



电力系统自动化

Automation of Electric Power Systems

ISSN 1000-1026, CN 32-1180/TP

《电力系统自动化》网络首发论文

题目：网孔型中压配电网组网形态、核心特征与研究展望
作者：刘洪，李其哲，高强，徐正阳，薛士敏，李玥轩
收稿日期：2022-10-24
网络首发日期：2023-04-07
引用格式：刘洪，李其哲，高强，徐正阳，薛士敏，李玥轩. 网孔型中压配电网组网形态、核心特征与研究展望[J/OL]. 电力系统自动化.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230406.1636.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网孔型中压配电网组网形态、核心特征与研究展望

刘 洪¹, 李其哲¹, 高 强², 徐正阳¹, 薛士敏¹, 李玥轩¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省杭州市 310000)

摘要: 当前中压配电网形态研究尚未涉及能够实现全系统潮流的柔性可控网架结构。为此,提出一种以智能软开关为核心组网装置的网孔型中压柔性互联配电网拓扑结构,并开展了其核心特征解析和规划运行等相关研究展望。首先,分析了传统配电网、柔性配电网、蜂巢配电网的典型架构,并结合其组网装置及控制方式对比了各架构的优势与不足;其次,探讨了网孔型配电网的组网形态、控制保护策略及改造方式,提出了针对不同应用场景的矩形网孔拓扑、六边形网孔拓扑以及交直流混联网孔拓扑,并构建了由传统配电网向网孔型配电网过渡的改造方式;然后,阐述了网孔拓扑结构的核心特征,并从负荷承载能力和分布式电源消纳能力两个角度进行了定量描述,总结了网孔型配电网的结构优势;最后,对所提基于新型拓扑的规划运行研究思路进行了总结与展望。

关键词: 网孔型中压配电网; 柔性互联; 智能软开关; 柔性可控; 分布式电源

0 引言

随着“双碳”目标及“构建以新能源为主体的新型电力系统”的能源战略的持续推进,大力发展分布式电源(DG)、分布式储能与新型负荷已成为必然选择,配电系统所承担的角色将由单纯的电能分配网络转变为深度融合源荷储互动的能源交互与服务平台。在未来配电系统中,由于源荷存在多重不确定性,潮流将呈现时序不定向特征,系统峰谷差将进一步增大,配电系统的安全高效运行将面临极大挑战^[1]。

针对上述问题,很多学者提出依靠新型电力电子装置^[2]、微网^[3]、储能^[4]、需求响应^[5]等调控手段来应对大规模新型源荷接入的需求。然而,配电网结构形态是影响系统功能和特性的最重要因素,决定了组网装置、调控手段等对系统提升效果的上限^[6]。因此,合理的网架结构是满足未来配电网需求、充分释放新设备和新技术潜能的关键因素。

近年来,围绕中压配电网的新形态和新结构已经形成了一系列研究成果。文献[7]以智能软开关(SOP)在关键位置替代传统配电开关,从功能形态角度定义了柔性中压配电网,并提出了柔性中压配电网的组网形态及运行方式。围绕采用该结构的柔性中压配电网,已有文献对其在优化调度^[8-10]、故障恢复^[11-12]、规划部署^[13-14]等方面的优势进行了论证,

表明柔性化将成为未来中压配电网中各可控资源交互和统筹、提升系统综合运行效率的重要方式。除在馈线层面实现互联的柔性中压配电网外,微网集群间的柔性互联也是有效保障DG消纳与电网协调运行的一种新形态。文献[15]提出基于混合公共连接单元的柔性互联多微网孤岛运行拓扑结构及其多层控制架构,多个微网间可以进行功率交互;文献[16]以能量路由器作为载体,实现不同微网间的柔性互联;文献[17]通过柔性直流互联多个微网进行集成聚合,在提升DG渗透率的同时,保障配电系统的经济运行。综合微网群和柔性配电网的特征与优势,文献[18-19]提出蜂窝状中压配电网是未来智能配电网网架形态演化的一种可能路径。蜂窝状中压配电网以可控网格构成的多环自相似结构为基础,提供全系统精细点对点能量传输控制能力。针对蜂巢配电网,文献[20]通过智能功率/信息交换基站将“源网荷储”规范化配置的分布式微网群组合形成蜂巢结构,在最大程度上实现新能源就地消纳和区内供需基本自平衡;文献[21]进一步阐述了以微网为基本单元的蜂巢结构在能量灵活转移、局部自治、广义柔性等方面的核心特征,并指出蜂巢结构符合未来电网的发展需求。综上,蜂巢结构为未来电网的形态演变提供了方向,但其应用于配电网的研究总体还处于探索阶段,网架拓扑尚不清晰。

在这一背景下,本文首先梳理了配电网形态结构演化路线,分析了各架构的组网设备、调控方式及应用局限性;其次,以网孔拓扑为基础,提出了实现

全系统柔性闭环运行的网孔型配电网,并系统分析了其拓扑结构、控保策略及改造方式;然后,结合网孔结构的特点,探讨了网孔型配电网的核心特征,并基于负荷承载能力及DG消纳能力两个维度定量分析了网孔型配电网的结构优势;最后,围绕网孔型配电网的未来研究方向进行了探讨,以期对未来配电网形态的理论研究和工程建设提供新的视角和思路。

1 配电网的形态结构演化

随着配电网从只承担电能分配的角色向满足用户多样化电力供应需求的多重角色转变,配电网需具备更强的可控性。从发展历程来看,配电网的形态结构也在由传统配电网向柔性配电网转变,其形态演化过程呈现出可控能力不断提升的特征。

1.1 “开环运行”的传统配电网

传统配电网采用“闭环设计、开环运行”的模式,并利用分段开关与联络开关的开关状态改变进行网络重构,以实现配电网的潮流调控。

图1为两种典型中压架空网结构。其中,图1(a)所示单联络架空网结构采用1个联络开关将2条馈线(F_1 、 F_2)连接起来,通过网络重构实现2条馈线的阶跃调节;图1(b)所示两联络架空网结构可通过多组开关的配合至多实现所联络的4条馈线的阶跃调节。电缆网与架空网调控方式相似,均通过分段开关和联络开关的配合实现潮流调节。这种非连续的调节模式受开关动作频次和馈线间联络数量的影响,调控效果相对有限。

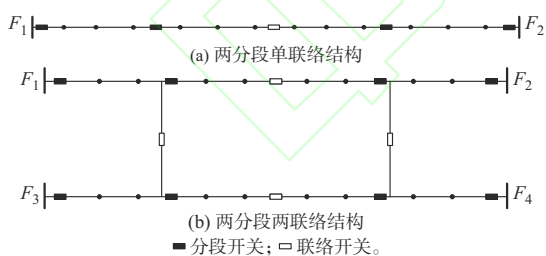


图1 传统配电网结构

Fig. 1 Structure of traditional distribution network

1.2 “柔性闭环”的柔性配电网

以SOP替换馈线间的联络开关,形成馈线互联的馈线间闭环柔性配电网结构,实现配电网的柔性闭环运行^[7],有效克服了传统配电网重构的阶跃调节局限性,其典型结构如图2所示。

图2所示柔性配电网结构可通过SOP进行功率的双向灵活流动与精确控制,实现所连接馈线的潮流连续调控。但是,该结构所需SOP端口数与馈线互联数量相等。当配电网需进行更大范围调节



图2 馈线间闭环柔性配电网结构

Fig. 2 Structure of closed-loop between feeders flexible distribution network

时,SOP端口数将急剧增加,投资成本也随之提升,相对降低了SOP的整体效益。同时,SOP安装还可能受限于地理因素,难以满足配电网调控需求。因此,针对馈线间闭环柔性配电网结构调节范围受限的问题,将SOP端口出线连接至不同单环网的馈线末端,形成环网间联络的柔性配电网结构,有效提升SOP调节范围^[22],其典型结构如图3所示。

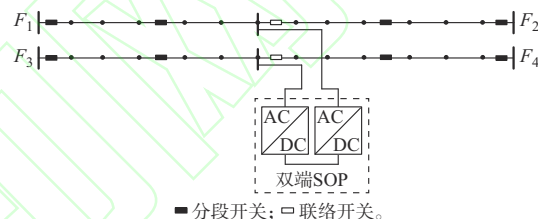


图3 环网间联络柔性配电网结构

Fig. 3 Structure of flexible distribution network between feeder loops

馈线间闭环结构所连馈线固定,而环网间联络结构通过不同配电开关及SOP的时序动作配合,实现多种馈线组合场景的柔性调节,在时间及空间上最大限度挖掘SOP的调节潜力,扩大配电系统的调节范围。但是,环网间联络的柔性配电网结构调控需进行传统开关和SOP的配合,调节过程呈现“阶跃调节”和“连续调节”的耦合特点。

1.3 “广域互联”的蜂巢配电网

基于多端SOP的蜂窝状配电网设想为未来配电网的拓扑构建提供了新的方向^[18]。理想状态下,蜂窝状配电网以可控六边形馈线网格为基础,形成多向能量传输通道,具有很高的连通性和冗余度。

在此构想下,基于智能功率/信息交换基站的蜂巢状有源配电网拓扑提供了一种可能的架构构建方案^[20],其典型结构如图4所示。

如图4所示,蜂巢配电网结构可以看作是微网群和柔性配电网的融合。蜂巢配电网以功率交互装置为控制核心,将多个源荷储资源规范配置的微网进行互联,实现微网内供需平衡、微网间功率互备。相较于传统结构,蜂巢配电网更加灵活,具有网络架构坚强、清洁能源消纳能力强、配电方式灵活和支持电力市场交易等优点。

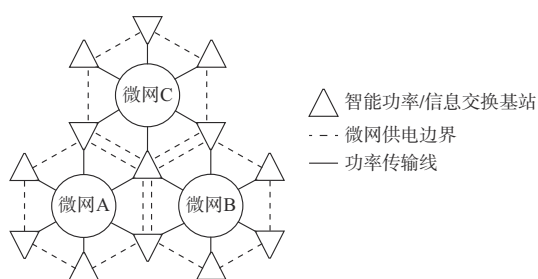


图4 蜂巢配电网结构
Fig. 4 Structure of honeycomb-shape distribution network

2 网孔型配电网组网形态及改造方式

2.1 网孔型配电网组网形态

未来配电系统中引入了DG、需求响应等要素,导致其运行调度趋于复杂多变,未来配电系统需要更灵活畅通的网架结构^[23]。基于此,延续蜂窝状配电网的设想并作进一步深化,提出一种以网孔拓扑为基础,实现全系统柔性闭环运行的网孔型配电网。

如图5所示,网孔型配电网以SOP作为核心组网装置,拓扑结构呈现网孔形态,4条馈线(F_1 至 F_4)可通过SOP实现潮流的灵活调节,有效克服馈线间闭环结构调节范围过小及环网间联络结构无法进行全系统时序潮流控制的局限性。网孔型拓扑对每条支路的潮流具有多方向连续调控能力,具备更强大的潮流控制能力,在广域范围内构成多条能量的传输路径,在统筹局部源荷储资源的基础上,实现配电系统各主体之间的准确匹配和快速响应,更好适应源荷的波动。

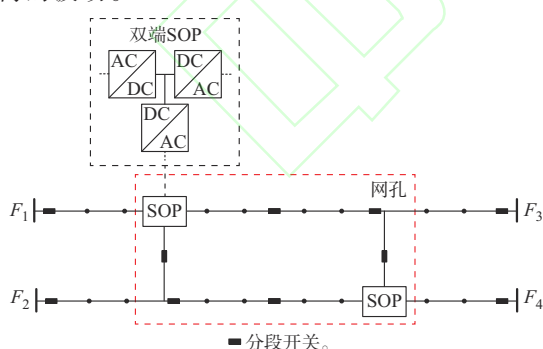


图5 网孔型配电网
Fig. 5 Mesh-shape distribution network

网孔型配电网中网孔结构除呈现矩形形式外,还可构建其他形式的拓扑结构,以正六边形结构为基础的网孔型配电网架构如图6所示。

如图6(a)所示,在六边形网孔拓扑中,6条馈线通过3组三端口的SOP实现柔性互联,馈线间的潮流能够平滑地相互支援,达到运行优化的目的。DG、直流负荷、储能等直流供用电设备接入需求下,

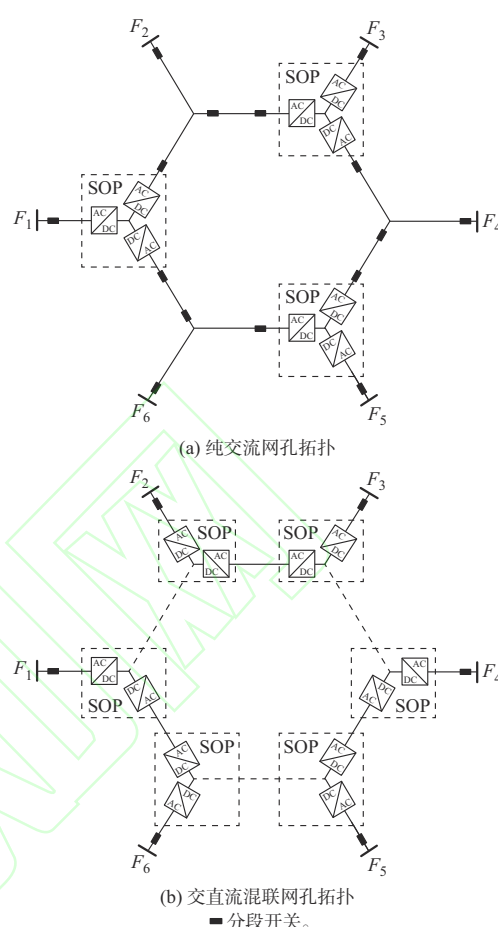


图6 六边形网孔拓扑
Fig. 6 Structure of hexagonal mesh distribution network

网孔型配电网还可衍生为交直流混联形态,其典型架构如图6(b)所示。在网孔型交直流混联配电网中,以双端口SOP作为核心组网设备,以SOP的直流端口构造直流母线,在实现能量灵活传输的同时,对DG、直流负荷等新型配用电技术也有着良好的兼容性和可扩展性。

在实际工程应用中,网孔大小可以根据实际配电网规模、需求等多方面因素综合优化确定。网孔型配电网拓扑无论以怎样的规律连接和铺展,任何基于网孔架构形成的配电网拓扑都可视为矩形网孔结构的扩展。

2.2 网孔型配电网控制保护策略

在正常运行情况下,网孔型配电网采用柔性闭环运行方式,以SOP各端口基于有功功率-无功功率(PQ)控制模式或者直流电压-无功功率($V_{dc}Q$)控制模式,对配电网传输功率进行控制,实现互联多条馈线间的功率传输。在故障发生时,网孔型配电网内高度灵活可控的SOP与保护装置共同协作,可以有效保障故障的恢复,是配电网快速故障隔离与供

电恢复的关键。

在馈线发生不对称故障时,网孔型配电网内 SOP 输入电流不对称, SOP 将快速闭锁,抑制不对称电流^[24-25],实现各端互联馈线间的电气隔离,防止失电范围扩大。在此之后,网孔型配电网内保护装置可提取 SOP 装置故障后注入配电网的电流负序分量,构造合理的正负序组合故障判据^[26],并充分利用各设备相互之间的信息交互能力形成联动,完成故障的准确识别与隔离。网孔型配电网 SOP 控制模式的切换需要与保护装置的动作次序配合^[27]。经保护动作后,系统实现故障隔离, SOP 解除闭锁,同时故障端切换到电压-频率(V/f)控制模式^[28],对停电区域的电压和频率提供支撑,实现正常运行区域不间断供电,失电区域获得电压支撑。

综上,网孔型配电网在控制保护策略上具有独特性,在进行策略制定时需充分考虑 SOP 各端口间、各 SOP 间配合,以及 SOP 与保护装置间的协同,以最大发挥其优势,保证系统的稳定运行。

2.3 网孔型配电网改造方式

网孔型配电网组网思路以传统配电网结构为基础,在关键位置采用多端 SOP 代替传统开关,实现网孔结构的改造。

以两分段两联络结构为例,详细分析由传统配电网向矩形网孔型配电网过渡的改造方式,如图 7 所示。

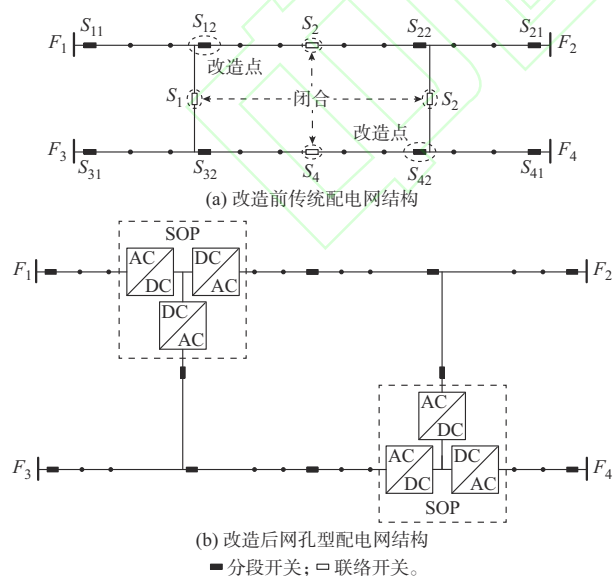


图 7 矩形网孔拓扑改造方式

Fig. 7 Reconstruction method of rectangular mesh

如图 7(a) 所示,选择馈线 F_1 的分段开关 S_{12} 和馈线 F_4 的分段开关 S_{42} 作为改造点,分别以 2 组三端 SOP 代替 S_{12} 和 S_{42} ,并闭合 4 个联络开关 S_1 至 S_4 。改

造后的网孔型配电网结构如图 7(b) 所示。可以看出,改造后的配电网将依托 SOP 进行潮流调控,其网孔结构呈现为矩形。改造后配电网仍保留大量传统配电开关,在故障发生后可通过开关间的联动控制以实现故障隔离,并基于 SOP 进行实时负荷转供,保障系统供电可靠性。

由于中国已基本完成了大规模城市配电网建设,整体结构以单联络为主,因此,从现有接线模式向网孔型拓扑的过渡过程中,也可以多组单联络结构为基础,在关键位置采用 SOP 替代传统开关来完成网孔拓扑的改造。采用单联络结构作为基本架构进行改造,简化了改造流程,更有助于中国当前城市配电网的形态演进。

3 网孔型配电网的核心特征和结构优势

3.1 核心特征

网孔型配电网具有典型的全系统柔性化特征,适合未来配电系统的建设需求,其核心特征包括如下 3 个方面:

1) 实现所有馈线间潮流的时序调节。未来配电网将作为具有电能互动功能的公共平台,馈线间需进行能量动态交互。现有配电网结构中,馈线能量一般由上级电网供给或者来自联络馈线,较为单一的能量传输渠道使得全系统能量的实时互济存在困难。网孔结构中,馈线间的能量通路数量更多,馈线间能量可选择传递路径更多样,打破传统柔性配电网受限于馈线地理分布所导致可控范围较小的局限性,易于实现大规模馈线间的能量互动。

2) 满足局部能量自治需求,实现源荷储资源在网孔内的自平衡。随着 DG 在配电网中接入比例的不断提升,现有配电网的结构可调能力较弱,难以适应大规模 DG 的接入。网孔型配电网可基于网孔状拓扑结构实现网孔内部 DG、储能与负荷间的动态平衡。同时,孔内资源还可与微网进行能量互动,实现相互支撑及协调优化。当网孔出现功率异常或发生故障时,可选择合适的支援路径,由上级电网对其施以功率支援使之恢复平衡。

3) 可扩展性较强,便于配电系统的灵活规划和改造。传统配电网在扩容或者改造时技术难度较大,经济成本高,往往需要对整个配电网进行重新设计。网孔型配电网结构以网孔结构为基础,各馈线通过 SOP 实现有机连接,因此,在进行配电网规划、建设、改造时,将更加便于实现整个系统在各环节的模块化,可以根据待建设区域的实际情况调整规划方案网孔的大小,其网架扩展可等效为基本单元的增加,灵活方便且降低了难度,以有效应对技术和政

策层面的不可预见性。

3.2 结构优势

基于3.1节所述,网孔型拓扑结构相较于其他网架结构具备高度可控。本文从负荷承载和DG消纳两个角度,定量分析网孔型拓扑结构的优势。

为方便与其他网架结构对比,传统配电网采用图1(b)所示两分段两联络结构,柔性配电网采用图3所示环网联络结构,网孔型配电网采用图5所示矩形拓扑。其中,3种结构馈线线路容量均为6.60 MVA,线路的单位自阻抗为 $0.22+j0.366\ 2\ \Omega/\text{km}$,互阻抗为自阻抗的1%,线路长度为4.1 km,SOP容量为8 MVA,负荷均匀分布,不同类型用户的典型负荷特性曲线见文献[29]。

3.2.1 负荷承载能力对比

负荷承载能力定义为在满足相关约束并考虑不同类型用户负荷时序差异的系统中各馈线承载负荷的能力^[30]。负荷承载能力与供电能力不同,这是由于各类用户的负荷时序不同,一个区域内整体负荷水平不是各类用户负荷的数值叠加。因此,以负荷承载区间描述配电网对各类负荷的供应能力,更能有效反应配电网对不同类型负荷承载效果。

以配电网N-1约束作为边界条件,计算不同配电网的负荷承载区间。对比的配电网结构均包含4条馈线,故构建的负荷承载区间为高维空间中复连通曲面体,无法直观描述。因此,以负荷承载区间超体积^[31]作为指标,定量描述负荷承载区间的大小。不同负荷类型数量接入下各形态配电网负荷承载区间超体积如表1所示。

表1 负荷承载区间分析结果
Table 1 Analysis results of load bearing interval

负荷类型数量	馈线 (负荷类型)	负荷承载区间超体积		
		传统配电网	柔性配电网	网孔型配电网
1种	F_1, F_2, F_3, F_4 (商业)	0.345 6	0.737 4	0.931 4
2种	F_1, F_3 (商业)/ F_2, F_4 (居民)	0.316 4	0.724 6	0.927 8
3种	F_1, F_3 (商业)/ F_2 (居民)/ F_4 (行政)	0.357 1	0.748 7	0.957 1
4种	F_1 (商业)/ F_2 (居民)/ F_3 (行政)/ F_4 (工业)	0.321 2	0.727 7	0.932 8

负荷承载区间的超体积反映了配电网中满足N-1安全的工作点所构成空间的大小。由表1可以看出,不论在何种接入场景下,环网联络柔性配电网的负荷承载区间超体积均大于传统配电网,这是由于传统配电网以分段开关和联络开关配合进行转供时,只能整体或分段离散转带负荷,转带方案有限,

无法充分利用线路容量,而环网间联络结构可以实现3条联络馈线的柔性联络,故所包含的负荷承载区间将更大。

如表1所示,网孔型配电网超体积在不同负荷类型接入场景下负荷承载区间的超体积均为最大,这是由于网孔结构相较于环间接入结构可实现4条馈线的互联,故在发生N-1故障时可供转供线路更多,所包含的负荷承载区间更大。

为方便观察不同网架形态下负荷承载区间的大小,采用降维观测方式对负荷承载区间进行分析,具体计算方式见附录A。馈线 F_4 出口负荷设定为4.5 MVA,配电网馈线 F_1 至 F_3 的负荷承载区间如图8所示,各负荷承载区间的坐标如附录A表A1至表A3所示。

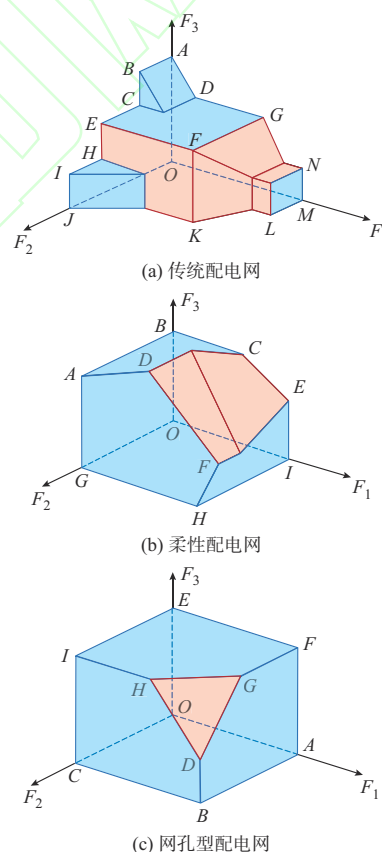


图8 配电网负荷承载区间
Fig. 8 Load carrying interval of distribution network

由上述例子可以看出,网孔结构释放了更多联络通道容量资源及全部转带能力,对于负荷承载能力及不同类型负荷接入的适应度更强。此外,网孔型配电网具备更大的负荷承载区间,这意味着有更大的带大负荷潜力及大范围内负载均衡能力,可以有效保障未来负荷的接入及配电网的高效运行。

3.2.2 DG消纳能力对比

DG的消纳能力是指从配电网运行的角度出发,在电网互联互通水平、运行模式、源荷特性等约束下能被配电网充分消纳的DG容量^[32-33]。通常考虑DG及负荷参与下的配电系统功率平衡调节过程,遵循电力电量平衡原则,因此,可用DG的容量渗透率定量衡量不同形态配电网对DG的消纳能力。

不同类型负荷接入下各形态配电网DG渗透率的具体计算方式见附录B。配电网中各条线路均包含10个负荷,DG均接入馈线 F_2 末端的最后一个负荷,接入类型为光伏,计算结果如表2所示。

表2 不同类型负荷接入DG消纳结果
Table 2 DG hosting result of different types of loads

负荷类型数量	馈线(负荷类型)	DG渗透率 $S_{DG}/\%$		
		传统配电网	柔性配电网	网孔型配电网
1种	F_1, F_2, F_3, F_4 (商业)	56.486	63.672	71.334
2种	F_1, F_3 (商业)/ F_2, F_4 (居民)	60.369	66.458	74.152
3种	F_1, F_3 (商业)/ F_2 (居民)/ F_4 (行政)	48.488	58.024	70.871
4种	F_1 (商业)/ F_2 (居民)/ F_3 (行政)/ F_4 (工业)	58.724	64.141	73.236

由表2可以看出,在4种典型接入场景下,环间联络柔性配电网的光伏接纳能力有一定提升,不仅能够有效克服传统配电网分段转供的局限性,且SOP的接入还可在端口处提供一定的电压调节^[34],对于DG的消纳起到促进作用。如表2所示,依托网孔结构,网孔型配电网进一步扩大DG消纳范围,对于高比例DG的接入将更加友好。

为更深入分析不同网架形态优劣,在表2所分析的1种类型负荷接入基础上设置不同负荷分布场景,进一步对比各网架结构的DG消纳能力。设负荷分别为首端集中(首端负荷占比为70%)、均匀分布、末端集中(末端负荷占比为70%)3种场景,此时各形态配电网DG渗透率如表3所示。

表3 不同负荷分布DG消纳结果
Table 3 DG hosting result of different load distribution

网架结构	$S_{DG}/\%$		
	首端集中	均匀分布	末端集中
传统配电网	47.051	56.486	61.535
柔性配电网	54.899	63.672	64.743
网孔型配电网	71.334	71.334	71.334

由表3可以看出,网孔型配电网相较于其他2种配电网形态,对于不同负荷分布下的DG消纳能力没有变化,这是由于传统配电网和环间联络柔性配电网在调节过程中均涉及阶跃性调节,而网孔型配电网可在全系统内进行柔性调节,有效消除不同负荷分布的影响,对DG消纳有极大促进作用。

综上所述,网孔型配电网在DG消纳方面相较于其他结构的配电网更具优势,将有效保障“以新能源为主体的新型电力系统”的建设。

3.3 面临挑战

任何配电网的形态结构都具有两面性。尽管网孔型配电网有一系列优势,但在现有技术背景下,其实际应用仍将面临诸多挑战。

3.3.1 经济问题

相较于馈线间闭环柔性配电网结构,网孔型配电网结构所需SOP端口数量增加了50%,从当前SOP的技术发展及建设投资费用来看,其建设成本较高,因此,经济性将成为网孔型配电网建设所需重点考虑的问题之一。但是,从长期发展来看,随着电力电子技术的不断迭代进步,SOP成本逐渐降低将成为必然趋势。同时,通过合理的容量规划,网孔型配电网的优越性与经济性将逐步凸显,成为未来配电网建设的重要方向。

3.3.2 调度问题

网孔型配电网优化调度需实现各SOP与其他多类型设备(传统控制设备及源荷储新型调度设备)的多时间尺度协同,遵循“多时间级优化协调、逐时间级细化”的调度原则,并通过多层协同调度架构,实现配电网的安全稳定运行。

基于网孔结构,网孔型配电网可根据实际运行情况建立多目标多时间尺度的区域自治协调控制策略,通过对网孔内资源的主动调度促进DG的大规模消纳,实现网孔区域内的自治,同时还可根据实时信息反馈,与网孔外部电网进行协调交互。

针对网孔型配电网的调度框架,主要考虑日前-日内-实时之间的配合,以实现DG最大消纳。在日前阶段,基于DG和负荷的日前预测确定运行中储能充放、OLTC挡位等离散量调度方案,并传递至日内阶段;在日内阶段,根据DG和负荷短期预测结果,以单个时间断面循环滚动的方式优化SOP各端口的控制策略,并传递到实时优化阶段;在实时阶段,利用通信设备将各类运行数据收集整理,实时调节SOP各端口输入输出功率,由此实现全系统的自治-协同优化调度,保障DG消纳需求。

综上所述,网孔型配电网在运行层面的调度和控制相较于传统电网更加复杂,同时对先进通信技

术的依赖度更强。但是,随着大数据、物联网、区块链、人工智能等先进数字技术的快速发展^[35],为网孔型电网调度控制提供了新的发展契机,可有效保障网孔型配电网的安全稳定运行。

3.4 应用场景

如前所述,网孔型配电网相较于传统电网,具备更强清洁能源消纳能力。在实际电网建设中,分布式电源的接入可能较为分散,且与所连馈线负荷的时序特性在不同时刻有着不同匹配特征,可通过建设网孔型配电网实现多馈线间的实时功率互济,在全系统层面进行源荷的动态平衡,保障清洁能源的高比例消纳。

基于现阶段我国电力系统发展现状,网孔型配电网由于其建设经济性问题,在全国范围内进行大规模推广建设的条件目前尚不充分,需依托部分具备高比例清洁能源接入特征的典型示范区域,并结合中国、日本、英国等地开展的SOP实际工程建设经验,通过示范工程的形式开展网孔型配电网的工程实践,为后续的大规模应用奠定基础。

4 网孔型配电网研究展望

网孔型配电网为未来配电网形态结构的发展提供针对性的思路,保障配电网的不断发展和完善。本节围绕网孔型配电网的结构及特征,对其未来的研究方向进行总结展望。

4.1 多重因素影响下网孔型配电网协同规划展望

在实际配电网规划中,由于DG、负荷、储能等元素地理分布并不规律,所需构建的网孔大小将呈现不规则形态。因此,基于多重因素影响的网孔型配电网规划方法将成为未来研究的重要思路。

网孔型配电网规划的核心将以网孔拓扑为约束,充分考虑系统形态发展、运行策略优化、多主体互动等动态因素,全面而准确地刻画各因素的复合关系,并体现不同影响因素之间的耦合关联与相互影响,求解得到网架结构、SOP拓扑结构和位置容量等要素的最优建设方案,为未来网孔配电网的实际规划建设奠定基础。

如前所述,网孔型配电网具有“模块化”特征,故其规划的核心为确定网孔拓扑的结构,因此,基于网孔拓扑的配电网规划首先需以负荷的规模、DG接入位置及容量、储能设施的建设约束等诸多方面约束为边界条件,综合考虑配电网的实际分布及建设需求及各方面的影响,以网孔拓扑建设经济性为目标,明确所需构建网孔的大小及数量,为后续SOP的选型及各定容提供结构基础。

作为网孔型配电网核心组网装置,多端SOP的

端口容量将直接影响配电网的协调运行及综合经济性的实现。网孔型配电网中SOP既承担网孔内功率流动的职责,又需实现网孔与上级电网间的连接。因此,基于SOP各端口容量规划时需充分考虑上述职责间的复杂关联,确保其端口容量可满足规划目标的实现。SOP的规划还需计及源-网-荷-储交叉互动及多重影响因素,使规划方案能够实现可控资源及核心装置的充分挖掘和高效利用,提升方案的科学合理性,从而实现综合效益的最大化,确保网孔型配电网建设的经济性和可行性。

此外,配电系统规划问题需与运行问题高度耦合^[36],其运行过程将极大影响配电系统的规划方案。因此,网孔型配电网的规划过程中需内嵌精细化运行,考虑系统的复杂运行策略、DG及负荷的多重不确定性特征等多种复杂因素的动态影响,实现考虑动态运行特征的多要素协调规划。

综上所述,基于网孔拓扑的配电网规划,面向未来配电网高质量发展的需求,通过准确衡量网孔拓扑内及网孔间的能量供需,实现DG、储能、可调控负荷、SOP等可调节资源的充分利用,避免资源浪费,实现上下协同、全局耦合的规划,确保规划方案在复杂不确定性环境下具备中长期的强适应性。

4.2 自治-协调下网孔型配电网优化运行展望

促进清洁能源消纳是未来配电网的核心功能^[37],也是网孔型配电网运行优化的重要目标。然而,相较于传统拓扑的配电网,网孔型配电网结构将更加复杂,其运行策略也将更加灵活。因此,制定一种自治-协调下网孔型配电网优化运行策略,有效应对源荷多重不确定性因素扰动,保障新能源的高效利用,将成为未来研究的重要思路。

配电系统自身存在着三相线路参数不对称及三相负荷不平衡,同时随着非全相并网DG的日益增多,其三相不平衡特征更加显著^[38]。网孔型配电网中包含多组SOP,其三相功率灵活可控,将有助于缓解配电网三相不平衡^[39-40]。因此,网孔型配电网运行策略制定时,需充分发挥SOP三相功率灵活调节能力,改善因三相不平衡而导致的供电瓶颈。

网孔型配电网整体潮流将以孔内流动为主,与上级电网间呈现弱连接。因此,围绕网孔型配电网运行优化策略的制定需充分发挥其结构优势,通过控制网孔内SOP各端口的功率流动,以网孔内清洁能源最大消纳为目标,实现网孔内部的平衡;同时,优化策略需兼顾网孔外馈线和网孔的能量互动,在实现孔内自治的前提下保障全系统的协调,以实现最终的优化目标。

如前所述,网孔型配电网是一个高度融合多元

主体的系统,网孔内部元素将具有多样化特征,除包含大量 DG 外,还接有各种可控负荷、微网等。由于这些设施的运行特性灵活可控,其在网孔内能够与配电系统进行双向互动,通过调整自身的运行计划和状态满足电网需求。因此,围绕网孔型配电网的优化策略需涉及微网等可调要素在运行过程中的参与,实现对配电系统的主动、有效管理。

除上述围绕 SOP 制定优化策略外,在建立自治-协调下网孔型配电网优化运行策略时还需将其其他传统调控手段进行统一协同控制,包括储能、OLTC 等控制方式,从而释放各种调控资源的调度潜力。

综上,建立网孔型配电网优化运行策略时需考虑系统的局部自治和全局协调间的耦合关系,计及源-荷多元化、差异化、不确定、互动化等特征,制定促进新能源消纳等目标实现的运行策略,充分发挥网孔拓扑的优势。

4.3 网孔型配电网的建模与仿真展望

数字仿真是网孔型配电网研究的重要支撑之一,对于其运行机理、规划设计、保护控制等问题的分析可以提供必要的工具和强有力技术支撑^[41],将有效支撑网孔型配电网的工程投建和稳定运行。

从数字仿真角度看,包含大量 DG 的网孔型配电网与传统配电网相比具备差异的稳态、暂态特性;大规模 SOP 接入使其控制逻辑、运行特性、调度策略复杂程度骤升,加上系统本身包括众多非线性、非线性元件,自身结构多样,使得其仿真过程将呈现各元素相互耦合的复杂非线性特征。

对于网孔型配电网仿真分析,核心在于 SOP 的元件等效建模,考虑各端口的差异化控制模式引入额外的增广方程及状态变量建立元件等效模型,结合换流器及其连接的线路与器件三相结构的不对称特征所导致的相间耦合,构建精细化功率损耗模型,将交流网络、直流网络及换流器的模型涵盖在统一的模型框架之下实现网孔型配电网的运行模拟。

作为一种全新的配电网形态,网孔型配电网在其运行过程中将包含 DG、储能、微网等新元素,在这些新元素的作用下,对其建模应涵盖结构层面、设备层面等多层次、不同时间尺度,并根据不同的研究目的,建立各种元件在不同时间尺度下的仿真模型,并根据需要合理选择仿真模型,从而保证仿真精度和效率。

基于网孔型配电网的数学仿真中,SOP 作为秒级变化的设备,需采用更小的计算步长来满足精度需求。同时,求解过程中涉及计算矩阵时变、步长间开关动作、数值振荡等问题^[3],整个网孔型配电网仿

真过程又涉及强非线性,使得求解严重受限。上述问题都将对网孔型配电网的仿真计算提出新的挑战,为此,需针对上述难点,对现有仿真方法进行优化,在保证算法稳定性的同时改善网孔型配电网仿真的计算精度与速度。

综上所述,围绕网孔型配电网进行建模仿真分析,需围绕其网孔型拓扑的优势及应用有效性的验证开展。通过设备建模与仿真计算,验证或修正网孔型配电网在规划设计、优化运行、控制保护等多方面方案,为网孔型配电网的实际应用创造条件。

网孔结构虽不一定为最优的配电网拓扑结构,但其为未来配电网网架结构的演化提供了一种可能路径。随着相关研究的深入开展和新技术的应用,网孔型配电网所面临的挑战将被克服,最终将实现大规模的推广与应用。

5 结语

本文延续蜂窝状配电网的设想提出了一种以网孔拓扑为基础,实现全系统柔性闭环运行的网孔型配电网。针对网孔型配电网,提出了其改造方式及核心特征,从负荷承载能力和 DG 消纳能力两个角度定量分析了网孔结构的应用潜力,探讨了后续研究中可能涉及的新难点和新问题,并得出了以下结论:

1) 本文提出的网孔型配电网拓扑具有全系统多方向连续调控能力,并依托网孔结构,实现网孔内的自治和与上级馈线间的双向互动。该拓扑与传统配电网相比,具有调节范围更广、负荷承载水平更高、消纳新能源能力更强、扩展灵活性更高等诸多优点。

2) 本文同时对所提拓扑在多重因素影响下的协同规划问题、自治-协调下的优化运行问题及建模与仿真问题中涉及的新方向进行了总结,并提出了相关的研究思路,从而为后续围绕网孔型配电网的研究提供参考。

本文提出的网孔型配电网拓扑结构,为未来新型配电系统形态结构的研究与实际构建提供了思路与方案。同时,随着电力电子技术、通信技术以及相关理论研究的不断进步,网孔型配电网在未来将得到更广泛的应用。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望

- [J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
- DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [2] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1899-1910.
- [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(2): 1-12.
- WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [4] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报[2022-08-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220824.1607.010.html>.
- ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J/OL]. Proceedings of the CSEE[2022-08-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220824.1607.010.html>.
- [5] 范帅, 危怡涵, 何光宇, 等. 面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 1-12.
- FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1-12.
- [6] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未来综合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3023-3034.
- LIU Dichen, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy Internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3023-3034.
- [7] 肖峻, 刚发运, 蒋迅, 等. 柔性配电网: 定义、组网形态与运行方式[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1435-1446.
- XIAO Jun, GANG Fayun, JIANG Xun, et al. Flexible distribution network: definition, morphology and operation mode [J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1435-1446.
- [8] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [9] 贾善翔, 彭克, 李喜东, 等. 基于智能软开关的柔性互联交直流配电系统分布式优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 95-103.
- JIA Shanxiang, PENG Ke, LI Xidong, et al. Distributed optimization of flexible interconnected AC/DC distribution system based on soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 95-103.
- [10] LONG C, WU J, THOMAS L, et al. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation [J]. Applied Energy, 2016, 184: 427-437.
- [11] LI P, JI J, JI H, et al. Self-healing oriented supply restoration method based on the coordination of multiple SOPs in active distribution networks[J]. Energy, 2020, 195: 116968.
- [12] 孙守晶, 丛伟, 邱吉福, 等. 含智能软开关的智能配电网分布式供电恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 79-85.
- SUN Shoujing, CONG Wei, QIU Jifu, et al. Distributed power restoration method for smart distribution network with soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 79-85.
- [13] WANG J, ZHOU N C, CHUNG C Y, et al. Coordinated planning of converter-based DG units and soft open points incorporating active management in unbalanced distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2015-2027.
- [14] JI H, WANG C, LI P, et al. Quantified flexibility evaluation of soft open points to improve distributed generator penetration in active distribution networks based on difference-of-convex programming[J]. Applied Energy, 2018, 218: 338-348.
- [15] 吴攀, 黄文焄, 邵能灵, 等. 基于功率互济的柔性互联多微网孤岛运行多层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3101-3111.
- WU Pan, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Multi-layer coordinated control strategy for islanded flexible interconnected multiple microgrids based on mutual power support [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3101-3111.
- [16] 黄开艺, 艾芊, 张宇帆, 等. 基于能源细胞-组织架构的区域能源网需求响应研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3149-3160.
- HUANG Kaiyi, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Challenges and prospects of regional energy network demand response based on energy cell-tissue architecture [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3149-3160.
- [17] 张释中, 裴玮, 杨艳红, 等. 基于柔性直流互联的多微网集成聚合运行优化及分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1025-1037.
- ZHANG Shizhong, PEI Wei, YANG Yanhong, et al. Optimization and analysis of multi-microgrids integration and aggregation operation based on flexible DC interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1025-1037.
- [18] 王成山, 李鹏, 于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 13-21.
- WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21.
- [19] JI H, WANG C, LI P, et al. An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 208: 986-995.
- [20] 江道灼, 徐宁, 江崇熙, 等. 蜂巢状有源配电网构想、关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 1-11.
- JIANG Daozhuo, XU Ning, JIANG Chongxi, et al. Conception, key technology and prospect of honeycomb-shape active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 1-11.
- [21] 祖国强, 王蕾, 肖峻, 等. 蜂巢配电网的核心特征、关键问题与研究思路[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 1-10.
- ZU Guoqiang, WANG Lei, XIAO Jun, et al. Core features, key issues and research ideas of honeycomb distribution network

- [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 1-10.
- [22] 葛少云, 周晨曦, 刘洪, 等. 考虑环间接入模式及可靠性影响的有源配电网软开关规划[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 120-128.
- GE Shaoyun, ZHOU Chenxi, LIU Hong, et al. Soft open point planning for active distribution network considering influence of access mode between feeder loops and reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 120-128.
- [23] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.
- XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [24] 杨欢, 蔡云旖, 屈子森, 等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153-165.
- YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [25] 薛俞, 李月乔, 刘文霞, 等. 柔性互联配电系统连锁故障风险评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 112-119.
- XUE Yu, LI Yueqiao, LIU Wenxia, et al. Risk assessment of cascading failures in flexible interconnected power distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 112-119.
- [26] AITHAL A, LI G, WU J. Grid side unbalanced fault detection using soft open point in an electrical distribution network[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2859-2864.
- [27] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.
- WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.
- [28] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4390-4398.
- SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4390-4398.
- [29] 刘洪, 郑楠, 葛少云, 等. 内嵌需求响应与优化运行策略的主动配电系统源网协同规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 89-97.
- LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Coordinated planning of source and network in active distribution system with demand response and optimized operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 89-97.
- [30] LIU Hong, CAO Yuchen, GE Shaoyun, et al. Load carrying capability of regional electricity-heat energy systems: definitions, characteristics, and optimal value evaluation[J]. Applied Energy, 2022, 310: 118586.
- [31] 肖峻, 张苗苗, 祖国强, 等. 配电系统安全域的体积[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2222-2231.
- XIAO Jun, ZHANG Miaomiao, ZU Guoqiang, et al. Volume of distribution system security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2222-2231.
- [32] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [33] 牛东晓, 李建锋, 魏林君, 等. 跨区电网中风电消纳影响因素分析及综合评估方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1087-1093.
- NIU Dongxiao, LI Jianfeng, WEI Linjun, et al. Study on technical factors analysis and overall evaluation method regarding wind power integration in trans-provincial power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1087-1093.
- [34] LI B K, LIANG Y S, WANG G, et al. A control strategy for soft open points based on adaptive voltage droop outer-loop control and sliding mode inner-loop control with feedback linearization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122: 106205.
- [35] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002-5017.
- LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5002-5017.
- [36] 王成山, 王瑞, 于浩, 等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2396.
- WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2396.
- [37] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J/OL]. 中国电机工程学报[2022-06-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220620.1355.010.html>.
- MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J/OL]. Proceedings of the CSEE [2022-06-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220620.1355.010.html>.
- [38] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 58-64.
- LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Bomeng, et al. Reactive power optimization for three-phase distribution networks with distributed generators based on mixed integer second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 58-64.
- [39] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 380-391.
- [40] WANG J, ZHOU N, WANG Q. Data-driven stochastic service restoration in unbalanced active distribution networks with multi-terminal soft open points[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106069.
- [41] 徐晋, 汪可友, 李国杰. 电力电子设备及含电力电子设备电力系统实时仿真研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10):

3-17.

XU Jin, WANG Keyou, LI Guojie. Review of real-time simulation of power electronic devices and power systems integrated with power electronic devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 3-17.

mail: liuhong@tju.edu.cn

李其哲(1996—),男,博士研究生,主要研究方向:配电系统规划与运行。E-mail: 84287738@qq.com

高 强(1985—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电网调控与规划。E-mail: gaoqiang242@163.com

(编辑 王梦岩)

刘 洪(1979—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:智能配电系统及综合能源系统的规划与运行等。E-

Morphology, core features and research prospect of mesh-shape medium voltage distribution network

LIU Hong¹, LI Qizhe¹, GAO Qiang², XU Zhengyang¹, XUE Shimin¹, LI Yuxuan¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The current research on medium voltage distribution networks has yet to involve the flexible, controllable grid structure of the whole system power flow. Therefore, a mesh-shape medium voltage flexible interconnected distribution network topology is proposed with the soft open point (SOP) as the core networking device, besides, the core characteristics and research of which is proposed. Firstly, the typical architectures of traditional, flexible, and honeycomb distribution networks are analyzed. The advantages and disadvantages of each architecture are clarified by combining their networking devices and control modes. Secondly, the network shape, control and protection strategy, and transformation mode of the meshed distribution network are discussed. Then, the rectangular mesh topology, hexagonal mesh topology, and AC-DC hybrid network topology are proposed for different application scenarios. The transformation mode of the transition from the traditional distribution network to the meshed distribution network is constructed. Thirdly, the core characteristics of the mesh topology are described, and the quantitative analysis and calculation are carried out from the perspectives of load-carrying capacity and distributed power supply (DG) absorption capacity. Finally, the structural advantages of the mesh distribution network are summarized. Finally, the future research ideas of planning and operation for this new topology are summarized and prospected.

Key words: mesh-shape medium voltage distribution network; flexible interconnection; soft open point; flexible and controllable; distributed generation



附录 A

负荷承载能力由于各类用户的负荷时序不同,一个区域内的整体负荷水平不是各类用户负荷的数值叠加,而是以区间的形式表示。负荷承载能力区间可表示为:

$$\Omega_{LCCI} = \left\{ (y_1, y_2, \dots, y_n) \mid Y = f_s(y_1, y_2, \dots, y_n), Y \in \Omega_{N-1} \right\} \quad (A1)$$

式中, Ω_{LCCI} 表示负荷承载能力区间, Ω_{N-1} 表示 $N-1$ 的安全区间, $f_s(\cdot)$ 表示各馈线考虑用户负荷特性互补后计算得到的负荷。例如,假设三条馈线有联络关系,负荷分别为 y_1, y_2, y_3 , 负荷曲线分别为 $L_{curv,1}, L_{curv,2}, L_{curv,3}$, 考虑用户特性后,叠加得到的负荷为 $y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2} + y_3 \cdot L_{curv,3}$ 。负荷承载能力区间数学表达式的含义为各馈线考虑用户负荷特性互补后计算得到的负荷,需要满足潮流约束和安全约束。

根据负荷承载能力区间的定义,以三维负荷承载能力区间为例进行说明。 y_1, y_2, y_3 存在联络关系,其负荷承载能力区间可表示为:

$$\Omega_{LCCI} = \left\{ (y_1, y_2, y_3) \mid 0 \leq y_1 \leq y_{1,max}, 0 \leq y_2 \leq y_{2,max}, 0 \leq y_3 \leq y_{3,max}, f_s(y_1, y_2, y_3) \leq y_{1,2,3,max} \right\} \quad (A2)$$

式中, $y_{1,2,3,max}$ 表示 y_1, y_2, y_3 总共可供应的最大负荷。

负荷承载能力区间的上边界即为:

$$f_s(y_1, y_2, y_3) = y_{1,2,3,max} \quad (A3)$$

其中, $f_s(y_1, y_2, y_3)$ 可以表示为:

$$f_s(y_1, y_2, y_3) = \max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2} + y_3 \cdot L_{curv,3}) \quad (A4)$$

式中, $L_{curv,1}, L_{curv,2}, L_{curv,3}$ 分别表示 y_1, y_2, y_3 的负荷曲线,是一个元素为 0~1 的数组,每个元素表示该时刻的负荷系数。

由式子(A4)可以看出,随着 y_1, y_2, y_3 的变化, $f_s(y_1, y_2, y_3)$ 的值也将发生变化,即随着各馈线负荷量发生变化时,其叠加后的负荷峰值出现的时刻和大小也将发生变化,负荷承载能力区间边界是将呈现不规则形态。

本文选取 $N-1$ 作为安全约束,考虑馈线出口故障是最严重的情况,计算三种不同的网架结构的负荷承载能力区间。

(1) 传统配电网

在发生 $N-1$ 故障后,传统配电网可通过分段开关和联络开关间的配合进行网络重构,实现供电恢复,在本节所述两分段两联络接线中,若馈线 F_1 出口故障,首先需将开关 S_{11} 断开实现故障隔离,其次,可闭合开关 S_2 或 S_1 ,通过馈线 F_2 或者 F_3 以单一路径实现故障区负荷的供电恢复;或闭合开关 S_1, S_2 ,断开开关 S_{12} ,将馈线 F_1 的负荷分段转供至 F_2 和 F_3 馈线。具体约束条件包括:

1) 线路容量约束

$$\begin{cases} y_1 \leq R_F \\ y_2 \leq R_F \\ y_3 \leq R_F \end{cases} \quad (A5)$$

式中: R_F 为馈线的容量。

2) 单一馈线转供约束

$$\begin{cases} \min(\max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2}), \max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_3 \cdot L_{curv,3})) \leq R_F \\ \min(\max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2}), \max(y_2 \cdot L_{curv,2} + y_4 \cdot L_{curv,4})) \leq R_F \\ \min(\max(y_3 \cdot L_{curv,3} + y_4 \cdot L_{curv,4}), \max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_3 \cdot L_{curv,3})) \leq R_F \\ \min(\max(y_3 \cdot L_{curv,3} + y_4 \cdot L_{curv,4}), \max(y_2 \cdot L_{curv,2} + y_4 \cdot L_{curv,4})) \leq R_F \end{cases} \quad (A6)$$

式中: y_4 为馈线 F_4 的负荷,在本节计算中为定值。

3) 分段转供约束

$$\left\{ \begin{array}{l} \max(\frac{1}{2}y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2}) \leq R_F \\ \max(\frac{1}{2}y_1 \cdot L_{curv,1} + y_3 \cdot L_{curv,3}) \leq R_F \\ \max(\frac{1}{2}y_2 \cdot L_{curv,2} + y_1 \cdot L_{curv,1}) \leq R_F \\ \max(\frac{1}{2}y_2 \cdot L_{curv,2} + y_4 \cdot L_{curv,4}) \leq R_F \\ \max(\frac{1}{2}y_3 \cdot L_{curv,3} + y_1 \cdot L_{curv,1}) \leq R_F \\ \max(\frac{1}{2}y_3 \cdot L_{curv,3} + y_4 \cdot L_{curv,4}) \leq R_F \\ \max(\frac{1}{2}y_4 \cdot L_{curv,4} + y_2 \cdot L_{curv,2}) \leq R_F \\ \max(\frac{1}{2}y_4 \cdot L_{curv,4} + y_3 \cdot L_{curv,3}) \leq R_F \end{array} \right. \quad (A7)$$

(2) 柔性配电网

由于柔性配电网中SOP的接入作用,当某馈线出口故障后,可所互联馈线所带负荷的情况,将故障馈线负荷按照合理的策略进行转带。若馈线 F_1 出口故障,首先需将开关 S_{11} 断开实现故障隔离,其次,可闭合开关 S_2 ,通过馈线 F_2 和 F_3 共同完成故障区负荷的供电恢复;或闭合开关 S_2 、 S_4 ,断开开关 S_{32} ,通过馈线 F_2 和 F_4 共同完成故障区负荷的供电恢复。

具体约束条件包括:

1) 转供约束

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(\max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2} + y_3 \cdot L_{curv,3}), \max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2} + \frac{1}{2}y_3 \cdot L_{curv,3} + y_4 \cdot L_{curv,4})) \leq R_F * 2 \\ \min(\max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_3 \cdot L_{curv,3} + y_4 \cdot L_{curv,4}), \max(\frac{1}{2}y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2} + y_3 \cdot L_{curv,3} + y_4 \cdot L_{curv,4})) \leq R_F * 2 \end{array} \right. \quad (A8)$$

线路约束如式子(A5)所示。

(3) 网孔配电网

由于网孔配电网通过2组3端口SOP实现全系统的柔性互联,当某馈线出口故障后,可由其他所有互联馈线进行转供,将故障馈线负荷进行转带。

具体约束条件包括:

1) 转供约束

$$\max(y_1 \cdot L_{curv,1} + y_2 \cdot L_{curv,2} + y_3 \cdot L_{curv,3} + y_4 \cdot L_{curv,4}) \leq R_F * 3 \quad (A9)$$

线路约束如式子(A5)所示。

表 A1 传统配电网负荷承载区间坐标
Table A1 Load carrying interval coordinate of traditional distribution network

网架结构	坐标				
传统配电网	A	B	C	D	E
	(0,0,6.6)	(2.1,0,6.6)	(2.2,0,4.3)	(0,2.4,4.3)	(4.3,0,4.3)
	F	G	H	I	J
	(4.2,4.5,4.2)	(0,4.5,4.2)	(4.3,0,2.1)	(6.6,0,2.1)	(6.6,0,0)
	K	L	M	N	O
	(4.2,4.5,0)	(2.1,6.6,0)	(0,6.6,0)	(0,6.6,2.1)	(0,0,0)

表 A2 柔性配电网负荷承载区间坐标
Table A2 Load carrying interval coordinate of flexible distribution network

网架结构	坐标				
	A	B	C	D	E
柔性配电网	(6.6, 6.6, 0)	(0, 0, 6.6)	(0, 4.1, 6.6)	(4.5, 2.1, 6.6)	(0, 6.6, 5.4)
	F	G	H	I	O
	(4.5, 6.6, 2.1)	(6.6, 0, 0)	(6.6, 6.6, 0)	(0, 6.6, 0)	(0, 0, 0)

表 A3 网孔型配电网负荷承载区间坐标
Table A3 Load carrying interval coordinate of mesh-shape distribution network

网架结构	坐标				
	A	B	C	D	E
网孔型配电网	(0, 6.6, 0)	(6.6, 6.6, 0)	(6.6, 0, 0)	(6.6, 6.6, 2.1)	(0, 0, 6.6)
	F	G	H	I	O
	(0, 6.6, 6.6)	(2.1, 6.6, 6.6)	(6.6, 2.1, 6.6)	(6.6, 0, 6.6)	(0, 0, 0)

附录 B

DG 消纳能力的求解过程如下所示:

(1) 目标函数

$$\max_x \sum_{i=1}^N \frac{S_i^{\text{dg}}}{S^{\text{load}}} \quad (\text{B1})$$

式中: S_i^{dg} 为节点 i 处 DG 的接入容量; N 为所有接入 DG 的数量; x 为决策变量的集合, 包括各个时刻 SOP 端口发出或吸收的功率以及网络重构方案等。

(2) 约束条件

1) 潮流约束

$$V_{j,t} = V_{i,t} - (r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) \quad (\text{B2})$$

$$P_{ij,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} + P_{j,t}^{\text{L}} - P_{j,t}^{\text{dg}} - P_{j,t}^{\text{SOP}} \quad (\text{B3})$$

$$Q_{ij,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} + Q_{j,t}^{\text{L}} - Q_{j,t}^{\text{SOP}} \quad (\text{B4})$$

式中: r_{ij} 为支路 ij 的电阻; x_{ij} 为支路 ij 的电抗; $P_{jk,t}$ 、 $P_{i,t}^{\text{L}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{dg}}$ 分别为支路 jk 在 t 时刻流过的有功功率、节点 j 处负荷 t 时刻的有功功率、节点 j 处 DG 在 t 时刻的有功功率; $Q_{jk,t}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{L}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{SOP}}$ 分别为支路 jk 在 t 时刻流过的无功功率、节点 j 处负荷 t 时刻的无功功率。

2) 线路容量约束

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq S_{ij,\max}^2 \quad (\text{B5})$$

式中: $P_{ij,t}$ 为支路 ij 在 t 时刻流过的有功功率; $Q_{ij,t}$ 为支路 ij 在 t 时刻流过的无功功率; $S_{ij}^{\max}$ 为支路 ij 允许流过的最大复功率。

为了使该约束线性化, 其转化为如下形式:

$$\begin{cases} -S_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t} \leq S_{ij}^{\max} \\ -S_{ij}^{\max} \leq Q_{ij,t} \leq S_{ij}^{\max} \\ -\sqrt{2} \cdot S_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t} + Q_{ij,t} \leq \sqrt{2} \cdot S_{ij}^{\max} \\ -\sqrt{2} \cdot S_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t} - Q_{ij,t} \leq \sqrt{2} \cdot S_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (\text{B6})$$

3) 电压安全约束

$$V_{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{\max} \quad (\text{B7})$$

式中: $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压; $V_{\min}$ 为节点电压的下限, $V_{\max}$ 为节点电压的上限, 根据配电网安全运行准则,

节点电压的上限为 1.05,节点电压的下限为 0.95。

4) SOP 功率约束

$$(P_{i,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{SOP}})^2 \leq (S^{\text{VSC}})^2 \quad (\text{B8})$$

$$(P_{j,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{SOP}})^2 \leq (S^{\text{VSC}})^2 \quad (\text{B9})$$

$$P_{i,t}^{\text{SOP}} + P_{j,t}^{\text{SOP}} = 0 \quad (\text{B10})$$

式中: $P_{i,t}^{\text{SOP}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{SOP}}$ 分别 SOP 在 t 时刻向节点 i 、节点 j 注入的有功功率; $Q_{i,t}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{SOP}}$ 分别 SOP 在 t 时刻向节点 i 、节点 j 注入的无功功率; S^{VSC} 为 SOP 的容量。

5) 网络重构约束

对于传统配电网和柔性配电网调控中涉及网络重构,需保障重构后闭合的支路总数不会改变,因此有如下约束:

$$\sum_{ij \in E \setminus E^{\text{SW}}} "1" + \sum_{ij \in E^{\text{SW}}} \delta_{ij,t} = N^{\text{BR}} - N^{\text{SW}} \quad (\text{B11})$$

式中: E^{SW} 为联络开关所在支路集合; E 为所有支路集合; $\delta_{ij,t}$ 为 0-1 变量,用以描述支路的通断状态,0 的时候支路为断开,1 的时候支路为闭合; N^{BR} 为含联络开关所在支路在内的支路总数; N^{SW} 为联络开关的数量,考虑到开关寿命,单个开关 24 小时内最多动作 2 次。

为保证断开支路上的有功功率、无功功率均为 0,引入如下约束:

$$-\delta_{ij,t} M_1 \leq P_{ij,t} \leq \delta_{ij,t} M_1 \quad (\text{B12})$$

$$-\delta_{ij,t} M_2 \leq Q_{ij,t} \leq \delta_{ij,t} M_2 \quad (\text{B13})$$

式中: M_1 、 M_2 分别为足够大的正数,一般取值为各变量可能出现的最大值,不宜过大,否则会影响求解效率。

断开支路上,其存在节点的电压不满足式(B2),为保证约束的通用性,对其进行松弛处理,将式(B2)改写为:

$$\begin{cases} V_{i,t} - V_{j,t} - (r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) \leq (1 - \delta_{ij,t}) M_3 \\ V_{i,t} - V_{j,t} - (r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) \geq (\delta_{ij,t} - 1) M_3 \end{cases} \quad (\text{B14})$$

式中: M_3 为足够大的正数。

上述求解模型为混合整数线性模型,采用 Cplex 求解器对模型进行求解。