

# 基于沙尘效应改进模型的新能源送端热稳定传输能力提升方法

李宏强<sup>1</sup>, 魏亚威<sup>2</sup>, 马晶<sup>2</sup>, 周雷<sup>1</sup>, 张汉花<sup>1</sup>, 鲁广明<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 710049;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 不确定性出力特性下规模化新能源并网, 电力系统本地消纳面临挑战。对于新能源送端电网, 采用长距离输送的方案, 才能尽可能满足新能源消纳要求。在不突破热稳定硬约束条件下, 动态提升输电线路传输能力, 已成为送端电网提升新能源消纳能力的关键手段。但受热稳定计算模型参数考虑不足影响, 现有输电线路传输能力提升方法在送端电网实际应用中存在评估偏差较大、适用性较窄的问题, 提升方案通常要针对特定线路进行定制化修改。针对以上问题, 首先针对送端电网地理环境的沙尘影响, 分析了沙尘电晕加热对输电线路热稳定传输能力的影响, 提出了基于沙尘效应的线路热稳定改进模型; 进一步, 考虑沙尘效应受天气影响存在不确定性, 提出了基于模糊分析的沙尘加热功率控制参数计算方法; 最后, 结合气象预报信息, 构建了针对新能源送端电网的线路热稳传输容量提升方案, 可同时对送端电网区域内多条线路同时开展热稳定传输容量提升分析。通过宁夏电网实际工程案例, 结合中国电科院电力气象预报数据, 验证了沙尘效应改进模型和多线路热稳定传输容量提升方案的有效性和适用性。

**关键词:** 新能源送端电力系统; 热稳定传输能力; 沙尘效应; 热平衡方程; 提升方案

**中图分类号:** TM744 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25467

## Improvement Method for the Renewable Energy Sending-end Power System Thermal Stability Transfer Capacity Based on the Modified Dust Effect Model

LI Hongqiang<sup>1</sup>, WEI Yawei<sup>2</sup>, MA Jing<sup>2</sup>, ZHOU Lei<sup>1</sup>, ZHANG Hanhua<sup>1</sup>, LU Guangming<sup>2</sup>

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 710049, Ningxia, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Under the large-scale renewable energy integrated with uncertain output characteristics, balancing the supply and demand within a local area becomes a new challenge. The long-distance transmission and consumption scheme is utilized for the sending-end grid to meet the requirements of renewable energy consumption. Within the constraints of thermal stability, dynamically improving the transmission lines' rating capacity has become a critical method for the sending-end power grid. However, due to the insufficient thermal stability calculation model, the existing improvement methods have the problems of significant evaluation deviation and narrow applicability in the practical application of the sending-end power system the improvement scheme usually needs to be customized and modified for specific line. In order to solve above issues, firstly, the influence of dust corona heating on the thermal stability transfer capacity at the sending end was analyzed, and an improved model of line thermal rating based on the dust effect was proposed. Furthermore, considering the uncertainty of the dust effect, a calculation method of dust effect control parameters based on fuzzy analysis was proposed, and the thermal rate capability calculation model was improved. Finally, combined with the meteorological forecast, a scheme for improving the thermal rating capacity of the renewable energy transmission power grid was constructed, which can be analyzed for multiple lines simultaneously. Via the practical engineering case of the Ningxia power grid and the

**基金项目:** 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK20005G)

**作者简介:** 李宏强(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析, Email: lhq1652@126.com

**通讯作者:** 鲁广明(1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统仿真, Email: lugm@epri.sgcc.com.cn

power meteorological forecast data of China Electric Power Research Institute, the effectiveness and applicability of the improvement model of dust effect and the improvement scheme of multi-line thermal stability transmission capacity were verified.

**Key words:** renewable energy sending-end power system; thermal stability transfer capacity; dust effect; thermal balance equation; improvement method

新能源发电的不确定性导致传统电网发用电调节策略面临挑战<sup>[1-3]</sup>,使得送端电网,尤其是规模化接入的西北地区送端电网,存在输电线路热稳定输送容量阶段性显著受限的问题<sup>[4-5]</sup>,已成为影响新能源送出与消纳的关键环节。同时,近年来我国极端气候频发,2021年西北更发生了近十年来最强沙尘暴天气<sup>[3]</sup>,沙尘效应对线路传输能力已产生不可忽视的影响。在不突破热稳定硬约束条件下,输电线路热稳定传输能力动态提升方案能实现柔性提高线路输送容量<sup>[6-8]</sup>,相较于改变输电线路材质和结构,具有较高经济性和应用前景。

输电线路热稳定能力评估的核心是考虑线路安全约束的最大载流量计算。各大电力协会、组织均提出了标准热平衡方程,包括我国《架空输电线路运行规程》(DLT 741—2010)、CIGRE国际大电网委员会标准<sup>[6]</sup>、IEC标准<sup>[7]</sup>以及IEEE国际电力协会标准(IEEE 73—2012)<sup>[8]</sup>等线路载流量通用计算模型。其中,IEEE标准对载流量相关计算所需参数都进行了大幅简化,侧重于工程应用;IEC标准与IEEE相类似;CIGRE标准较复杂,考虑了磁滞损耗加热、电晕加热和蒸发散热的影响。但总体而言,受当时电网输电能力分析需求的影响,标准模型简化较多,模型精度与对不同电网实际场景下传输能力提升空间分析偏差较大。因此,工业界早期实际应用中,通常对标准模型预设参数设定一个苛刻的参数组合,预留较大裕度。

因此,线路热稳定分析领域针对电网实际需求,开展了对热稳定模型的补充和完善。文献[9-10]结合传热学理论,从理论上提出了线路热稳模型改进方向。文献[11]利用BOTDR测温技术对架空线路周围环境温度进行分布式测量,实现实时运行导线温度量测,并将温度瓶颈点代入实现热平衡公式完善。文献[12]通过导线弧垂模型和实测数据对比方法,开展模型校核提升。以上方法需对线路展开侵入式量测,受部署环境、量测设备寿命以及运维操作限制较多。

文献[13]将动态增容与阻塞分析结合的方法,结合实时气象数据对于特定的易阻塞线路进行选择性的增容。文献[14]研究了针对具体线路考虑OU过程的动态增容预测方法。文献[15]整合构建了针对某电网基于智慧输电线路的智能增容辅助决策系统,整合了侵入式和非侵入式量测设备。但以上方法的模型通用性和模型稳定性均受限,侧重于挖掘电网中单条重点输电线路热稳容量潜力,对于新能源接入下电网多线路提升问题涉及较少,也没有考虑送端电网地理环境问题对热稳定模型的影响。

综合考虑上述问题,本文首先考虑新能源接入下送端电网的沙尘效应,分析了沙尘电晕加热的影响,提出了基于沙尘效应的线路热稳定改进模型。然后,考虑沙尘效应受天气影响存在不确定性,提出了基于模糊分析的沙尘加热功率控制参数计算方法。最后,结合气象预报信息,构建了针对新能源送端电网的线路热稳传输容量提升方案,可同时对送端电网区域内多条线路同时开展热稳定传输容量提升分析。通过宁夏电网工程模型以及2022年实际电网运行数据与气象数据,对所提的方法进行了验证,结果显示,所提方法对不同运行方式均可实现线路热稳传输能力的提升。所提出的方法能更精细反映宁夏新能源汇集区域送出线路实际运行场景。

## 1 考虑沙尘影响的架空输电线路热稳传输能力计算模型

### 1.1 基于沙尘效应的加热功率模型构建与分析

以新能源规模化高占比的宁夏电网为例,宁夏地区由于地处西北荒漠,晴热条件下叠加大风,会快速诱发沙尘效应,严重的情况下会形成灾害性沙尘暴天气。沙尘效应会直接增大高压输电线路电晕放电强度,引起功率损耗升高,导致线路的温度升高,其结果会限制输电线路热稳传输能力。在类似的新能源送端电网环境下,采用标准模型,会使得动态提升空间计算结果出现偏差。

因此,本文以送端电网较常见的LGJ钢芯铝绞输电线为对象,首先采用有限元仿真方法<sup>[6]</sup>,构建均质化导线模型,进行理论建模,分析考虑沙尘效应下的导线温度变化。分析导线的平均温升,得出导线温度与不同影响因素之间的关联关系,并构建形成沙尘效应下线路加热公式。图1是利用有限元多物理场分析软件建立的沙尘环境下均质化导线模型示意图。

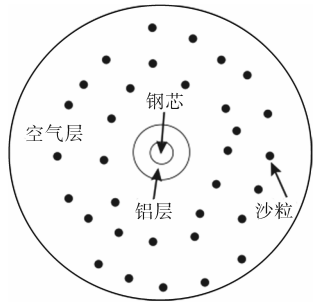


图1 沙尘环境下均质化导线模型  
Fig.1 Transmission line homogenized model considering the dust effect

导线电晕放电过程中参与粒子较多且反应方程式较为复杂。其中,等离子体放电反应主要包括18种粒子;粒子间的反应有44种;粒子与金属的表面反应则有10种<sup>[6]</sup>。从理论分析角度,本文进一步简化了所需分析粒子类型,主要针对空气中最常见的 $N_2$ 、 $O_2$ 和 $H_2O$ 开展电晕放电的影响分析。

### 1.1.1 沙尘浓度对电晕放电热效应的影响

电晕放电实际上是电子与空气中的分子进行碰撞电离,因此,根据空气中电子密度的大小可以判断出电晕放电的强度。

图2为电晕放电对导线的加热功率随沙尘浓度变化的关系曲线。当沙尘粒径和相对湿度一定时,沙尘天气下电晕放电加热功率随着沙尘浓度的增加呈非线性关系。

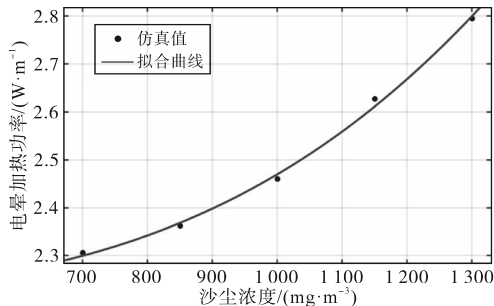


图2 不同沙尘浓度下的电晕加热功率

Fig.2 Corona heating power at different dust concentrations

### 1.1.2 沙尘粒径对电晕放电热效应的影响

分析沙尘粒径对导线电晕放电的影响时,选

取颗粒度为0.1 mm,0.2 mm,0.3 mm 3种沙粒,分析不同粒径的沙粒对电晕放电的影响情况。图3为电晕放电对导线的加热功率随沙尘粒径变化的关系曲线。当沙尘浓度和相对湿度一定时,沙尘天气下电晕放电加热功率随着沙尘粒径的增加非线性增大。

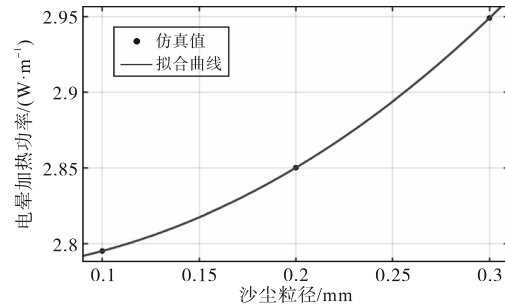


图3 不同沙尘粒径下的电晕加热功率

Fig.3 Corona heating power under different dust particle sizes

### 1.1.3 相对湿度对电晕放电热效应的影响

相对湿度在不同的环境中变化较大,在雾霾天气时,空气中相对湿度超过了80%,而在沙尘天气下,其相对湿度在20%左右。根据不同环境下相对湿度的差异,分析了相对湿度为20%,40%,60%和80%的环境下导线的电晕放电情况。

图4为电晕放电对导线的加热功率随空气相对湿度变化的关系曲线。当沙尘浓度和沙尘粒径一定时,沙尘天气下电晕放电加热功率随着相对湿度的增加非线性增大。

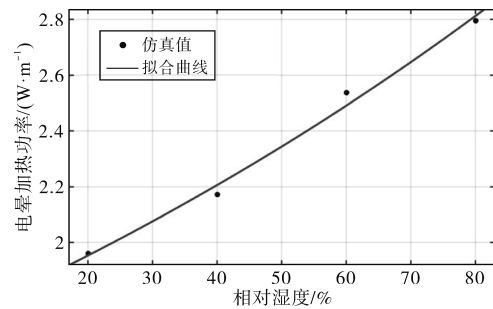


图4 不同相对湿度下的电晕加热功率

Fig.4 Corona heating power at different relative humidities

### 1.1.4 沙尘引起的电晕加热功率拟合计算

结合导线加热功率随沙尘浓度、沙尘粒径和空气相对湿度的变化规律,且三者对加热功率的影响是相互耦合的,得出沙尘天气下电晕放电对导线加热功率的实用计算公式如下:

$$P_f = a \cdot n_d^b \cdot r_d^c \cdot e^{d \cdot RH} \quad (1)$$

式中: $P_f$ 为电晕加热功率, W/m; $n_d$ 为沙尘浓度,  $mg/m^3$ ; $r_d$ 为沙尘粒径, mm; $RH$ 为空气相对湿度; $a, b, c, d$ 均为常数。

采用最小二乘法对式(1)进行拟合,得到:

$$P_r = 0.19n_d^{0.33}r_d^{0.06}e^{0.57RH} \quad (2)$$

拟合曲线和有限元仿真结果对比见图2~图4,可以看出,拟合误差较小,可以满足工程应用的误差要求。

## 1.2 基于沙尘加热的热稳定传输能力改进模型

我国架空线路载流量采用Morgan模型,包括对流散热、辐射散热、日照吸热和电流焦耳热的影响。参考Morgan模型,考虑线路为实心柱体,忽略子线路间空气间隙,输电线路稳态下热平衡方程为

$$P_c + P_r = I^2 R_{T_1} + P_s \quad (3)$$

式中: $P_r$ 为辐射散热功率; $P_c$ 为对流散热功率; $P_s$ 为日照吸热功率; $R_{T_1}$ 为导线温度 $T_1$ 时的交流导线电阻值; $I$ 为导线载流量。

考虑上节所述的沙尘加热功率 $P_f$ ,则改进的热平衡示意图如图5所示,其平衡方程变为

$$P_c + P_r = I^2 R_{T_1} + P_s + \alpha P_f \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 为控制参数,当存在沙尘影响时,参数值为1。

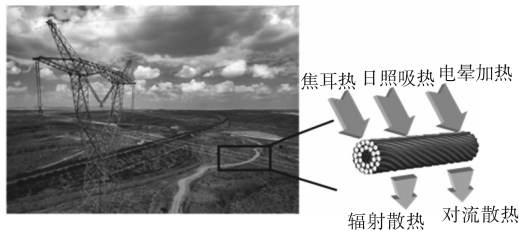


图5 新能源送端架空输电线路热稳平衡示意

Fig.5 Schematic of thermal stability balance of overhead transmission lines at the renewable energy transmission sending-end

辐射散热功率 $P_r$ 计算如下:

$$P_r = 17.8D\varepsilon \left[ \left( \frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{aavg} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

式中: $D$ 为导线直径; $\varepsilon$ 为导线辐射散热系数, $\varepsilon \in [0.9, 0.95]$ ;  $T_{aavg}$ 为导线周围温度平均值。

对流散热功率 $P_c$ 计算如下:

$$P_c = \lambda E_\mu \pi (T_1 - T_{aavg}) \quad (6)$$

其中

$$E_\mu = 0.65R_e^2 + 0.23R_e^{0.61}$$

式中: $E_\mu$ 为欧拉数; $R_e$ 为雷诺数。

日照吸热功率 $P_s$ 计算如下:

$$P_s = \beta J_{avg} D \quad (7)$$

式中: $\beta$ 为输电线路吸热系数。

$R_{T_1}$ 的计算公式如下:

$$R_{T_1} = (1 + k_c)R_d \quad (8)$$

$$R_d = R_{20} [1 + \alpha_{20}(T_1 - 20)] \quad (9)$$

式中: $\alpha_{20}$ 为20℃时导线材料温度系数; $R_{20}$ 为20℃时的直流导线电阻值; $k_c$ 为集肤效应系数。

## 1.3 沙尘加热功率控制参数计算

输电线路沙尘效应需要考虑多气象因素组合作用,因此,是否需要考虑沙尘加热功率存在一定程度的模糊性和不确定性<sup>[7]</sup>。本文采用模糊分析方法<sup>[7]</sup>,综合多种气象条件来形成沙尘效应评价矩阵,然后形成具有多种评价等级的架空输电线路沙尘效应评价矩阵。采用多维隶属函数来评判多因素与沙尘效应之间的关联关系。最后,综合评估,得到了是否需要考虑沙尘加热功率结果,为输电线路热平衡方程控制参数 $\alpha$ 取值提供依据。此评估方法包括6个主要步骤:

1)构建影响输电线路沙尘效应的评价因素集。

2)构建影响输电线路沙尘效应的评价集。

3)构建隶属度模糊评价集,分析多气象条件与沙尘效应之间的关联关系,形成评价矩阵。

4)基于步骤3)的隶属度矩阵,针对输电线路导线实际数据,开展评价分析。

5)构建输电线路沙尘效应影响因素权重集。

6)基于步骤3)隶属度评价结果和步骤5)权重集,构建综合评价模型并打分。根据打分结果,给出热平衡方程控制参数 $\alpha$ 取值结果。

在本文研究中,主要考虑4项气象因素,构建输电线路沙尘效应的因素集 $U$ :所在区域的日照 $u_1$ 、架空输电线路的环境温度 $u_2$ 、所在区域的风速 $u_3$ 及所在区域的风向 $u_4$ 。

评价集的等级划分视实际情况而定,等级太少会影响评价精度,太多则将增加运算的复杂度。在本文中,将架空输电线路的沙尘效应评价等级划分为4等,即 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ ,集合中 $v_1 \sim v_4$ 依次对应高影响度( $v_1$ )、较高影响度( $v_2$ )、一般影响度( $v_3$ )和低影响度( $v_4$ )。评价等级用量化的方式说明单一气象条件对输电线路传输能力的综合因素重要程度,如表1所示。

表1 多气象因素条件影响权重量化

Tab.1 The effect weights for multiple meteorological factors

程度水平	数字意义	程度水平	数字意义
[0.1~0.3)	低	[0.5, 0.8)	较高
[0.3~0.5)	一般	[0.8, 1.0]	高

各因素对线路沙尘效应影响程度有不同,因此隶属度模糊评价集 $R$ 的构建需考虑送端电网的具体特点,并结合历史数据信息,分析构建。

对于输电线路沙尘效应影响因素权重集 $A=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ ,则需要通过预设各因素权重的方式来定量反映各气象因素对线路总体的沙尘效应所占的比重。本文采用改进层次分析法来处理各气象因素权重,即要解决的问题分为2层,目标层为对输电线路传输能力提升等级,分析层针对可能影响线路传输能力的气象因素,采用权重集量化方式来进行进一步评估。

以中国宁夏地区电网为例,该地区夏季多发且高强度的强对流天气使输电线路同时面临高光照、降温、大风带来的多重影响,当大风从西北方向吹来,易诱发沙尘效应。针对某单条线路沙尘效应的因素集 $U_1=\{\text{强光照 } 1\,000\text{ W/m}^2, \text{环境高温 } 36\text{ }^\circ\text{C}, \text{大风 } 6\text{ m/s}, \text{西北风向 NW}\}$ ;考虑评价集 $V_1$ 的多气象因素影响权重,形成隶属度模糊评价集 $R=\{0.7, 0.8, 0.7, 0.9\}$ ;影响因素权重集 $A=\{0.23, 0.35, 0.31, 0.11\}$ 。计算可得当前状态下 $B=R^\circ A=(0.161, 0.35, 0.757, 0.192)$ , $B$ 取最大值为0.757,即具有较高影响度,所以需考虑沙尘效应影响。

## 2 新能源接入下多输电线路热稳传输能力提升方法

我国颁布的DLT 741—2010《架空输电线路运行规程》中规定,架空输电线路的最大允许载流量(即输电线路热稳定传输能力)预设计算条件为:线路所处的环境温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ ,风速 $0.5\text{ m/s}$ ,光照 $1\,000\text{ W/m}^2$ ,架空线路温升限额为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。对于送端电力系统而言,当新能源大发时,新能源接入电力系统所处区域的多条输电线路运行环境温度、风速和光辐照条件均会出现优于预设条件的实际运行环境,这为多线路动态提升留下了空间。因此,对于新能源规模接入的送端电力系统多输电线路热稳传输能力提升与校核方法构建如下:

1)根据新能源总体接入情况,首先分析新能源汇集区输电线路热稳输送能力受限情况,形成热稳受限关键线路列表。

2)获取输电线路在线运行数据以及新能源下一时刻出力数据。

3)分析区域新能源出力情况。当新能源处

于大发阶段,选择新能源大发区域内关键受限线路,进行热稳空间提升判断。

4)考虑受限线路所处气象环境,分析输电线路是否需要考虑沙尘加热影响。

5)根据步骤4)判断结果,结合式(3),计算受限输电线路传输能力提升空间。并进一步分析是否需要进行考虑沙尘加热效应的多线路热稳提升分析。

6)根据步骤5)输电线路计算得出的单/多线路热稳动态提升空间,进一步进行系统安全稳定校核,校验提升后的新动态热稳定空间是否具备可行性。

输电线路热稳传输容量动态增容计算方法如图6所示。

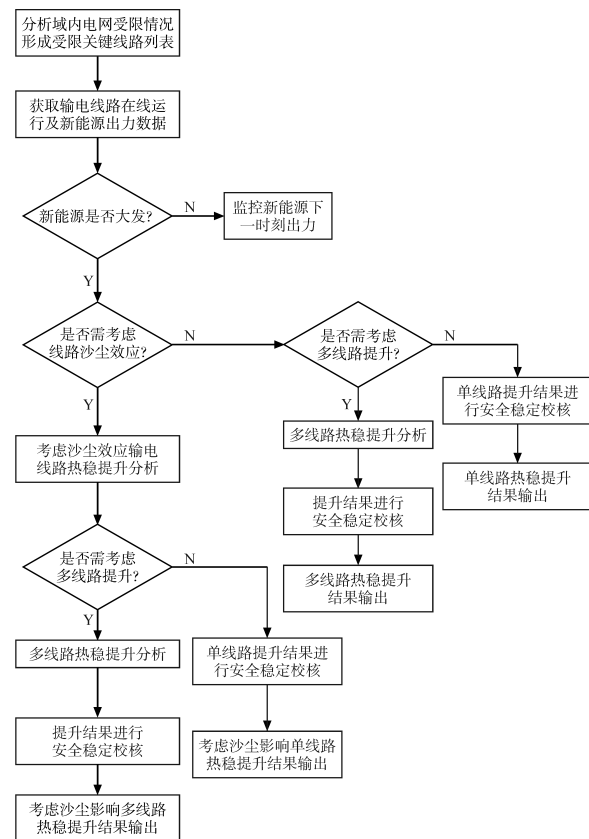


图6 输电线路热稳传输能力提升空间计算步骤

Fig.6 Transmission line dynamic transmission rating capacity calculation method

## 3 算例分析

为了验证基于沙尘改进模型的新能源送端电网输电线路热稳定传输能力提升方案的正确性和有效性,本文选取了我国送端电网——宁夏电网新能源汇集区实际运行数据构建分析算例。输电线路的传输容量对比计算采用了中国电科

院开发的PSASP仿真软件来开展分析。具体而言,是基于宁夏电网2022年的电网实际运行方式模型、新能源参数等开展了对比分析。

### 3.1 宁夏新能源汇集区电网与新能源送出的区域电网模型构建

宁夏电网中卫(ZW)地区新能源送出局部网架拓扑简图如图7所示。ZW地区在宁夏西南部,是宁夏电网新能源大规模送出基地之一,能源总装机容量为5 030 MW,其中风电2 530 MW,光伏2 500 MW。新能源集中并网、集中上网特征明显。

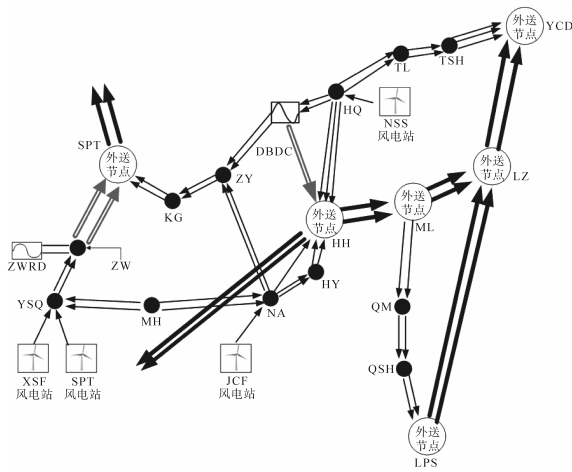


图7 宁夏电网ZW地区新能源送出局部网架图

Fig.7 Ningxia power grid ZW area renewable energy sending-end grid structure

### 3.2 宁夏电网新能源送出区域电网模型构建

如图7所示,ZW地区的新能源汇集区(如XSF,SPT,JCF以及NSS风电等标识点处)采用风电模型框图表示,宁夏电网所属330 kV母线节点由黑色圆点代表,外送节点由圆点结合文字单独表示,特高压外送线路由黑色加粗线表示。文中选取了与新能源传输消纳有关的关键线路,对其它母线节点和连接线路做了简化处理。对于XSF与SPT风电场基地,其送出潮流主要通过ZW—SPT双回线(简称为ZP双回线),以及DBDC—HH送出线路(简称为DH线,对应图7框图中间位置灰色箭头框线)汇集至SPT母线经主干网架汇集送出(图7中外送线路)。随着YSQ所属的XSF以及SPT风电场等新能源场站规模不断扩大,ZP双回线、DH送出线等线路潮流逐步加重,成为制约区域新能源消纳的关键。

目前,宁夏ZW地区ZP双回线、HH线等330 kV电压等级线路采用多种线路材料组合链接构成。对于ZP双回线,其两回线路材质总体采用相同材料,影响最大的导线材质为LGJ300;对于HH

线,其距离最大的线路材质与ZP线相同,均为LGJ300。LGJ300计算预设条件下导线设定的最大可传输电流为690 A,单线路最大传输容量为962 MW(考虑安全稳定校核后的最大传输容量)。新能源大发场景下,ZP以及HH等多条线路不满足热稳限额。

### 3.3 考虑沙尘效应ZW区域气象环境分析

本文采用中国电力科学研究院的电力气象数据集,对ZW地区展开沙尘效应分析。数据采用日内环境网络公用数据格式(NetCDF)。网格点信息包括了经度、纬度、时间、70 m高处风速、0 m高处风向、2 m高处湿度、2 m高处温度、积累雨量等8类。对于气象数据,采用ArcGIS软件构建宁夏地区的数字高程DEM模型,并采用Python开展详细历史数据分析。

针对2022年历史气象数据,分析形成了宁夏电网年均风速分布图,如图8所示。可看到ZW区域年平均风速在3.0 m/s以上,为宁夏风速较高区(宁夏总体平均风速为2.3 m/s,北部无风区已低至1.6 m/s),极易诱发沙尘电晕加热效应。同时,ZW基准环境情况相比规程计算基准值(0.5 m/s)有较大提升,对流散热功率也显著变大,综合判断,动态提升空间较大。

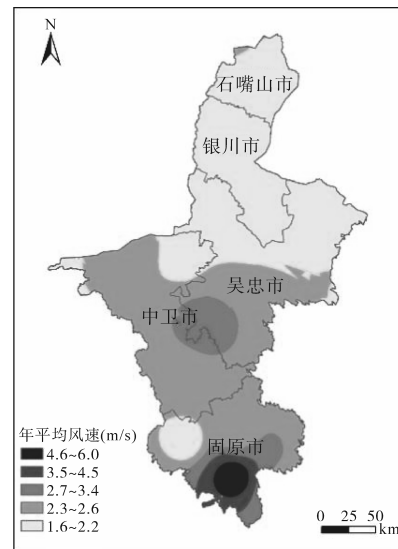


图8 基于ArcGIS的宁夏电网2022年年均风速图

Fig.8 Annual average wind speed map of Ningxia power grid based on the ArcGIS

以风速和气温为主要目标,绘制年度曲线图,如图9和图10所示。结果显示,ZW地区年度气温极大值37.5℃出现在7月7日16:00时和7月29日17:00时,年度风速极大值10.8 m/s出现在3月6日15:00时和3月7日04:00时。因此,

选取年度气温极大日(7月7日数据)和年度风速极大日(3月6日数据)展开算例验证分析。对于年度风速极大日,根据1.3节沙尘效应计算方法得到,  $B=0.912$ ,即对于沙尘有高影响度,模型计算需考虑沙尘效应带来的加热功率影响,式(3)计算中,沙尘加热模型控制参数  $\alpha=1$ 。作为对比,年度气温极大日7月7日,其沙尘效应计算得到  $B=0.43$ ,沙尘效应影响一般,则  $\alpha=0$ 。

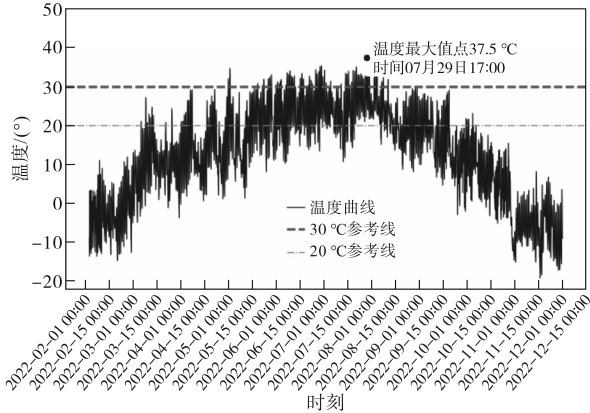


图9 宁夏电网2022年ZW地区年度气温数据分析图

Fig.9 Ningxia power grid's annual temperature data analysis results in 2022

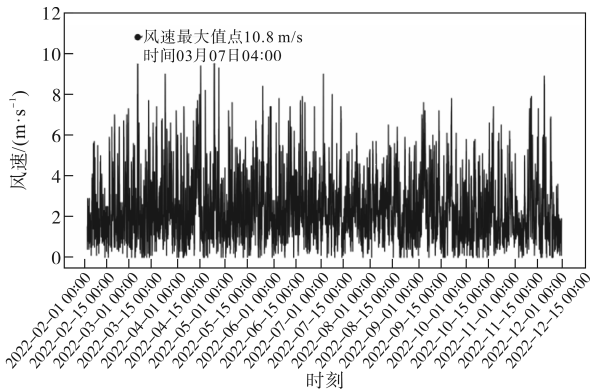


图10 宁夏电网2022年ZW地区年度风速数据分析图

Fig.10 Ningxia power grid's annual wind speed data analysis chart in 2022

### 3.4 送端电网输电线路提升分析

#### 3.4.1 单线路提升对比分析

针对3月6日下午15:00—18:00时风速时间段开展分析,16:00—17:00时间段内提取每15 min间隔数据,其余时间段采集每1 h间隔数据进行动态提升空间分析。动态提升分析结果如图11所示。

可以看到,由于当日风速较大,ZP线实际传输容量短暂达到限额上限(425 MW)。采用常规动态容量提升方法,可看到从15:00开始至18:00时间段内,传输容量可保持在450 MW以上,最大

可实现493 MW传输容量(16:15)。相比16:15时刻422 MW实际传输容量,可实现16.8%的传输容量提升;对比考虑沙尘效应的动态提升,在上午10:00时后,其增容空间受到了限缩,最小值出现在13:00—14:00时间段内,可提升空间与规程计算结果相同。受风沙影响,相似场景也同样出现在16:00—18:00晚大风时间段内,其增容空间同样受限。对比17:00—17:30的实际传输容量,平均可提升12.3%。

7月7日该日整体气温较高,全日以5 min为分析间隔,形成285个分析点,详细动态提升对比结果曲线如图12所示。需要注意的是,当年7月前,ZP I线进行了线路改造,线路最大传输容量获得了提升,已达500 MW。可以看到,由于该日环境气温较高,当日输电线路传输容量可提升空间相比大风日要小。7月7日11:00实际传输容量482 MW,动态传输容量提升计算结果为514 MW,可提升容量6.6%。

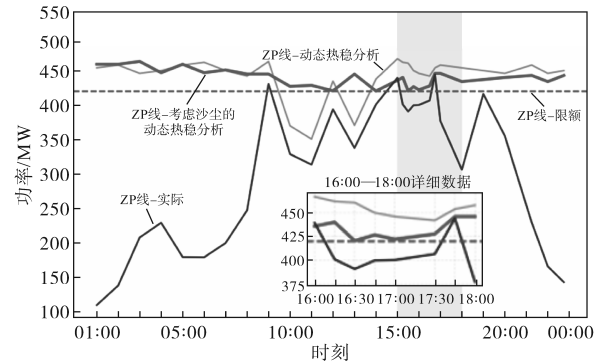


图11 ZP线2022-03-06日线路传输容量动态提升分析结果

Fig.11 Line ZP I DRTC results for March 6<sup>th</sup>, 2022

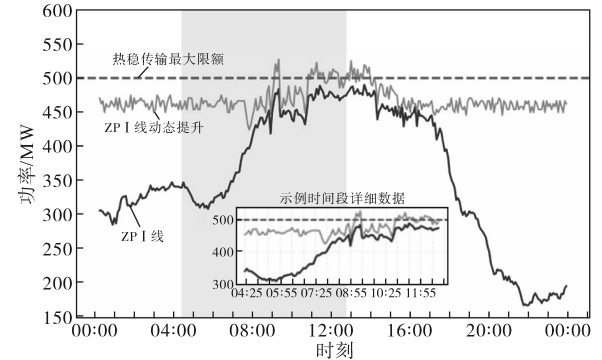


图12 ZP线2022-07-07日线路传输容量动态提升分析结果

Fig.12 Line ZP DRTC results for July 7<sup>th</sup>, 2022

#### 3.4.2 双线路提升对比分析

对于风速极大日(3月6日),其风速影响范围既包括ZP双回线路送出,也同样影响了DH线路送出。因此,采用相同数据,对DH线路也开展输电线路传输容量动态提升计算,考虑沙尘效应

影响的动态提升结果如图13所示。对比常规动态增容方法,其在早上11:00—14:00的时间段内,受沙尘效应影响,其增容空间受到了限制,基本等同于静态热稳传输计算值(425 MW)。多线路动态提升平均值对比如表2所示。

可以看到,相比于常规模型,考虑沙尘效应的改进型模型在大风关键时间段提升幅度小,考虑实际沙尘气象情况,计算结果更精确。

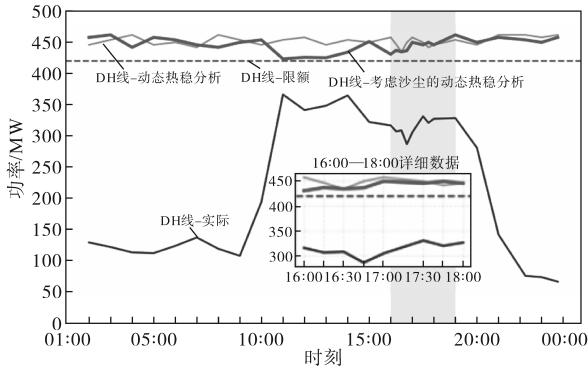


图13 DH线2022-03-06日线路传输容量动态提升分析结果

Fig.13 Line DH DRTC results for March 6th, 2022

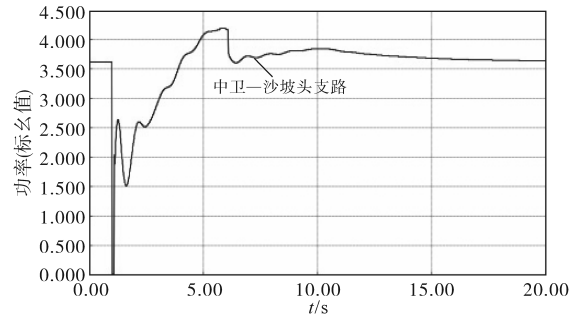
表2 多线路动态提升效果对比

Tab.2 Comparative analysis of multi-line dynamic rating enhancement

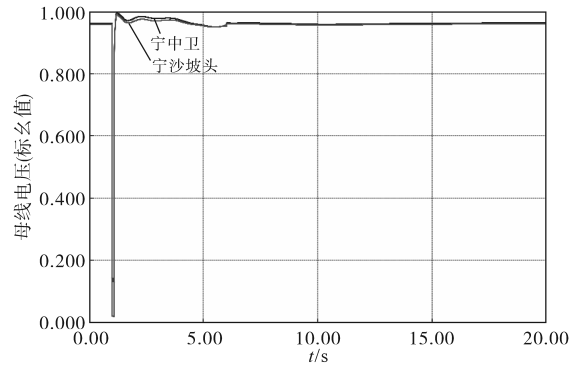
线路	3月6日 时间段	热稳静 值/MW	实际传输容量 平均值/MW	动态提升容量 平均值/MW	
				改进 模型	常规 模型
ZP	00:00—10:00	425	198	426	426
	10:00—15:00	425	367	431	459
	15:00—18:00	425	393	437	477
	18:00—23:00	425	274	441	453
DH	00:00—10:00	425	133	433	434
	10:00—15:00	425	281	427	441
	15:00—18:00	425	322	436	448
	18:00—23:00	425	217	451	453

### 3.5 输电线路提升后安全稳定校核

安全稳定校核目的是针对线路容量提升后,是否会由于传输容量提升导致电网相同线路发生电压稳定问题而做的对比校核。校核的是相同线路的电压稳定情况。采用PSASP模型开展安全稳定综合校核,校核结果如图14所示。通过图示对比结果可以看出,ZP线路提升后在相同预想故障下与提升前暂态电压波动曲线基本一致,没有发生稳定问题。因此,可以说明,采用本文所提出的动态提升容量值,ZP线在预想故障下未发生失稳等稳定问题。证明了所提出的动态传输容量提升方法具备可行性。



(a)未提升前中坡线单线功率暂态故障仿真校核结果



(b)动态提升后ZP线母线电压暂态故障仿真校核结果

图14 ZP线热稳传输容量动态提升仿真校核结果对比

Fig.14 Transient stability of ZP transmission line: comparative simulation study with and without DTRC

## 4 结论

为提高送端电网规模化新能源不确定性出力接入下的远距离输送能力,本文在常规线路热稳定计算模型基础上,考虑了送端电网沙尘导致电晕加热问题,并引入了模糊分析计算沙尘效应可能性,提出了改进型计算模型,克服了气象时空波动变化导致沙尘加热效应评估不准确的问题,实现了针对送端电网的动态评估。进一步,结合中国电科院电力气象预报,提出了针对新能源送端电网的多线路热稳传输容量提升方案。结合宁夏中卫地区电网实际算例分析,结果验证了所提出的基于沙尘改进模型的新能源送端电网输电线路热稳定传输能力提升方案的适用性和正确性,有助于动态挖掘新能源汇集区电网线路传输能力,提高新能源消纳水平。后续将结合智能预测算法,进一步开展考虑沙尘效应的传输能力动态预测分析。

### 参考文献

[1] 辛保安,李明节,贺静波,等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5731.  
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2023, 43(15): 5723-5731.
- [2] 辛保安. 新型电力系统与新型能源体系[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.  
XIN Baoan. New power system and new energy system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [3] 叶洽, 郑小慎, 赵尚玉. 2021年中国北部特大沙尘天气的遥感监测与路径分析[J]. 遥感学报, 2023, 27(8): 1821-1833.  
YE Qia, ZHENG Xiaoshen, ZHAO Shangyu. Remote sensing monitoring and transport path analysis of an intense dust weather in Northern China in 2021[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(8): 1821-1833.
- [4] 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): 189-199.  
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.
- [5] 艾芊, 杨曦, 贺兴. 提高电网输电能力技术概述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 34-40.  
AI Qian, YANG Xi, HE Xing. Research on technologies for improving power grid transmission capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 34-40.
- [6] CIGRE Working Group. Thermal behavior of overhead conductors: CIGRE 207[S]. Paris, France: Council on Large Electric Systems (CIGRE), 2002.
- [7] IEC Working Group. Overhead electrical conductors—calculation methods for stranded bare conductors: IEC TR61597[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission (IEC), 2021.
- [8] IEEE T&D Committee. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors: IEEE Std 738—2012[S]. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013.
- [9] 曾涛, 陈浩, 郭瑞鹏, 等. 基于公式化限额和最小裕度最大化的电网热稳定限额计算[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 159-167.  
ZENG Tao, CHEN Hao, GUO Ruipeng, et al. Thermal stability control limit calculation based on formulation control limit and maximization of minimum safety margin in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 159-167.
- [10] 刘刚, 阮班义, 林杰, 等. 架空导线动态增容的热路法稳态模型[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1107-1113.  
LIU Gang, RUAN Banyu, LIN Jie, et al. Steady-state model of thermal circuit method for dynamic overhead lines rating[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1107-1113.
- [11] 杨安琪, 龚庆武. 基于BOTDR测温技术的架空线路动态增容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 16-21.  
YANG Anqi, GONG Qingwu. Dynamic capacity-increase of overhead line based on BOTDR temperature monitoring technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 16-21.
- [12] 侯宇, 王伟, 韦微, 等. 基于模型校核的输电线路载流量限额动态评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 159-166.  
HOU Yu, WANG Wei, WEI Zheng, et al. Dynamic evaluation of ampacity limit for transmission line based on model calibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 159-166.
- [13] 徐伟, 鲍颜红, 周海锋, 等. 基于阻塞分析的输电线路动态增容[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 15-22.  
XU Wei, BAO Yanhong, ZHOU Haifeng, et al. Transmission line dynamic capacity-increase based on congestion analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 15-22.
- [14] MADADI S, MOHAMMADI-IVATLOO B, TOHIDI S. Dynamic line rating forecasting based on integrated factorized Ornstein-Uhlenbeck processes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 851-860.
- [15] 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): 160-169.  
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): 160-169.
- [16] 李宏强, 魏亚威, 马晶, 等. 架空线路热稳传输能力提升方法研究[J]. 宁夏电力, 2023(5): 12-18.  
LI Hongqiang, WEI Yawei, MA Jing, et al. Study on enhancing the thermal stability of transmission capacity of overhead lines [J]. Ningxia Electric Power, 2023(5): 12-18.
- [17] 熊小伏, 王尉军, 于洋, 等. 多气象因素组合的输电线路风险分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 11-15, 28.  
XIONG Xiaofu, WANG Weijun, YU Yang, et al. Risk analysis method for transmission line combining of various meteorological factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2011, 23(6): 11-15, 28.

收稿日期: 2023-11-03

修改稿日期: 2023-12-26