

智能配电系统规划关键问题与研究展望

袁 博¹,邵 华¹,贺春光¹,王 颖¹,杨 挺²,王 莹³

(1. 国网河北省电力公司 经济技术研究院,河北 石家庄 050000;

2. 天津大学 电气与自动化工程学院,天津 300072;3. 天津大学 教育学院,天津 300072)

摘要: 结合“源-网-荷”概念阐述智能配电系统概况并给出一种全面架构,重点针对智能配电系统规划,从 2 个方面展开分析研究。总结分析近年来智能配电系统规划研究成果中的关键问题,按照传统分类规划流程对智能配电系统规划关键问题进行综述和展望。在此基础上,对智能配电系统的适应性规划方法进行深入研究,提出未来适应性规划的具体思路和实现方法,包括“源-网-荷”综合规划、规划运行耦合规划、能量信息融合规划、面向消纳提升和低碳的新目标规划、其他规划方向和支撑技术等。

关键词: 智能配电系统; 架构; 综合规划; 适应性规划方法

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.011

0 引言

化石能源日益枯竭和低碳经济模式下,新能源等低碳电源和电动汽车等新型负荷大规模接入,电力市场改革继续推进,配电系统模式发生重大变化^[1]。智能配电系统 SDS(Smart Distribution System)作为智能电网建设的关键,为双向潮流、电压水平、供电可靠性等新问题带来的规划挑战提供了解决方法^[2]。

SDS 是具有灵活、可靠网络架构,通过对高渗透率分布式电源 DG(Distributed Generation)、储能、电动汽车、可控负荷和需求侧等资源灵活控制实现配电网优化运行能力的复杂系统^[3]。SDS 的规划对其构建和运行控制具有重要意义。目前对 SDS 的规划已有大量研究,但仍处于探索阶段,对其关键问题的系统分析和适应性规划方法的研究还有待探讨。

本文系统综述 SDS 规划关键问题及其研究展望,重点对适应性规划方法进行探讨。首先,按照“源-网-荷”新概念对 SDS 研究进行概述,阐述一种全面的架构;然后,在 SDS 规划研究现状基础上,按照传统规划思路对规划关键问题进行综述和展望;在此基础上,重点探讨未来 SDS 的适应规划思路并提出其实现方式;最后对全文进行总结和展望。

1 SDS 研究概述

SDS 的研究随着智能电网建设已广泛展开。系统的灵活调度方式使其表现出主动性,可解决“源-网-荷”优化融合及大规模 DG 并网等问题^[4]。DG 和储能的大规模灵活消纳是智能配电的重要目标^[5],SDS 同时还强调用户互动,资源灵活调度和供电高可靠性也是其重要目标^[6]。

国际大电网会议(CIGRE)的 C6.1 工作组指出智能配电应具备主动控制功能,满足交互式信息平台、优化调度和可靠供电是 SDS 的基本要求^[7]。与传统配电相比,智能配电具备分散式管理、灵活网络结构、优化控制方式等差异^[8]。

SDS 是“源-网-荷”优化融合的关键一环,笔者按照“源-网-荷”的新概念,将 SDS 的特点、功能定位和关切问题概述如下。

(1)在能源侧,SDS 支持多类型 DG 和储能的“即插即用”与灵活调度,实现多能源联合运行。新能源接入具备高分散性、强可控性和大规模消纳性。配电系统 DG 规划及其控制方式、多能源联合供应模式等仍是目前关切的主要问题。

(2)在电网侧,系统具备更高的安全性和可靠性,拥有先进分层控制方式,具备高效接纳“源-荷”资源和控制网络拓扑的能力,并可通过快速诊断和网络重构具备自愈能力。灵活 SDS 架构、协调控制方式、SDS 综合规划、系统保护和故障诊断等均是 SDS 需要进一步研究的关键问题。

(3)在负荷侧,SDS 具备与用户高度交互的能力,能够实现负荷分类可控和电动汽车高效管理。需求侧管理及柔性负荷控制是促进需求侧资源高效利用的动力。“源-荷”新资源影响下的 SDS 负荷预测、需求主动管理策略、电动汽车充电布局、柔性可控负荷的利用等,均是未来智能配电中需要继续探讨的问题。

(4)从“源-网-荷”融合角度来看,SDS 通过电网侧先进技术实现“源-荷”侧资源高效利用。系统具备极强的可观、可测和可控性,不同能源系统之间和不同网络之间具有强耦合性,表现出规划运行的相互影响和多重信息的高度融合等集成化特点。同时,SDS 需要高级量测体系、信息交互与大数据平

台、精准的计算与预测功能、强大的运行模拟功能等技术的有效支撑。

SDS 要求灵活系统架构为基础。“闭环设计、开环运行”的传统配电网架构仅实现电力配送和故障紧急处理^[9],难以适应 SDS 有源特性^[10]。因此,SDS 体系架构和网络拓扑更加复杂且灵活。文献[11]提出按照主站层、子站层和终端层构建智能配电体系结构,强调配电系统功能划分,但缺乏与电能配送系统的融合。按照配电系统的资源进行构建更具全面性,电能和诸多信息流在 DG、电力用户和配电系统之间交互,形成有机系统^[12]。文献[13]对架构进行扩展,按照用户层、低压配电、中压配电和高压配电 4 层系统构建了 SDS 的综合架构,指出高度融合信息物理系统的配送交互本质。在该架构基础上考虑其不足,计及功能体系和配送体系的融合,从传统电能配送系统结构和智能系统功能划分观点,建立 SDS 体系架构如图 1 所示。

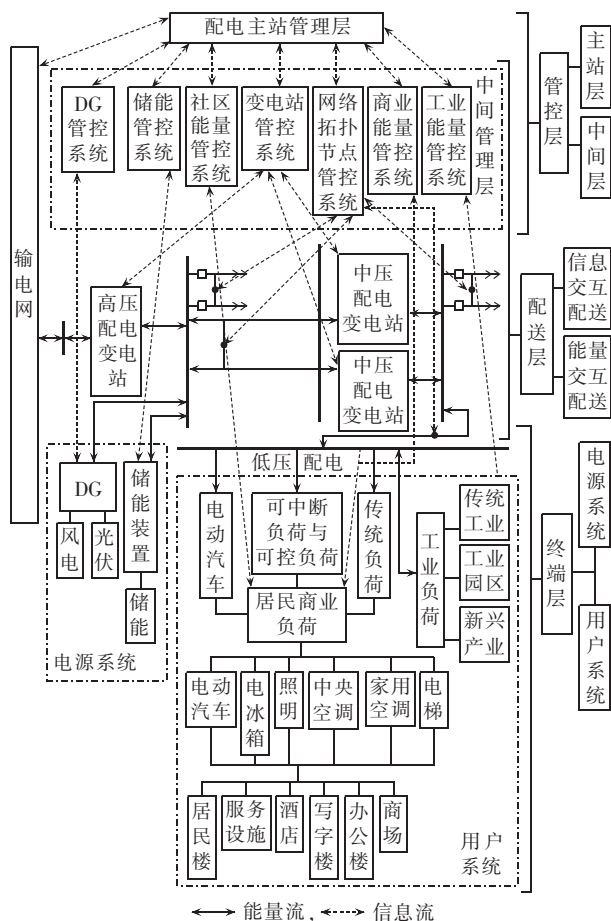


图 1 SDS 体系架构

Fig.1 Architecture of smart distribution system

SDS 架构由管控层、配送层和终端层组成,各层相互交叠,能量流和信息流高度融合且具有双向特性。终端层由电源和用户 2 个系统组成,管控层由主站层和中间层构成。各管控系统与“源-荷”资源交互,高效感知终端信息并分析反馈控制信号,实现

灵活拓扑。配送层进行能量流和信息流的融合配送,信息流包括监测信号、控制信号和响应信号等。

SDS 的关键技术都与规划和运行 2 类问题相关,其中适应性规划方法为系统构建和运行提供保证^[14],SDS 规划是领域内关切的重点问题。

2 SDS 规划关键问题

传统配电规划多为基于成本效益和可靠性的多阶段规划,而选址定容模型与备选方案的建立一般采用容载比法^[15]。SDS 涉及多类能源高效利用、多种负荷广泛接入和多个网络协调运行,其规划是一个多类型、多目标、多边界的综合协调规划^[16]。DG、新型负荷和配电网灵活控制是 SDS 规划的新挑战。

2.1 电源规划与负荷预测

2.1.1 DG 规划

DG 和储能系统规划多通过成本最小和接入容量最大确定选址定容方案^[17-18],而近年来以 SDS 运行为目标的规划模型被广泛关注。文献[19]重点研究了提升供电可靠性的 DG 优化配置问题。文献[20]以 DG 接入配电系统的网损最小和电压水平稳定性保持最优为目标,按 DG 类型建立规划模型。文献[21]着重考虑不确定性建立 DG 选址定容模型,以运营商总成本最小为目标。国内储能系统建设相对 DG 滞后且建设集中,文献[22]研究了分布式储能系统的选址定容模型,实现投资维护费用和系统运行年费用最小。

目前,储能系统推广的最大障碍仍是成本收益问题,配电系统消纳能力则是 DG 发展的制约因素。未来 DG 与储能的研究,应在减少传统发、输电侧投资费用和系统运行成本方面进行挖掘,考虑供电可靠性和系统运行特性方面的价值研究优化配置方法^[23]。

2.1.2 综合能源规划

多类可再生能源的大规模消纳是 SDS 的重要特征。能源多样化导致电源结构发生变化,而电源结构反制约着 DG 的消纳能力。综合能源规划和多类型电源协调规划是未来电源规划的方向。文献[24]研究了广义电源的优化配置问题,以有功网损灵敏度、电容器组投资效益等为目标,考虑电容器组的综合规划建立双层模型。其相比以投资收益最大和切除量最小分别为上、下层目标的双层规划模型^[25]更具适用性,但采用解析方法的 DG 选址定容上层规划难以适应大规模 DG。文献[26]建立了风力-火电联合发电的扩建模型,提出考虑成本和可靠性的联合电源规划方法。文献[27]讨论了大规模风电消纳背景下的电源规划,以充裕度和可靠性为基础,以成本效益为目标,求解规划方案并分析最优电源结构。

然而,DG 与输电网及其接入电源的融合规划、

全面电源综合规划、多类型电源与多类型用能负荷的联合规划尚未展开,笔者认为未来应作为关注重点。

2.1.3 负荷预测

SDS 中用能负荷可控度和不确定性增加,系统对电动汽车和可中断负荷的接纳控制能力影响配电系统规划。用户的行驶规律是电动汽车充电需求的主要影响因素,电动汽车类型和充电功率也是密切影响电动汽车负荷需求的条件^[28]。考虑用户行驶时空分布特性的电动汽车负荷预测方法是未来电动汽车负荷预测的主要思路^[29-30]。文献[31]对微网中的潜在可控负荷进行建模并探讨其优化策略,但其在微网中的应用效果难以推广到 SDS。

笔者在此提及,建立智能配电的适应性负荷分类方法及各类负荷的特性模型、建立需求响应对负荷的影响模型、考虑电动汽车负荷特性及其对规划的影响等均是未来 SDS 负荷预测的重点。

2.2 SDS 综合规划

2.2.1 新型网架规划

电源模型和负荷预测的不确定性与灵活网架结构必然导致网架规划更加复杂,但变电站的选址定容和线路规划依旧是规划重点问题。由于 DG 和新型负荷的影响,SDS 的变电站直供负荷和负荷密度可能发生不确定性变化,区域变电所需总容量波动较大,但考虑 DG 可信出力而导致变电总容量需求量有所减少。在 SDS 中多电源与负荷共存状态下,网架规划考虑网络重构等运行模式而变得异常复杂。备选方案比选法也应从技术性、经济性和适应性等诸多方面进行比较。由于变电站直供负荷降低,未来出线回数也将呈现下降趋势,而线路走廊的规划将成为复杂 SDS 建设的制约因素,因此规划工作宜在“适度超前”原则下进一步提前筹划。

SDS 中 DG、可控负荷和灵活控制模式是网架规划的新特点。DG 消纳最大和接入容量最小的网架规划方法^[32]适应智能配电的新能源特点,文献[33]以接纳 DG 容量最大和单位用电量综合经济代价最小为目标建立双层网架规划模型,考虑 DG 和负荷双重因素。以社会总成本最小建立电动汽车充电站的最优规划模型^[34]是计及电动汽车的配电系统规划的基础,文献[35]考虑充电站成本建立配电系统规划目标,研究充电站布局优化下的配电系统规划。研究表明,网架规划中建立综合考虑 DG 出力不确定性、储能和新型负荷的规划方法更适用于 SDS^[36]。

2.2.2 SDS 综合规划

SDS 规划方法愈加表现为“源-网-荷”相互影响、高度融合的综合规划,即考虑多类 DG、可控负荷和灵活管控等扩展因素的电源规划与网架规划相互协调的综合规划。文献[37]提出一种配电系统综合动

态规划方法,集成投资运行成本、上级电网获取的电能、可靠性成本、系统网损成本等各方面因素的多目标综合规划,通过场景模拟分析 DG 引起的不确定性并动态求解规划方案。文献[38]综合各成本要素进行多目标建模,考虑了 DG、负荷和网络重构的不确定性。文献[39]则考虑管理调度的 DG 切除,涉及峰谷负荷、 $N-1$ 约束、功率平衡、节点电压和支路容量越限等诸多方面的运行约束。文献[40]进一步将储能和需求响应进行建模,提出一种综合考虑 DG、储能、需求侧的建模思想。

在归纳相关研究的基础上,笔者认为,未来 SDS 规划的研究应该适应系统规划特点,在以下方面全面展开。

a. 系统化建立“源-网-荷”资源综合协调的规划思路,着重研究考虑新型负荷与 DG 的配电系统综合规划。

b. DG、储能、电动汽车、可控负荷的接入和需求侧互动,导致负荷预测和电源出力不确定性增强,不确定性建模直接影响规划效果。研究 SDS 中不确定性要素、指标及建模方法是重要关注点。

c. SDS 规划模型除涉及传统经济性、安全性、可靠性等目标外,还需考虑提升能源利用效率、社会效益和系统功能适应性的目标。未来对多维度规划目标及全面考虑运行适应性边界条件的建模方法研究还需在探索基础上继续深入,对成本与效益重新界定,考虑多维效益且灵活调控,建立多样性和动态性的规划模型。

d. SDS 运行方式灵活多变,规划运行强耦合,考虑运行过程的配电系统规划思路已被广泛关注,但规划模型、方法和实施方式等具体问题的研究还应作为重中之重深入研究。同时,对信息系统的依赖性要求信息规划也需同步跟进。

3 SDS 适应性规划方法探讨

3.1 “源-网-荷”资源全面融合建模的综合规划方法

SDS 中能源类型和网架构成异常复杂。网架规划中,或涉及 DG 作为目标与约束,或涉及新型负荷特征;反之,电源规划中“网-荷”资源要素也需充分考虑。但目前研究对电源、网架规划的相互融合上仍在局部范畴。笔者认为,SDS 是“源-网-荷”资源相互影响协调规划,是全面考虑分布式可再生能源、冷热电联供单元和新型负荷的规划,而“源-网”侧资源的不确定性给规划带来极大困难。在相关研究基础上,给出未来“源-网-荷”资源全面融合建模的 SDS 适应性综合规划方法,如图 2 所示。

规划方法涉及不确定性建模、负荷和 DG 出力预测、综合规划模型及求解方法、规划方案评估等步骤。综合规划模型建模是规划方法的关键,也是未

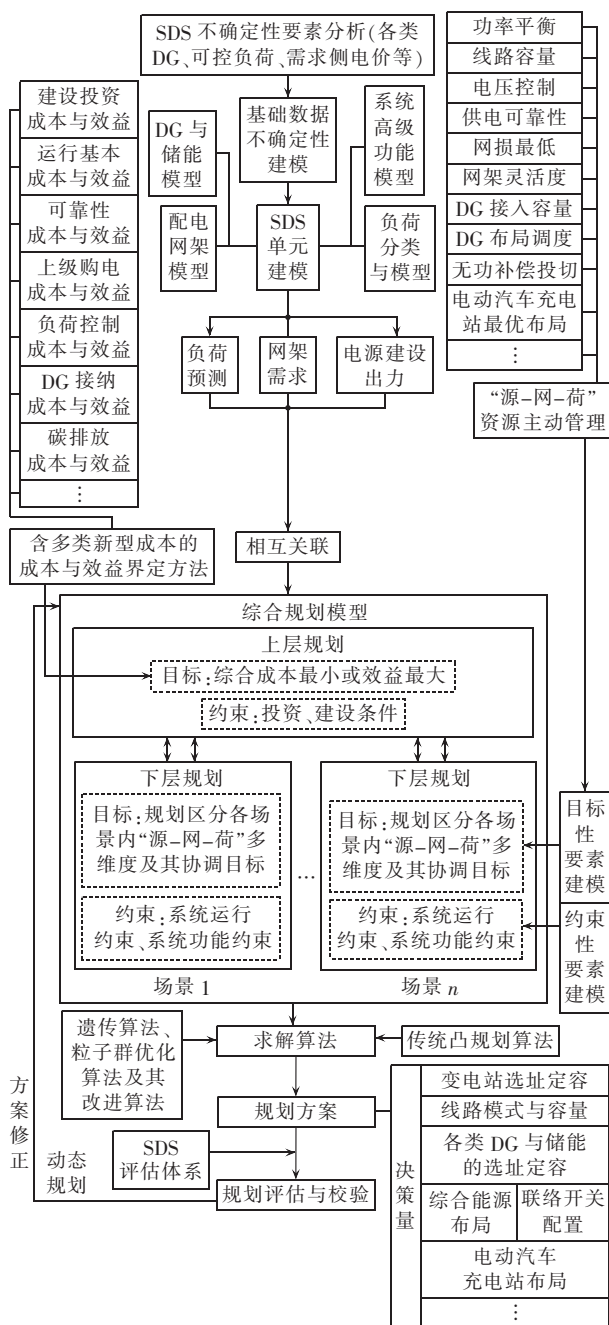


图 2 SDS 适应性综合规划方法
Fig.2 Integrated adaptive planning of smart distribution system

来的重点问题。综合规划模型涉及大量的目标、约束及模型中相关系统规划运行要素的数学模型,协调各规划目标与约束条件,明确和建立新指标的模型(运行指标及其等效成本效益、DG 指标及其成本等),是综合规划方法实施的关键。

3.2 规划与运行相互耦合的 SDS 规划方法

传统规划以负荷需求为引导,但 SDS 中规划与运行的强耦合性要求规划时考虑系统运行和控制策略的影响。文献[20]以系统运行中的线损和电压水平控制为目标进行规划建模,文献[21]则通过系统运行网损和容量充裕性的成本建模进行规划。文献

[41]综合考虑主动管理策略的有效性,分析多时段最优潮流并基于此进行规划。相比考虑运行过程的建模方式,文献[42]的综合规划方法中考虑建立精细化运行模拟,将规划方案进行模拟运行,依据分析指标修正方案。对目前考虑运行过程的配电系统规划研究进行总结,笔者将其实现方式归纳为 2 类,分别是基于运行要素建模和基于运行模拟评估,基本流程如图 3 所示。

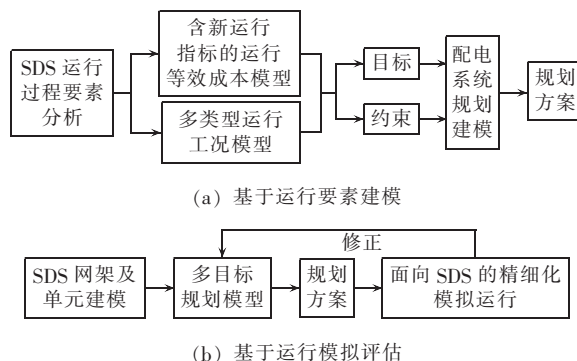


图 3 考虑运行过程的 SDS 规划
Fig.3 Smart distribution system planning considering operation

面向 SDS 中 DG、储能及灵活网架结构,建立规划与运行的一体化联合决策,更加全面适应规划与运行的耦合性^[43]。考虑规划与运行决策变量的相互影响性,利用多样化新型成本最优目标的思想^[21],笔者给出一种面向 SDS 的规划与运行一体化决策的优化思路,如图 4 所示。

3.3 能量系统与信息系统高度融合的 SDS 同步规划方法

SDS 具有信息物理高度融合的复杂架构,这造成未来配电规划必然考虑能量系统和信息系统融合的规划方法。文献[44]提出未来电力系统是典型的信息与物理高度融合的系统,一次系统与二次系统高度协调,物理过程与信息过程相互影响,信息系统与能量系统的异构性充分降低。文献[45]在分析信息系统对能量系统作用形式的基础上,提出考虑信息系统作用的可靠性评估方法。文献[46]则利用传统能量系统中 $N-1$ 约束进行信息系统分析。然而,考虑能量系统与信息系统双向作用和两者充分融合的配电系统规划方法还没有指导性研究成果。

能量系统和信息系统高度融合的研究多集中在配电系统运行分析和电网控制方面^[44,47]。因此,研究能量系统和信息系统的同步规划技术是 SDS 的规划方向,该同步规划技术的关键则在于 2 个系统的融合建模。笔者认为,研究可在相关工作上从以下几个方面突破。

a. 一次系统和系统控制策略建立的混合控制融合模型已有探索^[48],因此可考虑将融合控制模型推

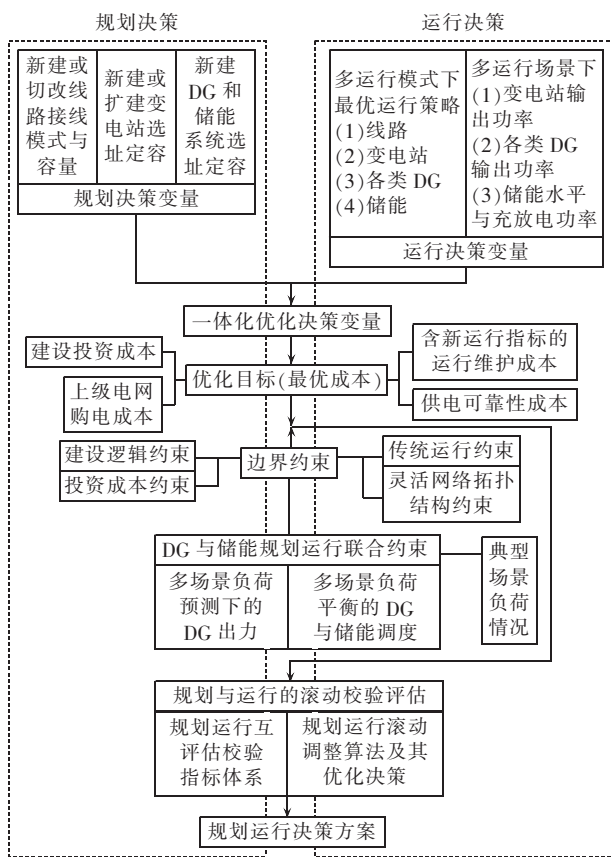


图 4 SDS 规划运行一体化决策方法

Fig.4 Planning-operation integrated decision making of smart distribution system

广建立规划模型。同时,对融合控制模型进行系统运行要素分析,在建立规划运行一体化优化模型时,将能量系统与信息系统的融合控制模型演变并作用于一体化优化模型。

b. 对信息系统和能量系统相互影响的探索也已展开,主要涉及系统的计算分析、相互影响的系统运行模式、系统控制策略和安全可靠分析^[49]等。通过分析信息系统规划、控制对能量系统运行的影响和能量系统对信息系统的影响,建立场景分析方法和系统规划的相互影响因素,扩展 SDS 规划模型。

在上述突破点的基础上,笔者给出一种能量系统与信息系统融合的 SDS 同步规划方法的实施思路:

步骤 1 建立能量系统规划和信息系统规划模型;

步骤 2 参照信息模型,对能量系统规划模型进行扩展和演变,使得信息规划模型中的每个要素在能量模型中存在对应指标;

步骤 3 照步骤 2 的思路,按照能量模型演化信息系统规划模型;

步骤 4 对比 2 个模型的要素属性对应情况并反复进行步骤 2 和步骤 3,直到 2 个系统规划模型要素全部对应,此时得到能量系统和信息系统融合规划模型。

3.4 面向新目标的 SDS 规划方法

各类 DG 和新型负荷大量接入,电源结构发生重大变化,在我国低碳经济发展模式下,SDS 中的规划目标出现新特点,以下 2 个方面值得关注。

3.4.1 面向新能源消纳能力提高的配电系统规划

传统能源发电难以适应经济社会发展,提高新能源消纳能力是近年来配电系统发展重点,这就要求在分布式可再生能源最大化接入和配电系统接纳能力之间做出平衡。以各类 DG 接入容量最大或切除最小为目标的 SDS 规划方法已有大量探究^[32-33],但这种思路一般仅计及当前电源的最大消纳,缺乏对建设时序下多场景间相互影响的考虑。文献^[50]提出一种面向新能源消纳的规划方法,该方法考虑系统包容能力和消纳成本之间的均衡,并采用网架方案排选方式进行方案获取。

面向新能源的规划中应以提高消纳能力为主要目标,兼顾各方因素的合理折中并考虑建设时序影响。DG 的接入造成配电系统结构和接纳能力的变化,规划时考虑系统最大消纳能力为目标,笔者提出如图 5 所示的规划思路。图 5 的规划方法中,新能源接纳能力评估方法已有大量研究^[51-53],成本和效益的判断可参考相关研究^[50],均不再赘述。

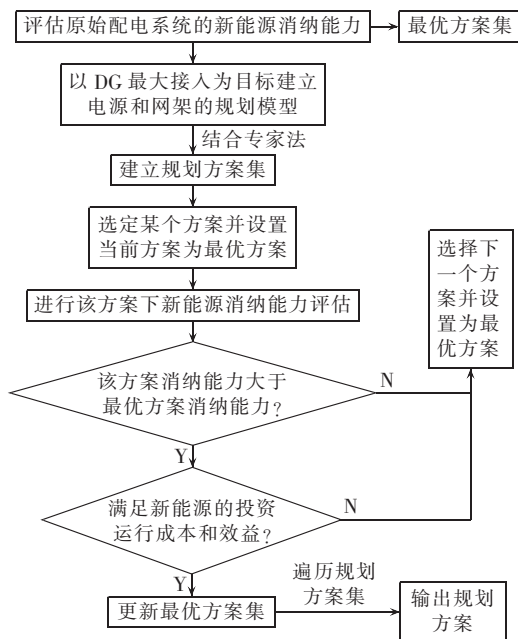


图 5 面向消纳能力提升的配电系统规划方法

Fig.5 Distribution system planning oriented to accommodation capability enhancement

3.4.2 面向低碳目标的配电系统规划

“低碳电网”理念已成为未来电网发展目标,减少碳排放必然导致建设成本增加,给规划工作带来新的挑战。配电系统规划要合理考虑减排政策和低成本的影响,建立低碳目标或低碳约束的新规划模型。对低碳电网的研究多集中在电网低碳效益模型

和评价指标方面^[54-55],文献[56]对间歇式 DG 规划进行研究,以年碳排放量最小为目标建立其优化配置模型。针对低碳电网规划,文献[57]研究了基于碳排放成本内部化手段和经济最优目标,目标单一,对 SDS 中电源和电网的综合规划未来还值得探索。基于配电系统中电网环节所涉及规划层面的低碳要素和低碳要素内部化方式,同时考虑 DG 的多场景模拟等因素,笔者提出一种面向低碳目标的规划方法,如图 6 所示。

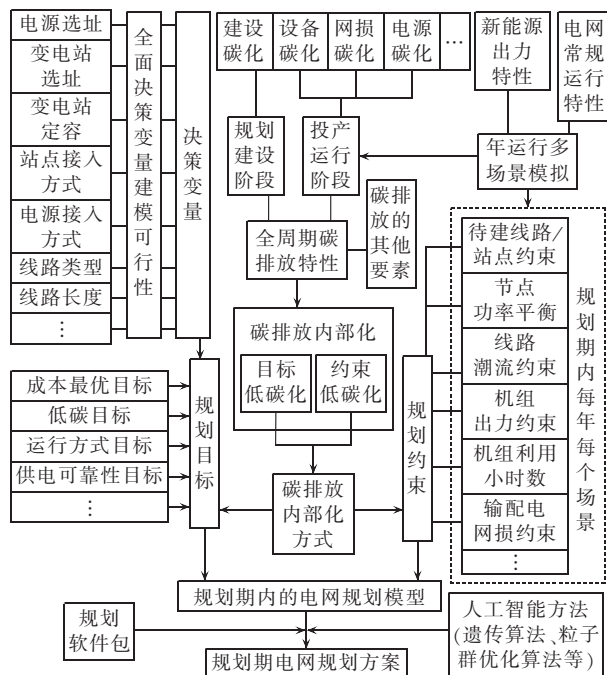


图 6 面向低碳目标的配电系统规划方法

Fig.6 Distribution system planning oriented to low-carbon target

3.5 SDS 规划的其他方向及支撑技术探讨

3.5.1 新能源和电动汽车供需平衡模式下的配电系统规划方法

目前, DG 以就地消纳方式为主,消纳范围呈扩大趋势。电动汽车等新型用能负荷的大量接入理论上可以提高区域内新能源消纳能力。研究电动汽车充电负荷特性和新能源出力特性,通过储能装置和电动汽车储能特性,合理配置探索 DG 发电和电动汽车用能两者之间的平衡模式,对降低传统电源直供负荷、提高新能源消纳和电动汽车负荷接纳等都具有重要意义。目前,这方面的研究还未全面展开, DG 和电动汽车平衡模式下的配电系统规划,特别是平衡模式下电动汽车充电站的合理布局的研究很值得期待。

3.5.2 满足态势感知的综合配电单元和多源信息终端布点优化

观测、分析和利用多类时空信息的 SDS 态势感知技术融合了来自综合配电单元、高级量测终端、远

方数据终端和变电站智能电子设备等类型的信息资源。因此,多源信息融合态势感知技术要求海量综合配电单元和智能电表等多源信息终端的配置。目前,对综合配电单元布点优化和规划的研究相对滞后,未来也应将终端的布点优化作为 SDS 规划的一个重要分支进行深入研究。

3.5.3 多场景模式运行模拟技术

运行场景模拟是 SDS 规划决策的重要支撑技术和基础条件,未来可按照以下递进方式进行研究:第一,研究 SDS 运行场景的信息抽取与估计技术,建立运行场景库;第二,基于运行场景库的运行模式,研究多场景下的运行模式特点、运行指标计算和预测技术等,提供丰富的计算支持。

3.5.4 面向复杂联络拓扑的规划方法

SDS 高可靠性要求下,传统配电系统“合环设计、开环运行”的规划运行模式正逐步向“合环运行”发展。“合环运行”也将给运行控制和多场景模拟等带来极大困难,深刻影响规划工作。在高可靠性要求下, SDS 具备较强的转供能力。无论是“合环运行”和高转供能力,都必将带来配电系统复杂的联络拓扑。未来 SDS 中,变电站联络增加,传统的 110 kV 辐射供电模式发生根本改变。例如,传统配电网规划基于容载比法,容载比在 1.8 以上,而中央配电网络联络加强必然导致配电系统转供能力增强,考虑基于复杂联络拓扑转供的规划方法则可适当降低容载比,兼顾低容载比和高可靠性的规划可实现资源节约化。虽然“合环运行”还有待探讨,但考虑复杂联络拓扑的规划方法是未来值得关注的问题。

4 总结与展望

SDS 规划研究目前仍处在探索阶段,本文对 SDS 规划进行了深入探讨。根据“源-网-荷”概念对 SDS 进行概述并提出全面体系架构。在此基础上,本文按照电源规划、负荷预测、网架规划和综合规划的传统规划思路,对国内外 SDS 规划关键问题的研究工作进行综述和展望。更进一步,重点对未来 SDS 中的适应性规划方法进行深入研究和探讨,提出未来“源-网-荷”综合规划方法规划与运行相互耦合的一体化规划方法、能量系统与信息系统高度融合的同步规划方法、面向消纳提升和低碳新目标的规划方法,以及新能源和电动汽车平衡模式下的规划等其他规划思路。提出适应性规划方法的实现方式,为后续探索工作提供参考并以此在领域内进行探讨。

未来 SDS 规划的研究可依据本文提出的适应性规划方法深入展开,重点探讨综合规划的复杂建模要素问题、规划运行进一步耦合、能量信息融合规划中 2 个系统的属性、面向 SDS 的新规划目标,以及新

能源/电动汽车平衡模式规划和主网/配电网一体规划等规划技术的具体实现。

参考文献:

- [1] BROWN R E. Impact of smart grid on distribution system design [C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: [s.n.], 2008: 1-4.
- [2] ARMITT R F, DUGAN R C. Distribution system analysis and the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2343-2350.
- [3] CELLI G, GHIANI E, MOCCI S, et al. From passive to active distribution networks: methods and models for planning network transition and development [C]//42nd International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE 2008). Paris, France: [s.n.], 2008: 1-11.
- [4] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [5] DRIESEN J, KATIRAEI F. Design for distributed energy resources [J]. Power and Energy Magazine of the IEEE, 2008, 6(3): 30-40.
- [6] LASSETER R H. Smart distribution: coupled microgrids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1074-1082.
- [7] CIGRE Task Force C6.1. Development and operation of active distribution networks[R]. Paris, France: CIGRE, 2011.
- [8] FAN M, ZHANG Z, TIAN T. The analysis of the information needed for the planning of active distribution system[C]//IET 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED). Stockholm, Sweden: [s.n.], 2013: 1-4.
- [9] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [10] FERREIRA P D F, CARVALHO P, FERREIRA L A F M, et al. Distributed energy resources integration challenges in low-voltage networks: voltage control limitations and risk of cascading [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 82-88.
- [11] 李勋, 龚庆武, 胡元潮, 等. 智能配电网体系探讨[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 108-111.
LI Xun, GONG Qingwu, HU Yuanchao, et al. Discussion of smart distribution grid system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 108-111.
- [12] 郭云鹏, 刘伟佳, 文福拴. 智能配电系统的发展现状与展望[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(5): 74-81.
GUO Yunpeng, LIU Weijia, WEN Fushuan. State-of-the-art and prospect of smart distribution system development[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(5): 74-81.
- [13] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.
WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9.
- [14] 马钊, 梁惠施, 苏剑. 主动配电系统规划和运行中的重要问题[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1499-1503.
MA Zhao, LIANG Huishi, SU Jian. Important issues in planning and operation of active distribution system [J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1499-1503.
- [15] 肖峻, 李振生, 张跃. 基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 8-14.
XIAO Jun, LI Zhensheng, ZHANG Yue. A novel planning and operation model for smart distribution networks based on total supply capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 8-14.
- [16] 刘开俊, 宋毅. 主动配电网规划理论与实践方向探索[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 3-7.
LIU Kaijun, SONG Yi. Exploration of active distribution network planning theory and practice direction [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 3-7.
- [17] NADERI E, KIAEI I, HAGHIFAM M R. NaS technology allocation for improving reliability of DG-enhanced distribution networks [C]//IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). Singapore: IEEE, 2010: 148-153.
- [18] SEDGHI M, ALIAKBAR-GOLKAR M, HAGHIFAM M R. Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 52: 221-230.
- [19] KHALESI N, REZAEI N, HAGHIFAM M R. DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2): 288-295.
- [20] INJETI S K, KUMAR N P. A novel approach to identify optimal access point and capacity of multiple DGs in a small, medium and large scale radial distribution systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 45(1): 142-151.
- [21] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 121-131.
- [22] NICK M, CHERKAOUI R, PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [23] MOHAMED M, AHMED S, FAHMY M, et al. Performance analysis of electric distribution systems with distributed generation resources [C]//CIGRE 2014. Paris, France: [s.n.], 2014: 1-8.
- [24] 潘超, 孟涛, 蔡国伟, 等. 广义电源多目标优化配置与运行[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3505-3512.
PAN Chao, MENG Tao, CAI Guowei, et al. Multi-objective optimal configuration and operation of generalized power sources [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3505-3512.
- [25] LIU Z, WEN F, LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2541-2551.
- [26] 李存斌, 常昊, 冯霞, 等. 智能电网下风力-火电联合发电在微电网系统中的扩展规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 47-51.

- LI Cunbin, CHANG Hao, FENG Xia, et al. Expansion planning of wind-thermal co-generation system in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 47-51.
- [27] 张谦, 王海潜, 谢珍建. 江苏电网消纳大规模风电的电源规划设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 60-65.
- ZHANG Qian, WANG Haiqian, XIE Zhenjian. Generation expansion planning with large-scale wind power integration into Jiangsu power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 60-65.
- [28] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 22-27.
- YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacting factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27.
- [29] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 13-20.
- ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [30] 周念成, 熊希聪, 王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 1-7.
- ZHOU Niancheng, XIONG Xicong, WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 1-7.
- [31] 江岳春, 王志刚, 杨春月, 等. 微网中可控负荷的多目标优化策略[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2875-2880.
- JIANG Yuechun, WANG Zhigang, YANG Chunyue, et al. Multi-objective optimization strategy of controllable load in microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2875-2880.
- [32] FAN M, SU A, ZHANG Z. A planning approach for active distribution networks[C]//21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt, Germany: [s.n.], 2011: 1-4.
- [33] 曾博, 刘念, 张玉莹, 等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 155-163.
- ZENG Bo, LIU Nian, ZHANG Yuying, et al. Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 155-163.
- [34] 熊虎, 向铁元, 祝勇刚, 等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 65-70.
- XIONG Hu, XIANG Tiejuan, ZHU Yonggang, et al. Optimal allocation of electric vehicle battery swap stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 65-70.
- [35] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.
- DU Aihu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42.
- [36] HAY S L, AULT G W, BELL K R W, et al. System operator interfaces to active network management schemes in future distribution networks[C]//IEEE 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2008). Padova, Italy: IEEE, 2008: 1-4.
- [37] BORGES C L T, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
- [38] 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.
- [39] HU Zechun, LI Furong. Cost-benefit analyses of active distribution network management, part II: investment reduction analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1075-1081.
- [40] 曾鸣, 杨雅琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 102-111.
- ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 102-111.
- [41] AL KAABI S S, ZEINELDIN H H, KHADKIKAR V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 785-793.
- [42] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
- ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [43] 沈欣炜, 朱守真, 郑竞宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920.
- SHEN Xinwei, ZHU Shouzhen, ZHENG Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920.
- [44] 赵俊华, 文福松, 薛禹胜, 等. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.
- ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7.
- [45] 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.
- [46] 孙英云, 游亚雄, 陈颖, 等. 一种考虑 $N-1$ 约束的智能配电网信息网络启发式规划算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 50-55.
- SUN Yingyun, YOU Yaxiong, CHEN Ying, et al. A heuristic algorithm for information network planning of smart distribution network considering $N-1$ constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 50-55.

- [47] 刘东,盛万兴,王云,等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3522-3531.
LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531.
- [48] DERLER P, LEE E A, VINCENTELLI A S. Modeling cyber-physical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 13-28.
- [49] 袁博,王莹. 智能电网 CPS 及其关键技术[J]. 电气时代, 2015 (5):44-48.
YUAN Bo, WANG Ying. Self-healing control and its key technology in smart distribution grid[J]. Electrotechnics Electric, 2015(5): 44-48.
- [50] 彭波,陈旭,徐乾耀,等. 面向新能源消纳的电网规划方法初探 [J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3386-3391.
PENG Bo, CHEN Xu, XU Qian Yao, et al. Preliminary research on power grid planning method aiming at accommodating new energy[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3386-3391.
- [51] VITTAL E, O'MALLEY M, KEANE A. A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 433-442.
- [52] 牟晓明,李卫星. 基于节点电压强弱性辨识的风电接纳能力评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 130-135.
MOU Xiaoming, LI Weixing. Wind power accommodation capability evaluation based on bus voltage strength index identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 130-135.
- [53] 赵珊珊,宋晓辉,孟晓丽. 双层次能源联络线结构配电网的接纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 63-68.
ZHAO Shanshan, SONG Xiaohui, MENG Xiaoli. Analysis on maximum allowable capacity of distributed generation for distribution network with double-layer structure of energy lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 63-68.
- [54] 康重庆,周天睿,陈启鑫,等. 电网低碳效益评估模型及其应用 [J]. 电网技术, 2009, 33(17): 1-7.
KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Assessment model on low-carbon effects of power grid and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 1-7.
- [55] 孙彦龙,康重庆,陈宋宋,等. 低碳电网评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 157-162.
SUN Yanlong, KANG Chongqing, CHEN Songsong, et al. Low-carbon power grid index system and evaluation method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 157-162.
- [56] 张沈习,李珂,程浩忠,等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 45-51.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 45-51.
- [57] 杜尔顺,孙彦龙,张宁,等. 适应低碳电源发展的低碳电网规划模型[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2725-2730.
DU Ershun, SUN Yanlong, ZHANG Ning, et al. Transmission expansion planning model facilitating low-carbon power sources' development[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2725-2730.

作者简介:



袁 博

袁 博(1989—),男,河北石家庄人,硕士,主要研究方向为电网规划与优化运行 (E-mail: yuanbo0000@tju.edu.cn);

邵 华(1976—),男,河北石家庄人,高级工程师,主要从事电网规划相关研究和工作的;

贺春光(1979—),男,河北石家庄人,高级工程师,硕士,主要从事配电网规划相关研究和工作的。

Key issues and research prospects of smart distribution system planning

YUAN Bo¹, SHAO Hua¹, HE Chunguang¹, WANG Ying¹, YANG Ting², WANG Ying³

(1. Economic and Technology Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050000, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. School of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A general overview of smart distribution system is described according to the concept of “energy-net-load” and a comprehensive framework is given. The smart distribution system planning is emphasized in two aspects. The key issues in the achievements of its recent research are summarized, analyzed and expected according to traditional classified planning process, based on which, its adaptive planning methods are deeply studied, and the specific ideas and implementation methods of future adaptive planning are proposed, including “energy-net-load” comprehensive planning, operation-coupled planning, energy-information system integrated planning, accommodation capability and low carbon oriented new target planning, other planning directions, supporting technologies, etc.

Key words: smart distribution system; framework; comprehensive planning; adaptive planning methods