

配电网形态演变下的协调规划问题与挑战

王成山¹, 王瑞¹, 于浩¹, 宋毅², 于力³, 李鹏¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209; 3. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东省 广州市 510670)

Challenges on Coordinated Planning of Smart Distribution Networks Driven by Source-network-load Evolution

WANG Chengshan¹, WANG Rui¹, YU Hao¹, SONG Yi², YU Li³, LI Peng¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education(Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China;
2. State Grid Economic and Technology Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China;
3. Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510670, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Distribution networks will serve as a comprehensive energy platform for the future society. The characteristics in the source, network, and load are changing more and more dramatically, bringing great challenges to the coordinated planning of distribution networks. The paper focused on the coordinated planning of smart distribution networks with consideration of the source-network-load evolutions. The driving forces for the development and evolution of distribution networks were analyzed. The influences of multiple driving forces on system planning were discussed. Several key issues were elaborated, including the morphology feature extraction and quantification, dynamic aggregation and prediction of planning elements, planning under complex scenarios, and multi-scenario deduction and decision-making. Analysis of the composition, objective and research direction of the key issues were performed, providing some thoughts and references for the development of smart distribution network planning technologies.

KEY WORDS: distribution network; morphology evolution; coordinated planning; uncertainty

摘要: 智能配电网作为面向未来的综合性电力能源服务平台,其源-网-荷形态变化愈发显著,给系统的协调规划问题带来巨大挑战。围绕智能配电网源-网-荷形态演变下的协调规划问题,剖析了配电网的形态发展驱动力构成及其作用机理,探讨了多元驱动力复合作用给规划问题带来的复杂影响。在此基础上,围绕智能配电网复杂形态特征的提取与量化、规划要素的动态聚合与分析预测、多要素影响下的复杂场景规划、多场景推演与协调决策等关键问题,对其技术内

涵进行了分析与阐述,对相关技术的发展目标与未来研究方向进行了探讨与展望,以为新形势下智能配电网规划理论与技术的发展提供一些思考和借鉴。

关键词: 智能配电网; 形态演变; 协调规划; 不确定性

0 引言

配电网是面向用户电力能源供应的核心环节,也是实现电能转换和利用的重要基础设施,科学的配电系统规划是电网建设、发展与运营中的重要一环^[1]。长期以来,配电网的规划问题都与源-网-荷特征的发展演变紧密相关^[2]。而在智能电网的技术推动下,配电网规划方案的经济性、灵活性与可靠性等指标与系统形态的关联更加密切,受其影响也更加显著^[3]。一方面,配电系统的规划需要“主动”协调源-网-荷层面的发展,充分释放复杂形态技术潜能并引导电网形态的演变,支撑其实现最理想的运行效率与客户体验;另一方面,配电网的规划方案也应能够“被动”调整,以适应源-网-荷各层面在不能准确预见的技术或政策驱动下发生的剧烈变化,如图1所示。这使智能配电系统规划问题的研究必须建立在对电网形态特征及发展趋势的深刻理解和充分掌控之上,既要富有针对性,又要富有前瞻性,从而形成了源-网-荷形态演变下的规划技术新需求。

传统配电系统大都采用闭环设计、开环运行的结构,以上级变电站为电源,线路构成配电网,用户即为负荷,源-网-荷各自角色和定位十分清晰。因此,传统配电网规划一般遵循“自下而上”

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1866207)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U1866207).

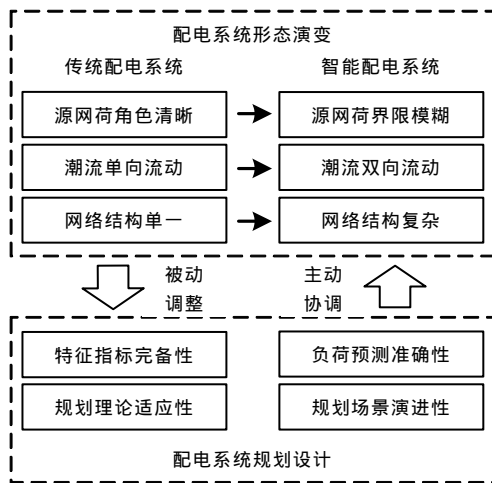


图1 配电系统形态演变与规划设计

Fig. 1 Evolution and planning of distribution networks 加“自上而下”的实现路径,即按负荷预测、空间负荷分布分析、变电站选址定容、线路网架设计、确定用户变压器容量这一典型流程来实现^[4]。但在智能配电系统中,分布式电源及各类调控装置和手段将广泛且大规模地接入与运营,源-网-荷的角色定位和行为特征将发生根本性变化,在推动配电系统进入新形态的同时,也将对未来配电系统的规划方法产生深远影响^[5]。

例如,配置有光伏发电系统和储能装置的用户,原本是单纯的“荷”,但在自身用电需求得到满足且尚有盈余的情况下,将具备向配电网反向供电的能力,此时它可以视为电网中的一个“源”。为了适应新型源-荷的运行特征,未来智能配电系统中网络的角色定位也将发生变化,例如采用智能软开关^[6](soft open point, SOP)后,可实现对配电线路间传输功率的灵活调节, SOP 的一端可视为可调负荷,另一端则可视为一个特殊的源,根据运行策略的不同将具备有功源、无功源的性质^[7],网络潮流将出现复杂的多向流动,这给点对点(peer to peer, P2P)能量交易^[8-9]、多能流协同供应^[10-11]等新型运营模式创造了条件,要求网络规划在满足基本能量配送的同时,还需要考虑更多的功能性要素。

此外,未来智能配电网在提供基础电力服务的同时,还将承担起电动汽车的接入支撑平台、城市发展的能源基础平台、多市场主体的能源交易与金融服务平台等多重角色。具体来说:1)配电网将成为电动汽车最重要的接入途径,而电动汽车作为电气化交通的重要承载形式之一,其充放电行为模式和交通出行特征紧密相关,从而使智能配电网与智能交通网之间的耦合互动成为可能;2)随着综合能源技术的兴起和电能替代的快速推进,电能将

在多种能源形式的转化与供应中扮演核心角色。在源侧,需要进一步扩展考虑气、热等能源供应特性以及微燃机等分布式电源带来的多能耦合特征;在网侧,综合能源站和综合能源管廊等新型网络形式将给城市能源系统的规划布局产生深刻影响;在负荷侧,用户冷、热等负荷需求和用能行为将使电网负荷特性发生复杂变化。这些因素使配电网的发展必须与社会综合能源体系构建和全局发展规划等问题统筹协同考虑;3)随着配电侧电力市场的逐步开放,新型“产销者”(prosumer)用户身份愈发普遍,在智能配电网不断完备的量测和控制能力支撑下,将进一步衍生出多种能源交易和金融服务创新模式,使智能配电网能量流-信息流-现金流深度融合。

总的来看,智能配电系统的形态演变使其内部源-网-荷的界限趋于模糊、层次更加丰富,外部与交通、能源、市政、金融等其他服务领域的壁垒逐渐打破^[12-13]。这要求智能配电系统在规划问题中不仅需要考虑常规配电模式,还需要考虑微电网、交直流混联等新型配电形式^[14];不仅需要考虑静态供电能力指标,还需要与灵活控制策略下的动态运行性能相结合;不仅需要考虑电力网中源-网-荷的综合发展需求,还需要考虑与智慧能源网、智能交通网等外部系统的协调发展^[15-16]。此时,系统中存在的众多因素的不确定性、源-网-荷的互动性、以及系统运行的时序特征和行为混杂性等,都对配电系统的协调规划问题提出了巨大挑战^[17]。

本文面向未来智能配电网的协调规划问题,从源-网-荷新要素、新特征以及其复合影响下的系统形态演变态势入手,重点阐述其对配网规划问题的影响以及给相关技术方法提出的新需求和新挑战,对相关技术问题的研究方向提出了一些见解和观点,希望能够为新形势下智能配电系统规划理论与技术的发展提供有益的思考和借鉴。

1 形态演变下规划问题的复杂性

配电网形态演变是指在用户需求和配用电技术水平等多元驱动力共同作用下,配电网构成要素、组织结构和生产运行模式发生的缓慢、持续而重大的变化。配网形态演变使规划问题进一步复杂化,根源主要在于两个方面:其一是多元驱动力作用下的形态演变路径复杂性,其二是形态特征变化带来的多类型要素协同规划复杂性。

1.1 形态演变路径的复杂性

配电系统的形态演变是在多方面因素共同驱

动下形成的，并且由于用户、市场、政策等不确定性因素而变得难以预见^[18]，如图 2 所示。其具体原因包括：

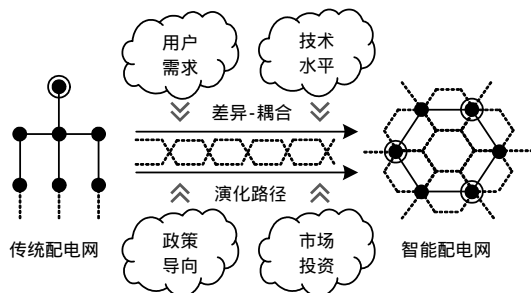


图 2 形态演变的多重驱动力

Fig. 2 Evolution of distribution networks driven by multiple factors

1) 驱动要素的差异性。

配电系统形态发展驱动力的来源极为丰富，其影响力水平、层次和效果各有不同^[19]，如何揭示不同背景下发展驱动力的来源属性、物理本质和作用机理，并准确识别关键驱动因素等问题十分复杂。

用户的多样化需求是推动配网形态不断变化的首要因素。例如，为了满足广大用户的基本用电需求，配电系统大多采用易于扩张的简单放射状结构，这种自上而下的单向供需关系可以保证功率的稳定输送，且能够以较少的投资覆盖较大的用电区域^[20]；随着经济的快速发展和新型城镇化的稳步推进，用户对供电可靠性的要求日益提升，手拉手、多供一备、多分段多联络等配电模式开始在重要负荷地区大量应用^[21]；为了适应用户侧精密负荷与直流负荷的不断增多，基于电力电子技术的有源滤波、柔性配电^[22]、交直流混合配电^[23]等技术形式开始崭露头角。这些差异化的用户用电需求主导了配网形态的发展方向。

与此同时，科技进步、装备水平等因素则在技术和政策层面影响着不同配网形态的具体实现。例如，在电力电子技术、信息通信技术、物联网技术的发展促进下，配电系统将从简单电力网发展为多维信息覆盖的信息物理系统^[24]；在各种新型储能技术的推动下，电力无法大规模存储的传统观点可能被颠覆，使配电系统形态发生根本性变化。这些不同来源的驱动力有着各不相同的作用方式和影响力水平，给配网形态发展驱动因素的认识、辨识与分析提出了巨大挑战。

2) 驱动要素的耦合性。

配电系统的形态演变是在多种驱动力共同作用下的动态过程，这些驱动力相互之间存在大量协

调、促进、矛盾、制约等复杂耦合影响，并且在不同发展背景下可能表现出截然不同的作用效果，使配电系统整体形态发展方向更加难以预计^[25]。例如，随着多利益主体参与到配电系统建设之中，企业的逐利性和电网的公益性之间、供电可靠性和投资经济性之间、电能质量要求和间歇式可再生能源渗透率之间，往往对电网形态提出差异化甚至矛盾对立的发展要求，必须要考虑多方面驱动力的复合影响^[26]。

另一方面，驱动力的影响模式与客观背景条件密切相关，在不同的时代阶段，基于当前的建设现状和技术储备，往往会形成不同的发展路径。例如，针对负荷的高可靠性用电需求，在传统框架下将促使配电系统增加建设备用线路、提高系统备用容量，而在新的技术背景下则可以通过更加完善的自愈控制体系、微电网和区域自治结构^[27]等方法来解决，使同样的需求驱动力在不同背景下体现出不同的塑造效果。这些多类型驱动力的强耦合性与高度相关性使其对配网形态发展的影响进一步复杂。

3) 形态演变路径的多样性。

随着用户差异化和定制化电力需求的普遍出现，个体用户行为对配电网发展的影响力将愈发显著，这使配电网局部形态特征发展演变的不确定性大大增强，而大量用户需求在不同层次的交叉耦合又使配电系统整体形态发展的可能路径成倍增长，同时形态演变路径的多样性又进一步增加了其复杂性。

为了全面而准确地刻画配电系统形态演变的路径，首先需要在考虑形态特征时空多维属性的基础上，建立具有全面性、代表性和前瞻性的形态特征表述方法，并充分体现不同特征之间的耦合关联与相互影响。在准确描述配电系统形态与发展机理的基础上，建立科学的配电系统形态演变分析模型，并结合对未来能源系统发展需求的认知和预测，探索配电系统不同层次的中远期形态发展目标 and 动态演变路径，这对智能配电系统规划问题的科学发展有着重要意义。

1.2 多要素协调规划的复杂性

随着智能配电网形态不断发展，源-网-荷多元化、差异化、不确定、互动化特征突出，不断丰富的规划要素与场景对规划方法的协调优化能力提出了挑战，成为规划问题复杂性的另一重要来源。

1) 规划要素的行为特征差异。

智能配电系统中各种源-网-荷复杂规划要素，

特别是不确定性要素在数量规模和影响强度上均显著增长^[28],其各自物理本质和行为特征的显著差异进一步增加了分析难度,规划问题混杂性和整体规模大大提升^[29]。

对此,一方面需要发展更加科学有效的多类型要素预测分析手段,充分利用已有认知经验和配用电大数据中的可获取信息,准确预测负荷需求变化、分布式电源出力、典型运行场景等关键信息,以掌握系统的未来发展态势,降低规划问题的不确定性水平。另一方面,需要采用更细颗粒度的规划方法来更充分地考虑不同要素的具体不确定性特征,将各种负荷的随机行为、不同用户行为习惯特殊性、不同形式电源的出力特性等信息都纳入到规划模型中来。这要求面向智能配电系统的规划方法必须具备有效处理这些大规模细颗粒度复杂规划场景的能力,并能够通过有效的模型简化和场景削减方法来捕捉问题的核心本质、限制问题规模。

2) 运行与规划的紧密耦合。

智能配电系统的规划问题与运行问题高度耦合,如何在考虑形态发展变化的前提下,计及系统的运行策略、市场机制、源-网-荷博弈互动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,同样是亟待解决的难点问题,其中的关键主要在于以下两个方面:

其一在于如何刻画规划问题、运行问题和形态演变三者之间的关联影响。配电系统的规划方案限制了其运行方式,而不同的运行特征又将影响源-荷形态的发展。例如,在用电成本较高的地区,基于可再生能源的供能方式往往发展较快;在供电可靠性无法满足用户需要的地区,用户侧储能和发电设备可能较为普遍^[30]。由此,配电网的形态发展与规划设计通过运行环节在一定程度实现耦合,其关联影响需要在规划问题中以准确、高效、量化的手段加以刻画。

其二在于如何在规划问题中考虑复杂运行问题的影响。不同的运行策略会显著影响规划方案的评价结果,而不同的规划方案又限制了运行策略的设计。因此,运行阶段的多类型影响要素,如多利益主体参与的博弈互动、运行过程中的不同优化策略^[31]、多种能源系统之间的相互支撑影响^[32]等,都需要以不同形式在规划问题中加以体现,使智能配电系统规划问题模型更加复杂,并具备了源于运行问题的多尺度动态特征,对复杂运行需求下的智能配电系统优化规划模型与方法提出了更高要求。

3) 复杂场景下的评估与决策。

在上述多方面因素的共同影响下,智能配电系统的规划问题复杂度将沿3个维度显著增长:一是更加丰富的规划对象,例如网架结构、变电站选址、分布式电源、智能软开关、微电网、以及信息通信系统和分散控制终端等,都将出现在规划问题模型中,使决策变量类型与数量大幅增长;二是动态化的约束条件,系统形态发展、运行策略优化、市场交易互动等动态因素大量出现,使规划问题从单一断面发展为具有时空标度的动态连续问题,无论是规划方案的评估还是决策都更加困难;三是多样化的规划场景,多类型影响因素的耦合与交织使规划问题必须考虑更加复杂多样的场景需求,科学高效的推演方法成为应对多场景分析决策的重要手段。通过上述分析,梳理出配电网形态演变下协调规划的若干关键问题,如图3所示。

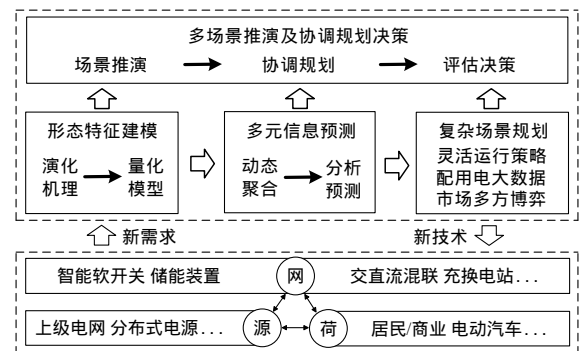


图3 关键问题结构图

Fig. 3 Key issues in distribution system planning

2 复杂形态特征的提取与量化

为了在规划中计及源-网-荷形态发展演变带来的复杂影响,首先需要进行精准的形态特征提取与量化分析,这不仅可以为探索未来智能配电系统的发展目标和演变路径奠定基础,而且有助于揭示规划方案在全目标周期内可能存在的薄弱环节,为复杂不确定性环境下的中长期强适应性规划问题提供解决依据。

传统的配电网规划一般采用可靠性、安全性、电能质量等指标来量化刻画电网特征^[33],但由于电网形态和用户需求的不断变化,这些传统的特征指标已难以满足智能配电系统的规划应用需求。由于智能配电系统的形态特征在时间、空间、物理、价值等多个维度上具有不同属性^[34],需要开发多维特征指标的定量描述方法,进而分析不同时空尺度上形态特征量化耦合与协同机制,将不确定性、灵活性、韧性、互联性等新兴理念转化为可科学度量的

计算指标^[35-36]，并形成统一框架下指导规划设计的指标集合和评估体系，如图 4 所示。目前，相关问题仍然缺乏有效的解决途径，成为制约智能配电系统规划水平提升的关键因素之一。

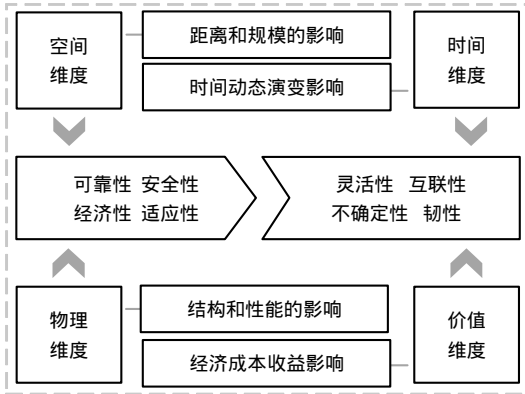


图 4 智能配电系统特征及影响要素

Fig. 4 Characteristics and impact elements of smart distribution system

例如，灵活性将是智能配电系统最为重要的形态特征之一^[37]。智能配电系统的灵活性具有多层次技术内涵，分别对应一次物理架构、二次信息通信和三次市场交易 3 个层面，反映的是配电网充分统筹系统内的可调度资源，以有效应对多重不确定性因素扰动，并维持高水平运行目标的能力。在一次侧，通过将传统的机械式联络开关替换成智能软开关或将智能软开关嵌入环网柜和开关站的关键位置，配电网馈线之间便可以建立柔性可控的连接关系，在广域范围内形成多条能量交互通道，在统筹局部资源的基础上实现源荷之间的准确匹配和快速响应；在二次侧，作为典型的信息物理系统，基于智能量测装置、光纤以太网等物理基础和信息管理、数据挖掘等分析手段，将赋予智能配电系统在信息侧极大的灵活调度空间^[38]；在三次侧，风机光伏等基于可再生能源的发电方式在用户侧大量分散式接入，用户可以依据市场价格机制在电能生成者和消费者之间灵活切换并实施购买或出售行为。

在规划阶段对灵活性特征的量化分析，也主要是从上述 3 个方面进行考虑。在一次侧，不仅要柔性电力电子装备的拓扑结构、端接方式等进行充分的考量，而且要对电磁容量和安装位置进行更为科学的计算，以满足负荷转供的要求^[39]；在二次侧，为了保证海量数据的安全传输，以及控制信号的准确传达，通信中断、延时、误码、冗余等异常状态必须在规划阶段就加以考虑^[40]，避免由于信息侧故障而引起的一次系统功能失败；在三次侧，考虑市场价格机制影响^[41]，分布式电源的选址定容与

接入方案，以及上级变电站所允许的倒送容量，也需要纳入智能配电系统的规划问题之中，以实现投资和运营的最佳收益。

3 规划要素的动态聚合分析预测

在传统配网规划中，供电区域的负荷结构较为简单且用电方式比较稳定，基于历史发展状况直接进行负荷预测便可以获得很好的效果。而智能配电系统承载的规划要素十分丰富，在物理属性和动态特性方面都存在较大差异^[42]。如分布式电源、分布式储能、智能软开关、智能家居等设备的接入具有很大的自由度，节点数目众多且较为分散，就地消纳和反向送电的发生愈加普遍，导致用户侧的电气特性难以进行统一的度量，各种个性化的不确定性因素在规模和强度上均显著增强，极大地增加了分析预测难度，如图 5 所示。

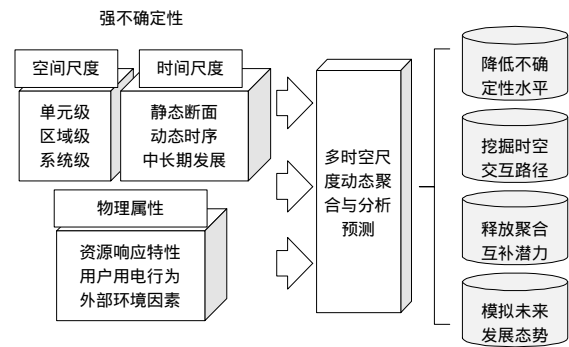


图 5 多时空尺度动态聚合与分析预测

Fig. 5 Multi-dimensional dynamic aggregation and prediction

3.1 多尺度动态聚合

通过多时空尺度动态聚合，凝练出大量源荷响应的共性特征，同时区分出不同源荷匹配的个性特征。在充分结合认知经验和终端数据的基础上，通过场景削减等方式限制规划问题的不确定性水平，从而模拟出典型场景和极端环境下源荷的变化趋势，从而把握规划要素的多尺度特征，为智能配电系统规划设计奠定基础。

例如，分布式发电的出力在很大程度上受自然因素的制约，具有明显的间歇性和波动性特征^[43]；而电动汽车的并网位置和充放电功率往往与一天的出行规律相关^[44]，柔性可控负荷跟随峰谷电价主动调节其耗电功率，在工作日和节假日的使用情况也有很大区别^[45]。由此可见，多时空尺度动态聚合的效果和资源响应特性、用户用电行为及外界环境因素密切相关，如果直接对上述资源的概率分布进行整合会存在较大误差。这就要求在明晰不同资源

工作特性与约束机制的基础上,借助数据监测和参数辨识等手段,分析源荷响应随时间推移、空间转换、场景演替而显示出的变化规律,建立适用于智能配电系统协调规划的统一概率化表征模型,以便深入挖掘不同性质资源之间的时空交互路径和聚合互补潜力,达到弱化不确定性因素影响的目的,提升资源参与系统削峰填谷、平滑功率和虚拟备用等辅助服务的能力。

3.2 多维度分析预测

随着智能配电网规划要素的颗粒度不断缩小,需要在获得大量分散资源聚合特性的基础上预测其在规划周期内的行为规律;另一方面,由于规划场景要素丰富且特性各异,其相互之间存在的复杂关联耦合影响更为显著,需要通过计及多维度要素的分析预测方法来掌握其在规划周期内的发展路径。由于用户侧同时具备发电、储电和用电的多重属性,角色灵活转变的同时,其对外特性还受局域内地理气象条件以及市场政策的影响。这使得无论是规划区域的年最大负荷预测,还是规划子区域的负荷空间分布预测,都会极大地区别于传统规划中的负荷预测方法^[46]。

倘若将分布式电源简单地看作是具有负出力特性的负荷,那么很多针对传统配电系统规划问题的负荷预测方法仍然具有重要的借鉴作用。然而,完全照搬传统负荷预测方法难以适应智能配电系统不同类型可控资源的差异化随机特征,也无法对大量接入的分布式储能进行有效预测,因而无法给出满足智能配电系统规划要求的源-荷-储综合预测信息,所以必须在获取各规划要素动态聚合结果的基础上,进一步深入挖掘它们间的联动关系,明确它们间的互动模式,发展源-荷-储协同预测新方法。

4 多要素影响下的复杂场景规划

未来智能配电系统规划问题的主要特征之一是多重要素与规划之间的相互影响和映射关联,如图6所示。考虑运行层面的灵活策略调整、配用电大数据的信息支撑、市场博弈的多方协调等诸多方面,将进一步加剧规划场景的不确定性和复杂性,同时也将给配网形态演变下的规划理论创新提供新的思路和技术手段。

4.1 计及运行特征的精细规划

传统配网规划的核心思想是以最小的投资承载电网最恶劣的运行状况,但由于关注的的数据与模型颗粒度并不一致,配电网规划层面的优化配置问

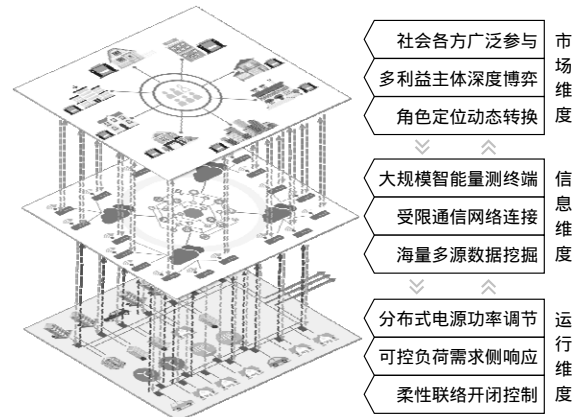


图6 多要素影响下复杂场景规划

Fig. 6 Planning under complex scenarios with multi-factor impact

题和运行层面的优化控制问题往往是割裂开来的,其不足显而易见:规划方案无法充分考虑实际运行策略中各种不确定性因素的复杂影响,往往导致资源的浪费和闲置。

在源-网-荷三者界限日趋模糊的新形态背景下,运行问题和规划问题高度耦合。因此需要在规划阶段就充分计及智能配电系统运行状态下源-网-荷交叉互动的不确定性特征和灵活运行策略的影响,使规划方案能够充分挖掘和有效利用各种可控资源,通过规划与运行问题相协调提升方案制定的科学性,从而实现最大的经济效益。

通过分析预测未来复杂不确定性因素的影响,获得可能出现的场景序列并进行场景划分和典型场景生成;然后针对各个场景出现的问题,如线路过载、电压越限、清洁能源消纳困难等,进行灵活资源调节,实现运行策略优选。除了采用基于预测和模拟的随机优化方法,另一种可行的思路是考虑上述问题最恶劣的情形,在电网安全运行边界之内利用鲁棒优化保证设计裕度,形成优化规划方案^[47]。

在计及运行策略影响时,电源侧分布式发电的有功无功支撑调节、网络侧柔性联络装置的开闭调节、负荷侧可控负荷的需求侧响应调节等都需统筹考虑,建立系统形态特征、不确定性运行策略、多场景规划运行等深度融合的多阶段优化规划模型,以便最大限度地利用灵活可调控资源来保证源荷平衡,减少运行策略调整对电网规划方案的影响,降低配网建设投资成本,提高设备资产利用率。

4.2 多源数据驱动的演进规划

智能配电系统的全面数字化、信息化与智能化使相关数据量成指数形式增长^[48]。除了直接反映系统的运行状态,这些配用电大数据中还蕴含着用户

的用电规律、配电系统发展模式和变化趋势等极为重要的信息，同时也具有海量、多源、异构、低信息密度等特点^[49-50]。实现多时空尺度配用电大数据的深度融合和挖掘，可以有效提升规划人员对电网现状的评估准确度和对电网未来发展趋势的预测精细度。将大数据分析与人经验有机融合，乃至逐步取代人工经验方法，构建以数据贯穿驱动的配电系统规划、建设、运行、评估、改造等全过程闭环链条，是智能配电系统协同规划未来发展的重要方向，如图 7 所示。

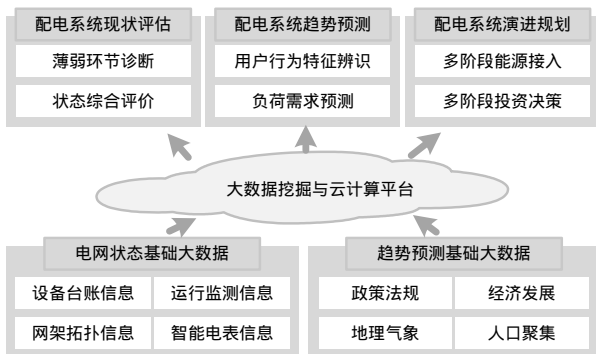


Fig. 7 Evolutionary planning of distribution system supported by big data

配用电大数据信息庞杂，目前仍然缺乏必要的信息管理和数据挖掘机制，在很大程度上限制了智能配电系统的规划水平。由于传统配电系统中不涉及海量数据的处理，所以有必要尽快开展信息层面相关技术的研究工作，以适应复杂数据环境下规划设计新的发展需要。

其中典型技术主要包含：基于配用电大数据的负荷特征挖掘技术，能够实现用户行为特征辨识、配电系统负荷发展预测、多时间尺度负荷需求场景设计等功能，可以为规划问题提供更精确的用电侧信息支撑；面向系统现状评估的大数据分析技术，是在充分利用设备参数、运行数据、网络拓扑与地理数据等多源异构信息的基础上，构建以状态综合评价或薄弱环节诊断为目标的智能配电系统优化规划模型；智能配电系统演进规划技术，主要包括基于大数据的清洁能源多阶段接入规划、配电系统多阶段投资效益预测与决策、配电系统投资效果后评价及合理性分析等。

4.3 多方市场博弈的协调规划

电力市场的兴起使配网侧形成多利益主体相互博弈的形势，投资、运营与监管各方相互制衡，反复磋商成为制定配电系统规划方案的新常态，如图 8 所示。

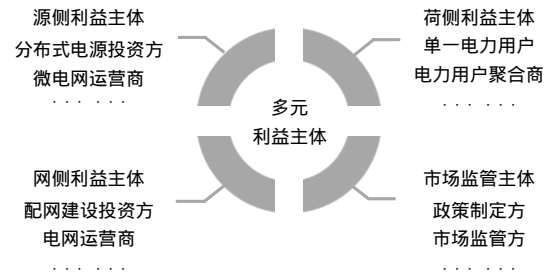


Fig. 8 Multi-stakeholders in distribution systems

随着电力市场开放程度不断提高，源-网-荷建设布局更加错综复杂，智能配电系统的规划对象和利益主体与传统配电系统相比也更加宽泛，包括配电系统投资方、运营方、使用方和监管方等在内的多元主体拥有各自不同的利益诉求，并呈现出多方深度博弈的态势，以社会效益最大化为目标的规划模型已不再适用，网架结构设计、电力装备更替、网络扩容规划等内容也不再由单方面所决定^[51]。因此，在智能配电系统规划问题中，必须要在多方博弈的框架下寻求整体利益的均衡和最大接纳度，以实现经济、社会和环境效益的最大化，实现增量配网与存量配网、网络新建和网络扩容、电网运营商与售电运营商的充分协调与有效协同^[52-53]。

在开放的市场环境下，多利益主体的诉求各有侧重，对博弈结果的承受力也不尽相同，且同一主体在不同场景下可能存在角色的转换。在建模分析过程中，博弈方的选择将直接影响规划方案的结果，如分布式电源建设方与网络运营商之间的售购电博弈，将直接影响分布式电源的接入位置、接入容量以及配套的售电方案、定价方案和运营模式；电力用户与网络运营方的需求响应博弈，将直接影响网供负荷需求的大小和网络架构的规划设计。因此，必须根据规划需求对利益主体的归属进行梳理，明确其主要利益诉求，并给出合理的计算方法，划定各方可接受程度的阈值区间，进而模拟多方博弈过程，最后实现博弈均衡条件下的智能配电系统协调规划。

通过均衡博弈下的多方协调规划，各利益主体能够在规划阶段即充分计及市场环境下可能出现的各种不确定性因素影响，避免重复投资和冗余建设，对提升配电网整体规划水平、优化资产利用率、提高投资回报效益等具有重要意义；同时，结合多市场主体不同的利益诉求，通过市场环境下的竞争、激励和监管机制，既能够充分调动各方参与配网规划建设的积极性和主动性，又能够兼顾社会、

经济和环境效益,同时也能够更好地满足用户差异化的用能需求,有助于提升整体智能配电网规划建设与运行服务水平。

5 多场景推演及动态协调决策

当前,配电系统正处于从优质的电力供应平台向综合性能能源服务平台升级的过渡阶段,组织构成和形态特征都在发生剧烈变化,技术应用和运营方式持续推陈出新,决定了智能配电系统未来的发展将是一个充满不确定性的演变过程。原来单次孤立的规划方法在适应性上将受到极大的限制,单纯依靠某一算法获取理想的规划结果也是不现实的。因此,发展智能配电系统多场景推演及动态协调决策的方法和工具,已成为亟待解决的关键问题。

5.1 多场景推演

多场景推演技术实质上是在连续的时空标度下,综合考虑系统在运行、信息、市场等多重维度上的动态要素,充分感知系统未来一段时间的发展态势,运用场景融合与分裂等方法,构建具有强适应性和强延展性的场景集。与传统方法相比,多场景推演更加强调场景变化和配电网发展的互动式过程刻画,即一方面关注配电网自身特征在不同场景和决策方案下的变化过程,同时也需要考虑配电网特征变化对用户负荷分布、用电行为模式等场景要素的关联影响,并且在必要时可以实现协商机制下的决策干预等,从而能够全面覆盖配电网可能的动态演化路径,有利于提高规划场景分析的灵活性、准确性和针对性。

通过多场景推演,可以将难以用数学模型表示的不确定性场景转变为多个较易求解的确定性场景,避免建立十分复杂的随机性模型,降低建模和求解的难度。构造大规模场景集虽然可以很好地保证模拟结果的精度,但增加了求解目标函数及相关约束的计算负担。为解决不确定性模型精度与计算复杂度的矛盾,可先通过生成足够多的场景满足模型的精度要求,再运用场景降维法缩减场景数量以满足模型的实用性要求。

在多元主体博弈的优化过程中,若将一些利益主体的诉求考虑为问题求解的约束条件,则会在一定程度上影响原有场景推演的规模和边界。可以按照利益诉求的重要程度进行整合排序,突出博弈关系中的主要矛盾和关键要素;然后通过持续推演获得一系列场景断面,根据具体时空条件的转换进行动态更替,从而得到满足各方诉求制约关系的多场

景演变过程。此外,基于历史数据库的多源数据分析方法可以为不同阶段规划方案的滚动修正提供基础数据支持,以提高不确定环境下规划方案的连续性和准确性。

5.2 动态协调决策

在智能配电系统规划工作中必须实现多利益主体之间、用户与配网之间、运行策略与规划方案之间、近期与中远期之间的协调,需要随着规划场景的推演更迭进行动态调整,以保证不同阶段规划方案对多种不确定运行场景的适用性。这就需要参照科学量化后得到的指标体系,准确分析并综合评价不确定发展过程中源-网-荷-储互动模式等要素对规划方案的影响,形成稳定高效的智能配电系统动态协调决策方法,在场景推演的基础上获取合理的规划方案。

动态协调决策的任务是既要给出未来目标年的系统发展方案,又要获取从现状年到目标年的发展路径。在较长的规划期间,不同推演方式下的场景集各有侧重,导致规划方案数目众多,如何准确快速地完成方案评估与决策是面临的又一难题。虽然可以采用划分若干静态断面的方式进行分析,但由于不同规划阶段之间存在联系,很难获得全时段的最优解,更无法给出确切的各个时段的计划安排。对此,动态协调规划决策旨在借助多场景推演工具,充分计及规划决策和场景发展变化之间持续的、动态化的互动过程,满足在全规划周期内的最优决策需求。随着人工智能技术,特别是深度强化学习技术(deep reinforcement learning, DRL)的发展,通过多要素之间动态交互实现最优路径求解成为可能,这为未来动态协调规划决策提供了一种可行手段。

6 结论

配电系统的形态演变是在用户需求变化和技术水平发展等多重因素共同驱动下的动态过程,并在近年来显著加速,促使规划问题所需要考虑的场景、对象、需求、目标等不断变化。配网运行环节的灵活策略、配用电信息源与信息量的爆炸增长、市场博弈环境下的多方协调等诸多新要素使规划问题的复杂性显著提升;同时由于规划决策与形态发展之间的密切动态关联,使智能配电网的规划问题难以通过断面化手段科学求解。因此,以具有前瞻性的视角,开展智能配电系统形态演变下的规划方法研究,有着重要科学价值与现实意义。

本文从配电系统源-网-荷形态演变的现实背景出发,对系统形态特征与规划问题之间的内在关联进行了剖析。围绕复杂形态特征的提取与量化、规划要素的动态聚合与分析预测、多要素影响下的复杂场景规划、多场景推演与协调决策等关键问题进行了阐述,对未来需要关注的重点问题和研究方向进行了探讨与展望。其最终目标是,在考虑配电系统形态演变、多类型不确定性特征、规划与运行交易耦合等因素的影响下,将多样化的技术需求进行有效的模块化集成,形成一套较为完整的涵盖规划、推演与决策的分析方法与实用工具,而这已经成为一项高度复杂的系统性研究课题。

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 邢海军,程浩忠,张沈习,等.主动配电网规划研究综述[J].电网技术,2015,39(10):2705-2711.
Xing Haijun, Cheng Haozhong, Zhang Shenxi, et al. Review of active distribution network planning[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2705-2711(in Chinese).
- [3] Shen Yu, Xu Jin, Yue Yuanyuan, et al. Comprehensive coordinated model of active distribution network planning [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Power System Technology. Wollongong, NSW, Australia: IEEE, 2016.
- [4] Khator S K, Leung L C. Power distribution planning: a review of models and issues[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1151-1159.
- [5] Tabares A, Franco J F, Lavorato M, et al. Multistage long-term expansion planning of electrical distribution systems considering multiple alternatives[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1900-1914.
- [6] 王成山,宋关羽,李鹏,等.考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J].中国电机工程学报,2017,37(7):1889-1896.
Wang Chengshan, Song Guanyu, Li Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1896(in Chinese).
- [7] Bloemink J M, Green T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 911-919.
- [8] Jin Xiaolong, Wu Qiuwei, Jia Hongjie. Local flexibility markets: literature review on concepts, models and clearing methods[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114387.
- [9] Morstyn T, Farrell N, Darby S J, et al. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants[J]. Nature Energy, 2018, 3(2): 94-101.
- [10] 韦晓广,高仕斌,臧天磊,等.社会能源互联网:概念、架构和展望[J].中国电机工程学报,2018,38(17):4969-4986.
Wei Xiaoguang, Gao Shibin, Zang Tianlei, et al. Social energy internet: concept, architecture and outlook[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4969-4986(in Chinese).
- [11] Zhang Xiaping, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [12] 谈金晶,李扬.多能源协同的交易模式研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6483-6496.
Tan Jinjing, Li Yang. Review on transaction mode in multi-energy collaborative market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6483-6496(in Chinese).
- [13] 王成山,罗凤章,张天宇,等.城市电网智能化关键技术[J].高电压技术,2016,42(7):2017-2027.
Wang Chengshan, Luo Fengzhang, Zhang Tianyu, et al. Review on key technologies of smart urban power network[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2017-2027(in Chinese).
- [14] Nikmehr N, Ravadanegh S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [15] Krause T, Andersson G, Fröhlich K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 15-27.
- [16] Yilmaz M, Krein P T. Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5673-5689.
- [17] Zou Kai, Agalgaonkar A P, Muttaqi K M, et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 112-123.
- [18] Mengelkamp E, Gärtner J, Rock K, et al. Designing microgrid energy markets: a case study: The Brooklyn Microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 210: 870-880.
- [19] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展

- 与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23(in Chinese).
- [20] Fang Xi, Misra S, Xue Guoliang, et al. Smart grid—the new and improved power grid: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(4): 944-980.
- [21] Zare M, Azizpanah-Abarghoee R, Hooshmand R A, et al. Optimal reconfiguration of distribution systems by considering switch and wind turbine placements to enhance reliability and efficiency[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(6): 1271-1284.
- [22] Ceseña E A M, Capuder T, Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 348-357.
- [23] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.
Xiong Xiong, Ji Yu, Li Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802-6813(in Chinese).
- [24] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌, 等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489.
Guo Qinglai, Xin Shujun, Sun Hongbin, et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489(in Chinese).
- [25] 乐健, 柳永妍, 叶曦, 等. 含高渗透率分布式电能资源的区域电网市场化运营模式[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3343-3353.
Le Jian, Liu Yongyan, Ye Xi, et al. Market-oriented operation pattern of regional power network integration with high penetration level of distributed energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3343-3353(in Chinese).
- [26] Manshadi S D, Khodayar M E. A hierarchical electricity market structure for the smart grid paradigm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1866-1875.
- [27] Zheng Wendi, Cai Jinding. A multi-agent system for distributed energy resources control in microgrid[C]// Proceedings of the 2010 5th International Conference on Critical Infrastructure. Beijing: IEEE, 2010.
- [28] Salehi J, Haghifam M R. Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 321-333.
- [29] Sioshansi R. Evaluating the impacts of real-time pricing on the cost and value of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 741-748.
- [30] 吴志, 刘亚斐, 顾伟, 等. 基于改进 Benders 分解的储能、分布式电源与配电网多阶段规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4705-4715.
Wu Zhi, Liu Yafei, Gu Wei, et al. A modified decomposition method for multistage planning of energy storage, distributed generation and distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4705-4715(in Chinese).
- [31] Geramifar H, Shahabi M, Barforoshi T. Coordination of energy storage systems and DR resources for optimal scheduling of microgrids under uncertainties[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(2): 378-388.
- [32] Li Zhigang, Wu Wenchuan, Shahidehpour M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 12-22.
- [33] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 50-57.
Xiao Jun, Wang Chengshan, Zhou Min. An IAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57(in Chinese).
- [34] 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(in Chinese).
- [35] Nosair H, Bouffard F. Flexibility envelopes for power system operational planning[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 800-809.
- [36] Bie Zhaohong, Lin Yanling, Li Gengfeng, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [37] 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(in Chinese).
- [38] 栾文鹏, 王冠, 徐大青. 支持多种服务和业务融合的高级量测体系架构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5088-5095.
Luan Wenpeng, Wang Guan, Xu Daqing. Advanced

- metering infrastructure solution supporting multiple services and business integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5088-5095(in Chinese).
- [39] Wang Chengshan, Song Guanyu, Li Peng, et al. Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 189: 301-309.
- [40] 俞斌, 郭创新, 王越, 等. 考虑信息系统作用的电力系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 7-13.
Yu Bin, Guo Chuangxin, Wang Yue, et al. Research on the reliability of the power system considering impacts of the information system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 7-13(in Chinese).
- [41] Rahimi F, Ipakchi A. Using a transactive energy framework: providing grid services from smart buildings[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(4): 23-29.
- [42] 钟清, 孙闻, 余南华, 等. 主动配电网规划中的负荷预测与发电预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3050-3056.
Zhong Qing, Sun Wen, Yu Nanhua, et al. Load and power forecasting in active distribution network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3050-3056(in Chinese).
- [43] Martins V F, Borges C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [44] Gan Lingwen, Topcu U, Low S H. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 940-951.
- [45] Papadaskalopoulos D, Strbac G. Nonlinear and randomized pricing for distributed management of flexible loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1137-1146.
- [46] 郑睿程, 顾洁, 金之俭, 等. 数据驱动与预测误差驱动融合的短期负荷预测输入变量选择方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 487-499.
Zheng Ruicheng, Gu Jie, Jin Zhijian, et al. Research on short-term load forecasting variable selection based on fusion of data driven method and forecast error driven method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 487-499(in Chinese).
- [47] 高红均, 刘俊勇, 魏震波, 等. 主动配电网分层鲁棒规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1389-1400.
Gao Hongjun, Liu Junyong, Wei Zhenbo, et al. A bi-level robust planning model of active distribution network and its solution method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1389-1400(in Chinese).
- [48] Diamantoulakis P D, Kapinas V M, Karagiannidis G K. Big data analytics for dynamic energy management in smart grids[J]. Big Data Research, 2015, 2(3): 94-101.
- [49] 刘科研, 盛万兴, 张东霞, 等. 智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 287-293. a
Liu Keyan, Sheng Wanxing, Zhang Dongxia, et al. Big data application requirements and scenario analysis in smart distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 287-293(in Chinese).
- [50] Wang Qianggang, Wang Jian, Lei Chao, et al. Short-term planning model for distribution network restructuring based on heat maps[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(14): 3569-3577.
- [51] 黄淳驿, 王承民, 谢宁, 等. 基于运行-市场强耦合特性的配电网扩展规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4716-4731.
Huang Chunyi, Wang Chengmin, Xie Ning, et al. Distribution expansion planning based on strong coupling of operation and spot market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4716-4731(in Chinese).
- [52] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
Lu Qiang, Chen Laijun, Mei Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017(in Chinese).
- [53] Nguyen P H, Kling W L, Ribeiro P F. A game theory strategy to integrate distributed agent-based functions in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 568-576.



王成山

在线出版日期: 2020-03-20。

收稿日期: 2019-11-01。

作者简介:

王成山(1962), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统安全性分析、城市电网规划、分布式发电系统与微电网方面的研究工作, cswang@tju.edu.cn;

王瑞(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网优化运行与城市电网规划等, rwang@tju.edu.cn;

于浩(1988), 男, 博士, 讲师, 研究方向为智能配电网与综合能源系统运行、仿真与优化, tjuyh@tju.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Challenges on Coordinated Planning of Smart Distribution Networks Driven by Source-network-load Evolution

WANG Chengshan¹, WANG Rui¹, YU Hao¹, SONG Yi², YU Li³, LI Peng¹

(1. Tianjin University; 2. State Grid Economic and Technology Research Institute Co., Ltd;
3. Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid)

KEY WORDS: distribution network; morphology evolution; coordinated planning; uncertainty

Distribution networks that deliver the electricity from transmission systems to end consumers constitutes a critical part of power system. Scientific design and planning are essential for the high-quality construction, extension, and operation of distribution networks. Rapid evolution of the sources, networks and loads at distribution level brings new challenges to the planning in smart distribution networks (SDN). The methods considered need to “actively” coordinate and guide the development of sources and loads, which is the precondition to fully release the potential of complex structures. On the other hand, the planning scheme should be able to “passively” accommodate the unpredictable changes caused by the advances in technologies or changes in policies.

Driving forces for the evolution of distribution networks are diversified. The demand of consumers for high-quality power supply is the primary factor that stimulates the structure of distribution networks evolving from being radial to meshed. The technical progresses facilitate the adoption of new equipment like distributed generators, soft open points, energy storage systems, and micro-phasor measurement units, making the network comprehensively observable and controllable. Due to the coupling among these driving forces, the evolution of distribution networks becomes a complex problem and must be properly addressed in planning.

Fig.1 illustrates the issues in coordinated planning of SDN with the evolutions of sources, networks and loads.

1) Feature extraction and quantification. The SDN has evolved both in structure and configuration for improved power service. New indexes like flexibility, resilience, and connectivity are needed to describe the enhanced operational capabilities of SDN. These indexes should be quantified in terms of time, space, physics, values, etc., and thus to provide measurable criteria for planning.

2) Dynamic aggregation and prediction. The integration of distributed generators, energy storages,

and intelligent home applications makes the uncertainty intensified and user characteristics individually tailored. The sources and loads should be dynamically aggregated according to their behavioral similarities to relieve the computational burden for prediction and planning.

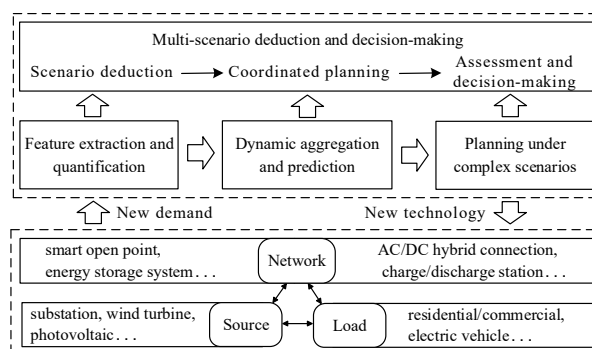


Fig. 1 Key issues in distribution system planning

3) Planning under complex scenarios. The planning of SDN is highly coupled with the flexible operation strategies, including both continuous power dispatching and discrete switching controls. Big data analytics becomes an effective approach to explore the energy consumption patterns based on the historical data. The participation of different stakeholders, including the investors, operators and users, formulates a game-based problem, which means the planning should make an equilibrium for the benefit of the whole.

4) Multi-scenario deduction and decision-making. The planning of SDN is a long-term and dynamic process. The multi-scenario deduction is intended to determine the possible evolution paths with consideration of their interactions with varied decisions in each stage. Then the optimal planning path that coordinates and leads the development of SDN throughout the entire period is obtained.

This paper emphasizes the importance of coordinated planning of SDN in condition of source-network-load evolutions. Some instructive perspectives of feature extraction, characteristic prediction, scenario deduction and path evaluation are proposed for future researches.