

[输电线路]

复合横担紧缩型输电线路不平衡张力计算及分析

文/葛洲坝集团电力有限责任公司 高鹏飞 李笑怡 唐伟 蔡连成

三峡大学电气与新能源学院 罗曼平

复合横担紧缩型输电线路具有耐雷、耐污和经济性好等优点，在输电线路中具有广泛的应用前景。推导了紧缩型线路中多分裂导线在不均匀覆冰条件下的不平衡张力计算公式，并用有限元数值方法验证了公式的计算准确度，分析了悬垂串长度对不平衡张力的影响。

随着社会经济的发展，城乡用地越来越紧张，为了降低输电线路走廊对土地的占用面积，复合横担紧缩型输电线路应运而生。复合横担紧缩型线路是指在输电杆塔中将钢铁横担用绝缘复合材料横担代替，并取消传统的绝缘子串的线路。复合横担紧缩型线路可杜绝风偏，杜绝鸟害，提升防雷水平，提升耐污闪、耐雨闪和耐冰闪水平，减少走廊，降低投资，是一种综合优势十分显著的线路结构形式，具有广泛的应用前景。采用复合横担的杆塔，由于横担为绝缘体，悬垂串可取消绝缘子从而减小串长，但对于采用分裂导线的高电压等级输电线路来说，在杆塔设计时还需要考虑因脱冰或子导线断线而产生的纵向不平衡张力的影响。研究表明，纵向不平衡张力主要控制杆塔塔身侧面斜材和塔身横隔面的部分杆件。直线塔主要承受塔身和导线风荷载，如果不考虑一定的纵向不平衡张力，就会导致塔身侧面刚度太低，当发生导线断线、覆冰等纵向不平衡张力时，铁塔侧面斜材因承受不了纵向不平衡荷载而倒塔。因此开展复合横担紧缩型输电线路不平衡张力的计算分析对保证杆塔安全、保障线路稳定运行具有十分重要的意义。复合横担紧缩型线路示意图如图1所示。

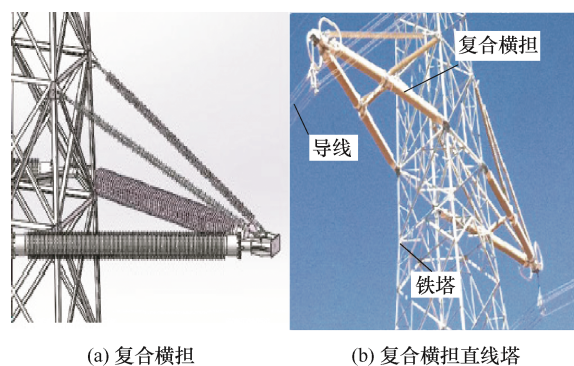


图1 复合横担紧缩型线路示意图

导线不平衡张力对杆塔设计荷载的确定至关重要，规范基于运行经验提出了相关规定，但线路实际运行环境千差万别，统一的技术要求难以满足工程实际需要。基于此，导线不平衡张力的计算与分析引起了工程界广泛的关注。周坤等分析了输电线路在遭遇极端天气情况时的不平衡张力的特征。韩军科等采用有限元方法建立塔-线-串耦合的三维模型，考虑铁塔变形的影响，分析了不均匀覆冰工况下的不平衡张力。姚志刚等基于动力有限元方法建立塔-线耦联模型，采用脉动风激励方式，分析了导线在覆冰-风耦合作用下的不平衡张力。综上，

基金项目：中国能源建设股份公司 2019 年众筹科技项目(CEEC2019-KJ03)

现有文献主要集中在不平衡张力的分析方法与数值模型方面,而针对复合横担紧凑型输电线路不平衡张力及影响因素方面的研究则未见报道。

本文针对复合横担紧凑型输电线路,采用迭代法计算导线在不均匀覆冰工况下的不平衡张力,分析中主要考虑档距、串长等因素的影响,采用有限元方法对迭代法计算结果进行了验证,研究成果对复合横担紧凑型输电线路铁塔不平衡张力的设计具有十分重要的借鉴意义。

分析方法及验证

1. 分裂导线不平衡张力求解方法

文献给出了单根导线不平衡张力的求解方法,但实际工程中大都采用多分裂方式。本文在单根导线不平衡张力求解方法的基础上,推导了多分裂导线在不均匀覆冰状态下的不平衡张力求解方程组。

(1) 档距变化与应力间的近似关系

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos^2 \beta_i \left(1 + \frac{\gamma_i^2 l_i^2}{8 \sigma_i^2} \right)} \left\{ \left[\frac{(l_i \cos \beta_i)^2}{24} \times \left[\left(\frac{\gamma_m}{\sigma_m} \right)^2 - \left(\frac{\gamma_i}{\sigma_i} \right)^2 \right] + \left(\frac{\sigma_i - \sigma_m}{E \cos \beta_i} \right) + \alpha_i (t + \Delta t_e - t_m) \right] \right\} \quad (1)$$

式中, l_i 为耐张段内悬垂串处于中垂位置第 i 档的档距, m; β_i 为高差角, ($^\circ$); α 为导线的温度膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; E 为弹性系数, N/mm^2 ; t_m 为导线架线时的气温, $^\circ\text{C}$; σ_m 为相应气温下耐张段内架空线的水平应力, N/mm^2 ; Δt_e 为架线时考虑初伸长降低的等效温度(取正值), $^\circ\text{C}$; γ_m 为架线时导线的自重比载, $\text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{m})$; t 为计算不平衡张力时的气温, $^\circ\text{C}$; σ_i 为第 i 档的水平应力, $\text{N}/(\text{mm}^2)$; γ_i 为架线时各档的比载, $\text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{m})$; Δl_i 为档距的增量(缩短时为负值), m。

(2) 悬垂绝缘子串偏斜与两侧导线应力间的关系

$$\sigma_{i+1} = \left[\left(\frac{G_i}{2NA} + \frac{\gamma_i l_i}{2 \cos \beta_i} + \frac{\gamma_{i+1} l_{i+1}}{2 \cos \beta_{i+1}} + \frac{\sigma_i h_i}{l_i} \right) + \frac{\sigma_i \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} \right] \div \left(\frac{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} + \frac{h_{i+1}}{l_{i+1}} \right) \quad (2)$$

式中, σ_i 、 σ_{i+1} 分别为第 i 档及 $i+1$ 档内导线的水平应

力, N/mm^2 ; δ_i 为第 i 基直线杆塔上悬垂串导线悬挂点顺线路水平偏距, 偏向大者正值, 反之为负值, m, 满足 $\delta_i = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n$; λ_i 为第 i 基杆塔上悬垂串的串长, m; G_i 为第 i 基杆塔上悬垂串重量, N; h_i 、 h_{i+1} 为悬垂串处于中垂位置时, 第 i 及 $i+1$ 档导线悬挂点间的高差角, ($^\circ$); l_i 、 l_{i+1} 为悬垂串处于中垂位置时, 第 i 及 $i+1$ 档的档距(两端悬挂点间的水平距离), m; A 是导线截面积, mm^2 ; N 为导线分裂数。

(3) 各档档距增量间的关系

对于整个耐张段内各档档距增量之和应等于零, 即第 n 基杆塔(耐张杆塔)上导线悬挂点的偏距应等于零, 即

$$\delta_n = \sum_{i=1}^n \Delta l_i = 0 \quad (3)$$

(4) 考虑绝缘子串偏移对导线悬挂点高差的影响

第 i 档高差变化 Δh_i 与第 i 基杆塔悬挂点偏移点偏移 δ_i 间的关系为

$$\Delta h_i = \left(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - \delta_i} \right) - \left(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - \delta_{i-1}} \right) = \sqrt{\lambda^2 - \delta_i} - \sqrt{\lambda^2 - \delta_{i-1}} \quad (4)$$

式中, Δh_i 为第 i 档高差 h_i 的增量, m, $h_i = h_i + \Delta h_i$, 其中 $\Delta h_i > 0$; δ_i 、 δ_{i-1} 分别为第 i 档两端第 i 和第 $i-1$ 基杆塔上悬挂点偏移的水平距离, 其中两端耐张杆塔上的 $\delta_0 = 0$, $\delta_n = 0$, m; λ 为绝缘子串长度, m。

(5) 各档导线应力的求解步骤

耐张段内若有 n 档, 则有 $n-1$ 基直线杆塔。利用式(1)可列出 n 个方程, 利用式(2)可列出 $n-1$ 个方程, 利用式(3)可列出一个方程, 共列出 $2n$ 个方程。有 Δl 、 σ 共 $2n$ 个未知数是可以求出的。较为直接的求解方法是利用上述公式迭代求解。依据上述计算方法编写计算程序, 求解导线不平衡张力。

2. 有限元数值验证

有限元方法是一种在工程领域广泛应用的数值求解方法, 具有求解准确度高、适用范围广的特点。本文采用有限元方法验证分裂导线不平衡张力计算公式。计算导线不平衡张力时, 保守起见, 不考虑杆塔的挠曲变形, 即在建模分析时, 假定悬垂串绝缘子挂点位置不变。因此, 有限元分析模型中只考虑导线与悬垂串。导线与悬垂串分别采用 Link10 单元和 Link8 单元。分析的主要步

骤如下：

（1）找形分析

找形分析时应设置较大的初应变，以便较快收敛。可根据初始水平张力和初应变，确定一假定的较小的弹性模量。创建几何模型并生成有限元模型，几何模型为索两端点连接的直线。施加荷载和约束后求解，如果自重荷载以加速度施加，应注意加速度施加在未变形的单元上，因此应将密度除以初应变。

（2）初始状态分析

找形分析后，恢复真实的弹性模量，并设置很小的初应变以获得求解稳定性。该求解过程中，如果索内力水平张力与已知张力不符，可采用类似“直接迭代法”中的迭代过程。

（3）工作状态分析

在初始状态分析完成后，即可施加外荷载进行分析，从而获得基于初始状态的外荷载作用下的结果。

文本以某 7 档耐张段线路为例，分别采用理论计算方法与有限元计算方法计算导线在不平衡覆冰条件下的悬垂串偏移量，比较误差。

计算时导线采用钢芯铝绞线，型号为 LGJ-500/45，导线截面积为 531.68 mm²，架线时导线的自重比载为 0.031 38 MPa/m，导线弹性系数为 65 000 MPa，架线时的水平应力为 45.47 MPa，导线的计算拉断力为 128 kN，悬垂串的串长为 2 m，悬垂串（金具）重量为 1 640 N。档距及高差数据见表 1。本项目分别对比了四种工况：第一档比载为 0.066 34 MPa/m，其余档为 0.048 735 MPa/m。计算结果对比见表 2。

表 1 档距及高差数据

档数序号	档距/m	计算不平衡张力时比载/（MPa/m）	第 <i>i</i> +1 基杆塔对第 <i>i</i> 基杆塔导线悬挂点的高差/m
1	400	0.048 735/0.066 345	0
2	400	0.048 735/0.06 6345	0
3	400	0.048 735/0.066 345	0
4	400	0.048 735/0.066 345	10
5	400	0.048 735	-10
6	400	0.048 735	0
7	400	0.048 735	0

表 2 计算结果对比

悬垂串编号	悬垂串偏移量		
	有限元计算结果/mm	按理论公式编程计算结果/mm	相对误差（%）
1	483.00	483.55	0.11
2	230.48	236.65	2.88
3	112.46	114.39	1.7
4	49.72	51.44	3.45
5	22.51	23.00	2.18
6	7.12	7.45	4.6

从上述计算结果可以看出，采用 Ansys 有限元计算方法计算的结果与本项目根据理论计算公式编制的计算程序计算结果非常接近，误差均小于 5%，表明本项目编制的计算程序具有足够的计算准确度，可应用于工程实践。

悬垂串长度对不平衡张力的影响

相比传统线路，复合横担杆塔取消了悬垂串绝缘子，复合绝缘横担端部与导线之间仅通过金具连接，因此导线至横担的长度大幅减小，由此可能会导致不平衡张力发生改变。因此，主要讨论悬垂串（金具）长度对不平衡张力的影响。线路地形高差取上下山情况，覆冰率取上山档 20%，下山档 100%覆冰，不同工况改变悬垂金具串长度，参数见表 3。

表 3 不同串长工况

工况号	悬垂串长度/m	悬垂串重量/N
C1	0.3	500
C2	0.5	600
C3	0.7	700
C4	0.9	800
C5	1.1	900
C6	1.3	1 000

通过本项目编制的计算程序计算导线在不均匀覆冰下各工况的不平衡张力计算结果，如表 4、图 2 所示。

表 4 工况计算结果

	直线塔号	1	2	3	4	5	6
工况 C1	不平衡张力/N	-1 777.50	-6 786.67	-3 7341.41	-3 356.28	-2 964.85	842.04
	占最大使用张力（%）	0.75	2.85	15.69	1.41	1.25	0.35
工况 C2	不平衡张力/N	-2 556.78	-7 931.16	-3 1491.81	-3 621.82	-4 558.35	-1 429.67
	占最大使用张力（%）	1.07	3.33	13.24	1.52	1.92	0.60
工况 C3	不平衡张力/N	-2 966.93	-8 276.20	-27 412.62	-3 638.57	-5 190.71	-1 881.65
	占最大使用张力（%）	1.25	3.48	11.52	1.53	2.18	0.79
工况 C4	不平衡张力/N	-3 161.89	-8 262.07	-24 374.36	-3 565.24	-5 452.10	-2 019.18
	占最大使用张力（%）	1.33	3.47	10.24	1.50	2.29	0.85
工况 C5	不平衡张力/N	-3 235.23	-8 086.02	-22 023.42	-3 465.07	-5 599.16	-2 196.49
	占最大使用张力（%）	1.36	3.40	9.26	1.46	2.35	0.92
工况 C6	不平衡张力/N	-3 234.65	-7 827.76	-20 111.79	-3 342.07	-5 578.93	-2 184.06
	占最大使用张力（%）	1.36	3.29	8.45	1.40	2.34	0.92

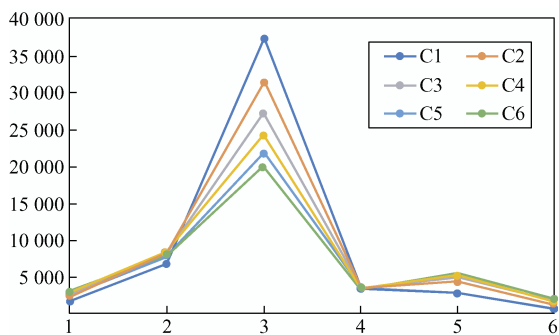


图 2 不平衡张力分布图

由上述图表可见,随着悬垂串长度的增大,不平衡张力最大值呈减小趋势,当悬垂串长度小于 1.1 m 时,将不满足规范(不均匀覆冰情况不平衡张力占最大使用张力的 10%)要求。紧缩型线路由于悬垂串长度的大幅降低,导致线路在不均匀覆冰条件下的不平衡张力大幅

增大。

结束语

针对复合横担紧凑型输电线路,推导了多分裂导线不平衡覆冰下的不平衡张力计算公式,采用有限元方法对公式计算结果进行了验证,分析了复合横担金具串长度对不平衡张力的影响,结论如下:

- 1) 推导的分裂导线不平衡张力计算结果准确可靠,可直接应用于工程实践。
- 2) 悬垂金具串长度对不平衡张力值影响极大,工程设计时需重点考虑。
- 3) 与常规线路相比,复合横担紧凑型线路的不平衡张力更加显著,对杆塔力学性能提出了更高要求。EA

(收稿日期: 2021.04.08)

声 明

《电气时代》杂志唯一投稿渠道

登录电气时代官网 www.eage.com.cn, 点击“我要投稿”

咨询电话: 010 - 68993981