

呈现集中-分布式形态的耦合协同型配电网架构研究

徐 谦¹, 邹 波¹, 王 蕾¹, 谢 宁², 钱振宇², 虞文武³, 符 早⁴, 王承民²

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310008; 2. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240;
3. 东南大学 数学学院, 江苏 南京 211189; 4. 东南大学 网络空间安全学院, 江苏 南京 211189)

摘要:随着电力系统能源转型,未来配电系统的结构形态得到了更多的关注。首先,分析了未来配电网的发展目标和趋势,多维度比较了当前不同未来配电网设想的优劣;然后,提出了呈现集中-分布式形态的耦合协同型配电网架构,剖析了该架构在未来电网中的优势和适应性,并且初步提出了评价耦合协同型配电网的关键指标;最后,提出了耦合协同型配电网的研究框架以及需要发展的关键技术。

关键词:小概率高风险事件;能源转型;集中-分布式形态;耦合协同型配电网;分布式电源;储能

中图分类号:TM 711;TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103011

0 引言

随着全球能源危机和环境污染问题的日益严峻,世界各国都在积极推动能源系统向更安全、更可持续和更低碳化方向转型^[1-2]。在能源供给侧促进可再生能源的大规模开发和利用,在能源消费侧促进更广泛的再电气化,成为实现能源转型的2个重要方向。电力系统转型是实现能源转型的主要支撑^[3]。在转型过程中,随着大规模可再生能源,特别是分布式可再生能源的并网,以及储能设施、电动汽车、需求响应资源的快速发展,对电网的适应性发展提出了更高的要求。随着信息技术、通信技术、计算机技术、电力电子技术的快速发展,能有效融入先进技术、实现电网结构更新换代的智能电网成为了未来电力系统发展的目标^[4]。

当前,由于全球气候变化与国际形势的复杂多变,各种极端自然灾害^[5](包括台风、洪涝、海啸)以及网络攻击^[6]等小概率高风险 LPHI(Low Probability High Impact)事件不断发生,对社会造成了巨大的经济损失。智能电网作为一种典型的物理信息融合系统,面临着来自物理层面和信息层面的双重风险,需要进一步拓展和丰富其安全防御体系。提高电力系统抵抗 LPHI 事件的韧性水平是智能电网的发展目标,这已经得到了社会各界包括政府机构和科研工作者的广泛认同^[7-10]。这也引出了韧性电网(resilient power grid)^[9-10]的概念,即强调电网在面对自然灾害等 LPHI 极端事件时所表现出的抵抗、适应以及恢复的能力,并将其补充至智能电网的概念中。

在能源转型以及新的安全防御体系的背景下,电网的规划和运行面临着新的挑战,迫切需要转型

发展,进而促进清洁低碳、安全高效的能源体系建设。目前电力系统主要的电源均集中在大型发电厂(站)中,因而大电网采用集中式的管理模式,通过全网资源的协调优化来实现电网的最优运行。然而,随着综合能源系统的建设,特别是大规模分布式电源设备的并网以及物联网技术的发展,不仅电源呈现出分布式特性,而且将会产生海量的生产、运行、控制、交易、消费等数据。为应对这一挑战,以分布式计算和云计算为基础的大数据分析技术得到了快速发展^[11]。另一方面,在集中管理模式下,当发生自然灾害等 LPHI 事件时,如果主网架无法有效应对 LPHI 事件,则会导致更多的甩负荷。

本文总结了未来配电网的发展趋势和目标,归纳了当前对未来配电网的相关研究成果,分析比较了采用不同组织形式的配电网的多维度差异。并且提出了耦合协同型的未来配电网架构,阐述了耦合协同型配电网的优势以及需要发展的关键技术。

1 未来配电网的发展目标与设想

1.1 未来配电网的发展目标

配电网是电力系统中最接近终端用户的环节,未来配电网的发展目标与电力系统的发展目标息息相关。未来电力系统的发展目标依然是安全可靠、经济高效以及环境友好的,只是随着可再生能源发电比例的提高,以及电动汽车、储能等新要素的出现,其需要更具体的结构调整,以契合和适应能源转型。当前对于未来电力系统的发展前景存在着分歧。

集中式的大电网结构在我国相对成熟,集中式指的是结构规模统一、层级分明,同时运行决策控制也是从上到下的管理模式。传统的发输配环节泾渭分明,采用集中式的管理模式可以实现电力系统的高效运行。由于电力系统能源转型问题,分布式电源大规模接入配电网在一定程度上改变了传统的电力系统结构。为了适应未来可再生能源发电高占比

收稿日期:2020-09-08;修回日期:2021-01-15

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY19000X)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(5211JY19000X)

的形势,构建以电力系统为核心的综合能源系统,将能源网络规模进一步扩大化,借助新兴的通信和云计算技术,管理调控更大规模的能源系统是一种解决方案。在此情形下,未来配电网不需要进行大规模的调整,可以根据需要适当接入部分电源和储能设备,依然以整体调控供电为主。

与此相对应,存在以分布式结构作为未来电力系统主体的方案,分布式指的是结构分散,同时控制决策相对独立。分布式的电力系统结构打破了传统的发输配环节,以能够独立自主运行的配电网作为电力系统的主体,每个配电网均配备足够的分布式电源和储能设备,即由传统的大型发电机组供电模式转变为大量小型发电单元供电模式,以分布式配电网作为独立自治单元。

大规模能源系统能充分发挥规模经济效益优势,更加经济高效地协调全局资源,但在面对 LPHI 事件时,易牵一发而动全身,而采用分布式结构的能源系统由于相对独立,更易保障负荷需求。

1.2 未来配电网结构形态设想

随着储能、分布式电源等相关技术的发展,当前已有一些对未来配电网发展的相关设想和成果。

主动配电网是较早提出的概念,是智能电网概念的分支和延伸,其主要具有以下三大特征:实时监测全网运行状态,灵活改变网架拓扑,协调控制各类分布式电源。微电网是实现主动配电网的一种形式,却又相对独立,当前关于微电网的研究已经较为成熟,我国多项微电网示范工程都已投入建设。

相比于对主动配电网的研究,目前更多的研究仍是对未来配电网的初步设想。法国国家科研署的分形电网(fractal grid)^[12]研究项目提出了基于分形理论的网络设计方法,用以模拟分析和设计2030年及以后的智能电网,旨在构建更加灵活、可控、自愈和协同的电力系统,从而实现高效安全运行。分形电网更侧重于电网拓扑结构的设计与优化,期望从整体和局部自相似的角度构建未来配电网结构。

针对未来(2030年及以后)可再生能源高度渗透的电力系统,欧盟资助的智能电网综合研究计划ELECTRA在2015年的国际供电会议上提出了元胞电网(web of cell)^[13]的概念。元胞电网是一种以元胞(cell)为基本单元的采用分布式控制结构的电网,强调的是各个元胞电网的自治性,未涉及与大电网的交互模式,以及在LPHI事件下的适应性。

在构建综合能源系统的背景下,电力物联网和坚强智能电网统一于能源互联网,并深度交融^[14]。配电物联网更多强调的是利用信息通信技术全面感知配电网运行状态,从而完成“能量流”、“信息流”和“业务流”的深度耦合,为用户提供更优质的电力服务。

2 未来配电网形态特征分析

2.1 采用集中式形态的配电物联网

电力物联网是采用集中式结构形态的电力系统的代表,根据国网公司提出的建设大纲^[15],其整体结构分为感知层、网络层、平台层和应用层。感知层由大量的传感器监测设备组成,从而实现状态全面感知;网络层指空天地协同一体化电力通信网,可实现信息的快捷传递;平台层存在实现物联管控和能力开放共享的云平台,能够实现信息的高效处理;应用层通过打造智慧能源服务平台,旨在高效协调多能源交互以及更方便地服务终端用户。

智能感知、高效通信和信息处理是配电物联网的优势。由于边缘智能化技术,配电物联网的主干通信网只承担处理结果,对信道综合容量上限要求较低,故能更广泛高效地采集数据^[16]。在此背景下,未来配电网状态数据全局共享,由局部或终端智能化设备进行信息处理,从而高效完成局部运行策略调整,将处理结果传达给上级控制中心,层层递进,进行实现配电网整体乃至电力系统的运行方案调整。

电力物联网在电力系统层面的规划更接近于综合能源系统的规划^[17],就配电网层面而言应当充分考虑配电网内不同能源形式电源的数学模型,同时考虑配电网与其他能源系统交互的能源流通路。电力物联网是采用集中式结构形态的电力系统,但在运行调度层面蕴含着分布式控制的思想,即通过终端智能化处理实现局部电网的快速调整。在此背景下的配电网是大系统结构下的重要组成部分,存在集中式形态固有的规模经济效益优势及难以应对LPHI事件的缺陷。

2.2 采用分布式形态的元胞电网

元胞电网是采用分布式形态结构的电力系统的典型代表,未来电力系统由多个元胞组成,发输配的界限不再明确。元胞是在一定的电力或地理边界范围内,互联的分布式发电机、储能单元及负荷的灵活组合^[18]。每个元胞内都有足够的有功备用容量和无功补偿容量以进行电压和功率平衡控制,而且单个元胞并不是一个孤立的供电孤岛,它与相邻元胞之间存在基于平衡功率市场机制的功率交换。

元胞电网的控制体系采用弱中心化的分布式控制结构。控制对象与传统集中层级式控制一致,控制电源、负荷以及电力网络,但分布式控制以每个元胞各自的运营商为核心进行控制,同时通过相邻元胞的通信、功率协调等来实现整体配电网的稳定^[19]。

元胞电网的新建规划要考虑元胞的划分,具体划分方法与传统配电网供电区域划分方法类似,综合考虑经济、政治、地理位置和负荷分布等因素,以及因地制宜适合建设的分布式电源、储能电站等因素。完成对元胞的划分后,电网规划以单个元胞为

独立规划的主体,按设置的要求或原则如电源容量、负荷、功率传输等相关标准完成规划,随后针对单个元胞的个体局限性,完成临近元胞的联络线规划。

元胞电网的最大优势在于可以更具个性化地接入各类新要素而不用考虑主网运行的稳定性,可以通过联络线弥补自身不足,但相对于目前采用集中式结构的电网,完全自治的元胞电网仍处于理想而难以实现的状态。

2.3 以集中式为主、分布式为辅的主动配电网

主动配电网是采用集中式结构形态的电力系统的组成部分,但由于微电网采用独立分布式结构,可以将含微电网的主动配电网看作以集中式为主、分布式为辅的结构。主动配电网与传统配电网结构类似,但接入了大量分布式电源、储能,安装了更多的开关、电压调节设备、负荷监控装置,同时也会接入网架结构复杂、电源类型多样的微电网。

主动配电网采用传统的日前优化+日内滚动的优化模型确定运行策略^[20-21]。控制手段主要包含多电源协同控制、电压调节控制、供电故障恢复和负荷管理,总体控制结构仍以集中式的层级控制模式为主。具备配电网重构技术是主动配电网相比传统电网的显著优势,当前对配电网重构算法的研究较为成熟,可以通过深度学习与鲁棒优化相结合,有效降低线路损耗^[22];可以利用改进的正弦余弦算法有效降低网络的总功率损耗并保持电压稳定^[23];可以采用改进的二进制粒子群优化算法优化存在光伏和储能的配电网拓扑^[24]。

微电网的基本理念与元胞电网类似,但其结构和运行模式与之大为不同,微电网结构为辐射形,只与上层配电网相连,连接线单一^[25]。微电网运行模式主要分为并网和孤岛 2 种,正常状态下 2 种模式可相互切换。在具体控制策略层面,可以从多种分布式电源的电力电子设备接入角度出发,灵活满足不

同情况下的负荷需求^[26];可以采用分层控制方法,按照控制难度划分等级,有层次地建立控制策略^[27];可以采用微电网主从控制与对等控制相结合的控制策略^[28]。有学者认为完善了储能技术的直流微电网是未来电网的存在形式,其基本思想与采用分布式结构的自治元胞电网理念相似^[29]。

在规划方面,对微电网内微电源(包括储能)建立恰当的数学模型,研究不同微电源的动静态特性,实现各类微电源容量的优化配置是微电网规划的关键,需要考虑不同类型电源的合理配置和科学调度^[30-31]。而对于主动配电网的规划,除传统配电网规划外主要考虑储能、分布式电源以及需求侧管理。

相比于传统集中式能源系统,微电网具有许多优势,如主网故障不影响微电网独立运行,在发生重大风险时微电网可通过大电网或本地的分布式电源和储能设施保障部分负荷的供应。而主动配电网更像是改进型的传统配电网,具备一定接入可再生能源发电的能力,且具备更强的通信能力和网架重构能力。包含分布式独立微电网的主动配电网,更像是不同形态电网之间的折中和过渡。

3 耦合协同型配电网的基本理念与架构

针对未来配电网的发展趋势及电网不同形态特征的优劣,本文提出了呈现集中-分布式形态的耦合协同型配电网,其基本理念是实现电网集中式管理与分布式控制的融合,各耦合单元相互耦合,当大电网出现紧急状况时进行协同支撑。在大规模分布式电源与关键技术的支撑下,配电网可实现聚合(并网)状态与分散(孤岛)状态的灵活转换,在面对各种运行风险以及 LPHI 极端事件时,通过“聚-散-聚”状态的切换,可实现电网更高可靠性、更高质量供电。耦合协同型配电网与其他未来配电网设想的多维度特征对比如表 1 所示。

表 1 不同未来配电网的多维度特征对比

Table 1 Comparison of multi-dimensional characteristics among different future distribution networks

特征	配电物联网	元胞电网	含微电网的主动配电网	耦合协同型配电网
基本形态	集中式	分布式	以集中式为主、分布式为辅	集中-分布式
主要优势	全面感知和即时通信、信息高效处理	以独立元胞形式运营,在 LPHI 事件下满足更多负荷需求,有效参与电力市场	主动配电网可以通过拓扑变化降低损耗,提高效益,微电网作为独立自治主体,有效接入新要素,能在主网故障情形下满足更多负荷需求	以集中式结构为主发挥规模经济效益,在大面积故障时转为分布式结构,有效保障负荷需求
网络结构	在配电网中加入大量传感、通信、智能终端设备	由多个独立自主的元胞组成	以集中式配电网为主、分布式微电网为辅的结构	以集中式配电网为主要结构,通过耦合点可分解为自治的耦合单元
工作模式	由传感器感知全网状态,通过云计算平台协调全网运行	多个元胞独立自主,通过联络线实现不同元胞的互补	由日前优化+日内滚动确定主动配电网运行策略,微电网并网或孤岛运行	正常状态下全网协调运行,崩溃状态下分解为耦合单元独立运行
规划流程	充分考虑配电网内不同能源形式电源的数学模型,同时考虑配电网与其他能源系统交互的能源流通道	以单个元胞作为独立规划的主体,按照相关标准完成规划,随后根据单个元胞的个体局限性,完成临近元胞的联络线规划	主动配电网除传统规划外主要考虑储能、分布式电源以及需求侧管理,微电网规划需考虑不同类型电源的合理配置和科学调度	完成配电网整体规划,根据重要负荷预设耦合点位置,调整分布式电源及储能配置,对预设的耦合单元进行规划

3.1 耦合协同型配电网的基本架构

面向未来的耦合协同型配电网的基本结构见图1。按照电压等级将配电网分为不同层级的耦合单元,配电网各部分均有备用线路,在局部出现故障时可以实现替换,提高可靠性。同时以集中式与分布式相结合的决策方式进行统筹调度,提高效率。

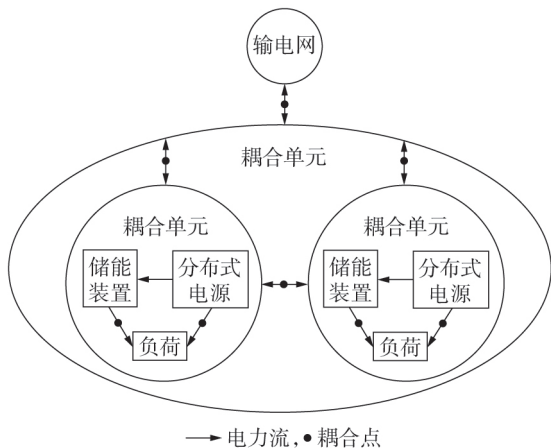


图1 耦合协同型配电网的层次架构

Fig.1 Hierarchical structure of coupled collaborative distribution network

在耦合协同型配电网的框架中,系统运行通过大电网制定高层次的运行目标,配电网通过分布式集群事件触发驱动控制和优化共同实现这些目标。耦合协同型配电网的运行架构见图2。其依托大规模分布式电源,通过设计适应多种运行状态下的电网结构和稳定运行控制策略,实现电网正常状态下全网协调运行、紧急状态下对大电网的主动支撑、崩溃状态下低压配电网的自主运行、恢复状态下各配电网的并网协作。由于独特的运行和组织架构,耦合协同型配电网可视为集中式结构和分布式结构并存或相互转化的形式,即呈现集中-分布式形态。

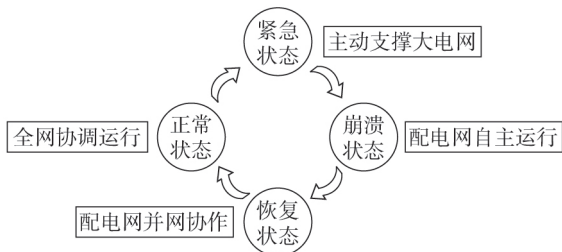


图2 耦合协同型配电网的运行架构

Fig.2 Operation architecture of coupled collaborative distribution network

耦合点是耦合协同型配电网实现“聚-散”功能的关键部分,在耦合点处断裂开的局部网络可以实现孤岛运行,并且耦合点处的并网操作会相对简单。按照控制层次的不同,耦合点可以分为3个等级。一级耦合点连接配电网和主网或低压配电网和中压

配电网,当上级电网崩溃时,耦合点断裂,配电网依赖分布式电源和储能装置的供电自主运行;当上级电网处于恢复状态时,耦合点帮助配电网并网,向上级电网提供电能或消纳上级电网多余电能。二级耦合点连接相同层级的耦合单元,是划分耦合单元的边界条件,各耦合单元自相似,当某耦合单元崩溃时,耦合点及时断裂,从而保证无故障部分的良好运行。三级耦合点连接耦合单元内部负荷,正常状态下由高压网络和耦合单元内部的分布式电源协同供电,当两者之一出现崩溃故障时,由耦合点备用线路进行连通,保证无故障部分正常供电,供电量由储能装置及主动负荷进行相应调节。

耦合点不仅能实现配电网的“聚-散”功能,同时也负责信息的连通。耦合点处的监测装置通过采集各部分连接处的线路数据,传输到控制中心进行数据分析,具体的断裂和并网操作都由控制中心判断各部分网络状态后下达指令进行集中控制。

耦合协同型配电网的理想状态是在正常状态和紧急状态下各耦合单元实现频率、功率的相互支撑,在发生严重故障时分解为多个能在短时间内独立自治的耦合单元,但是由于当前相关技术的限制,同时为了减少投资冗余,在未来很长的一段时间内,耦合协同型配电网以发生故障时保障重要负荷供电为目标,根据故障发生时的实际情况选取分解耦合点。

3.2 耦合协同型配电网的集中-分布式决策形态

未来配电网由于其组成要素的多样性,相比传统配电网而言更为复杂,依据大系统分解协调理论,将复杂系统分解为多个耦合单元,在上级电网处进行协调处理^[32-33]。

传统配电网依据不同的电压等级,以变压器为不同层级配电网连接耦合的媒介,在考虑规划运行时,以集中式的方式整体统筹考虑。耦合协同型配电网在局部具有更强的自治能力,连接耦合不如传统配电网紧密,这也为“聚-散”功能创造了条件。

上述的采用集中-分布式形态的配电网组成如图3所示。未来的各低压配电网将具备不同的特点,或有大量可控、不可控的分布式电源,或有充足的储能设备,或有较大比例的可中断负荷,这些复杂的特点都增加了配电网整体统筹的难度。

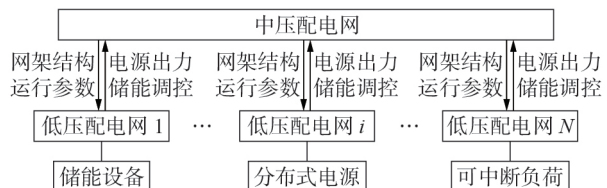


图3 耦合协同型配电网的集中-分布式形态

Fig.3 Centralized-distributed pattern of coupled collaborative distribution network

依据大系统分解协调理论,应当加强各低压配电网的自主性,完成自主规划运行方案的设计,将结果作为反馈量传递到上级电网,上级电网结合低压配电网的决策方案以及各低压配电网之间的联系要素,完成整体方案的可行性验证,将调控方案作为协调变量传递到各低压配电网,形成双向反馈协调机制。这种集中式统筹与分布式决策并存的形式,就是耦合协同型配电网的集中-分布式决策形态。

理想的未来配电网以独立自治的耦合单元为分布式决策的主体,但由于技术和成本的限制,当前耦合单元的划分更为灵活,故本文将更宏观的低压配电网作为决策主体,参与集中-分布式决策调控。

3.3 耦合协同型配电网的性能分析

以算例的形式简要说明耦合协同型配电网面对LPHI事件的社会效益以及“聚-散”前后的可靠性变化情况。

以修改的文献[34]中的配电网测试系统作为耦合协同型配电网,网架结构图见附录中图A1。其电压等级为10 kV,共有3条馈线、108个节点,总负荷为7.774 MW,存在21个分布式光伏电源和4个容量为100 kV·A的分布式风电电源,光伏电源容量最大修正为140 kV·A,系统内有2座0.5 MW的电动汽车充电站和1座1 MW/4 MW·h储能电站,同时假设各馈线首段均存在某一级耦合点,各节点之间均存在某二级耦合点(耦合点的优选需进一步研究)。本文使用MATLAB的Matpower工具箱进行潮流计算,以此评估耦合协同型配电网的运行状况。

仿真模拟时,在正常运行状态下,储能电站和电动汽车充电站均处于充电状态。假设某时刻系统突然出现少量功率缺额,导致频率下降,系统进入紧急状态,传统配电网将失去部分负荷,而耦合协同型配电网中储能电站和充电站检测到系统频率下跌,充电站停止充电,储能电站由充电状态转变为放电状态,为上级电网提供功率支撑,则频率有可能恢复原状,系统恢复正常,不影响负荷供电。假设某LPHI事件发生,系统出现大量功率缺额,储能电站和充电站无法支撑电网恢复正常,电网进入崩溃状态,此时根据控制策略解开耦合点,形成小系统。在评估崩溃状态下配电网的运行状况时,需重点考虑正常供电负荷比例,同时校核最大电压偏差幅值、最大支路有功功率值等参数,与正常运行状态下配电网各项参数的比较可以评估耦合协同型配电网崩溃状态下的运行情况。

对于本算例而言,在崩溃状态下,由于缺少足够的配电网电源和联络开关,传统电网难以保障负荷供电,而耦合协同型配电网则可以通过解开耦合点,独立部分耦合单元。计算崩溃状态下耦合协同型配电网在2种极端用电场景中的负荷供电情况,显然

当储能电站和电动汽车充电站无电能储备且分布式电源无出力时,正常供电负荷比例为0,2种极端场景设置如下:崩溃状态1,储能电站和电动汽车充电站电能储备充裕且分布式电源满出力;崩溃状态2,储能电站和电动汽车充电站无电能储备,分布式电源满出力。崩溃状态下,耦合协同型配电网的运行状况如表2所示,分解为各耦合单元的情况见附录中图A2和图A3。

表2 崩溃状态下的耦合协同型配电网运行状况

Table 2 Operation conditions of coupled collaborative distribution network in collapsed state

运行状态	最大电压 偏差 / %	最大支路 功率 / MW	正常供电 负荷比例 / %
崩溃状态 1	2	0.98	43.45
崩溃状态 2	0	0.17	17.80
正常状态	9.6	2.27	100

上述情形说明耦合协同型配电网在面对LPHI事件时的性能优于传统无源配电网,能够在上级电网崩溃状态下保障大量负荷需求,且由于耦合点的断开减小了配电网规模,相对提高了供电可靠性。同时可以看出,配电网内储能电站、电动汽车充电站以及分布式电源等资源配置越多或容量越大,短时间内正常供电负荷比例越高,这就需要在安全性和经济性之间折中。

本算例具有一定的代表性,若要进一步验证耦合协同型配电网在不同状态下的各方面性能,则需要更多的算例情形加以说明。

3.4 耦合协同型配电网的关键指标

面对未来大规模的分布式电源并网以及安全风险的加剧,耦合协同型配电网通过信息物理融合、集中式与分布式管理融合,以实现电力的高可靠高质量供电、电网的经济高效管理与运营的发展目标。

相比于传统配电网的发展评估指标,耦合协同型配电网在安全性、弹性、灵活性、清洁性、经济性等方面具有区别于传统配电网的关键指标,如图4所示,通过这些关键指标可以有效地评价和指导耦合协同型配电网的建设。

关键指标的初步定义如下。

(1) 紧急状态支撑时长。

紧急状态支撑时长是指系统发生故障或者被攻击时,耦合协同型配电网通过改变其运行状态来支撑大电网保持安全稳定运行的持续时长,其反映了耦合协同型配电网对大电网的支撑能力。电网紧急状态可通过仿真软件进行模拟,计算方法如下:

$$t_E = \sum_{i=1}^{N_E} t_{Ei} / N_E \quad (1)$$

其中, t_E 为紧急状态支撑时长; N_E 为一年内紧急状态发生次数; t_{Ei} 为第*i*次紧急状态的大电网支撑时长。

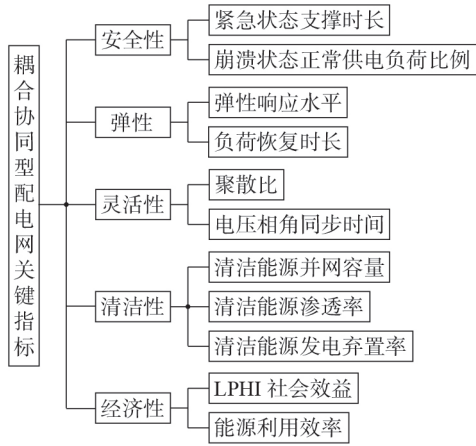


图4 耦合协同型配电网关键指标

Fig.4 Key indicators of coupled collaborative distribution network

(2)崩溃状态正常供电负荷比例。

崩溃状态正常供电负荷比例是指当系统无法保持稳定运行而进入崩溃状态时,配电网将以分散电网形式存在,此时系统供应的负荷水平与正常运行状态下负荷水平的比值,其反映了耦合协同型配电网的供电能力。计算方法如下:

$$\sigma_L = P_{Ld}/P_L \quad (2)$$

其中, σ_L 为崩溃状态正常供电负荷比例; P_{Ld} 和 P_L 分别为系统崩溃时和正常运行时的负荷水平。

(3)弹性响应水平^[35]。

弹性响应水平是评估耦合协同型配电网面对故障风险恢复能力的指标,其数值的大小反映了在相应时间段电网的恢复能力。计算方法如下:

$$\sigma_R(T) = \int_0^T P_R(t) dt / \int_0^T P_E(t) dt \quad (3)$$

其中, $\sigma_R(T)$ 为某一时间段 T 内的电网弹性响应水平; $P_R(t)$ 和 $P_E(t)$ 分别为电网实际修复曲线和电网性能期望曲线对应的函数。

(4)负荷恢复时长。

负荷恢复时长是指系统恢复所有负荷供应所用的时间,反映了整个电网的恢复能力。计算方法为:

$$t_{LR} = \sum_{i=1}^{N_f} t_{LRi} / N_f \quad (4)$$

其中, t_{LR} 为负荷恢复时长; N_f 为一年内发生故障的次数; t_{LRi} 为第 i 次发生故障的实际负荷恢复时间。

(5)聚散比。

聚散比是指对于某一区域的配电网,其聚合电网单元与可分散电网单元的比值。聚散比反映了电网网架灵活性与通信控制的复杂性,是体现电网运行方式灵活转换的指标。计算方法如下:

$$k_{gs} = n_g / n_s \quad (5)$$

其中, k_{gs} 为聚散比; n_g 和 n_s 分别为聚合电网和可分散电网单元的数量。

(6)电压相角同步时间。

电压相角同步时间是指配电网在恢复状态和主网执行并网操作时,达到相角同步需要的时间,其反映了网架结构变换的灵活性。电压相角同步时间的计算由相关电力电子设备决定。

(7)LPHI社会效益。

LPHI社会效益是指面对LPHI事件时电网在崩溃状态下通过耦合点断裂保留的负荷带来的经济效益,反映了耦合协同型配电网在面对大风险事件时相对于整个社会的规模经济效益。计算方法为:

$$S_{LPHI} = \sigma_L S_N \quad (6)$$

其中, S_{LPHI} 为LPHI社会效益; S_N 为在电网正常运行状态下的整体社会效益。

4 耦合协同型配电网的研究框架与关键技术

实现耦合协同型配电网架构,是一项系统性、体系化的工作,需要开展能源互联网背景下的“物理-信息-控制-运行”框架的研究,重点突破相关的关键技术。耦合协同型配电网研究框架如图5所示。

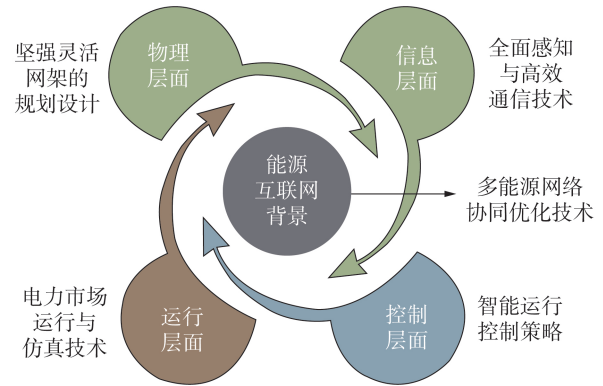


图5 耦合协同型配电网研究框架

Fig.5 Research framework of coupled collaborative distribution network

4.1 坚强灵活网架的规划设计

为实现耦合协同型配电网的构建,需要建立坚强灵活的网架,使其既能够满足大量分布式电源接入的需要,也能够故障时灵活运行,实现有关耦合点的一系列操作。

储能技术的成熟程度是实现耦合协同型配电网网架灵活变化的基础,配电系统配置储能电站的相关参数,如容量、充放电功率等,直接决定了耦合协同型配电网在多故障场景下的正常供电负荷比例。储能技术已在我国得到了长足的发展,按照“十三五”规划要求,2020年底,我国抽水蓄能累计装机达40 GW,电化学储能累计装机达1.78 GW。并且由于国家政策的支持和相关技术的发展,我国储能设施容量将不断增长,且储能调控技术将与大数据、云计算等技术深度融合^[36]。对于耦合协同型配电网而

言,需要配置大量响应速度快的电化学储能设施,从而在故障时起到辅助调频和功率平衡的作用^[37]。电化学储能设施的容量应综合考虑该地区的负荷总量以及新能源发电出力波动情况,以最优的投资成本达到最大化保障重要负荷需求的目的。在储能设施发挥作用时,应当充分利用调度中心集中式统筹和各小型区域配电网分布式决策相结合的优势,利用人工智能技术实现配电网内部多个储能设施资源的调配工作。

在完成坚强灵活网架的规划设计流程时,需要完善电压等级的划分^[38-39],要适应负荷密度进一步提高以及分布式电源大量接入的未来,必须对电压等级进行更细致的划分。耦合点的确定问题一定程度上是指对耦合单元边界的划分问题,将电网依据电压等级分为不同层级的耦合单元,需要充分考虑耦合单元的自治性,并且对单元之间联络线的建设进行经济性最优规划,考虑风险情形下不同层级耦合单元之间耦合点的连通状态。

在技术层面,需要考虑耦合协同型配电网组网时电压相角和频率同步的问题。对于直流微电网并网,只需要保证直流母线电压稳定就可以正常运行;对于交流并网操作,除传统并网方式外,考虑交直流变换装置,尽可能以直流的形式进行并网操作。最后,耦合协同型配电网需要重点考虑线路的输电能力,对网架更复杂的耦合协同型配电网进行规划研究,确保线路输电能力适应分布式电源的发展和负荷的增长仍是核心问题。

4.2 全面感知与高效通信技术

在智能电网建设中,受控电网节点的系统运行数据、控制指令和反馈信息的接收以及传输均依赖于智能终端,因此智能终端之间信息交互的稳定性、高效性以及安全性构成了耦合协同型配电网通信技术的3项关键指标^[40]。

与通常意义下的相关通信网络技术指标不同的是,耦合协同型配电网通信网络的稳定性是指信息交互以及通信网络能够适应多种复杂通信环境下信息与指令传输的稳定性,包括时变有向通信拓扑、切换通信拓扑、通信间隔不同步、时延不统一等环境;耦合协同型配电网通信网络的高效性指的是智能终端之间信息交互与通信协议的高效性,旨在尽可能短的通信时间内达成协同性、最优性等通信目的;耦合协同型配电网通信网络的安全性描述的是智能终端信息交互与通信的信息安全,反映了面向耦合协同型配电网的通信网络在多种复杂网络攻击情形下的可靠性,如拒绝服务DOS(Denial Of Service)攻击、欺骗攻击、重放攻击等。

此外,面向耦合协同型配电网的通信网络应当考虑电网在“聚”与“散”状态切换下的无缝衔接,并

且其能够分别独立运行在2种不同的电网状态下。此外,随着“边云融合”的概念与相关技术的提出,耦合协同型配电网可以更多地考虑将本地化的一些策略与云端策略进行有机的融合。例如在紧急状态下,耦合协同型配电网“支撑”策略不起作用时,本地化的解列策略将按照既定的解列序列进行解列,而此时若基于数据驱动的云端依靠自主学习完成了对紧急状态下故障点的检测并确定了紧急模式引发的原因(如某些微电网故障等),则云端随即发送相应的云端控制策略,终止本地策略并切断故障微电网从而完成对电网的修复过程。“边云融合”技术在耦合协同型配电网中的应用对现阶段电网感知、控制和通信技术提出了更高的要求。

4.3 智能运行控制策略

考虑到耦合协同型配电网的系统特性以及单元分布特性,采用分散或分布式控制与优化将会是首选控制或优化策略。对于分散或者分布式系统而言,其强烈依赖通信网络性能以及结构的特性使得对控制或优化的协议有着一定的要求。目前普遍采用的分散或者分布式的控制与优化策略大多是基于一些状态的一致性,从而达到对全局系统的控制或优化目标,并从一致性系统状态的误差与收敛时间大致能判断和评价分散或分布式一致性协议的性能。

分散或者分布式控制与优化策略旨在基于自身信息以及获得的邻居信息,通过个体的系统演化以及群体的演化行为达到全局控制与优化目标^[41-42]。一方面,在耦合协同型配电网中,分散或分布式控制与优化策略主要充当电网稳定运行的协调者,应用于分布式调频控制、负载频率控制、用户需求响应、经济调度等多个方面。正常状态下,耦合协同型配电网通过感知各耦合单元实时状态,以整个耦合协同型配电网系统设备利用率及能量利用效率最大化为经济目标,从而对多个耦合单元进行经济优化调度。对配电网中分散的各耦合单元还需要设计优化控制算法,提高耦合协同型配电网在正常运行状态下的电压稳定性水平、电源品质及系统经济运行水平。紧急状态下,通过势态感知预警策略实现对可恢复故障的快速识别及分析诊断。通过收集事故区域的电压/频率偏移量、功率缺口等信息,制定事故发生后耦合单元对本级及上级配电网的电压/频率稳定支撑及功率调度策略,提高耦合协同型配电网在故障时的坚强性。另一方面,在耦合协同型配电网“聚”与“散”状态切换过程中,所设计的控制与优化策略应该能够及时响应电网物理结构与系统状态的突变,在规定的短时间内平滑地在2种电网运行状态间进行切换,这就需要采用基于时间触发的分布式控制与优化技术。当自然灾害等LPHI事件发生时,依据协同优化控制理论,针对耦合协同型配

网解列策略及故障恢复重组策略,合理规划耦合解列及重组方式,以最少的变动来提高故障时耦合协同型配电网正常供电负荷比例。在耦合点开关闭后,优先保障重要负荷的供电,通过调节耦合单元内储能及具备自调节能力的分布式电源来维持耦合频率和电压的稳定,保障过渡状态下各耦合单元稳定运行。

4.4 电力市场运行与仿真技术

随着我国电力体制改革的逐步推进,如何针对我国国情以及市场交易的规则制定面向耦合协同型配电网的电力市场运行与交易策略成为耦合协同型配电网建设的关键一环^[43]。经济性是电力市场被逐渐放开与推广的一个主要因素,因此面向耦合协同型配电网设计的运行与交易规则应当充分考虑电网企业、分布式电源供应商、用户以及微电网等相关运营商的利益诉求,以实现各方的共赢与平衡。此外,面向耦合协同型配电网的电力市场交易规则应当在“聚”时对主电网起到支撑的作用,在“散”时能够主动支撑分布式电网结构。因此,针对不同情形,应采用适用的激励策略,促使用户在不损失利益的情况下更加主动地达到上述目标,是电力市场运行与交易规则设计的另一重要参考指标。

考虑到市场规律的快速变化,拥有能够快速测试所设计策略在不同市场环境下性能的仿真平台在维持电网长期稳定与经济运行中显得尤为重要。面向耦合协同型配电网电力市场运行的仿真平台,应当能够完成不同交易规则以及大量变化参数情况下快速分析的任务^[44]。

4.5 多能源网络协同优化技术

在充分利用综合能源系统的未来,耦合协同型配电网需要成为多能源网络交互的核心与枢纽。

未来配电网存在大量的分布式电源接入,并且存在集中式可再生能源发电直接接入配电网的可能。为提高能源利用效率,最大化规模经济,需要研究配电网与其他能源网络协同优化的控制技术。这不仅需对高比例可再生能源接入的耦合协同型配电网自身进行优化,还需兼顾其他能源系统的利用效率和经济效益,充分利用各能源,减少能源损耗^[45-46]。

除了对能源转换装置进行深入研究外,也需要重视多能源网络架构设计和协同调度方式。需要尽可能将包括气网在内的能源网络数学模型化,实现不同能源网络的协同运算,这样可以重点考察多能源网络连接点处的性能要求,同时能够完成多系统的综合规划以及调度方法的综合优化。在当前环境下,研究冷、热、电、气多能源系统的综合规划和调度方法是构建耦合协同型配电网的必要工作。

5 结语

本文总结了未来配电网的发展目标和发展趋

势,分析比较了不同形态的未来配电网的多维度特征,在当前研究基础上提出了耦合协同型配电网。其在全系统耦合的基础上,能够实现主网崩溃时相应部分的孤岛运行,同时可以通过快速并网加速故障主网的恢复过程,完成“聚-散-聚”的基本动作。

耦合协同型配电网的基本运行决策架构是依据大系统协调理论提出的集中-分布式形态,该形态能够使独具特色的各低压配电网具备较强的自主性,能够自主进行运行规划决策,同时将决策结果与上级电网的调控方案进行双向反馈,最终形成最优方案。实现耦合协同型配电网架构需要更多关键技术的突破,本文对坚强灵活网架、感知高效通信、智能运行控制、电力市场仿真以及多能源网络协同优化等相关技术方向进行了阐述,并且确定了研究框架及技术原则。

总之,本文提出的耦合协同型配电网能够适应未来的发展需要,具有深入研究的价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] European Commission. Energy roadmap 2050 [R]. Brussels, Belgium: Publications Office of the European Union, 2012.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030)[DB/OL]. (2016-12-29)[2020-06-20]. <http://news.bjx.com.cn/html/20170425/822221.shtml>.
- [3] 周孝信. 能源转型中我国新一代电力系统技术发展趋势[J]. 电气时代, 2018(1): 32-35.
ZHOU Xiaoxin. The development trend of new generation power system technology in my country during the energy transition[J]. Electric Age, 2018(1): 32-35.
- [4] 鞠平, 周孝信, 陈维江, 等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 2-11.
JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 2-11.
- [5] U.S. Government Accountability Office. Climate change: energy infrastructure risks and adaptation efforts[R]. Washington DC, USA: U.S. Department of Energy, 2014.
- [6] 汤奕, 陈倩, 李梦雅, 等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 59-69.
TANG Yi, CHEN Qian, LI Mengya, et al. Overview on cyberattacks against cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 59-69.
- [7] HOUSE W. Economic benefits of increasing electric grid resilience to weather outages[R]. Washington DC, USA: Executive Office of the President, 2013.
- [8] 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 1-7.
JU Ping, WANG Chong, XIN Huanhai, et al. Flexibility, resilience and toughness of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 1-7.
- [9] U.S. Department of Energy. 2009 smart grid system report [R]. Washington DC, USA: U.S. Department of Energy, 2014.
- [10] BIE Zhaohong, LIN Yanlin, LI Gengfeng, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.

- [11] 赵俊华,董朝阳,文福拴,等. 面向能源系统的数据科学:理论与展望[J]. 电力系统自动化,2017,41(4):1-11.
ZHAO Junhua,DONG Chaoyang,WEN Fushuan,et al. Data science for energy systems:theory,technology and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(4):1-11.
- [12] RETIÈRE N,MURATORE G,KARINIOTAKIS G,et al. Fractal grid-towards the future smart grid[J]. CIRED-Open Access Proceedings Journal,2017(1):2296-2299.
- [13] MARTINI L,RADAELLI L,BRUNNER H,et al. ELECTRA IRP approach to voltage and frequency control for future power systems with high DER penetration[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon,France: CIRED,2015:1-4.
- [14] 杨挺,翟峰,赵英杰,等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化,2019,43(13):9-20,53.
YANG Ting,ZHAI Feng,ZHAO Yingjie,et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power Internet of Things[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(13):9-20,53.
- [15] 国家电网有限公司. 全面部署泛在电力物联网建设[EB/OL]. (2019-04-16)[2020-06-20]. <http://h5ip.cn/ozIF>.
- [16] 周峰,周晖,刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术的发展思路[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):70-82,375.
ZHOU Feng,ZHOU Hui,DIAO Yinglong. Development of intelligent perception key technology in the Ubiquitous Internet of Things in electricity[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(1):70-82,375.
- [17] 刘敦楠,张婷婷,李华,等. 面向泛在电力物联网的综合能源系统规划模型[J]. 发电技术,2020,41(1):50-55.
LIU Dunnan,ZHANG Tingting,LI Hua,et al. Integrated energy system planning model for Ubiquitous Power Internet of Things[J]. Power Generation Technology,2020,41(1):50-55.
- [18] 宋蕙慧,于国星,曲延滨,等. Web of Cell体系——适应未来智能电网发展的新理念[J]. 电力系统自动化,2017,41(15):1-9.
SONG Huihui,YU Guoxing,QU Yanbin,et al. Web of Cell architecture-new perspective for future smart grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(15):1-9.
- [19] MORCH A Z,JAKOBSEN S H,VISSCHER K,et al. Future control architecture and emerging observability needs[C]//2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). Riga,Latvia:IEEE,2015:234-238.
- [20] 刘东,张弘,王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术,2017,36(4):2-7,20.
LIU Dong,ZHANG Hong,WANG Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(4):2-7,20.
- [21] 徐意婷,艾芊. 含微电网的主动配电网协调优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):18-26.
XU Yiting,AI Qian. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):18-26.
- [22] ZHENG Weiye,HUANG Wanjun,DAVID J. A deep learning-based general robust method for network reconfiguration in three-phase unbalanced active distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,120:105982.
- [23] USHARANI R,SIVKUMAR M. An improved sine-cosine algorithm for simultaneous network reconfiguration and DG allocation in power distribution systems[J]. Applied Soft Computing Journal,2020,92:106293.
- [24] RAUL V,JAKSON P,RAONI F,et al. Electric distribution network reconfiguration optimized for PV distributed generation and energy storage[J]. Electric Power Systems Research,2020,184:106319.
- [25] 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(1):57-70.
YANG Xinfu,SU Jian,LÜ Zhipeng,et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):57-70.
- [26] 王鹤. 含多种分布式电源的微电网运行控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
WANG He. Research on operation and control of microgrid with different types of distributed sources[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.
- [27] 金鹏. 微电网分层控制与优化运行研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
JIN Peng. Study on hierarchical control and optimization operation of microgrid[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.
- [28] 杨彦杰,杨康,邵永明,等. 微电网的并离网平滑切换控制策略研究[J]. 可再生能源,2018,36(1):36-42.
YANG Yanjie,YANG Kang,SHAO Yongming,et al. Control strategy for smooth switching between island operation mode and grid-connection operation mode of microgrid[J]. Renewable Energy Resources,2018,36(1):36-42.
- [29] 刘健,魏昊焜,张志华,等. 未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(18):11-16.
LIU Jian,WEI Haokun,ZHANG Zhihua,et al. Future architecture of power distribution network-low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control,2018,46(18):11-16.
- [30] 王成山,焦冰琦,郭力,等. 微电网规划设计方法综述[J]. 电力建设,2015,36(1):38-45.
WANG Chengshan,JIAO Bingqi,GUO Li,et al. Review of methods of planning and design of microgrids[J]. Electric Power Construction,2015,36(1):38-45.
- [31] 李宏仲,吕梦琳,胡列翔,等. 考虑广义储能的微电网联合规划[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):149-160.
LI Hongzhong,LÜ Menglin,HU Liexiang,et al. Joint planning of microgrid considering generalized energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(7):149-160.
- [32] 邱家驹,蔡雯,于渤. 基于大系统分解-协调理论的电力系统经济调度分布式算法[J]. 中国电机工程学报,1994(6):30-34.
QIU Jiaju,CAI Wen,YU Bo. The study of distributed algorithm for power system economic dispatching based on the large scale system decomposition-coordination theory[J]. Proceedings of the CSEE,1994(6):30-34.
- [33] 陈杰. 基于大系统分解协调理论的风水火电站联合调度优化[D]. 北京:华北电力大学,2015.
CHEN Jie. Schedule optimization of wind hydro and thermal based on large-scale system decomposition coordination theory[D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
- [34] 祖文静,李勇,谭益,等. 高渗透率可再生能源配电网测试系统建模与有效性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):45-50.
ZU Wenjing,LI Yong,TAN Yi,et al. Modeling and effectiveness analysis on test system for distribution networks with high penetration of renewable resource[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):45-50.
- [35] 赵丽敬. 电网的弹性建模与评估[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
ZHAO Lijing. Resilience modeling and assessment of power

- grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [36] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.
- [37] 元博, 张运洲, 鲁刚, 等. 电力系统中储能发展前景及应用关键问题研究[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 1-8.
YUAN Bo, ZHANG Yunzhou, LU Gang, et al. Research on key issues of energy storage development and application in power systems[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 1-8.
- [38] 安怡然. 基于分布式电源大量接入下的智能配电网灵活网架结构研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
AN Yiran. Research on flexible grid structure of smart distribution network when mass distributed generations are connected[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [39] 刘科研, 刘永梅, 盛万兴, 等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 81-87.
LIU Kejian, LIU Yongmei, SHENG Wanxing, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 81-87.
- [40] 张冀川, 陈蕾, 张明宇, 等. 配电物联网智能终端的概念及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1729-1736.
ZHANG Jichuan, CHEN Lei, ZHANG Mingyu, et al. Conception and application of smart terminal for distribution Internet of Things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1729-1736.
- [41] 范开俊. 智能配电网分布式控制技术及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
FAN Kaijun. Distributed control technologies and its application in smart distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [42] 窦晓波, 王萌萌, 全相军, 等. 微电网双模分布式控制策略与实现[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5179-5191, 5399.
DOU Xiaobo, WANG Mengmeng, QUAN Xiangjun, et al. A dual mode distributed control strategy and its implementation in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5179-5191, 5399.
- [43] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [44] 柳文轩, 赵俊华, 黄杰, 等. 面向能源领域信息物理社会系统的行为仿真建模分析——以现货电力市场为例[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 8-15.
LIU Wenxuan, ZHAO Junhua, HUANG Jie, et al. Simulation and modeling analysis on behavior of cyber physical social system in energy—a case in electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 8-15.
- [45] 程林, 刘琛, 朱守真, 等. 基于多能协同策略的能源互联微网研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 132-138.
CHENG Lin, LIU Chen, ZHU Shouzheng, et al. Study of micro energy internet based on multi-energy interconnected strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 132-138.
- [46] 王德文, 王莉鑫. 基于实用拜占庭容错算法的多能源交互主体共识机制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 41-52.
WANG Dewen, WANG Lixin. Consensus mechanism of multi-energy interactive subject based on practical byzantine fault tolerance algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 41-52.

作者简介:



徐 谦

徐 谦(1963—),男,浙江宁波人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统规划(E-mail: qian_xu_0207@163.com);
邹 波(1989—),男,重庆人,高级工程师,博士,主要研究方向为电网规划、综合能源规划(E-mail: eebzou@zj.sgcc.com.cn);
钱振宇(1996—),男,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为未来电网形态(E-mail: 191576064@qq.com)。

(编辑 李玮)

Research on architecture of coupled collaborative distribution network presenting centralized-distributed pattern

XU Qian¹, ZOU Bo¹, WANG Lei¹, XIE Ning², QIAN Zhenyu², YU Wenwu³, FU Zao⁴, WANG Chengmin²

(1. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Department of Mathematics, Southeast University, Nanjing 211189, China;

4. Department of Cyberspace Security, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: With the energy transition of power system, the structure of future power distribution system has received more attention. Firstly, the development goals and trends of future distribution network are analyzed, and the advantages and disadvantages of different future distribution network ideas are compared in multiple dimensions. Then, the architecture of coupled collaborative distribution network presenting centralized-distributed pattern is proposed. The advantages and adaptability of the architecture in the future power grid are analyzed, and the key indicators used to assess coupled collaborative distribution network are initially demonstrated. Finally, the research framework of coupled collaborative distribution network and the key technologies to be developed are proposed.

Key words: low probability high impact incident; energy transition; centralized-distributed pattern; coupled collaborative distribution network; distributed power generation; energy storage

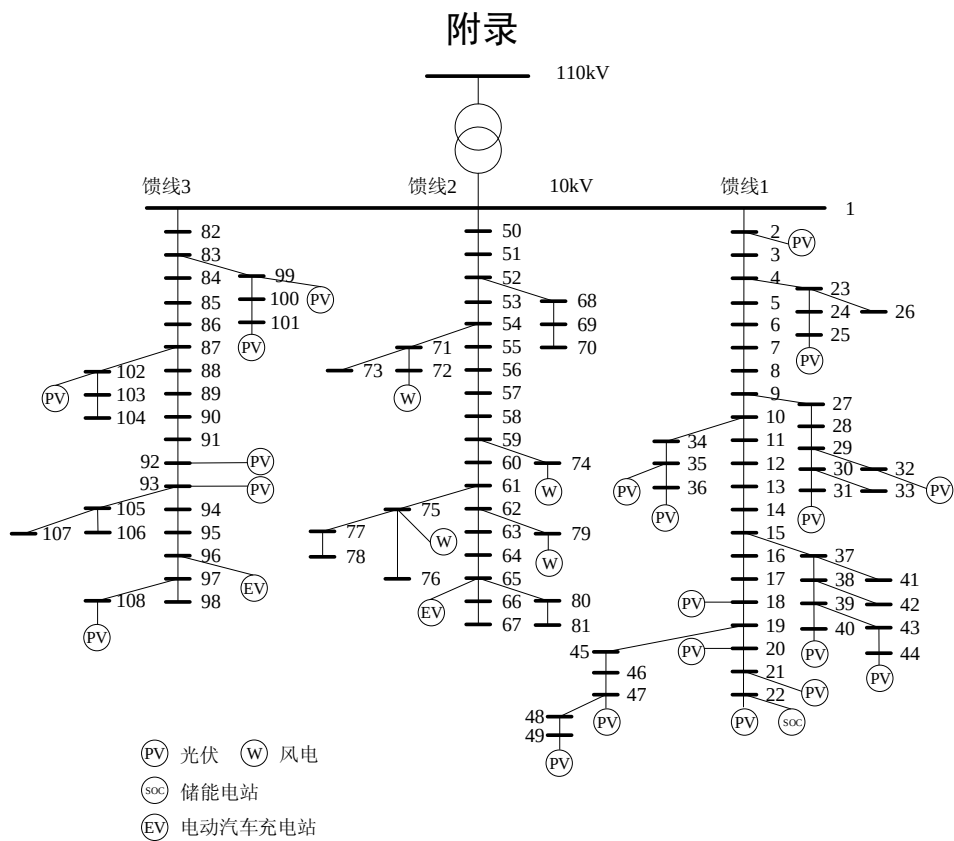


图 A1 耦合协同型配电网算例拓扑图

Fig.A1 Topology diagram of coupled collaborative distribution network example

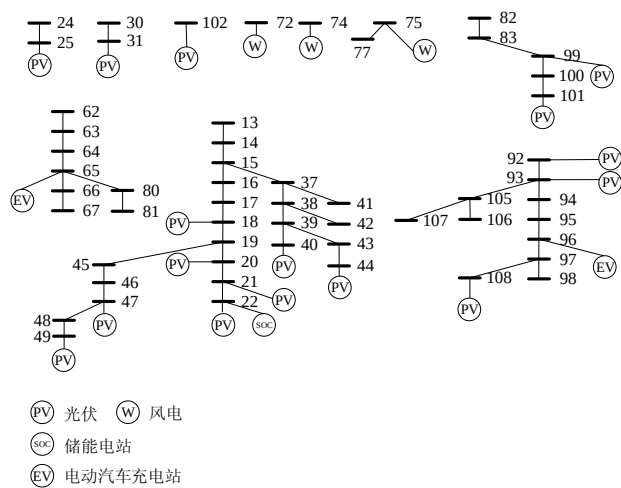


图 A2 崩溃状态 1 耦合单元拓扑图

Fig.A2 Topology diagram of coupling unit in Crash State 1

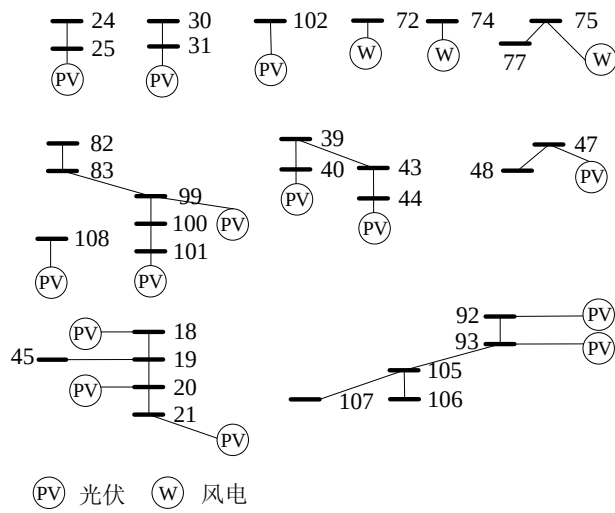


图 A3 崩溃状态 2 耦合单元拓扑图

Fig.A3 Topology diagram of coupling unit in Crash State 2