

# 考虑动态增容效应的陆上风电场送出线路截面优化方法

张成炜<sup>1</sup>, 林瑞宗<sup>1</sup>, 张宁宇<sup>2</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 现有风电场架空导线截面优化设计通常以典型环境参数为依据, 未考虑风速等气象条件的动态变化, 仍有进一步挖掘输电能力潜力的空间。为了进一步优化导线截面, 文中基于 Morgan 公式, 建立数学模型表征陆上风电场架空送出线路导线截面优化设计过程, 提出一种适用于送出线路导线截面设计的优化方法。该方法综合考虑线路动态增容效应和风电场出力特性的匹配, 根据地区历史气象数据等信息, 选择送出线路导线截面, 完成优化设计。通过算例分析验证了文中所提出的陆上风电场送出线路导线优化设计方法。结果表明, 所提出的方法能够在满足风电送出需求的基础上有效降低导线截面积, 节省导线材料, 提高陆上风电场电气设计的经济性。

**关键词:** 动态载流量; Morgan 公式; 架空线路; 导线截面优化

中图分类号: TM726.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)04-0086-06

## 0 前言

我国风能资源极其丰富, 随着国家不断加大投入, 风电装机容量日益增加, 风电场作为新兴设计对象其设计业务量也逐渐增多。在风电场设计过程中往往选用单一且较低的风速设定值计算整定导线载流量, 而一般情况下风电场所在区域的风速均大于该设定值。此时若仍采用单一且较低风速设定值计算导线载流量, 得到的结果不能正确反映架空线路的真实输电能力, 仍有进一步优化的空间。

目前关于电力系统架空输电线路动态增容的研究主要集中于运行层面, 通常以线路地区气象数据为依据探索提高架空输电线路的输电容量的方法。如文献[1]提出基于气象数值网格点的预报结果, 结合输电线路最大载流量计算方法提高输电线路动态载流量能力, 取得了很好的效果。文献[2]通过预测线路区域的气象情况, 提出一种线路输送容量的概率预测方法, 为电力系统迎峰度夏提供了新的思路。此外, 还有不少研究从热稳定约束的视角出发, 基于线路暂态热平衡方程提出分析方法分析线路的输电能力<sup>[3-4]</sup>。

风电场地区风资源比较丰富, 同时输电线路动态载流量与风速具有很强的相关性<sup>[5]</sup>, 文献[6-7]利用这一特性提高电网可靠性和风电接入电力系统的比例。但现有研究大多从系统运行的视角出

发考虑动态增容问题, 虽然文献[8]综合考虑了风力发电机功率特性和输电线路最大载流量计算模型, 分别从运行和设计视角提出了陆上风电场送出线路导线截面优化设计方法, 但所提出的模型仅考虑了单一时刻的典型状态, 并不能全面反映风电场地区风速的波动特性及概率分布情况。同时, 该研究侧重于从技术层面研究导线截面优化问题, 缺乏从经济视角对导线截面优化进行投资量化分析, 将其应用于环境更加复杂的现实场景中仍有一定的局限性, 有待进一步扩展。

因此文中提出一种适用于陆上风电场架空送出线路导线截面的优化设计方法, 综合考虑线路动态增容效应和风电场出力特性的匹配, 充分挖掘线路功率输电潜力, 并建立基于概率约束的优化模型实现导线截面的优化设计, 以提高设计结果经济性。

## 1 线路动态增容效应与风电场出力特性匹配特性分析

### 1.1 风电场外送功率载流量需求计算方法

图1是典型的风力发电机组出力特性曲线, 根据风电场地区气象数据的历史典型场景, 对照风力发电机出力特性及计算公式, 模拟生成各典型场景下风电场中风力发电机的出力, 得到各场景下风电场外送功率的载流量需求。

风力发电机的出力计算公式如下式:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{in} \\ f(v) & v_{in} < v \leq v_r \\ P_{max} & v_r < v \leq v_{out} \\ 0 & v > v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-02-18

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“适应交直流混联受端电网的大规模海上风电接入方式优化及运行控制技术研究”

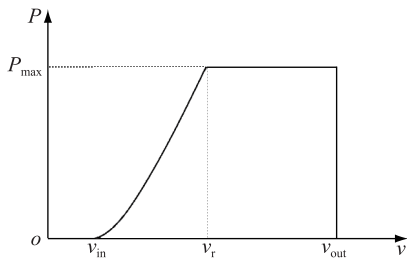


图1 风力发电机组典型出力特性曲线

Fig.1 Typical output curve of wind generator

式中： $v$  为风速； $v_{in}$  为风力发电机的切入风速； $v_r$  为风力发电机的额定功率风速； $v_{out}$  为风力发电机的切出风速； $f(v)$  为风速在  $v_{in}$  到  $v_r$  之间时风力发电机输出功率与风速关系的函数，即输出特性，该特性可以用线性函数和幂函数表示。

由此可计算风电场外送功率所对应的载流量需求，计算方法如下：

$$I_{s,t} = \frac{n_{wind} P(v_{s,t})}{\sqrt{3} V_{wind}} \quad (2)$$

式中： $I_{s,t}$  为场景  $s$  下时刻  $t$  的风电场外送功率所对应的载流量需求； $n_{wind}$  为风电场风机数； $v_{s,t}$  为场景  $s$  下时刻  $t$  的风速； $V_{wind}$  为风电场接入的电压等级。

## 1.2 架空导线载流能力计算方法

目前，国际上用于计算架空导线最大允许载流量的方法主要为 IEEE 标准 (IEEE 738—2006)<sup>[9]</sup> 和 CIGRE 提出的计算方法<sup>[10]</sup>。结合我国线路运行的实际特点，根据 GB 50545—2010<sup>[11]</sup> 中所采用的 Morgan 公式计算导线载流量，当导线与外界的热交换达到或接近稳定状态时，导线载流量的计算公式可以表示成如下形式：

$$I = \left( \frac{Q_r + Q_c - Q_s}{\zeta R_d} \right)^{\frac{1}{\tau+2}} \quad (3)$$

式中： $Q_r$  为辐射散热； $Q_c$  为对流散热； $Q_s$  为日照辐射吸热； $I$  为导线载流量； $R_d$  为直流电阻； $\zeta$ ， $\tau$  均为常量，与导线型号相关。

$Q_r$ ， $Q_c$  和  $Q_s$  及相关过程变量的计算方法如下<sup>[11]</sup>：

$$Q_r = \pi \sigma D k_e [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (4)$$

$$Q_c = \pi \lambda_r Nu (T_c - T_a) \quad (5)$$

$$Q_s = a J_s D \quad (6)$$

$$Nu = 0.65 Re^{0.2} + 0.23 Re^{0.61} \quad (7)$$

$$Re = 1.644 \times 10^9 v_{\perp} D [T_a + 273 + 0.5(T_c - T_a)]^{-1.78} \quad (8)$$

式中： $\sigma$  为斯特凡-玻尔兹曼常数，为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； $D$  为导线外径； $k_e$  为导线表面的辐射散

热系数，新线为 0.23~0.43，旧线为 0.9~0.95； $T_c$  为导线允许温度； $T_a$  为环境温度； $\lambda_r$  为导线表面空气层的传热系数，通常取值为  $0.025 \text{ 85 W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； $Nu$  为欧拉数； $Re$  为雷诺数； $v_{\perp}$  为垂直导线风速； $a$  为吸热系数，新线为 0.35~0.46，旧线为 0.9~0.95<sup>[11]</sup>； $J_s$  为日照强度。

在设计过程中，为简化计算过程，可将导线允许温度、日照强度设为定值，如一般取导线允许温度为  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  或  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，取日照强度为  $1 \text{ 000 W}/\text{m}^2$ ，也可以根据风电场和导线所在区域的历史气象数据生成的典型场景取动态数值。

## 1.3 风电场出力特性与线路动态增容效应匹配

根据前 2 节介绍的方法，分别绘制出风电外送载流量需求曲线和导线载流能力曲线，如图 2 所示。

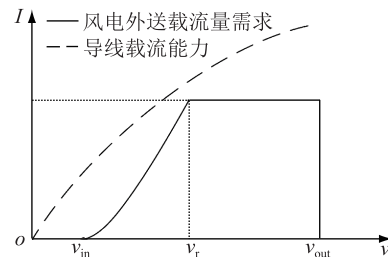


图2 风电外送载流量需求和导线载流能力匹配特性

Fig.2 Characteristic matching relationship between demand for wind power output current and transmission line current-carrying capability

由图 2 可知，当风速介于切入风速  $v_{in}$  和额定功率风速  $v_r$  之间时，随着风速的增大，风电场出力随之增大，其外送载流量需求也越大，同时由于导线的对流散热加快，其送出线路的导线载流能力也随之增大。此时若按现行设计标准  $0.5 \text{ m/s}$  的风速设定值整定导线的最大载流量，所得结果势必较小，并未充分挖掘架空输电线路的输电能力，仍有优化的潜力和空间。上述分析表明，综合考虑风电场出力特性与线路动态增容效应，优化设计陆上风电场架空送出线路导线截面是有一定理论基础的。

## 2 陆上风电场架空送出线路导线截面优化模型

基于前文所述的风电场外送功率载流量需求计算方法和架空导线动态载流量的计算方法，建立风电场架空导线截面优化模型。

### 2.1 目标函数

$$\min f = \min (c_{inv} + c_{loss}) \quad (9)$$

式中： $c_{inv}$  为线路的投资费用； $c_{loss}$  为线路工程的年运行损耗费用，即年网损费用。

$$c_{\text{inv}} = mc_j L_{\text{line}} \quad (10)$$

$$m = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (11)$$

式中： $m$  为净现值计算系数； $c_j$  为  $j$  型号的导线的单位长度造价成本； $L_{\text{line}}$  为线路工程长度； $r$  为贴现率，常用取值为 8%； $y$  为线路工程全寿命周期。

$$c_{\text{loss}} = 365 \times \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T 3 \times (I_{j,s,t}^{\text{wind}})^2 R_{Tj,s,t} L_{\text{line}} \lambda_e}{S} \quad (12)$$

式中： $S$  为考虑的各种场景； $T$  为考虑的日内时段总数； $I_{j,s,t}^{\text{wind}}$  为  $j$  型号的导线在场景  $s$  下时刻  $t$  的实际载流量； $R_{Tj,s,t}$  为  $j$  型号的导线在场景  $s$  下时刻  $t$  的交流电阻值； $L_{\text{line}}$  为线路工程长度； $\lambda_e$  为风电上网电价。

导线实际载流量按下式计算：

$$I_{j,s,t}^{\text{wind}} = \min\{I_{s,t}, I_{j,s,t}\} \quad (13)$$

式中： $I_{s,t}$  为场景  $s$  下时刻  $t$  的风电场外送功率的载流量需求； $I_{j,s,t}$  为  $j$  型号的导线在场景  $s$  下时刻  $t$  的载流量能力。

## 2.2 约束条件

约束条件用于表示风电场送出线路工程需要满足清洁能源消纳比例的需求，具体可以从以下方面考虑。

(1) 线路载流量越限概率约束：

$$p(I_{s,t} \geq I_{j,s,t}) \leq \alpha \quad (14)$$

(2) 最低弃风率水平约束：

$$1 - \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T P_{j,s,t}}{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T P(v_{s,t})} \geq \beta \quad (15)$$

式中： $\alpha$  为设置的置信水平，典型取值为 1%、5% 和 10%； $P_{j,s,t}$  为当选择导线型号为  $j$  的导线时，在场景  $s$  下时刻  $t$  的风电场外送功率； $\beta$  为要求的最低弃风率水平。

综上，利用上述提出的优化模型即可实现陆上风电场架空导线截面的优化设计。

## 2.3 方法实施流程

文中所提出陆上风电场送出线路导线截面优化设计方法的具体实施流程如图 3 所示。首先，基于风电场和相关输电线路所在气象网格点（大小根据需要进行选择，如 5 km×5 km）的历史温度、风速、风向、日照强度等数据采用聚类分析方法生成同时考虑时空维度的历史典型场景；随后，对照风力发电机出力特性及计算公式，模拟生成各典型场景下风电场中风力发电机的出力，计算得到各场景下风电场满载情况下设计线路载流量需求；然后，基于线路设计的基本条件、线路最高温度限制等参数，计

算生成各典型场景下各备选导线型号所对应的全线路走廊的动态载流量能力；最后，求解优化模型，得到导线截面优化设计结果。

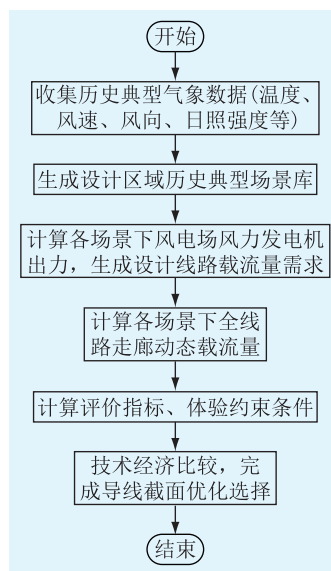


图 3 陆上风电场送出线路导线截面优化设计方法流程

Fig.3 Optimal cross-section design method flow chart of lines for onshore wind farms

## 3 算例分析

### 3.1 算例参数

文中算例分析以一座陆上风电场及其送出线路为例，该风电场共有 120 台单机额定容量为 2 MW 的风力发电机。风电场配置型号风力发电机的切入风速  $v_{\text{in}}$  为 3 m/s，额定功率风速  $v_r$  为 10.5 m/s，切出风速  $v_{\text{out}}$  为 25 m/s。假设风速在风力发电机切入风速到额定功率风速之间，风力发电机输出有功功率与风速的函数关系是线性的。假设风电场送出线路电压等级为 220 kV，采用双分裂导线，单回路架空架设，图 4 是风电场及送出线路的示意图。线路长度约为 10 km，每 5 km 分为一段并配有 1 个气象观测点（如图 4 中观测点 I 和 II）。现已有多种方法对风速和温度的历史数据进行处理分析和特征提取<sup>[12-16]</sup>，文中采用聚类的方法处理历史数据<sup>[17]</sup>，图 5—图 9 是对观测点 I 和 II 一年四季的风速及温度数据聚类后各季节场景下的相关数据（ $S_1$ — $S_4$  分别表示春、夏、秋、冬）。常见 LGJ 型钢芯铝绞线参数取值可参考文献[18]中数据，常见 LGJ 型钢芯铝绞线工程单根导线造价如表 1 所示。导线辐射散热系数和吸热系数取值为 0.9，导线允许温度  $T_c$  取值为 70 ℃，日照强度  $J_s$  取值为 1 000 W/m<sup>2</sup>。线路工程全寿命周期  $y$  取值为 25 a，贴现率  $r$  取值为 8%，风电上网电价  $\lambda_e$  的取值为 0.4 元/(kW·h)。



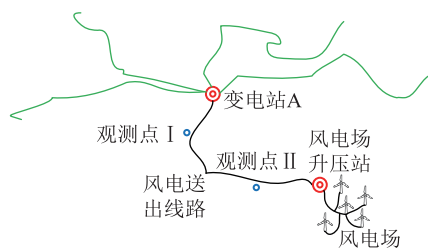


图4 风电场及送出线路位置示意

Fig.4 Location of wind farm and overhead transmission lines

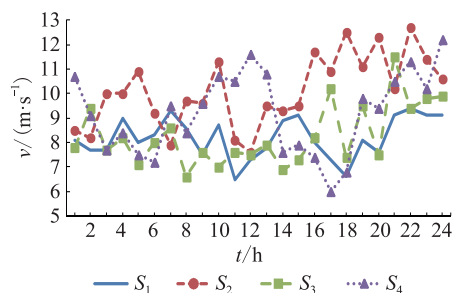


图5 风电场所在区域典型风速曲线

Fig.5 Typical wind speed curves for area of wind farm

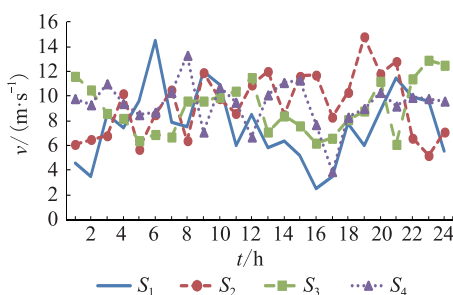


图6 观测点 I 典型风速曲线

Fig.6 Typical wind speed curves of observation location I

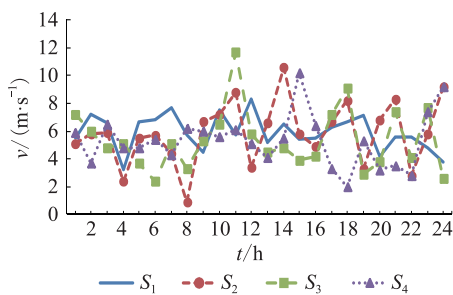


图7 观测点 II 典型风速曲线

Fig.7 Typical wind speed curves of observation location II

### 3.2 结果分析

表2是利用文中提出的方法得到的在不同载流量越限率和不同弃风率要求情况下,导线截面优化选择的结果。在分析过程中,引入国际上风电场工程投资评价常用的平准化度电成本(levelized cost of electricity, LCOE)评价投资结果<sup>[12]</sup>。

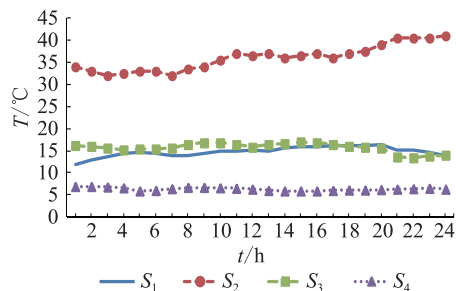


图8 观测点 I 典型温度曲线

Fig.8 Typical temperature curves of observation location I

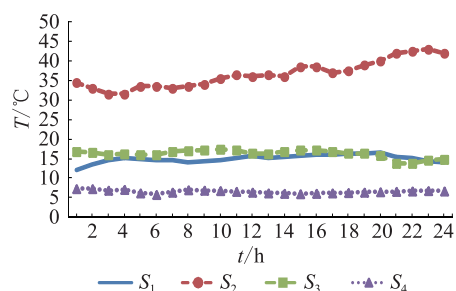


图9 观测点 II 典型温度曲线

Fig.9 Typical temperature curves of observation location II

表1 常见 LGJ 型钢芯铝绞线工程造价

Table 1 Construction costs and transmission capabilities for usually used steel core aluminum hinge lines of LGJ

标准截面 /mm <sup>2</sup>	造价/(万元·km <sup>-1</sup> )	传统计算方法载流量/A
70/40	42.5	196.908 8
95/55	44.2	235.233 8
120/20	47.6	282.230 9
150/35	51	328.633 0
185/45	54.4	379.517 0
240/30	59.5	445.885 7
300/25	68	508.948 7
400/35	76.5	590.383 9

从表2可以看出,随着导线截面逐渐增大,年投资费用逐渐增加,年网损费用逐渐减小。二者综合作用导致相同情况下年成本先减小后增大,年成本最小所对应导线型号为2×LGJ-185/45。若按照传统导线截面选择方法,以0.5 m/s的风速和40℃的环境温度整定导线的最大载流量,送出线路导线型号应为2×LGJ-300/25。相比传统方法,采用文中所提方法选择的导线截面,其年成本降低了约10.8%,铝截面减少38.3%,导线整体截面减少了约29.2%。因此,文中所提出的方法确实能有效减少导线截面积,提高经济性。此外,从表2还可以看出,随着导线截面的逐渐增大,平准化度电成本 $C_{LOCE}$ 也是呈现

表2 导线截面优化设计结果  
Table 2 Optimal design results of cross-section for lines

标准截面/ mm <sup>2</sup>	年成本/ 万元	年投资费用/ 万元	年网损费用/ 万元	载流量越限率/%	弃风率/%	$C_{LCOE}/$ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
70/40	129.10	79.63	49.48	17.71	9.90	0.552 7
95/55	126.89	82.81	44.08	8.33	3.51	0.515 9
120/20	129.30	89.18	40.12	2.08	0.46	0.500 1
150/35	127.51	95.55	31.96	0	0	0.497 8
185/45	127.40	101.92	25.48	0	0	0.497 7
240/30	130.72	111.48	19.24	0	0	0.497 8
300/25	142.78	127.40	15.38	0	0	0.497 9
400/35	155.37	143.33	12.04	0	0	0.498 1

出先减小后增大的趋势,2×LGJ-185/45 是使平准化度电成本最低的导线截面,此时的平准化度电成本为 0.497 7 元/(kW·h)。

值得注意的是,上述结论仅当导线造价达到一定水平后才成立。例如当风电场装机容量为 160 MW,送出线路电压等级为 110 kV,采用单分裂导线,单回路架空架设时,由于 110 kV 相对 220 kV 导线造价更低,此时影响年成本的主要因素为线路网损,得到的结论也是单调的,即在一定程度上选择越大截面的导线所带来的经济效益越高。故在采用文中提出方法时需要综合考虑风电场的装机容量、送出线路电压等级、导线分裂数及导线回路数等工程实际参数。

综上,利用文中提出的陆上风电场送出线路导线截面优化设计方法,可以根据电力系统电储能设备的配置情况和调峰能力,选择合适的载流量越限率和弃风率,满足电网运行的不同需要,这也体现了该方法的灵活性。算例结果也表明有必要根据风电场的出力特性和架空导线动态载流量特性,提出科学合理的设计方法,进一步提高导线截面选择的科学性和经济性。

#### 4 结语

文中提出一种适用于陆上风电场架空送出线路导线截面设计的优化方法,通过算例分析验证了所提出的方法,并得出以下结论:

(1) 提出的方法能够综合考虑线路动态增容效应和风电场出力特性的匹配,充分挖掘架空线路功率输送潜力,提高导线截面选择的经济性。

(2) 相比传统方法,采用文中所提出方法选择的导线截面能够降低所用导线的截面积,节省导线材料,提高电气设计选型的经济性。

(3) 利用文中方法,电力工程设计人员可以根据电力系统电储能设备的配置情况和调峰能力,选择合适的载流量越限率和弃风率,得到不同情况下的线路导线截面以满足电网运行的不同需要。

(4) 同时本方法在实际应用过程中,仍可依照安全性需求,根据工程范围大小对风速和环境温度做保守处理,或者对计算得到的动态载流量数值做保守处理。例如可以结合利用所提出方法得到的设计结果,根据需要选择更高级别的导线截面,这也体现了该方法的灵活性。

#### 参考文献:

- [1] 周海松,陈哲,张健,等. 应用气象数值预报技术提高输电线路动态载流量能力[J]. 电网技术,2006,40(7):2175-2178.  
ZHOU Haisong, CHEN Zhe, ZHANG Jian, et al. Application of meteorological numerical forecast technology for improving transmission line capability[J]. Power System Technology, 2006, 40(7):2175-2178.
- [2] 张斌,林章岁,叶荣,等. 随环境条件变化的输电线路送容量概率建模研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(12):46-52.  
ZHANG Bin, LIN Zhangsui, YE Rong, et al. Probabilistic modeling of transmission capacity of transmission lines with changing environmental conditions [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(12):46-52.
- [3] 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.
- [4] 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(1):116-121.  
FAN Jingyi, MAO Anjia, LIU Yan, et al. Analysis of the short-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1):116-121.
- [5] 王天正,朱石晶,郭瑞宙,等. 山西平鲁败虎堡风电场并网线动态载流量研究[J]. 电网技术,2016,40(5):1400-1405.  
WANG Tianzheng, ZHU Shijing, GUO Ruizhou, et al. Study on dynamic line rating of baihubao wind farm outgoing lines [J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1400-1405.
- [6] JIASHEN T, IAN C. Reliability impact of dynamic thermal rating system in wind power integrated network[J]. IEEE Transactions on Power Reliability, 2016, 65(2):1081-1089.
- [7] CARL J W, YALIN H, LENNART S. Impact from dynamic line rating on wind power integration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1):343-350.
- [8] 秦佳南,房岭峰,盛戈皞,等. 基于风机功率和导线载流特性动态匹配的风电场出线增容[J]. 高压电器,2015,51(6):9-19.

- QIN Jianan, FANG Lingfeng, SHENG Gehao, et al. Wind farm outgoing transmission line dynamic rating based on dynamic matching of wind turbine power characteristic and conductor permissive carrying current[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6):9-19.
- [9] IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors; IEEE Standard 738—2006[S]. 2006.
- [10] CIGRE. The thermal behavior of overhead conductors[J]. Electra, 1992(10):107-125.
- [11] 100~750 kV 架空输电线路设计规程: GB 50545—2010[S]. 2010.  
Code for designing 110~750 kV overhead transmission line; GB 50545—2010[S]. 2010.
- [12] 张介, 马赟, 张旭鹏, 等. 基于聚类分析方法的风电场日前功率预测研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(1):42-46.  
ZHANG Jie, MA Yun, ZHANG Xupeng, et al. Research on day-ahead power forecast of wind farm based on cluster analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(1):42-46.
- [13] 茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22):80-86.  
MAO Jingfeng, WU Bowen, WU Aihua, et al. Maximum power tracking adaptive robust control for wind power systems [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22):80-86.
- [14] 黄国栋, 许丹, 丁强, 等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15):162-170.  
HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. A review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):162-170.
- [15] 陈宁, 薛禹胜, 丁杰, 等. 利用空间相关性的超短期风速预测[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12):124-130.  
CHEN Ning, XUE Yusheng, DING Jie, et al. Ultra-short term wind speed prediction using spatial correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):124-130.
- [16] 陶玉波, 陈昊, 秦晓辉, 等. 短期风电功率预测概念和模型与方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5):7-13.  
TAO Yubo, CHEN Hao, QIN Xiaohui, et al. A review of the short-term wind power forecasting theory, model and approach [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):7-13.
- [17] 吴霜, 季聪, 孙国强. 基于 CUDA 技术的海量电力负荷曲线聚类算法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4):65-70.  
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang. A clustering algorithm based on CUDA technology for massive electric power load curves [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):65-70.
- [18] 韩晓燕, 黄新波, 赵小惠, 等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5):92-96.  
HAN Xiaoyan, HUANG Xinbo, ZHAO Xiaohui, et al. Preliminary study on morgan transmission capacity simplified formula of transmission Lines [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2009, 21(5):92-96.

## 作者简介:



张成伟

张成伟(1992),男,硕士,助理工程师,从事电力规划设计,电力需求响应和电力市场等方面研究工作(E-mail: alex191x@163.com);

林瑞宗(1966),男,硕士,高级工程师,从事电力规划设计,电力技术经济工程造价分析等方面研究工作;

张宁宇(1985),男,博士,高级工程师,从事电力系统优化与运行、FACTS技术、海上风电并网技术相关工作。

## Cross-section optimization method of overhead transmission lines for onshore wind farms considering dynamic ampacity increasing

ZHANG Chengwei<sup>1</sup>, LIN Ruizong<sup>1</sup>, ZHANG Ningyu<sup>2</sup>

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Fujian 350012, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Currently, the cross-section optimal design of overhead transmission lines for wind farms is on the basis of typical environmental parameters, which neglects the dynamic changes of weather conditions (like wind speed) and still has potentials to dig out transmission capability. In order to furtherly optimize the cross-section, this paper establishes mathematical model to characterize the optimal cross-section design process of overhead transmission lines for onshore wind farms and proposes an method which can be applied to optimize the cross-section design of overhead transmission lines. In which, the cross-section of transmission lines is designed and selected optimally considering the match between dynamic ampacity increasing of overhead transmission lines and wind turbine output characteristics on the basis of regional historical meteorological data. Finally, the proposed method is verified by case study. Results indicates that the proposed method efficiently decreases the cross-section of transmission line, saves wire material and improves economic performance of electrical design for land wind farms.

**Keywords:** dynamic ampacity; morgan formula; overhead transmission line; cross-section optimization of transmission line

(编辑 钱悦)