DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0096 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-11

面向新能源接入的架空输电线路动态增容方法综述

吴军[1],季雨晴[2],甘艳[1],吕华林[1],陈佳[1],邹建明[1],王浩[2]

(1. 国家电网有限公司华中分部,湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 具有波动性和随机性的新能源接入电力系统给现有输电网络带来了压力,动态增容方法能在不改变当前网络结构的前提下增强线路输送能力,具有可观的应用前景和经济效益。首先,综述新能源接入后实际输电环境的变化及其对传统动态增容标准计算方法的影响,如大风速、强日照和重覆冰,强调针对性研究的必要性。其次,介绍基于多物理场分析的载流量计算改进方法,如径向温差分析、热力耦合分析和流固耦合分析,给出基于有限元分析的特定场景下动态增容分析方法。最后,考虑实际使用动态增容方法时的工程问题,讨论了动态增容的断面潮流计算方法以及实时监测与决策系统设计方法,为工程实际提供参考并展望未来的发展方向。

关键词: 动态增容;输电线路;在线监测;多物理场分析;新能源

中图分类号: TM 75 **文献标志码:** A

Review of dynamic capacity expansion methods of overhead transmission lines for renewable sources access

WU Jun[1], JI Yuqing[2], GAN Yan[1], LÜ Hualin[1], CHEN Jia[1], ZOU Jianming[1], WANG Hao[2]

(1. Central China Branch, State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Integrating volatile renewable sources into the power system pressures existing transmission networks. Dynamic rating methods can enhance line capacity without altering the network structure, offering significant potential and economic benefits. This paper reviews the impact of renewable sources integration on transmission environments and traditional dynamic rating methods, emphasizing the need for research on high wind speeds, intense solar radiation, and heavy icing. It introduces improved capacity calculation methods based on multiphysics analysis, including radial temperature difference, thermomechanical coupling, and fluid-structure interaction, with scenario analysis using finite element analysis. Engineering considerations for practical application, such as cross-sectional power flow calculations and real-time monitoring and decision systems, are discussed, providing references for engineering practice and future development.

Key words: dynamic line rating; transmission lines; online monitoring; multiphysics analysis; renewable sources

随着我国经济的高速发展,当前有限的电网输送能力难以满足不断攀升的工商业及居民生活用电需求[1],建设或改造输电线路需要投入大量土地、时间、人力和资金[2],提高现有输电线路输送能力是

收稿日期: 2024-12-29

作者简介: 吴军(1977-),男,高级工程师,主要从事输电线路状态检测技术研究,E-mail: wjun8@163.com。

通信作者: 季雨晴(1999-),女,博士研究生,主要从事输电线路非接触测量研究,E-mail: jiyuqing@whu.edu.cn。

基金项目: 国家电网公司华中分部科技项目(编号:52140023000K)。

本文引用格式: 吴军,季雨晴,甘艳,等.面向新能源接入的架空输电线路动态增容方法综述[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-11.

Citation: WU Jun, JI Yuqing, GAN Yan, et al. Review of dynamic capacity expansion methods of overhead transmission lines for renewable sources access[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-11.

较为经济的解决方法[3]。

输电线路的输送能力与电力系统的暂态和静态稳定性、导线暂态和稳态热稳定等因素有关。随着电网建设的不断完善和设备水平的提高,电网的暂态和静态稳定性不断增强,架空输电线路的热稳定极限即最大允许载流量成为制约其输送能力的关键,尤其对短距离输电线路[4]。

国家标准中最大载流量计算环境条件严苛[5],结合实际运行环境,对输电线路过载能力进行分析和评估,制定新的限流标准,对提高输电通道的输送能力具有重要意义。

当前大量新能源接入电网,其具有波动性、不确定性,且输送过程中可能出现强日照、大风速、重覆冰等恶劣环境[6],现有动态增容标准如ICE1597-1995、Morgan公式、IEEE-738 Standard[7-8]等不再适用,迫切需要有针对性的动态增容研究。本文旨在分析和归纳新能源大量接入背景下动态增容技术面临的关键技术问题和新的工作原理。首先阐述线路输送环境的变化和挑战;随后分析基于多物理场耦合计算线路最大实时载流量的方法,总结考虑实时动态增容的断面潮流计算方法;最后讨论基于多点监测协同的实时监测与决策系统设计与实现,并总结未来发展方向。

1 环境因素对载流量的影响

新能源输电区域较普通输电区域环境更为恶劣,用于动态增容实时最大载流量标准计算的传统模型不再适用。考虑到热交换过程的非线性,不同的环境变化对计算的影响是可变的,动态增容计算需要同时考虑所有相关环境参数,而这样的复杂模型无法解析求解,直接简化误差较大。下面针对较为典型的大风速、强日照、重覆冰3种情况,回顾一般计算方法,并对考虑新能源接入情况下动态增容研究所面临的实际环境问题进行分析。

1.1 大风速

风速是输电线路温度与弧垂变化的主要影响因素,对输电线路载流量有很大影响。标准中定义了风速和载流量之间的关系,但实际上它们的关系很复杂,因为风速随时间沿每个跨度的水平和垂直方向变化[9],且受地形和屏蔽物影响较大[10],时间常数较小,跨度仅为几分钟[11]。

我国当前实行的输电线路载流量计算方法由《110~750 kV架空输电线路设计规范》[12]给出,与IEEE以及CIGRE(Conseil International des Grands Réseaux Électriques)方法相似[13],采用了Morgan公式的简化计算模型[14]。该方法在大风速环境下有一定的局限,计算结果较为保守。我国目前很多风力发电的架空输电线路处于大风速地区,即年平均风速超过6.0 m/s,如西北、云贵高原、沿海等[15]。

IEEE和CIGRE模型是当前国际通用的架空线路热性能评估计算标准,它们的主要区别为对流项Q_c,低风速的线路额定值显著不同,通常仅在0.5 m/s内结果较为准确。

根据标准,在稳态情况下,导体温度由热平衡决定,即:

$$R(T_c)I^2+Q_s=Q_r+Q_c \tag{1}$$

式中:$R(T_c)$为导体在温度T_c下单位长度的电阻;I为导体电流;Q_s为太阳辐射热量;Q_r为取决于导体和环境温度的辐射热量;Q_c为对流热量,主要受风速和风向影响。

暂态热平衡方程是类似稳态热平衡方程的一阶微分方程,即:

$$\frac{\mathrm{d}T_c}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{mC_p}\left[R(T_c)I^2+Q_s-Q_r-Q_c\right] \tag{2}$$

式中:m为导体单位长度的质量;C_p为导体的比热容;t为时间。大多数导体的设计风速的时间常数约为15 min,风速大于3 m/s时可以减少到10 min内。

总的来说,国内外现阶段导线载流量计算标准对其所处环境的风速考虑不足,对空气动力特性仅考虑了影响不大的湍流,并假设空气密度均匀、不变[16]。这些简化假设使计算复杂度降低,并无需求解空气动力学方程。在大风速新能源发电场景中,当前标准计算方法无法直接采用[17-18]。

1.2 强日照

根据当前的国内外标准,在输电线路动态增容的实时最大载流量计算中,太阳辐射强度常被设定为固定值,该值在不同国家取值不同。太阳辐射强度因地理位置、季节和时间差异显著不同,简单选取固定值计算结果不准确[19]。

我国很多太阳能发电的架空输电线路处于强日照地区。根据本地校准和卫星检索统计,我国全域太阳辐射强度的均方根误差可达36 W/m^2,高海拔地区更大[20]。文献[21]采用埃-普雷斯科特公式模拟计算太阳辐射,利用线性回归对系数进行拟合。文献[22]针对直接辐射观测的稀疏问题,基于晴空物理模型计算晴空直接辐射,根据日照持续时间数据及云透射率估计常规观测日直接辐射。文献[23]采用机器学习方法,总结我国115个地点的太阳辐射模型。然而,相应的强日照情况下的载流量计算方法却未被涉及。

传统标准计算方法中架空线路的载流量主要由导体温度限制、环境温度和太阳强度等因素决定。太阳辐射是架空线导体温度升高的主要外部热源。载流量可以采用Morgan公式计算:

$$I=\sqrt{\frac{9.92(T_c-T_0)(VD)^{0.485}+q_r-\alpha DJ_s}{kR_{DC}}} \tag{3}$$

$$q_r=\pi D\varepsilon s\left[(T_c+273)^4-(T_0+273)^4\right]$$

式中:I为导线最大允许载流量;q_r为辐射散热;α为导线表面吸热系数;D为导线外径;J_s为日照强度;k为交直流电阻比;R_{DC}为导线直流电阻。

太阳辐射强度E_t另一种确定方法基于IEEE 738-2006标准,即:

$$E_t=A+BH_c+CH_c^2+DH_c^3+EH_c^4+FH_c^5+GH_c^6 \tag{4}$$

式中:H_c为太阳高度角;A、B、C、D、E、F、G为计算系数,在清洁环境和工业环境下取值有差异。

导体横截面越大,太阳辐射强度对导体承载能力极限的影响越大。在考虑特定地理区域信息的情况下建立实时辐射强度计算模型是必要的。

总的来说,当前国内外标准对实际输电线路所处环境中强日照情况考虑不足,尤其对空间差异特性,常假设太阳日照强度为一个常数。这些简化假设在一般日照强度的情况下能够实现较好的计算效果,无需求解热传递方程,但在一些强日照场景中无法直接采用,如太阳能发电。

1.3 重覆冰

传统标准计算方法未考虑极端天气,如极端低温天气引起的输电线路覆冰。导线上的覆冰引起的额外负载取决于冰的类型和附着力,并与传输线类型相关。

我国电网冰灾主要分布在西南、中部和南部地区,覆冰由冻雨导致。文献[24]在动态增容模型中增加覆冰风险评估,并给出了相关环境约束条件。文献[25]在规范中的单摆模型中引入修正系数和等效静力风荷载,提出一种覆冰条件下输电线路动态风偏角的简化计算方法。文献[26]考虑覆冰情况下输电线路的动态响应,并利用悬索自由振动的线性理论计算垂直振荡的幅度。文献[27]根据环境监测结果进行覆冰情况预测,提出预警和测量的双级覆冰监测方法。文献[28]提出一种基于弧垂、温度测量的输电线路等值覆冰厚度数值计算模型,并以连续档下不同塔线连接类型及大高差非均匀覆冰线路为对象,提出标况下状态方程参数计算及覆冰厚度监测方法。

根据环境因素的加热和冷却效应、线路实际负荷的焦耳热效应进行动态线路最大载流量计算,导体温度按下式迭代确定:

$$P_J+P_s-P_c-P_r-P_e\approx 0 \tag{5}$$

式中:P_J、P_s、P_c、P_r、P_e分别为焦耳加热效应、太阳辐射的加热效应、对流冷却效应、辐射冷却效应、蒸发冷却效应功率。

然后,根据时间相关的瞬态温度跟踪,计算出导体的实时温度,给出时间周期内的温度变化。根据下式,通过考虑导体的时间常数可以监测连续变化的环境参数对相线温度的影响:

$$mC_p\mathrm{d}T_{av}/\mathrm{d}t=P_J+P_s-P_c-P_r-P_e \tag{6}$$

式中:T_{av}为导体平均温度。该计算方法考虑了冷却效应,是传统标准IEEE和CIGRE方法的拓展。根据输电线路负荷计算出导线温度,从而确定预期的冰型,进而计算出冰层半径及由其引起的机械附加载荷。覆冰预测模型考虑了环境温度、相对湿度、降水类型和强度、导线的温度,可确定覆冰类型。

覆冰引起的附加载荷对动态增容计算的影响不容忽略。一些模型将覆冰作为特殊情况,将覆冰预测模型和对应约束集成在动态增容系统中,但是缺乏计算通用性,尤其是覆冰的类型多,准确预测并不容易。因此,进一步开发能有效兼容恶劣天气条件的动态增容一般性模型十分必要[29]。

2 基于多物理场分析的载流量计算

传统动态增容计算模型在新能源发电场景中应用精度不足,而多物理场分析方法通过建立电、热、力、流体等多种物理场耦合模型,采用有限元数值分析方法,可提升模型整体计算精度。目前通过多物理场分析导线载流量研究的重点主要集中在导线径向温差分析、导线热力耦合分析以及流固耦合分析3个方面。

2.1 导线径向温差分析

标准模型假设导线为等温体,但实际上由于对流换热的冷却作用,导线表面温度明显低于内部[30]。径向温差计算要考虑焦耳效应和磁效应在导体中产生的热量,要求已知电流沿截面的分布及由电流产生的导体芯线磁通,此外,导体内部、从其外围到外部介质的热传导过程及导线芯线之间空隙的空气热对流过程也必须研究。

文献[31]在室内受控风力条件下和室外真实环境中监测瞬态和稳态架空导体径向温差,明确径向温度对动态增容计算的重要性。文献[32]用等效电路表征导线电气性能,用有限元模型求解导线

的非均匀性热行为,从而获得导线稳态和瞬态热模型。文献[33]在稳态和瞬态下模拟具有径向温度分布的均匀一维导体模型,简化了计算过程。文献[34]基于动态热平衡关系迭代计算导线的表面温度,并由导线内部接触热传递系数推算导线的内部温度。文献[35]建立径向与周向传热的热网络模型,采用非线性迭代和参数辨识,得到导线径向温度计算方法。文献[36]建立输电线温度场电磁耦合有限元绞合模型计算输电线径向温度,实现导线温度的精确计算。文献[37]研究了考虑径向温差的导线径向热膨胀、应力与伸长量的关系。

由式(2)可知,导体内部产生的热功率应与层与层之间以及与外部介质的热传递功率一起计算。但给定层的温度计算高度复杂,因为导体各部分是异质的且计算需要迭代。该过程需要采用有限元法计算,导线截面的有限元模型如图1所示。

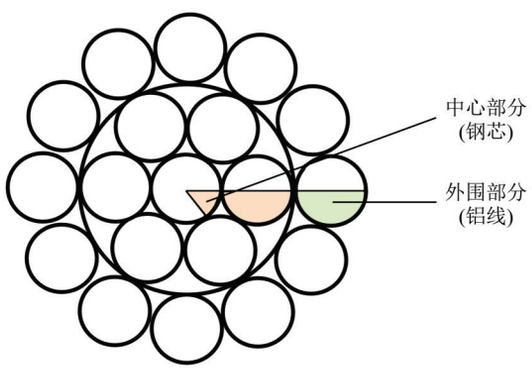


图1 导线截面的有限元模型

Fig.1 Finite element model of conductor section

单元中的能量平衡如图2所示,能量平衡公式如下:

$$\begin{aligned}E_{t+\Delta t}(i,j,k)=&q_{\mathrm{c}}(i,j-1,k)S_{\mathrm{c}}(i,j-1,k)-\\&q_{\mathrm{c}}(i,j,k)S_{\mathrm{c}}(i,j,k)+\\&q_{\mathrm{p}}(i,j,k-1)S_{\mathrm{p}}(i,j,k-1)-\\&q_{\mathrm{p}}(i,j,k)S_{\mathrm{p}}(i,j,k)+E_{\mathrm{int.gen}}+E_{\mathrm{t}}(i,j,k)]\end{aligned}\tag{7}$$

式中:

有限元单元中的热量来自焦耳效应和磁效应。导线内部单元之间的热交换通过热传导进行。内部导线的外围有限元之间的热交换是它们的接触和间隙空气中的热对流的结果。在涉及外部导线计算时,还必须考虑到其与外部环境的热传导、热对流和热辐射。热传递的研究结果可以表示为导线接触之间的传导系数。

2.2 导线热力耦合分析

输电线路导体机械特性和热特性相互耦合,如

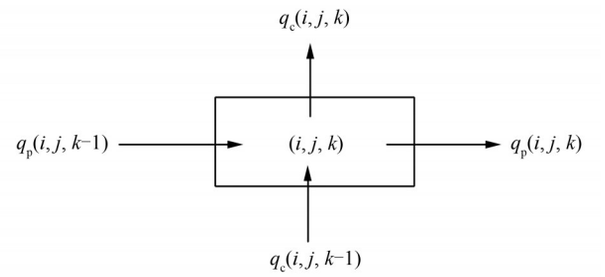


图2 单元中的能量平衡

Fig.2 Energy balance in finite element

机械伸长率和热膨胀率影响弧垂[38]。弧垂监测是架空线路动态增容监测系统的基础。

根据常用的输电线路材料统计[39],输电线路导体不是完全弹性体,其受拉时不仅产生弹性应变,还产生沉降应变,其受热时还产生受热应变。导体的应变取决于自重、拉力、风荷载、冰荷载、温度和受力时间等,总应变为受热应变、弹性应变、沉降应变和蠕变应变的累加[40]。增容不可避免地会引起导线温升,而导线温升又影响导线的机械性能[41]。有限元分析方法是输电线路热力耦合分析过程中经常使用的数值方法,如图3所示。

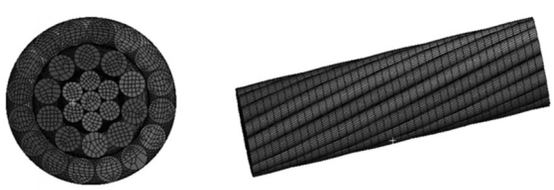


图3 有限元分析方法模型

Fig.3 Finite element analysis method model

在进行输电线路热力耦合分析时,首先要建立导体温度应力配位方程。假设同层绞线受力状态相同,轴线在同一圆柱面上,则导体绞线的轴向应力σ_{m}如下:

$$\sigma_{\mathrm{m}}=E_n\left(\delta\cos^3\beta_n-\alpha_n\Delta T_n\cos\beta_n\right)\tag{8}$$

式中:E_n、ΔT_n、α_n、β_n分别为第n股绞线的弹性模量、温度变化、温度膨胀系数、扭转角度;δ为导线轴向伸长率。

该层的轴向张力F_n计算如下:

$$F_n=\sigma_{\mathrm{m}}A_n\tag{9}$$

式中:A_n为股线的横截面积。

假设导体在被拉后没有发生塑性变形,忽略泊松比和摩擦力,则绞线的轴向应力之和F计算如下:

$$F=\sum_{n=1}^{4}250\pi\left(\delta\cos^3\beta_n-\alpha_n\Delta T_n\cos\beta_n\right)E_nd_n^2\tag{10}$$

式中:d_n为第n股绞线的直径。

文献[42]研究了动态增容实施时钢芯铝绞线中材料瞬态热膨胀特性差异,发现导体的机械应力可能导致材料老化和机械损坏更快。文献[43]对钢芯铝绞线进行径向温差条件下热应力分析,结果表明线路应力分布差异明显,钢芯的应力大于铝绞线,其与铝绞线的应力接触明显增加。文献[44]采用有限元方法对三相输电线路段的正常和意外张力位置进行综合力学分析,使用正常电流和意外电流下的不同传输线模型来确定产生高应力的线段。文献[45]提出一种基于IEEE 738标准的配有模糊动态热评估系统的输电线路模糊热老化模型。文献[46]研究了动态增容条件下基于弧垂监测的导体永久热老化模型。

2.3 流固耦合分析

在动态增容计算中,考虑地形因素和局部天气条件可以更准确地估计导线状态,尤其针对存在微气象带和极端天气的区域。流固耦合模拟结果与较为稀疏的气象观测站数据结合,能够提升导体处气象环境评估的准确性,且流固耦合模拟方法成本明显低于大量使用气象传感器。

输电线路导体流固耦合计算用于动态增容载流量计算过程中,首先应用标准k-ε方法建立风场解的偏微分方程,即:

$$\rho U_i\frac{\partial U_j}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{11}$$

式中:U_i为速度向量。湍流动能k、湍流耗散率ε、湍流生产项P_k满足下式:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(U_ik)}{\partial x_i}=\dfrac{\partial}{\partial x_i}\left(\dfrac{\mu_t\partial k}{\sigma_k\partial x_i}\right)+P_k-\varepsilon\\ \dfrac{\partial(U_i\varepsilon)}{\partial x_i}=\dfrac{\partial}{\partial x_i}\left(\dfrac{\mu_t\partial\varepsilon}{\sigma_\varepsilon\partial x_i}\right)+\varepsilon_1\dfrac{\varepsilon}{k}P_k-\varepsilon_2\dfrac{\varepsilon^2}{k}P_k\\ \mu_t=C_\mu k^2/\varepsilon\\ P_k=\mu_t\left(\dfrac{\partial U_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\dfrac{\partial U_i}{\partial x_j}\end{cases} \tag{12}$$

式中:C_μ、ε_1、ε_2、σ_k、σ_ε为k-ε模型的固定常数。由此即可建立风场空气动力学模型。

近年来,已有不少学者将流固耦合分析应用于输电线路动态增容。文献[47]通过使用图形处理单元集群对试验台区域中等复杂地形上的风进行涡流模拟,发现风速以及风向是决定导体温度的关键因素。文献[48]建立耦合模型计算冰覆盖的导体温度,考虑流体动力学、热传递和焦耳热,发现导线温度是不同风速值的函数。文献[49]基于流固耦合方法,分析风积耦合数值法的带电输电线路的振动增强传热特性,考虑了风沙振动引起的传热增强效应,发现风沙振动能有效提高导体散热效果。文献[50]使用空气动力学方法,根据地形对当地风况进行插值,直接计算出整条输电线路的实时最大载流,有效增大监测密度。文献[51]基于球形导体热对流的理论计算公式,提出一种输电线路等效换热稳态模型,并通过风洞实验平台验证。

3 考虑动态增容的断面潮流计算方法

动态增容方法允许在热稳态中利用额外的输电能力,但增加的容量取决于气象条件。由于调度计划在操作前制定,根据气象预报预测的载流量可能与实际值有很大差异,确定实际线路额定值的方法为概率建模。实际线路额定值δ为随机变量,可以用多元正态分布来描述,即$\delta\sim N(\boldsymbol{\mu},\Sigma)$,$\boldsymbol{\mu}$为具有预期线额定值的向量,$\Sigma$为相应的协方差。另外有:

$$\forall\delta\in W:\left|P_L+f(\Delta,\delta)\right|\leqslant\delta,\quad \Delta\in R \tag{13}$$

式中:P_L为预定的有功潮流;$f(\Delta,\delta)$为描述由适当的补救措施引起的潮流变化的函数;Δ、R为集合,R包含采取一切可行的补偿措施;W为不确定性集中的任何值。该方法的目标是求解一个鲁棒优化问题使得集合R足够大,即为每一次不确定性提供适当的补偿措施。

输电能力的预测误差可能引起的线路过载问题可以通过一定的校准措施消除,该问题可与最优潮流计算问题结合并优化,以便在调度时为给定的热线路额定值预测提供足够的灵活性。大量研究针对如何将动态增容集成到调度优化中的鲁棒优化问题给出了方案。文献[52]通过对3节点简单电力系统进行分析,提出综合考虑热稳定约束与潮流变化的计算方法。文献[53]依据线路短时、长期运行载流量确定设备组初始有功潮流的约束条件。文献[54]建立了可再生能源占比高的基准电力系统模型。文献[55]采用补偿控制措施,基于实际线路额定值集中计算,或依赖于仿射策略,将当前线路额定值与补偿措施直接相关,以分散的方式部署。文献[56]采用支路开断分布因子计算潮流动态转移比,实时分析稳控装置动作对潮流的影响并修正限值。文献[57]结合代表档距法将架空线路沿线各耐张段应力的计算融入到电热耦合潮流计算。文献[58]给出了动态增容加入后在N-1条件下的风力发电调度策略。文献[59]分析了架空输电

导线的电热耦合理论,建立了潮流计算的通用等效电路模型,增加了关于输电导线温度的微分方程,根据导线温度修正导线电阻。

以文献[55]为例,描述考虑动态增容不确定性后的经济预测调度问题优化计算如下所示:

$$c_{\mathrm{DLR}}^{*}=\min_{P_{\mathrm{gen}},\underline{\Delta},\bar{\Delta},\Delta_i^{-},\Delta_i^{+}} c_{\mathrm{disp}}+c_{\mathrm{proc}}+\alpha c_{\mathrm{wc}} \tag{14}$$

$$\text{s.t. } c_{\mathrm{disp}}\geqslant P_{\mathrm{gen}}^{\mathrm{T}}Q_{\mathrm{gen}}P_{\mathrm{gen}}+c_{\mathrm{gen}}^{\mathrm{T}}P_{\mathrm{gen}}$$

$$c_{\mathrm{wc}}\geqslant c_{\mathrm{op}}^{+}\Delta_i^{+}-c_{\mathrm{op}}^{-}\Delta_i^{-},\ c_{\mathrm{proc}}\geqslant c^{+}\bar{\Delta}-c^{-}\underline{\Delta}$$

$$0\leqslant\Delta_i^{+}\leqslant\bar{\Delta}\leqslant\bar{\Delta}^{\max},\ \sum\Delta_i^{+}+\Delta_i^{-}=0$$

$$\left|H_{\mathrm{DLR}}\left(P_{\mathrm{gen}}-P_{\mathrm{load}}+\Delta_i^{+}+\Delta_i^{-}\right)\right|\leqslant\delta_i$$

$$\left|H_{\mathrm{NLR}}\left(P_{\mathrm{gen}}-P_{\mathrm{load}}+\Delta_i^{+}+\Delta_i^{-}\right)\right|\leqslant\bar{P}_{\mathrm{L,NLR}}$$

$$\sum_j\left(P_{\mathrm{gen},j}-P_{\mathrm{load},j}\right)=0,\ \underline{P}_{\mathrm{gen}}\leqslant P_{\mathrm{gen}}\leqslant\bar{P}_{\mathrm{gen}}$$

式中:α为加权调优参数;P_{gen}为发电机功率;Q_{gen}为二次成本;c_{gen}为线性成本向量;Δ^{+}和Δ^{-}代表补偿措施;H_{DLR}和H_{NLR}为矩阵,分别对应有和没有动态增容线路上净总线注入的影响。约束1是动态增容预测误差补偿措施,约束2保证在所有情况下都为零净注入,约束3确定具有动态线路额定值的线路上的有功潮流必须小于实际线路额定值,并且在采取补偿措施后满足所有剩余线路的线路限制。该优化最大限度地降低了调度和运行成本。

以上给出了考虑实时动态增容的断面潮流计算的一般思路,但许多问题仍需解决,如降低求解对应导体动态行为的函数的补偿措施的时间复杂度;将动态增容与可控设备结合使用;扩展策略以纳入其他不确定性来源,如间歇性新能源的预测不确定性;模拟在实际电网使用历史气象数据等。

4 实时监测与决策系统设计与实现

根据实时环境进行的动态增容计算结果需要通过装置实现,并配合电力系统运行状态决策以给出合适的调整建议。当前针对电力系统运行实际进行的实时化、标准化动态增容装置的研究较为零散,缺乏系统性,相关研究主要集中实时动态增容监测系统及动态增容决策系统2个方面。

4.1 实时动态增容监测系统

动态增容监测系统由数据采集端、信息传输端和数据处理端组成。

在早期,有学者提出利用Power Donut/sup TM来测量线路上多个位置的导体温度和载流量,通过动态热平衡实时确定导体上的最大载流量,并用于计算每分钟的长短期预警,整个线路由最低的计算值确定,并作为模拟信号发送至数据采集与监视控制系统[60],如图4所示。文献[61]设计的架空输电线路动态增容监测分析系统主要由温度监测、气象监测和计算分析3部分组成,实现温度预警、辅助分析、边界计算、设备管理和数据管理功能。文献[62]采用无线通信网络将监测到的数据传送回监测中心,由监测中心计算实时最大载流量,并传送给数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition,SCADA)系统,供电力调度员决策。文献[63]中的动态增容监测系统如图5所示,由杆塔上的数据采集端和监控管理平台组成,数据采集终端采集线路轴向张力和气象参数等并计算线路的温度、弧垂及实时最大载流量。



(a) Power Donut/sup TM装备　　(b) 数据采集终端

图4 动态增容监测装置

Fig.4 Dynamic capacity-increasing monitoring device

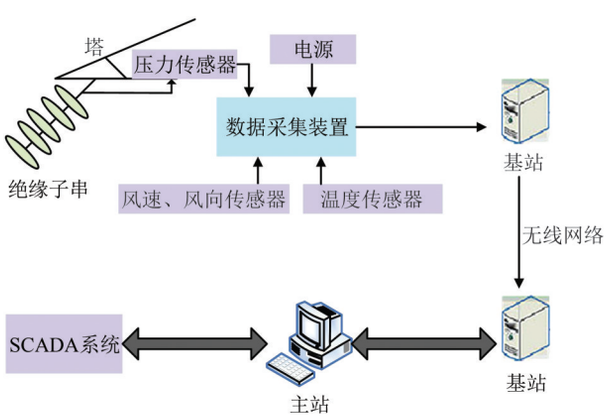


图5 动态增容监测系统

Fig.5 Dynamic capacity-increasing monitoring system

近几年,监测系统引入了通信新技术,并向集成设备发展。文献[64]提出的动态增容监测系统由安装在线路上的子站、杆塔上的主站和上位机组成,子站采集的数据采用短距离无线射频技术发送至主站。文献[65]研究了线路行波传输时间的差值、线路长度和弧垂之间的关系,提出一种新的基于微型气象站和行波采集装置动态增容系统。文献[66]提出一种基于数据的新型相量测量单元线路温度监测方法,采用电阻参数的跟踪估计取代额外的温度测量。文献[67]提出一种配电设备动态增容提升分布式光伏集成输送容量的方法。

4.2 动态增容决策系统

动态增容决策系统的设计是一个优化问题,要保证增容的可靠性和设备的安全性。在安全的约束条件下,基于前端监测数据由调度部门给出增容的相关指令,这就要求有稳定完备的策略设计。

文献[68]考虑到当前监测数据庞杂、装置可靠性不高、交互性能较差等问题,设计一种新的动态增容决策系统,以实现过载预警和方案校核。文献[69]通过测量超声波传输距离计算最大弧垂,结合行波传输时差实时更新各点的弧垂值,判断是否满足线路安全距离要求,判断温度是否超出安全限值,超出则预警,同时计算上传相关数据。文献[70]考虑系统安全稳定运行约束,尤其是关键输电设备的动态增容计算结果,给出决策方法,形成辅助调度决策系统,该系统在运维系统中得到了检验。文献[71]提出一种基于窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)的电力线路弧垂远程在线监测系统,实现了输电线路弧垂的测量、计算及信息传输。

近年来,决策系统的设计朝着智能化、实时性和设备友好型方向发展。文献[72]提出一种基于多阶段随机建模的动态增容决策方法,在算力充足的情况下,求解时间可以缩短至10 min级别。文献[73]考虑到动态增容可能带来的导体老化问题,设计一种新的决策方法,使得每条母线的平均老化程度最小,采用双目标非排序遗传算法和模糊决策方法,实现了线路老化与可靠性之间的权衡。文献[74]提出一种基于智能电网概念的动态增容决策系统,将数据上传至主站并由包含相关电力系统信息的专家系统帮助决策,实现线路增容计算的智能决策。

5 结论

随着新能源大量接入电网,动态增容方法成为合适的不改造现有线路结构的经济型增容方法。针对特定的发电场景和传输场景改进传统动态增容标准计算方法十分必要,如在大风速情况下考虑区域的详细空气动力学特性、在强日照情况下考虑采用特定地理信息建立辐射强度模型、在重覆冰情况下考虑复杂的结冰类型。通过建立电-热-力-流体等多种物理场耦合模型、考虑导线径向温差的电热耦合模型,进行导线的热力耦合分析以及流固耦合分析,用有限元数值分析方法建立高保真仿真模型提升整体计算准确度。面向工程实际时,采用动态增容的断面潮流计算方法、实时动态增容监测系统以及动态增容决策系统建立系统友好型的动态增容方法。

未来还需进一步利用数字孪生、人工智能、大数据分析等数字化手段提高数值分析的准确性和仿真建模的完整性;充分利用现代数字通信手段和优化决策方法改进设备的数据采集利用和系统反馈环节,提升装置和结果的可靠性;扩大评估的物理范围和时间范围,逐步与电力系统实时运行接轨,降低调度风险,提高增容效率,为实现“双碳”目标提供助力。

参考文献:

[1] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 48-51.
ZHANG Qiping, QIAN Zhiyin. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 48-51.

[2] 胡毅, 刘庭. 输电线路建设和运行中的制约与技术创新[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2262-2269.
HU Yi, LIU Ting. Restriction and technological innovation in construction and operation of power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2262-2269.

[3] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 9-16.
LIAO Huaiqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy resources and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.

[4] 秦嘉南. 基于动态增容的输电线路高效运行关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
QIN Jianan. Reasearch on the key technologies of high-efficiency operation of transmisson lines based on dynamic line rating[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[5] 戴沅. 高压架空输电线路动态增容技术[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
DAI Yuan. Dynamic Capacity Expansion Technology for High Voltage Overhead Transmission Lines[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

[6] 侯宇, 王伟, 韦徵, 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.
HOU Yu, WANG Wei, WEI Zheng, et al. Research and application of dynamic rating technology of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 189-198.

[7] MICHIORRI A, NGUYEN H M, ALESSANDRINI

S, et al. Forecasting for dynamic line rating[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1713-1730.

[8] ABBOTT S, ABDELKADER S, BRYANS L, et al. Experimental validation and comparison of IEEE and CIGRE dynamic line models[C]//45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010. August 31-September 3, 2010, Cardiff, UK. New York: IEEE Press, 2010: 1-5.

[9] JITTRATORN A N, HUANG B C, YANG C H. Very short-term wind power forecasting using a hybrid LSTM-Markov model based on corrected wind speed [J]. Renewable Energy and Power Quality Journal, 2023, 21(4): 433 - 438.

[10] QIAO D L, WU S, LI G, et al. Wind speed forecasting using multi-site collaborative deep learning for complex terrain application in valleys[J]. Renewable Energy, 2022, 189(C): 231-244.

[11] 康丽莉, 陈科技, 韩颂雨, 等. 两次强对流天气对500 kV输电线路的影响[J]. 浙江电力, 2023, 42(3): 79-87.
KANG Lili, CHEN Keji, HAN Songyu, et al. Influence of two strong convective weather cases on a 500 kV transmission line[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(3): 79-87.

[12] 李敏生, 王振华. 中国输电线路规范的风荷载计算比较[J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 89-93.
LI Minsheng, WANG Zhenhua. Comparison of wind load calculation for China transmission codes[J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(3): 89-93.

[13] A DOUGLASS D, GENTLE J, NGUYEN H M, et al. A review of dynamic thermal line rating methods with forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2100-2109.

[14] MORGAN V T. The thermal rating of overhead-line conductors Part I: the steady-state thermal model[J]. Electric Power Systems Research, 1982, 5(2): 119-139.

[15] 徐阳. 大风速环境架空输电线最大允许载流量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
XU Yang. Study on maximum allowable carrying capacity of overhead transmission lines under high wind speed[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[16] ABBOUD A W, GENTLE J P, MCJUNKIN T R, et al. Using computational fluid dynamics of wind simulations coupled with weather data to calculate dynamic line ratings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 745-753.

[17] DING Z H, YU K Y, WANG C, et al. Transmission line overload risk assessment considering dynamic line rating mechanism in a high-wind-penetrated power system: a data-driven approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1112-1122.

[18] FAWZY S, ABD-RABOH E E, ELADL A A. Interactive demand response and dynamic thermal line rating for minimizing the wind power spillage and carbon emissions[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 232: 110399.

[19] BEŇA Ľ, GÁLL V, KANÁLIK M, et al. Calculation of the overhead transmission line conductor temperature in real operating conditions[J]. Electrical Engineering, 2021, 103(2): 769-780.

[20] WANG C L, YUE T X, FAN Z M. Solar radiation climatology calculation in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2): 132-138.

[21] RONALD D M. Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications[M]. CRC Press: 2017.

[22] TANG W J, YANG K, QIN J, et al. First effort for constructing a direct solar radiation data set in China for solar energy applications[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(3): 1724-1734.

[23] GOUDA S G, HUSSEIN Z, LUO S, et al. Review of empirical solar radiation models for estimating global solar radiation of various climate zones of China[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2020, 44(2): 168-188.

[24] BABŚ A, SAMOTYJAK T. Dynamic rating of 110 kV overhead lines[J]. Acta Energetica, 2016, 28(3): 4-9.

[25] 卞荣, 徐雄, 王一枫, 等. 覆冰导线动态风偏简化计算方法及影响因素分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(7): 35-41.
BIAN Rong, XU Xiong, WANG Yifeng, et al. Simplified calculation method for dynamic wind-induced deflection of iced conductors and influencing factor analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(7): 35-41.

[26] ROSSI A, JUBAYER C, KOSS H, et al. Combined effects of wind and atmospheric icing on overhead transmission lines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104271.

[27] SZABÓ D, NÉMETH B, GÖCSEI G, et al. Icing analysis of Kleče-Logatec transmission line with two-level icing model[C]//Flexitranstore. Cham: Springer International Publishing, 2020: 107-115.

[28] 胡建林, 刘杰, 蒋兴良, 等. 基于弧垂测量的综合荷载下导线等值覆冰厚度监测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 584-593.
HU Jianlin, LIU Jie, JIANG Xingliang, et al.

Monitoring method for equivalent icing thickness of conductor under complex load based on sag measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 584-593.

[29] 李明明. 恶劣天气下输电线路弧垂计算改进及风险预警方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
LI Mingming. Research on sag calculation improvement and risk warning method of transmission line in severe weather[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

[30] 彭向阳, 彭瑞东, 王锐, 等. 架空输电线路动态增容等效散热暂态测量模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3975-3986.
PENG Xiangyang, PENG Ruidong, WANG Rui, et al. Equivalent heat transfer transient measurement model for dynamic capacity increase of overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3975-3986.

[31] FOSS S D, LIN S H, CARBERRY R. Significance of the conductor radial temperature gradient within a dynamic line rating methodology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(2): 502-511.

[32] MINAMBRES J F, BARANDIARAN J J, ALVAREZ-ISASI R, et al. Radial temperature distribution in ACSR conductors applying finite elements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 472-480.

[33] KANG M, STROBACH M, FRANCK C. Radial temperature distribution of AAAC overhead line in stationary and transient conditions[C]//ISH-18th International Symposium on High Voltage Engineering, Republic of Korea, ISH, 2013: 1970-1975.

[34] 高琦. 架空导线温度场的数值模拟与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
GAO Qi. Numerical simulation and analysis of temperature field of overhead conductor[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[35] 胡剑, 熊小伏, 王建. 基于热网络模型的架空输电线路径向和周向温度计算方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 139-152.
HU Jian, XIONG Xiaofu, WANG Jian. Radial and circumferential temperature calculation method of overhead transmission lines based on thermal network model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 139-152.

[36] 李军辉, 贾思棋, 杜冬梅, 等. 考虑径向温差的架空输电导线的动态增容分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 57-66.
LI Junhui, JIA Siqi, DU Dongmei, et al. Dynamic capacity analysis of overhead transmission lines considering temperature field[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(4): 57-66.

[37] 赵隆, 王如水, 代鹏飞, 等. 基于导线径向温度和蠕变的导线弧垂计算方法[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(4): 21-29.
ZHAO Long, WANG Rushui, DAI Pengfei, et al. Calculation method of conductor sag based on radial temperature and creep[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(4): 21-29.

[38] MICHAEL M, STEPHAN P, STEFAN J. Elongation of overhead line conductors under combined mechanical and thermal Stress[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. April 21-24, 2008, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2008: 671-674.

[39] MOHD ZAINUDDIN N, ABD RAHMAN M S, AB KADIR M Z A, et al. Review of thermal stress and condition monitoring technologies for overhead transmission lines: issues and challenges[J]. IEEE Access, 2020, 8: 120053-120081.

[40] LI J H, JIA S Q, WU P, et al. Calculation and analysis of ampacity and stress of overhead transmission line [J]. AIP Advances, 2022, 12(10): 105209.

[41] HATHOUT I, CALLERY K, TRAC J, et al. Impact of thermal stresses on the end of life of overhead transmission conductors[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). August 5-10, 2018, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.

[42] MOROZOVSKA K, NAIM W, VIAFORA N, et al. A framework for application of dynamic line rating to aluminum conductor steel reinforced cables based on mechanical strength and durability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105491.

[43] NAIM W, MOROZOVSKA K, HILBER P. Effects of dynamic line rating on the durability and mechanical strength of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductors[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 3164-3169.

[44] AHMAD A, JIN Y, ZHU C G, et al. Investigating tension in overhead high voltage power transmission line using finite element method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114: 105418.

[45] YAQOOB Y, MARZUKI A, LAI C M, et al. Fuzzy dynamic thermal rating system-based thermal aging model for transmission lines[J]. Energies, 2022, 15(12): 4395.

[46] KALMÁR D, SZABÓ D, GÖCSEI G, et al.

Extension of dynamic line rating models with the effect of conductor aging[C]//2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE). July 6-9, 2022, Hungary. New York: IEEE Press, 2022: 1-5.

[47] Phillips T B. Dynamic rating of transmission lines for improved wind energy integration in complex terrain [C]//4th ASME Joint US-European Fluids Engineering Diviison Summer Meeting, Chicago, ASME, 2014: 5-9.

[48] GHASSEMI M, FARZANEH M. Coupled computational fluid dynamics and heat transfer modeling of the effects of wind speed and direction on temperature increase of an ice-covered FRP live-line tool[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2268-2275.

[49] ZHANG M, XU J K, ZHAO G F, et al. Enhanced heat transfer characteristics and ampacity analysis of a high-voltage overhead transmission line under aeolian vibration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(12): 2918-2925.

[50] ABBOUD A W, FENTON K R, LEHMER J P, et al. Coupling computational fluid dynamics with the high resolution rapid refresh model for forecasting dynamic line ratings[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 170: 326-337.

[51] 骆书剑, 王锐, 黄振, 等. 架空线路动态增容等效换热稳态模型的误差分析及改进[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(11): 72-80.
LUO Shujian, WANG Rui, HUANG Zhen, et al. Error analysis and improvement method of equivalent heat transfer steady-state model for dynamic thermal rating of overhead conductors[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(11): 72-80.

[52] 马晓明, 范春菊, 胡天强, 等. 基于热稳定约束的架空导线增容计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 86-91.
MA Xiaoming, FAN Chunju, HU Tianqiang, et al. Calculation of current carrying capacity of overhead transmission line based on thermal stability constraint [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40 (14): 86-91.

[53] 陈祎, 郭瑞鹏, 叶琳, 等. 电网断面热稳定限额计算模型及方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 20-24.
CHEN Yi, GUO Ruipeng, YE Lin, et al. Calculation model and method for thermal stability control limit to transmission interfaces in a power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 20-24.

[54] XU B L, ULBIG A, ANDERSSON G. Impacts of dynamic line rating on power dispatch performance and grid integration of renewable energy sources[C]//IEEE PES ISGT Europe 2013. October 6-9, 2013, Lyngby, Denmark. New York: IEEE Press, 2014: 1-5.

[55] BUCHER M A, ANDERSSON G. Robust corrective control measures in power systems with dynamic line rating[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2034-2043.

[56] 朱斌, 邱丽君, 王勇, 等. 电网输电断面动态热稳定限值在线计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (3): 94-99.
ZHU Bin, QIU Lijun, WANG Yong, et al. Online calculation method for dynamic thermal stability limit of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 94-99.

[57] 王孟夏, 韩学山, 韦志清, 等. 电网运行环境下基于电热耦合潮流的架空线路应力预估[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1078-1087.
WANG Mengxia, HAN Xueshan, WEI Zhiqing, et al. Tension prediction of overhead transmission line based on electrothermal coupling power flow in operating power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1078-1087.

[58] ERDINÇ F G, ERDINÇ O, YUMURTACı R, et al. A comprehensive overview of dynamic line rating combined with other flexibility options from an operational point of view[J]. Energies, 2020, 13(24): 6563.

[59] 孙立军. 基于电热耦合理论的牵引网潮流计算及动态增容研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
SUN Lijun. Study on power flow calculation and dynamic thermal rating of traction network based on electric-thermal coupling theory[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.

[60] ENGELHARDT J S, BASU S P. Design, installation, and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system[C]//Proceedings of 1996 Transmission and Distribution Conference and Exposition. September 15-20, 1996, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 366-370.

[61] 龚坚刚. 架空输电线路动态增容研究[J]. 华东电力, 2005, 33(7): 27-29.
GONG Jiangang. Dynamic capacity-increase of overhead transmission lines[J]. East China Electric Power, 2005, 33(7): 27-29.

[62] 邹鹰, 金红核. 输电线路动态增容监测系统的构成[J]. 华东电力, 2008, 36(12): 33-35.
ZOU Ying, JIN Honghe. Study on dynamic rating monitoring systems for transmission lines[J]. East China

Electric Power, 2008, 36(12): 33-35.

[63] HE Z M, LIU Y D. The field application analysis of dynamic line rating system based on tension monitoring [C]//2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. September 8-9, 2011, Wuhan. New York: IEEE Press, 2012: 284-288.

[64] 郭昊坤, 衡思坤, 应展烽, 等. 输电线路动态增容在线监测装置研究[J]. 电力学报, 2012, 27(5): 459-462.
GUO Haokun, HENG Sikun, YING Zhanfeng, et al. Dynamic capacity-increase online monitoring device of transmission lines[J]. Journal of Electric Power, 2012, 27(5): 459-462.

[65] 戴沅, 钟卓颖, 邓小康, 等. 基于弧垂实时测量的电力线路动态增容方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(21): 68-73.
DAI Yuan, ZHONG Zhuoying, DENG Xiaokang, et al. Dynamic capacity increase of power line method based on real-time sag measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(21): 68-73.

[66] SINGH R S, COBBEN S, ĆUK V. PMU-based cable temperature monitoring and thermal assessment for dynamic line rating[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1859-1868.

[67] LI Y X, WANG Y, KANG C Q, et al. Improving distributed PV integration with dynamic thermal rating of power distribution equipment[J]. iScience, 2022, 25(8): 104808.

[68] 花欢欢. 输电线路动态增容决策支持技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
HUA Huanhuan. Research on an online decision support system of overhead transmission line dynamic rating[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.

[69] 曾祥君, 阳韬, 钟卓颖, 等. 基于弧垂实时测量的输电线路动态增容决策系统设计[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(2): 9-15.
ZENG Xiangjun, YANG Tao, ZHONG Zhuoying, et al. Design of dynamic power capacity increasing decision system based on the real-time measurement of transmission line sag[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(2): 9-15.

[70] 钱海, 王奇, 陈翔宇, 等. 考虑电网多元风险的输电断面动态增容调度分配方案[J]. 中国电力, 2015, 48(10): 60-64.
QIAN Hai, WANG Qi, CHEN Xiangyu, et al. Distribution scheme for dynamic capacity-increase of the transmission section with considering the multi-risk of power grid[J]. Electric Power, 2015, 48(10): 60-64.

[71] 朱广城. 架空电力线路弧垂远程在线监测终端研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
ZHU Guangcheng. Study and design of the remote online monitoring terminal for the sag of overhead power line[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.

[72] GIANNELOS S, KONSTANTELOS I, STRBAC G. Option value of dynamic line rating and storage[C]//2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). June 3-7, 2018, Limassol, Cyprus. New York: IEEE Press, 2018: 1-6.

[73] KHOO W C, TEH J, LAI C M. Demand response and dynamic line ratings for optimum power network reliability and ageing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 175319-175328.

[74] 张怡, 张锋, 李有春, 等. 基于智慧输电线路的动态增容辅助决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 160-168.
ZHANG Yi, ZHANG Feng, LI Youchun, et al. Assistant decision system to improve transmission capacity based on a smart transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 160-168.