,用户或检修人员没有意识到DG继续供电,而造成的人身事故伤害。

2) 对孤岛内用电设备的危害。这是由于DG出力的随机与波动,或过载情况的出现,使得孤岛范围内的电压与频率不能稳定,容易对用电设备造成损害。

3) 电网恢复供电时,DG的重新并网可能会因相位不同步,引起大的电流冲击。

1.5 保护与控制

DG并网对配电网继电保护的影响主要集中在DG通过故障点对短路电流的影响^[12-14]。由于不同类型DG装机容量、接入位置与并网形式(逆变型、旋转型)不同,输出功率也具有随机性与波动性等特点,当并网容量较大时,DG可能会改变故障点短路电流的大小及方向。这有可能会造成:

1) 线路保护误动,从而使保护失去选择性,扩大事故影响范围;

2) 线路保护灵敏度降低,严重时引发保护拒动,增加系统大面积停电的可能;

3) 当线路上安装重合闸时,DG在线路发生瞬时性故障时可能会继续向线路提供电流,导致故障点电弧不能及时熄灭,导致重合闸失败,影响配电系统的安全稳定运行。

由上可见,DG并网对配电系统继电保护影响的复杂多变将会给继电保护的方案设置和参数整定带来一定难度。

1.6 规划设计

以REG为主的DG具有随机波动性、间歇性和不可预测性等特点,对电网规划的影响体现在配电网的电源规划、网架结构规划等方面。

电源规划是电力系统电源优化布局与容量决策,其规划的合理与否直接影响系统的安全、可靠和经济运行。DG的

出力具有随机性与波动性,这首先就给电源规划过程中的准确发电预测带来困难。同时,DG接入位置不同对配电网安全经济运行造成不同的影响,这给DG的选址定容增加了不小的困难。加上以电动汽车为代表的FL功率的不确定性,如何利用DG进行负荷的移峰填谷,实现DG与FL协同规划,这对DG规划提出了较高的要求。

配电网网络拓扑结构规划是一个涉及众多变量与约束条件的复杂大规模组合优化问题,而DG接入到配电网以后,在对配电网有功潮流、线路损耗、电压分布和供电可靠性产生影响的同时,DG的出力、位置、气候条件等不确定因素增加了数学模型中的变量和约束条件,增加了数学模型的复杂性和求解方法的难度。

2 可再生能源发电并网安全问题解决建议

2.1 制定全面规范的并网导则、规程、标准

针对DG并网对配电系统安全运行带来的不利影响,必须分别从DG与配电网的不同角度制定统一、全面并网安全标准。

从DG的角度,应首先规范电网对DG并网要求,对DG的总体要求、电能质量、并网测试等方面规范外,还应从DG的主动控制和对电网运行支撑角度考虑,对DG功率控制和故障穿越等要求制定相应标准。

同时,从电力系统的角度,应进一步修订完善考虑DG并网的电力系统的安全稳定计算、规划设计、运行控制等方面的规范标准,从而保证系统稳定可靠运行。

2.2 提升可再生能源发电出力稳定性与可调控水平

DG的出力波动性、随机性与间歇性的特性是对配电系统造成不良影响的关键,很大程度上决定了配电系统的安全稳定性。因此提高REG的出力稳定性与可调控性^[15],是配电系统安全运行的必要条件,也是DG健康发展的必然需求。

1) 提高REG的可预测性。利用多种方式混合的预测方法处理气候、环境等多种不确定因素,对风力发电、光伏发电等REG进行多时间尺度的电力与电量预测,提高预测精度。

2) 提高REG输出功率的稳定性。利用REG互补特性或ESS,构建风气互补发电系统与风光储联合发电系统等混合发电系统^[16-19],获得较稳定的功率输出,平抑REG出力的不确定性对配电网的不利影响。

3) 提高REG的可调控性。将REG纳入到数据采集与监视控制系统(supervisor control and data acquisition, SCADA)或电网能量管理系统(energy manage system, EMS),利用先进的调控手段与控制策略,有效地对REG进行有效的出力预测、状态估计、在线监控、优化调度与管理,协调控制具有波动性、不确定性的电功率,使配电系统稳定运行^[20,21]。

2.3 优化配电系统网络结构

在配电网方面,优化配电系统网络结构,提高电网消纳波动性REG能力是提高配电网安全运行的重要措施。

灵活可控的环网状网络可以促进对REG的主动调度与管理,提高REG的消纳与利用水平^[22]。同时,环网状网络可以通过有效的隔离手段和网络重构提高配电网的自愈能力。因此,应按照适度超前的前瞻性规划原则,适度增加配电系统格状结构或环网结构,构建多电压等级环网状配电网拓扑结构,如图2所示^[23,24]。对含DG的闭环网络拓扑结构及相应运行、保护问题进行研究,利用闭环网络的连续供电性与电能质量方面的优势,考虑将配电网从开环辐射结构向闭环拓扑结构过渡。

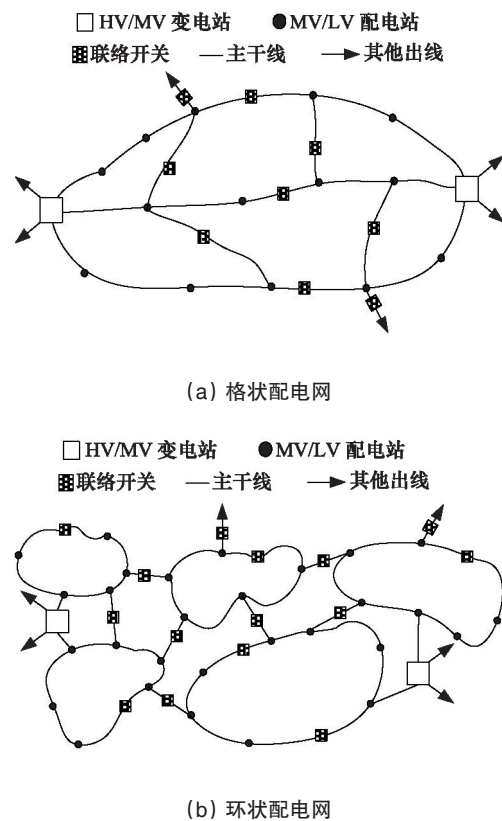


图2 格状与环状配电网结构

Fig. 2 Structures of mesh-topology and ring-topology distribution networks

同时增加中压系统的联络开关数量,提高负荷转供能力,提升网络互联水平。优化联络开关安装位置,建设结构清晰的配电网网架结构。此外,对REG并网的故障与非故障配电网快速重构(异构)进行研究,通过灵活的网络拓扑结构提高配电网安全运行水平及自愈能力。

2.4 制定协调全面的保护与控制策略

对于DG并网的配电网,当发生故障时,多数国家要求在配电网继电保护动作之前将DG切除,以保证继电保护与重合闸的正常动作,但这样频繁的投切会降低DG的利用效率,并可能给配电网运行带来冲击。为了解决孤岛运行问题,电气与电子工程协会(Institute of Electrical and

Electronics Engineers, IEEE)推出了IEEE1547标准,允许有计划的孤岛运行,鼓励利用多种技术手段实现DG孤岛运行及孤岛区域内的频率、电压稳定及功率平衡。

因此,应首先对孤岛运行状态与控制保护策略进行研究,解决因线路故障导致的孤岛状态下,1)如何快速准确地实现孤岛检测的问题;2)如何根据DG容量与负荷容量合理解列的问题;3)如何实现非计划孤岛形成后,通过减载、切机等控制策略实现孤岛正常运行的问题;4)故障清除后,孤岛实现重新并网问题^[25,26]。

此外,应制定允许孤岛运行的配电网与DG的协调保护策略,并重新整定配置与保护装置,利用光纤等安全、高效的通讯方式,实现DG与配电网继电保护的协调一致。

2.5 研究源、网、荷协调规划方法

针对DG接入,与需求侧FL互动对配电系统的广泛影响,规划过程应摒弃传统配电网规划过程中对DG、FL等消极处理的规划理念,开展计及REG出力不确定性的发电预测与电源规划方法;计及需求侧响应的负荷预测方法;计及源、荷不确定因素的配电系统源、网、荷协同规划方法研究。

1)发电预测与电源规划。面向REG并网的配电网电源规划主要是根据规划区的发展阶段,对以REG为主的DG的容量选择与优化布点。建立考虑规划区自然条件、装设地环境条件、设备停运概率等不确定因素的REG的出力模型,对REG的一定置信度下的可信出力进行求取,并配合装机容量进行配电网电源容量配置。

同时,考虑到多种DG、ESS之间的互补支撑效应,其容量规划的协调匹配可以在一定程度上平抑可再生电源的波动性、间歇性对电网的不利影响。在容量配置过程中,应充分考虑DG与ESS的功率输出特性协调配置容量,并综合考虑REG与ESS联合单元的功率外特性,纳入电源规划对象,进行REG的优化布点与容量选择。

2)需求侧响应与负荷预测。负荷预测是面向REG并网的配电网规划的关键内容之一,预测的准确程度直接影响着规划区电源规划与网络拓扑结构规划的效果与可行性。

由于配电网中FL等需求侧资源的互动响应程度不断加大,负荷预测及其特性分析也变得更加复杂。在负荷预测过程中,应根据规划区历史负荷数据、自然气候条件、宏观经济与人口发展数据进行负荷电量、最大负荷功率等内容的预测。然后对规划区内负荷进行“刚性”与“柔性”划分,并对不同FL对引导机制的响应特性建立数学模型,进行差异化研究。最后定量计算DR对负荷预测的影响程度,进而得到计及DR的负荷预测结果。

3)网络拓扑结构规划。面向DG的配电系统规划模型应该是在计及间歇式DG、负荷需求增长以及未来能源市场等不确定因素下,综合考虑原有配电网规划内容、多种REG及ESS的优化配置、选址定容等,以追求能源损耗小、供电可靠率高以及绿色能源利用率高的多目标,并涉及众多不确定因素的组合优化复杂问题^[27]。

在规划理念方面,应摒弃传统配电网规划仅以最严重工况作为运行条件的确定性规划思路,并充分利用对DG、ESS及DR模式下的FL在运行过程中的主动管理与主动控制,充分挖掘并利用源、荷两侧可调度资源,并以此优化网架结构,改善投资与运行成本,提高资产利用率。

在规划数学模型方面,应摒弃源、网、荷3方面单独优化决策,并将“源”侧与“网”侧的资源配置与网络结构规划结合,给出综合数学模型进而得出综合优化规划方案。具体需要在以下几个方面展开重点研究。

1)多重不确定因素处理。配电系统网络拓扑结构规划过程中需要对DG出力不确定性、FL参与DR、ESS充放电策略等多方面不确定性因素进行综合考虑,这需要根据不确定因素的不同数理特性建立相应的不确定性数学模型。但目前的研究所采用的概率模型、模糊模型或灰色模型较为单一,无法对具有交叉混合特点的多重不确定信息准确表征。因此,应采用云模型、盲数等模型综合表征规划过程中的多重不确定因素,利用蒙特卡罗模拟、拉丁超立方采样、场景分析及机会约束规划等方法实现计及多不确定因素的配电系统柔性规划。

2)源、网、荷全局最优。目前,对配电系统电源规划、网架规划、负荷预测等方面的多数研究存在源、网、荷规划过程中的独立优化决策缺陷,虽然文献[28]~[30]分别通过多层、多阶段、多目标规划模型一定程度上实现DG与网架结构协调规划,但优化过程中负荷模型建立时却忽略了配电系统运行过程中FL参与DR的重要作用,忽略了源、网、荷三者内在联系和可能存在的交互影响(如季节性或昼夜性的多种REG出力互补性,REG与负荷需求相关性,DR对负荷曲线的移峰填谷作用等),这可能导致无法得到全局最优规划方案。

规划过程中可将FL视为特殊电源对待,对DG、FL与主网购电的运行费用进行综合分析,并确定三者运行过程中承担的调度任务,以此合理配置DG、FL与主网电源在负荷需求中承担的容量。

3)含多微电网(micro grid, MG)的配电系统规划。作为DG并网的一种重要形式, MG在配电网系统出现比例也将随DG并网数量的增加而迅速提升。因此,在配电系统规划过程中,应将MG列为重要的规划对象,将其处理为特殊的电源节点,研究MG整体外功率供需特性并建立数学模型,借鉴“分布式优化”理念,研究MG节点接入的主动配电网规划方法,利用MG为局部优化及微电网之间的相互协调,实现配电系统中大量DG广域协调优化配置。

4)源、网、荷全面约束条件。数学模型中约束条件方面,除功率平衡约束、线路容量约束、节点电压约束、网络连通等“网”侧约束条件外,还应充分综合考虑:(1)“源”侧增加的REG功率约束、ESS充放电功率及容量约束、REG为主的DG并网渗透率约束,及安全可靠约束等由DG并网引起变化的约束条件;(2)“荷”侧增加的电动汽车充、放电约束、FL限值约束、调用次数约束等由FL参与DR而增加的约束条件,

进而确定考虑源、网、荷协调互动的配电网规划数学模型约束条件。

3 结论

1) 以 REG 为主的 DG 大量接入配电网,使传统配电系统变为一个含 DG、ESS 和具有 DR 特征的 FL 的新型主动配电系统。REG 出力的波动性、随机性、安装位置的不确定及并网形式的不同,给配电系统的安全运行在功率传输、电压分布、频率稳定、孤岛效应、保护控制、规划设计等多方面带来显著的影响。

2) 针对上述 6 方面安全影响因素,REG 广泛并网的配电系统应从制定全面规范的并网导则与标准,提高 REG 稳定性与可调控性,优化配电系统网络结构,制定协调的保护与控制策略,研究源、网、荷协调规划方法 5 个方面展开重点研究。

3) 针对主动配电系统规划方面,应将“源”侧与“网”侧的资源配置与网络结构规划相结合,将多种运行工况与规划设计相结合,重点从计及 REG 出力不确定性的发电预测与电源规划方法,计及 DR 的负荷预测方法,计及多重不确定因素的配电系统源、网、荷协同规划方法 3 个方面展开研究。不确定因素处理,源、网、荷全局最优,含多 MG 的配电网规划,约束条件等方面则是配电系统源、网、荷协调规划模型的研究重点与难点,是求取源、网、荷协同规划方案的关键因素。

参考文献(References)

- [1] Djapicp, Ramsay C, Pudjianto D, et al. Taking an active approach[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 68-77.
- [2] Wang D T C, Ochoa L, Harrison G. DG impact on investment deferral: Network planning and security of supply[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1134-1141.
- [3] 曾鸣, 李红林, 薛松, 等. 系统安全背景下未来智能电网建设关键技术发展方向——印度大停电事故深层次原因分析及对中国电力工业的启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 175-181.
Zeng Ming, Li Honglin, Xue Song, et al. Key technologies of future smart grid construction based on power system security: A view of blackout in India and experience and enlightenment to power industry in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 175-181.
- [4] Mozina C J. Impact of smart grids and green power generation on distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1079-1090.
- [5] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
Fan Mingtian, Zhang Zuping, Su Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [6] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
Pei Wei, Sheng Kun, Kong Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [7] Tonkoski R, Turcotte D, El-Fouly THM. Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 518-527.
- [8] Perera D, Meegahapola L, Perera S, et al. Characterisation of flicker emission and propagation in distribution networks with bi-directional power flows[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 172-180.
- [9] Ladjavardi M, Masoum M A S, Islam S. Impact of a SG nonlinear model on the harmonic distortion of a distribution generation system[C]// 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference. Sydney, Australia: IEEE, 2008: 1-6.
- [10] Meersman B, Renders B, Degroote L, et al. Three-phase inverter-connected DG-units and voltage unbalance[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(4): 899-906.
- [11] 刘科研, 何开元, 盛万兴, 等. 基于协同粒子群优化算法的配电网三相不平衡状态估计[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1026-1031.
Liu Keyan, He Kaiyuan, Sheng Wanxing, et al. A cooperative particle swarm optimization based state estimation of unbalanced three-phase distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1026-1031.
- [12] Brahma Sukumar, Dirgis Adly. Overview of the effect of distributed generation on protection in power distribution systems[C]// IASTED 6th International Conference on European Power and Energy Systems. Rhodes, Greece: Acta Press, 2006: 276-280.
- [13] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5.
Zhou Wei, Zhang Yao, Xia Chengjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5.
- [14] Zeineldin H H, Sharaf H M, Ibrahim D K, et al. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 115-123.
- [15] 薛晨, 黎灿兵, 曹一家, 等. 智能电网中的电网友好技术概述及展望[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 102-107.
Xue Chen, Li Canbing, Cao Yijia, et al. An overview and prospects of grid friendly technology in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 102-107.
- [16] 包能胜, 朱瑞丹. 风气互补发电系统与电力系统相互影响的研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(4): 517-522.
Bao Nengsheng, Zhu Ruidan. Study on interaction impact between wind gas turbine hybrid power system and power grid[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2010, 31(4): 517-522.
- [17] Rehman S, Mahbub Alam M, Meyer J P, et al. Feasibility study of a wind-PV-diesel hybrid power system for a village[J]. Renewable Energy, 2012, 38(1): 258-268.
- [18] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98.
Xu Lin, Ruan Xinbo, Zhang Buhuan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98.
- [19] Mohammed Alsayed, Mario Cacciato, Giuseppe Scarcella, et al. Multicriteria optimal sizing of photovoltaic-wind turbine grid connected systems[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2013, 28(2): 370-379.
- [20] Falahi Milad, Lotfifard Saeed, Ehsani Mehrdad, et al. Dynamic model predictive-based energy management of DG integrated distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2217-2227.

- [21] Zhao Bo, Xue Meidong, Zhang Xuesong, et al. An MAS based energy management system for a stand-alone microgrid at high altitude[J]. Applied Energy, 2015, 143: 251-261.
- [22] Asakura T, Genji T, Yura T, et al. Long-term distribution network expansion planning by network reconfiguration and generation of construction plans[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1196-1204.
- [23] Nouredine Hadjsaid. 有源智能配电网[M]. 陶顺, 肖湘宁, 彭聘, 译. 北京: 中国电力出版社, 2012: 29-31.
Nouredine Hadjsaid. Smart active distribution networks[M]. Tao Shun, Xiao Xiangning, Peng Pin, trans. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 29-31.
- [24] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
Ma Zhao, Zhou Xiaoxin, Shang Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [25] Soo Hyung Lee, Jung Wook Park. Improvement on stability and islanding detection performances by advanced inverter control of DG [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3954-3963.
- [26] 丁磊, 潘贞存, 苏永智, 等. 并网分散电源的解列与孤岛运行[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 25-29.
- Ding Lei, Pan Zhencun, Su Yongzhi, et al. Splitting and islanding of networked dispersed generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 25-29.
- [27] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
Zhang Jianhua, Zeng Bo, Zhang Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [28] 方陈, 张翔, 程浩忠, 等. 主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 823-829.
Fang Chen, Zhang Xiang, Cheng Haozhong, et al. Framework planning of distribution network containing distributed generation considering active management[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 823-829.
- [29] Aghaei J, Muttaqi K M, Azizvahed A, et al. Distribution expansion planning considering reliability and security of energy using modified PSO (particle swarm optimization) algorithm[J]. Energy, 2014, 65: 398-411.
- [30] Al Kaabi S S, Zeineldin H H, Khadkikar V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 785-793.

Impacts of renewable energy generations on the safety of the distribution system

LI Rui^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, WU Xuezhi^{1,2}, HE Yongjing^{1,2}

1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100081, China

Abstract The fluctuation and the randomness of REG's output have severe impacts on the safety and stability of the operation. To guarantee a stable operation of the distribution system, the important impacts of the REGs on the safety operation of the distribution system are analyzed in six aspects, including the power transmission, the power quality, the frequency stability, the islanding effects, the protection, and the planning. To cope with these impacts, the corresponding suggestions, such as the formulation of a comprehensive safety and stabilization guide, the optimization of the network structure, and the improvement of the REGs' stability and controllability, are proposed. Particularly, the coordinated planning method for the distribution network is discussed in detail. The in-depth analysis of the planning model is presented.

Keywords renewable energy generation; distributed generation; distribution system; security operation; distribution network planning

(责任编辑 王媛媛)