

# 配电网规划研究综述与展望

肖白, 郭蓓

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:**从规划模型、规划方法、求解算法3个方面对配电网规划研究进行综述。根据配电网规划的内容、是否采取主动管理措施和考虑的利益主体的不同将规划模型分为电源规划模型、网架规划模型、电源与网架的综合规划模型、实施主动管理的规划模型和考虑多利益主体的规划模型五大类,对规划模型的关键问题进行评述;根据规划模型的目标函数个数、层数、时间的动态性和是否考虑不确定性因素将规划方法分为多目标规划方法、双层规划方法、多阶段规划方法和不确定性规划方法四大类,对规划方法进行分析;对于用于配电网规划目标函数求解的数学优化算法和人工智能优化算法的优缺点和适用性进行比较。最后展望配电网规划未来的研究方向。

**关键词:**配电网规划;规划模型;规划方法;求解算法  
**中图分类号:**TM 761 **文献标识码:**A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.030

## 0 引言

配电网是电力系统的重要组成部分,科学合理的配电网规划不仅可以提高电力系统运行的经济性和可靠性,保证电网的供电质量,还可以为运营商节省大量的投资、运行和维护费用。配电网规划的最主要目的是为了能够在尽可能经济、可靠和安全的方式下满足日益增长的负荷需求<sup>[1-3]</sup>。

早期配电网规划主要包括变电站的选址定容<sup>[4-6]</sup>以及网架结构的优化。近年来,分布式电源<sup>[7-9]</sup> DG (Distributed Generation)、储能<sup>[10-11]</sup>等新技术的发展及需求侧响应的实施,极大地丰富了配电网规划的内容,对配电网的规划模型和规划方法也产生了诸多影响。电力市场环境新参与者的加入使配电网中的利益主体变得更加多元,传统仅考虑配电网运营商一个利益主体的规划模型得到扩展,同时为减小新技术接入配电网对系统产生的不利影响,主动管理在配电网中逐渐得到应用,新的场景下考虑这些新的影响因素的配电网规划模型应运而生,而规划模型的发展对规划方法和求解算法都提出了新的要求,不仅促进了规划方法的发展,一些比较新颖的智能优化算法也被用于求解配电网规划问题。

本文对现有研究中所建立的规划模型、采用的规划方法和求解算法进行了分析和总结,以便于读者能够较为全面地了解目前配电网规划研究的进展情况,最后对未来配电网规划的研究重点进行了展望。

## 1 配电网规划流程

配电网规划是在完成规划区域目标年空间负荷

预测和现状电网分析的基础上,结合该地区的控制性详细规划编制规程(简称地区控规)制定目标年配电网的优化规划方案。其一般流程如图1所示。

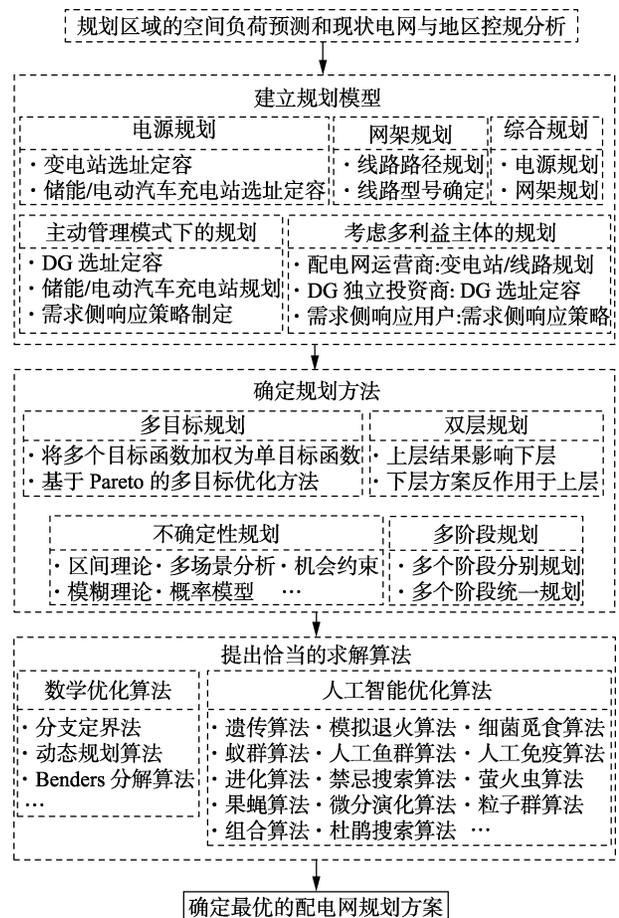


图1 配电网规划的流程图

Fig.1 Flowchart of distribution network planning

## 2 规划模型

规划模型是指根据规划的要求和优化目标所建立的数学模型。早期的规划模型主要是电源和网架

收稿日期:2018-03-31;修回日期:2018-10-10  
基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(20170101120JC)  
Project supported by Jilin Provincial Natural Science Foundation (20170101120JC)

的规划模型,随着新技术的应用,考虑这些新技术的规划模型也应运而生,同时电力市场改革的不断深入激发了更多主体参与配电网建设的积极性,能够兼顾多利益主体的规划模型将更加具有实际应用价值。

## 2.1 电源规划模型

电源规划是配电网规划的重要环节,直接影响到规划区域配电网的结构及系统运行的经济性与可靠性。传统的电源规划主要是进行变电站选址定容,而新技术的发展使电源规划的研究内容扩展为变电站选址定容、DG 选址定容、储能规划等。

### a. 变电站规划模型。

较早的变电站规划模型是在变电站负载率约束和供电半径约束下,以变电站及其低压侧线路的初始投资和运行年费用最小为目标的选址定容模型<sup>[1-2]</sup>。但这类模型没有考虑到变电站规划项目的周期较长,其后期的运行、维护、故障和报废成本可能大于其初始投资的特点,对此以设备全寿命周期成本最小为目标的变电站规划模型得到了应用和发展<sup>[3-4]</sup>,以最大限度地实现变电站规划的长远经济效益。

除方案的经济性外,地理条件对变电站的规划也有重要影响,因此出现了通过地理奖惩因子来影响总成本目标函数<sup>[5]</sup>和将对多个地理信息因子的量化评定结果嵌入目标函数<sup>[6]</sup>的考虑地理因素的变电站规划模型,增强了方案的可行性。

以上文献在进行变电站规划时,只考虑了传统的确定负荷,并没有考虑到新的技术条件下出现的可时移负荷,如智能家电、电动汽车、储能电池等,对变电站位置和容量的影响。

### b. DG 规划模型。

紧张的能源形势与人们增强的环保意识促进了可再生 DG 的发展,并逐渐成为配电网扩展规划的新选择。

DG 的环境效益及其接入配电网对系统网损和电压的改善作用对其规划方案有直接影响。文献[7]建立了污染物排放量最小, DG 投资运行费用、因 DG 接入节省的购电费用、变电站新建及线路升级的投资费用和网损费用之和最小,以及系统电压偏差最小的 DG 规划模型,对多种类型 DG 进行选址定容。而文献[8]则进行投资运行成本最小、系统有功损耗最小和负荷节点电压偏移量最小的 DG 规划。

边际收益的分析对 DG 投资者判断各种边际收益来源的盈利程度具有重要作用,而盈利的多少直接影响到投资者对 DG 的投资决策。文献[9]以包含各种 DG 的边际收益的利润最大、各种技术指标越限的风险加权和最小以及污染气体的年排放量最

小为目标,建立 DG 的多目标规划模型,该方法的缺点是在建立模型时需要进行大量简化。

### c. 储能规划模型。

考虑到储能的规划和运行在一定程度上受到分时电价的影响,文献[10-11]在分时电价场景下对配电网中储能的长期投资规划与短期运行方式进行优化。文献[10]以线路和储能的年投资、维护、电能交易及可靠性成本之和最小为目标建立线路和储能的多阶段规划模型,并考虑了储能的充放电运行约束、极限负荷场景约束和停电时间约束,但文中假设在各节点配置的储能的初始能量为其额定容量的一半是一种极大的简化。文献[11]建立了线路建设成本,线路、储能和可控 DG 的运行维护成本,向输电网和区域能源供应商的购电成本及失负荷成本之和最小的多阶段综合规划模型,并考虑了区域能源供应商的营收约束。但上述研究中的方法受各阶段负荷预测曲线的准确度影响较大,且在计算节点电压和有功损耗时均没有考虑无功功率的影响,因此存在一定的误差。

新技术的发展使配电网的电源不再局限于变电站, DG、储能也可作为系统的电源,电源规划模型得到了扩展。但新技术的特点使得规划模型中需要考虑的因素和约束条件比变电站规划要多,如 DG 的环境效益和出力约束、储能的充放电约束等,进一步增加了电源规划模型的复杂程度。

## 2.2 网架规划模型

网架规划在配电网规划过程中起着承上启下的关键作用,规划方案的好坏直接影响着对用户供电的质量,其目的是在满足负荷增长需求及相关约束条件下,获得经济性和可靠性最优的线路方案。

较早的网架模型主要是从经济性的角度出发<sup>[12-16]</sup>,在功率平衡约束、线路容量约束、节点电压约束、网络的辐射性以及连通性等常规约束条件下,以年投资以及运行成本最小为优化目标进行网架优化。

为了减少 DG 的削减功率和线路的网损成本,获得经济性更好的网架方案,文献[12]在网架规划时考虑了 DG 和柔性负荷的相互配合对规划方案的影响。在进行由多个变电站供电的地区网架规划时,文献[13]建立了综合总成本最小的网架规划模型,为了求解该混合整数非线性规划模型,引入埃尔米特矩阵对非线性潮流方程和约束条件进行处理,消除二进制变量和整数变量的乘积项,再增加辅助变量对约束条件进行松弛,将原模型转化为二阶锥模型。

针对模型的约束条件较多会影响计算效率的问题,文献[15]对建立的适用于负荷点数量庞大且存在多个电源的大规模配电网的规划模型采取了逐步

引入约束条件的办法,先获得松弛条件下目标函数最优的方案,然后再逐步增加约束条件。

由以上模型获得的网架方案虽然经济性很好,但却忽略了可靠性,对此,不少研究建立了计及可靠性的网架模型。通过在目标函数中增加切负荷成本<sup>[17]</sup>、供电不足期望值成本<sup>[17]</sup>以及停电损失成本<sup>[18-20]</sup>,或者建立负荷供电恢复率<sup>[21]</sup>、负荷损失指标<sup>[22]</sup>、系统性能指标<sup>[22]</sup>和网络结构抗毁度<sup>[23-24]</sup>等指标并将其纳入目标函数或约束条件来考虑可靠性对网架方案的影响。

从提高系统的可靠性出发,文献[17]将系统切负荷成本和功率不足期望值成本加入网架模型的目标函数,并且增加电压稳定裕度约束为可靠性约束,该方法通过降低系统的风险来减小后期的投资,从而减小方案的总成本,在规划周期较长时优势更加明显。

DG 的接入和故障期间联络线对负荷的转供等区域自组网运行方式对系统的可靠性均有重要影响,文献[21]在区域自组网运行方式下建立了负荷供电恢复率指标,并将其作为可靠性约束,以获得总成本最小以及可靠性最佳的方案。

与传统的从设备故障导致电量中断的角度分析可靠性不同,引入复杂网络理论中描述网络抵御破坏能力的网络结构抗毁性可从配电网自身的拓扑结构角度出发分析网架的可靠性<sup>[23-24]</sup>,通过提高网架自身的连接性得到停电范围更小的规划方案。

以上文献在网架规划时都是一次性考虑所有的负荷节点并对其进行线路规划,在配电网规模较大时,网架模型存在决策变量过多以及求解难度大的问题。文献[25-26]首先对变电站供电区域内的负荷节点划分区域,然后进行小区域的网架规划,以减少需要同时考虑的决策变量来简化计算,但是文中采用的负荷节点分区方法没有考虑负荷分布不均匀的影响,存在各条线路带负荷相差较大的情况,不利于系统的经济运行,同时增大了联络线的容量,增加了投资。

以上研究多是先根据目标年负荷预测值的大小确定线路型号再优化路径,而较少同时对线路路径和型号进行优化。

### 2.3 电源与网架综合规划模型

将电源和网架分开进行规划虽然可以降低问题的求解难度,但是将联系密切的 2 个系统分开难以保证最终方案的综合最优,不能充分利用网络中各设备,因此为提高系统中电气设备的利用率,获得电源与网架相互协调的规划方案,许多研究建立了配电网的电源与网架的综合规划模型。

为实现对变电站、线路和电容器组的协调优化,文献[27]建立了投资、运行总成本最小的综合规划

模型,为保证解的最优性,文中将该混合整数非线性规划模型转化为二次约束规划模型,与将非线性模型进行近似线性化的方法相比,该方法不必引入额外的辅助变量,更便于求解,但约束条件的个数明显增加。

为建立适用于大规模配电网的综合规划模型,文献[28]将配电网的规划问题分为中压变电站规划以及高压变电站与中压馈线规划 2 个子问题,并构造了能量损耗特征矩阵、电压降指标矩阵和供电距离修正系数用于中压变电站规划。

线路分区开关和联络线的相互配合对系统的可靠性影响较大,文献[29]考虑了故障情况下分区开关和联络线相互配合对负荷恢复供电的影响,建立了投资和缺供电量成本最小的综合规划模型,在对变电站和电缆馈线规划的同时优化分区开关和联络线,与其他不含分区开关和联络线的模型相比,其不仅要考虑故障线路下游负荷的中断情况,还必须考虑故障区间和故障线路上游负荷的供电情况。

新形式下含 DG 的电源与网架的综合规划模型是当前配电网规划研究的一个热点。电容器组和可控 DG 的配合能有效改善系统的功率损耗和电压分布,进而减小变压器和线路容量,提高方案的经济性和可靠性。文献[30]建立了变压器、线路、固定电容器组和可控 DG 的综合规划模型,并将可靠性成本和购电减少成本加入目标函数中,在计算网损成本时考虑了 7 种不同的负荷水平。

为了解决配电网中因 DG 候选位置过多造成的计算量大的问题,文献[31]提出根据有功损耗改善率、电压变化率、可靠性指标和配电网实际结构确定 DG 候选位置的方法,建立 DG 和线路的多目标综合规划模型,计算可靠性成本时考虑了线路和 DG 故障以及不同负荷类型的影响,该方法能有效改善系统网损及电压分布,以最经济的方式对新增负荷供电。

为充分挖掘 DG 与联络线的相互配合对提高系统的可靠性的作用,文献[32-33]建立了 DG 与联络线的多目标综合规划模型,并且在目标函数中考虑了 DG 的环境效益。文献[32]是先进行可控 DG 和辐射状网架的规划,再进行联络线规划,而文献[33]是同时对分布式风电源和联络线进行优化,并以块为单位对年缺供电量进行评估,显著提高了对可靠性进行评估的效率。

但上述研究均是在静态负荷条件下对 DG 和联络线进行规划,没有考虑负荷增长的影响。文献[34]在负荷增长条件下进行 DG 和联络线的优化,同时对变电站和线路进行升级改造,建立投资、网损和可靠性成本最小以及节省购电成本最大的综合规划模型。

研究表明,电源与网架的综合规划有更好的经济效益,在配电网规划中同时进行 DG 和联络线的规划,不仅可以通过 DG 与联络线的相互配合提高系统的可靠性,还能充分利用 DG 满足负荷增长需求以延缓对变电站和线路的升级改造,减小网损和提高电压质量。但目前在配电网扩展规划中同时考虑 DG 和联络线协调规划的研究相对还比较少。

#### 2.4 实施主动管理的规划模型

配电网中 DG 和参与需求侧响应的用户逐步增多,使配电网的运行特性发生了一定的变化,为保证配电网的安全运行以及充分发挥这些新技术接入配电网的积极作用,促使系统的综合性能更加优化,主动管理<sup>[35]</sup>得到了应用。而主动管理的实施势必会对规划模型产生影响,近几年,许多学者对实施主动管理的配电网规划模型进行了研究。

为充分考虑对系统中的可控负荷实施主动管理策略对变电站规划的影响,文献[36]在变电站规划模型的目标函数中增加了负荷管理费用,由于负荷和 DG 的时序特性,传统的主变约束扩展为时序容量约束和时序负载率约束,主动管理策略的实施在一定程度上减小了变电站综合负荷的波动性,避免了容量的浪费,提高了方案的经济性,但文中没有对负荷平移策略与市场电价、DG 的出力特性进行相互协调,也没有对不同类型的负荷在不同时间段的可平移能力等问题进行深入分析。

为充分发挥主动管理措施在提高可再生 DG 的消纳、降低主网购电成本、减少系统的运行损耗,及提高规划方案的经济性等方面的作用,文献[37-38]通过削减 DG 出力、调节有载调压变压器分接头、采用无功补偿和切负荷等主动管理措施,建立了含 DG 的配电网综合规划模型,并在模型中增加了 DG 出力切除量约束、变压器分接头可调节范围约束、分接头可调节次数约束、无功补偿容量约束以及负荷可切除量约束等主动管理约束条件。约束条件的增多使模型变得复杂,对此,文献[38]通过在配电网潮流方程中引入新的变量对模型的非线性目标函数和约束条件进行松弛处理,将非线性模型转化为二阶锥模型。与传统的单纯通过增加投资来降低系统运行风险的方法相比较,实施主动管理策略能够在一定程度上降低系统运行风险,而不必增加额外投资。

在采用调节有载调压变压器抽头、削减分布式电源 DWG (Distributed Wind Generation) 有功出力、调节 DWG 功率因数和需求侧管理等主动管理措施条件下,文献[39]在上层 DWG 选址定容模型的综合成本目标函数中增加了对 DWG 的年主动管理费和需求侧管理成本,在下层 DWG 运行优化模型中增加了有载调压变压器二次侧电压约束、DWG 有功出力削减比例约束、DWG 的功率因数角约束、

可中断负荷的允许中断量约束等主动管理约束条件,以充分考虑主动管理在规划中的作用。

对 DG 和参与需求侧响应的用户(可控负荷)采取主动管理措施,一方面丰富了模型的目标函数,增加了对各种可控新技术的主动管理费用,如对 DG 和可控负荷的主动管理费用、对参与需求侧响应的用户的补贴费用等;另一方面增加了模型的主动管理约束条件,如 DG 出力切除约束、有载调压变压器分接头约束、无功补偿容量约束、需求侧响应用户的时移负荷与可中断负荷的容量约束等,使模型更加复杂,并且主动管理模式下的配电网规划方案既能获得线路、变电站和 DG 等的具体配置方案,还能获得各种可控资源的控制运行方案。

虽然考虑主动管理措施的配电网规划方案能更好地适应各种新技术的接入,提高方案的经济性和可靠性,更符合当前配电网的发展趋势,但是实际中也存在 DG、有载调压变压器、无功补偿设备以及可控负荷不能及时有效地对主动管理策略做出响应的情况,而如何将这情况反映到规划模型的目标函数或约束条件中,目前的相关研究还没有充分体现出来。

#### 2.5 考虑多利益主体的规划模型

DG 技术的不断成熟及其成本的降低,同时,随着电力市场改革的不断深入,投资主体将不再局限于配电网运营商,DG 运营商和参与需求侧响应的用户等新主体也加入进来。新主体投资的目的是实现自身利益的最大化,而现阶段 DG 的接入和参与需求侧响应用户的用电行为需要得到配电网运营商的允许,因此配电网运营商将综合考虑其对自身利益和系统运行的影响,再做出相应决策。

为兼顾 DG 运营商、配电公司和参与需求侧响应用户的利益,文献[40]以 DG 运营商年综合收益最大、配电公司年综合成本最小以及参与需求侧响应用户的年综合收益最大为目标,建立“源”、“网”、“荷”相互协调的三层规划模型。在源层模型中,加入以 DG 接入后系统的网损和电压是否改善为衡量指标的规划方案被接受程度约束,以充分与网层规划相互协调;在网层模型的目标函数中引入需求侧响应用户的年管理费用、减少的年售电收益和对可中断负荷的补偿费用,实现与荷层的相互协调;而荷层模型目标函数中的分时电价和对可中断负荷的激励信息则依赖于网层。源层和荷层分别将 DG 规划方案和负荷响应方案传递至网层,实现对线路规划的决策,通过各层目标函数或约束条件的相互作用,在增大 DG 的接入容量和减小配电网运营商总成本的同时保证了参与需求侧响应用户的利益。

目前研究协调配电网运营商和 DG 投资商 2 个利益主体的规划模型较多,通过在目标函数中引入

DG 运营商向配电公司的售电收益<sup>[41]</sup>、对 DG 的主动管理费用<sup>[42-43]</sup>和配电公司向 DG 运营商的购电费用<sup>[42-43]</sup>或增加特定的约束条件<sup>[41]</sup>,或通过分析 DG 接入对配电网产生的影响<sup>[44]</sup>等方法进行 2 个利益主体之间的相互作用。

为协调配电公司和 DG 发电商的利益,文献[41]除将 DG 发电商的利润净现值非负和 DG 机组的上网电价限制作为模型的特定约束条件外,还将因 DG 接入而延长的配电网投资成本和减少的用户期望停电损失加入配电公司的综合收益目标函数中。而文献[42-43]则采用双层规划模型来协调双方利益,通过在上下层规划模型的目标函数中引入对 DG 的主动管理费用,不仅促进了配电公司对 DG 发电量的购买,节省了配电公司从主网购电的成本,同时也增大了 DG 的并网容量和 DG 运营商的收益,但最终规划方案是否能够协调 DG 运营商和配电公司之间的利益在很大程度上取决于 DG 单位电量的主动管理费用制定得是否合理。

不同于上述研究通过目标函数或约束条件进行 2 个主体间的相互作用,文献[44]通过 DG 接入对系统网损、电压分布及孤岛内用户的可靠性改善的考虑,在进行 DG 规划的同时兼顾配电公司的利益,建立 DG 单位成本收益最大和配电公司因 DG 接入对电网的改善收益最大的多目标规划模型。

针对在不同发展阶段 DG 的投资主体可能不同的问题,文献[45]对不同的情况进行了建模分析,当配电网运营商为 DG 投资主体时,以节点电压偏移最小、支路负载率最小和单位电量的供电费用最小为目标建立 DG 的机会约束规划模型;当用户为 DG 投资主体时,在供电可靠性约束条件下,以 DG 接入容量和供电可靠性指标的最小值最大为目标建立 DG 的规划模型,该方法可以实现在不同的发展阶段 DG 都能以最合理的方案接入配电网。

研究表明在含 DG 运营商、参与需求侧响应的用户等多主体的配电网规划中,兼顾各主体利益的规划模型是实际可行的,且能够提升方案的整体效益,激发新投资主体对配电网建设的积极性。但现有研究均是假设在整个配电网中只存在 1 个 DG 运营商,没有考虑电力市场中可能存在多个 DG 运营商的情况,而考虑参与需求侧响应的用户这一利益主体的研究相对较少,因此考虑多利益主体的配电网规划模型还有待进一步发展完善。

### 2.6 对配电网规划模型关键问题的几点说明

**a.** 规划模型的主要难点在于目标函数和约束条件的确定。一方面目标函数考虑的因素较多,应综合经济性、可靠性、社会环境效益等多个方面,同时新技术的应用、主动管理的实施和新投资主体的加入都增加了目标函数中的成分,如 DG 接入的环境

效益、主动管理费用、DG 独立投资商的收益等;另一方面模型的约束条件复杂,含有各种等式和不等式约束,尤其是各种新技术和主动管理的应用使约束条件进一步增多,如 DG 的削减出力约束、有载调压变压器分接头约束等,模型的求解难度增大。

**b.** 目前对模型的约束条件主要有以下几种处理方式:严格满足约束以保证解的可行性;将违反约束的情况以较大的罚函数形式加入目标函数;将严格的不等式约束按一定的可信度松弛为概率约束。

**c.** 规划模型的目标函数和约束条件都存在非线性项,既含有离散的二进制变量又含有连续的整数变量,当配电网规模较大时模型的维数会显著增加,求解复杂。目前多采用松弛技术对非线性模型进行近似线性化处理或者将非线性规划模型转化为二次约束规划模型,以简化模型便于求解。

**d.** 配电网规划模型的建立流程可总结为以下几个主要步骤:确定规划问题的类型,明确规划的决策变量,建立模型的目标函数,确定模型的约束条件。规划模型的建立流程如图 2 所示。



图 2 规划模型建立流程图

Fig.2 Flowchart of planning model establishment

## 3 规划方法

规划方法的选取需要结合问题所建立的具体模型,根据模型的目标函数个数可采用多目标或单目标规划方法;根据模型的层级可采用单层或双层规划方法;根据规划的阶段数可采用单阶段或多阶段规划;根据模型是否考虑影响因素的不确定性可采用确定性规划方法和不确定性规划方法。

### 3.1 多目标规划方法

在进行配电网规划时应计及经济性、可靠性和社会环境等多个因素对方案的影响,通常采用建立多个目标函数的方法来考虑,现有研究中对多目标函数主要有 2 类处理方法。

第一类方法对不同的子目标函数设置不同的权重,将多目标问题加权转化为单目标问题进行求解。文献[17]通过层次分析法确定各子目标的权重,并采用变权重以获得满足不同规划场景的方案。文献[31]通过判断矩阵法确定各子目标权重,并通过归一化处理将多目标加权为单目标。

虽然这种方法可以简化问题的求解难度,但是现有研究中用于确定子目标函数权重的方法多是根据专业人员的意见,带有一定的主观性,且不同量纲的子目标函数也不宜直接进行加权相加。

第二类方法是采用基于 Pareto 的多目标规划方法将相互制约或冲突的多个目标函数同时进行优化,得到一组 Pareto 最优解集,决策者可以根据规划的不同侧重点或采用不同的分析方法从 Pareto 最优解集中选取最优方案。文献[7]通过分层模糊决策技术选择最终方案,首先将各子目标函数按目标值大小顺序分为 5 个层级,根据决策者的侧重点赋予权重,然后对最优解集中各方案进行隶属度求解。文献[9,33,50]采用模糊隶属度函数来表示各子目标函数的满意度,然后根据 Pareto 最优解集中各方案的标准化满意度选择最终方案。文献[46-47]通过逼近理想解排序法对待选方案进行评估以获得最优方案。文献[48]利用模糊多权重技术计算由各子目标函数的模糊隶属度函数组成的评价指标值,从而确定最优方案。

基于 Pareto 的多目标规划方法可有效地避免最终方案出现一个子目标达到相对最优而别的子目标较差的情况,能在一定程度上保证各子目标的相对均衡。对多目标函数的 2 类处理方法的比较见表 1。

表 1 2 类处理方法的比较

Table 1 Comparison between two processing methods

处理方法	优点	缺点	适用场合
将多个子目标函数加权为单目标函数	直接得到最优解,问题的求解难度较小	各子目标函数的权重不易确定,且量纲不同时不能相加	量纲或性质相同的多个目标函数
基于 Pareto 的多目标方法	能保证各子目标的相对均衡	不能直接得到最优解,问题的计算量较大,求解时间长	需对多个子目标进行协调的场合

### 3.2 双层规划方法

为了使配电网规划的层次更加清晰,减少需要同时考虑的决策变量个数,简化决策变量和状态变量之间的相互关系,降低求解难度,相关研究中提出了双层规划方法。

为实现同时对 DG 进行选址定容规划和运行方式的优化,文献[42,46]采用了双层规划方法,上层将 DG 的位置和容量传递到下层,下层将 DG 出力模拟结果反馈至上层,上层再利用下层反馈结果进行

目标函数值计算更新决策,循环直至得出最优解。

双层规划方法还可实现对网架结构和 DG 运行方式的优化,文献[37]在 DG 位置和容量确定的前提下进行双层规划,上层进行网架规划并将结果传递给下层进行 DG 出力优化,上层再将下层传递的 DG 出力代入目标函数进行网架决策。

为了适应高渗透率可再生 DG 的接入,文献[49,51]采用了双层规划方法,上层进行网架的优化,并将结果传递至下层进行 DG 位置和容量的优化,下层再将结果反馈至上层影响网架规划。但上述研究只考虑了 DG 对辐射状网架规划的影响,没有考虑联络线的作用,对此文献[50]考虑了 DG 对含联络线的环状配电网网架规划的影响,上层进行辐射状网架和联络线规划,下层根据上层结果对 DG 进行选址定容优化再将结果反馈给上层进行网架的最优决策,上下层循环迭代得到综合最优的方案。

对网架和 DG 进行联合规划的问题,采用双层规划方法将其分解为 2 个单层次问题具有以下好处:可根据各自的特点建立合适的规划模型和选择不同的求解算法,对需要进行编码的算法而言,网架和 DG 分开编码可有效缩短编码的长度,减小模型的维度和计算量。但对双层规划而言,上层需优先进行决策,然后下层再根据上层的传递结果进行决策,因此整个优化过程是以上层为主的,规划中应根据具体问题的侧重点合理进行上下层选择。

### 3.3 多阶段规划方法

配电网规划是一个中长期的过程,为充分考虑时间的动态因素降低问题的复杂度,相关研究提出将较长的规划期分为几个阶段的多阶段规划方法,使各阶段的方案在满足负荷需求和保证系统安全稳定运行的同时整个规划期的综合总成本最小。

由于各规划阶段只通过设备的投资成本直接产生联系,而其他成本均只和当前阶段的变量取值相关,文献[30]提出时序时间分割法进行多阶段规划,首先假设所有后续阶段的负荷水平与当前阶段相同,算出所有阶段目标函数中的网损、运行维护和可靠性成本,再以前一阶段的投资成本为依据对当前阶段目标函数中的投资成本进行修正。

当规划周期较长时,动态考虑各阶段负荷需求的变化,从整体最优的角度决定规划期内各设备的建设时间对提高方案的经济性和可靠性具有重要作用。文献[52]基于全寿命周期理论,在满足各阶段负荷增长需求的条件下,采用多阶段规划方法确定线路和分段开关的最佳建设时间。

动态规划方法能够根据各阶段规划区内的负荷增长速度确定各阶段的最佳规划方案,以避免过度投资。文献[53]采用动态规划方法进行变电站的多阶段规划,首先按照初始年和目标年的变电站容

量确定候选容量类型,然后根据中间各阶段的负荷确定变电站的最小容量,最后结合决策变量确定各阶段所需规划的变电站数目、容量类型和供电范围。文献[54]通过动态规划方法在各规划阶段的第一年计算线路、分段开关及变压器的投资成本,然后根据每年的负荷水平计算各年的能量损耗成本和供电不足期望值成本,确定各阶段的变电站和线路规划方案。

近些年提出了一种基于反向传播算法的多阶段规划方法<sup>[55]</sup>,该方法的主要步骤是:首先根据成本-效益分析法确定规划期末年峰值负荷水平下 DG、变电站和线路的规划方案集,然后逐年向前推,通过成本-效益分析在后一年的规划方案集中确定前一年的最佳方案,直到完成整个阶段的规划,该方法可确定各项建设的最佳时间获得效益最好的规划方案。

多阶段规划方法虽能得到比较符合实际的规划方案,但阶段数的划分及各阶段的持续时间通常是按照经验进行的,缺乏一定的理论依据。同时需要考虑各阶段的决策变量之间的逻辑约束关系以及某阶段变量的取值是否受其他阶段的影响,使得规划模型复杂,求解困难,因此近年来配电网的多阶段规划方法的研究进展比较缓慢。

### 3.4 不确定性规划方法

配电网规划过程中存在很多不确定性因素,如未来负荷需求和负荷位置的不确定性、可再生 DG 出力的不确定性、电价的不确定性和运行设备故障率的不确定性等。近年来,在不确定性因素处理方面的研究取得了较大的进展,出现了多种不确定性规划方法,主要有基于概率模型、模糊理论、多场景分析、区间理论和机会约束的不确定性规划方法。

#### a. 基于概率模型的不确定性规划方法。

目前研究中常用 Beta 分布函数来表示光照强度的概率密度<sup>[50]</sup>,然后根据光照强度与光伏出力之间的关系得到不同光照强度下的光伏出力;风速概率模型多应用两参数的 Weibull 分布模型<sup>[12,44,59]</sup>,通过风速与风机出力之间的关系得到不同风速区间的风机出力;不确定性负荷的概率模型则多采用正态分布函数<sup>[12,44,59]</sup>,其参数通过负荷的历史数据得到。

在建立 DG 出力和负荷的概率模型基础上,文献[12,44]分别采用场景还原法和拉丁超立方抽样获得典型的组合场景,由此将不确定性规划转化为多个确定性场景下的规划。概率模型表示不确定因素的方法虽比较精确,但需大量的历史数据作为支撑。

#### b. 基于模糊理论的不确定性规划方法。

采用模糊理论对不确定性因素进行处理能够对问题进行极大的简化。文献[9]基于三角模糊数模型对负荷、电价、DG 出力及其运行成本和容量因子

的不确定性进行处理。文献[57]则采用梯形模糊变量表示负荷预测值的不确定性,建立目标函数和约束条件的模糊期望值模型,具有严格的数学意义,且能用可信性理论进行求解。但当变量的变化范围较大时,采用模糊理论可能会产生较大误差。

#### c. 基于多场景分析的不确定性规划方法。

将多个不确定性因素的可能取值进行组合的多场景分析法应用较为普遍。文献[38]采用多场景分析将风机、光伏出力和负荷在一年中的历史数据按照天数和小时数构造成一个高维的矩阵,然后进行聚类降维并将每一类的中心作为一个场景,但文中没有指出应该如何确定合适的聚类数量,以及如何选取典型场景。文献[58]将负荷和电价的可能取值进行场景组合,并求得每个场景的概率,在此基础上求某个场景下规划方案的初始投资,然后再求该场景向其他场景过渡时该规划方案的补偿投资,该方法获得的方案对未来的多种不确定场景都有一定的适应能力。

但当规划过程中需要考虑的不确定性因素较多且其取值范围变化较大时,组合场景较多,计算量增大,并且如何从数量众多的场景中选择典型场景仍是难点,由于规划方案是在单个场景下得到的,可能会出现最优方案所对应的场景在实际中发生概率非常小的情况,使最优方案不具有普遍适用性。

#### d. 基于区间理论的不确定性规划方法。

在规划中获得准确的负荷预测值往往比较困难,而负荷预测值的范围却较容易获得,因此区间理论具有一定的优势。文献[56]用区间数表示不确定性负荷,利用区间潮流端点法代入负荷的上下限值进行 2 次确定的潮流计算求得潮流的上下限值,进而求得目标函数的上下限值,并由此确定规划方案的可行区间,但负荷预测值的变化范围较大时可能产生较大的误差。

#### e. 基于机会约束的不确定性规划方法。

以上几种不确定性规划方法都需要严格满足模型的不等式约束条件,而实际运行中不可避免地会出现违反约束的情况。文献[46,60]在 DG 和负荷的每个时序组合场景下将严格的节点电压约束和支路功率约束转化为机会约束,以计及由不确定性因素引起的变量越限情况。机会约束规划允许在一定的置信度水平下出现不满足约束的情况,尤其是在含有大量不确定性的 DG 和负荷的配电网中,若严格保证节点电压和支路功率约束可能会使投资大幅增加,此时采用机会约束规划能综合考虑方案的经济性和安全风险,避免不必要的过度投资,但规划方案受置信度影响较大。

与确定性规划相比,通过不确定规划方法获得的规划方案对未来场景的变化具有更强的适应性,

方案的经济性和可靠性均优于确定性规划,但也会增加规划模型的复杂程度。基于概率模型、多场景分析、区间理论和模糊理论的不确定性规划方法的实质均是将不确定性规划转化为多个确定场景下的规划,需要进行多次确定性计算,增加了问题的计算量。

以上几种不确定性规划方法在不同的情形下都得到了应用,各有优缺点,几种方法的比较见表 2。

表 2 不确定性规划方法的比较

Table 2 Comparison of uncertainty planning methods

方法	优点	缺点	适用场合
概率模型	建模比较准确	需要大量的历史数据支持,计算量较大	对精度要求高的场合
多场景分析	简化问题求解难度,便于计算	难以确定场景削减的数目和典型场景,易忽视极端情况	组合场景较少且易确定典型场景的场合
模糊理论	计算量相对较小,计算效率高	只能获得模糊潮流的大致分布,精度较差	不确定因素变化范围不大时
区间理论	只需要进行 2 次确定计算,计算量较小	只能获得 2 组用区间端点值计算的潮流分布,精度较差	不确定因素变化范围较小精度要求不高时
机会约束	允许少量越限,符合实际运行	可信度水平的选取对规划方案的影响较大	允许电压和功率在某些情况下越限的场合

### 3.5 几种规划方法的比较

针对不同的规划模型出现了与之相对应的多种规划方法,这些方法各有其优缺点和适用性,几种规划方法的比较见表 3。

表 3 规划方法的比较

Table 3 Comparison of planning methods

方法	优点	缺点	适用场合
多目标规划方法	得到一组 Pareto 最优解集供决策者进行选择	计算量大,求解时间长	对多个子目标进行协调的场合
双层规划方法	上下层模型之间关系明确,可选择不同算法	上下层规划结果相互影响,需要反复传递,计算量大	规划方案和运行方式的同时优化或 DG 与网架的同时规划
多阶段规划方法	能考虑时间的动态因素,规划方案更符合实际	各阶段决策变量之间的逻辑关系复杂,求解困难	建设周期较长的规划项目
不确定性规划方法	方案更适应未来的不确定性场景	模型更加复杂,计算量大,求解困难	考虑 DG 出力、负荷、电价等因素变化的场合

## 4 求解算法

配电网规划模型中存在大量的二进制或整数型决策变量以及各种线性和非线性的目标函数和约束条件,模型求解比较复杂,因此对求解算法的研究一直是配电网规划问题的重点内容。目前主要采用数学优化算法和人工智能优化算法对配电网规划问题的目标函数进行求解。

### 4.1 数学优化算法

数学优化算法在理论上可保证解的最优性,被用于多种场合。文献[13]通过混合整数非线性规划方法获得线路路径和型号的规划方案。文献[15]采用动态规划法对导线型号进行选择。文献[19]采用多目标动态规划算法对多阶段的网架模型进行求解。文献[25]通过最小生成树算法产生辐射状网架,并结合地理条件和人工干预得到馈线沿街道的规划方案。文献[63-64]分别将非线性的混合整数规划模型进行松弛化和分段近似线性化,然后用分支定界法求解,但系统规模增大时分支的次数会显著增多,分支定界法需要求解的子问题数目急剧增加,非常耗时。

虽然数学规划算法在理论上可以保证解的最优性,但随着问题的规模及复杂度的增大,算法不易找到最优解,不适合求解大规模的规划问题。

### 4.2 人工智能优化算法

禁忌搜索算法、模拟退火算法、粒子群算法、遗传算法、蚁群算法等人工智能优化算法的研究给配电网规划问题的求解注入了新的活力,这些算法能以较高的搜索速度和求解效率在合理时间内取得较好的优化结果。

文献[30,54]采用多目标禁忌搜索算法求解配电网规划问题。除禁忌搜索算法自身的搜索列表外,文献[54]还引入 Pareto 列表和候选列表分别存放目前搜索到的非支配解集和未搜索到的非支配解集,以提高算法的求解速度。

由于模拟退火算法受参数的影响较大,当问题规模较大时,若选择较大的初始温度会加大计算量,若初始温度较小算法又容易陷入局部最优。文献[18]将模拟退火算法与遗传算法相结合用于求解网架模型。文献[65]将最陡下降法和模拟退火算法相结合,通过最陡下降法确定网架的初始方案以加快模拟退火算法的收敛速度。

粒子群算法在配电网规划领域应用非常广泛,其改进算法在搜索性能和收敛性能方面都得到了很大提高。文献[48]引入自适应非线性惯性权重递减函数对粒子群算法的权重进行动态调整,并通过成功阈值系数对粒子更新表达式进行动态调整。文献[49,51]对惯性权重和学习因子采用动态减小策略,利用变异或混沌扰动操作避免粒子陷入局部最优。

遗传算法的编码方式和遗传算子对其求解效率有重要影响,因此出现了格雷码与二进制码组合的编码<sup>[17]</sup>、基于树形结构的联合编码<sup>[21]</sup>和量子位实数编码<sup>[46]</sup>等改进的编码方式用于提高算法的效率。文献[49,62]则分别通过组织膜计算中的多种交流规则和限制可交叉的遗传因子最大数量的方式来改

进遗传算子,提高算法的搜索能力。但随着配电网规模的增大,遗传编码的长度会显著增加,迭代过程中产生的不可行解的数量也会随之增加。

文献[58]提出一种基于云模型的改进蚁群算法,利用云模型的不确定性关联规则推理对信息素挥发系数和信息素强度进行定性控制与动态选取,加快算法的求解效率和收敛速度,但是蚁群算法存在需要对大量参数进行调整的问题,并且需要多次运行。

近年来配电网规划问题的求解出现了一些比较新的方法,如果蝇优化算法<sup>[5]</sup>、借鉴生物免疫机制的改进萤火虫算法<sup>[12]</sup>、改进的细菌觅食算法<sup>[14]</sup>、基于优化原则的直接算法<sup>[20,22]</sup>、以排序比较和目标软化为核心思想的向量序优化方法<sup>[23]</sup>、引入并行计算的新型遗传膜优化算法<sup>[40]</sup>和改进的带 Levy 飞行的杜鹃搜索算法<sup>[42-43]</sup>等。

虽然人工智能优化算法有许多优点,但也存在以下问题:大部分算法的搜索性能和收敛性能在很大程度上取决于算法的控制参数,如模拟退火遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等,但目前对各种算法参数的设定还没有严格的理论依据,多采用经验法或实验法;最终解的好坏在一定程度上取决于初始解;迭代过程还容易陷入局部最优和产生不可行解,因此算法不能保证最终解为全局最优解。为了克服算法自身的缺陷并充分发挥其优势,许多研究对智能算法的组合展开了探索。

#### 4.3 2 类优化算法的比较

由以上分析可知,数学优化算法和人工智能优化算法各有优缺点和适用性,2 类算法的比较见表 4。

表 4 2 类算法的比较

Table 4 Comparison between two algorithms

求解算法	优点	缺点	适用场合
数学优化算法	能获得理论上的最优解;搜索精度高	建模时需进行大量简化;规模较大时求解难度大	小规模的规划问题
人工智能优化算法	模型的目标函数与算法的适应度函数容易转化;算法的搜索速度快,计算效率高,通用性强	算法的搜索性能和收敛性能对参数具有较强的依赖性;迭代时易产生不可行解;易陷入局部最优,搜索精度不够高,不能保证最终解的最优性	大规模、非线性、多目标、多层次的规划问题

## 5 总结与展望

### 5.1 总结

本文主要从规划模型、规划方法以及求解算法 3 个方面对配电网规划研究现状进行了总结归纳,得出了以下主要结论。

a. 规划模型变得更加复杂,近年来随着配电网

中 DG、电动汽车、参与需求侧响应的用户的增多,以及主动管理策略的实施,配电网规划模型在传统的变电站规划、网架规划、变电站与网架的联合规划模型的基础上,增加了 DG 规划模型、DG 与网架的联合规划模型、主动管理模式下的规划模型和考虑多利益主体的规划模型等。

b. 规划方法方面,多目标规划方法应用较多;两层规划方法在网架和 DG 的协同规划中应用较为简便;多阶段规划方法由于其复杂的逻辑约束关系发展较慢;近年来不确定性规划方法得到了快速发展,研究中提出了多种不确定性规划方法。

c. 求解算法方面,基本的智能优化算法得到了许多改进,其全局寻优能力和求解速度都有了很大的提高,许多研究也开始采用组合算法,近年来一些比较新颖的智能优化算法也被引入配电网规划领域中。但大多算法的搜索性能和收敛性能都受到其参数的影响,而目前参数设置主要采用经验值法或实验法,尚没有形成具体的理论,并且部分算法在迭代过程中产生不可行解的问题仍然无法避免。

### 5.2 展望

尽管在配电网规划问题方面,现有研究已经取得了许多成果,但是近年来智能配电网、DG、电动汽车、储能和需求侧响应等新技术的快速发展使配电网逐渐发生了许多转变,并且当前各领域掀起了关于人工智能的研究热潮,因此在新形式下配电网规划仍有许多的可研究空间。笔者认为今后的研究重点包含以下几个方面。

a. 随着各种新技术的发展,配电网将成为包含多种电源的系统,今后的规划模型应更加注重各类电源与网架的协调规划。并且通常得到的网架方案只表示电源与负荷之间的连接关系,还需通过人工干预才能获得沿街道分布的网架方案,因此今后可以建立基于人工智能技术的馈线沿街道的自动布线系统。

b. 未来的配电网中 DG 的渗透率会更高,电动汽车、储能以及参与需求侧响应等新技术的应用也会更多,建立基于人工智能的配电网主动管理系统,将更有利于各种新技术的接入,实现各种资源的统筹协调,提高规划方案的经济性和可靠性。

c. 新技术应用于配电网增加了规划过程中的不确定性因素,对规划方案产生了诸多影响,如何对这些不确定性因素进行处理是当前配电网规划研究的难点,人工智能技术的发展将有望对 DG 出力和储能状态等不确定性因素进行更为精细和精确的处理,为配电网规划提供数据支持。

d. 电力电子设备的广泛应用和人工智能技术的发展给配电网的灵活运行带来了无限可能,今后除考虑规划方案的经济性和可靠性,还应将规划方

案的灵活性纳入配电网规划模型的目标函数或约束条件中,因此对规划方案的灵活性指标的建模和计算将会成为研究热点。

### 参考文献:

- [ 1 ] 曹昉,孟琦斌,苗培青,等. 基于改进加权 Voronoi 图和遗传算法的变电站规划[J]. 电网技术,2015,39(2):511-517.  
CAO Fang, MENG Qibin, MIAO Peiqing, et al. Optimal substation planning based on improved weighted Voronoi diagram and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 511-517.
- [ 2 ] 李燕青,谢庆,王岭,等. 云理论在配电网变电站选址定容中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):672-677.  
LI Yanqing, XIE Qing, WANG Ling, et al. Application of cloud theory to optimal planning of substation locating and sizing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 672-677.
- [ 3 ] 姜小静,苏海锋,梁志瑞. 计及风险成本的配电网变电站规划方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):141-145.  
JIANG Xiaojing, SU Haifeng, LIANG Zhirui. Distribution network substation planning method considering risk cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 141-145.
- [ 4 ] 苏海锋,张建华,梁志瑞,等. 基于 GIS 空间分析与改进粒子群算法的变电站全寿命周期成本规划[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):92-99.  
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation life cycle cost planning based on the GIS spatial analysis and improved PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 92-99.
- [ 5 ] 彭文,杜晓东,石敏. 基于负荷区域划分的配电网变电站规划模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):112-117.  
PENG Wen, DU Xiaodong, SHI Min. Distribution substation planning model based on load area division[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 112-117.
- [ 6 ] 刘自发,张伟. 基于地理信息因子及自适应小生境微分进化算法的变电站规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):42-47.  
LIU Zifa, ZHANG Wei. Substation planning based on geographic information factor and adaptive niche differential evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 42-47.
- [ 7 ] 栗然,申雪,钟超,等. 考虑环境效益的分布式电源多目标规划[J]. 电网技术,2014,38(6):1471-1478.  
LI Ran, SHEN Xue, ZHONG Chao, et al. Multi-objective planning of distributed generation considering environmental benefit[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1471-1478.
- [ 8 ] 王瑞琪,李珂,张承慧,等. 基于多目标混沌量子遗传算法的分布式电源规划[J]. 电网技术,2011,35(12):183-189.  
WANG Ruiqi, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed generation planning based on multi-objective chaotic quantum genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 183-189.
- [ 9 ] 曾鸣,杜楠,张鲲,等. 基于多目标静态模糊模型的分布式电源规划[J]. 电网技术,2013,37(4):954-959.  
ZENG Ming, DU Nan, ZHANG Kun, et al. Distributed generation planning based on multi-objective static fuzzy model[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 954-959.
- [ 10 ] SHEN X, SHAIDEHPUR M, HAN Y, et al. Expansion planning of active distribution networks with centralized and distributed energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 126-134.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 石季英,薛飞,李雅静,等. 基于免疫二进制萤火虫算法的主动配电网低碳目标网架规划[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(5):507-513.  
SHI Jiying, XUE Fei, LI Yajing, et al. Low carbon target space grid planning of active distribution network based on immune binary firefly algorithm[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2017, 50(5): 507-513.
- [ 13 ] JABR R A. Polyhedral formulations and loop elimination constraints for distribution network expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1888-1898.
- [ 14 ] SACHIN S, GHOSE T, GOSWAMI S K. Optimal feeder routing based on the bacterial foraging technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 70-78.
- [ 15 ] MOREIRA J C, MIGUEZ E, VILACHA C, et al. Large-scale network layout optimization for radial distribution networks by parallel computing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1946-1952.
- [ 16 ] 唐利锋,卫志农,王成亮,等. 基于公共信息模型的配电网网架优化规划[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):43-49.  
TANG Lifeng, WEI Zhinong, WANG Chengliang, et al. Optimal planning of distribution network structure based on public information model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 43-49.
- [ 17 ] 叶斌,李万启,王绪利,等. 含分布式新能源的配电网风险规划[J]. 电力建设,2016,37(4):117-123.  
YE Bin, LI Wanqi, WANG Xuli, et al. Risk planning of distribution network with distributed energy sources[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 117-123.
- [ 18 ] 王坤,王蕾,赵兴亮. 基于 LCC 与模拟退火遗传算法的配电网网架优化研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(增刊1):95-100.  
WANG Kun, WANG Lei, ZHAO Xingliang. Distribution network structure optimization based on LCC and simulated annealing genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(Supplement 1): 95-100.
- [ 19 ] GANGULY S, SAHOO N C, DAS D. Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 46(11): 65-78.
- [ 20 ] SAMUI A, SINGH S, GHOSE T, et al. A direct approach to optimal feeder routing for radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 253-260.
- [ 21 ] 李志铿,王钢,陈志刚,等. 计及区域自组网的含分布式电源配电网网架柔性规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):42-47.  
LI Zhikang, WANG Gang, CHEN Zhigang, et al. Flexible planning of distribution network structure with distributed generation considering regional self-organizing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 42-47.
- [ 22 ] SAMUI A, SAMANTARAY S R, PANDA G. Distribution system planning considering reliable feeder routing[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2012, 6(6): 503-514.
- [ 23 ] 吴霜,卫志农,孙国强,等. 考虑网络抗毁性的配电网网架多目标规划[J]. 电力系统自动化,2014,38(3):137-142.  
WU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Multiobjective pro-

- gramming of distribution network structure considering network invulnerability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3):137-142.
- [24] 杨丽徙,曾新梅,方强华,等. 基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8):65-69.  
YANG Lixi, ZENG Xinmei, FANG Qianghua, et al. Topology of medium voltage distribution network based on invulnerability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8):65-69.
- [25] 霍凯龙,王主丁,畅刚,等. 目标年中压配电网规划实用方法[J]. 电网技术, 2013, 37(6):1769-1774.  
HUO Kailong, WANG Zhuding, CHANG Gang, et al. A practical method for medium voltage distribution network planning in target year[J]. Power System Technology, 2013, 37(6):1769-1774.
- [26] 徐芮,刘俊勇,刘友波,等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主次网架规划方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6):48-55.  
XU Rui, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Distribution network primary and secondary grid planning considering load clustering partitioning and distributed generation access[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):48-55.
- [27] FRANCO J F, RIDER M J, ROMERO R. A mixed-integer quadratically-constrained programming model for the distribution system expansion planning[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 62(9):265-272.
- [28] NAJAFI S, HOSSEINIAN S H, ABEDI M, et al. A framework for optimal planning in large distribution networks[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2009, 24(2):1019-1028.
- [29] COSSI A M, DA SILVA L G W, LAZARO R A R, et al. Primary power distribution systems planning taking into account reliability, operation and expansion costs[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(3):274-284.
- [30] ZIARI I, LEDWICH G, GHOSH A, et al. Optimal distribution network reinforcement considering load growth, line loss, and reliability[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2013, 28(2):587-597.
- [31] 吕涛,唐巍,丛鹏伟,等. 分布式电源与配电网架多目标协调规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21):139-145.  
LÜ Tao, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-objective coordinated planning of distributed generation and distribution network[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(21):139-145.
- [32] 李振文,陈宏,熊尚峰,等. 考虑分布式发电和联络线的配电网扩展规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1):63-67.  
LI Zhenwen, CHEN Hong, XIONG Shangfeng, et al. Expansion planning for distribution network considering DG and tie-lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1):63-67.
- [33] 吕冰,颜伟,赵霞,等. 考虑能量随机性的分布式风电和联络线协调规划[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):145-153.  
LÜ Bing, YAN Wei, ZHAO Xia, et al. Coordinated allocation of tie lines and DWGs considering random energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):145-153.
- [34] ZIARI I, LEDWICH G, GHOSH A. Integrated distribution systems planning to improve reliability under load growth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2):757-766.
- [35] 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.
- [36] 李振坤,岳美,胡荣,等. 计及分布式电源与可平移负荷的变电站优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18):4883-4893.  
LI Zhenkun, YUE Mei, HU Rong, et al. Optimal planning of substation considering distributed generation and shiftable loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18):4883-4893.
- [37] 方陈,张翔,程浩忠,等. 主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J]. 电网技术, 2014, 38(4):823-829.  
FANG Chen, ZHANG Xiang, CHENG Haozhong, et al. Framework planning of distribution network containing distributed generation considering active management[J]. Power System Technology, 2014, 38(4):823-829.
- [38] 邢海军,程浩忠,杨镜非,等. 考虑多种主动管理策略的配电网扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23):70-76.  
XING Haijun, CHENG Haozhong, YANG Jingfei, et al. Distribution network expansion planning with various active management strategies[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(23):70-76.
- [39] 张沈习,李珂,程浩忠,等. 主动管理模式下分布式风电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9):208-214.  
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Location and capacity planning of distributed wind power generation under active management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):208-214.
- [40] 李遂云,雷霞,邱少引,等. 考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J]. 电网技术, 2017, 41(2):378-388.  
LI Shuyun, LEI Xia, QIU Shaoyin, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” benefits[J]. Power System Technology, 2017, 41(2):378-388.
- [41] 曾鸣,舒彤,史慧,等. 兼顾分布式发电商利益的有源配电网规划[J]. 电网技术, 2015, 39(5):1379-1384.  
ZENG Ming, SHU Tong, SHI Hui, et al. An active distribution network planning taking interest of distributed genco into account[J]. Power System Technology, 2015, 39(5):1379-1384.
- [42] 温俊强,曾博,张建华. 市场环境下考虑各利益主体博弈的分布式电源双层规划方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15):61-67.  
WEN Junqiang, ZENG Bo, ZHANG Jianhua. Bilevel planning method of distributed generation considering game of interest subjects in market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15):61-67.
- [43] 孙鹏,罗明武,孙朝霞,等. 采用改进杜鹃搜索算法的主动配电网双层分布式风电规划方法[J]. 电网技术, 2016, 40(9):2743-2751.  
SUN Peng, LUO Mingwu, SUN Zhaoxia, et al. An improved approach based on cuckoo search algorithm for bi-level distributed wind generation planning in active distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(9):2743-2751.
- [44] 张立梅,唐巍,王少林,等. 综合考虑供电公司及独立发电商利益的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4):23-28.  
ZHANG Limei, TANG Wei, WANG Shaolin, et al. Distributed power planning considering the interests of distribution companies and independent generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4):23-28.
- [45] 江知瀚,陈金富. 计及不确定性和多投资主体需求指标的分布式电源优化配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31):34-42.  
JIANG Zhihan, CHEN Jinfu. Optimal distributed generator allocation

- method considering uncertainties and requirements of different investment entities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 34-42.
- [46] 屈高强,李荣,董晓晶,等. 基于随机机会约束规划的有源配电网多目标规划[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 10-16.  
QU Gaoqiang, LI Rong, DONG Xiaojing, et al. Multi-objective planning of active distribution network based on stochastic chance constrained programming[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 10-16.
- [47] 盛四清,范林涛,李兴,等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 51-57.  
SHENG Siqing, FAN Lintao, LI Xing, et al. Multi-objective planning of distribution network based on Pareto optimality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 51-57.
- [48] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 6-13.  
LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization planning of distribution network considering distributed generation access[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.
- [49] 张彼德,何岷,张强,等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85.  
ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 80-85.
- [50] 唐念,夏明超,肖伟栋,等. 考虑多种分布式电源及其随机特性的配电网多目标扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 45-52.  
TANG Nian, XIA Mingchao, XIAO Weidong, et al. Multi-objective expansion planning of active distribution systems considering distributed generator types and uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 45-52.
- [51] 芦新波,张建华,行晋源. 考虑 DG 与网架适应性的配网双层优化规划[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 56-63.  
LU Xinbo, ZHANG Jianhua, XING Jinyuan. Bi-level optimization planning of distribution network considering adaptability between DG and framework[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 56-63.
- [52] 苏海锋,张建华,梁志瑞,等. 基于 LCC 和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 118-127.  
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Multi-stage planning optimization for power distribution network based on LCC and improved PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 118-127.
- [53] 葛少云,贾鸥莎. 配电变电站多阶段优化规划模型[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 113-118.  
GE Shaoyun, JIA Ousha. Multi-stage model for optimal distribution substation planning[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 113-118.
- [54] JUNIOR B R P, COSSI A M, CONTRERAS J, et al. Multi-objective multistage distribution system planning using tabu search[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 5(6): 56-66.
- [55] HUMAYD A S B, BHATTACHARYA K. Comprehensive multi-year distribution system planning using back-propagation approach[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(12): 1415-1425.
- [56] 张亚璇,严萃群,唐巍,等. 基于改进遗传算法的新建变电站中压配电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 73-78.  
ZHANG Yaxuan, YAN Cuiqun, TANG Wei, et al. The middle-voltage distribution network planning of new substation based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 73-78.
- [57] 杨毅,韦钢,周冰,等. 基于模糊期望值模型的配电网网架规划[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 200-206.  
YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing, et al. Distribution network planning based on fuzzy expected value model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 200-206.
- [58] 李思,宋珺峥,沙立成. 基于风险度评价和改进蚁群算法的配电网网架规划[J]. 中国电力, 2009, 42(11): 52-57.  
LI Si, SONG Junzheng, SHA Licheng. Power distribution network planning based on risk assessment and improved ant colony algorithm[J]. Electric Power, 2009, 42(11): 52-57.
- [59] 张新松,张沈习,袁越. 含分布式风电源的配电网网架规划[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 1-6.  
ZHANG Xinsong, ZHANG Shenxi, YUAN Yue. Grid planning for distribution network with distributed wind generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 1-6.
- [60] 白牧可,唐巍,张璐,等. 基于机会约束规划的 DG 与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 346-354.  
BAI Muke, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 346-354.
- [61] MOGHADDAM M M, POULADKHAY M. Short-term distribution network expansion planning considering load and price uncertainties[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2016, 21(32): 45-50.
- [62] WANG T C, OCHOA L F, HARRISON G P. Modified GA and data envelopment analysis for multistage distribution network expansion planning under uncertainty[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2011, 26(2): 897-904.
- [63] 高燕,杨仁刚,李伟. 配电网扩展规划方法研究[J]. 电力建设, 2013, 34(4): 8-14.  
GAO Yan, YANG Rengang, LI Wei. Research on power distribution network expansion planning[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(4): 8-14.
- [64] LOTERO R C, CONTRERAS J. Distribution system planning with reliability[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2011, 26(4): 2552-2562.
- [65] NAHMAN J M, PEROC D M. Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 790-795.

#### 作者简介:



肖 白

肖 白(1973—),男,吉林吉林人,教授,博士,长期从事电力系统规划、城市电网风险评估、电力系统继电保护等方面的研究与教学工作(**E-mail**:xbxiaobai@126.com);

郭 蓓(1993—),女,重庆人,硕士研究生,主要从事城市电网规划的研究工作(**E-mail**:smilegbb@163.com)。

(下转第 217 页 continued on page 217)

电力自动化设备,2009,29(3):101-105.

HUANG Fangng,HUANG Chengjun,CHEN Chen,et al. Study and application of UPFC stabilizer [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):101-105.

[14] 郑三保,程时杰. UPFC 动态特性仿真研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(7):26-29.

ZHENG Sanbao,CHENG Shijie. Dynamic simulation study of the UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(7):26-29.

#### 作者简介:



李兴建

李兴建(1977—),男,山东潍坊人,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为继电保护测试(E-mail:lixj@nrec.com);

笃峻(1975—),男,江苏南京人,研究员级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统自动化。

## Research and application of sub-module test device for UPFC converter valve

LI Xingjian, DU Jun, YAO Tingting, YU Zhe, ZHANG Yandong, QI Qi, WEI Xing

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Aiming at the grading debugging of new UPFC (Unified Power Flow Controller) project, an automatic debugging method is proposed, and a test device is designed to solve the sub-module debugging of converter valve. The test device consists of test management unit and the test execution unit. The test management unit is the core of the test device, which controls the test execution unit through internal distributed bus. The test execution unit includes valve-controlled simulation module, sampling module and energy control module. The valve-controlled simulation module can simulate communication protocol of valve-controlled device and control sub-module to realize function test and state monitoring at the same time. The sampling module acquires the related voltage state of sub-module. The energy control module can control energy output to test the charge and discharge logics for sub-module. The test manager unit configures the parameter, including control protocol and the topologic structure of sub-module to control test function and flow. Combining the sampling information and communication state information, the test manager unit can make test judgment and give the test report at the end of test, so as to complete automatic debugging of sub-module of UPFC project. Engineering practice shows that the proposed method is fully applicable to the requirements of field acceptance test and factory debugging.

**Key words:** UPFC; converter valve; sub-module; automatic test

(上接第 211 页 continued from page 211)

## Review and prospect of distribution network planning

XIAO Bai, GUO Bei

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The research of distribution network planning is reviewed from planning model, planning method and solving algorithm. According to the content of distribution network planning, whether to take active management measures and the difference of stakeholders considered, the planning models are classified into five categories: power source planning, grid structure planning, joint planning of power source and grid structure, planning under active management measures and planning of multi-stakeholder, and the key issues of planning models are commented. According to the number of objective functions, the number of layers, time dynamics and whether uncertainties are taken into account in the planning model, the planning methods are classified into four types: multi-objective planning, bilevel planning, multi-stage planning and uncertainty planning, and the planning methods are analyzed. The advantages, disadvantages and applicability of mathematical and artificial intelligence optimization algorithms used for solving the objective functions of distribution network planning are compared. Finally, the future research direction of distribution network planning is prospected.

**Key words:** distribution network planning; planning model; planning method; solving algorithm