

不确定因素耦合下输电网风险规划研究综述

刘佳¹,程浩忠¹,刘盾盾¹,姚良忠²,曾平良²,马则良³

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;
2. 中国电力科学研究院,北京 100192;3. 国家电网公司华东分部,上海 200120)

摘要:传统的确定性风险分析方法由于存在多种弊端,难以适应新形势下的输电网规划和方案评估,为了更加合理地管控输电网风险水平,基于概率性分析方法对输电网风险规划和评估等研究成果进行了综述。介绍了输电网中的安全、设备、结构、管理和市场等一系列风险因素及相应建模方法;从场景规划、随机规划、模糊规划和区间规划等方面,评述了考虑多种不确定因素的输电网风险规划方法;基于评估指标和方法,综述了近年来国内外考虑多种不确定因素的系统风险评估体系研究成果。在此基础上,结合高比例可再生能源、交直流混联、网源协调、需求响应和建模优化等研究热点,展望了未来考虑多种不确定因素的输电网风险规划领域中需要关注的问题。

关键词:输电网;不确定因素;风险建模;风险规划;风险评估

中图分类号:TM 715

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.002

0 引言

传统电力系统中已存在多种不确定因素,如发电机出力、负荷波动、元件故障率和节点报价参数等。但随着智能电网概念的提出和发展,更多且不确定程度更高的不确定因素已渗透到电力系统中,如需求响应的广泛开展、高比例可再生能源以及储能系统的时空接入和交直流混联系统中的直流系统功率调节等。这些不确定因素共同构成了电力系统经济、安全规划和运行的风险源,不仅会增大电网的经济风险,而且会严重影响电网的潮流分布、电压稳定。为降低不确定因素给电网带来的不利影响,有必要在电网规划阶段合理考虑各种不确定因素,进行输电网风险规划,以获得输电网规划新思路。

目前,输电网规划中分析系统风险大小的方法大体上可以分为确定性和概率性 2 类^[1-5]。确定性风险分析方法主要是指 $N-k$ 校验,即保证预想故障下的电网安全稳定,已在电力规划和调度部门沿用多年。但是该方法存在多个缺点,如无法反映元件故障的概率特性以及各类风险因素发生概率的时空差异性、没有体现连锁故障的动态特性和计算所有枚举故障场景的耗时性等。相比之下,概率性风险分析方法不仅考虑了元件故障发生的概率,而且可对元件故障下的严重程度进行定量评估,是输电网规划风险分析方法中的热门研究方向。因此,本文主要调研了基于概率性分析方法的输电网风险规划

方法研究现状和成果。

本文基于输电网中的风险源分析,从规划模型、求解算法、评价指标和评估方法等角度出发,综述近年来国内外考虑多种不确定因素的输电网风险规划研究现状和成果,分析其面临的机遇和挑战,并提出若干亟待解决的问题和相应的建议,为未来考虑多种不确定因素的输电网风险规划研究提供一定的参考。

1 输电网中风险辨识及建模

不确定因素广泛存在于输电网中,给电网规划和运行工作带来了不可避免的风险。依据 IEEE Std 100—1992 中的定义,风险是对危害场景发生的概率和严重性的度量,一般采用概率乘以后果的形式加以计算^[6]。通过风险辨识,本文将输电网中的风险分为安全风险、设备风险、结构风险、管理风险和市场风险五大类。由于各风险间既存在一定的独立性,又存在较强的耦合性,故需建立完整的风险源辨识体系以全面分析输电网中的风险。表 1 给出了各类风险因素的具体分解情况,可按该表识别输电网中的风险因素并建模。

表 1 输电网中风险分解结构

Table 1 Risk breakdown structure in transmission network

风险因素	因素分解
安全风险	常规电源装机风险
	清洁能源出力风险
	负荷波动风险
设备风险	独立故障风险
	共模故障风险
	连锁故障风险
结构风险	自然灾害风险
	人为风险
管理风险	模式风险
	价格波动风险
市场风险	输电投资风险

收稿日期:2017-07-02;修回日期:2018-04-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900102);
国家自然科学基金重点项目(51337005)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900102) and the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51337005)

1.1 安全风险

安全风险主要考虑的是由负荷或电源出力变化而导致的系统功率不平衡所产生的元件过载、电压越限、切负荷和次同步谐振等。传统输电网中,负荷主要是由居民、商业和工业 3 种用户类型构成,电源主要是指火电、水电等常规机组,系统电力电量的平衡主要通过发电机再调度或切负荷来实现。随着智能电网的发展,输电网中接入了大量的新型元件和设备,如风电及光伏等可再生电源、电动汽车等可中断负荷、储能系统和直流输电线路等,给电网的安全稳定带来了更多且不确定程度更高的风险。

现有文献中用来描述安全风险因素不确定性的模型主要有概率模型^[7-12]、模糊模型^[13-14]、区间模型^[15-18]。负荷概率模型最为常见的是正态分布^[7-8],常规机组装机容量概率模型通常服从离散分布^[8],风速概率模型包括 Weibull 分布^[8-10]、Rayleigh 分布^[10]、LogNormal 分布^[10]以及 Singh-Maddala 分布^[10]等,光照强度概率模型有 Beta 分布^[11]和 Weibull 分布^[12]等。为了准确获得各概率分布函数的参数,通常还需对大量历史记录数据进行统计计算,常用方法包括极大似然估计法^[19]、期望和标准差估算法^[20]等。除了以上各安全风险源的独立建模,考虑到安全风险源间具有一定的相关性,如风速、光照强度和负荷等,故需进行多安全风险源相关建模,目前主要有以下 3 种方法:Cholesky 分解^[11]、Nataf 变换^[9]和 Copula 函数^[21]。模糊模型以模糊数来反映各安全风险源的不确定程度,常用的模糊数有梯形模糊数^[13]以及三角模糊数^[14]等。区间模型^[15-18]则采用区间数来刻画各安全风险源的外延信息,无需已知安全风险源在可行域内的分布情况,具有建模简单的特点。

1.2 设备风险

设备风险是指电力系统中一次设备(如发电机、线路、主变和断路器等)和二次设备(如继电保护装置等)故障给系统带来的风险。按照故障模式,其可分为独立故障风险、共模故障风险和连锁故障风险等。

独立故障风险是指系统当中单一设备故障所带来的风险。考虑到设备故障率、故障类型、故障位置和故障清除时间等因素均具有一定的不确定性,目前已有大量文献对独立故障风险中的这些不确定因素进行了概率建模。其中,故障率一般服从泊松分布^[2,22-25];故障类型和故障位置常通过基于历史统计数据的离散分布来模拟^[25];故障清除时间的概率模型有正态分布^[24-26]、LogNormal 分布^[24]和韦伯分布^[27]等。对于设备故障率,除了以上概率模型,还有模糊模型^[28-29]、Markov 模型^[1,30]、数学解析模型^[23,30-32]、物理分析模型^[33]、应力强度干涉模型^[30]

等,而数学模型又包括回归预测模型^[23,30]、贝叶斯网络模型^[31]和支持向量机模型^[32]等。鉴于一般环境条件(包括正常和恶劣 2 种状态)、在线健康状态等因素对设备故障率有很大影响,文献[23]以输电线路为例,按天气条件、电压水平和线路长度将各线路分区,并将各区的风速和温度数据作为输入,故障率作为输出,建立各区的回归预测模型,然后利用极大似然估计法拟合泊松分布的参数,以计算各区域线路故障率,具有支持在线评估的优点。文献[34]指出传统线路两状态模型由于没有计及断路器潜在故障可能性而存在一定不足,并基于证据理论给出了考虑设备在线运行状态的输电网风险评估方法。

共模故障风险是指由同一种原因引起系统多个设备故障的风险,其建模方法主要有 2 种:组合模型^[2,35]、分离模型^[2,7]。相比组合模型,分离模型由于可避免使用 Markov 方程且考虑了独立故障和共模故障的非互斥性,具有计算量小、精度高和理论完备等特征。

连锁故障风险是指由系统中单一或多个设备故障而诱发其他设备故障的风险。目前已有大量研究表明^[36-38],故障间的连锁性和累积性符合用自组织临界理论来描述且连锁故障发生的概率具有幂律分布特征。自组织临界模型可对连锁故障从快、慢动态 2 个时间尺度进行建模分析^[38]。现有的连锁故障模型可分为 3 类:基于设备负荷再分配,譬如 Cascade 模型^[36-38]和分支过程模型^[38],该类模型属于早期连锁故障研究模型,由于其没有考虑网络结构及潮流分布,适应性较差;基于电网动态特性描述,譬如 OPA 模型^[36-38]、Manchester 模型^[37-38]和保护隐性故障模型^[36-38],该类模型能够模拟包括过载主导型、保护主导型和结构主导型在内的所有类型连锁故障,较好地反映了连锁故障发展机理,具有鲁棒性强的特征;基于复杂性理论和复杂网络理论,如小世界网络模型^[39]、无标度网络模型^[40]和事故链模型^[39,41],该类模型主要以系统网络结构为核心,在识别网络脆弱环节和研究连锁故障传播机理方面具有一定优势。近年来,随着直流输电技术的发展,逐步形成了交直流混联系统,目前已有文献考虑了交、直流系统间的相互影响,进行交直流混联系统的连锁故障研究。文献[27]对文献[38]中的 OPA 模型进行了改进,主要集中在以下 3 点:提出直流系统参与连锁故障过程的 3 种模式;添加包括直流系统故障在内的 4 种预想故障场景;将潮流/最优潮流计算扩展至交直流系统。另外,该连锁故障模型采用直流线路的等效参数计算短路电压,无需进行时域仿真,具有计算效率高、大电网适用性强的优点。

1.3 结构风险

除了 1.2 节中提到的 2 种一般性环境条件,系

统中还存在着灾变性环境条件(如地震、冰灾、磁暴等),而结构风险就是指由于自然灾害等不可抗因素导致系统结构连通性破坏而引发的风险。结构风险具有发生概率小但危害严重的特征。目前国内外学者已经开展了对结构风险的研究,但是相比安全和设备风险,研究仍存在很大不足,主要原因是由于预测不可抗因素较为困难,难以给出精确的结构风险模型,往往需指定灾害发生的区域来评估结构风险。文献[35]率先提出将电力系统潮流计算引入地震灾害引起的结构风险分析,建立了地震灾害风险评估模型。该模型充分考虑了地震灾害给不同电力系统设备带来的差异化故障率,较好地实现了震源对网络结构损坏程度差异化的模拟。文献[42]着重分析了冰灾给电力系统带来的中短期风险,其最大贡献在于考虑了同一灾区设备故障的相关性。结果显示,考虑相关性将增加系统发生共模故障的概率,从而诱发更高层次的结构风险。因此,有必要考虑灾区设备故障的相关性,合理辨识系统结构风险的薄弱环节。

1.4 管理风险

管理风险是指由于调度人员操作、电力系统管理模式等因素给系统安全稳定运行带来的风险。目前国内外关于管理风险研究的文献相对较少,而能量化分析管理风险的模型更是屈指可数。

对于人为风险,认知可靠性和误差分析方法 CREAM(Cognitive Reliability and Error Analysis Method)^[43]是最为常用的、可定量分析人因可靠性的方法,该方法原发性地计及了环境条件对人为风险的影响。文献[43]对 CREAM 进行了模糊化改进,采用模糊克隆选择算法加以求解,并在九级外部环境条件和四级人因可靠性的双重维度下,仿真验证了模糊 CREAM 能兼顾设备和人因可靠性,更为客观地反映了系统安全性。但是,该模型忽略了设备和人因可靠性的相关性,有待进一步完善。

对于模式风险,由于电力企业和政府监管机构对电力系统安全生产的定位不同和管理指令的不同势必会给电力系统安全稳定运行带来一定风险。目前输配分离已成为我国进行电力市场化改革的关键,因此在未来的管理模式风险建模中,也需要计及电力体制改革所带来的影响,合理管控模式风险。

1.5 市场风险

市场风险主要是指由于市场环境预测和参与方行为的不确定性所带来的风险。目前对市场风险的研究主要集中在节点价格波动风险和输电投资收益风险^[44]。对于价格波动风险,影响价格波动的因素有很多,如负荷水平、区域差异、网络运行状态、线路阻塞盈余情况和供电可靠性需求等,这些因素共同构成了节点价格波动的风险源。文献[44]计及节

点价格和系统可靠性间的相关性,给出了“Pool+双边交易”模式下的最优节点定价策略,以降低系统运行风险。对于输电投资收益风险,可通过风险价值 VaR(Value at Risk)和条件风险价值 CVaR(Conditional Value at Risk) 2 个指标加以定量评估^[27,45]。相比 VaR,由于 CVaR 具有一致性、凸性和可加性等优良性质,能够衡量损失超过采用 VaR 时的平均损失,拥有更为广阔的应用前景。

2 不确定因素耦合下输电网风险规划方法

为了合理管控输电网中各风险源,在投资规划阶段就降低电网风险水平,国内外学者将场景分析法、随机规划理论、模糊数学理论和区间数学理论引入输电网规划中,提出了多种风险规划模型及求解算法,以求获得更为经济、安全的规划方案。

2.1 基于场景分析法的输电网风险规划

场景分析法是将电源、负荷、设备故障、风电和光伏等风险源的可能取值通过历史统计数据或者采样概率分布选取出来并逐一列举,形成一系列的规划场景,每个规划场景对应了一组规划参数,从而将具有不确定性的风险源建模为一系列离散的不确定性问题。其是早期处理风险规划问题的方法,有易于理解、计算简单的特征。文献[45]采用保护隐性故障模型和基于重要性采样的场景法来模拟大停电风险,以电力不足期望值 EDNS(Expected Demand Not Supplied)、VaR、CVaR 和幂率尾风险为风险评估指标,建立了多目标输电网扩展规划模型。文献[46]将电源、负荷、线路故障和风电出力视为风险因素,并采用蒙特卡洛模拟 MCS(Monte Carlo Simulation)法进行场景采样,以最小化全寿命周期成本和 CVaR 为目标函数,提出了多阶段输电网风险规划方法。

分析现有的基于场景分析法的输电网风险规划模型,均需要在优化网架结构的同时,考虑如何降低系统在每种场景下的运行风险。为了更好地将两者结合,求解时需将所建模型转化为双层规划模型。上层规划为求解输电网网架优化规划问题,决策变量为可架线路走廊的架线数目;下层规划为求解使系统风险水平最小的优化运行问题,决策变量为各种风险管控措施(如发电机再调度、切负荷等)。上层规划将输电网网架结构传递给下层,下层规划则在此基础上进行低风险运行方式的规划,并将计算结果传递给上层。该规划流程具体如图 1 所示。

基于场景分析法的输电网风险规划虽然可将不确定性规划模型转化为与其等价的不确定性规划模型,从而降低建模和求解的难度,但是由于需要较多的采样场景,故该方法的鲁棒性、灵活性和适应性较差。此外,如何对不确定因素进行合理的分类、组合,对场景进行削减,从而在保证模型精度的前提

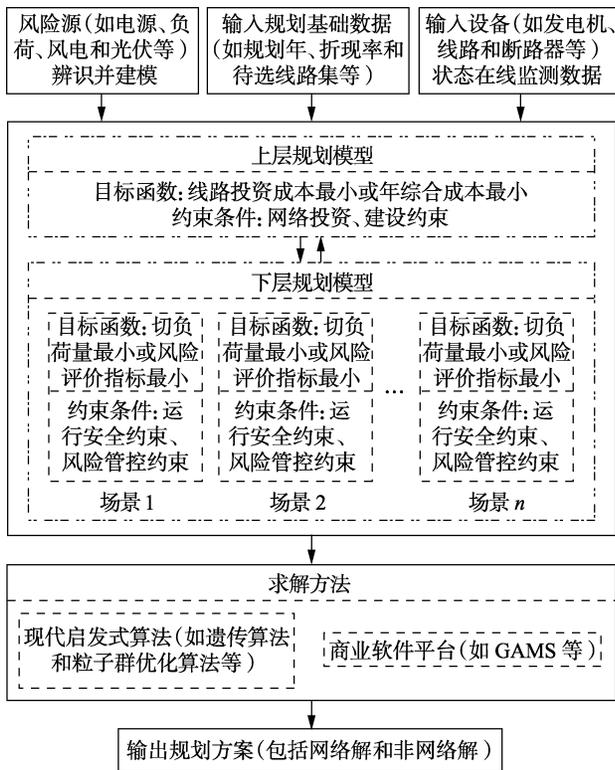


图 1 基于场景分析法的输电网风险规划流程图

Fig.1 Flowchart of transmission network risk planning based on scenario analysis method

下,确定参与风险规划的典型场景是一大难点,也是制约该方法进一步发展的主要因素。

2.2 基于随机规划理论的输电网风险规划

不确定因素的时空存在给输电网规划结果的安全性和经济性带来诸多风险。为了在规划阶段合理管控这些风险,往往将其加以量化并加入规划模型的目标函数或约束条件中。目前已有不少文献围绕随机规划理论研究输电网风险规划。文献[47]将机会约束规划建模方法应用到含风电场的输电网扩展规划当中,考虑电源、负荷、风电和线路故障不确定性所带来的风险并用线路过载率加以表征。在对过负荷约束进行校验时,采用卷积运算计算线路随机潮流,大幅降低了规划模型求解时间。文献[48]建立了考虑电源和负荷不确定性的多目标动态输电网期望值规划模型。模型富有创造性地将线路潮流期望值和其标准差进行线性组合并给出确定性的约束条件,采用解析法中的半不变量方法对线路随机潮流加以求解,具有精度高、速度快的优势。

作为随机规划理论的典型代表,机会约束规划方法被更广泛应用于输电网风险规划,其模型为:

$$\begin{cases} \min F(x_1, x_2) \\ \text{s.t. } P\{F(x_1, x_2) \leq \bar{F}\} \geq \alpha \\ P\{H_1(x_1, x_2) \leq 0\} \geq \beta \\ H_2(x_1, x_2) \leq 0 \\ G(x_1, x_2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $F(x_1, x_2)$ 为目标函数, x_1 为线路投资决策变量, x_2 为运行状态变量; $P\{\cdot\}$ 为 $\{\cdot\}$ 中事件成立的概率; \bar{F} 为在置信度水平 α 下达到的最优目标函数值, α 和 β 为投资者设置的置信度水平; $H_1(x_1, x_2) \leq 0$ 通常为线路传输功率约束; $H_2(x_1, x_2) \leq 0$ 包括可架线走廊架线数目约束、常规机组出力约束、可再生能源出力约束、切负荷约束等; $G(x_1, x_2) = 0$ 为系统潮流方程约束、节点功率平衡方程约束等。

对于式(1)中的模型,现有文献一般采取现代启发式算法结合随机潮流法^[46-47]加以求解。其中,随机潮流用于校验规划方案机会约束条件的满足情况。目前校验机会约束条件的方法主要分2种:模拟法^[46]、解析法^[47]。模拟法对于复杂系统具有很强的适应性,而且在采样规模足够大的前提下计算精度颇高,但具有计算量过大的缺点。其典型代表有基于简单随机采样的MCS法、基于重要采样的MCS法、基于拉丁超立方采样的MCS法和准MCS法。解析法虽然计算结果可信度高,但是由于计算量随系统规模的增大呈指数型增长,仅适用于网络规模小且结构坚强的网络。其典型代表有点估计法^[49]、快速傅里叶变换和半不变量法。

除了式(1)所示的单阶段随机规划模型,已有大量文献采用了两阶段的随机规划模型^[50-51]。两阶段的随机规划方法采用了分解协调优化的思想,将随机规划模型划分为规划主问题和运行子问题,并采用交替迭代的思想对模型加以求解。两阶段的随机规划模型一般可表达为:

$$\begin{cases} \min F_1(x_{1,1}, x_{1,2}, x_2) \\ \text{s.t. } H_1(x_{1,1}) \leq 0 \\ \min F_2(x_{1,2}, x_2) \\ \text{s.t. } H_2(x_{1,2}, x_2) \leq 0 \\ G(x_{1,2}, x_2) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $F_1(x_{1,1}, x_{1,2}, x_2)$ 、 $F_2(x_{1,2}, x_2)$ 分别为第一、二阶段规划的目标函数, $x_{1,1}$ 为第一阶段规划的决策变量,主要包括可架线走廊架线数目等, $x_{1,2}$ 为第二阶段规划的决策变量,主要有发电机出力和切负荷量等; $H_1(x_{1,1}) \leq 0$ 通常为可架线走廊架线数目约束; $H_2(x_{1,2}, x_2) \leq 0$ 主要包括线路传输功率约束、常规机组出力约束、可再生能源出力约束和切负荷约束等; $G(x_{1,2}, x_2) = 0$ 为系统潮流方程约束和节点功率平衡方程约束等。

式(2)属于非常复杂的混合整数非线性两阶段随机规划模型,一般采用现代启发式算法与数学优化方法相结合的混合算法加以求解,其中,数学优化方法通常为内点法。在混合算法求解体系中,现代启发式算法是框架,用于确定第一阶段规划的可架线走廊架线数目,而在现代启发式算法的每次迭代

过程中,通过第二阶段规划确定发电机组和负荷参与系统运行的最优方式^[51]。该混合求解算法通过利用现代启发式算法优化离散变量,用内点法优化连续变量,从而充分发挥了各自算法的优点。

基于随机规划理论的输电网风险规划能够精确利用随机变量的表达式来描述风险规划中的不确定因素。该方法的重大特点在于能在规划阶段根据实际需求来控制规划方案的风险,该方法的缺陷是当系统规模较大时,模型求解时间普遍较长。

2.3 基于模糊数学理论的输电网风险规划

输电网模糊风险规划以模糊集理论^[14]或可信性理论^[13,28-29]为基础。相比于模糊集理论,可信性理论是通过利用可信度计算所有模糊数,建立了与概率论相对应的模糊论公理化体系。将可信性理论用于输电网风险规划可以定量给出用于评估模糊不确定因素下输电网规划方案优劣的直接指标。文献^[52]分别以线路投资、线路削减阻塞电力为经济、风险指标,构建了基于模糊集理论的输电网规划模型,指出该模型特别适用于获取风险评价指标和网络建设信息受限情况下的投资决策。文献^[13]进一步地对文献^[52]中模型进行转化,提出了基于可信性理论的输电网规划模型,该模型的最大优势在于不仅规避了大量的模糊最优潮流计算,提高了求解效率,而且对模糊隶属度函数的形式无需加以约束。

总结已有文献,基于模糊数学理论的输电网风险规划模型可以概括为:

$$\begin{cases} \min \tilde{F}(x_1, \tilde{x}_2) \\ \text{s.t. } \tilde{H}_1(x_1, \tilde{x}_2) \leq 0 \\ H_2(x_1) \leq 0 \\ \tilde{G}(x_1, \tilde{x}_2) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\tilde{F}(x_1, \tilde{x}_2)$ 为模糊目标函数, \tilde{x}_2 为模糊运行状态变量,主要有模糊负荷、模糊电价、模糊清洁能源出力和模糊线路传输功率等; $\tilde{H}_1(x_1, \tilde{x}_2) \leq 0$ 主要包括模糊线路传输功率约束等; $H_2(x_1) \leq 0$ 通常为可架线走廊架线数目约束; $\tilde{G}(x_1, \tilde{x}_2) = 0$ 为模糊系统潮流方程约束、模糊节点功率平衡方程约束等。

式(3)可采用数学优化方法^[51]或现代启发式算法^[13]加以求解。文献^[52]提出了一种内嵌潮流计算和最大流最小割定理的模糊分支定界法,可有效求解所提输电网模糊风险规划模型。文献^[13]采用贪婪随机自适应搜索算法求解模糊风险规划方案,具有适应性强、可并行计算的特点。

基于模糊数学理论的输电网风险规划是一种建立在模糊不确定信息下的电网规划方法。和随机机会约束规划方法一样,模糊规划模型的约束条件也可采用弹性约束的形式。相比于随机规划方法,模

糊规划方法的优点是无需已知不确定因素的概率分布函数,缺点则在于规划结果的精度不高。

2.4 基于区间数学理论的输电网风险规划

输电网区间风险规划以不确定理论中的区间规划为基础,使用区间分布函数来描述规划过程中的不确定因素。具体求解时,一般采用区间潮流来校验区间不确定因素下系统规划方案的安全性。文献^[15]首次提出了考虑区间负荷不确定性的输电网规划方法,但是由于该方法采用了类似弹性负荷的简单不确定负荷处理办法,具有一定局限性。在此基础上,文献^[16]建立了区间最小切负荷量下的输电网三层风险规划模型,其中,上层为网架规划模型,中、下层为区间至多切负荷双层线性规划模型。该模型将区间负荷不确定性下的区间至多切负荷量作为规划方案的风险评估指标,保证了规划结果在给定负荷区间下的绝对安全。文献^[17]基于田口正交阵列法,提出了输电网扩展规划。相比于文献^[16],该方法添加考虑了区间可再生能源出力不确定性,将节点注入功率区间不确定性下的区间至多切负荷量和可再生能源弃能之和作为评价规划结果风险高低的指标。但是,由于田口正交阵列法没有遍历所有场景,所得评价指标未必能真实反映系统规划方案的风险情况,鲁棒意义有待完善。文献^[18]在文献^[17]的基础之上,建立了考虑区间负荷和可再生能源出力不确定性的输电网鲁棒规划模型。在保证规划方案经济性的前提下,确保了规划结果在节点注入功率区间不确定性下的安全性。

对于输电网区间风险规划模型的求解,可采用数学优化方法^[18]、现代启发式算法^[15,17]或者将二者相结合的方法^[16],其中,数学优化方法包括分支定界法^[16]和 Benders 分解法^[18]等;现代启发式算法包括遗传算法^[15,17]和贪婪随机自适应搜索算法^[16]等。鉴于风险规划模型的求解需在计算灵活性和精度间进行均衡,通常采用将二者相结合的办法,这样既能发挥数学优化方法计算精度高的优势,又能充分利用现代启发式算法编程易实现的特征。

基于区间数学理论的输电网风险规划通常先围绕节点注入功率的不确定性建立区间模型,进而获得输出变量(如电流、电压等)的变化范围。该方法因具有所需历史数据少、计算效率高和鲁棒性强等特点而受到广泛关注,其缺点在于难以像多场景规划一样从历史数据中简单地计及变量间的相关性。

3 不确定因素耦合下输电网规划方案风险评估

受规划模型求解的限制,很难在规划阶段对所有风险源进行建模并给出系统的风险评价指标体

系。作为风险规划的重要补充,规划方案的风险评估不仅有助于客观反映系统风险水平、全面识别安全隐患,更可为下一步的规划决策指明方向。按照系统状态分析的性质,规划方案风险评估可分为系统充裕性评估和安全性评估^[34]。充裕性风险评估是为了分析规划方案能否满足安全稳定运行条件和负荷需求;安全性风险评估则是为了评定规划方案对暂态和动态扰动的响应能力,具体包括暂态、动态、电压稳定性、连锁故障和在线风险评估等。本文从风险评估指标和风险评估方法 2 个维度对系统风险评估技术进行综述。风险评估指标和方法分类情况如表 2 所示。

表 2 输电网规划方案风险评估指标和方法分类
Table 2 Categories of risk evaluation indices and methods for transmission network planning solutions

指标和方法	分类情况
风险评估指标	严重度指标
	停电损失指标
	控制代价指标
风险评估方法	解析法
	模拟法

3.1 风险评估指标

科学、完整的指标体系是进行规划方案风险评估的重要基础。从风险产生危害后果性质的角度,本文将风险评估指标划分为严重度、停电损失和控制代价指标 3 类。

对于严重度指标,文献[53]指出应采用风险描述系统安全稳定运行影响的程度,并给出了线路过载、节点低电压、电压稳定性和连锁故障的严重度指标。传统的严重度指标均是基于越限驱动型风险,而文献[33]在文献[53]的基础上,定义了事件驱动型风险,填补了原有风险评估指标体系的不足。考虑到风险对规划方案拓扑的可能影响,文献[54]基于复杂网络理论,引入了网络结构严重度指标,包括线路平均长度、网络平均介数、网络平均度数和多馈入短路比。同时,文献[54]也对越限驱动型严重度指标进行了补充,如反映电网电能质量的系统频率、衡量互联系统同步性的机组功角差和校验系统动态稳定性的阻尼比,实现了风险对暂态和动态稳定性影响严重度的全面评估。

对于停电损失指标,主要可从停电所带来的电力电量损失和经济性损失 2 个角度加以描述,其中,电力电量损失指标取自可靠性分析,经济性损失指标源于风险价值理论。文献[5]采用停电电力损失指标作为定量风险评估指标。文献[7]以供电能量损失作为风险评估指标。文献[27,45]用 VaR 和 CVaR 2 个指标衡量了电网实际收益与期望收益的差距。文献[54]则通过可/不可拉闸限电用户的负荷削减电量乘以单位停电费用的方式核算停电经济损失。

对于控制代价指标,文献[24]分析了严重度和停电损失指标的不足,并提出利用最小控制代价进行风险评估的新理念,后得到广泛认同。与停电损失类似,控制代价同样可分为风险管控措施(如切机、切负荷等)代价和经济性代价。文献[34]计算了发电机再调度下的满足约束校验的最小切负荷量,进而将电力不足期望(EDNS)作为风险评估指标。文献[25]考虑由稳定控制措施及保护动作所带来的切机、切负荷给发电方、输电网和用户造成的经济损失,并将其视作控制代价。

用一种或一类风险评价指标难以对规划方案的风险水平进行客观描述,已有文献在进行风险评估时,考虑建立多维度的风险评估指标体系。文献[54]将严重度指标和停电损失指标相结合,构建了二维的风险指标体系。

3.2 风险评估方法

作为风险评估技术的关键,评估方法的选用将直接影响规划方案风险评估的速度和精度。按照求解思路的差异,现有文献一般将风险评估方法分为解析法和模拟法 2 类。

对于解析法,主要是依据系统中元件的随机参数,建立精确的系统数学模型,利用数值计算求取系统各项指标,主要包括预想故障集法^[7,9,34]、快速排序结果集法^[33]、故障树法^[39,41]、Markov 过程法^[39]、贝叶斯网络法和近似法等。对于含诸多不确定因素的电力系统风险评估,考虑到解析法建模的复杂性,现有研究中多采用预想故障集法,从而使得系统严重故障模式的识别、筛选成为关键。此外,为了满足在线风险评估的速度需求,通常将快速排序结果集法作为辅助手段与预想故障集法相结合进行系统状态的选取。故障树法由于可以清晰描述故障间的因果关系,被广泛应用于连锁故障的研究。Markov 过程法大多被用于计算状态转移概率,将其与故障树法相结合可以建立用于分析复杂系统风险的动态故障树理论,已成为近期风险评估解析法研究的热点^[39,41]。

对于模拟法,主要是通过建立一个参数为问题所求解的概率模型或随机过程,对其观察或抽样试验得到参数的统计特征,并给出近似所求解的过程。现有文献当中主要有以下 5 种模拟法:非序贯 MCS 法^[35,54]、序贯 MCS 法、状态转移抽样法、时序交叉熵 MCS 法、伪时序状态转移抽样法。序贯 MCS 法除了像非序贯 MCS 法一样可以得到系统网络结构和发电机运行情况,还可以获得系统状态持续的时间和导致系统状态转移的事件;状态转移抽样法通过对状态转移进行抽样,避免了对相似系统状态的二次分析,但由于抽样没有方向,计算效率提升有限;时序交叉熵 MCS 法通过修改元件可靠性参数,提高对

风险指标计算有贡献状态的参数频率,具有抽样效率高的优点,而缺点在于需假设各元件在概率空间上的相互独立;伪时序状态转移抽样法将状态抽样法和状态转移抽样法相结合,通过仅反映部分状态的时序信息来提高评估速率。

鉴于风险评估必须在计算速度和精度间权衡,可采用解析法和模拟法相结合的方法。文献[55]综合利用预想故障集法和非序贯MCS法对巴西电网进行了风险评估。

4 不确定因素耦合下输电网风险规划展望

虽然考虑不确定因素的输电网风险规划研究已经有大量成果,但随着海量风险源的时空耦合嵌入,势必会给输电网风险规划方案的输出带来更多难题。为了使风险规划工作能更好地与未来输电网意识形态相符,可重点开展以下研究。

a. 网源协调风险规划。

传统的输电网规划通常是建立在已知电源规划方案的基础上,继而进行的网架规划,是一种人为划分的纵向规划。考虑到电源规划和电网规划是相互影响、相互制约的^[56-57],人为将两者划分通常难以得到发输电系统规划方案的全局最优解。另外,为了充分消纳清洁能源出力,传统规划方法一般需较大的系统投资成本,使得规划方案的经济性较差。由于发电机再调度可以调节系统潮流的分布,采用合理的电源规划方案将会有助于降低电网规划方案的风险水平。因此,有必要进行网源协调规划,以有效管控发输电系统风险。对于网源协调规划模型的求解,可采用分解协调技术将网源规划问题分解成若干个易于求解的子问题,并利用现代启发式算法和数学优化方法相结合的策略对多层模型加以求解。

b. 含高比例可再生能源的输电网风险规划。

高比例可再生能源并网及跨区输送将成为未来互联电力系统的重要特征。然而,作为可再生能源的典型代表,风电和光伏出力具有间歇性、波动性,这导致了含可再生能源的输电网规划方案存在一定的安全和经济风险。虽然已有大量文献考虑了该问题^[8,18,47,58],但是随着可再生能源渗透率逐步上升,现有规划思路是否能在满足技术经济约束的前提下消纳高比例可再生能源尚未得知。因此,考虑到节点注入功率不确定性的量变极有可能引起规划方案风险水平的质变,为合理管控风险,提出考虑高比例可再生能源消纳的风险规划方法和含高比例可再生能源的风险评估技术具有重大的研究价值。解决此问题的方法之一是进行考虑可再生能源弃能风险的输电网前置规划,即优先进行输电网风险规划,再进行可再生能源风险规划。此种方法的优点在于可精

确计算输电网接纳可再生能源的能力,避免弃风弃光等弃能现象的发生。

c. 考虑需求侧响应的输电网风险规划。

停电风险是输电网中安全风险后果的常用表现形式,这就意味着当系统供电能力不足时,需对用户拉闸限电^[48]。随着智能电网的发展,需求响应技术^[59]应运而生,通过采取可靠性电价机制并给予用户一定的停电补偿即可降低系统运行风险,统筹考虑各方利益。与通过规划手段的传统风险管控策略相比,该方法可适当延缓线路升级改造,降低规划投资,具有较大的经济效益。由于现有研究尚未客观、全面地揭示需求响应措施对负荷需求弹性变化的作用机理,如何对可靠性电价机制进行科学建模并将其嵌入现有输电网风险规划模型将成为未来研究的一个热点,而能效电厂理论的出现为定量分析需求侧响应对负荷的影响提供了新途径。

d. 交直流输电网风险规划。

随着直流及多端直流输电技术的发展,交直流混联系统如今已屡见不鲜。相比传统交流系统,交直流混联系统在拓扑结构、潮流计算方式、模型约束条件表达方面均有所不同^[27,60];由于直流系统中含有大量电力电子设备,其可靠性建模的准确性将直接影响交直流混联系统风险评估结果;对于交直流混联系统,其中任意一环节故障,都有可能产生连锁故障事件的发生,从而产生大停电风险。综合以上3点,有必要在电力系统规划环节,充分考虑交流系统和直流系统的相互影响,建立交直流混联系统的风险规划模型,以期合理管控系统风险。

e. 输电网风险规划方案的不确定性安全校验。

风险规划本质上是不确定规划的进一步延伸,具有维度高、变量多和求解困难等特征。传统输电网规划方案的安全校验是以规划年最高负荷场景作为最危险场景的确定性校验。但考虑到多种风险因素的存在,年最高负荷场景未必是风险规划方案的最危险场景^[15-18,50-51,61]。因此,可利用年持续负荷曲线获得多负荷水平或年负荷的不确定性模型,并对所得风险规划方案进行安全性校验。

f. 输电网风险规划模型的求解加速技术。

现有风险规划方法一般采用模拟法处理各种风险因素,为了保证模拟的精度通常需要大量样本,降低了规划模型求解效率。为了提高模型求解速度,除了可以采用基于拉丁超立方采样的MCS法和准MCS法等计算效率高的抽样方法处理风险因素,还可以根据线性模型和风险因素的特点将不确定规划模型转化为有限场景下的确定性规划模型。

g. 输电网风险规划的数学优化方法求解。

目前的输电网风险规划模型多为复杂的混合整数规划模型,一般采用现代启发式算法加以求解。

但对于大规模系统,此种算法具有计算量大、鲁棒性差等缺点。为了得到适应性强的规划方案,可对风险规划模型加以简化,通过利用松弛方法、数学优化KKT条件、数学分解方法、对偶理论和互补理论将结构复杂的风险规划问题转化为可直接用CPLEX和GUROBI等商业化软件进行求解的数学优化模型。

h. 随机/鲁棒输电网风险规划。

基于随机规划理论的输电网风险规划通常以机会约束的形式表示违反线路传输功率约束的概率不超过某一置信水平,所得规划方案未必能通过所有场景下的安全校验。虽然未通过安全校验的场景数量较少,但是由于这些危险场景的存在,势必影响规划方案的安全稳定运行。通过对随机规划过程加以鲁棒控制,筛选出最危险的场景,并实现在其满足安全性约束前提下的风险规划模型优化。

5 结语

海量不确定因素的时空耦合注入给电力系统的安全经济运行带来了诸多风险,也对输电网传统风险规划方法和风险评估技术产生了一定冲击。目前国内外学者在考虑不确定因素的输电网风险规划、评估领域开展了许多研究工作,但仍需进一步完善和发展相关理论。基于此,本文综述了输电网中风险因素的建模方法,探讨了考虑多种不确定因素的输电网风险规划理论及方法。在此基础上,展望了未来考虑多种不确定因素的输电网风险规划领域需要解决的问题和可能出现的理论、方法,旨在为后续研究提供参考。

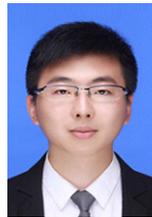
参考文献:

- [1] 李碧君,方勇杰,徐泰山. 关于电网运行安全风险在线评估的评述[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):171-177.
- [2] LI Bijun, FANG Yongjie, XU Taishan. Review on online operational security risk assessment of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 171-177.
- [3] LI Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2014: 10-33, 67-71.
- [4] CIGRE Task Force 38. 03. 12. Power system security assessment: a position paper [J]. Electra, 1997, 175: 49-77.
- [5] CIGRE Working Group C4. 601. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems [R]. Paris, France: CIGRE, 2010.
- [6] KIRSCHEN D S, JAYAWEERA D. Comparison of risk-based and deterministic security assessments [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(4): 527-533.
- [7] MCCALLEY J D, VITTAL V, ABI-SAMRA N. An overview of risk based security assessment [C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton, Canada: IEEE, 1999: 173-178.
- [8] 刘佳,徐谦,程浩忠,等. 考虑N-1安全的分布式电源多目标协调优化配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):84-92.
- [9] LIU Jia, XU Qian, CHENG Haozhong, et al. Multi-objective coordinated DG planning with N-1 security [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 84-92.
- [10] ZHENG J, WEN F, LEDWICH G, et al. Risk control in transmission system expansion planning with wind generators [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 24(2): 227-245.
- [11] 张里,刘俊勇,刘友波,等. 计及风速相关性的电网静态安全风险评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):84-89.
- [12] ZHANG Li, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Static security risk assessment of power system considering wind speed correlation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 84-89.
- [13] BRANO V L, ORIOLI A, CIULLA G, et al. Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo, Italy [J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 1026-1039.
- [14] ZHANG S, CHENG H, ZHANG L, et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3215-3225.
- [15] 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.
- [16] 武鹏,程浩忠,邢洁,等. 基于可信性理论的输电网规划[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):22-26.
- [17] WU Peng, CHENG Haozhong, XING Jie, et al. Transmission network expansion planning based on credibility theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 22-26.
- [18] 洪芦诚,石立宝,姚良忠,等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报,2010,25(8):116-122.
- [19] HONG Lucheng, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Fuzzy modelling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122.
- [20] SILVA I J, RIDER M J, ROMERO R, et al. Transmission network expansion planning considering uncertainty in demand [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1565-1573.
- [21] WU P, CHENG H, XING J. The interval minimum load cutting problem in the process of transmission network expansion planning considering uncertainty in demand [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1497-1506.
- [22] YU H, CHUNG C Y, WONG K P. Robust transmission network expansion planning method with Taguchi's orthogonal array testing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1573-1580.
- [23] 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.
- [24] 丁明,吴义纯,张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):107-110.
- [25] DING Ming, WU Yichun, ZHANG Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110.
- [26] DONG Z Y, WONG K P, MENG K, et al. Wind power impact on system operations and planning [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [27] CAI D, SHI D, CHEN J. Probabilistic load flow computation using Copula and Latin hypercube sampling [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(9): 1539-1549.
- [28] MCCALLEY J D, FOUAD A A, VITTAL V, et al. A risk-based security index for determining operating limits in stability-limited electric power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1210-1219.
- [29] XIAO F, MCCALLEY J D, OU Y, et al. Contingency probability es-

- timation using weather and geographical data for on-line security assessment[C] // Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Stockholm, Sweden: IEEE, 2006: 1-7.
- [24] 薛禹胜, 刘强, 董朝阳, 等. 关于暂态稳定不确定性分析的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 1-6.
XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Zhaoyang, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-6.
- [25] 王伟, 毛安家, 张粒子, 等. 市场条件下电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 68-73.
WANG Wei, MAO Anjia, ZHANG Lizi, et al. Risk assessment of power system transient security under market condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 68-73.
- [26] VAAHEDI E, LI W, CHIA T, et al. Large scale probabilistic transient stability assessment using BC Hydro's on-line tool[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 661-667.
- [27] 余晓鹏, 张雪敏, 钟雨芯, 等. 交直流系统连锁故障模型及停电风险分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 33-39.
YU Xiaopeng, ZHANG Xuemin, ZHONG Yuxin, et al. Cascading failure model of AC-DC system and blackout risk analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 33-39.
- [28] FENG Y, WU W, ZHANG B, et al. Power system operation risk assessment using credibility theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1309-1318.
- [29] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明, 等. 运行风险评估中缺乏历史统计数据时的元件停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 26-31.
NING Liaoyi, WU Wenchuan, ZHANG Bomng, et al. Component outage modeling method for operation risk assessment with limited power components' failure data[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 26-31.
- [30] 孙羽, 王秀丽, 王博学, 等. 架空线路冰风荷载风险建模及模糊预测[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 21-28.
SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Wind and ice loading risk model and fuzzy forecast for overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 21-28.
- [31] ZHOU Y, PAHWA A, YANG S S. Modeling weather-related failures of overhead distribution lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1683-1690.
- [32] 汤昶烽, 卫志农, 李志杰, 等. 基于因子分析和支持向量机的电网故障风险评估[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1039-1044.
TANG Changfeng, WEI Zhinong, LI Zhijie, et al. Risk assessment of power grid failure based on factor analysis and support vector machine[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1039-1044.
- [33] 崔建磊, 文云峰, 郭创新, 等. 面向调度运行的电网安全风险管控系统(二)风险指标体系、评估方法与应用策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 92-97.
CUI Jianlei, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Design of a security risk assessment system for power system dispatching and operation, part two: risk index, assessment methodologies and application strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 92-97.
- [34] GUO L, GUO C X, TANG W H, et al. Evidence-based approach to power transmission risk assessment with component failure risk analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(7): 665-672.
- [35] 贺海磊, 郭剑波. 考虑共因失效的电力系统地震灾害风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 44-54.
HE Hailei, GUO Jianbo. Seismic disaster risk evaluation for power systems considering common cause failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 44-54.
- [36] CHEN J, THORP J S, DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(4): 318-326.
- [37] NEDIC D P, DOBSON I, KIRSCHEN D S, et al. Criticality in a cascading failure blackout model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(9): 627-633.
- [38] MEI S, HE F, ZHANG X, et al. An improved OPA model and blackout risk assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 814-823.
- [39] 丁明, 肖遥, 张晶晶, 等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 821-829.
DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Risk assessment model of power grid cascading failures based on fault chain and dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 821-829.
- [40] CHASSIN D P, POSSE C. Evaluating North American electric grid reliability using the Barabási-Albert network model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2005, 355(2): 667-677.
- [41] WANG A, LUO Y, TU G, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 442-450.
- [42] ZHANG N, KANG C, LIU J, et al. Mid-short-term risk assessment of power systems considering impact of external environment[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(2): 118-126.
- [43] WANG A, LUO Y, TU G, et al. Quantitative evaluation of human-reliability based on fuzzy-clonal selection[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(3): 517-527.
- [44] DING Y, WANG P. Reliability and price risk assessment of a restructured power system with hybrid market structure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 108-116.
- [45] 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.
- [46] LIU L, CHENG H, YAO L, et al. Multi-objective multi-stage transmission network expansion planning considering life cycle cost and risk value under uncertainties[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013, 23(3): 438-450.
- [47] 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 Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1568-1576.
- [48] 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.
- [49] 雷加智, 龚庆武. 基于改进点估计法的输电线路过负荷风险评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 67-72.
LEI Jiazhi, GONG Qingwu. Transmission line overload risk assessment based on improved point estimation methods[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 67-72.
- [50] 刘佳, 程浩忠, 徐谦, 等. 网源协调驱动下考虑网络转供能力的

- 配电系统多目标双层近期规划[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 42-49.
LIU Jia, CHENG Haozhong, XU Qian, et al. Multi-objective bi-level short-term planning of distribution system considering network transfer capability under network-generation coordination drive [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 42-49.
- [51] 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.
- [52] CHOI J, EL-KEIB A A, TRAN T. A fuzzy branch and bound-based transmission system expansion planning for the highest satisfaction level of the decision maker[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 476-484.
- [53] NI M, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.
- [54] 龙日尚, 张建华, 蒙园, 等. 严重灾害下特高压交直流电网风险评估方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2939-2946.
LONG Rishang, ZHANG Jianhua, MENG Yuan, et al. Risk assessment method of UHV AC/DC power system in serious disasters[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2939-2946.
- [55] REI A M, SCHILLING M T. Reliability assessment of the Brazilian power system using enumeration and Monte Carlo[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1480-1487.
- [56] LÓPEZ J Á, PONNAMBALAM K, QUINTANA V H. Generation and transmission expansion under risk using stochastic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1369-1378.
- [57] ALIZADEH B, JADID S. Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(9): 948-960.
- [58] 刘学, 李晖, 周明, 等. 考虑风速相关性的多目标电网规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 87-94.
LIU Xue, LI Hui, ZHOU Ming, et al. Multiple-objective power grid planning considering wind speed correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 87-94.
- [59] ZENG M, XUE S, MA M J, et al. Historical review of demand side management in China: management content, operation mode, results assessment and relative incentives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25: 470-482.
- [60] 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.
- [61] 谢仕炜, 胡志坚, 宁月. 考虑最优负荷削减方向的电网多目标分层随机机会约束规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 35-42.
XIE Shiwei, HU Zhijian, NING Yue. Multi-objective hierarchical stochastic chance-constrained programming considering optimal load-shedding direction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 35-42.

作者简介:



刘佳

刘佳(1991—),男,河南商丘人,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化规划、运行(E-mail: liujia911011@126.com);

程浩忠(1962—),男,浙江东阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划、电压稳定、电能质量;

刘盾盾(1992—),男,湖南株洲人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划。

Review of risk-based transmission network planning under coupled uncertainties

LIU Jia¹, CHENG Haozhong¹, LIU Dundun¹, YAO Liangzhong², ZENG Pingliang², MA Zeliang³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. East China Grid Company Limited, Shanghai 200120, China)

Abstract: Owing to the drawbacks of conventional deterministic risk analysis methods, it is hard for them to adapt to the transmission network planning and solution evaluation under the new situation. In order to control the risk levels of transmission networks more reasonably, the achievements of risk planning and assessment of transmission networks based on probabilistic analysis methods are reviewed. The risk modeling methods for security, equipment, structure, management and market in transmission networks are introduced. From the perspectives of scenario-based planning, stochastic planning, fuzzy planning and interval planning, the transmission network risk planning methods considering multiple uncertainties are commented. The domestic and international research results of system risk assessment considering multiple uncertainties based on indices and approaches are summarized. On this basis, the problems to be focused for future study on the transmission network risk planning considering multiple uncertainties are put forward, which are incorporated to the hot study topics such as high renewable energy penetration, AC-DC interconnection, grid-source coordination, demand response and modeling optimization.

Key words: transmission network; uncertainties; risk modeling; risk planning; risk assessment