

基于线性拟合和差值补偿的跳线计算方法研究

李铁鼎¹, 雷雨泽¹, 程述一², 刘文勋¹, 周古月¹

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 以最小二乘法线性拟合和差值补偿法为基础, 对 1000 kV 单回路特高压交流输电线路跳线设计方法进行优化, 提出一种新的跳线安装设计方法, 简化了跳线安装设计流程, 避免了常规“穷举算法”中因输电线路杆塔尺寸、转角度数、绝缘子串长度、绝缘子串倾斜角等边界条件变化产生的“逐塔逐相”反复计算, 有效提升跳线设计工作效率和设计质量。

关键词: 输电线路; 线性拟合; 差值补偿; 特高压交流; 跳线安装设计

中图分类号: TM75 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)01-0006-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.002

Research on Calculation Method of Jumper Based on Linear Fitting and Difference Compensation

Li Tieding¹, Lei Yuze¹, Cheng Shuyi², Liu Wenxun¹, Zhou Guyue¹

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power

Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Based on the least square fitting method and difference compensation method, the jumper design method is optimized for 1000 kV UHVAC single-circuit transmission line. A new design method is put forward to simplify the installation and design of jumpers, which can avoid the repeated calculation of transmission line tower size, rotation degree, length and inclination angle of insulator strings etc because of boundary condition changes in the conventional "exhaustive algorithm". The proposed method can effectively enhance the design efficiency and design quality for jumpers.

Key words: transmission line; linear fitting; difference compensation; UHVAC; jumper installation design

0 引言

耐张塔跳线系统是高压输电线路的重要组成部分, 由硬跳线和软跳线构成。跳线安装必须满足带电部分与杆塔构件的最小间隙、压接工艺及成形美观等要求^[1]。

由于跳线系统较复杂, 跳线设计包含跳线长度 $L_{\text{软}}$ 、跳线弧垂、平视弧垂计算等, 其主要设计边界条件又包含转角度数、耐张串长度、耐张串倾斜角、杆塔尺寸、硬跳线长度等。现有研究成果均需进行逐塔、逐相计算^[2-3], 设计方法、计算过程复杂且施工过程的操作性较差。下面提出一种基于线性拟合和

差值补偿法的 1000 kV 特高压交流输电线路跳线安装设计方法, 有利于提高跳线设计、安装工作效率和工作质量; 减少因杆塔尺寸、串长、串重、转角度数等边界条件变化时带来的重复计算跳线线长工作。

1 理论依据

1.1 最小二乘法原理

已知两变量为线性关系 $y = kx + b$, 实验获得其 n 组含有误差的数据 (x_i, y_i) 。若将这 n 组数据代入方程求解, 则 k 、 b 之值无确定解。最小二乘法其基本思想是拟合出一条“最接近”这 n 个点的直线。在这条拟合的直线上, 各点相应的 y 值与测量值对

应纵坐标值之偏差的平方和最小。根据统计理论，参数 k 和 b 计算公式为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1)$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n x_i y_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2)$$

1.2 相关系数

相关系数 γ 表示数据 (x_i, y_i) 相互联系的密切程度以及拟合所得的线性方程的可靠程度。 γ 的计算公式为

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中 γ 的值在 $-1 \sim +1$ 之间 γ 的绝对值越接近 1 表明 (x_i, y_i) 相互联系越密切，线性方程的可靠程度越高，线性越好。

1.3 跳线计算拟合模型

以 2013 年版《国家电网公司输变电工程通用设计 1000 kV 输电线路分册》^[4] 中的单回路 10A 杆塔模块为计算模型，杆塔示意如图 1 所示。跳线装置的侧视图如图 2 所示。

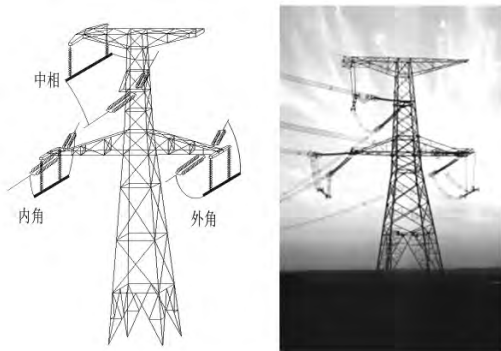


图 1 杆塔示意

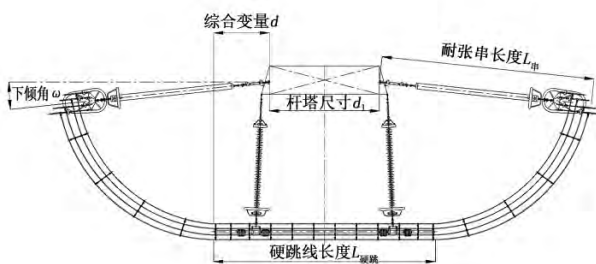


图 2 跳线装置侧视

确定拟合函数相关变量:

1) 确定杆塔尺寸

根据耐张塔结构详图确定耐张串挂点位置及大、小号侧挂点间距离 d_1 。

2) 确定耐张串长度

根据不同污区、冰区的绝缘配置，确定耐张串实际长度 $L_{串}$ 。

3) 确定杆塔尺寸综合变量

由杆塔尺寸 d_1 、硬跳线长度 $L_{硬跳}$ ，确定耐张串挂点与硬跳端部沿线路方向的距离 $d = (L_{硬跳} - d_1) / 2$ 。

4) 确定倾斜角

根据实际定位成果计算耐张串下倾角 ω 。

5) 确定跳线基准长度

根据转角度数 θ 查本标准设计典型边界下的跳线基准长度 L_0 。

6) 计算修正后的实际跳线长度

根据实际耐张塔边界条件和典型边界条件的对比，通过差值补偿公式 $L(\omega, L_{串}, d, L_0) = A(\omega - \omega_0) + B(L_{串} - L_{串0}) - C(d - d_0) + L_0$ 计算出耐张塔实际边界条件下的跳线线长。

2 跳线安装设计要求

1) 跳线型式

1000 kV 特高压交流线路耐张塔跳线由硬跳线部分和软跳线部分组成。硬跳线是由管、棒、角钢、槽钢和金具组成，一般分为铝管式跳线和笼式跳线，目前特高压交流线路一般采用悬挂的笼式跳线；软跳线是由多分裂软导线和金具组成^[5]。

1000 kV 特高压交流线路耐张塔跳线一般采用八分裂形式，呈正八边形排列，分裂间距为 400 mm。

2) 跳线绝缘子串的布置

笼式跳线含两个跳线绝缘子串，两跳线串的间距为 8 ~ 10 m(根据横担宽度和硬跳线长度确定)，跳线串高压侧与骨架钢管连接，低压侧与横担连接，跳线串布置方式如图 2 所示。

3) 跳线间隔棒布置

耐张塔每段软跳线部分安装 3 ~ 4 个跳线间隔棒，其中 1 个间隔棒安装在距离耐张线夹引流板 1.0 m 的位置，另 1 个间隔棒安装在笼式硬跳线出口 1.5 m 的位置，其余间隔棒按剩余软跳线长度等

距离安装。

4) 跳线安装

跳线宜使用未受过张力的导线制作,跳线安装人员不能蹬踩跳线,以保证跳线成形美观。在安装耐张绝缘子串时,必须注意引流板的方向,将其方向调整后再进行压接。

5) 跳线间隙校核

跳线安装时应注意,由于绝缘子及金具等尺寸存在误差,且影响跳线长度的其他因素也较多,实际工程使用应在参考“跳线安装标准设计”的同时,必须保证各种工况下跳线对塔身的电气间隙满足要求。1000 kV 单回路线路电气间隙控制值如表 1 所示。

表 1 电气间隙控制值

海拔/m	工频电压间隙/m	操作过电压间隙/m
500	2.7	5.6
1000	2.9	6.0
1500	3.1	6.4

注:跳线对塔身最小间隙值应不小于表 1 所述控制值的 1.1 倍。

3 跳线设计计算实例

3.1 单回路耐张塔边相跳线安装设计边界条件 边相跳线标准设计的边界条件详见表 2。

表 2 边界条件

边界条件	取值
设计最大风速/($m \cdot s^{-1}$)	27
设计覆冰厚度/mm	15
跳线型号	8 × JL/G1A - 500/45
张力取值/N	150
典型串长 $L_{串}/m$	16.5
典型倾斜角 $\omega_0/(^\circ)$	10
典型杆塔尺寸 d_0/m	5.5

3.2 单回路耐张塔边相跳线安装设计

3.2.1 典型边界条件下的跳线安装表

一型转角塔使用转角度数为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 塔,计算典型边界条件下($\omega_0 = 10^\circ, L_{串0} = 16.5 m, d_0 = 5.5 m$)的跳线线长标准值 L_0 如表 3 所示。由于跳线串倾斜度数较小,跳线串对硬跳线的垂直方向位置影响很小,无需考虑跳线串倾斜情况对跳线线长的影响。

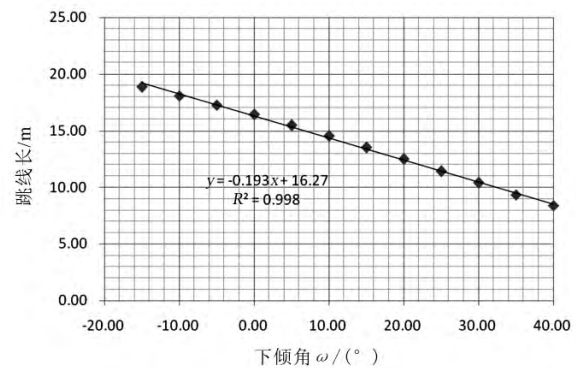
3.2.2 耐张串倾斜角对跳线安装和线长影响

改变耐张塔倾斜角,并保持其他典型边界条件

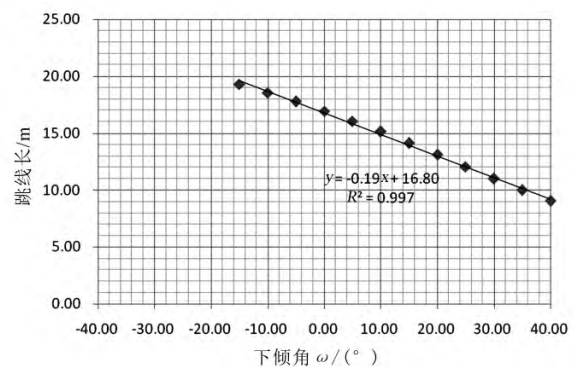
中不变,计算倾斜角 ω 变化对跳线线长的影响,如图 3 所示。

表 3 典型边界条件下的边相跳线线长

转角度数 $\theta/(^\circ)$	内角侧线长标准值 L_0/m	外角侧线长标准值 L_0/m
0	14.82	14.82
1	14.76	14.88
2	14.70	14.94
3	14.64	15.00
4	14.59	15.06
5	14.53	15.12
6	14.48	15.18
7	14.42	15.24
8	14.37	15.31
9	14.32	15.37
10	14.26	15.44



(a) 内角侧



(b) 外角侧

图 3 边相跳线线长与倾斜角关系

以倾斜角 ω 为变量,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合结果如下:

$$\begin{aligned} \text{内角侧 } L(\omega) &= -0.193\omega + 16.27 \\ \text{外角侧 } L(\omega) &= -0.19\omega + 16.8 \end{aligned} \quad (4)$$

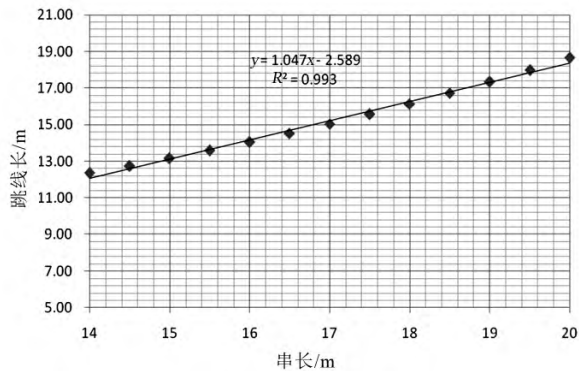
3.2.3 耐张绝缘子串长对跳线安装和线长影响

改变耐张串的长度,保持其他典型边界条件不变,计算耐张串串长变化对跳线线长的影响,如图 4

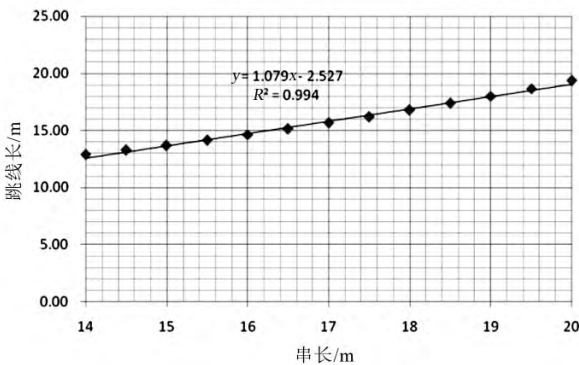
所示。

以耐张串串长 $L_{串}$ 为变量,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合结果如下:

$$\begin{aligned} \text{内角侧 } L(L_{串}) &= 1.047 L_{串} - 2.589 \\ \text{外角侧 } L(L_{串}) &= 1.079 L_{串} - 2.527 \end{aligned} \quad (5)$$



(a) 内角侧



(b) 外角侧

图4 边相跳线线长与串长关系

3.2.4 杆塔尺寸综合变量 d 变化对跳线安装和线长影响

改变杆塔尺寸综合变量 d ,保持其他典型边界条件不变,计算杆塔尺寸综合变量 d 对跳线线长的影响,如图5所示。

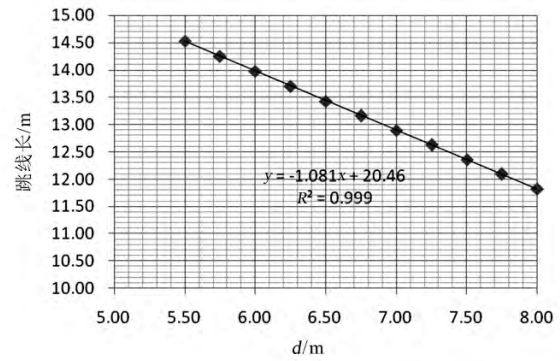
以杆塔尺寸综合变量 d 为变量,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合结果如下:

$$\begin{aligned} \text{内角侧 } L(d) &= -1.081d + 20.46 \\ \text{外角侧 } L(d) &= -1.067d + 20.97 \end{aligned} \quad (6)$$

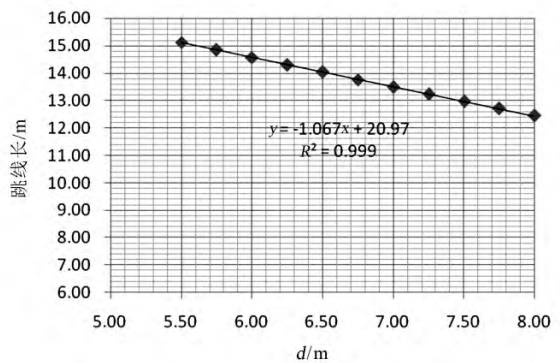
3.2.5 跳线线长计算

根据跳线线长计算结果和拟合结果,跳线线长与单一变量 (ω 、 $L_{串}$ 或 d) 呈线性关系,于是,为避免复杂的线长计算过程,改变传统跳线计算方式,可以以典型边界条件下线长为基础,通过各变量差值补偿进行跳线设计:

1) 通过《电力工程高压送电线路设计手册》中线长计算公式,计算得典型边界条件下的跳线线长 L_0 。



(a) 内角侧



(b) 外角侧

图5 边相跳线线长与杆塔尺寸综合变量 d 关系

2) 通过线性函数拟合结果计算不同边界条件 (ω 、 $L_{串}$ 或 d) 变化时的跳线长度补偿值 $\Delta L_{串}$ 、 ΔL_{ω} 和 ΔL_d 。

3) 通过差值补偿法确定不同边界条件的跳线线长,由 $L = L_0 + \Delta L_{串} + \Delta L_{\omega} + \Delta L_d$ 计算出实际所使用耐张塔的跳线长度,根据第3.2.2至3.2.4节中各单一边界条件与跳线线长的线性拟合结果得出跳线线长计算公式:

$$\begin{aligned} \text{内角侧: } L(\omega, L_{串}, d, L_0) &= -0.193(\omega - \omega_0) + \\ & 1.047(L - L_{串0}) - 1.081(d - d_0) + L_0 \\ \text{外角侧: } L(\omega, L_{串}, d, L_0) &= -0.19(\omega - \omega_0) + \\ & 1.079(L - L_{串0}) - 1.067(d - d_0) + L_0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: ω_0 、 $L_{串0}$ 和 d_0 分别表示典型边界条件倾斜角、串长和杆塔尺寸综合变量 d 的取值; L_0 表示典型边界条件下的跳线长度; ω 、 $L_{串}$ 和 d 分别表示设计倾斜角、串长和杆塔尺寸综合变量; $\Delta L_{串}$ 、 ΔL_{ω} 和 ΔL_d 分别表示串长、横担宽度和倾斜角分别变化时跳线线长与典型边界条件下长度 L_0 的差值。

3.3 单回路耐张塔中相跳线安装设计边界条件

根据单回路10A模块参数确定该标准设计的边界条件见表4。

表4 中相跳线边界条件

边界条件	取值
设计最大风速 / (m · s ⁻¹)	27
设计覆冰厚度 / mm	15
跳线型号	8 × JL/G1A - 500/45
张力取值 / N	150
典型串长 L _{串0} / m	16.5
转角度数 θ ₀ / (°)	30
典型杆塔尺寸 d ₀ / m	5.5

3.4 单回路耐张塔中相跳线安装设计

耐张塔中相绕跳跳线如图6所示。

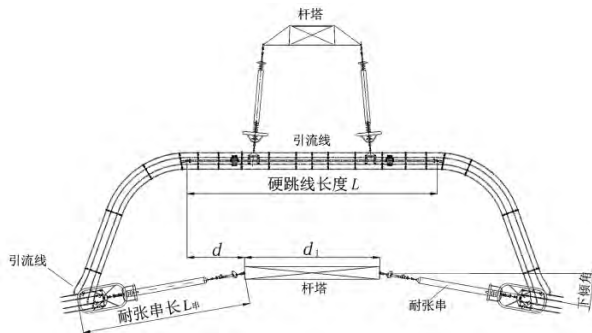


图6 耐张塔中相绕跳跳线

与耐张塔边相一样,耐张串长度 L_串、倾斜角度数 ω、转角度数 θ 和杆塔尺寸综合变量 d 对跳线的影响较大。拟合结果表明:与边相直跳不同,单回路耐张塔中相绕跳跳线线长与串长 L_串、杆塔尺寸变化参数 d 及转角度数 θ 基本呈线性关系。因此,设计以典型边界条件(耐张串长度 L_{串0}、转角度数 θ₀ 和杆塔尺寸变化参数 d₀) 为基础,通过单变量线性差值的方法确定不同耐张串倾斜角的跳线线长。

3.4.1 典型边界条件下的跳线线长

确定典型边界条件下(ω₀ = 10°, L_{串0} = 16.5 m, d₀ = 5.5 m)的跳线线长标准值 L₀ 如表5所示。

表5 典型边界条件下的中相跳线线长

转角度数 θ / (°)	内角侧线长标准值 L ₀ / m	外角侧线长标准值 L ₀ / m
0	14.34	14.22
1	14.31	14.26
2	14.27	14.29
3	14.24	14.32
4	14.20	14.35
5	14.16	14.39
6	14.13	14.42
7	14.10	14.46
8	14.06	14.49
9	14.03	14.53
10	14.00	14.56

3.4.2 耐张串下倾角对跳线安装和线长影响

只改变转角度数 θ,其他典型边界条件不变,计算分析转角度数 θ 变化对跳线线长的影响。跳线线

长随转角度数 θ 变化的曲线如图7所示。

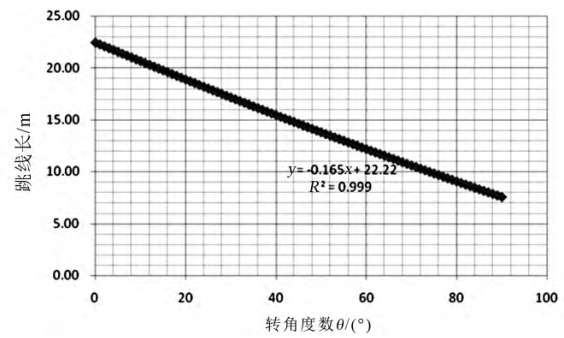


图7 中相跳线线长与转角度数的关系

以转角度数 θ 为变量,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合结果如下:

$$L(\theta) = -0.165\theta + 22.22 \quad (8)$$

3.4.3 耐张绝缘子串长对跳线安装和线长影响

跳线线长与随耐张串串长变化的曲线如图8所示。

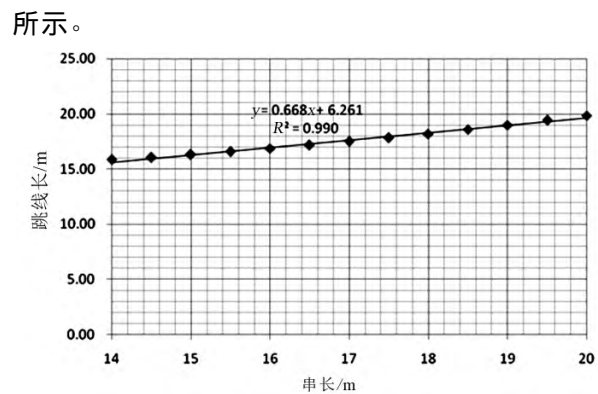


图8 中相跳线线长与串长的关系

以耐张串串长 L_串 为变量,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合结果为

$$L(L_{串}) = 0.668L_{串} + 6.621 \quad (9)$$

3.4.4 杆塔尺寸综合变量 d 变化对跳线安装和线长影响

跳线线长与杆塔尺寸综合变量 d 变化的曲线如图9所示。

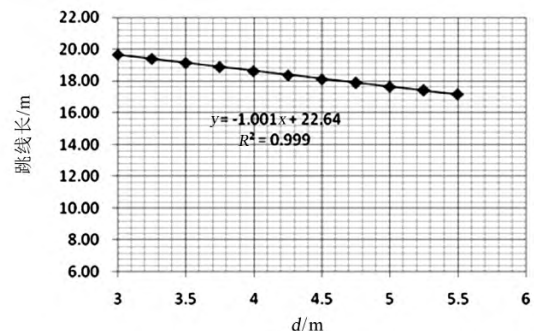


图9 中相跳线线长与杆塔尺寸综合变量 d 关系

以杆塔尺寸综合变量 d 为变量,利用最小二乘法进行线性拟合,拟合结果如下:

$$L(d) = -1.009d + 22.67 \quad (10)$$

3.4.5 跳线线长计算

根据跳线线长计算结果和最小二乘法拟合结果,跳线线长与单一变量(θ 、 $L_{\#}$ 或 d)呈线性关系。为避免复杂的线长计算过程,改变传统跳线计算方式,以典型边界条件下线长为基础,通过各变量差值补偿进行跳线设计。

首先,通过《电力工程高压送电线路设计手册》中线长计算公式,计算得典型边界条件下的跳线线长 L_0 ;然后通过函数拟合结果计算不同边界条件(θ 、 $L_{\#}$ 或 d)变化时的跳线长度补偿值 $\Delta L_{\#}$ 、 ΔL_{ω} 、 ΔL_d ;最后,通过差值补偿法确定不同边界条件的跳线线长。由 $L=L_0+\Delta L_{\#}+\Delta L_{\omega}+\Delta L_d$ 计算跳线长度。

根据第3.4.2至3.4.4节中各单一边界条件与跳线线长的线性拟合结果得出中相跳线线长计算公式:

$$L(\theta, L, d, L_0) = -0.165(\omega - \omega_0) + 0.668(L - L_{\#0}) - 1.001(d - d_0) + L_0 \quad (11)$$

3.5 误差分析

根据第3.2.5节及第3.4.5节线性拟合结果采用差值补偿法计算不同边界条件(转角度数 θ 为 $0 \sim 90^\circ$ 、绝缘子串长 $L_{\#}$ 为 $15 \sim 19$ m、杆塔尺寸综合变量 d 为 $4.5 \sim 6.5$ m、下倾角 ω 为 $-10^\circ \sim 40^\circ$ 随机组合)的跳线线长,计算结果与《电力工程高压送电线路设计手册》中普通线长计算公式计算结果^[6]进行对比分析,如表6、表7所示。

表6 边相跳线安装设计(差值补偿法)计算误差分析

转角度数 $\theta/(\circ)$	耐张串长 $L_{\#}/m$	杆塔尺寸综合 变量 d/m	倾斜角 $\omega/(\circ)$	跳线长/m		误差/%	
				手册公式 计算值	差值补偿法 计算值	外角侧	内角侧
0	14.50	6.50	-10	15.79	15.39	-2.51	-3.04
5	15.00	6.50	-5	15.54	15.28	-1.65	-2.87
10	15.50	6.50	0	15.34	15.19	-0.99	-2.34
15	16.00	6.00	5	15.67	15.62	-0.27	-0.69
20	16.50	6.00	10	15.59	15.60	0.03	0.05
25	17.00	6.00	15	15.54	15.64	0.68	1.24
30	17.50	6.00	20	15.48	15.68	1.32	2.53
35	18.00	5.50	25	15.94	16.35	2.53	2.31
40	18.50	5.50	30	15.80	16.45	4.06	3.57
45	14.50	5.50	35	11.30	11.13	-1.47	0.46
50	15.00	5.50	40	11.13	11.29	1.46	1.54
55	15.50	5.00	35	13.26	13.64	2.89	2.06
60	16.00	5.00	30	15.21	15.61	2.63	1.45
65	16.50	5.00	25	17.28	17.58	1.74	0.87
70	17.00	5.00	20	19.43	19.58	0.77	0.14
75	17.50	4.50	15	22.07	21.94	-0.58	-1.42
80	18.00	4.50	10	24.26	23.97	-1.20	-1.87
85	18.50	4.50	5	26.40	26.03	-1.39	-2.92
90	19.00	4.50	0	28.42	28.10	-1.14	-2.99

表7 中相跳线安装设计(差值补偿法)计算误差分析

倾斜角 $\omega/(\circ)$	串长 /m	杆塔尺寸 综合变量 d/m	转角度数 $\theta/(\circ)$	跳线长		误差 /%
				手册公式 计算值	差值补偿法 计算值	
-10	15.00	6.50	0	20.47	20.17	-1.45
-5	15.50	6.50	5	19.97	19.63	-1.72
0	16.00	6.00	10	19.85	19.62	-1.18
5	16.50	6.00	20	18.47	18.52	0.32
10	17.00	5.50	30	17.57	17.66	0.52
15	17.50	5.50	40	16.33	16.46	0.80
20	18.00	5.00	50	15.74	15.87	0.82
25	18.50	5.00	60	14.97	15.28	2.08
30	19.00	4.50	70	14.93	14.90	-0.20
35	18.50	4.50	80	14.31	14.44	0.94
40	18.00	4.00	90	14.35	13.72	-4.39

(下转第51页)

用[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003.

[16] Morren J, de Haan, S W H. Short-circuit Current of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.

[17] Sheng Hu, Xinchun Lin, Yong Kang, et al. An Improved Low-voltage Ride-Through Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator During Grid Faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2011 26(12): 3653-3665.

[18] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

[19] 胡家兵. 双馈异步风力发电机系统电网故障穿越(不间断)运行研究——基础理论与关键技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

[20] 刘洪波, 穆钢, 严干贵, 等. 根据量测轨迹计算轨迹灵敏度的卷积法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 13-17.

[21] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 一种基于轨迹灵敏度的发电机参数抗差估计法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 21-24.

[22] 韩睿, 郑竞宏, 朱守真, 等. 基于灵敏度分析的同步发电机参数分步辨识策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 74-80.

[23] 张俊峰, 毛承雄, 陆继明, 等. 双馈感应发电机的直接功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 31-35.

[24] Stephen M Benschluch, Joe H Chow. A Trajectory Sensitivity Method for the Identification of Nonlinear Excitation System Models [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2): 159-164.

作者简介:

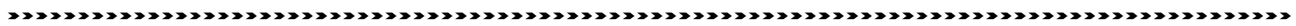
许中(1986), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统与电能质量;

莫文雄(1971), 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统与电能质量;

马智远(1987), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电能质量;

周凯(1993), 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量与用电技术监督。

(收稿日期: 2019-11-25)



(上接第11页)

以上数据表明: 采用差值补偿法的计算结果与采用《电力工程高压送电线路设计手册》^[6]线长计算公式的计算结果吻合较好, 计算结果的最大偏差不超过4.5%。

4 结 语

经过实践验证, 依照基于线性拟合和差值补偿法的1000 kV特高压交流输电线路跳线安装设计方法进行单回路跳线设计, 有效地简化了设计流程, 减少了40%设计时间, 对减少重复计算时间也具有实际意义。

参考文献

[1] 尹泉军, 崔志国, 付明翔, 等. 1000 kV特高压交流输电线路跳线安装施工技术[J]. 河北电力技术, 2012(10): 23-26.

[2] 付克勤, 古祥科, 张雄, 等. 500 kV输电线路风偏特性的有限元分析[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 123-128.

[3] 邵天晓. 架空送电线路的线力学计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 2003.

[4] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计1000 kV输电线路分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[5] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计1000 kV输电线路金具分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[6] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

作者简介:

李铁鼎(1987), 工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作;

雷雨泽(1991), 工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作;

程述一(1986), 高级工程师, 主要从事特高压输电线路设计、研究与管理的工作;

刘文勋(1982), 高级工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作;

周古月(1992), 工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作。

(收稿日期: 2019-10-24)