

# 输电线路规划方法和寿命周期成本综述

杨丹<sup>1</sup>,倪江<sup>1</sup>,杨迎昕<sup>1</sup>,焦一飞<sup>1</sup>,齐韵英<sup>2</sup>,许潇<sup>2</sup>,刘俊勇<sup>2</sup>  
(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610095;  
2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**按照传统标准设计的输电线路规划存在效率低和资本浪费等问题。经济研究表明,采用优化设计和科学成本管理方法的输电线路建设对于节省资本投资具有重要意义。因此,从输电线路扩建规划方面进行了探讨研究,以帮助在输电线路建设和运营方面做出更明智的决策。首先,通过综述国内外的研究论文,概述了输电线路规划的基础理论,系统梳理了输电线路规划的方法,包括确定性方法、启发式方法、元启发式方法等,分析了各种方法的优缺点;然后,在经济评估方面考虑线路建设、运行、维护等多个阶段的费用,提出了寿命周期成本分析,更全面地评估输电线路规划方案的经济性。

**关键词:**输电线路; 输电规划; 经济寿命; 寿命周期成本

**中图分类号:** TM 715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)01-0065-07

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20240110

## Overview of Economic Planning Methods and Life Cycle Cost for Transmission Lines

YANG Dan<sup>1</sup>, NI Jiang<sup>1</sup>, YANG Yingxin<sup>1</sup>, JIAO Yifei<sup>1</sup>, QI Yunying<sup>2</sup>, XU Xiao<sup>2</sup>, LIU Junyong<sup>2</sup>  
(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610095, Sichuan, China;  
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** In the past, transmission line planning based on standard designs suffered from inefficiency and capital wastage. Economic studies show that employing optimal design and scientific cost management for transmission line construction is crucial for saving capital investment. So the review of research efforts in transmission expansion planning is given to facilitate more informed decision-making regarding the construction and operation of transmission lines. By surveying domestic and international research articles, the fundamental theories of transmission line planning are outlined. The methods for transmission line planning, including deterministic, heuristic and metaheuristic approaches, are systematically delineated and their respective strengths and weaknesses are analyzed. Then, for economic evaluation, a life cycle cost analysis is proposed to account for expenses across multiple phases such as line construction, operation and maintenance, which can more comprehensively evaluate the cost-effectiveness of any given transmission planning scheme.

**Key words:** transmission line; transmission planning; economic life; life cycle cost

## 0 引言

随着能源消费的不断增长,电力负荷需求也不断攀升<sup>[1-3]</sup>,供电质量和电力系统的安全稳定运行至关重要。输电线路在将电力从发电厂输送到用户

的过程中发挥着重要作用<sup>[4]</sup>。为了满足不断增长的电能需求,电力行业面临着建设新发电站和输电线路以及升级和改善现有设施的挑战,因此输电线路的规划和运行成为了一个重要课题。

输电线路的设计是一个复杂的过程,涉及各种设计参数的选择,包括导体类型、直径和结构、塔架类型和高度以及基础设计。这些设计参数的相互关

系复杂,一个参数的变化会影响整个系统的性能和成本。因此,选择最佳设计参数对于实现输电系统的最佳性能和成本效益至关重要。输电线路规划旨在确定新的输电线路或扩大现有线路的最佳路线和设计参数。规划过程涉及各个方面,包括环境影响评估、安全和可靠性分析以及成本效益分析。输电线路规划的目标是制定一个既能满足电力需求又能将成本和环境影响降到最低的计划。

为了实现最优的输电线路规划,会用到各种建模和优化算法,包括数学规划、启发式算法等。这些算法可以有效解决输电线路规划中复杂的多目标优化问题,有助于实现输电系统的最佳性能和成本效益。另外,输电线路的经济寿命也是输电线路规划中的一个重要因素。输电线路的寿命取决于各种因素,包括设计参数、环境条件和维护方法。因此,在规划过程中必须考虑输电线路的经济寿命,以确保投资的成本效益和可持续性。

下面对当前输电线路规划和经济分析研究进行了综述,旨在讨论输电线路优化经济规划中存在的问题,并从输电线路规划的基础理论、不同建模和优化算法以及输电线路的经济寿命方面进行了分析和论述。

## 1 输电线路

输电线路是电力系统中的重要组成部分,其基本功能是将发电厂产生的电能从远离负荷中心的地区输送至负荷中心和城市等用电高峰区域。输电线路的建设和运营能够保障电力系统的平稳运行,满足用户对电能的需求。随着能源转型的深入推进,新能源发电接入电网的比例不断增加,输电线路的重要性也愈加凸显。输电线路规划能够为能源转型提供必要的支持,使可再生能源和分布式能源能够更加有效地接入电网。

### 1.1 输电规划

输电规划旨在以最低的成本建造或扩建新的输电线路,满足电力需求的同时达到质量和可靠性的要求。根据时间跨度的不同,输电规划可分为长期、中期和短期规划<sup>[5]</sup>。长期规划指考虑未来 10 年以上的输电线路规划,其目的是确定新输电线路建设的技术要求,并从发电区域的角度开发新技术。中期规划通常考虑未来 3~5 年,侧重于扩建计划,并

考虑相互关联的系统。而短期规划则指 1 年内的输电线路规划,通过分析操作限制和解决方案,保持向消费者提供优质电力供应的连续性。输电规划方法中考虑的各种技术、经济和环境问题如图 1 所示。

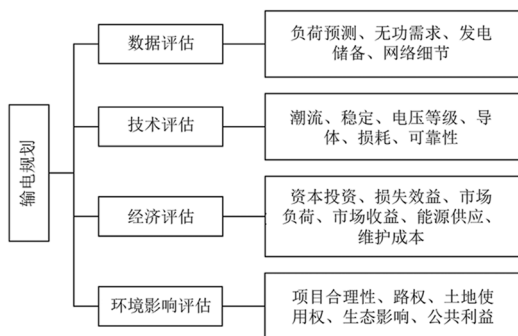


图 1 输电规划

### 1.2 输电线路选型和电压等级选择

对特定类型的线路或电压等级的选择取决于线路上传输的功率大小。高电压输电可以减少线路损耗,提高输电效率,但一些因素限制了高电压的水平,如:传输电压水平提高后,导体和接地塔之间的绝缘需要增加,导体和地面之间的距离需要拉大,导致塔的高度增加;导体之间需要增加距离,导致需要更长的横担。这些都导致了线路建设成本的增加。因此每条输电线路都有一个固定的电压水平上限,超过这个上限经济性就会大打折扣。

电力系统输电电压等级之间的比例,在电压低于 110 kV 时一般为 3 左右,在 110 kV 以上时宜为 2 左右。选择输电线路电压时,首先根据输送容量、距离和周围网络的电压等级制定方案,再通过经济技术比较确定最佳的方案。

## 2 输电线路扩建规划方法

输电线路的优化过程包括同时研究和分析线路的各个组成部分的设计和选择,以实现整体成本的最佳技术经济设计<sup>[6]</sup>。因此,设计架空输电线路时需要考虑各种设计参数,这些参数在对系统成本的影响方面具有复杂的相互作用,并受到外部约束的限制。为了考虑所有主要参数的各种可能配置,可以利用优化的手段设计架空电力线路,以最低的成本满足输电线路性能<sup>[7]</sup>。

以输电线路规划为主题的现有研究重点关注降低投资成本和提高系统可靠性两方面。尽管数学规划方法很受欢迎,但存在模型难以处理、需要大量的

决策变量以及计算时间长的缺点<sup>[8]</sup>。为了解决这些问题,启发式和元启发式算法被用于建立最优的输电线路模型。下面重点介绍基于数学规划、启发式和元启发式算法的输电线路规划研究。

## 2.1 数学规划

输电线路的优化问题具有强复杂性,因此在进行输电规划时无法考虑到所有因素,要做出很多假设和优化。输电线路规划的目的是在考虑网络运行条件和可靠性的情况下,降低现有或新建网络中规划新线路的资金成本。为了实现这一目标,可以使用经典的解析方法,例如线性规划、非线性规划、动态规划和混合整数规划等来得到问题的最优解。

与其他使用直流模型进行输电规划的研究不同,文献[9]提出了一种基于交流最优潮流的随机多目标输电扩展规划的优化框架,采用非线性规划方法,目标是 minimized 输电投资成本、预期运行成本和预期甩负荷成本并最大化预期负荷系数,交流潮流下的电压安全管理也作为目标之一。文献[10]针对输电网络扩展规划建立了一个双层优化模型,上层以投资成本最低为目标对新建线路的数量和位置进行规划,下层对所得方案应对不确定性因素的能力进行了校验,上下层模型分别利用粒子群算法和线性规划求解器求解。

文献[11-14]为满足电力发展需求,提出了发输电系统的联合规划方法,对系统的扩建线路方案进行了研究,并最终将其转化为混合整数规划模型求解;文献[11-13]同时还计及了可再生能源发电的不确定性,并建立了  $N-1$  安全校核约束模型;文献[14]在发输电规划中同时兼顾黑启动机组的规划,旨在提高系统的恢复力。

综上,经典优化技术是可以有效解决输电规划问题的工具,但数学优化过程的内在局限性带来了非凸和非线性的问题。计算时间长、模型难处理、需要大量决策变量被认为是数学规划的主要瓶颈。

## 2.2 启发式和元启发式算法

与精确的数学规划方法相比,启发式模型能够提供良好的解决方案,同时花费较少的计算时间。文献[15]提出了一个基于可控随机局部搜索的启发式输电线路扩建模型,分析了系统的线路扩建方案和成本,解决了实际的阶段输电规划问题。文献[16]使用启发式方法获得一组候选扩建线路并进行排序,同时考虑了拥堵指标来衡量节点价格和

线路拥堵的变化。

元启发式算法是一个迭代生成过程,可以有效地找到优化问题的最优或接近最优解。元启发式在搜索方法方面取得了重大进展,这些方法成功地解决了不同领域的复杂优化问题,优于启发式。

文献[17]提出了一种基于二元粒子群优化算法的模型来解决具有安全约束的输电扩展规划问题,计及了新建线路的投资成本和运营成本;该方法在具有 10 年规划范围内的 24 节点算例系统进行了测试。文献[18]提出了一种进化算法来解决静态输电扩展规划问题,该算法使用一种机制来动态调整算法运算符的选择概率。新能源发电尤其是风电的接入给输电线路的规划带来了很大的不确定性,文献[19]考虑风电的不确定性分布,建立了基于机会约束的鲁棒输电规划模型,将其转化成不含随机变量的确定性模型后采用遗传算法求解。文献[20]针对风储联合系统提出了一种双层输电线路规划模型,文献[21]提出了一种双层优化模型用于含风电场的输电系统规划,其目标都是减少输电投资成本和其他成本。

文献[22]考虑到线路维护的经济影响,提出了一种十进制编码遗传算法来解决输电网络扩展规划问题。目标是 minimized 投资新建输电线路的总成本,并探究了维修成本系数对输电线路和变电站的寿命系数影响。文献[23]提出了一种基于树搜索启发式算法和遗传算法相结合的多阶段输电系统扩展规划的求解方法,同时考虑了  $N-1$  安全约束。文献[24]考虑输电阻塞盈余,上层目标为减小投资成本,下层模型基于节点边际电价,引导输电网络的扩展规划。文献[25]考虑了高铁负荷和新能源发电不确定性,基于解耦线性潮流建立了输电网的随机规划模型。

## 3 输电线路经济寿命分析

电力投资巨大,占国家总投资的主要部分,对国民经济有重大影响。不断增长的电能需求、新能源的接入以及电网的升级改造要求改善现有的输电设施,扩建新的线路,以适应电力系统的动态变化,并保持系统稳定。经济分析是对该过程进行的一种评估方法,它可以在经济效益和技术可行性之间找到最佳平衡点,以确定成本效益最大化的方案,并对方



案的风险和不确定性进行评估。

在输电规划的经济评价这一重要课题上,也已经有不少研究,制定了各种目标:1)最小化静态投资或扩建线路长度<sup>[26]</sup>;2)最小化投资和乘以足够大的惩罚系数的负荷削减<sup>[27]</sup>;3)最小化投资和运营成本,如发电机成本<sup>[28]</sup>、能源赤字成本<sup>[29]</sup>、损失成本<sup>[30]</sup>和放松管制市场的拥堵成本<sup>[31]</sup>;4)风险分析的最大遗憾最小化<sup>[32]</sup>;5)投资最大化和模糊形式的边缘率的交付<sup>[33]</sup>。大多数研究将输电规划的运行和可靠性指标转化为基于价值的目标,以包含在目标函数中。然而,对输电规划决策的经济评价不仅是一个静态投资的问题,还应该包括在规划、运行、维护、退役和报废等各个阶段产生的直接和间接支出。生命周期成本(life cycle cost, LCC)理论的应用为输电规划和未来资产管理带来了一种新的方法。

### 3.1 输电线路的生命周期成本分析

1933年,美国审计总署首次提出 LCC 的概念<sup>[34]</sup>,该方法在供电公司获取输电线路资本投资方面被广泛采用。LCC 用来评估一个项目在其生命周期内的累积成本,从而为项目在生命周期内的阶段决策提供有用的信息<sup>[35]</sup>。LCC 分析方法可以帮助确定最佳的输电线路设计和规划方案,并考虑到各种因素的影响,帮助供电公司在制定维护策略和更新计划上的决策。

输电线路的 LCC 分析还包括线路系统及组成部分寿命、输电线路可靠性等研究。输电线路 LCC 设计的基本框架如图 2 所示。

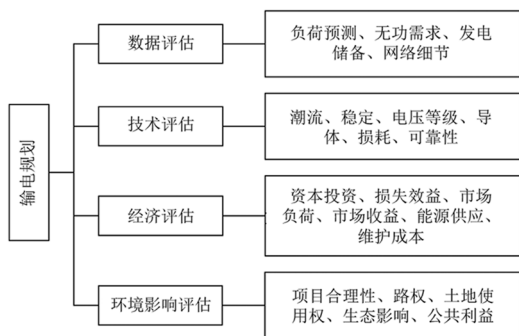


图 2 输电线路 LCC 设计基本框架

在实际应用中,输电线路的建设还应着重考虑两个方面。第一,除考虑各个环节的成本外,还要考虑输电线路的安全性、实用性以及对自然环境的影响。第二,由于输电线路暴露在户外,运行时会受到损耗以及自然灾害等多种因素的影响,因此很容易

导致零部件受损,进而影响线路正常运行。为了保证线路的可靠性,需要从多个角度对其进行分析,对每个组件的寿命进行考虑。

### 3.2 生命周期成本在输电规划中的应用

文献[36-37]最早提出了一种完整的输电系统 LCC 分析方法,该方法描述了影响系统的主要成本和重要元素,以研究不同的维护策略,并考虑其相应的 LCC;该方法考虑了设备的使用寿命、停电成本、维护成本、维护间隔、计算时间和罚款等因素,以确定系统的现值;该研究表明,LCC 分析对于考虑金融行业或由监管引起的变化是非常有用的,并能够根据新的情况制定维护策略。文献[38]认为之前的成本管理没有考虑到由于断电、维护和故障损失造成的成本,应用范围有限;该文献针对输电线路设计了一种成本评估方法用以选择导线类型,目标是最小化一次投资成本、运行损耗成本、维护成本、故障损失成本和报废成本。文献[39]按照文献[38]提出的全生命周期成本组成,针对 500 kV 线路提出了基于 LCC 的导线性能经济评估方法,并分析了影响投资成本和运行损耗成本的因素,通过实例计算选择出最适合 500 kV 线路的导线类型。

文献[40]提出了一种双层的输电扩展规划模型,并考虑具有间歇性的可再生能源发电带来的不确定性,同时协调了上层的决策过程和下层的可靠性评估。上层主要目标是最小化扩建输电项目的 LCC;下层目标是评估可靠性,以负荷削减作为指标。上层的目标函数为

$$\min c_{LCC} = c_1 + \frac{(1+r_D)^{S_L} - 1}{r_D(1+r_D)^{S_L}}(c_0 + c_M + c_F) + \frac{c_D}{(1+r_D)^{S_L}} \quad (1)$$

式中: $c_{LCC}$ 为扩展规划的 LCC; $c_1$ 为扩展线路的投资; $r_D$ 为资本贴现率; $S_L$ 为输电线路使用寿命; $c_0$ 、 $c_M$ 、 $c_F$ 和  $c_D$ 分别为预期网络运营成本、输电网络维护成本、预期故障成本以及扩展线路的报废成本。

在上层的输电规划决策下,下层可靠性评估被视为一个概率最优潮流问题,目标是最小化每个不确定场景下的预期负荷削减。下层目标函数为

$$\min E_{LSEs} = p_s \sum_d^{N_d} R_{d,s} \quad (2)$$

式中: $E_{LSEs}$ 为年度预期削减功率; $p_s$ 为场景  $s$  的权重因子; $R_{d,s}$ 为场景  $s$  节点  $d$  上的负荷削减; $N_d$ 为节点

集合。通过对不同扩建方案进行对比分析,得到了最优的输电线路扩建方案。

文献[41]提出了一种基于 LCC 的预测分析和输电线路的分层设计方法,通过总体设计有效预测输电线路寿命周期内的各项费用。对输电线路进行了基于 LCC 的分层设计,每一层的设计都需要对 LCC 进行循环比较,以做出具体的设计选择,即“分层反馈”。文献[42]针对输电线路的经济寿命提出了一种评估方法,利用区间分析法计算各阶段的 LCC,能够降低故障率预测或其他误差带来的不确定性。

文献[43]提出了一种基于 LCC 的输电线路绝缘子串更换成本计算方法,并考虑了逐年停电更换成本。文献[44]依托于电力信息平台和数据驱动技术,提出了一种输变电设备的 LCC 分析方法,解决了以往 LCC 分析所用基础数据不准确的问题。通过成本分析,得到设备的最优寿命周期,可结合维修策略,为运维检修提供参考。文献[45]基于全寿命管理理论,建立了电力设备的成本年金测算模型,并应用灰色理论预测运行成本,最终得出设备的经济寿命和最佳的更换时间。

在输电线路选材方面,文献[46]对比了几种不同材料的性能,从一次性投资成本、维护和使用寿命对全寿命周期成本进行分析,为输电线路杆塔接地体选择最优的材料。结果表明,柔性石墨接地材料具有良好的性能和显著的技术经济优势。文献[47]提出了一种基于 LCC 评估的地下电缆钢支架选择方法,将支架的尺寸和钢的类型作为影响初始投资成本的因素,通过计算得出电缆支架的 LCC,选择最经济的电缆支架材料。

因此,输电线路全寿命周期成本分析可以帮助电力公司和相关部门了解电力设备的成本情况,包括设备的采购、安装、运行、维护和报废等各个阶段的成本;帮助决策者制定科学合理的运营和维护策略,评估设备寿命和更换时机,在降低电力系统的总体成本,提高设备的可靠性和安全性方面具有重要意义。

## 4 结 论

上面回顾了与输电线路的最优经济规划有关的研究,对输电线路规划和建设的基础知识、输电

规划中使用的优化方法进行了研究,对输电线路的经济寿命分析进行了综述,以帮助规划人员做出决策。输电规划中采用的各种方法表明,在输电线路优化问题中,必须对模型的设计参数进行权衡,以得出满足约束条件的目标函数的优化方案。随着可再生能源的接入和城市化进程的推进,输电线路规划、建设和运行中涉及的不确定性越来越大。因此,需要提出新的设计、规划、优化和经济分析的综合方法,以分析和估计新输电线路带来的技术和经济效益。

### 参考文献

- [1] 罗信庄. 电力系统 220kV 输电线路施工技术[J]. 中国新技术新产品, 2016(3): 111-111.
- [2] 黄谨益. 电力输电线路巡检中无人机的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(1): 233-233.
- [3] CARRIÓN D, PALACIOS J, ESPINEL M, et al. Transmission expansion planning considering grid topology changes and N-1 contingencies criteria[C]//Multidisciplinary International Congress on Science and Technology, Springer, 2020: 266-279.
- [4] 胡毅, 刘凯, 吴田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.
- [5] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
- [6] RAO S S. Engineering Optimization: Theory and Practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 2009.
- [7] CHANG W S, ZINN C D. Minimization of the cost of an electric transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(4): 1091-1098.
- [8] VELTEN K. Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers[M]. New York: John Wiley and Sons, 2009.
- [9] AKBARI T, RAHIMI-KIAN A, BINA M T. Security-constrained transmission expansion planning: A stochastic multi-objective approach[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 444-453.
- [10] 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.
- [11] 张衡, 程浩忠, 曾平良, 等. 考虑经济性与安全性的

- 发输电联合优化规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21):62-69.
- [12] 张衡, 程浩忠, 张建平, 等. 高比例风电背景下计及  $N-1$  安全网络约束的发输电优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 5929-5936.
- [13] 程浩忠, 张程铭, 柳璐, 等. 可再生能源接入下考虑短路电流限制的发输电鲁棒规划方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 68-76.
- [14] 楼奕轩, 孙磊, 丁明. 计及  $N-1$  安全约束和系统恢复能力的发输电拓展规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 41-50.
- [15] HINOJOSA V H, GALLEGUILLOS N, NUQUES B, et al. A simulated rebounding algorithm applied to the multi-stage security-constrained transmission expansion planning in power systems[J]. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 2013, 47:168-180.
- [16] AGUADO J A, DE LA TORRE S, CONTRERAS J, et al. Market-driven dynamic transmission expansion planning[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 82(1):88-94.
- [17] MORTAZ E, FUERTE-LEDEZMA L F, GUTIERREZ-ALCARAZ G, et al. Transmission expansion planning using multivariate interpolation [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 126:87-99.
- [18] LEITE DA SILVA A M, FREIRE M R, HONORIO L M. Transmission expansion planning optimization by adaptive multi-operator evolutionary algorithms[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133:173-181.
- [19] 边巧燕, 徐开, 孙黎滢, 等. 考虑风电功率概率分布不确定性的输电系统规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 60-65.
- [20] 郑静, 文福拴, 李力, 等. 计及风电场和储能系统联合运行的输电系统扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 135-142.
- [21] 郑静, 文福拴, 周明磊, 等. 计及需求侧响应的含风电场的输电系统规划[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 42-48.
- [22] MAHDAVI M, KHEIRKHAH A R, MACEDO L H, et al. A genetic algorithm for transmission network expansion planning considering line maintenance[C]//2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), IEEE, 2020: 1-6.
- [23] POUBEL R P B, DE OLIVEIRA E J, MANSO L A F, et al. Tree searching heuristic algorithm for multi-stage transmission planning considering security constraints via genetic algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 142: 290-297.
- [24] 胥威汀, 杨宇玄, 周笑言, 等. 考虑输电阻塞盈余的输电网双层扩展规划模型[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 113-120.
- [25] 苟竞, 刘方, 刘嘉蔚, 等. 考虑高铁负荷和风光不确定性的输电网规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 156-164.
- [26] BAHIANSE L, OLIVEIRA G C, PEREIRA M, et al. A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3):560-565.
- [27] 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.
- [28] LUMBRERAS S, RAMOS A, SÁNCHEZ P. Automatic selection of candidate investments for transmission expansion planning[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 59:130-140.
- [29] MENDONÇA I M, SILVA I C, MARCATO A L M. Static planning of the expansion of electrical energy transmission systems using particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 60:234-244.
- [30] SILVA A M L D, MANSO L A D F, RESENDE L C D, et al. Tabu search applied to transmission expansion planning considering losses and interruption costs[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, IEEE, 2008:1-7.
- [31] TOR O B, GUVEN A N, SHAHIDEHPOUR M. Congestion-driven transmission planning considering the impact of generator expansion [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2):781-789.
- [32] CHARLIN D, RUDNICK H, ARANEDA J C. Transmission expansion under uncertainty in the chilean system via minmax regret with GA [J]. IEEE Latin America Transactions, 2015, 13(3):698-706.
- [33] 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.
- [34] KUPRENAS J A. Project management actions to improve

- design phase cost performance [J]. Journal of Management in Engineering, 2003(1):25-32.
- [35] WANG Y L, SONG S S, GAO M C, et al. Accounting for the life cycle cost of power grid projects by employing a system dynamics technique: A power reform perspective[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 3297.
- [36] JEROMIN I, BALZER G, BACKES J, et al. Life cycle cost analysis of transmission and distribution systems[C]. 2009 IEEE Bucharest Power Tech, IEEE, 2009:1-6.
- [37] JEROMIN I, BALZER G, BACKES J, et al. Life cycle cost analysis of transmission and distribution systems[C]. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Prague, Czech Republic, 2009:1-4.
- [38] LIU H S, LIU J, WANG H G, et al. Analysis of LCC model of high-voltage transmission line[C]. 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, 2012:1-4.
- [39] 张宇娇, 孙晓彤, 王杰, 等. 考虑节能导线的 500 kV 输电线路全寿命周期成本评估[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 80-86.
- [40] GAN L, LI G Y, LIN Jeremy, et al. A bi-level probabilistic transmission planning with intermittent generations based on life cycle cost[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 306-314.
- [41] LIU J Y, XIU C, PAN J, et al. Research on transmission line design method based on life cycle cost theory[C]// 2017 Chinese Automation Congress (CAC), IEEE, 2017: 6194-6199.
- [42] 许巍, 王慧芳, 杜振东, 等. 输电线路最佳经济寿命区间评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 74-80.
- [43] CHEN R, ZHANG L L, YANG D, et al. Research on power-off replacement calculation of transmission line insulators based on life cycle cost [C] // 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), IEEE, 2019: 236-240.
- [44] 辛建波, 康琛, 陈田, 等. 基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 181-187.
- [45] 盛萌, 张书雅. 基于灰色理论的电网设备更换最优时间[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 131-136.
- [46] 俞越中, 朱海峰, 张子阳, 等. 输电线路杆塔接地体选材研究[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(5): 25-31.
- [47] ZHANG Y J, WANG Z L, ZHU Y Y, et al. Life cycle cost assessment method considering multiple factors for economic evaluation of cable line steel brackets[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(17): 2488-2498.
- 作者简介:**  
 杨 丹(1993), 女, 硕士, 从事电力系统相关工作;  
 倪 江(1990), 男, 硕士, 从事电力系统相关工作;  
 杨迎昕(1994), 女, 硕士, 从事电力系统相关工作。  
 (收稿日期: 2023-07-03)
- 需求侧管理, 2018, 20(1): 15-19.
- [15] ELLMAN D, XIAO Y Z. Incentives to manipulate demand response baselines with uncertain event schedules[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1358-1369.
- [16] 代心芸, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 电力市场环境 下工业需求响应技术的应用与研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4169-4186.
- 作者简介:**  
 肖钰皓(1995), 男, 硕士, 研究方向为新技术在电力工程中的应用;  
 李 科(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字化关键技术;  
 苏 军(1991), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力大数据应用。  
 (收稿日期: 2023-06-30)

—————  
 (上接第 34 页)

- [10] 孔祥玉, 刘超, 陈宋宋, 等. 考虑动态过程的可调资源集群多时间节点响应潜力评估方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 55-64.
- [11] 吴云芸, 方家琨, 艾小猛, 等. 计及需求响应的数据中心联盟共享储能规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 42-50.
- [12] 陈启鑫, 高洪超, 冯成, 等. 虚拟电厂动态构建与可信量化: 理论分析与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 26-36.
- [13] KONG Xiangyu, SUN Bowei, KONG Deqian, et al. Home energy management optimization method considering potential risk cost [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 62 (2020): 102378.
- [14] 魏小曼, 余昆, 陈星莺, 等. 基于 Affinity propagation 和 K-means 算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力