第 41 卷 第 9 期 2017 年 5 月 10 日
DOI：10.7500/AEPS20170111001
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.41 No.9 May 10，2017

考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望

程浩忠[1]，李　隽[2]，吴耀武[3]，陈皓勇[4]，张　宁[5]，柳　璐[1]

（1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海市 200240；2. 国网北京经济技术研究院，北京市 102209；3. 华中科技大学电气与电子工程学院，湖北省武汉市 430074；4. 华南理工大学电力学院，广东省广州市 510640；5. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 100084）

摘要：未来高比例可再生能源的时空分布特性将给电力系统规划带来前所未有的挑战，电力系统基本形态与运行特性将发生根本性变化。文中在调研国内外研究现状的基础上，阐述了高比例可再生能源并网的输电网规划面临的科学问题，分别从网源协同规划、输电网柔性规划、与配电网协同的输电网规划、输电规划方案综合评价与决策方法四个方面，提出了考虑高比例可再生能源并网的输电网规划的研究思路与框架。最后，对未来高比例可再生能源并网的输电网规划进行了展望与总结。

关键词：高比例可再生能源；输电网规划；网源协同；柔性规划；综合评价

0　引言

目前能源安全和气候变化是人类社会面临的两大严峻挑战。大力发展风电、太阳能、水电等可再生能源，实现可再生能源逐步替代传统能源是中国乃至全球实现能源与经济可持续发展的重大需求[1-4]。高比例可再生能源并网将成为未来电力系统的重要特征。然而，在高比例可再生能源接入的未来电力系统中，作为电力供应重要支柱的风电和太阳能，其时空分布特性和不确定性将导致电力系统运行方式发生巨大改变，亟待重新探讨电力系统规划和运行机制[5]。在当前可再生能源并网的场景下，系统已经出现严重弃风弃光现象。《2016 上半年全国风电并网运行情况》指出，上半年风电弃风电量 32.3 TW·h，同比增加 14.8 TW·h，平均弃风率 21%，同比上升 6 个百分点。2016 年上半年全国风电平均利用小时数 917 h，同比下降 85 h。弃风弃光现象极大地阻碍了中国可再生能源的健康持续发展。解决可再生能源并网消纳问题成为国家的重大需求。

对于输电网，高比例可再生能源接入将使电力系统运行方式多样化、电网交直流连接复杂化[6]。尽管国内外对含有可再生能源的输电网规划已有一定研究基础，但仍缺乏高比例可再生能源接入对规划的影响机理研究和成熟的规划方法。本文围绕高比例可再生能源接入的输电网规划问题，首先，在充分调研研究现状的基础上，提出高比例可再生能源接入下的输电网规划面临的科学问题。然后，从以下三方面阐述输电网规划理论的研究框架：①网源协同规划方法；②输电网柔性规划方法；③与配电网相协同的输电网规划方法。接着，针对高比例可再生能源接入的输电网规划决策复杂化问题，阐述基于安全校核与生产模拟融合技术的规划方案综合评价与决策方法。最后，针对高比例可再生能源并网的输电网规划提出展望与总结。

1　研究现状

输电网连接着电源与负荷，其规划决策直接影响可再生能源的消纳，是电力系统中极为重要的基础性工作[7-8]。在高比例可再生能源接入的背景下，输电网规划的理论与方法更需要重点研究。

从网源协同角度来看，电网规划与电源规划都是大规模、高维度、非线性的混合整数规划问题，优化计算非常困难。在传统电力规划中源端不确定性因素相对较少，因而电源规划与电网规划的求解可以分开进行。随着强不确定性可再生能源的不断渗透，电源与电网分开优化的不协调、不匹配使得弃风和弃光等问题日益凸显[9]，需要研究含高比例可再生能源的网源协同规划方法。现有文献基于不同角度构建网源协同规划模型。例如：文献[10]提出了考虑分布式电源的网源协同规划模型，并在实际大

收稿日期：2017-01-11；修回日期：2017-02-18。
上网日期：2017-03-17。
国家重点研发计划资助项目（2016YFB0900102）。

规模系统中测试；文献[11]将可靠性指标纳入网源协同规划模型中；文献[12]提出了考虑调节机组与电网规划相结合的网源协同规划模型。文献[13]提出了同时计及风电随机性和模糊性的源网荷协同规划模型。但是，对未来考虑高比例可再生能源时空分布特性的网源协同规划还缺乏研究。

从柔性规划角度来看，高比例间歇性可再生能源的接入将给电网带来更强的不确定性。柔性规划方法计及规划过程中的不确定性因素，以寻求灵活性更强和适应性更好的柔性规划方案[14]。

目前，处理电网规划中的不确定性因素主要有两类方法：随机规划方法[15-20]和鲁棒优化方法[21-23]。输电网随机规划研究较为成熟。文献[24]应用多场景概率的方法考虑风电出力和负荷变化等不确定性因素，并提出了计及大型风电场的输电系统规划方法；文献[25]采用了基于极端场景集的场景法取代了基于蒙特卡洛仿真的场景法，在计算时间和精度方面均有所改善。文献[26]用对多个可能发生场景的确定性来描述风电的不确定性，并在规划场景内基于直流潮流等约束给出了以线路投资成本、发电成本、停电成本、负荷削减量最小为目标函数的最优潮流计算模型。文献[27]根据风速分布与风力发电机风速功率曲线推导出风力发电机功率的概率分布函数和概率密度函数。文献[28]利用不考虑和考虑风电场间发电出力的相关性比较分析了其对输电网规划方案的影响，并在此基础上构造了一种计及间歇性电源接纳能力的输电网规划两层模型。基于多场景技术的输电网规划是目前的主流方法，但仍存在大规模问题求解困难、低频事件随机特性难以获取等问题。不同于随机规划方法，鲁棒优化方法在输电网规划中的应用尚处于初步研究阶段，其不需要不确定参数的概率分布，求解规模与随机规划相比相对较小。文献[29]提出了考虑可再生能源出力与负荷不确定性的输电网鲁棒规划方法，通过构建不确定性集合描述不确定性因素。鲁棒优化方法所得规划方案的鲁棒特性可抵抗恶劣场景，但同时也存在规划方案过于保守的问题，自适应鲁棒优化[30]、轻鲁棒优化[31]等方法是解决其保守性问题的途径之一，文献[32]则将鲁棒优化与随机规划相结合以改善保守性。

从输配电网协调角度来看，输配电网的协调程度是电力系统安全性和经济性的重要基础。为保证各电压等级电网的充分协调，既不形成瓶颈，也不产生过大浪费，研究输配电网协调模型，对提高电网间各个部分之间的协调程度具有重要意义。在中国，各电压等级的电网往往由不同层级的电网企业或供电企业规划、由不同的部门管理。各级电网应相互支援，协调优化规划，确保电网的可靠性和经济性，避免不同电压等级电网之间容量不匹配、供电能力不协调等问题。在中国全面建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强智能电网的大背景下，加快各级电网协调问题的研究是形势所趋。目前，已有少量文献研究输配电网协调性[33-35]，在与配电网相协同的输电网规划方面尚无文献报道。

2　关键科学问题

2.1　考虑高比例可再生能源时空分布特性的网源协同与交直流输电网柔性规划方法

当非水可再生能源比例超过一定比例时，电力系统结构形态将会从量变走向质变。电力系统将出现电力电量平衡概率化、电力系统运行方式多样化、电网潮流双向化、电力系统稳定机理复杂化、电力系统灵活资源稀缺化、输配电系统源荷界限模糊化等特征[6]。可再生能源占比是指可再生能源发电量占负荷电量的比例；对于电源基地，可再生能源占比是指可再生能源发电量占当地发电总量的比例。

在源端强波动性、随机性与荷端大量含源负荷的共同作用之下，输配电网络的规划与运行特征也将发生根本性变化。具体地，对源端和荷端，通常需要对中长期和短期的可再生能源出力和负荷进行预测，为电力系统的规划和运行提供相应的边界条件，而可再生能源出力多时空耦合具有较大的不确定性；另外分布式可再生能源的接入对“净负荷”的预测也带来了极大的挑战；系统运行方式多样化、分散化、复杂化，如何使输电网规划能够包容所有的运行状态，同时还具有经济性，是输电网规划面临的重要科学问题。需要革新考虑高比例可再生能源的网源协同规划与交直流输电网柔性规划方法，以适应多时空强不确定性。

2.2　适应可再生能源发电和电网运行特性的交直流输电网规划方案多维度精细化运行模拟与综合评估方法

未来高比例可再生能源并网将使电力系统运行特性发生根本性变化。与此同时，随着多端直流及直流电网的发展，未来交直流混联电网将给电力系统带来一系列关于拓扑结构、经济性评估、安全性评估、可靠性评估、优化规划等关键技术问题。目前输电网运行与规划问题主要针对交流电网，如何在输电网运行与规划中考虑交直流混联的特性是需要研究的重点。具体地，直流电网的并入必然导致电网整体拓扑结构发生改变，同时并入大量电力电子设备，其控制策略与运行特性将对电网运行方式产生

重要影响。交直流混联电网的潮流计算方式、各类约束条件的表示形式都将有所不同[36]，其经济性评估、安全性评估、可靠性评估都需要对电力系统中的电力电子设备建立合适的数学模型。在高比例可再生能源并网与交直流混联的新型电网形态下，输电网规划方案的多维度精细化运行模拟与综合评价方法是亟待研究与解决的关键问题。

3　研究主线

针对高比例可再生能源并网、交直流混联的新型电网形态，本文提出了考虑高比例可再生能源的输电网规划理论研究脉络，分为以下四个方向：①考虑高比例可再生能源时空分布特性的网源协同规划；②基于随机规划和鲁棒优化的输电网柔性规划；③与配电网相协同的输电网规划；④规划方案综合评价与决策方法。其中前三点是输电网规划方法研究，最后一点为规划方案的综合评价方法研究。不同输电网规划方法及其侧重点如表 1 所示。

表 1　输电网规划方法比较

Table 1　Comparison of planning methods for transmission network

规划方法	新型电网形态		研究对象			规划模型		
	高比例可再生能源	交直流混联	电源	输电网	配电网	随机规划	鲁棒规划	多目标规划
网源协同规划	✓	✓	✓	✓		✓		✓
输电网随机规划	✓	✓		✓		✓		✓
输电网鲁棒规划	✓	✓		✓			✓	
与配电网相协同的输电网规划	✓	✓		✓	✓	✓		✓

4　交直流输电网多目标规划方法

4.1　网源协同规划

风电、光伏等可再生能源出力具有强波动性、随机性与时序性特点，直接将其海量的发电场景纳入网源协同规划，计算工作量巨大。基于海量发电场景的聚类方法，可以实现发电场景的归类削减，大幅降低网源协同规划的求解规模，但是容易遗漏对系统电力平衡和调峰平衡影响重大的关键场景。因此，需要考虑可再生能源发电场景与负荷的耦合特性，提出可再生能源发电聚类场景与关键场景的筛选与聚类方法，建立可再生能源发电的多场景时序与概率分布模型。

运行模拟的基本任务是客观地模拟规划水平年电力系统的运行方式，校验网源协同规划方案的可行性，并计算相关经济技术指标。高比例可再生能源并网将带来复杂、多维度、不确定性的电力系统运行形态。需要研究新的网源协调运行模拟方法，以适应高比例可再生能源并网、交直流混联网源协同规划的海量方案评估的需求。此外，网源协同规划建模应充分考虑高比例可再生能源发电的强波动性和随机性特点，以及电力系统的经济性、安全性和环保性。因此，网源规划的协同机制是模型优化求解的研究重点。考虑高比例可再生能源的网源协同研究框架如图 1 所示。

4.2　输电网柔性规划

4.2.1　基于多场景技术的输电网随机规划

基于多场景技术的输电网随机规划的主要思想是将不确定因素作为具有概率分布的随机变量，由离散化取值过程生成场景集合。将原不确定性优化问题转化为在场景集合下的确定性优化问题。其关键在于场景集合的生成与削减，以及规划模型建立和求解。

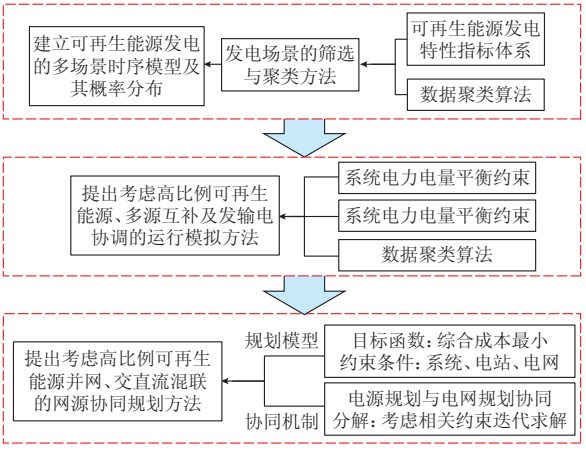

图 1　网源协同规划研究框架

Fig.1　Research framework of coordinated grid-source planning

在新型输电网形态下，随着可再生能源并网比例提高，不确定因素成倍增加，场景数量将呈指数增长。为解决场景数量骤增问题，当前研究者们提出了若干随机规划中的场景削减技术，按其思想方法可以划分为以下两类。

1）按因聚类，其数学原理可以简单地理解为通过比较不同场景之间的“距离”，从而合并相近的场景。该方法在数学上有相对完备的理论依据，但是没有充分利用随机优化问题本身的性质特点，因而

变成了相对独立于随机优化求解的过程。

2)按果聚类，该方法利用优化问题的信息对场景进行削减，如对基于单场景问题的目标函数优化值进行场景削减，通过衡量各种场景对于目标函数值的影响，在随机优化问题下削减获得具有代表性的场景。相较于按因聚类方法的严格数学推导，按果聚类的场景削减方法更好地利用了原问题的信息，但缺乏坚实的理论依据，属于一种经验式、启发性的方法。

综合考虑场景之间的差异性及优化问题的特殊性，将场景削减主要分为两步：场景聚类和代表场景选择[37]。K-均值、K-中心、层次聚类和模糊聚类等均是主流聚类方法，主要思路是选择概率最大的场景。然而小概率极端事件可能会被排除在外，适当保留极端场景，其方案才会更加鲁棒。对于代表场景选择，需要研究评估是选择概率最高的已有场景，还是将所有方案合成一个最具代表性的场景。

基于多场景技术的输电网规划的优化变量一般为线路投资决策变量及系统运行变量。目标函数一般包括线路投资成本及系统运行成本。约束条件包含投资约束及系统运行约束。系统运行约束一般仅考虑经济调度模型而不考虑机组启停状态约束。在系统运行约束中需要建立考虑线路投资状态的线路潮流约束。同时采用大 M 法将其约束转化为线性约束。进而使整个规划模型变成混合整数线性规划(MILP)模型。

4.2.2　高比例可再生能源并网的输电网鲁棒规划

输电网鲁棒规划是一种基于鲁棒优化理论的输电网规划方法。不同于随机规划，鲁棒优化通过不确定集合描述不确定因素[38]，不需要不确定因素的概率分布信息。其中不确定集合的设计与构建对模型的准确度和复杂度有着重要影响。输电网鲁棒规划模型通常为三层优化模型：上层目标函数为投资费用、运行费用最小，决策变量为线路投资整数型变量，以确定线路投资方案；中层目标函数为运行费用最大，以确定上层投资方案下的最差运行场景，决策变量为新能源出力与不确定性负荷，或其他不确定因素；下层问题为最优潮流问题，目标函数为运行费用最小，确定在上层投资方案下的最差场景中的最优潮流。

现有输电网鲁棒规划方法中将可再生能源出力和预测负荷的不确定性以区间模型表征，但是并未考虑可再生能源出力间的相关性及节点负荷间的相关性。因此需要考虑不确定因素的相关性，建立表征可再生能源出力与预测负荷相关性的鲁棒规划模型。输电网柔性规划研究框架如图 2 所示。

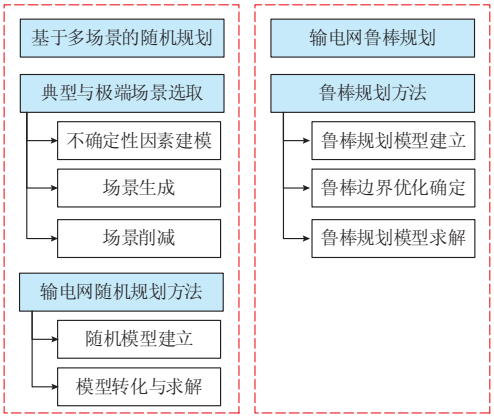

图 2　输电网柔性规划

Fig.2　Flexible planning for transmission network

4.3　与配电网相协同的输电网规划

4.3.1　价值指标

输电网规划中的价值指标通常由成本和收益所构成的函数关系来量度[39]。这种函数关系既可以为二者的差值，也可以为二者的比值。由差值关系导出的价值指标表示净收益的大小，但是它仅适用于成本与收益具有相同量纲的情况；由比值关系导出的价值指标表示单位成本所获得的收益，虽然其适用于成本与收益量纲不一致的情况，但比值关系易引入非线性，嵌入规划模型中时将增加模型的求解难度。

全寿命周期成本(LCC)是指在产品寿命周期或预期的有效寿命周期内，产品设计、研究投资、使用、维修及产品保障中发生的或可能发生的一切直接的、间接的、派生的或非派生的所有费用的总和[40]。LCC 较传统经济性指标更为准确、全面[41]。文献[42]针对输电网建立了包括时间维度、元件维度和费用维度的三维 LCC 层级模型，提出了基于 LCC 的电力系统经济性评估策略。而 LCC 建模的难点与关键在于系统费用构成体系或分解结构，保证既不遗漏又不重复。现有 LCC 模型仅考虑了设备故障的不确定性，没有考虑间歇式可再生能源等不确定性因素，因此需要研究多不确定因素环境下的输电网规范方案 LCC 模型[43]。

4.3.2　风险指标

电力系统中的风险评估是辨识不确定性事故发生的可能性及事故后果的严重程度，其本质是对不确定性因素的进一步量度以实现电网投资的风险可控[44]。从电网规划的角度来看，风险主要存在于规划方案的可行性和最优性两方面[45]。规划方案的可行性方面存在技术风险，技术风险因系统运行模拟所需参数的不确定性产生，主要涉及规划方案在

未来环境中对安全稳定性约束条件的满足，如存在电网规划方案对各项安全稳定运行约束可能越限等。规划方案的最优性方面存在经济风险，经济风险因市场的不可精确预测和各参与方市场行为的不确定性产生，如因市场交易中报价参数的波动性使得电网收益不确定等情况。

有效的风险评估依托于风险指标的构建，即对风险的描述。目前电力系统中对于风险的描述方式主要分为确定性和概率性两类：一类是利用随机变量的期望值和方差等数学特征；另一类是借鉴金融学中用于风险管理的风险价值（value at risk，VaR）与条件风险价值（conditional value at risk，CVaR）[46]。风险使得电网规划过程更加复杂，通过适当架线来合理控制系统风险已成为电网规划规避风险的重要研究方向。

4.3.3　输配电网协调性指标

目前，输配电网协调性评估体系还未成型，有待深入研究。合理的输配电网协调性评估应从可靠性、经济性、技术性等方面来构造输配电网协调性指标体系。在评价体系中的各类指标中，又可以分为输电网指标、配电网指标和输配电网指标，前两者是以输、配电网作为两个单独的研究对象构建协调性指标，而后者是以输、配电网作为一个整体来构建协调性指标。指标应具有明确的物理意义与简洁清晰的数学表达，指标间的关联与筛选是需要重点考虑的内容。所构建的输配电网协调性指标体系同时又可以作为输配电网协调性定义的有力支撑，二者相辅相成。

4.3.4　与配电网相协同的输电网多目标规划

在价值指标、风险指标、输配电网协调性指标的基础上，建立与配电网相协同且考虑经济性与安全性的交直流输电网多目标规划方法，技术路线如图 3 所示。

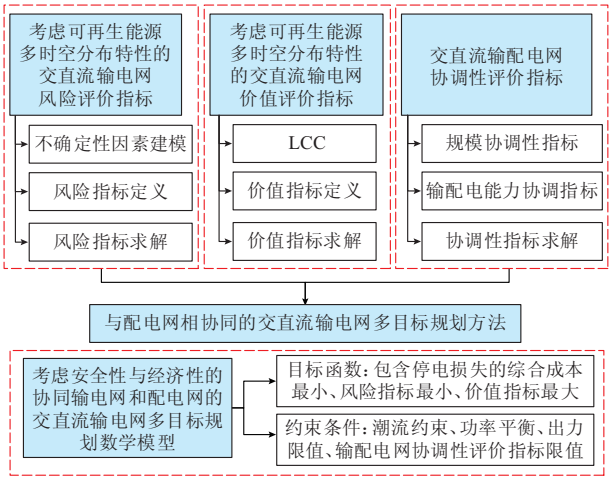

图 3　与配电网相协同的交直流输电网多目标规划
Fig.3　Multi-objective AC/DC transmission planning coordinated with distribution network

4.4　规划方案综合评估与决策

为建立考虑网络拓扑与可再生能源随机性的电力系统运行模拟模型，首先需要分析网络约束和调峰约束对高比例可再生能源弃电量的影响，提出基于精细化运行模拟的电力系统电力电量平衡分析方法。

1）考虑可再生能源发电的时空特性，建立规划可再生能源基地的时序出力模型，提出满足生产运行模拟精度要求的可再生能源出力生成技术。

2）提出考虑可再生能源海量运行场景的时序生产模拟技术，提高电力、电量平衡分析的准确度。

3）提出计及电网拓扑结构及输电能力的运行模拟方法，为适应高比例多地区可再生能源出力和负荷特性差异模拟的要求，提出可再生能源弃电量的网络约束和调峰约束的精细计算方法。

为有效、合理地衔接电力系统运行模拟和电网规划中电气计算分析，提取满足高比例可再生能源消纳的电网安全裕度相对小的运行方式，充分考虑可再生能源出力特性，需要提出适应高比例可再生能源时空分布特性的安全校核、时序生产模拟与电气计算的深度融合技术。具体包括：①建立满足电力负荷预测、电源规划、电网规划等多来源规划数据融合要求的数据模型；②提出基于时序运行模拟结果数据的潮流数据自动生成技术，提出考虑高比例可再生能源和高压直流（HVDC）的电网交流潮流无功优化调整方法及提高病态潮流收敛性的方法，改善电网规划潮流计算的收敛性；③提出满足规划人员工作需求的电网典型方式提取方法。最后，构建包融多种规划模型、多维评价指标的电网规划方案综合决策理论和方法。研究框架如图 4 所示。

5　挑战与展望

5.1　网源协同规划难点与解决思路

海量可再生能源发电场景纳入网源协同规划模型，计算工作量巨大，需要通过聚类方法实现场景削减。常规聚类方法容易遗漏概率小且对电力系统运行影响较大的场景。可在场景聚类与筛选过程中，考虑可再生能源发电与电力系统负荷的耦合特性，增加对系统电力平衡和调峰平衡影响较大的关键场景，与聚类场景一起构成可再生能源发电的多场景时序与概率分布模型。

网源协同规划模型是大规模、高维度、非线性的

混合整数规划问题，计算求解难度较大。一方面，通过研究相应的协同机制，将大规模的网源规划问题进行协调分解，形成若干个易于求解的子问题；另一方面，可以基于全局搜索能力强的智能优化方法和局部寻优效率高的数学优化方法，研究网源协同规划模型的高性能混合优化方法。

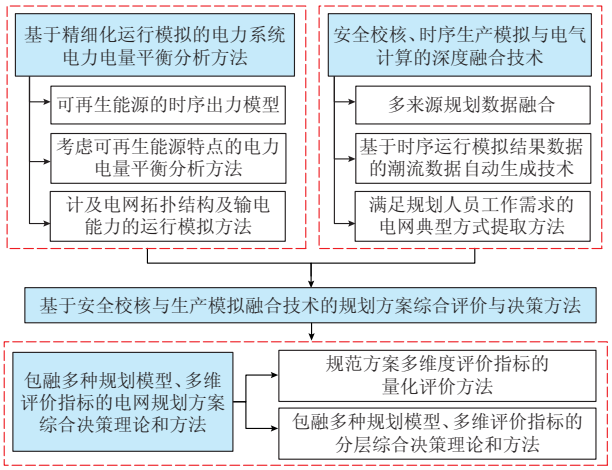

图 4　基于安全校核与生产模拟融合技术的规划方案综合评价与决策方法

Fig.4　Comprehensive evaluation and decision method based on merging technology of security check and production simulation

5.2　输电网柔性规划难点与解决思路

由于可再生能源和负荷等因素的不确定性，常规电网规划方法所制订的规划方案难于实施或具有较大偏差。目前基于多场景技术的输电网规划的主要挑战在于：①如何考虑交直流电网的建模及运行控制方式；②虽然采用场景削减技术，但规划模型仍规模较大，因此需要研究规划模型的高效求解技术。电力系统鲁棒规划理论的建立是研究难点，国内外可借鉴的研究成果不多，需在深入研究鲁棒优化、鲁棒控制和电力系统鲁棒调度的理论和方法的基础上，建立电力系统鲁棒规划的系统理论。在电力系统鲁棒规划中对于间歇式电源随机性的处理，一种方法是根据间歇式电源出力的概率模型将系统运行状态归结为多个场景（不确定集），并采用混合整数规划方法求解。模型求解可考虑充分利用 CPLEX 等商业数学优化软件进行算法研究。另一方面，还可研究电力系统鲁棒规划的博弈论方法。

5.3　与配电网相协同的输电网规划难点与解决思路

与配电网相协同的交直流输电网规划模型为复杂的大规模非线性混合整数规划模型，难以获得最优解。现代启发式优化算法在求解非线性混合整数规划模型方面具有一定的优势，可考虑现代启发式优化算法和原对偶内点法相结合的方法求解规划模型，其中现代启发式优化算法用于规划方案的形成和优化，原对偶内点法用于校验规划模型的安全性。

此外，无论是效益还是成本，其计算在很大程度上依赖于数据的准确程度。数据不仅随时间变化，还同社会、经济发展、政策息息相关，很难准确获得。在成本部分，LCC 技术在电力系统规划中的应用并不多见，其各成本元素涉及的因素非常多，各因素的典型取值尚无定论。在效益部分，现有电网作为一个整体，不同电压等级电网的效益很难区分。

研究 LCC 中各成本元素的取值和影响，同时紧跟国家、行业、企业的政策标准制定。例如：在电力市场尚未完全放开、售配电价还未区分的场景下，采用最优潮流收益模型可计算得到财务收益，而随着《中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》正式下发，电力系统效益计算方式受到很大影响，需要提出新的直接利用电价计算经济效益的方法。

5.4　规划方案综合评估与决策难点与解决思路

基于生产运行模拟运行结果，很难自动生成收敛性较好的潮流数据，为电气计算奠定数据基础。在大规模可再生能源并网下，可再生能源的随机特性决定了电力系统运行方式的多样性，没有显著的典型场景与极端场景。传统的人工调整潮流方式难以适应海量潮流方式分析的要求，需要研究基于生产运行模拟运行结果的潮流自动生成技术。潮流自动生成技术主要是将生产运行模拟运行结果的直流潮流数据转换为满足特定的仿真计算软件（如 BPA）交流潮流计算所需的方式数据。将 BPA 交流潮流与直流潮流输入数据对比可知，主要差别在于一个是包含无功平衡的有功无功潮流计算，一个是不包含无功平衡的有功潮流计算。因此，潮流自动生产技术针对每个生产运行模拟运行结果的直流潮流方式数据，依据各节点的有功出力计划及其功率因数等方面的约束，采用基于节点的九宫格方法，计算发电与负荷等具有无功负荷节点或设备的无功计划初值；在此基础上，计算系统的无功平衡情况，对于不平衡情况，结合灵敏度系数，进行初值的调整优化，作为无功出力计划的初值修改值，实现生产运行模拟运行结果与潮流自动生成技术的融合。

同时，针对自动化批量生成的电网规划潮流数据中的病态潮流问题，为实现批量含新能源及大规模 HVDC 的交流潮流的精细化、自动化计算，提出

系统的解决方案，包括不合理潮流数据辨识技术、潮流辅助分析技术、无功规划及区域无功优化调整技术等，有效改善电网规划潮流计算数据的收敛性。

6　结语

本文提出了新型电网形态下输电网规划面临的科学问题，基于国内外研究现状，阐述了考虑高比例可再生能源并网的输电网规划研究方向与内容。从考虑高比例可再生能源时空分布特性的网源协同规划、基于随机规划和鲁棒优化的输电网柔性规划、与配电网相协同的输电网规划，以及规划方案综合评价与决策方法四个方面提出了输电网规划研究框架及技术路线，并针对研究难点提出了相应解决思路，旨在为未来考虑高比例可再生能源并网的输电网规划研究提供指导与建议。

本文写作得到上海交通大学博士研究生刘盾盾与国网北京经济技术研究院王佳明协助，谨此致谢！

参考文献

[1] 国家发展和改革委员会能源研究所.中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R].2015.

[2] HAND M M，BALDWIN S，DE MEO E，et al. Renewable electricity futures study [R]. Colorado，USA：National Renewable Energy Laboratory，2014.

[3] Price Water House Coopers LLP (PwC)，Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)，International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). 100% renewable electricity：a roadmap to 2050 for Europe and North Africa[R]. 2014.

[4] 鲁宗相，李海波，乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化，2016，40(13)：147-158. DOI：10.7500/AEPS20151215008.
LU Zongxiang，LI Haibo，QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(13)：147-158. DOI：10.7500/AEPS20151215008.

[5] 国家能源局.2016上半年全国风电并网运行情况[R].2016.

[6] 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/OL].电力系统自动化[2017-03-07]. DOI：10.7500/AEPS20170120004.
KANG Chongqing，YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2017-03-07]. DOI：10.7500/AEPS20170120004.

[7] HEMMATI R，HOOSHMAND R A，KHODABAKHSHIAN A. Comprehensive review of generation and transmission expansion planning [J]. IET Generation Transmission & Distribution，2013，7(7)：955-964.

[8] LATORRE G，CRUZ R D，AREIZA J M，et al. Classification of publications and models on transmission expansion planning [J]. IEEE Trans on Power Systems，2003，18(2)：938-946.

[9] GU Y，MCCALLEY J D，NI M. Coordinating large-scale wind integration and transmission planning [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy，2012，3(4)：652-659.

[10] ROUHANI A，HOSSEINI S H，RAOOFAT M. Composite generation and transmission expansion planning considering distributed generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2014，29(4)：1592-1601.

[11] AGHAEI J，AMJADY N，BAHARVANDI A，et al. Generation and transmission expansion planning：MILP-based probabilistic model[J]. IEEE Trans on Power Systems，2014，29(4)：1592-1601.

[12] 高赐威，吴天婴，何叶，等.考虑风电接入的电源电网协调规划[J].电力系统自动化，2012，36(22)：30-35.
GAO Ciwei，WU Tianying，HE Ye，et al. Generation and transmission coordinated planning considering wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(22)：30-35.

[13] 张宁，胡兆光，周渝慧，等.计及随机模糊双重不确定性的源网荷协同规划模型[J].电力系统自动化，2016，40(1)：39-44.DOI：10.7500/AEPS20150607002.
ZHANG Ning，HU Zhaoguang，ZHOU Yuhui，et al. Source-grid-load coordinated planning model considering randomness and fuzziness [J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(1)：39-44. DOI：10.7500/AEPS20150607002.

[14] 程浩忠，范宏，翟海保.输电网柔性规划综述[J].电力系统及其自动化学报，2007，19(1)：21-27.
CHENG Haozhong，FAN Hong，ZHAI Haibao. Review of transmission flexible planning [J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2007，19(1)：21-27.

[15] ALVAREZ LOPEZ J，PONNAMBALAM K，QUINTANA V H. Generation and transmission expansion under risk using stochastic programming[J]. IEEE Trans on Power Systems，2007，22(3)：1369-1378.

[16] MAJIDI-QADIKOLAI M，BALDICK R. Stochastic transmission capacity expansion planning with special scenario selection for integrating contingency analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems，2016，31(6)：4901-4912.

[17] AKBARI T，RAHIMIKIAN A，KAZEMI A. A multi-stage stochastic transmission expansion planning method[J]. Energy Conversion & Management，2011，52(8/9)：2844-2853.

[18] ROH J H，SHAHIDEHPOUR M，LEI W. Market-based generation and transmission planning with uncertainties [J]. IEEE Trans on Power Systems，2009，24(3)：1587-1598.

[19] CARRION M，ARROYO J M，ALGUACIL N. Vulnerability-constrained transmission expansion planning：a stochastic programming approach [J]. IEEE Trans on Power Systems，

2007，22(4)：1436-1445.

[20] ORFANOS G A，GEORGILAKIS P S. Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(2)：1355-1362.

[21] CHEN B，WANG L. Robust transmission planning under uncertain generation investment and retirement[J]. IEEE Trans on Power Systems，2016，31(6)：5144-5152.

[22] CHEN B，WANG J，WANG L，et al. Robust optimization for transmission expansion planning：minimax cost vs. minimax regret[J]. IEEE Trans on Power Systems，2014，29(6)：3069-3077.

[23] RUIZ C，CONEJO A J. Robust transmission expansion planning[J]. European Journal of Operational Research，2015，242(2)：390-401.

[24] 袁越，吴博文，李振杰，等.基于多场景概率的含大型风电场的输电网柔性规划[J].电力自动化设备，2009，29(10)：8-12.
YUAN Yue，WU Bowen，LI Zhenjie，et al. Flexible planning of transmission system with large wind farm based on multi-scenario probability[J]. Electric Power Automation Equipment，2009，29(10)：8-12.

[25] 周金辉，余贻鑫，曾沅.大规模风电接入下输电网扩展规划的启发式优化算法[J].电力系统自动化，2011，35(22)：66-70.
ZHOU Jinhui，YU Yixin，ZENG Yuan. Heuristic optimization algorithm for transmission network expansion planning with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(22)：66-70.

[26] DING Yi，WANG Peng，GOEL L，et al. Long-term reserve expansion of power systems with high wind power penetration using universal generating function methods[J]. IEEE Trans on Power Systems，2012，26(2)：766-774.

[27] YU H，CHUNG C Y，WONG K P，et al. A chance constrained transmission network expansion planning method with consideration of load and wind farm uncertainties[J]. IEEE Trans on Power Systems，2009，24(3)：1568-1576.

[28] 黄裕春，杨甲甲，文福拴，等.计及接纳间歇性电源能力的输电系统规划方法[J].电力系统自动化，2013，37(4)：28-34.
HUANG Yuchun，YANG Jiajia，WEN Fushuan，et al. Transmission system planning considering capability of accommodating intermittent generation sources[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(4)：28-34.

[29] JABR R A. Robust transmission network expansion planning with uncertain renewable generation and loads[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(4)：4558-4567.

[30] DEHGHANA S，AMJADY N，CONEJO A J. Adaptive robust transmission expansion planning using linear decision rules[J/OL]. IEEE Trans on Power Systems[2017-01-16]. DOI：10.1109/TPWRS.2017.2652618.

[31] 覃岭，林济铿，戴赛，等.一种改进轻鲁棒优化模型及其线性对应式[J].中国电机工程学报，2016，36(13)：3463-3469.
TAN Ling，LIN Jikeng，DAI Sai，et al. An improved light robust optimization model and its linear counterpart[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(13)：3463-3469.

[32] ZHAO Chaoyue，GUAN Yongpei. Unified stochastic and robust unit commitment[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(3)：3353-3361.

[33] 段刚，余贻鑫.输配电系统综合规划的全局优化算法[J].中国电机工程学报，2002，22(4)：109-113.
DUAN Gang，YU Yixin. Global optimization for power transmission and distribution system planning[J]. Proceedings of the CSEE，2002，22(4)：109-113.

[34] 张勇军，刘瀚林，蒋金良，等.主网与配电网协调规划的评价指标和规划方法[J].电力系统自动化，2010，34(15)：37-41.
ZHANG Yongjun，LIU Hanlin，JIANG Jinliang，et al. Research on evaluation index and method of coordinated planning between main system and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(15)：37-41.

[35] 丰颖，贠志皓，孙景文，等.输配协同的配电网态势快速感知方法[J].电力系统自动化，2016，40(12)：37-44. DOI：10.7500/AEPS20160311009.
FENG Ying，YUN Zhihao，SUN Jingwen，et al. Fast situation awareness method for distribution network coordinated with transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(12)：37-44. DOI：10.7500/AEPS20160311009.

[36] 曹佳，严正，李建华，等.含风电场交直流混联系统的概率潮流计算[J].电力自动化设备，2016，36(11)：94-101.
CAO Jia，YAN Zheng，LI Jianhua，et al. Probabilistic power flow calculation for AC/DC hybrid system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(11)：94-101.

[37] 洪绍云，程浩忠，曾平良，等.基于相关场景聚类的发输电联合拓展规划[J].电力系统自动化，2016，40(22)：71-76. DOI：10.7500/AEPS20151129005.
HONG Shaoyun，CHENG Haozhong，ZENG Pingliang，et al. Coordinate generation and transmission expansion planning with clusters of correlative scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(22)：71-76. DOI：10.7500/AEPS20151129005.

[38] 魏韡，刘锋，梅生伟.电力系统鲁棒经济调度：(一)理论基础[J].电力系统自动化，2013，37(17)：37-43.
WEI Wei，LIU Feng，MEI Shengwei. Robust and economic scheduling methodology for power systems：Part one theoretical foundations[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(17)：37-43.

[39] 张建平，朱忠烈，柳璐，等.大规模风电接入的输电系统价值规划方法[J].电力系统自动化，2014，38(19)：47-51. DOI：10.7500/AEPS20131028007.
ZHANG Jianping，ZHU Zhonglie，LIU Lu，et al. Transmission network value planning considering large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems，2014，38(19)：47-51. DOI：10.7500/AEPS20131028007.

[40] 蔡亦竹，柳璐，程浩忠，等.全寿命周期成本技术在电力系统中的应用综述[J].电力系统保护与控制，2011，39(17)：149-153.
CAI Yizhu，LIU Lu，CHENG Haozhong，et al. Application review of life cycle cost (LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control，2011，39(17)：149-153.

[41] 柳璐，王和杰，程浩忠，等.基于全寿命周期成本的电力系统经济性评估方法[J].电力系统自动化，2012，36(15)：45-50.
LIU Lu，WANG Hejie，CHENG Haozhong，et al. Economic evaluation of power systems based on life cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(15)：45-50.

[42] 柳璐，程浩忠，马则良，等.考虑全寿命周期成本的输电网多目标规划[J].中国电机工程学报，2012，32(22)：46-54.
LIU Lu，CHENG Haozhong，MA Zeliang，et al. Multi-objective transmission expansion planning considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE，2012，32(22)：46-54.

[43] 张立波，程浩忠，曾平良，等.基于不确定理论的输电网规划[J].电力系统自动化，2016，40(16)：159-167. DOI：10.7500/AEPS20150330018.
ZHANG Libo，CHENG Haozhong，ZENG Pingliang，et al. Transmission network planning approaches based on uncertainty theories[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(16)：159-167. DOI：10.7500/AEPS20150330018.

[44] 田书欣，程浩忠，曾平良，等.大型集群风电接入输电系统规划研究综述[J].中国电机工程学报，2014，34(10)：1566-1574.
TIAN Shuxin，CHENG Haozhong，ZENG Pingliang，et al. Review of transmission planning for integrating large clusters of wind power[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(10)：1566-1574.

[45] 王一，程浩忠，胡泽春，等.计及过负荷风险的输电网多目标期望值规划[J].中国电机工程学报，2009，29(1)：21-27.
WANG Yi，CHENG Haozhong，HU Zechun，et al. Multi-objective transmission expected value planning considering risk of overloading[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(1)：21-27.

[46] 曹一家，曹丽华，黎灿兵，等.考虑大停电风险的输电网扩展规划模型和算法[J].中国电机工程学报，2014，34(1)：138-145.
CAO Yijia，CAO Lihua，LI Canbing，et al. A model and algorithm for transmission expansion planning considering the blackout risk[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(1)：138-145.

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

李　隽(1972—)，女，硕士，高级工程师，主要研究方向：电力系统分析、电力系统规划。

吴耀武(1963—)，男，博士，副教授，主要研究方向：电力系统规划。

（编辑　章黎）

Challenges and Prospects for AC/DC Transmission Expansion Planning Considering High Proportion of Renewable Energy

CHENG Haozhong[1], *LI Jun*[2], *WU Yaowu*[3], *CHEN Haoyong*[4], *ZHANG Ning*[5], *LIU Lu*[1]

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China;
3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
4. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
5. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The spatial and temporal distribution characteristics of the future high proportion of renewable energy will present unprecedented challenges to the operation and planning of power systems. Owing to the radical change in the power system basic forms and operational characteristics, it is of great significance to study the transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy planning. Based on former researches, four aspects of transmission expansion planning are introduced including the theory and method of coordinated grid-source planning, the transmission flexible planning method, the transmission planning coordinated with distribution network and the comprehensive evaluation and decision-making method of the transmission planning scheme. Finally, the key issues and prospects for future power systems with a high proportion of renewable energy are provided.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900102).

Key words: high proportion of renewable energy; transmission expansion planning; coordinated grid-source planning; flexible planning; comprehensive evaluation