

主动配电网技术研究现状综述

刘东¹, 张弘¹, 王建春²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

2. 国网淮安供电公司, 江苏 淮安 223001)

摘要:主动配电网作为解决大规模分布式能源接入及配网优化运行问题的有效解决方案,是智能配电网的发展趋势,引发了国内外学者广泛而深入的研究。本文从主动配电网规划技术、主动配电网运行控制技术、主动配电网供电恢复技术与主动配电网负荷管理技术等相关重点领域出发分析了主动配电网关键技术的研究现状,并阐述了国内外主动配电网示范工程试点情况。

关键词:主动配电网; 可再生能源; 示范工程; 综述

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0002-07

0 引言

由于分布式能源(distribution energy resource, DER)的大量接入,配电网产生了功率倒送、弃风弃光等现象,为电网稳定运行带来很大影响同时降低了新能源的效益与价值。主动配电网(active distribution network, ADN)是为解决分布式能源接入配电网问题而提出的方案,利用先进的电力电子技术、通信和自动控制技术,具有协调控制各种类型分布式能源的能力。它可以实现配电网系统中双向潮流的控制,使新能源所发电量得到高效的利用,从根本上解决大量分布式能源接入配电网的问题,是未来智能配电网的发展趋势^[1,2]。

主动配电网由分布式电源(distributed generation, DG)、各类负荷以及大量监控装置等构成,通常包含光伏、风电等可再生能源的发电装置,以及为有效平抑间歇式能源的出力波动而配置的储能设备。对比传统配电网,主动配电网是可控的,在实时获取全网运行状态的情况下,综合利用各种可控DG(如储能设备)、灵活的网络结构(开关)以及电压调节设备(如无功补偿装置),通过主站管理系统的控制调度实现配电网在正常工况下的电网安全稳定经济运行和故障情况下的隔离恢复。同时能够结合用户侧需求分析,综合优化计算给出最优的运行方式。

作为未来电网的发展方向,越来越多的学者将研究重点放到了主动配电网相关领域的研究上来,本文将从主动配电网相关关键技术与国内外工程

实践两方面展开论述,阐述主动配电网技术的相关研究现状。

1 主动配电网关键技术

主动配电网作为目前国际上的研究热点,学者们对其涉及到的诸多相关技术均展开了研究,其中热点研究方向主要包含主动配电网的规划技术、运行控制技术、供电恢复技术与主动负荷管理技术等多个方面。

1.1 主动配电网规划技术

和传统配电网规划不同,主动配电网的规划设计过程中不仅要考虑传统规划的内容,更要考虑新出现的DG、需求侧管理等不同信息,同时由于可再生能源(风、光等)的出力波动存在不确定性,使得考虑DER的主动配电网规划问题也将具有很大的不确定性。目前,部分学者已对主动配电网的规划问题开展了相关研究,取得了一定成果,本节从考虑分布式发电、储能、需求侧管理这几个方面的主动配电网规划研究展开阐述。

1.1.1 考虑分布式发电的配网规划

分布式发电的概念早于主动配电网的概念为人们所知,因此,国内外学者对于考虑DG的配网规划开展了广泛、深入的研究。文献[3]给出了一个考虑DG接入的多阶段配电网扩展规划问题的建模及求解方法,结合网架参数在约束条件中计入节点电压的同时使模型仍保持为一个混合整数线性规划(MILP)问题。文献[4]同样展示了一个考虑接入DG的运行策略的配电网扩展规划问题,首先介绍了一种应用于富含DG的配网自主性区域配网管理系统,实现了以下两方面的优化控制:通过有载调压优化电压,减少电压越限,提升电能质量;用合

收稿日期:2017-02-21;修回日期:2017-03-30

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2014AA051902);国网江苏省电力公司科技项目(J2016083)

理削减 DG 实现最优潮流控制,然后进一步提出了一种配电网扩展规划方法,将问题分解为上层的配网扩建 MILP 问题和下层 $N-1$ 校验。

除采用 MILP 模型外,混合整数非线性规划(MINLP)和智能算法、启发式算法在应用求解配网规划问题中也十分常见。文献[5]采用人工蜂群算法,在每阶段中都进行日前经济调度机组组合计算,从而实现了配网规划问题与机组组合问题的统一考虑。文献[6]采用启发式方法对含分布式电源的配网规划进行了研究,用模糊算法进行评估分析。文献[7]采用遗传算法和模拟退火算法,将分布式电源选址定容与网架扩展拆分为两个阶段,分别应用两种启发式算法求解。

除经济成本外,供电可靠性也是加入 DG 后配电网规划问题应当重要关切的一个因素。文献[8]在考虑配电网中可能集成波动性可再生能源的前提下,提出了主动配电网动态规划模型,在目标函数中考虑了多个指标,并最终通过拟动态规划求取最优解。

由上可知,采用 MILP 及数学算法进行规划,其优点在于模型可通过分段线性化获得良好的拓展性,并且所得到的解能够保证全局最优性,缺点在于在配电网规划中需考虑和交流潮流计算结果尤其是节点电压的误差问题,同时,变量数较大的模型的收敛性问题有待探讨和解决;采用 MINLP 及启发式算法进行规划,优点在于可以纳入多种非线性约束、拓展性强,缺点在于算例个例性较强,无法很好保证所得到的解的全局最优性。

1.1.2 考虑储能的配网规划

含储能的配电网扩展规划也是传统配电网规划改进的一个重要方向。集中式的储能电站是部分规划研究中的重点分析对象,而电动汽车充电站作为新型储能的一种形式,同样得到了部分学者的关注。

文献[9]考虑了一个含分布式风力发电的地区的变电站扩容问题,得到了将电池储能系统(battery energy storage system, BESS)选型规划与变电站扩容规划相结合的规划方法,但变电站扩容显然仅是配网规划问题的一个子集。文献[10]以一个配网扩展规划模型研究了满足传统负荷增长和新增电动汽车充电站建设的配电网单阶段规划问题,所采用的模型仍为 MILP 模型,但是该文献将电动汽车充电站作为固定负荷进行分析,并未考虑其向电网注入功率的可能性。文献[11]提出的规划方法考虑了 DG、储能的联合选址和定容,目标函数中包含

固定成本、运行成本以及可靠性成本。

需要注意的是,上述研究大多数并未在分时电价背景下考虑储能的智能经济调度。实际上,储能调度的经济性依赖于节点边际电价曲线的预测,因而也应同时影响储能的规划选址。因此,考虑节点边际电价背景下储能与主动配电网运行状况的规划问题应作为接下来研究的重点之一。

1.1.3 考虑需求侧管理的配电网规划

含需求侧管理的配电网规划同样得到了部分学者的关注。如文献[12]分析了在中压配电网规划问题中引入需求侧管理、储能、主动配电网管理技术的重要性,并引出文献,阐述了在配网中引入能源管理政策,建立柔性负荷管理机制来削峰填谷,进而减少对配网改造的需求,但该文献对于 DG 和储能在主动配电网中的应用并未进行分析。对于综合考虑分布式电源、储能、需求侧管理等技术的主动配电网规划问题还有待深入研究。

1.2 主动配电网运行控制技术

运行与控制是主动配电网的核心技术,也是国内外学者研究的重点内容,近年来取得了大量的研究成果。本节从其优化运行、协同控制、电压管理三方面对目前研究内容进行总结。

1.2.1 主动配电网的优化运行

优化运行是主动配电网的核心,自治区域的自动控制与区域间的协调控制都依赖于优化值。对于传统的电力系统优化技术来说,考虑到 DER 的不确定性、储能技术的应用及需求侧响应技术,运行优化更加趋向于非线性化以及复杂化,传统的优化技术难以适用于主动配电网中。目前对于运行优化的研究主要集中在对目标函数综合化^[13,14](经济性、稳定性、峰谷差、网络损耗等)、优化手段多样化^[15,16](最优潮流、网络重构、分布式电源控制、无功优化等)及优化算法高效化的研究上^[16,17]。

目前的主动配电网优化运行策略研究主要思路是借鉴输电网中发电计划的思想,建立“日前优化+日内滚动”的优化模型模式。所谓日前优化,是指以日为优化运行的基本单位,在准确的负荷预测和分布式出力能力预测的基础上,考虑储能装置的实际运行状况,形成覆盖一日的优化模型。该模型可以以电网网损最低、新能源接纳最充分等为优化目标,考虑电网的安全约束、各种设备的运行状态约束,形成一套基于次日预测信息的最优运行状态。所谓日内滚动,是指在每天的实际执行过程中,根据当前的实际运行状态和超短期负荷预测、分布式能源出力预测等信息,形成下阶段最优的运

行状态^[18]。这种方式在主动型配网上应用还不够成熟,尚未综合考虑 DG、柔性负荷等源、网、荷等多方面特性,有待深入研究应用。

1.2.2 主动配电网协同控制

随着更多的可控 DG 的接入,主动配电网运行控制技术有了更多的可能和意义,对各 DG 间的协同控制成为研究的热点。文献[19]为表示配电网中实际运行状态与优化计算得出的最优运行状态的差异,提出了馈线控制误差指标(feeder control error, FCE),在此基础上研究产生区域协调控制方法。文献[20]提出了一种考虑主动配电网以及 DG 特性的优化调度模型,以一个完整调度周期的运行成本最低为目标函数,通过控制主动配电网内可控 DG 和联络开关,并利用智能单粒子优化算法进行求解,实现主动配电网运行最优。目前主动配电网主要有集中式控制、单层分布式控制、分层分区式控制三种控制模式。

集中式控制由配电网中唯一控制中心主动配电网能量管理系统(active distribution management system, ADMS)进行全局的控制,ADMS 根据配电网实时运行数据、负荷预测、发电预测等信息计算出全局最优运行控制策略并统筹调整配电网中各可控制单元,实现配电网最优状态运行。然而随着更多的 DER 的接入,集中式控制方法中的优化问题将更加复杂,影响主动配电网控制管理的实时性以及准确性,同时所有 DG 的信息将通过中央的管理系统进行处理,可能导致信息阻塞。

单层分布式控制理论是为了解决集中式控制中存在的问题而提出的,该控制结构中配电网被规划为多个控制区域,每个区域都受控于独自的控制单元,控制单元接收该区域内的信息并管理区域内的 DG,各控制单元基于是否通信可进行就地控制或者进行分布式控制。

单层分布式控制框架下,各区域控制器只需处理自身区域的相关数据,信息量少,解决集中式控制时可能发生的信息阻塞问题。同时区域间联系少,各自区域并不会明显受其他区域故障影响,然而难以实现全局最优控制,对 DG 的利用也不够灵活。

分层分区控制吸取集中式控制与分布式控制的优点,由最上层 ADMS 收集全网信息,基于预测统筹全局,制定全局最优运行控制策略;下层控制器控制配电网中一个区域,在接收 ADMS 最优策略基础上,针对区域内 DG 状态及特点进行自治控制,其结构示意图如图 1 所示。主动配电网需要进行实时

的跟踪控制以应对大量间歇式能源的接入,而分层控制中各层控制范围以及控制策略复杂程度存在差异,往往底层控制单元实现的控制时间尺度较短,可满足主动配电网实时跟踪的需求^[21]。

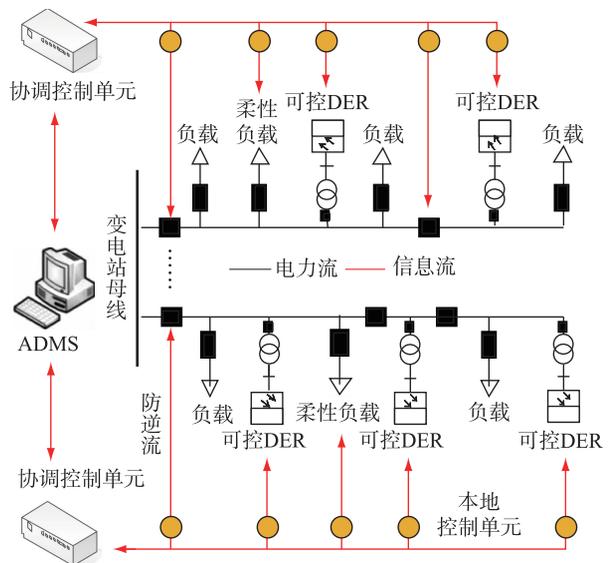


图 1 分层分区式控制结构示意图

Fig.1 Hierarchical and regional control structure

1.2.3 主动配电网电压控制

由于 DG 的接入与控制设备的多样化,使得主动配电网在电压控制方面存在多处难点,目前国内外文献中所述的控制策略可以分为分散式电压控制、集中式电压控制、协调电压控制三大类。

分散式电压控制策略通常以传统配电网电压控制设备为基础,利用增设其他就地控制器的方式避免变电站内自动控制装置大幅改造而导致的控制成本提高。目前主要的分散式电压控制策略可以分为两种,第一种是基于主动配电网中 DG 接入特征,通过对 DG 增加控制器实现分散式电压控制;第二种是基于分散式电压控制本身特征,进行分区域控制。

集中式电压控制策略从目前国内外文献研究来看,可以根据其出发点不同分为两大类:第一类是以电压优化为出发点^[22],以不同类型优化算法为核心的优化式电压控制策略,这种电压控制通常是为了确定未来一段时间内系统各种可控设备的运行状态,以保证电网运行的经济性与安全性;第二类是以电压越限恢复为出发点^[23],以控制规则为核心的触发式电压控制策略,这种电压控制策略根据实时采集到的值,通过启发式算法或一定的控制逻辑直接触发预定的控制流程来进行电压越限恢复。

集中式电压控制策略可以综合考虑不同类型电压控制设备,在此基础上通过状态估计实现优化

控制。集中式电压控制的主要问题在于控制成本高,计算负担较大,同时这种单一中心的配置方式会导致可扩展性和可靠性的降低等问题。

协调电压控制策略弥补了集中式电压控制策略和分散式电压控制策略部分缺点,但同时也带来了许多亟需攻克难点:

首先,目前文献中的协调电压控制大多是以设备类型或者设备控制特性进行区域划分的,主动配电网本身运行方式的灵活多变导致控制区域难以保持稳定,为了保证不同运行状态下协调电压控制的有效性,需要更为有效的区域划分手段保证优化运行,或者加设冗余通信通道,但这种方式会增加控制成本。

其次,目前区域间交互信息大多为区域内控制信息,这种情况下难以利用多区域间信息与能量联系实现优化运行。为了保证区域间的优化控制,需要像文献[19]所述的 FCE 指标一样,选择一个或者一系列参数作为电压控制指标以实现更有效的协调电压控制。

同时,由于协调电压控制的控制策略比较灵活,在不存在上层设备时,如何通过同等级控制设备所具备的区域信息形成完整拓扑结构,从而在主动配电网运行方式改变时保证状态估计或控制策略的有效性也是一个极大的难题。

1.3 主动配电网供电恢复技术

目前 IEEE 1547—2008 已经提出了 DER 的接入配电网中无意识孤岛的形成及其防范,并且强调了对于未来配电网的安全运行必须防止各种可能造成孤岛的情况^[24]。针对含高渗透率 DG 的配电网保护,国内外已开展大量研究,并提出了多种解决方法^[25]。由于主动配电网将允许存在孤岛运行的情况,因此必须考虑在 DER 中带有反孤岛保护情况下的保护配合。

主动配电网故障处理算法,主要包括故障定位、故障隔离与非故障区域供电恢复三大部分,有学者又称之为故障监测、隔离与恢复,通常又简称为故障处理。自愈作为主动配电网的主要特征与重要组成部分,可以最大程度地减少电网故障对用户的影响,并且支持大量 DG 接入。主动配电网故障状态的自愈处理是智能配电网自愈功能实现过程中重要一环,对此进行深入研究至关重要,其主要包括集中式故障处理与分布式故障处理两大类。

集中式故障处理基于通信网络、现场自动化终端与实现自愈决策的配电自动化主站系统之间的紧密配合,由现场自动化终端监测故障信号,并通

过通信网络将这些信号发送至配电自动化主站系统,配电自动化主站系统结合网络拓扑,进行故障定位,并通过手动或自动的方式下发开关控制指令给终端,实现故障区域隔离与非故障区域的供电恢复。在配电自动化主站与现场终端之间有时还配置了配电自动化子站,既可减轻主站系统的通信和计算负载,也可承担本区域配电网的馈线自动化功能。从算法实现的角度来看,集中式故障处理算法的主要包括:动态规划法、专家系统法、启发式算法、遗传算法及其他各种智能优化算法等^[26-28]。

不过,由于配电网具有辐射型运行、配电网之间关联度小的特点,非常适合采取就地分布式自愈处理方式^[29]。这种模式不需要主站而依靠智能开关设备相互配合就能达到故障隔离和健全区域恢复供电的目标。实际应用中,分布式处理模式包括重合器分段器模式、广域保护模式以及基于多代理系统的就地控制模式。

1.4 主动配电网负荷管理技术

通信技术与传感量测技术的发展为主动配电网需求侧负荷控制提供了可能。在主动配电网中,用电管理部门可以利用高级量测设备捕获实时负荷数据信息,并利用智能插座、智能用户终端与智能红外控制器对负荷进行合理控制。这对实现主动负荷管理,平抑 DG 功率波动,优化系统运行具有重要意义。

目前,作为集中式发电的重要补充,分布式发电和储能技术得到大力发展,主动配电网通过控制分布式发电和储能有效解决区域供需平衡问题,平抑间隙式能源的波动。但是大范围推广储能面临巨大的投资成本,因此将现成的柔性负荷作为调度资源主动参与电网供需平衡调节,是电网发展的客观要求。

空调负荷在居民负荷中占比越来越大,也是夏季负荷尖峰的主要贡献者,对于空调负荷的管理策略,国内外都有大量研究。在控制手段上,主要分为频繁开关空调以调节瞬时功率以及调节设定温度来调节平均功率两种手段。从控制策略上,也主要分为两种,一种是以平衡电网实时功率为目的的直接负荷控制策略,另一种是基于动态电价的优化控制策略。

各类直接负荷控制方案中新颖的思路层出不穷,但本质上仍然没有脱离由电网侧完成全部调度的传统模式,电网供需平衡是其唯一目的,没有体现负荷管理的特色。而基于动态电价的负荷响应策略则充分考虑了用户的利益,增强了用户的参与

度;同时也减轻了电网侧的控制负担,只需要通过智能电表获取日前市场的动态电价即可^[30],值得进一步深入研究与发展。

2 主动配电网工程实践

国内外针对主动配电网技术,已经实施了一系列典型示范工程,以实践和应用来检验理论。

在国外,美国、澳大利亚、欧盟、日本等均对主动配电网展开了研究并构建诸多示范工程。就欧盟而言,已开展了诸如 ADINE、GRID4EU、ADDRESS 等具有不同侧重点与特色的主动配电网示范工程。ADINE 示范工程由欧盟 FP6 主导,主要研究了能够满足更高 DG 渗透率配电网所需的一系列关键技术,并联合试验了诸如反孤岛、保护定值自适应整定、电压控制、电能质量控制等策略。GRID4EU 项目由 6 家配网运营商共同参与,围绕智能配电网规划、运行、控制等关键技术展开研究,耗资达 5000 万欧元,同时研究相关标准制定及成本效益分析等。ADDRESS 项目由 11 个国家共同参与,历时 4 年完成,研究以“主动需求”为核心的用户侧需求响应管理技术。通过建立能满足大量实时数据出力的电力通信网络,实验并验证了实时激励等主动需求管理技术对系统效益的积极作用。

在我国,主动配电网已经成为智能电网新的研究阶段,智能信息统一平台、完善的配电管理体系是我国目前发展方向和目标。国内高校、科研院、电力企业等纷纷对主动配电网的相关理论展开研究,并立项进行工程示范实践,取得了一定成果。2012 年起开展了“主动配电网的间歇式能源消纳及优化技术研究与应用”863 计划课题,并在广东佛山三水建立示范工程,在国内首次将分层分区的控制策略应用到配网能量管理中,实现了分布式可再生能源在多种工况下的消纳与协调控制。2014 年起的“多源协同的主动配电网运行关键技术研究及示范”863 项目分别在北京、贵阳等多地进行示范,其中贵阳红枫地区示范工程现场集成示范实现了主动规划构建的灵活电网拓扑结构与高比例可控资源,部署了全局运行决策系统,主动负荷管理系统,分布式馈电自动化等装置,通过对风、光、水、气、储等多种 DER、柔性负荷联合优化及冷、热、电的能源互联控制,实现了多级分层的源-网-荷协同控制与多能互补的高效运行。

3 结语

集成可再生能源的主动配电网作为当前配电

网的发展方向,围绕其关键技术的研究与示范是目前研究的重点。目前国内外在主动配电网的理论及示范工程、主动配电网的规划技术、运行决策、供电恢复以及运行控制与负荷管理等方面均已经进行了较多的研究并取得了一定的进展,但同样还存在需要加强研究的地方,如主动配电网规划方面,需加强考虑集成储能系统的规划问题;在电网优化运行方面,针对风、光、水电能源联合调度研究尚处在初步研究阶段,含间歇性电源的多能源电力系统的有功无功综合优化问题同样值得深入研究;在负荷管理方面,目前在需求侧管理、需求响应等方面研究应用我国还处于起步阶段,同样有待进一步研究应用以求真正达到主动配电网的源-网-荷协同优化控制。

参考文献:

- [1] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks-update of CIGRE C6. 11 working group activities [C] // Electricity Distribution-Part 1, CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on. IET, 2009: 1-4.
- [2] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [3] HAFFNER S, PEREIRA L F A, PEREIRA L A, et al. Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation—Part II: Numerical results [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 924-929.
- [4] HUZechun, LI Furong. Cost-benefit analyses of active distribution network management, part I: annual benefit analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1067-1074.
- [5] EL-ZONKOLY A M. Multistage expansion planning for distribution networks including unit commitment [J]. Generation Transmission & Distribution IET, 2013, 7(7): 766-778.
- [6] 李伟伦, 桂淑华, 孙志刚, 等. 考虑分布式电源的配电网优化规划 [J]. 江苏电机工程, 2010, 29(5): 30-32.
LI Weilun, GUI Shuhua, SUN Zhigang, et al. Distribution network optimal planning considering distributed generators [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(5): 30-32.
- [7] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.
WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [8] BORGES C L T, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties [J]. International Journal of Electrical

- Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
- [9] 李振文, 颜伟, 刘伟良, 等. 变电站扩容和电池储能系统容量配置的协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 89-96.
- LI Zhenwen, YAN Wei, LIU Weiliang, et al. Coordinated planning of substation expansion and BESS sizing[J]. Power System Protection & Control, 2013, 41(15): 89-96.
- [10] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.
- DU Aihu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42.
- [11] SEDGHI M, ALIAKBAR-GOLKAR M, HAGHIFAM M R. Optimal reliable distribution network expansion planning using improved PSO algorithm[C]// Integration of Renewables into the Distribution Grid, CIRED 2012 Workshop. IET, 2012: 1-4.
- [12] GROND M O W, MORREN J, SLOOGWEG J G. Integrating smart grid solutions into distribution network planning[C]// Powertech. IEEE, 2013: 1-6.
- [13] JOHN B, SIKAI H, DAVID I, et al. The evolution of electricity demand and the role for demand side participation, in buildings and transport[J]. Energy Policy, 2013, 52(3): 85-102.
- [14] 刘自发, 刘刚, 刘幸. 基于量子差分进化算法的分布式电源协调优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1922-1928.
- LIU Zifa, LIU Gang, LIU Xing. Coordinated optimal dispatching of distributed generation based on quantum differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1922-1928.
- [15] GABASH A, LI P. Flexible optimal operation of battery storage systems for energy supply networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2788-2797.
- [16] LEVRON Y, GUERRERO J M, BECK Y. Optimal power flow in microgrids with energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3226-3234.
- [17] GAYME D, TOPCU U. Optimal power flow with large-scale storage integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 709-717.
- [18] TAN C W, CAI D W H, LOU X. Resistive network optimal power flow: uniqueness and algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 263-273.
- [19] 于文鹏, 刘东, 余南华. 馈线控制误差及其在主动配电网协调控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 30(13): 108-115.
- YU Wenpeng, LIU Dong, YU Nanhua. Feeder control error and its application in coordinate control of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 108-115.
- [20] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(09): 177-183.
- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [21] MELIPOULOS A P S, POLYMENEAS E, TAN Z, et al. Advanced distribution management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2109-2117.
- [22] 陈芳, 王玮, 徐丽杰, 等. 分布式电源接入对配电网电压变化的分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 145-149.
- CHEN Fang, WANG Wei, XU Lijie, et al. Analyzing the voltage variation of distribution network including distributed generation[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System & Its Automation, 2012, 5(3): 180-3.
- [23] KULMALA A, MUTANEN A, KOTO A, et al. RTDS verification of a coordinated voltage control implementation for distribution networks with distributed generation[C]// Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe) 2010 IEEE PES. IEEE, 2010: 1-8.
- [24] JOUYBARI-MOGHADDAM H, HOSSEINIAN S H, VAHIDI B. An introduction to active distribution networks islanding issues[C]// Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2012: 1-6.
- [25] 邱永生, 姜玉磊. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(6): 81-84.
- QIU Yongsheng, JIANG Yulei. Research of relay protection for distributed generation system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2009, 28(6): 81-84.
- [26] AOKI K, ICHIMORI T, KANEZASHI M. Normal state optimal load allocation in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(1): 147-155.
- [27] 马骞, 杨以涵, 刘文颖, 等. 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复方法[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 21-28.
- MA Qian, YANG Yihan, LIU Wenying, et al. Method of power system restoration based on object-oriented petri-net technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 21-28.
- [28] HONG Tzeryang, CHAO Minghuang. Distribution system service restoration using fuzzy Petri net models[J]. Electrical Power and Energy System, 2002, 24(5): 395-403.
- [29] 刘健, 赵树仁, 负保记, 等. 分布智能型馈线自动化系统快速自愈技术及可靠性保障措施[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 67-71.
- LIU Jian, ZHAO Shuren, YUN Baoji, et al. Fast self-healing technology in distributed intelligent feeder automation systems and its reliability enhancement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 67-71.
- [30] OZTURK Y, JHA P, KUMAR S, et al. A personalized home energy management system for residential demand response[C]// Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). 2013 Fourth International Conference on IEEE, 2013: 1241-1246.

Research and Application of Coordinate control & Optimization Technology for Active Distribution System

LI Haitao

(Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The clean energy sources are utilized extensively due to environment protection. There will be series of challenges for distribution system operation and control with the high penetration of distributed generation (DG) in near future. This paper highlights the control framework and optimization approach for the coordination of source-net-load in active distribution system, which can realize the effective accommodation distributed renewable resources and secure and economic operation. It can solve the compatibility between distribution systems with distributed generation. Simulation results validate the effectiveness of the coordinated control technology for active distribution system.

Key words: clean energy sources; distributed generation; active distribution system; coordinated control of source-net-load; optimal control

(编辑 徐林菊)

(上接第7页)

作者简介:



刘东

刘东(1968—),男,江苏盐城人,博士,教授,主要研究方向为智能电网、主动配电网、电网物理信息系统(E-mail: dongliu@sjtu.edu.cn);

张弘(1993—),男,山东青岛人,硕士,研究方向为智能配电网、信息集成(E-mail: colinzh@163.com);

王建春(1973—),男,江苏淮安人,工程师,从事电气专业技术和管理工作。

Review on the State of the Art of Active Distribution Network Technology Research

LIU Dong¹, ZHANG Hong¹, WANG Jianchun²

(1. Electronic Information and Electrical Engineering School of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Huaian Power Supply Company, Huaian 223001, China)

Abstract: As an effective solution to large-scale distributed energy interconnection and optimal operation of distribution network, the Active Distribution Network(ADN) becomes the trend of next generation intelligent distribution network, and has aroused extensive and deep research of scholars. This paper analyses the key technologies of ADN research status, including ADN planning technology, ADN operation control technology, ADN power supply restoration technology and ADN load management technology. This paper also introduces the ADN demonstration projects.

Key words: active distribution network; renewable Energy; demonstration project; review

(编辑 刘晓燕)