

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.022

输电线路带电跨越封网施工用绳索的选型算法

李文斌¹, 陈亦², 李晓斌², 谢志勇¹, 周方¹

(1. 广东省输变电工程有限公司, 广州 510160; 2. 广东电网有限责任公司江门供电局, 江门 529000)

摘要: [目的]为解决承载索在输电线路带电跨越封网施工过程中因选型不合适而发生断线的问题,基于架空线机械性能力学计算方法,提出了一种承载索的选型算法,使施工安全且高效。[方法]首先,对绳索材料的抗拉强度、伸缩率和单位长度重量进行对比,确定了承载索的材料,即迪尼玛绳;然后以架空线空间力学平衡方程为基础,推导了承载索的力学计算模型;最后,通过力学计算模型提出了承载索的选型算法。[结果]以阿克苏库车750 kV变电站送出工程为实例,运用承载索选型算法选出的承载索满足施工要求。[结论]验证结果表明提出的承载索的选型算法可行,可为实际应用提供指导。

关键词: 输电线路带电跨越; 封网施工用承载索; 选型算法; 力学计算; 迪尼玛绳

中图分类号: TM7; TM752

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0137-07

Selection Algorithm of Ropes for Power Transmission Lines Crossing the Sealing Network

LI Wenbin¹, CHEN Yi², LI Xiaobin², XIE Zhiyong¹, ZHOU Fang¹

(1. Guangdong Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510160, China;

2. Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Jiangmen 529000, China)

Abstract: [Introduction] In order to solve the problem that the supporting cable is disconnected due to improper selection during the construction of the transmission line across the sealing network, based on the mechanical calculation method of the mechanical performance of the overhead line, a selection algorithm of the supporting cable is proposed to make the construction safe and efficient. [Method] Firstly, the tensile strength, expansion ratio and weight per unit length of the rope material were compared, and the material of the supporting cable, namely Dyneema rope, was determined; Then based on the equilibrium equation of overhead space mechanics, the mechanical calculation model of the bearing cable was derived; Finally, the selection algorithm of the supporting cable was proposed by the mechanical calculation model. [Result] Taking the Aksuku 750 kV substation delivery project as an example, the supporting cable selected by the supporting cable selection algorithm satisfies the construction requirements. [Conclusion] The verification results show that the proposed selection algorithm of the supporting cable is feasible and can provide guidance for practical application.

Key words: charge span of transmission line; supporting cable for sealing net construction; selection algorithm; mechanical calculation; dyneema rope

输电线路跨越施工分为带电与停电两种,由于停电施工会造成巨大损失,现跨越施工多采用带电

跨越^[1-4]。封网跨越具有适用范围广泛的优点,在带电跨越中被普及应用^[5-6]。承载索作为封网跨越中的关键结构,其选型直接关乎带电跨越封网施工的安全^[7-8]。

目前,封网施工用承载索的选型方法有两种,分别是通过施工经验和工程算法选取。其中,施工经验选取通常只适用于已存在类似的案例且已

收稿日期: 2019-02-19 修回日期: 2019-06-05

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目“超特高压架空线路立塔、放线、交叉跨越等施工技术研究”(GDKJXM20172912)

安全完成了施工过程的工程,因此,其在实际工程中的应用受到限制很大^[9-11]。工程算法这一方法在现今的封网跨越中应用非常广泛,均依据状态方程求出承载索在空载、静载以及动载状态下的水平张力 T ,以求出的水平张力 T 并考虑安全系数选取合适的承载索。文献[12-15]提出的局部封网承力索受力计算分析方法,仅考虑了承载索的空载、静载和动载状态,没有考虑到工况对承载索三种状态的影响;文献[16-18]提出的承载索计算方法,直接选取了承载索的材料为迪尼玛绳,存在没有对绳索材料进行研究的问题。综上所述,现有的封网跨越承载索选型方法均不够完善,考虑到的因素不全,选出来的封网跨越承载索存在不能满足施工要求的问题。

为此,提出了基于架空输电线路导线机械性能力学计算方法的承载索选型算法。首先选定承载索材料为迪尼玛绳,然后以满足承载索对被跨越线路电气安全距离以及施工所需强度为依据,分析了承载索在各种工况以及各种受力状态下的弧垂 f 以及张力 T ,最后确定出承载索的型号。

1 承载索及其选型

输电线路带电跨越施工是指在不影响被跨越线路带电运行的情况下,采用搭设绝缘防护设施实现新建输电线路的架线工作^[19]。封网跨越是输电线路带电跨越的一种施工方式,它的组成结构有临时横担、封网装置、承载索和放线滑车等,在施工过程中,封网装置与承载索下方相连,而承载索一端与临时横担相连,另一端与放线滑车相连,能够切实有效的完成带电跨越这一目标。相对于常规线路施工而言,其难点在于要求在运行中的带电线路之上进行张力放线。因此,必须在被跨越线路的两侧铁塔上搭设临时横担,并与承载索、封网装置以及放线滑车连接起来,构成完整的封网跨越施工结构,以保证被跨越线路与施工过程中各类物体之间满足电气安全距离^[20-22]。

承载索是封网跨越中的主要结构之一,在输电线路带电跨越封网施工中,如果承载索因为强度不够,发生断索事故,会使新建线路与被跨越线路导线产生碰撞接触,影响到施工的安全以及效率,因此承载索的优化选型是保证输电线路带电跨越封网施工安全性及高效性的关键技术。

考虑到带电跨越封网施工的安全问题,承载索要保证施工时不会发生断线问题,需要满足张力要求,故其参考破断力要大;承载索如果与被跨越线路距离过近会发生电力事故,故需要满足安全距离,其弧垂需较小,即承载索的伸缩率要小。另外,基于对施工效率考虑,较轻的绳索更易于施工,提高施工效率,故承载索的单位长度重量要轻。综上所述,承载索的选型要求为参考破断力大、伸缩率小及单位长度重量轻。

基于对承载索选型要求的分析,对承载索的选型进行研究,将承载索的选型分为材料与规格两步。

首先,基于带电跨越封网施工所需承载索的要求,对绳索材料的抗拉强度、伸缩率和单位长度重量进行比较,选出承载索的材料^[23]。

承载索材料选定后,只需确定承载索的规格,即直径,就可以完成带电跨越封网施工所需承载索的选型。关于承载索规格的选取,考虑到承载索要满足施工张力要求,本文采用参考破断力 T_p 作为参考量,通过计算承载索的张力,并考虑承载索安全系数,来选取合适的承载索规格。

通过对相关现场实验资料分析,利用孤立档公式来计算跨越档张力,所得到的结果误差率一般不大于5%,能够满足工程的需要,故采用孤立档公式来计算张力。

在对承载索张力计算的过程中,会用到承载索本身的弹性模量 E 、自身重量 w 、有效截面积 S 等量,因此可以假定一种规格的所选承载索材料作为承载索,以方便计算。然后基于架空输电线路导线力学计算方法^[24],通过确定荷载 q 、允许弧垂 f 以及控制条件 F 等量来求出承载索承受张力 T ,最后验算初选承载索是否满足张力要求。

2 承载索选型算法

对承载索的选型算法进行研究,将承载索的选型分为材料与规格两步,首先通过对绳索材料性能对比选取承载索的材料,然后初选一个承载索规格,再之后通过确定荷载 q 、允许弧垂 f 、以及控制条件 F 等量来求出承载索承受张力 T ,最后验算初选承载索是否满足张力要求。

2.1 承载索材料选择

在封网跨越施工中,承载索分为绝缘段和非绝

缘段。其中, 在跨越档内因为需要带电跨越施工, 故在跨越档内, 选用以绝缘材料加工合成的绳索作为承载索; 而在非跨越档, 选用以非绝缘材料加工合成的绳索作为承载索, 通常采用圆股钢丝绳。本文主要对跨越档内, 即承载索绝缘段进行选型研究。

市场上的绝缘材料有很多种, 如锦纶、涤纶、丙纶、乙纶以及迪尼玛纤维等。而考虑到在封网跨越施工过程中, 施工安全以及施工效率的问题, 对市场多种绝缘材料绳索进行对比, 结果如表1所示。

表1 各种绝缘材料绳索的综合应用性能评价

Tab. 1 Comprehensive application performance evaluation of various insulation ropes

| 名称 | 重量 ^① | 重量 ^② | 直径 | 耐磨 | 耐候 | 高温 | 低温 | 蠕变 | 价格 | 其他 | 评价 |
|------|-----------------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| 涤纶 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 锦纶6 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 2 | 3 | 2.5 |
| 锦纶66 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 乙纶 | 1 | 5浮 | 1 | 2 | 5 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 1.5 |
| 丙纶 | 2 | 5浮 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 3 | 5 | 3 | 2 |
| 芳纶 | 4 | 3 | 4 | 4 | 0 | 4 | 2 | 5 | 0 | 1 | 1 |
| 迪尼玛 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0 | 5 | 1 | 0 | 5 | 5 |

注: ①指空气中的重量; ②指水中的重量综合评价越高说明绳索的适用性越强。

由表1数据分析可知, 迪尼玛绳的抗拉强度高, 可以有效地防止在封网跨越施工中发生断线事故, 以保障施工人员以及电力设备的安全; 迪尼玛绳的伸缩率小, 相同直径的迪尼玛绳与其他绳相比, 在承受相同的张力的条件下, 绳索的伸长量更小, 减小了弧垂, 更能满足与被跨越线路之间的安全距离; 迪尼玛绳的单位长度重量轻, 可以减少封网施工难度, 提高劳动效率。故最终选定采用迪尼玛绳作为绝缘段承载索。

2.2 承载索规格选择

通过计算承载索在各工况下的最大张力来确定承载索的规格, 承载索张力计算思路如下所示:

1) 确定荷载 q 。通过推导出承载索在空载、静载、动载状态下的荷载计算公式, 以及代入新建线路情况和假定承载索的自身属性数据, 计算出承载索在三种运行状态下的荷载。

2) 确定跨越点处的允许弧垂 f 。根据推导出的

弧垂公式以及承载索对被跨越线路的电气安全距离, 计算出跨越点处承载索的允许弧垂。

3) 确定控制条件 F 。首先根据线路运行状态求出最大限定张力以及最小限定张力, 然后根据控制条件 F 与限定张力之间的关系, 求出承载索的最小允许张力 F_a 与最大允许张力 F_b , 其中 $F_a \leq F \leq F_b$, 选取一个折中的 F 值作为控制条件。

4) 确定以及校验张力 T 。根据控制条件 F 、推导出的线长公式以及孤立档架空线基本状态方程式, 推导出新的承载索状态方程式, 计算出承载索在空载、静载、动载三种状态下的最大张力 T 。通过承载索安全系数以及假定承载索的参考破断力 T_p 判断假定承载索是否满足张力要求。若满足, 则假定承载索就为封网跨越所需要的承载索; 若不满足, 则另选一参考破断力 T_p 更大的承载索为假定承载索重复以上步骤, 直至假定承载索满足张力要求。

2.2.1 荷载的确定

承载索在各工况下的运行状态有3种, 分别为空载状态、事故状态和安全放线状态, 主要对空载状态以及事故状态进行分析, 确定两种状态下荷载 q , 为后文允许弧垂 f 的求取奠定了基础。

1) 空载状态

承载索在空载状态下的荷载计算由单根承载索总重量、线路档距决定, 具体公式为:

$$q_0 = \frac{1}{2} \frac{(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n)}{l} \cdot g \quad (1)$$

2) 事故状态

承载索事故状态下的荷载, 要按其其在事故状态下最危险的一种情况来确定, 即导线掉落封网装置上, 滑落封网装置的那一部分的最低点与被跨越线路刚好保持最小电气安全距离。在封网跨越施工过程中, 要确保被跨越线路在事故状态下能安全运行, 所以考虑导线在事故状态下的状态非常重要, 特别是动载状态下的运动状态。导线在动载状态时, 是以类似架空线模数 K 的曲线形状作类似于自由落体的运动。导线在动载状态下的运动状态可以分为两步, 第一步是导线断线下落但未碰触到封网装置, 在这个过程中, 导线的形状不断发生改变, 即导线的 K 值在逐渐变化; 第二步则是导线断线坠落与封网装置碰触后, 导线以类似承载索的形状向下作自由落体运动, 在

此过程中导线与承载索有近似的 K 值。导线与承载索在碰撞结束后达到静止, 则此时承载索处于静载状态。计算承载索在动载状态下的荷载比较复杂, 为了使计算更简便, 使承载索在动载以及静载状态下的假设保持一致, 且取导线掉落封网装置的冲击系数为 K_d 。

事故状态下, 承载索在跨越档内承受非均布荷载, 依据架空线非均布荷载力学计算公式对其进行力学分析, 其受力分析图如图 1 所示。

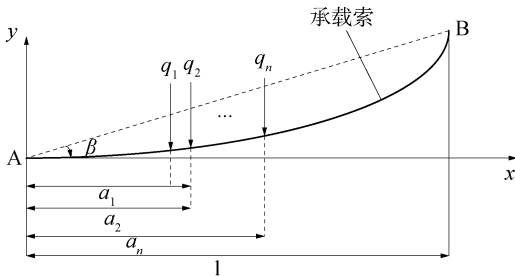


图 1 单根承载索的受力分析图

Fig. 1 Stress analysis diagram of single bearing cable

第一点的荷载为:

$$q'_1 = q_0 + \frac{1}{2} \cdot K_d \cdot K_h \cdot n \cdot \left(\sigma_0 \text{tg}\beta_1 + \frac{\gamma a_1}{2 \cos\beta_1} \right) \cdot A \quad (2)$$

第二点荷载为:

$$q'_2 = q_0 + \frac{1}{2} \cdot K_d \cdot K_h \cdot n \cdot \gamma (a_2 - a_1) \cdot A \quad (3)$$

.....

在第 n 点荷载为:

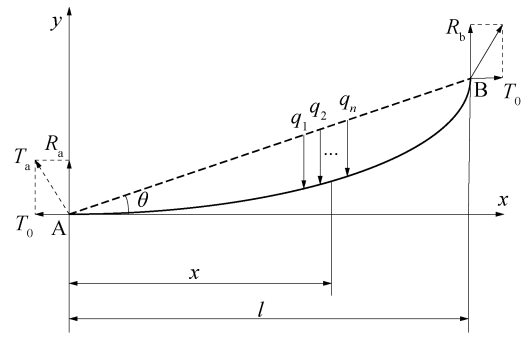
$$q'_n = q_0 + \frac{1}{2} \cdot K_d \cdot K_h \cdot n \cdot \left(\sigma_0 \text{tg}\beta_2 + \frac{\gamma (l - a_n)}{2 \cos\beta_2} \right) \cdot A \quad (4)$$

式中: A 为导线的截面积; n 为分裂导线数; K_h 为导线的偏心系数, 取值为 1.2; K_d 为导线冲击荷载系数, 动载状态下取 $K_d = 1.67$, 静载状态下取 $K_d = 1$; β_1 为承载索第一小段内的高差角; β_2 为承载索最后一小段内的高差角。

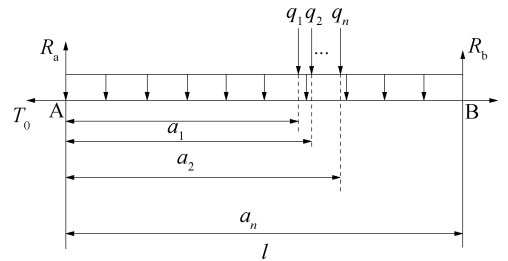
2.2.2 允许弧垂的确定

对各工况下空载状态及事故状态下的允许弧垂 f 进行计算, 为后文确定出满足施工原则的控制条件 F 的求取提供了数据参考。

非均布荷载作用下, 承载索的受力情况如图 2 所示。



(a) 正视图



(b) 俯视图

图 2 承载索受力分析简图

Fig. 2 Schematic diagram of bearing cable stress analysis

当 $a_{i-1} \leq x \leq a_i$ 时, 分别对悬点 B 以及 x 处列力矩平衡方程:

$$R_a l + T_0 l \text{tg}\theta - \sum_{m=1}^n q_m (l - a_m) - p_0 l \cdot \frac{l}{2} = 0 \quad (5)$$

$$R_a x + T_0 y - \sum_{j=1}^{i-1} q_j (x - a_j) - p_0 x \cdot \frac{x}{2} = 0 \quad (6)$$

联立式(5)和式(6)消去 R_a , 则有:

$$y = x \text{tg}\theta + \frac{l \sum_{j=1}^{i-1} q_j (x - a_j) - x \sum_{m=1}^n q_m (l - a_m) - \frac{p_0 l x (l - x)}{2}}{T_0 l} \quad (7)$$

又由弧垂的定义以及式(7)可知, 任意一点 x 处的弧垂为:

$$f_x = x \text{tg}\theta - y = \frac{x \sum_{m=1}^n q_m (l - a_m) - l \sum_{j=1}^{i-1} q_j (x - a_j) + \frac{p_0 l x (l - x)}{2}}{T_0 l} \quad (8)$$

式中: f_x 为承载索在事故状态时任意一点 x 处的弧垂; T_0 为承载索在事故状态时的水平张力。

2.2.3 控制条件的确定

确定各工况下的控制条件 F , 为后文通过状态

方程求取并验证张力 T 提供了条件。

承载索在施工过程中不仅要满足绳索的强度要求,而且要满足其弧垂最低点到被跨越线路之间的电气安全距离,故存在控制条件使其满足以上两个要求。

在事故状态下,承载索与被跨越带电线路之间存在一个最小的电气安全距离,故承载索存在最小限定张力;并且承载索需要能满足强度要求,不发生断线事故,故承载索存在最大限定张力。

根据两个最大限定张力值并运用下式,可计算出两种限定条件下的 F 值:

$$F_n = \frac{K_n}{T_{0n}^2} - T_{0n} - \alpha E t_n \cos \beta \quad (9)$$

将计算所得的两个限定值作为边界值,从两者之间选取一个 F 值作为控制条件。

2.2.4 张力的确定与校验

求取出各工况下空载及动载状态下的张力 T ,并对两种状态下的最大张力 T_{\max} 进行校验,判断初选承载索是否合适。

承载索基本状态方程为:

$$L_2 - L_1 = \frac{l_1}{ES \cos^2 \beta} (T_2 - T_1) + \frac{\alpha l_1}{\cos \beta} (t_2 - t_1) \quad (10)$$

又知,跨越档内线长可以写成如下形式:

$$L = \frac{l}{\cos \theta} + \frac{p^2 l^3 \cos \theta}{24 T_0^2} \quad (11)$$

式中: l 、 θ 分别为档距和悬挂点间的高差角; p 为承载索单位长度荷载。

将上式中的 L_1 、 L_2 用线长公式代入,得到承载索的张力状态方程式为:

$$T_2^2 \left\{ T_2 + \left[\frac{K_1}{T_1^2} - T_1 + \alpha E \cos \beta (t_2 - t_1) \right] \right\} = K_2 \quad (12)$$

从式(12)可以看出,为了求解出承载索在未知状态下的水平张力 T_2 ,必须要计算出承载索在两种状态下的线长系数 K 。利用线长公式(11),可推导出承载索的线长系数为:

$$K = \frac{p^2 l^2 E S \cos^3 \beta}{24} \quad (13)$$

用折中的 F 值作为控制条件求解任意状态 n 下的承载索张力。式(12)可以改写为:

$$T_{0n}^2 \{ T_{0n} + [F + \alpha E t_n \cos \beta] \} = K_n \quad (14)$$

通过式(14)可求得承载索在各种工况下空载状态和事故状态时的张力值,通过比较选取其中最大的张力值 T_{\max} 对承载索进行校验。

$$\frac{[T]}{T_{\max}} = k \quad (15)$$

式中: $[T]$ 为承载索的容许张力; T_{\max} 为承载索在各条件下所受的最大张力; k 为承载索的安全系数,根据施工规程,此处取值 $k=6$ 。

若通过式(15)求得的容许张力 $[T]$ 小于或等于参考破断力 T_p ,则假定承载索为封网跨越施工所需要的承载索;若大于,则另选一参考破断力 T_p 更大的承载索为假定承载索重复以上步骤,直至假定承载索满足张力要求。

3 算例验证及其结果分析

在提出承载索选型算法后,选取了一个工程实例,运用承载索的选型算法,确定出了该工程封网跨越所需的承载索型号。

3.1 参数设置

对阿克苏库车 750 kV 变电站送出工程进行算例分析,其主要参数为:交叉跨越角 42° ,被跨越线路规程规定安全距离 3.6 m,新建线路导线型号 LGJ400/35,档距 l 为 370 m 等。具体参数如表 2~表 4 所示。

表 2 计算用气象条件

Tab. 2 Meteorological conditions for calculation

| 项目 | 气温/ $^\circ\text{C}$ | 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 覆冰厚度/mm |
|--|----------------------|---------------------------------------|----------------|
| 最低气温 | -10 | 0 | 0 |
| 年均温 | 15 | 0 | 0 |
| 基本风速 | -5 | 30 | 0 |
| 覆冰 | -5 | 10 | 导线 5 地线 10 |
| 最高温 | 40 | 0 | 0 |
| 安装 | -5 | 10 | 0 |
| 雷电过电压 | 15 | 10 | 0 |
| 操作过电压 | 15 | 15 | 0 |
| 验算覆冰 | -5 | 10 | 导线 20 地线 25 |
| 冰的密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 0.9 | — | — |

表 3 被跨越线路参数

Tab. 3 Crossed line parameters

| 参数类型 | 参数值 |
|--------------|------|
| 被跨越处线路对地高度 | 22.5 |
| 顺新建线路方向跨越点距离 | 113 |
| 交叉跨越角 | 42 |

| 参数类型 | 参数值 |
|-------------|-----------|
| 高差角 | 0 |
| 规程规定安全距离 | 3.6 |
| 对地安全距离(最高温) | 16.91 |
| 对地安全距离(最低温) | 17.75 |
| 对地安全距离(安装) | 17.55 |
| 对地安全距离(最大风) | 18.024 21 |

表4 新建线路参数
Tab. 4 New line parameters

| 参数类型 | 参数值 |
|----------------|------------|
| 导线型号 | LGJ-400/35 |
| 档距/m | 370 |
| A塔侧导线挂点对基准面高/m | 47 |
| B塔侧导线挂点对基准面高/m | 50.8 |

3.2 结果分析

运用承载索选型算法对该工程实例进行计算,初选 $\Phi 16$ 的迪尼玛绳(参考破断力 T_p 为211 kN)为假定承载索,计算出承载索在各种工况下的 F 值如表5所示。

表5 承载索在各种工况下的 F 值

Tab. 5 F value of the load cable under various working conditions

| 项目 | 最低温 | 最大风 | 安装情况 | 最高温 |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 气温/ $^{\circ}\text{C}$ | -10 | -5 | -5 | 40 |
| 最大限定张力/kN | 58.8 | 58.8 | 58.8 | 58.8 |
| 最小限定张力/kN | 29.6 | 31.9 | 29.8 | 29.6 |
| F_a /kN | 22.153 | 28.721 | 23.525 | 22.252 |
| F_b /kN | 163.691 | 150.034 | 161.268 | 163.439 |

由表5可知, F 值的选定范围由28.721 kN到150.034 kN,选定 F 值为100 kN,则承载索在各种工况下的张力值如表6所示。

表6 承载索在各种工况下的张力值

Tab. 6 Tension values of load-bearing cables under various working conditions

| 项目 | 气象条件 | 空载张力/kN | 静载事故张力/kN | 动载事故张力/kN |
|-----|------|---------|-----------|-----------|
| 工况1 | 最低温 | 4.825 | 20.549 | 27.165 |
| 工况2 | 最大风 | 9.156 | 22.165 | 29.138 |
| 工况3 | 安装 | 5.158 | 20.649 | 28.463 |
| 工况4 | 最高温 | 4.933 | 20.615 | 27.548 |

由表6可知,承载索在4种工况下的最大张力

均小于 $\frac{T_p}{k} = \frac{211 \text{ kN}}{6} = 35.167 \text{ kN}$,故初选的承载索型号符合要求。

通过对工程实例进行选型算法计算,成功的选择出来了该工程适用的承载索型号,证明此选型算法准确且可行。

4 结论

1)对比各绝缘绳索材料,选出合适的承载索材料,并在已有工程算法的基础上,考虑承载索在多种工况下的运动状态,提出了输电线路带电跨越封网施工用承载索的选型算法。

2)以阿克苏库车750 kV变电站送出工程这一封网跨越工程实例对承载索选型算法进行验证,验证结果表明文中提出的封网跨越承载索选型算法可行,对指导封网跨越工程实际具有一定的作用。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 加快建设坚强国家电网促进中国能源可持续发展[J]. 电力建设, 2006(10): 1-3.
LIU Z Y. Accelerating the construction of a strong national grid to promote the sustainable development of China's energy [J]. Electric Power Construction, 2006(10): 1-3.
- [2] 强洪涛. 浅谈我国特高压输电技术的发展趋势[J]. 科技信息(科学教研), 2008(24): 305+277.
- [3] CASTRO R D. Overview of the transmission line design process [J]. Electric Power Systems Research, 1995, 35(2): 109-118.
- [4] 郑明, 王长虹. 海上风电场输电方式研究[J]. 南方能源建设, 2018, 5(2): 99-108.
ZHENG M, W C H. Research on transmission mode of offshore wind farms [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 99-108.
- [5] 钟杰峰, 陈丽萍, 袁康龙, 等. 多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 38-45.
ZHONG J F, CHEN L P, YUAN K L, et al. Current status and application prospects of multi-terminal flexible DC transmission technology [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 38-45.
- [6] 肖宇. 输电线路工程人力运输与索道运输费用比较[J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 167-171.
XIAO Y. Comparison of manpower transportation and ropeway transportation cost of transmission line engineering [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 167-171.
- [7] 李振东, 马洪波. 无跨越架带电跨越施工技术应用[J]. 东北电力技术, 2009, 30(10): 1-6.

- LI Z D, MA H B. Application of the technology of crossing spanning without crossing frame [J]. Northeast Electric Power Technology, 2009, 30(10): 1-6.
- [8] 李知韦, 辛彪. 电力施工安全管理研究 [J]. 现代经济信息, 2011(12): 40.
- LI Z W, XIN B. Research on safety management of electric power construction [J]. Modern Economic Information, 2011(12): 40.
- [9] 陈建社, 江义勇. 输电线路带电封网跨越施工技术探究 [J]. 科技创新与应用, 2016(6): 169-170.
- CHEN J S, JIANG Y Y. Study on the construction technology of the power-sealed network across transmission lines [J]. Science & Technology Innovation and Application, 2016(6): 169-170.
- [10] 翁思端. 输电线路架线施工中迪尼玛绳封网跨越技术的应用 [J]. 江西电力, 2008(1): 33-35.
- WENG Z D. Application of dyneema rope sealing technology in transmission line construction [J]. Jiangxi Electric Power, 2008(1): 33-35.
- [11] 曾元俏. 迪尼玛绳在梧万线跨越西江架线中的应用 [J]. 广西电业, 2007(5): 62-64.
- ZENG Y Q. The application of dini code rope in the crossing of the Xijiang line in the wanwan line [J]. Guangxi Electric Power, 2007(5): 62-64.
- [12] 栾勇. 无跨越架跨越施工局部封网承力索受力计算分析 [C]// 中国电力企业联合会. 第四届全国架空输电线路技术交流研讨会论文集. 济南: 中国电力企业联合会科技开发服务中心, 2013: 300-306.
- [13] 孙晓伟. 大档距带电跨越架线施工方法 [J]. 现代经济信息, 2018(17): 367.
- SUN X W. Construction method of large span distance electrified spanning line [J]. Modern Economic Information, 2018(17): 367.
- [14] 詹满生. 浅谈输电线路无跨越架封网跨越高架桥施工 [J]. 江西建材, 2017(20): 208.
- ZHAN M S. Discussion on the construction of transmission bridge crossing spanning bridge without crossing frame [J]. Jiangxi Building Materials, 2017(20): 208.
- [15] 何伏生. 无跨越架跨越架线施工在跨越公路桥梁施工中的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2017(20): 98-100.
- HE F S. Application of cross-over construction of cross-over frames in cross-road bridge construction [J]. China's New Technology and New Products, 2017(20): 98-100.
- [16] 戚柏林. 220 kV 线路工程跨越 110 kV 电力线封网解决方案 [J]. 电力与能源, 2017, 38(5): 495-500.
- QI B L. 220 kV line project spans 110 kV power line sealing network solution [J]. Electric Power and Energy, 2017, 38(5): 495-500.
- [17] 赵维, 黄成云, 罗本壁, 等. 特高压跨越施工封网结构力学分析 [J]. 东北电力技术, 2017, 38(4): 1-5.
- ZHAO W, HUANG C Y, LUO B B, et al. Mechanical analysis of the structure of UHV spanning construction sealing network [J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(4): 1-5.
- [18] 林楚标. 高压线路带电跨越封网施工技术 [J]. 中国电业 (技术版), 2015(7): 57-60.
- LIN C B. Construction technology of powered crossing sealing network for high voltage lines [J]. China Electric Industry (Technical Edition), 2015(7): 57-60.
- [19] 杨军, 郑乔, 谢丽霞, 等. 一种机械式带电跨越保护装置的设计与力学分析 [J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2017, 9(5): 454-459.
- YANG J, ZHENG Q, XIE L X, et al. Design and mechanical analysis of a mechanical charge crossing protection device [J]. Engineering Research-Interdisciplinary Engineering, 2017, 9(5): 454-459.
- [20] 高涛. 输电线路架线施工不停电跨越技术探讨 [J]. 电力安全技术, 2013, 15(2): 12-16.
- GAO T. Discussion on the technology of power transmission line construction without power failure [J]. Electric Power Safety Technology, 2013, 15(2): 12-16.
- [21] 王军, 刘巍, 赵雪松, 等. 跨越带电 220 kV 管母线架设软导线的施工技术 [J]. 电力建设, 2005(5): 43-44 + 52.
- WANG J, LIU W, ZHAO X S, et al. Construction technology for erecting flexible conductors across powered 220 kV pipe busbars [J]. Electric Power Construction, 2005(5): 43-44 + 52.
- [22] 孟遂民, 王爽, 郭昊. 大跨越输电线路导线力学计算软件研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 37-41.
- MENG S M, WANG S, GUO W. Study on mechanical calculation software of guideline of large span transmission line [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2013, 35(2): 37-41.
- [23] 常敏, 胡延军, 王建平. 输电线路工程无跨越架跨越架线技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [24] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

 作者简介:


LI W B

李文斌(通信作者)

1975-, 男, 江西上高人, 高级工程师, 硕士, 主要从事输电线路设计、咨询工作(e-mail)734420932@qq.com。

(责任编辑 李辉)