

## 面向高比例可再生能源的输电网规划方法研究进展与展望

柳璐<sup>1</sup>, 程浩忠<sup>1</sup>, 吴耀武<sup>2</sup>, 陈皓勇<sup>3</sup>, 张宁<sup>4</sup>, 王智冬<sup>5</sup>

- (1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240;  
2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074; 3. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640;  
4. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084;  
5. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 102209)

**摘要:** 为应对高比例可再生能源接入带来的消纳问题,提出了以多场景技术、鲁棒优化技术和协同规划技术为核心的输电网规划理论,涵盖不同适用条件或需求场景下的4种不同规划方法,即基于多场景的输电网随机规划方法、基于概率驱动的输电网鲁棒规划方法、考虑多源互补的网-源协同规划方法以及与配电网相协同的输电网规划方法,能够从输电网规划的角度在安全稳定前提下提高可再生能源消纳能力。在此基础上,对未来输电网规划方法进行了展望,提出了满足更高安全稳定需求、协同更广泛的源-网-荷-储柔性互动、推动大数据应用和挖掘电力市场机制激励空间的可能研究方向,并探讨了研究难点和解决方式。

**关键词:** 可再生能源; 输电网规划; 随机规划; 鲁棒规划; 协同规划

### 0 引言

高比例可再生能源并网将成为未来电力系统的基本特征<sup>[1]</sup>。然而,高比例可再生能源运行特性区别于传统电源,电源波动甚至超过了负荷波动而成为系统不确定性的主要来源。由于电源增长与负荷增长不匹配,或系统调峰能力有限、外送通道不畅,高比例可再生能源的消纳一直都是世界性难题。另外,随着可再生能源跨地区、跨流域远距离输送,中国电力系统电力电子化、交直流混联化的趋势逐步显现,给电力系统安全稳定运行带来一定隐患,同时也对其提出了更高要求。

传统的输电网规划以满足峰值负荷为目的。高比例可再生能源并网下,电力系统运行方式多样化促进输电网规划考虑多场景,电力电量平衡概率化促进输电网规划概率化,电力系统源-荷界限模糊化促使输电网规划考虑与电源协同,电网潮流双向化促使输电网规划考虑与配电网相协同。因此,有必要提出面向高比例可再生能源的输电网规划理论与方法,在计算效率效果、适用性和协同对象上对传统的输电网规划做出改进。

收稿日期: 2020-11-14; 修回日期: 2021-01-18。

上网日期: 2021-05-13。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51807116)。

从国外研究现状来看,研究人员普遍关注到了如何在规划过程中处理可再生能源的不确定性,提高可再生能源消纳、增强安全稳定。文献[2-3]将鲁棒优化理论用于不确定性因素建模;文献[4-5]则基于多场景理论提出输电网规划模型。也有部分研究开始着眼于协同规划,文献[6-9]提出了可再生能源与输电网线路的联合扩展模型。从国内研究现状来看,研究者多从指标<sup>[10-13]</sup>和协同<sup>[14-16]</sup>2个方面入手应对可再生能源问题。文献[10]提出电力系统供需灵活性指标,建立多目标优化的双层输电网扩展规划模型;文献[11]提出电网运行效率评价指标,建立了考虑投资成本、运行成本、弃风损失与电网运行效率的输电网规划优化模型;文献[12-13]提出适应性指标,建立输电网多目标规划模型;文献[14-15]均是网-储协调规划模型;文献[16]则是风电场接入与输电网协调规划模型。

### 1 典型研究进展和成果

文献[17]指出,到2050年中国可再生能源能够供应60%以上的一次能源消费,为中国进行能源战略的部署指明了方向。

2016年开始,中国科学技术部陆续部署了一批战略性、基础性、前瞻性重点研发计划项目,在涉及可再生能源方面取得了不少进展和突破。2016年立项的“分布式可再生能源发电集群灵活并网集成

关键技术及示范”项目,提出了高渗透率分布式发电集群优化规划设计方法。2016年立项的“支撑低碳冬奥的智能电网综合示范工程”项目,突破了多能互补的分布式能源与微网系统及其相关技术。2017年立项的“交直流混合的分布式可再生能源关键技术、核心装备和工程示范研究”,正在构建多个多类型分布式可再生能源互补系统示范工程。

本文基于2016年开展的国家重点研发计划项目研究成果,针对文献[1]提出的关键科学问题“高比例可再生能源并网对电力系统形态演化的影响机理和源-荷的强不确定性约束下输电网规划和运行问题”,以文献[18]提出的科学问题为指引,提出了以多场景技术、鲁棒优化技术和协同规划技术为核心的输电网规划理论,涵盖不同适用条件或需求场景下的4种不同规划方法。首先是基于多场景的输电网随机规划方法,为应对可再生能源不确定性带来的海量场景。文献[19]内嵌场景削减,采用少量典型场景乘子平均值逼近原有多个场景的平均值加速随机规划求解。其次是基于概率驱动的输电网鲁棒规划方法。文献[20-21]分别构建了基于风电极限场景和基于概率驱动的两阶段输电网鲁棒规划模型,前者将规划模型鲁棒性转化为可行性,保证规划方案对极限场景集内的任意风电波动均具鲁棒性,同时取得经济性最优;后者充分利用可获取的概率分布信息降低鲁棒规划方案保守性。然后是面向高比例可再生能源考虑多源互补的网-源协同规划方法,文献[22]内嵌多类型电源运行模拟,同时考虑可再生能源和负荷的长短期不确定性。最后是面向高比例可再生能源与配电网相协同的输电网规划方法,文献[23]建立了混合输电网的分布式随机优化规划模型,采用分析目标级联法解耦输电网和配电网。上述4种规划方法均将运行与规划相结合,分别适合已知可再生能源概率分布强调经济性的规划场景、未知可再生能源概率分布强调安全性的规划场景、可再生能源集中接入源侧的规划场景和可再生能源接入不同电压等级电网的规划场景,较其他文献提高了可再生能源消纳能力,能够适应未来高比例可再生能源接入的电力系统。上述方法有助于丰富中国电力系统规划理论与方法,也将有助于促使传统的输电网规划方法向考虑多场景、概率化和协同化的方向发展。

## 2 基于多场景的输电网随机规划方法

### 2.1 随机规划模型

高比例可再生能源的时空分布特性导致系统运行状态多样化,且不同时刻运行状态差异较大,在电

网规划中需要考虑海量场景的多样性。基于多场景技术的输电网随机规划模型<sup>[19]</sup>目标函数为:

$$\min \left( \sum_{l \in \Omega_{LN}} c_l x_l + \sum_{s \in \Omega_s} \alpha_s \left( \sum_{g \in \Omega_G} \sum_{t \in T} c_g p_{g,s,t} + \sum_{n \in \Omega_N} \sum_{t \in T} c_n p_{r,n,s,t} \right) \right) \quad (1)$$

式中: $c_l$ 为待建线路 $l$ 的投资成本; $c_g$ 为常规机组 $g$ 的单位发电成本; $c_n$ 为节点 $n$ 的单位切负荷成本; $x_l$ 为线路 $l$ 投建与否的决策变量; $p_{g,s,t}$ 为常规机组 $g$ 在时段 $t$ 、场景 $s$ 的出力; $p_{r,n,s,t}$ 为节点 $n$ 在时段 $t$ 、场景 $s$ 的切负荷量; $\alpha_s$ 为场景 $s$ 出现的年电量贡献率概率,这里的场景是包含多个时段以天为单位的场景; $T$ 为总时段集合; $\Omega_{LN}$ 为待建线路集合; $\Omega_s$ 为场景集合; $\Omega_G$ 为常规机组集合; $\Omega_N$ 为节点集合。

式(1)中,第1项为年化线路投资成本,第2项为发电出力运行成本,第3项为切负荷惩罚成本。上述模型的约束条件包括节点功率平衡约束、已建线路功率潮流表达式、待建线路功率潮流表达式、节点切负荷约束、已建线路功率潮流容量约束、待建线路功率潮流容量约束、常规发电机组输出功率的上下限约束、可再生能源输出功率的上下限约束、可再生能源消纳约束和决策变量的整数约束。

上述模型为大规模混合整数规划问题,随机规划模型框架如图1所示。

变量	投资决策变量 (0-1变量)	运行变量(连续变量)
目标函数	投资成本	运行成本
约束条件	线路建设约束 投资决策变量约束	场景 $n$ 下的电量平衡约束 场景 $n$ 下的电源出力约束 场景 $n$ 下的已有线路潮流约束 场景 $n$ 下的新建线路潮流约束 ...

图1 随机规划模型框架

Fig. 1 Framework of stochastic planning model

### 2.2 基于内嵌场景削减的Benders算法

Benders算法将电网规划问题分解为投资规划主问题和多个场景的运行模拟子问题,通过迭代得到最优解。但是,将海量运行场景直接融入优化模型中,往往会带来巨大的计算负担,甚至导致计算资源不足,难以求解。在Benders算法的迭代过程中,引入多参数规划方法研究不同场景参数(如负荷和可再生能源出力等)对最优解的影响,形成参数等值空间进行场景聚类。求解聚类场景对应的运行子问题并反馈给规划主问题,从而更好地保留海量场景提供的不确定信息,保证解的最优性<sup>[19]</sup>。内嵌场景削减的Benders算法流程图如图2所示。

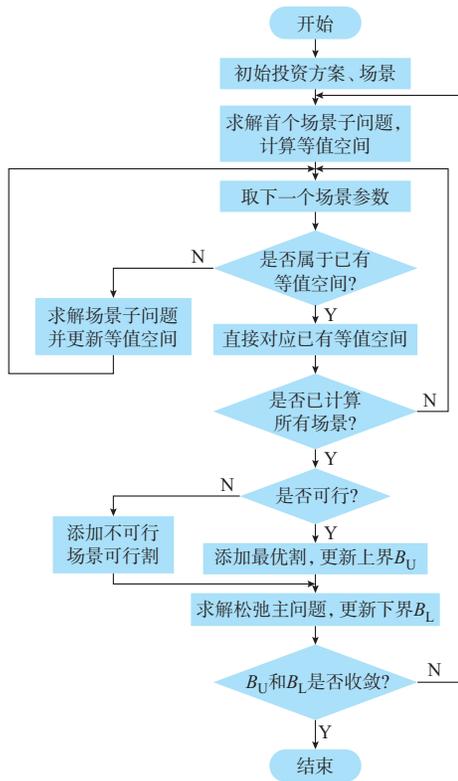


图2 随机规划模型内嵌场景削减的Benders算法流程图  
Fig. 2 Flow chart of Benders algorithm with scene reduction embedded for stochastic planning model

与复杂的聚类方法相比,内嵌场景削减在一定程度上保证了对总体刻画的有效性,在迭代过程中并不舍弃任何一个场景,真正意义上保留了总体信息,保证了计算高效性,降低了内存存储规模,非常适合大规模电力系统计算。

### 3 基于概率驱动的输电网鲁棒规划方法

#### 3.1 鲁棒规划模型

传统鲁棒规划问题是 min-max-min 模型,核心思想是已知不确定参数可能取值的集合,寻找一个在不确定参数所有可能取值下均可行且优化结果较好的解。为了降低保守性,充分利用可获取的概率分布信息,构建了包含 1-范数和无穷范数的混合不确定集刻画可再生能源出力场景  $s$  的概率  $q_s$ ,这里的场景为小时级场景。基于概率驱动的输电网鲁棒规划模型<sup>[21]</sup>目标函数为:

$$\min \left( \sum_{l \in \Omega_{L,N}} c_l x_l + \max_{q_s \in \Psi} \min_{y(\cdot)} \left( \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{g \in \Omega_G} q_s c_g p_{g,s} + \sum_{s \in \Omega_s} \sum_{n \in \Omega_N} q_s (c_{n,a} p_{n,a,s} + c_{n,r} p_{r,n,s}) \right) \right) \quad (2)$$

式中:  $c_{n,a}$  为节点  $n$  的单位弃能成本;  $c_{n,r}$  为节点  $n$  的

单位切负荷成本;  $p_{g,s}$  为常规机组  $g$  在场景  $s$  的出力;  $p_{n,a,s}$  为节点  $n$  在场景  $s$  的弃能量;  $p_{r,n,s}$  为节点  $n$  在场景  $s$  的切负荷量;  $\Psi$  为可再生能源出力的概率集合;  $y(\cdot)$  为运行约束函数。

式(2)中,第1项为年化线路投资成本,第2项为发电出力运行成本,第3项为可再生能源弃能成本,第4项为切负荷惩罚成本。模型属于三层优化问题,外层优化寻找最小化的投资扩展策略;中间层在外层给定的投资扩展策略下,寻找最恶劣的概率波动;内层在外层投资扩展策略和中间层概率不确定集给定的情况下,寻找最优的系统运行策略。式(2)与2.1节随机规划模型的约束条件类似,此外,鲁棒规划模型的约束条件还包括不确定集约束和可再生能源弃能约束。

#### 3.2 可并行列与约束生成求解算法

列与约束生成 (column and constraint generation, CCG) 算法相比 Benders 算法具有更低的复杂度,对变量类型不敏感,但对大规模优化问题仍然难以求解。并行 CCG 算法<sup>[21]</sup>将中层和内层的 max-min 两层优化问题分解为多个可以并行计算的小型线性优化问题,从而避免了高度非凸双线性项的出现。算法主问题决定模型第1阶段的投资决策变量,对于第  $k$  次迭代,在主问题给定的情况下,子问题尝试寻找最严重的运行状况。根据子问题是否能够取得最优解,迭代地向主问题动态添加一系列起作用的积极约束。因此,主问题由原问题的松弛约束组成。由于主问题是一个混合整数线性规划模型,可以由先进求解器有效求解。鲁棒规划模型的并行 CCG 算法流程图如图3所示。

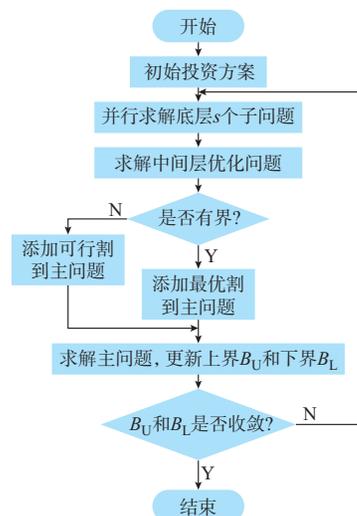


图3 鲁棒规划模型的并行 CCG 算法流程图  
Fig. 3 Flow chart of parallel CCG algorithm for robust planning model

## 4 面向高比例可再生能源考虑多源互补的网-源协同规划方法

### 4.1 网-源协同规划模型

电源与电网建设主体具有多样性的特点。近年来,电源与电网规划建设的不协调和不匹配受到广泛关注,为了优化利用资源,电源规划与电网规划需要协同考虑、协调进行。为了克服传统规划以机组作为模型优化变量带来的忽略电源地理特点和无法计及施工约束等缺点,以电厂装机和电网线路建设与否作为网-源协同规划模型的优化变量,建立网-源协同规划模型<sup>[22]</sup>的目标函数为:

$$\min \left( \sum_{y=1}^Y \left( \sum_{i \in \Omega_{GN}} C_{g,i,y} + \sum_{j \in \Omega_{LN}} C_{L,j,y} + C_{o,y} + C_{a,y} + C_{r,y} \right) \right) \quad (3)$$

式中:  $Y$  为规划周期;  $C_{g,i,y}$  为第  $y$  年电厂  $i$  的投资成本;  $C_{L,j,y}$  为第  $y$  年线路  $j$  的投资成本;  $C_{o,y}$  为第  $y$  年运行成本,包括发电成本和网源运行维护成本;  $C_{a,y}$  为第  $y$  年可再生能源弃能成本;  $C_{r,y}$  为第  $y$  年切负荷成本;  $\Omega_{GN}$  为新建电厂集合。

模型约束条件包括网侧约束条件与源侧约束条件。网侧约束条件与 2.1 节随机规划模型的约束条件类似。源侧约束条件包括投资决策约束(电厂投运年限、装机规模、建设时序、厂址互斥和可再生能源渗透率等)、运行优化约束(备用、调峰平衡、电量平衡、启停时间、台数约束和爬坡约束等)和可靠性约束(年电量不足期望值约束等)。传统规划仅考虑全年最大负荷,而本节则考虑了全年 8 760 h 的负荷状况,提高了规划的精确性,同时考虑了可再生能源的渗透率及弃电率约束,实现了可再生能源的容量替代效益的最大化。

### 4.2 分解协调算法

网-源协同规划模型可分为 2 层:第 1 层是电源和电网规划,向第 2 层传递电源和网架方案;第 2 层是发输电运行模拟,向第 1 层反馈运行成本、潮流和出力方式等运行信息。采用分解协调的思路,对 2 层模型分别进行求解和反复迭代,其框架结构如图 4 所示。

针对第 2 层发输电运行进行模拟。第 1 步,不考虑电网输电能力约束,仅对系统及各分区进行 8 760 h 时序运行模拟,优化分区间交换的电力电量、各类机组开机、机组工作位置和发电出力,得到不考虑电网输电能力约束下系统各机组 8 760 h 的发电出力和分区间联络线 8 760 h 交换功率的优化值。第 2 步,基于直流潮流约束对火电开机容量进行再优化。第 3 步,计算各类电站运行约束最大

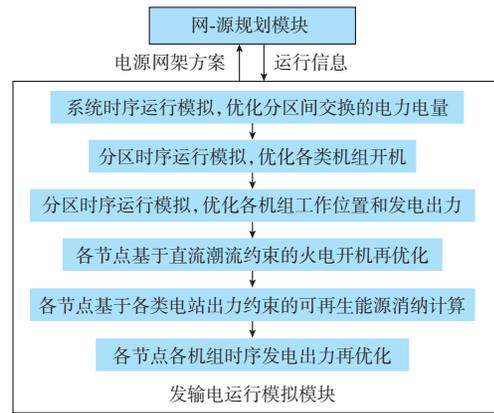


图 4 网-源协同规划模型分解协调算法框架  
Fig. 4 Framework of decomposition-coordination algorithm for grid-source coordinated planning model

化可再生能源消纳能力。最后,再优化各机组时序出力并输出计算结果。多类型电源包括火电、水电、核电、可再生能源、光热和储能。

## 5 面向高比例可再生能源与配电网相协同的输电网规划方法

### 5.1 输电网分布式优化规划模型

随着可再生能源不断接入配电网,在某些时刻配电网可能体现出“源”的属性。为了应对“源”属性的配电网,建立输配电网分布式优化规划模型,通过输配电网边界传输的有功功率和节点电压将模型分解为输电子系统和配电子系统<sup>[23]</sup>。分解后的输配电子系统独立求解满足本区域投资、运行约束的线路建设和发电调度方案,仅需要向相邻系统传递边界功率和节点电压信息。

输电子系统目标函数如式(4)所示。式(4)中:第 1 项为年化输电网线路投资成本,第 2 项为输电网输电运行成本,第 3 项为切负荷惩罚成本。输电子系统既需优化输电网网架结构,又涉及对发电机出力和目标变量的优化。根据分解协调思想将其建立为双层规划模型。上层为输电网网架规划问题,下层为发电机出力和输电网向配电网提供的有功功率的优化问题。上层将输电网网架结构传递给下层,下层则在此基础上进行发电机出力和输电网侧共享变量的规划,并将计算结果传递给上层。约束条件为:

$$\min \left( \sum_{l \in \Omega_{LN}} c_l x_l + \sum_{s \in \Omega_S} \alpha_s \left( \sum_{g \in \Omega_G} \sum_{t \in T} c_{H,g} p_{H,g,s,t} + \sum_{n \in \Omega_N} \sum_{t \in T} c_{H,n} p_{H,n,r,s,t} \right) \right) \quad (4)$$

式中:  $c_{H,g}$  为输电网中常规机组  $g$  的单位发电成本;

$p_{H,g,s,t}$  输电网中常规机组  $g$  在时段  $t$ 、场景  $s$  的出力;  
 $c_{H,n}$  为输电网中节点  $n$  的单位切负荷成本; $p_{H,n,r,s,t}$  为  
 输电网中节点  $n$  在时段  $t$ 、场景  $s$  的切负荷。

配电子系统目标函数如式(5)所示。式(5)中,  
 第1项是配电网配电运行成本,第2项为切负荷惩  
 罚成本。与输电子系统不同,配电子系统不需要规  
 划网架线路。约束条件包括配电网节点功率平衡方  
 程、潮流方程、线路容量约束、机组出力约束和电压  
 幅值约束。

$$\min \sum_{s \in \Omega_s} \alpha_s \left( \sum_{g \in \Omega_G} \sum_{t \in T} c_{L,g} p_{L,g,s,t} + \sum_{n \in \Omega_N} \sum_{t \in T} c_{L,n} p_{L,n,r,s,t} \right) \quad (5)$$

式中: $c_{L,g}$  为配电网中常规机组  $g$  的单位发电成本;  
 $p_{L,g,s,t}$  配电网中常规机组  $g$  在时段  $t$ 、场景  $s$  的出力;  
 $c_{L,n}$  为配电网中节点  $n$  的单位切负荷成本; $p_{L,n,r,s,t}$  为  
 配电网中节点  $n$  在时段  $t$ 、场景  $s$  的切负荷。

### 5.2 基于分析目标级联的分布式优化算法

分析目标级联法是基于并行思想由内、外2层  
 循环构成的一种迭代式求解方法,与输配电网分布  
 式优化规划模型的层级结构一致。在分析目标级联  
 算法框架下,将输配边界节点传输功率和节点电压  
 一致性约束以罚函数松弛到目标函数中,定义  $\Delta p_{i,s}$   
 和  $\Delta U_{i,s}$  分别为在时段  $t$ 、场景  $s$  的功率和电压的输  
 配电网差值,原目标函数式(4)和式(5)可分别改写为  
 式(6)和式(7)。

$$\min \left( \sum_{l \in \Omega_{LN}} c_l x_l + \sum_{s \in \Omega_s} \alpha_s \left( \sum_{g \in \Omega_G} \sum_{t \in T} c_{H,g} p_{H,g,s,t} + \sum_{n \in \Omega_N} \sum_{t \in T} c_{H,n} p_{H,n,r,s,t} \right) + \omega \Delta p_{i,s} + \omega \Delta U_{i,s} + \beta \Delta p_{i,s}^2 + \beta \Delta U_{i,s}^2 \right) \quad (6)$$

$$\min \left( \sum_{s \in \Omega_s} \alpha_s \left( \sum_{g \in \Omega_G} \sum_{t \in T} c_{L,g} p_{L,g,s,t} + \sum_{n \in \Omega_N} \sum_{t \in T} c_{L,n} p_{L,n,r,s,t} \right) + \omega \Delta p_{i,s} + \omega \Delta U_{i,s} + \beta \Delta p_{i,s}^2 + \beta \Delta U_{i,s}^2 \right) \quad (7)$$

式中; $\omega$  和  $\beta$  分别为罚函数的一次项系数和二次项  
 系数。

基于分析目标级联的分布式优化算法流程<sup>[23]</sup>  
 如图5所示。

## 6 标准算例系统下的规划方法分析

基于研究成果开发了适用于高比例可再生能源  
 输电网规划的HRP-38标准算例<sup>[24]</sup>。

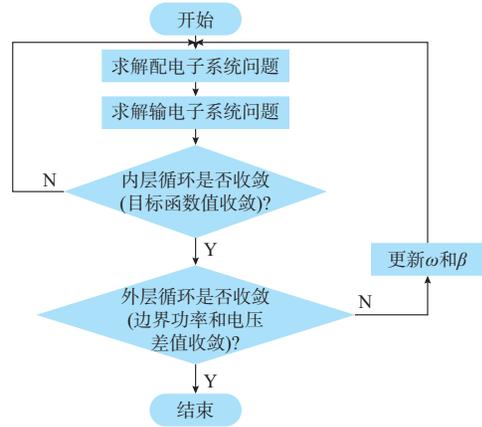


图5 基于分析目标级联的分布式优化算法流程图  
 Fig.5 Flow chart of distributed optimization  
 algorithm based on analysis of target cascading

本文提出的方法目标函数以投资成本、运行成  
 本、切负荷成本之和最小为主,将运行与规划相结  
 合。约束条件涵盖可再生能源电量比例(弃能约束)  
 以提高可再生能源消纳能力。由于不同方法的侧重  
 点不同,因此规划结果也存在显著差异。在HRP-38  
 标准算例下的结果显示,随机规划计算时间缩短为  
 传统Benders算法的19%,选取海量运行场景对规  
 划方案在整体经济性上有所改善;鲁棒规划虽然增  
 加了投资成本,但在应对极限场景时的整体经济性  
 上有所改善;网-源协同规划在规划网架的同时,  
 规划减少的发电机组容量为21 GW,在提高可再生  
 能源利用率方面优势明显;输配协同规划针对HRP-  
 38标准算例的 $D_2$ 和 $D_3$ 区进行,在提高运行经济  
 性的同时也能够提高可再生能源消纳能力。总之,  
 随机规划适用于历史数据具备大量可再生能源概  
 率分布的场景,简单易行且经济性好;鲁棒规划  
 适用于可再生能源历史数据缺乏的场景,特别是强  
 调最严重运行场景时,安全性较高;网-源协同规  
 划适用于可再生能源集中接入的送端输电网场景;  
 输配协同规划适用于可再生能源分布式接入不同  
 电压等级的受端输电网场景。

## 7 输电网规划方法的前景展望

本文提出的面向高比例可再生能源的输电网  
 规划理论解决了输电网在消纳高比例可再生能源  
 和计算效率上的一些问题,但面对未来新技术的  
 发展和新形势的要求,仍然有值得继续研究和挖  
 掘的空间。

### 7.1 满足更高安全稳定需求

由于高比例可再生能源电力系统场景数量  
 激增,可能出现某几个特殊场景不满足安全稳定  
 的情况。而传统典型输电网规划方案一般采用后  
 校验方法来判断其静态、暂态、频率、电压安全  
 和短路电流

校验等,只能判别所得规划方案是否安全稳定,无法直接体现在规划模型中。为满足更高安全稳定需求,在高比例可再生能源电力系统中可能更需要考虑更多安全稳定因素。

例如考虑静/暂态安全,对于海量场景下的静态安全,可以进一步探寻更加快速高效的场景削减方法。对于暂态稳定,可以考虑引入动态安全域理论,利用节点注入功率空间上的超平面方程提供暂态可行边界或者内嵌时域仿真计算暂态稳定裕度,形成线性化暂态稳定约束,并反馈给输电网规划模型。在考虑频率安全时,面对电力系统转动惯量不足而引起的频率安全问题,目前一般通过频率控制来进行动态调整。然而,缺乏从宏观规划角度约束并优化所有电源惯量以保证系统满足一定调频能力。该问题的难点在于能够提供惯量的对象再发展,包括可再生能源、特高压直流和新型负荷等,其惯量的大小与其接入方式、调频模式和控制方式密切相关,如何将传统频域中的频率分析与时域中的优化规划模型相结合<sup>[25]</sup>也是难点所在。此外,还有短路电流因素,随着用电负荷密度不断增大,电网结构紧密程度不断提高,部分临近电厂或出线相对集中的变电站母线短路电流超标。合理的电网结构是解决电力系统短路电流超标的优先措施,但目前主要集中在电力系统运行层面,在电力系统规划<sup>[26]</sup>中考虑较少。可行的思路为充分挖掘柔性直流输电接入和新能源集群对短路电流的影响,建立面向可再生能源电力系统的短路电流计算模型,协同考虑规划层面和运行层面各项短路电流限制措施,实现规划运行全局层面的短路电流限制。

## 7.2 协同更广泛的源-网-荷-储柔性互动

随着中央“新基建”的加快落实,源-网-荷-储的各领域迎来新型技术基础设施的提速建设,电力系统将呈现源-网-荷-储深度互动的趋势。更广泛的源-网-荷-储是指在能源互联网背景下,融合了电力、天然气、交通甚至信息等的多源协同系统,包括常规的可再生能源、储能、电动汽车,以及新型的主动负荷、信息负荷和碳捕集电厂等。这些元素有的表现出负荷特性,在某些时候也会表现出电源特性,并且受众多不确定性因素的强烈影响,具备一定的响应能力,为输电网规划问题提供了另一种解决途径。其中,储能是实现柔性互动的关键灵活性资源,可以平抑可再生能源出力波动性、缓解线路阻塞和延缓电网升级改造。这一部分的难点在于如何协同多类型储能的多种服务形式,实现更广泛源-网-荷-储的柔性互动。此外,能源网互联互通可为电网提供多元调节手段,分析电网与其他能源系统的耦合机制,提出电网与多能系统联合效率效益的

评价方法及提升策略。统筹能源互联优化电网规划方法是首先需要解决的问题。

## 7.3 推动大数据应用

随着能源革命与数字革命的融合发展,大数据在电力系统中的应用逐渐深入,主要体现在预测、状态估计、模式识别和决策分析等方面。传统的电力系统规划问题是以电力系统基本定律为基础建立起来的完整物理模型。在给定的负荷水平及拓扑参数下,采用数值计算和优化求解等方法得到线路建设方案及相应的运行数据。基于大数据的电力系统规划问题,则可通过对采集的电力大数据进行系统分析处理,以数据驱动的方式描绘规划过程中的不确定性因素、运行方式和场景等,减少对物理模型的依赖,甚至直接得出估计的规划方案。数据驱动的方法完全从历史数据中进行学习,是大数据应用的优点,同时也是缺点,其难点在于目前有限的量测数据还不能构成大数据基础。

除此之外,还有实时电价数据、天气数据和通信数据等多元数据也没有充分挖掘出其蕴含的价值。实际的遥测通信环境中存在诸多非理想因素,比如量测误差、数据畸变和时延等不确定因素。如何准确地对这类存在的不确定因素进行建模和处理,直接影响规划方案应对不确定因素的鲁棒性。智能感知是实现海量数据收集分析的重要基础,也是值得尝试的方向之一。

## 7.4 挖掘电力市场机制激励空间

高比例可再生能源电力系统将规划与运行相结合,越来越多地在规划层面考虑到机组启停机、线路主动断线和联络线功率调整等运行手段。但这些运行手段是否被采纳、是否能由设备所有者主动实现都值得商榷。需要建立在一定的市场导向下,具备一定的效益和效果,新能源厂商才会愿意主动弃能以提供备用。因此,采用市场杠杆激发网-源-荷-储各类调节手段对电网的主动支撑作用,挖掘电力市场机制激励空间并在电网规划模型中考虑电力市场激励作用,是未来规划发展的必然途径。目前,该问题的难点在于电力市场机制仍处在不断创新发展的过程中。例如清洁能源参与电力市场,对电力市场的出清价格会产生波动影响,加大了日前市场与实时市场之间的价格差异,同时也加大了市场参与者收益的不确定性,进一步加剧了电力系统规划的不确定性。随着电力市场化的建设推进,在规划过程中挖掘电力市场机制激励空间具有广泛的应用前景。

## 8 结语

以绿色发展、净零排放和碳中和等为目标,中国

电力系统形态正在发生巨大变化,输电网规划方法也需要不断进步和发展。为应对高比例可再生能源接入带来的消纳问题,提出了相应的输电网规划理论,涵盖不同适用条件或需求场景下的4种不同规划方法,即基于多场景的输电网随机规划方法、基于概率驱动的输电网鲁棒规划方法、考虑多源互补的网源协同规划方法以及与配电网相协同的输电网规划方法。其中,随机规划方法适用于具备大量可再生能源概率分布历史数据的场景,简单易行且经济性好。鲁棒规划方法适用于可再生能源历史数据缺乏的场景,尤其强调最严重运行场景,安全性较高。网-源协同规划方法适用于可再生能源集中接入源侧的场景。输配协同规划方法适用于可再生能源接入不同电压等级电网的场景。在此基础上,对未来输电网规划理论方法进行了展望,提出了满足更高安全稳定需求、协同更广泛的源-网-荷-储柔性互动、推动大数据应用和挖掘电力市场机制激励空间的可能研究方向,并探讨了研究难点和解决方式。

### 参考文献

- [1] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [2] JABR R A. Robust transmission network expansion planning with uncertain renewable generation and loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4558-4567.
- [3] BAGHERI A, ZHAO C Y, QIU F, et al. Resilient transmission hardening planning in a high renewable penetration era[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 873-882.
- [4] ORFANOS G A, GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1355-1362.
- [5] UGRANLI F, KARATEPE E. Transmission expansion planning for wind turbine integrated power systems considering contingency[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1476-1485.
- [6] MOREIRA A, POZO D, STREET A, et al. Reliable renewable generation and transmission expansion planning: Co-optimizing system's resources for meeting renewable targets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3246-3257.
- [7] ALXANDRE M, GORAN S, RODRIGO M, et al. A five-level MILP model for flexible transmission network planning under uncertainty: a min-max regret approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 486-501.
- [8] DEGHAN S, AMJADY N. Robust transmission and energy storage expansion planning in wind farm: integrated power systems considering transmission switching [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 765-774.
- [9] AIDA A M, EBRAHIM F, MOHAMMAD R. Composite generation and transmission expansion planning toward high renewable energy penetration in Iran Power Grid [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(9): 1520-1528.
- [10] 刘万宇,李华强,张弘历,等.考虑灵活性供需平衡的输电网扩展规划[J].电力系统自动化,2018,42(5):56-63.  
LIU Wanyu, LI Huaqiang, ZHANG Hongli, et al. Expansion planning of transmission grid based on coordination of flexible power supply and demand [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 56-63.
- [11] 刘自发,于寒宵,王帅,等.综合考虑运行效率和弃风损失的输电网规划[J].电网技术,2018,42(3):827-834.  
LIU Zifa, YU Hanxiao, WANG Shuai, et al. Transmission grid planning considering operation efficiency and wind curtailment loss [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 827-834.
- [12] 王晔,苟亮,苏韵掣.基于联合加权熵的高比例可再生能源电网适应性扩展规划[J].电力建设,2019,40(2):45-54.  
WANG Xi, GOU Jing, SU Yunche. Adaptability expansion planning of grid with high penetration renewable energy applying united weighted entropy theory [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 45-54.
- [13] 樊金柱,李华强,刘万宇,等.考虑网源协同的输电网适应性扩展规划[J].电网技术,2019,43(9):3360-3370.  
FAN Jinzhu, LI Huaqiang, LIU Wanyu, et al. Adaptability expansion planning of transmission grid considering grid-source coordination [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3360-3370.
- [14] 孙伟卿,刘唯,裴亮,等.高比例可再生能源背景下考虑储能系统价值的储-输多阶段联合规划[J].高电压技术,2021,47(3):983-993.  
SUN Weiqing, LIU Wei, PEI Liang, et al. Multistage energy storage-transmission network joint planning considering the system value of energy storage under the background of high penetration renewable energy [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 983-993.
- [15] 宋福龙,吴洲洋,张艳,等.大规模风电下基于模糊场景聚类的网-储协调规划方法[J].电力自动化设备,2018,38(2):74-80.  
SONG Fulong, WU Zhouyang, ZHANG Yan, et al. Fuzzy scene clustering based grid-energy storage coordinated planning method with large-scale wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 74-80.
- [16] 王秀丽,张凯,曾平良,等.基于多场景的风电场接入与输电网协调规划[J].电力建设,2015,36(10):36-52.  
WANG Xiuli, ZHANG Kai, ZENG Pingliang, et al. Coordinated planning of wind farm integration and transmission network based on multi-scenario [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10): 36-52.
- [17] 中国2050年高比例可再生能源发展情景研究[EB/OL]. [2020-11-14]. <https://news.bjx.com.cn/html/20160608/740762.shtml>.  
Study on development scenario of high proportion of renewable energy in China in 2050[EB/OL]. [2020-11-14]. <https://news.bjx.com.cn/html/20160608/740762.shtml>.
- [18] 程浩忠,李隽,吴耀武,等.考虑高比例可再生能源的交直流输

- 电网规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.  
CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27.
- [19] ZHUO Z Y, DU E S, ZHANG N, et al. Incorporating massive scenarios in transmission expansion planning with high renewable energy penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1061-1074.
- [20] 梁子鹏, 陈皓勇, 郑晓东, 等. 考虑风电极限场景的输电网鲁棒扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 58-67.  
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, ZHENG Xiaodong, et al. Robust expansion planning of transmission network considering extreme scenario of wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 58-67.
- [21] LIANG Z P, CHEN H Y, CHEN S M, et al. Probability-driven transmission expansion planning with high-penetration renewable power generation: a case study in Northwestern China[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113610.
- [22] WANG Y C, LOU S H, WU Y W, et al. Coordinated planning of transmission expansion and coal-fired power plants flexibility retrofits to accommodate the high penetration of wind power [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(20): 4702-4711.
- [23] LIU J, CHENG H Z, ZENG P L, et al. Decentralized stochastic optimization based planning of integrated transmission and distribution networks with distributed generation penetration [J]. Applied Energy, 2018, 220: 800-813.
- [24] ZHOU Z Y, ZHANG N, YANG J W, et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2597-2608.
- [25] NGUYEN N, ALMASABI S, BERA A, et al. Optimal power flow incorporating frequency security constraint [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 55(6): 6508-6516.
- [26] TEIMOURZADEH S, AMINIFAR F. MILP formulation for transmission expansion planning with short-circuit level constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 3109-3118.
- 柳璐(1983—),女,博士,副研究员,主要研究方向:电力系统规划与评估。E-mail:liulu52@163.com  
程浩忠(1962—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统规划、电压稳定、电能质量。E-mail:hzcheng@sjtu.edu.cn  
吴耀武(1963—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统规划。E-mail:ywwu@mail.hust.edu.cn

(编辑 杨松迎)

### Research Progress and Prospects of Transmission Expansion Planning Method for High Proportion of Renewable Energy

LIU Lu<sup>1</sup>, CHENG Haozhong<sup>1</sup>, WU Yaowu<sup>2</sup>, CHEN Haoyong<sup>3</sup>, ZHANG Ning<sup>4</sup>, WANG Zhidong<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

4. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

5. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** In order to deal with the consumption problem caused by the access of high proportion of renewable energy, the transmission planning theory based on multi-scenario technology, robust optimization technology and coordinated planning technology is proposed. The theory is composed of four different planning methods under different applicable conditions or in demand scenarios, i.e., multi-scenario based random planning method of transmission network, probability-driven based robust planning method of transmission network, coordinated network-source planning method considering multi-source complementarity and transmission network planning method coordinated with distribution network. It can improve renewable energy consumption from the perspective of transmission network planning on the premise of security and stability. On this basis, the future transmission network planning methods are prospected, and the possible research areas are proposed, including satisfying higher security and stability requirements, coordinating more extensive source-grid-load storage flexible interaction, promoting the application of big data and exploring the incentive space of electricity market mechanism. The corresponding research difficulties and feasible solutions are discussed.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900100) and National Natural Science Foundation of China (No. 51807116).

**Key words:** renewable energy; transmission expansion planning; stochastic planning; robust planning; coordinated planning

