

110 kV 及以上架空输电线路输送能力影响因素分析及 对策研究

郭志锋,熊伟鹏,万 佳,付师瑀,杨林立

(国网江西省电力有限公司南昌供电分公司,江西 南昌 330069)

摘 要:输电线路输送能力受温度、导线材料等多方面因素影响,传统热稳定极限通过载流导体最大允许电流静态值确定,不能准确反映断面的安全状况。有效评估输电线路输送能力,可提高电网运行经济性,降低电网稳定风险和负荷控制风险。文中分析了影响输电线路输送能力的各个因素,针对各个影响因素提出相应的改进措施,并结合某地市重要潮流断面数据动态分析各因素对输电线路输送能力影响。通过计算分析,证明了在极端炎热天气情况下,提高线路允许稳态运行温度,强化线路特巡特维是提升线路载流量的有效手段,在大负荷时期对重要断面潮流稳定控制具有重大实践意义。

关键词:输电线路;输送能力;影响因素;潮流断面

中图分类号:TM 732 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)02-0011-05

0 引言

输电线路过载能力指的是线路在短时间内可以承受的、超过其长期允许载流量的电流值,过载能力会实时动态变化。在工程应用中,线路输送容量按最恶劣气象条件(如高环境温度、低风速、强日照)来静态设定,输送容量偏保守^[1]。在实际运行中,负荷变化引起的断面过载情况往往只持续较短的时间,此时断面线路的温度仍能保持在最大允许温度之内,因而无需切除负荷就能保证系统安全。因此,在短时间内允许断面过载以提高断面输电能力,不仅可以避免不必要的负荷损失,而且可以避免因线路切除、潮流再分布而引起线路相继过载跳闸的连锁反应^[2]。

影响线路输送容量的核心因素就是温度,所有影响导线散热和升温的因素,如环境气象条件、导线最高允许温度、线路自身的材料等等,都会直接影响其输送能力^[3]。现今对输电线路过载能力的研究集中在动态增容技术,该技术依托输电导线吸热和散热的热平衡方程^[4],综合考虑气温、风速、辐照度的影响,

可动态预测线路的实时传输容量。

文中分析了不同因素对输电线路输送能力的影响,提出相应的改进措施,再基于输电导线热平衡方程,结合某地市的重要潮流断面实例,分析环境温度、导线温度等因素对输电线路过载能力的影响,为大负荷时期重要断面的潮流控制提供参考依据。

1 输电线路输送能力影响因素分析

1.1 环境气象条件

环境气象条件对线路输送能力的因素主要包括:环境温度、风速、日照强度、降雨(雪)。这些条件都直接决定电流在导线中产生的热量能否有效地散发,当散热速度大于产热速度,则导线温度下降,过载能力提升,反之亦然。

环境温度是影响线路过载能力的核心因素。环境温度与导线的温差越大,散热效率越高。环境温度低时,导线通过额定电流时的实际温度远低于最高允许温度,因此过载能力强;环境温度高时,则散热能力下降,导线在额定电流运行时,导线温度接近最高允

收稿日期:2025-12-01

作者简介:郭志锋(1977),男,硕士,高级工程师,从事电力系统生产技术管理工作。

许温度,过载能力显著降低。环境温度每降低1℃,输电导线的载流量可提升约1%~1.5%。在冬季,输电线路的输送容量比夏季高出30%以上。

风速是影响对流散热效率的决定性因素。风将导线周围被加热的空气层(边界层)吹走,从而极大地加速了热交换过程。风速大时,强制对流散热效果极佳,导线冷却速度快,过载能力显著增强;风向垂直于导线时,散热效率最高;风速小或无风时,主要依靠自然对流散热(热空气上升),效率低。因此,该条件也是静态额定容量设定的保守基准。风速从0.5 m/s(微风)提升到5 m/s(三级风),线路的载流量可提升20%至50%不等。

日照强度:日照作为一种外部热源,持续给导线加热。太阳辐射被导线表面吸收并转化为热能,该部分热量需要通过对流和热辐射散发。日照强度最大时,导线吸收大量太阳辐射,温度显著升高,严重削弱过载能力;在夜间、阴天或雨天,日照强度为零或很弱,无额外热源,导线只依靠自身电阻发热,过载能力相对更强。深色、粗糙的导线表面比光亮表面吸收更多太阳辐射。

降雨/降雪:作为最强的自然冷却剂,可通过蒸发吸热、对流换热、物理接触等方式与导线进行热交换,并吸收大量热量。相较于晴天,在中等降雨气象环境中,一条输电线路的输送能力可提升30%以上;但在降雪环境中,积雪附着在导线上,导致导线表面绝缘特性发生改变,可能带来覆冰问题,但其初始的冷却效应较为显著。典型气象环境对线路载流量的综合影响如表1所示。

表1 气象条件对线路载流量的影响

气象场景	对线路载流量影响	原理分析
严寒、大风、雨雪天	极强	环境温度极低,温差大;风速快,对流散热极佳;降水带来极强的蒸发冷却。
炎热夏季、无风、晴朗午后	极弱	环境温度高,温差小;无风导致对流散热停滞;强日照持续为导线加热。
春秋季节、多云、有风	较强	环境温度适宜,温差适中;有风保证了良好的对流散热;云层削弱了辐射强度。
夜间、晴朗、无风	中等偏弱	无风导致散热主要依赖效率较低的自然对流和辐射。

1.2 线路材料与架设方式

导线材料与结构:导线材料的电阻率和最高允许工作温度是影响线路过载能力的根本因素。考虑到经济性,架空线路普遍使用铝基材料,运行最高允许温度通常为70℃~80℃,若温度进一步升高,则会导致导线机械强度下降严重(退火现象),弧垂增大,

安全距离不足,进一步降低输送能力。从导线截面积看,截面积越大,在相同发热功率下,导线的温度上升越慢,过载能力越强;从导线结构上看,广泛采用的钢芯铝绞线将多股铝线绞合在钢芯外围,可有效降低交流电阻、增强散热表面积和机械强度,从而提高输电线路的过载能力。

架设方式:架空线路通过对流和热辐射向空气散热,散热条件较好;而电缆线路被多层绝缘层、护套和管道、土壤包围,散热条件恶劣。热阻、土壤热阻率、敷设方式与间距都是影响电缆线路过载能力的重要因素。分裂导线也可提升线路输电容量,将一相导线由分裂成多根子导线构成,子导线间保持一定距离,等效增大了截面积和散热表面,减小了表面场强和电晕损耗,线路固有特性对载流量的影响对比如表2所示。

表2 线路固有特性对载流量的影响

固有特性	对载流量影响机理
导线材料电阻率	电阻率越低,电阻发热越小。线路材料电阻率:铜>铝>钢。
导线最高允许温度	温度限值越高,允许的温升越大,散热能力越强。耐热导线(150~230℃)载流量远大于常规导线。
导线截面积	截面积越大,电阻越小,热容量越大。载流量大致与直径成正比。
导线结构(绞线)	增加散热表面积,减小集肤效应,降低交流电阻。
敷设方式(架空)	暴露在空气中,散热条件好。载流量主要受限于导线自身耐热性和弧垂。
敷设方式(电缆)	被绝缘和土壤包裹,散热条件差。主要受限于绝缘耐热等级和整体热阻,通常远低于同截面架空线。
分裂导线	等效增大截面积和散热表面积,改善电场分布。

1.3 系统运行方式

过载持续能力与时间紧密相关。若仅为分钟级的短时过载,则输电线路允许的过载电流可以非常高,如电网进行合解环、故障跳闸场景,线路可承受数倍于额定电流的冲击;若为小时级的持续过载,此时过载时间大于热时间常数,导线温度会进一步达到新的稳态。因此,可以根据系统运行需求,制定运行策略,允许线路在规定的时间内过载运行。

1.4 其他因素

在理想的输电导线中,电阻的分布较为均匀。但在工程实际中,线路的关键连接点如耐张线夹、螺栓接头等若存在缺陷,则会进一步制约线路的过载能力。常见的缺陷有以下几种:

- 1) 安装工艺不当:压接不紧、螺栓未达到规定扭矩、接触面未清洗干净(有油污、氧化层)或未涂电力复合脂,这些问题都会使初始接触电阻过大,最终导致连接点烧红、熔焊甚至烧断。
- 2) 设计缺陷:金具结构设计不合理,导致实际接

触面积不足或压力分布不均。

3) 材料不匹配:如铝导线与铜质金具直接连接,由于两种金属的电极电位不同,在潮湿空气中会发生电化学腐蚀,生成高电阻的腐蚀产物。

4) 振动与蠕变:导线在风中长期振动,会使螺栓松动。导线的机械蠕变(缓慢伸长)也会导致压接点压力下降,接触电阻随时间推移而增大。

2 提升现有输电线路输送能力技术

当前,国内外对提高架空输电线路输送能力技术主要集中在以下几种:1) 提高输电线路电压等级、增加输电线路回路数;2) 采用特殊交流导线,如耐热型导线等;3) 利用灵活交流输电技术;4) 静态和动态增容技术。其中,提高现有线路运行输电能力有两种方法:静态增容技术(提高导线运行温度)和动态增容技术(动态额定值监测技术)。

2.1 静态增容技术

静态增容技术通常为提高现行技术规定的导线允许温度值。依据《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010),钢芯铝绞线的允许温度宜采用 70 °C,必要时可升高至 80 °C。文献[5]详细分析了输电导线稳态温度从 70 °C 提升至 80 °C 后,载流量可提升大约 20%。但是静态增容技术的应用,需合理评估温度上升对导线及相关金具的机械强度与使用寿命的影响,同时还需考虑由此导致的导线弧垂增大、线路对地距离减小,以及交叉跨越段空气间隙距离不足等潜在风险。

2.2 动态增容技术

动态增容技术是指不改变原有技术规程,实时在线监测导线状态和气象条件,在确保线路安全运行的前提下,充分利用线路存在的隐容量,提高线路的输电能力^[6]。动态增容技术的核心原理在于依据导线的吸热和散热平衡方程,详细分析导线载流量,并量化评估线路的热稳定限额。

目前,动态增容技术通过在输电线路路上安装实时监测装置来挖掘输电线路潜在传输能力。然而,该方法在建设和维护中存在高昂的成本和复杂的结构问题,并且电网的运行大多数决策需提前进行判断,仅依赖实时数据难以满足电网运行决策的提前性需求。

此外,由于环境因素的不确定性和不同区域气象差异,会导致动态增容技术的应用效果和增容风险不一。

2.3 其他改进措施

1) 运行控制与潮流优化

安装柔性交流输电系统装置,如统一潮流控制器、静止同步串联补偿器等先进电力电子设备^[7],精确、快速地控制线路的潮流分布,减轻重载线路的压力;还可整合动态增容、柔性灵活输电装置控制、发电机调度等多源信息,利用人工智能和大数据算法,实现对电网潮流的全局最优控制,进一步提升整体输电能力,规避电网安全风险。

2) 强化运维与状态评估

对重要潮流断面强化线路特巡特维^[8],利用无人机、机器人等先进技术,强化线路巡检及测温,替代传统人工巡检,实现线路状态的实时感知和精准评估,及时发现隐患并消除;定期清除通道内的树障,采用特殊涂料或装置防止金具和导线腐蚀,维持线路固有的机械强度和绝缘水平;应用线路在线监测系统、可视化装置,实时监测导线温度、弧垂、张力等关键参数,动态评估线路状态,严防线路故障跳闸,建立可观测、可控制、响应快的线路调控网络。

3 输电线路过载能力实例分析

3.1 线路载流量计算数学模型

导线载流量是在一定环境条件下,导线温升时的最大稳态电流。载流量与导线的型号、电阻、最大允许温升、环境气象密切相关。载流量的计算依据为导线的热平衡方程^[9],当导线的发热、吸热、散热达到平衡时,可用下式表示:

$$P_j + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad (1)$$

式中: P_j 为电阻焦耳效应产生的热量; P_{sol} 为导线表面的日照吸热; P_{rad} 为导线的辐射散热; P_{conv} 为导线的对流散热。可用式(2)表示:

$$\begin{cases} P_j = R_T I^2 \\ P_{sol} = \gamma D G_i \\ P_{rad} = S \pi D K_e (T_2^4 - T_1^4) \\ P_{conv} = \lambda N u \pi (T_2 - T_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_T 为导线温度为 T 时导线电阻; I 为导线电流; γ

为日照辐射吸热系数; D 为导线直径; G_1 为日照强度; S 为史蒂夫波兹曼常数; π 为圆周率; K_e 为相对黑体的发射系数; T_2 为导线最终平衡温度; T_1 为环境温度,温度单位均为开尔文(K); λ 为与导线接触的空气膜热导率,通常取值为 $0.025\ 85\ \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$; Nu 为努塞尔特数。

由式(1)可知,电网稳定状态下,导线载流量最大值 $I_{\max}$ 可由式(3)计算:

$$I_{\max} = \left[(P_{\text{rad}} + P_{\text{conv}} - P_{\text{sol}}) / R_T \right]^{1/2} \quad (3)$$

3.2 实例分析

本节选用某地区电网重要输电断面分析多场景下线路的极限载流量,线路采用全架空形式架设,局部网络结构如图1所示。A站为500 kV变电站,B站、C站为220 kV变电站,AB线、BC线、AC线均为220 kV线路。AC线、BC线的导线型号为2*LGJ-240/40,额定载流量为1 100 A,AB线的导线型号为2*JL 3-630/45,额定载流量为3 600 A。本实例设定环境参数如下:风速0.5 m/s,日照辐射强度 $1000\ \text{W/m}^2$,日照吸收系数0.9,相对黑体发射系数0.9。在实际电网运行中,AB线、BC线潮流较重,AC线潮流较轻,BC线的线径小且常存在重过载风险,因此,本实例重点对BC线的过载能力进行分析。图2、图3为该地区夏季、冬季典型日温度曲线。

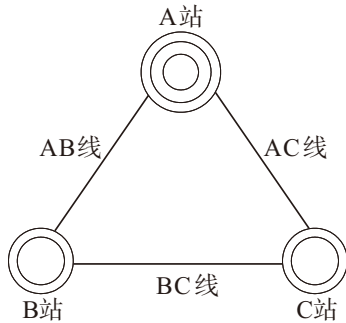


图1 局部网络结构图

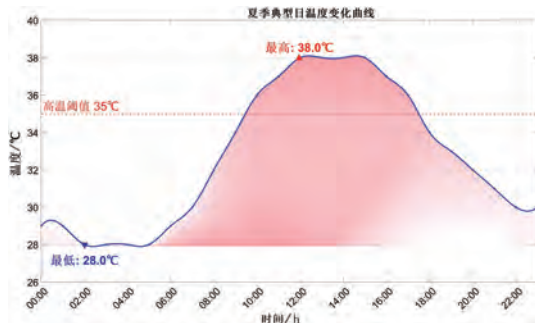


图2 夏季典型日温度变化曲线

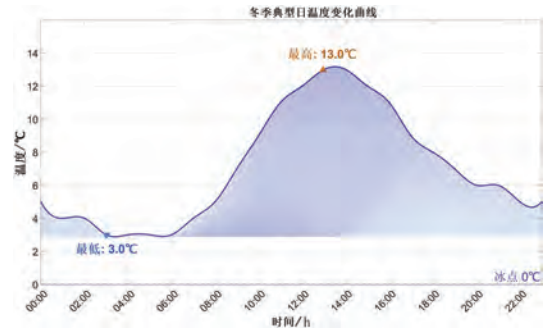


图3 冬季典型日温度变化曲线

对比图4和图5,在线路稳态温度为80℃时,夏季典型日BC线的日最大、最小载流量分别为1 299.4 A、1 127.2 A,在冬季典型日BC线的日最大、最小载流量分别为1 653.2 A、1 521.4 A,同比增大27.22%、34.97%,因此,线路载流量与环境温度成反比,环境温度越低(覆冰除外),线路载流量越大。



图4 夏季BC线路极限载流量日变化曲线

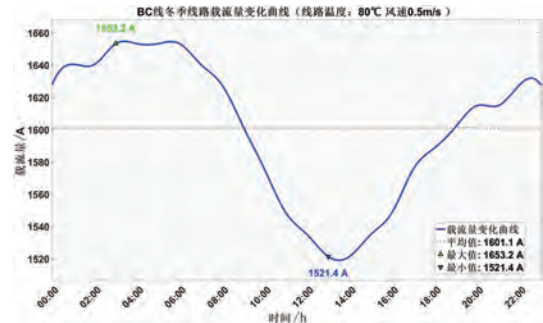


图5 冬季BC线路极限载流量日变化曲线

对表3进行分析,不同稳态温度下BC线载流量情况差异巨大,温度越高,则载流量越大。在夏季,70℃时BC线极限载流量为1 140 A,90℃时BC线极限载流量为1 434.9 A,同比上升25.87%,而冬季BC线载流量同比上升13.5%。BC线载流量受环境因素影响较大,相较于夏季,在线路稳态温度为70℃、80℃、90℃时,冬季BC线的极限载流量分别同比上升35.36%、37.23%、22.07%。

表3 不同线路温度下BC线的载流量情况

线路 稳态温度/℃	夏季		冬季	
	最大值/A	最小值/A	最大值/A	最小值/A
70	1 140.0	931.1	1 543.2	1 395.6
80	1 299.4	1 127.2	1 653.2	1 521.4
90	1 434.9	1 286.4	1 751.6	1 632.2

以BC线为例,夏季线路温度70℃时线路的极限载流量为931.1 A(环境温度38℃),冬季线路温度90℃时线路的极限载流量为1 751.6 A(环境温度3℃),同比增加88.12%。综上所述,当线路稳态温度与环境温度差值越大时,线路的极限载流量越高。

为验证光照强度对线路载流量的影响,设定环境温度为35℃、风速0.5 m/s、线路稳态温度为70℃,光照强度采用该地区夏季典型日光照强度曲线,如图6所示。线路载流量变化量变化情况如图7所示。

结合图6、图7进行分析,当光照强度由0 W/m²上升至1 099 W/m²时,载流量由1 276.6 A下降至1 027.3 A,同比下降24.27%。光照强度逐渐增大时,导线吸热逐渐增强,导致线路达到稳态温度的可通过电流减小。若线路稳态温度进一步上升,则载流量也会随着上升,结合表4分析,在夏季同一个线路稳态温度如70℃下,随着光照强度的增加,载流量由1 140 A下降至931.1 A,同比下降18.3%。因此,光照强度也是影响线路载流量的重要因素。

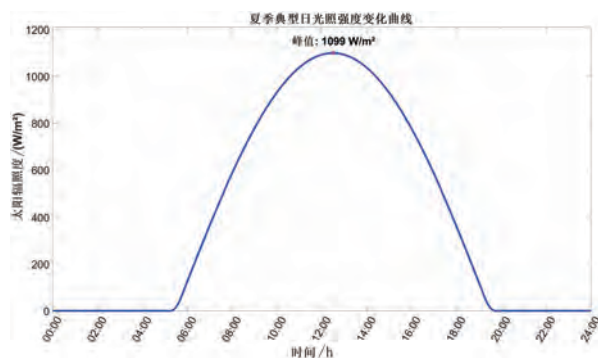


图6 夏季典型日光照强度变化曲线

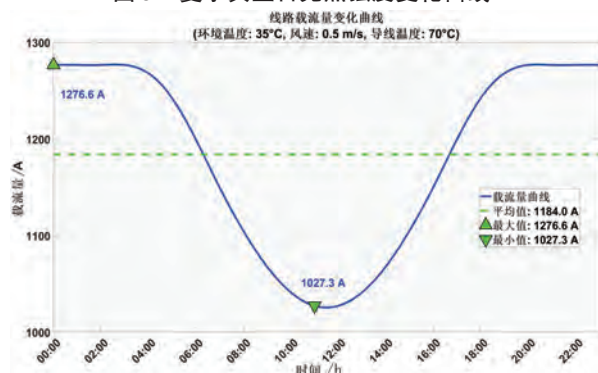


图7 BC线路载流量随光照强度变化曲线

表4 不同光照强度下BC线的载流量情况

线路 稳态温度/℃	夏季	
	最大值/A	最小值/A
70	1 140.0	931.1
80	1 457.0	1 244.4
90	1 621.6	1 433.6

进一步考虑极端情况,设定场景为夏季中午时段,条件如下:气温40℃,线路运行温度由70℃上升至80℃,风速0.5 m/s,辐照度为1 099 W/m²。此时,BC线的极限载流量由852.8 A上升至1 083.5 A,同比增长27.05%。

此外,重点对线路开展耐张杆塔的红外测温、树竹区段的无人机树障巡视、城区及周边杆段的无人机通道巡视,梳理并开展集中消缺及治理,包括但不限于清除临时搭建的鸟巢、更换破损及零低值绝缘子、金具锁紧销补装及螺栓复紧、超高树竹砍伐及易发山火区段通道清理,也是提升线路载流量、改善设备运行状态的有效手段。

综上所述,在不改变线路现有状态情况下,可通过将线路允许运行的稳态温度由70℃提升至80℃,同时强化线路薄弱点特巡特维,合理调整电网运行方式,可提升架空线路载流量20%以上。

4 结语

文中详细阐述了110 kV及以上架空输电线路输送能力的影响因素,并分析了提高现有输电线路输送能力的相关技术;最后,结合热平衡方程,基于某地区电网重要输电断面进行实例计算,分析环境温度、线路稳态温度以及光照强度对输电线路载流量的影响。结论表明,同一条线路的极限载流量在不同的环境和运行状态下最大差距相差88.12%,在极端炎热天气情况下,将线路稳态允许运行温度由70℃提升至80℃,可有效提升线路载流量,可同时满足设备安全与电网稳定性要求。因此,可结合具体的线路运行情况评估线路过载能力,并合理调整运行方式、强化线路特巡特维,为架空输电线路的经济运行提供科学依据。

参考文献:

- [1] 陈强,王建,熊小伏,等.考虑设备动态过载能力的风电送出通道紧急过载运行策略[J].电力系统自动化,2020,44(15):163-171. (下转第56页)

后续将进一步开展装置轻量化、智能化升级,集成接触电阻、温升无线遥测功能,实现接地状态实时监控;同时,持续完善标准化管理体系,推动配网运检全流程的精益化提升。

参考文献:

[1] 宋宝安,林涛.改造接地线夹提高供电可靠性研究[J].科技与企业,2013(21):214.

[2] 孙洁,王增平,王英男,等.含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J].电力系统保护与控制,2014,42(02):56-62.

[3] 王森,李志忠,徐晓晴,等.大型接地装置的性能测试与综合评价[J].陕西电力,2012,40(01):28-32,56.

[4] Holm R.Electric contacts: theory and application[M].Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.

[5] 《配电线路》编委会.配电线路[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

[6] 姜涛,张东辉,李雪,等.含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J].电力自动化设备,2021,41(09):102-109,125.

[7] 赵帅.配网运维检修管理模式创新研究[J].工程施工技术,2023,1(01):28-30.

[8] 张静波,王海涛.以提升精益化管理为目标的配电运维一体化探析与实践[J].企业管理,2016(增刊2):120-121.

[9] 吕斌,唐敏,周升俊.电连接器接触件优化设计研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2006,24(03):54-57.

[10] 姚建国,周大平,沈兵兵,等.新一代配电网自动化及管理系统的设计和实现[J].电力系统自动化,2006,30(08):89-93.

[11] 肖新华,黄明烨,宋志强.基于智能配变终端的低压配电网智能运检体系构建研究[J].供用电,2019,36(06):55-61.

[12] 刘丙江.解读《国家电网公司电力安全工作规程电力线路部分(试行)》[J].农村电工,2006(09):39-41.

(上接第 15 页)

[2] 范京艺.考虑断面短时过载的断面输电能力提高的研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.

[3] 范京艺,毛安家,刘岩,等.基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(01):116-121.

[4] 张锐.架空输电线路动态增容提升能力研究[J].科学技术创新,2025(11):220-223.

[5] 叶鸿声,龚大卫,黄伟中.提高导线允许温度增加线路输送容量的研究及在 500 kV 线路上的应用[J].华东电力,2006

(08):43-46.

[6] 沈鑫怡.基于宏观气象信息的输电线路动态增容技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.

[7] 董政鑫.统一潮流控制器接入的输电线路单端量保护方法[D].天津:天津大学,2022.

[8] 付浩东.基于无人机点云数据的超高压输电线路运检管理研究[D].西安:西安理工大学,2024.

[9] 侯宇,王伟,韦微,等.输电线路动态增容技术研究及应用[J].电力系统自动化,2021,45(17):189-198.