

输电线路不平衡张力分析和计算

刘庆丰

(湖南省电力勘测设计院,湖南 长沙 410007)

摘要: 不平衡张力是危害输电线路安全稳定运行的重要因素之一。不平衡张力主要由不均匀覆冰造成。随着输电线路设计水平要求的不断提高,对杆塔所承受不平衡张力的计算分析成为线路设计中的重要环节。建立了不平衡张力的力学模型,分析了档距变化与电线应力间的数学关系,以及悬垂绝缘子串偏移和两侧导线应力间的数学关系。采用 VB 面向对象语言编程实现不平衡张力的求解。通过对具体实例的分析和计算,模拟计算出的结果和实际情况相符。

关键词: 不平衡张力; 输电线路; 杆塔

中图分类号: TM 744;TM 752 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)01-0093-03

0 引言

在我国西南和华中地区,每年的严冬和初春季,北方的强冷气团与南海副热带暖湿气团交汇,形成“南岭准静止锋”及其延伸的“昆明准静止锋”^[1]。在这种气象条件下,输电线路导线和杆塔上最容易覆冰,也最容易因为导线各档不均匀覆冰而产生不平衡张力影响线路的安全运行^[2-3]。其不平衡张力主要有以下 3 个情况引起:各档档距相差比较大;相邻两基杆塔高差大;外力(冰、风等)荷载在各档的不均匀分布。以上 3 种情况存在时,易造成输电线路耐张段内各直线档应力不一致,进而使导线上出现纵向不平衡张力,导致悬垂绝缘子串偏移和导线在线夹内滑动,严重时会引起倒塔事故。特别应指出的是,在以上各种情况中,不均匀覆冰是引起不平衡张力的主要原因,易造成大面积倒塔断线事故。在输电线路设计中应对气象条件比较恶劣的耐张段进行不平衡张力的计算和分析,对可能存在较大不平衡张力的地段,采取对杆塔加强设计或者改线避开该区域等处理措施^[4-5]。

本文根据电线路力学状态方程^[6]和力矩平衡原理,建立不均匀覆冰时导地线应力和绝缘子串偏移的数学关系模型,采用 VB 面向对象语言程序设计,编制了针对线路具体某一耐张段内不均匀覆冰情况下不平衡张力计算程序。通过对具体实例的分析计算,证明该程序的计算结果和实际情况是相一致的。

1 不平衡张力力学模型

1.1 档距变化与电线应力间的数学关系

设有一个具有 n 个连续档的耐张段,架线后无冰、无风,架线气温为 t_m ,导线初伸长尚未放出的架线应力为 σ_e ,各直线杆塔上的绝缘子串均处于中垂位置。当出现不平衡张力的气象条件时^[7],各档应力

不一样,悬垂串发生偏移,不考虑集中荷载时,其关系式可以如下表示:

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos^2 \beta_i [1 + (r_i l_i)^2 / (8 \sigma_i^2)]} \frac{(l_i \cos \beta_i)^2}{24} \times \left[\left(\frac{r_e}{\sigma_e} \right)^2 - \left(\frac{r_i}{\sigma_i} \right)^2 \right] + \frac{\sigma_i - \sigma_e}{E \cos \beta_i} + a(t + \Delta t_e - t_e) \quad (1)$$

式中 l_i, β_i 分别为悬垂串处于中垂位置的第 i 档的档距和高差角; a, E 分别为导线的温度膨胀系数和弹性系数; $t_e, \sigma_e, \Delta t_e, r_e$ 分别为架线时的温度、架线应力、考虑初伸长降低的等效温度和架线比载; $t, \sigma_i, r_i, \Delta l_i$ 分别为计算不平衡张力时的温度、第 i 档的应力、不均匀覆冰情况下第 i 档的比载、第 i 档的档距增量。

r_i 在覆冰情况下的数值大小表示为导线自重和冰重的综合比载,即单位长度、单位面积导线上所承受的总重量^[8]。例如, LGJ-400/50 导线自重比载为 $32.816 \text{ N/m} \cdot \text{mm}^2$,当覆冰厚度为 15 mm 时,冰的比载为 $39.266 \text{ N/m} \cdot \text{mm}^2$,则 r_i 是导线自重比载 + 冰的比载 = $72.082 \text{ N/m} \cdot \text{mm}^2$ 。输电线路不均匀覆冰时,各档导线覆冰厚度不一样,这样各档的 r_i 数值不同,由此引起各档应力不同,产生不平衡张力。

1.2 悬垂绝缘子串偏移和两侧导线应力间的数学关系
在不平衡张力的作用下,悬垂绝缘子串将发生偏移,如图 1 所示。

根据力矩平衡原理,有如下关系式:

$$(\sigma_{i+1} - \sigma_i) A \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2} = G_i \delta_i / 2 + W_i A \delta_i \quad (2)$$

$$W_i = r \left(\frac{l_i}{2 \cos \beta_i} + \frac{\sigma_i h_i}{r_i l_i} + \frac{l_{i+1}}{2 \cos \beta_{i+1}} - \frac{\sigma_{i+1} h_{i+1}}{r_{i+1} l_{i+1}} \right) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中,可得:

$$\sigma_{i+1} = \left(\frac{G_i}{2A} + \frac{r_i l_i}{2 \cos \beta_i} + \frac{r_{i+1} l_{i+1}}{2 \cos \beta_{i+1}} + \frac{\sigma_i h_i}{l_i} + \frac{\sigma_i \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} \right) / \left(\frac{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} + \frac{h_{i+1}}{l_{i+1}} \right) \quad (4)$$

式中 G_i 为第 i 档悬垂串的重量; λ_i 为第 i 档悬垂串长度; δ_i 为第 i 档悬垂串偏移; A 为导线截面积;

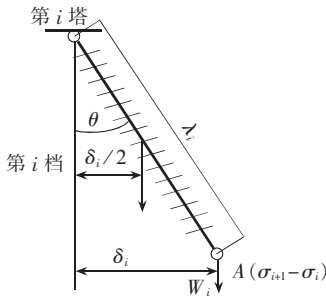


图1 悬垂绝缘子串受力偏移图
Fig.1 The offset of pendant insulator strained

h_i 为第 i 基杆塔对第 $i-1$ 基杆塔的高差。
而

$$\delta_n = \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \cdots + \Delta l_n = 0 \quad (5)$$

也就是说,对于整个耐张段内,各档档距增量之和应为零,从而第 n 基杆塔(耐张塔)上的导线悬挂点的偏移应为零。

2 不平衡张力计算

设耐张段内有 n 档,则根据式(1)可列出 n 个方程,根据式(4)可列出 $n-1$ 个方程,加上式(5)共可以列出 $2n$ 个方程。而这 $2n$ 个方程中包含 Δl_i 和 σ_i 共 $2n$ 个未知数。因此,联立这 $2n$ 个方程可以求出唯一解。通过 VB 编程使用试凑法可以直接求解,假定第 1 档应力 σ_1 的大小,依次推出其他各档

的应力和档距偏移,最后验证各档的档距偏移是否为零。如果不为零,换一个值进行计算;如果为零,则假设值即为所求解。程序设计流程图如图 2 所示。

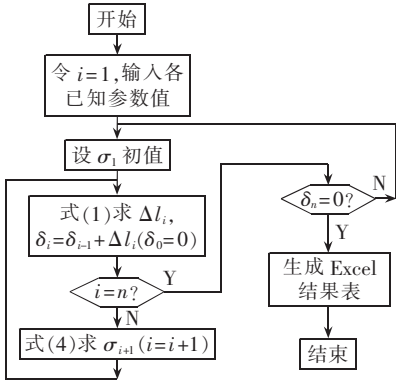


图 2 最大不平衡张力程序设计流程图
Fig.2 The flowchart of maximal unbalanced tensile force calculation

3 实例分析

下面以湖南 500kV 岗云线 175~177 号倒塔事故段为例进行不平衡张力分析。事故现场情况是 175, 176 和 177 号杆塔向大号侧倒塌,178 号横担变形。
导线的型号为 4*LGJ 300 / 40,最大使用应力为 103 MPa,安装工况为气温 -5℃,无冰无风,安装应力 47.17 MPa,串长 5.2 m,串重 2 300 N。通过现场冰样测量,确定各档的导线冰厚,通过最大不平衡张力程序进行模拟计算,其结果如表 1 所示。

表 1 最大不平衡张力计算结果表
Tab.1 The calculative results of maximal unbalanced tensile force

杆塔运行号	设计编号	高差/m	档距/m	冰厚/mm	张力差/N	百分比/%	串偏移/mm	偏移角度/(°)
173	E107				/	/	/	/
174	E108	49.3	548	5	10 818.5	7.7	2396	27.43
175	E109	76.9	355	15	35 850.1	25.7	2407	27.57
176	E110	35.3	334	30	14 870.8	10.6	784	8.67
177	E111	-20.8	231	30	7 297.4	5.2	603	6.66
178	E112	0.7	571	25	-32 750.8	-23.4	-1 571	-17.58
179	E113	-46.4	755	15	-784.3	-0.6	-114	-1.26
180	E114	24.9	247	20	/	/	/	/

注:高差、档距指相邻 2 杆塔的高差、档距;冰厚为相邻 2 杆塔间导线的覆冰。

由上表可看出,最大不平衡张力发生在 175 号杆塔,张力差为 35 850.1 N,为最大使用张力的 25.7%,绝缘子串向大号侧倾斜。175 号杆塔是 ZB84 塔,在 25 mm 导线覆冰下它所能承受的最大不平衡张力为 10%,而实际最大不平衡张力达到了 25.7%,因此造成 175 号铁塔向大号侧倒塌,继而拉倒 176 和 177 号杆塔向大号侧倒塌。程序模拟计算结果与现场倒塔情况一致,表明不平衡张力程序计算的结果是正确的。

4 结语

输电线路实际参数组合千变万化,往往需要对实际线路各种可能的不利情况进行计算,找出最不利的情况,分析最大不平衡张力可能发生在哪些杆塔上,是否超过杆塔所能承受的最大不平衡张力。对于最

大不平衡张力较严重的杆塔应考虑加强设计、缩小耐张段长度和改道避开等措施,防患于未然。

参考文献:

[1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
[2] 姚茂生. 葛虹Ⅱ回覆冰断线倒塔事故的原因分析[J]. 华中电力,1995,8(4):60-63.
YAO Mao-sheng. The reason analysis of the wire broke and tower collapse accident of the Ge-Shuang II transmission line[J]. Central China Electric Power,1995,8(4):60-63.
[3] 黎湘康,魏长喜. 500 kV 二普三线不均匀覆冰的影响及对策[J]. 四川电力技术,2002(2):21-22.
LI Xiang-kang,WEI Chang-xi. The impact and the strategy for the asymmetric icing of the 500 kV Liangpu

-Sanxian transmission line[J]. **Sichuan Electric Power Technology**,2002(2):21-22.

[4] 胡毅. 输电线路大范围冰害事故分析及对策[J]. 高电压技术,2005,31(4):14-15.

HU Yi. The analysis and the strategy of the large range icing accident of the transmission line[J]. **High Voltage Engineering**,2005,31(4):14-15.

[5] 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,2002.

[6] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 北京:水利电力出版社,1987.

[7] 孔伟,甘凤林,徐守琦. 单个集中荷载作用下架空线张力计算[J]. 东北电力技术,2000(4):45-48.

KONG Wei,GAN Feng-lin,XU Shou-qi. The calculation

of over-head line tension under the action of single concentrated load[J]. **Northeast Electric Power Technology**,2000(4):45-48.

[8] 谢运华. 输电线设计覆冰荷载计算方法的对比分析[J]. 电力建设,1995(5):15-18.

XIE Yun-hua. Contrast and analysis of the methods for calculating the design icing load of the transmission line [J]. **Electric Power Construction**,1995(5):15-18.

(责任编辑:戴绪云)

作者简介:
刘庆丰(1979-),男,湖南邵阳人,助理工程师,硕士,从事高压输电线路设计工作(E-mail:luchief@163.com)。

Analysis and calculation of transmission line unbalanced tensile force

LIU Qing-feng

(Hunan Electrical Power Design Institute, Changsha 410007,China)

Abstract: Unbalanced tensile force,mainly caused by asymmetric icing,is one of the important factors impacting the safe running of transmission line. Along with the raise of transmission line design level,the analysis and calculation of unbalanced tensile force effecting on the tower becomes a necessary work. A mathematical model is built up. The mathematical relationships between span variation and line stress and between the offset of pendant insulator strained and line stresses of both sides are analyzed. The object-oriented development tool VB is adopted to calculate unbalanced tensile force. An instance is analyzed and calculated,and the simulated result accords with the fact.

Key words: unbalanced tensile force; transmission line; tower

~~~~~