

文章编号:1000-582X(2010)09-132-07

考虑脱冰速度效应的输电线路脱冰模拟

沈国辉¹,袁光辉²,孙炳楠¹,何运祥³,楼文娟¹

(1. 浙江大学土木工程学系,浙江 杭州 310058;2. 成都基准方中建筑设计事务所,四川 成都 610017;
3. 广东省电力设计研究院,广东 广州 510600)

摘要:输电线路的脱冰将对相邻塔产生纵向不平衡张力,严重威胁到输电线路的安全。提出输电线路覆冰脱落的有限元模拟方法,与以往的模型试验结果进行比较以验证该方法的准确性,分析导线和地线整档同时脱冰产生的系统响应,最后针对导线的 unzipping 形式脱冰分析脱冰速度对响应的影响。本文的算例发现,地线整档同时脱冰将产生比导线整档脱冰更大的纵向不平衡张力。在 unzipping 形式脱冰分析中,脱冰速度越慢,系统响应越接近于静态卸载;脱冰速度越快,系统响应越接近于整档同时脱冰。

关键词:输电线路;有限元;覆冰脱落;动力响应

中图分类号:TU312.1

文献标志码:A

Simulation of ice-shedding on transmission lines considering ice-shedding velocity effect

SHEN Guo-hui¹, YUAN Guang-hui², SUN Bing-nan¹, HE Yun-xiang³, LOU Wen-juan¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, P. R. China;
2. Chengdu Jizhun Fangzhong Architectural Design Associates, Chengdu, Sichuan 610017, P. R. China;
3. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou, Guangdong 510600, P. R. China)

Abstract: Ice-shedding on transmission lines results in longitudinal unbalanced forces on adjacent transmission towers, which significantly threaten the safety of transmission lines. The methodology of ice-shedding simulation on transmission lines is developed by using the finite element method and validated by comparing the simulation results with those obtained from the model-scale experiments done by previous researchers. The responses of the tower-line system induced by simultaneous ice-shedding on the conductor and ground wire are analyzed. The developed methodology is then applied to study ice-shedding considering unzipping effect, in which the influence of the velocity of ice-shedding on the responses is investigated. Results from this study show that the longitudinal unbalanced forces induced by simultaneous ice-shedding from the ground wire are greater than those from the conductor under similar condition. During the analysis of ice-shedding considering unzipping effect, the slower the velocity of ice-shedding is, the closer the responses are to those resulting from static unloading; and the faster the velocity of ice-shedding is, the closer the responses are to those resulting from simultaneous ice-shedding.

Key words: transmission line; finite element method; ice-shedding; dynamic response

收稿日期:2010-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50638010);浙江省自然科学基金资助项目(Y1080207)

作者简介:沈国辉(1977-),男,浙江大学副教授,博士,主要从事结构计算分析和结构风工程研究,(Tel)0571-88208737;
(E-mail) ghshen@zju.edu.cn.

输电线路覆冰严重威胁到电力系统的安全运行,并且会引发次生灾害,给社会和人民生命财产造成严重危害。2008年年初,雨雪冰冻灾害天气袭击南方地区,造成10~110 kV线路倒塔超过14万基,220 kV及以上线路倒塔1500多基^[1]。线路的覆冰会在特定的气象条件下发生脱落,输电线由于覆冰脱落会产生上下跳跃,相邻档之间由于不均匀脱冰会产生纵向不平衡张力。

输电线的覆冰脱落对线路的危害主要有:电气方面,减少导线以及导地线间的安全距离,造成闪络或短路,烧伤导线,使线路跳闸;力学方面,导致绝缘子断裂,导地线断线断股,塔头破坏,甚至倒塔等。据2008年雨雪冰冻灾害的灾后调查^[2],冰灾中90%左右的倒塔都是由于不均匀覆冰以及不均匀脱冰产生的纵向不平衡张力造成。在中国输电线路的设计规范^[3-4]中,对于覆冰采用静态荷载考虑,根据所在地冰区的划分取5~20 mm的冰厚,并没有考虑脱冰产生的纵向不平衡张力问题。

针对输电线的脱冰问题,已有一些研究人员采用模型试验和数值模拟方法进行研究。模型试验方面,Jamaleddine等^[5]进行两档输电导线的试验,采用跌落质量块的方法来模拟脱冰。数值模拟方面,Jamaleddine^[5]和Fekr等^[6]采用ADINA软件对两档输电线模型进行脱冰响应计算;Kalman等^[7]研究脉冲荷载引起的单档输电线脱冰问题;候镭等^[8]针对输电线模型进行脱冰模拟的参数分析;李黎等^[9]针对某实际工程进行3档塔线体系模型的脱冰计算。上述研究主要分析了输电线脱冰对电线本身产生的荷载作用,对输电塔产生的荷载作用研究并不多,同时几乎所有的计算工况都只限于整档同时脱冰。

笔者提出塔线体系的有限元建模和输电线覆冰脱落的模拟方法,通过两档导线的实例进行脱冰模拟方法的验证,然后建立某9档输电线路的塔线体系有限元模型,分析导线或地线整档同时脱冰引起的响应,最后针对unzipping形式脱冰分析脱冰速度对塔线体系各响应的影响,具有重要的工程应用和参考价值。

1 塔线体系建模和脱冰模拟方法

输电塔线体系的有限元模型主要由3部分组成:输电塔、输电线(导线、地线)和绝缘子,分别对这3个组成部分进行建模,最后组装成整个塔线体系的有限元模型。笔者的脱冰模拟在ABAQUS^[10]有限元软件中进行建模和计算。

1)输电塔可以视为空间梁杆结构,在有限元中采用三维梁单元来模拟输电塔的杆件。节点板和爬梯等对输电塔的刚度几乎没有贡献,但必须考虑其质量作用,采用质量单元来模拟。2)输电线包括导线和地线,为典型的悬索结构,在自重作用下呈悬链线形状。由于输电线是柔性结构,可以忽略其抗弯和抗扭刚度,在有限元中采用仅受拉的三维杆单元来模拟^[5-6],当输电线失去张拉力时可模拟出输电线的松弛现象。给杆单元赋予初始应力以模拟输电线在自重作用下的初始张力。3)绝缘子是连接输电线与输电塔的构件,采用三维杆单元来模拟。

计算导线覆冰荷载时,都是假设覆冰沿长度方向均匀分布成一个空心圆柱体^[11],即覆冰截面为圆环截面,在ABAQUS中采用与输电线平行的管道pipe单元来模拟,输电线和覆冰的有限元模拟如图1所示。由于冰的弹性模量较小,因此主要考虑其质量作用,其刚度贡献很小。

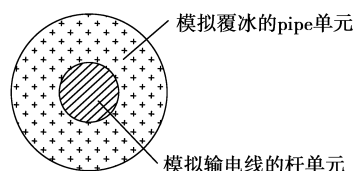


图1 输电线和覆冰的有限元模拟

导线的覆冰发生脱落,相当于模拟冰的pipe单元消失,可采用有限元的单元生死来模拟^[10]。覆冰脱落后,导线内积聚的势能得到释放,迅速向上跳起,并使相邻档之间产生纵向不平衡张力。覆冰脱落的有限元计算过程有以下几个步骤:

- 1)计算塔线体系在自重作用下的平衡;
- 2)计算输电线在一定厚度的均匀覆冰作用下的平衡;
- 3)假设某输电线上的覆冰发生突然脱落,采用单元生死方法移去这些模拟冰的单元;
- 4)覆冰脱落后塔线体系的响应。

2 脱冰模拟方法的实例验证

为了验证笔者提出的脱冰模拟方法的准确性,取以往的脱冰研究结果进行对比分析。由于输电线脱冰是在某个时刻突然发生,关于脱冰的现场实测资料几乎没有。脱冰模拟的模型试验成果也不多,较为系统的成果是Jamaleddine等^[5,12]进行的试验,试验中采用脱落质量块的方法来模拟脱冰,笔者针

对该实例进行计算和校核。该试验的模型如图2所示,模型的参数如下所示:导线直径为4.76 mm,截面积为 0.17795 cm^2 ,自重为 0.0926 kg/m ,导线平均抗拉刚度为 298191 N ,导线初始张力为 6.61 N ,档距为 3.322 m 。覆冰采用挂质量块的方法模拟,试验中的质量块可折算成 9.52 mm 厚度的覆冰,每档导线采用10个相同质量块来模拟,以尽量模拟覆冰沿长度方向均布的效果。该模型试验的荷载情况如图3所示^[12],试验中两档导线全部覆冰,获得一档导线全部脱冰后系统的响应,脱冰档导线中点的竖向位移如图4中的点线所示^[12]。

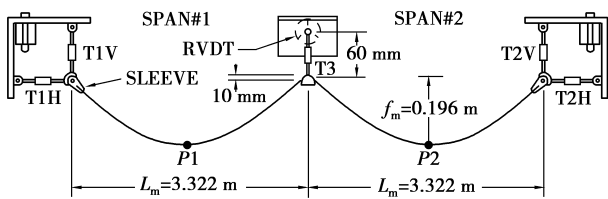


图2 某两档导线的模型示意图



图3 模型的荷载分布示意图

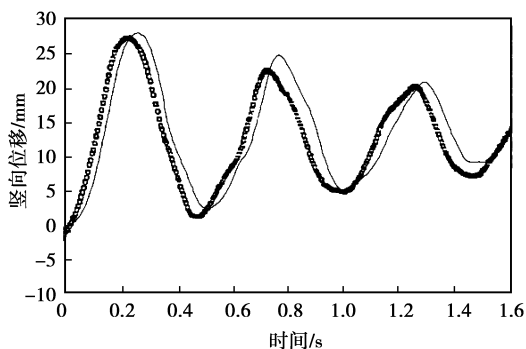


图4 脱冰档导线中点的竖向位移
(点:试验结果;实线:计算结果)

针对该实例采用第1节阐述的方法建立两档导线的有限元模型,每档导线划分为100个单元,导线的阻尼比依据以往的脱冰模拟研究^[5-7]可取2%。计算采用的时间步长为 0.02 s ,时间总长为 1.6 s ,采用笔者的有限元计算获得脱冰档导线中点的竖向位移,如图4的实线所示。比较图4中的点线和实线,可以发现两个时程分布非常接近,峰值数据和峰值出现的时刻也比较吻合。同时其他响应的结果也

较为接近,因此笔者提出的脱冰模拟方法的准确性得到验证。

3 某9档输电线路的整档脱冰分析

3.1 某9档输电线路简介

某直流输电线路的输电塔呼称高为 46 m ,总高为 50.7 m ,塔身平面形状为正方形,全部采用等边角钢材料,图5为其立面图。输电线分为上下两层,上层为地线,下层为导线,导(地)线型号及相关参数如表1所示。导线的挂线绝缘子长度为 6.8 m 。选取9档输电线路进行计算,图6为输电线路的布置图,定义1方向为顺导线方向,2为横导线方向,3为竖直方向。

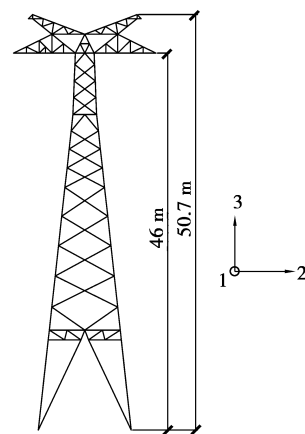


图5 某输电塔的立面图

表1 导(地)线的型号及参数

参数	导线	地线
型号	4xACSR-720/50	LGJ-95/55
弹性模量/MPa	63 000	105 000
截面积/ mm^2	775.14	152.81
直径/mm	36.23	16.00
单位长度质量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	2.401	0.707 7
运行张力/ $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	52.2	121.3

采用第1节阐述的方法建立9档的塔线体系有限元模型,模型包含中间的8个输电塔,每个塔由596个梁单元和206个质量单元组成,每档输电线划分为50个杆单元,每个绝缘子划分为1个杆单元。输电塔和输电线的阻尼采用瑞利阻尼假设,输电塔的阻尼比依据文献^[13]取为2%;输电线的阻尼比依据以往的脱冰模拟研究^[5-7]取为2%。导地线的覆冰厚度均为 20 mm 。

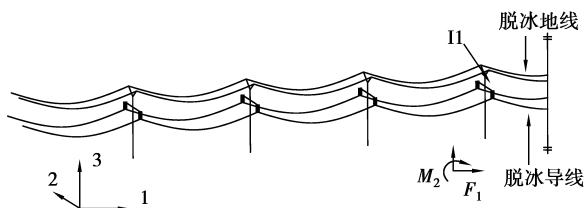


图 6 输电线路的平面布置图

多分裂导线的覆冰与单分裂导线的覆冰是不同的,由于多分裂导线之间通常有间隔棒进行隔离和支撑,这样使得覆冰和脱冰的模拟变得相当复杂。笔者主要分析输电线的脱冰对塔线体系的荷载作用,因此在文中并没有考虑导线多分裂的影响,即将 4 根单分裂导线合成为一根总导线进行处理,总导线的截面面积等于单分裂导线面积之和。

3.2 导线整档同时脱冰的计算结果

假设中间档的某根导线发生整档同时脱冰,导线脱冰后,其积累的势能得到释放,会迅速向上跳起。脱冰档导线中点的竖向位移如图 7 所示,图中以导线覆冰后的平衡位置作为零点。由图可知,脱冰后导线发生上下跳跃,并做低频振荡,中点竖向位移的峰值数据为 11.65 m。脱冰档导线的跃起很可能造成导线与地线的碰撞,产生相间闪络,烧伤线路,造成跳闸事故。脱冰档导线中点的轴应力如图 8 所示,导线从无冰到覆冰情况,导线的应力增加较多,从 52.2 MPa 变成 76.5 MPa,脱冰过程中应力值出现一些振荡。

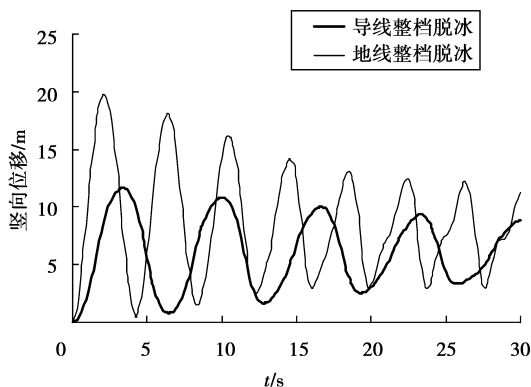


图 7 整档同时脱冰时的中点竖向位移

根据灾后调查^[1-2],很多倒塔都是由脱冰产生的纵向不平衡张力造成,因此纵向不平衡张力是一个非常重要的响应。图 9 给出导线整档同时脱冰在相邻塔产生的纵向不平衡张力,可以发现脱冰前即 $t=0$ 时刻,该塔上的纵向不平衡张力为零,即塔左右两侧

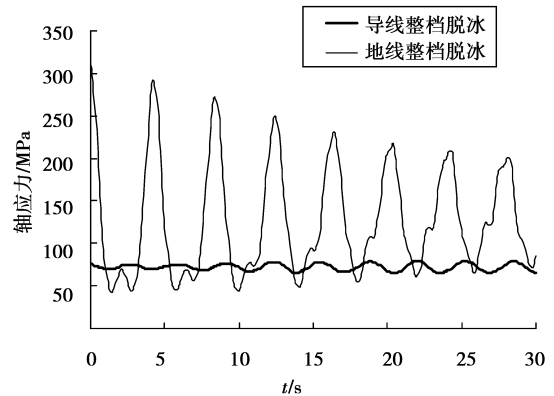


图 8 整档同时脱冰时脱冰档输电线的轴应力

的导线张力平衡。覆冰脱落后在该塔上产生较大的纵向不平衡张力,同时出现低频振荡,并随着时间的增长呈衰减趋势,纵向不平衡张力的峰值数据为 6.52 kN。这种不平衡张力对直线塔来说是非常不利的,应引起极大的注意。

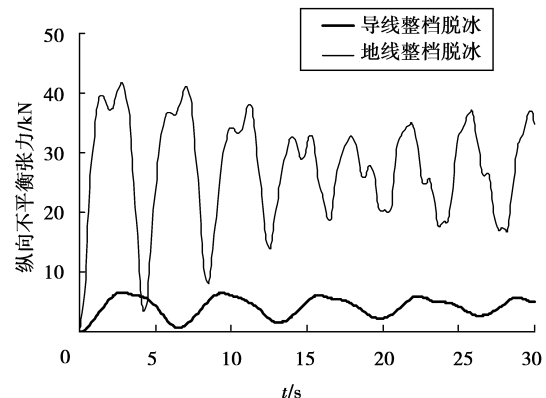


图 9 整档同时脱冰时的纵向不平衡张力

3.3 地线整档同时脱冰的计算结果

假设中间档的某地线发生整档同时脱冰,脱冰档地线中点的竖向位移如图 7 所示。由图可知,对于本实例,脱冰档地线发生跳跃,地线中点竖向位移的峰值数据为 19.79 m,比同样条件下导线整档脱冰的峰值数据大,同时地线的舞动频率也比相同条件下导线整档脱冰的频率高。脱冰档地线中点的轴应力如图 8 所示,地线从无冰到覆冰情况,地线的应力大幅增加,从 121.3 MPa 变成 312.8 MPa,在脱冰过程中出现大幅振荡。

地线整档同时脱冰在相邻塔产生的纵向不平衡张力如图 9 所示,同样可以发现在脱冰前即 $t=0$ 时刻没有纵向不平衡张力。覆冰脱落后出现较大的纵向不平衡张力,同时出现低频振荡,随着时间的增长呈衰减趋势。纵向不平衡张力的峰值数据为

41.79 kN,比相同条件下导线整档脱冰产生的不平衡张力大。2008年冰灾的灾后调查^[1]发现,一部分损坏的塔仅地线支架发生倒塌和变形,并认为地线及地线支架在严重覆冰气候下是一个薄弱环节,该结论也得到了其他灾后调查^[14-16]的支持。就笔者实例而言,地线整档脱冰产生的纵向不平衡张力比导线整档脱冰产生的数值大,由地线脱冰产生的不平衡张力是地线支架破坏的一个重要原因。

4 考虑脱冰速度的脱冰模拟计算

4.1 unzipping 形式的脱冰

以往关于覆冰脱落的计算,基本上均假定为某一档的覆冰同时全部脱落,实际上输电线的覆冰发生一截一截脱落的更为常见。很多文献^[7,16,17]均提到了 unzipping 形式的脱冰,即输电线的覆冰在某跨内沿着线路长度方向依次脱落,像拉开拉链一样,一截接着一截脱冰。unzipping 形式脱冰的成因:在风、振动等外力作用下,当输电线上某个位置覆冰的应力应变超过冰的流变极限时,该位置就发生掉冰,在该冰块脱落的地方就会产生应力集中,使得输电线表面上剩余冰的粘附力变弱^[17],脱冰就会逐步发展,图 10 为 unzipping 形式脱冰的示意图。

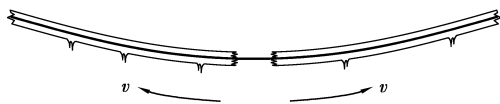


图 10 输电线的 unzipping 形式脱冰

对于 unzipping 形式脱冰的模拟计算,以第 3 节的 9 档塔线体系模型为例,假设其导线覆冰厚度为 20 mm,计算中间档某根导线的覆冰从档中往两端以速度 v 依次脱落。在有限元计算中将脱冰档导线划分为 500 个杆单元,按速度 v 移除那些模拟冰的 pipe 单元,计算中选取的脱冰速度分别为:5、12.5、25、50 m/s。

下面分别从脱冰档导线的中点竖向位移、脱冰档导线的中点轴应力、相邻档绝缘子的轴力、相邻输电塔的顺线向基底剪力和基底弯矩,以及纵向不平衡张力等角度,分析导线的 unzipping 形式脱冰对输电塔线体系的动力冲击作用,并探讨不同脱冰速度的影响。由于导线跨度为 500 m,从中间往两侧脱冰,可以计算 unzipping 形式脱冰从脱冰开始至脱冰结束所需的时间。如对 50 m/s 的脱冰速度,脱冰的完成时间为 5 s;而对 5 m/s 的脱冰速度,脱冰完成需要 50 s。因此本次计算选用 70 s 的时距离,使得

4 种脱冰速度下在脱冰完成后还有足够多的自由响应时间。

4.2 脱冰档导线中点的竖向位移

图 11 给出不同脱冰速度下脱冰档导线中点的竖向位移,即脱冰导线中点的跳跃高度。由图可知,当脱冰速度很慢,如 5 m/s 的速度时,响应变化缓慢,接近静力卸载情况;而随着脱冰速度的增加,导线跳跃高度的波动增大,并出现明显的低频振荡;当脱冰速度很快,如 50 m/s 时脱冰导线的跳跃高度很高;而整档同时脱冰可以视脱冰速度为无穷大的情况,因此该情况下导线跳跃的波动最大,跳跃高度也最高,为最不利情况。由上面分析可知,与整档同时脱冰不同,导线由于覆冰积聚的势能在 unzipping 形式脱冰情况下是一个逐渐释放的过程,因此其响应不会像整档同时脱冰那样强烈。

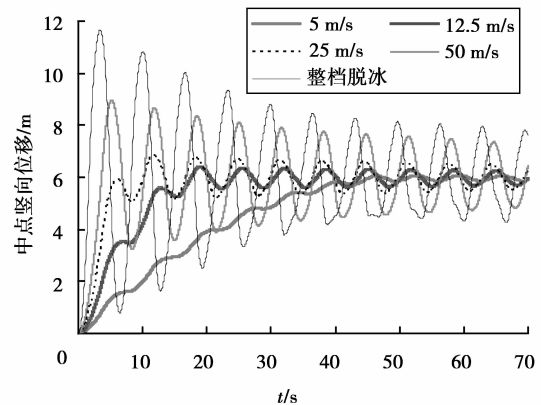


图 11 不同脱冰速度下脱冰档导线中点的竖向位移

4.3 脱冰档导线中点的轴应力

图 12 给出不同脱冰速度下脱冰档导线中点的轴应力,可以发现与 4.2 节类似的结论:当脱冰速度很慢时,轴应力响应接近静力卸载情况;随着脱冰速度的增加,轴应力响应的波动增大。

4.4 相邻档绝缘子的轴力响应

图 13 给出了不同脱冰速度下相邻档绝缘子 I1 的轴力,I1 位置见图 5。可以发现与 4.2 节类似的结论:当脱冰速度很慢时,绝缘子轴力响应接近静载情况;随着脱冰速度的增加,轴力响应的波动增大。从图中还可以发现,相邻档绝缘子 I1 的轴力在脱冰前即 $t=0$ 时刻取到最大值,后面的脱冰响应数据均小于该数值。

4.5 相邻塔的顺线向基底剪力和基底弯矩

导线脱冰将对输电塔产生动力冲击作用,将冲击力合成为施加于基底中心的 6 个分量力,与纵向力最相关的是顺线向的基底剪力 F_1 和基底弯矩 M_2

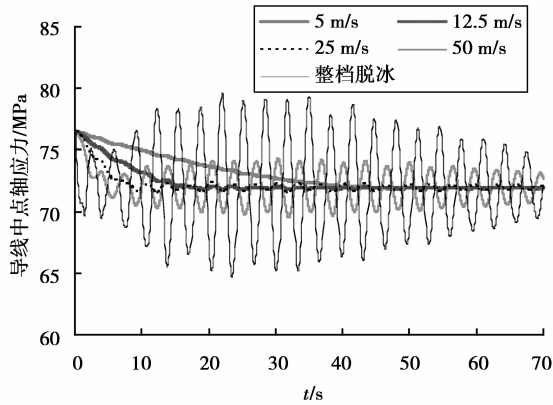


图 12 不同脱冰速度下脱冰档导线中点的轴应力

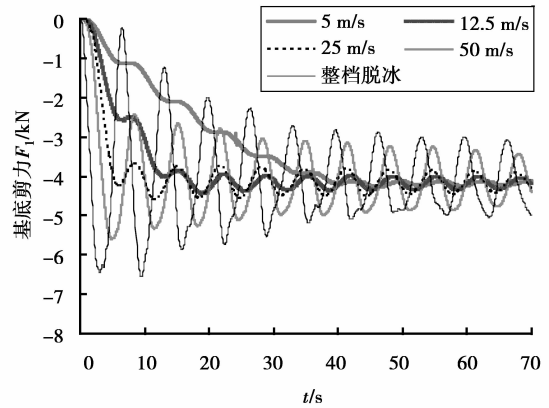


图 14 不同脱冰速度下相邻塔的基底剪力 F_1

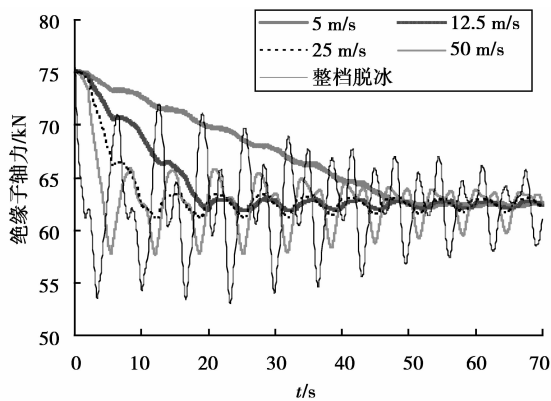


图 13 不同脱冰速度下相邻档绝缘子的轴力响应

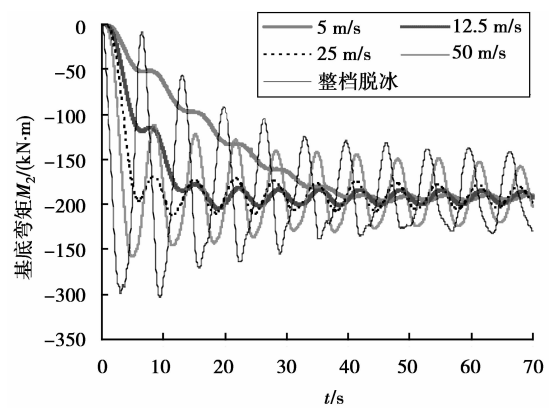


图 15 不同脱冰速度下相邻塔的基底弯矩 M_2

(见图 6)。图 14 和图 15 分别给出不同脱冰速度下相邻塔的顺线向基底剪力 F_1 和基底弯矩 M_2 。由图可知,导线脱冰前,相邻塔受到的顺线向基底剪力和基底弯矩均为零,即脱冰前相邻塔不受纵向力作用。当导线脱冰后,基底剪力和基底弯矩均大幅增加。当脱冰速度很慢时,基底剪力和基底弯矩接近静载情况;随着脱冰速度的增加,两者的波动增大。整档同时脱冰可以看作是最不利的情况,因为此时顺线方向的底部剪力和底部弯矩达到最大值。

4.6 相邻塔的纵向不平衡张力

图 16 给出不同脱冰速度下相邻塔的纵向不平衡张力。由图可知,在脱冰之前,相邻塔的纵向不平衡张力为零,即直线塔不受纵向力作用;脱冰后纵向不平衡张力大幅增加,较快的脱冰速度对应着较大的峰值,整档同时脱冰情况下纵向不平衡张力达到最大值。

5 结论

采用有限元方法进行输电线路的脱冰模拟,并考虑脱冰速对响应的影响,有以下几点结论:

1) 笔者提出输电线路脱冰的有限元模拟方法,即

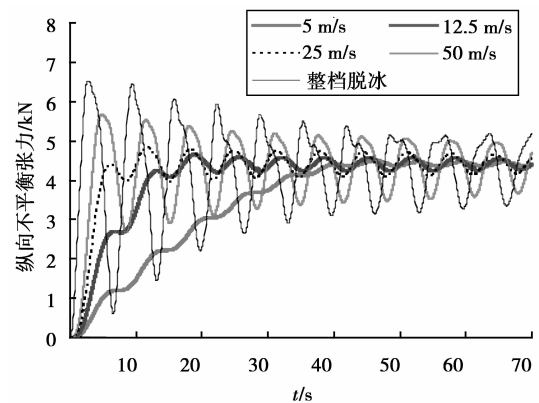


图 16 不同脱冰速度下相邻塔的纵向不平衡张力

采用单元生死来模拟覆冰脱落,通过与两档导线模型试验的对比验证,结果吻合较好,说明该模拟方法能准确模拟输电线路的脱冰。

2) 通过对 9 档输电线路的实例分析,发现地线整档同时脱冰产生的纵向不平衡张力比导线同时整档脱冰产生的数值大,因此由地线脱冰产生的不平衡张力是地线支架破坏的一个重要原因。

3) 与整档同时脱冰不同,由于覆冰积聚的势能

在 unzipping 形式脱冰情况下是一个逐渐释放的过程,因此其响应没有整档同时脱冰那样强烈。

4) 在 unzipping 形式的脱冰分析中,脱冰速度越慢,系统响应越接近于静态卸载;脱冰速度越快,系统响应越接近于整档同时脱冰;整档脱冰可以视为脱冰速度为无穷大情况,为 unzipping 形式脱冰中的最不利情况。

参考文献:

- [1] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 215-219.
HU YI. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 215-219.
- [2] 杨靖波, 李正, 杨风利, 等. 2008 年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(4): 4-8.
YANG JING-BO, LI ZHENG, YANG FENG-LI, et al. Analysis of the features of covered ice and collapsed tower of transmission line snow and ice attacked in 2008 [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(4): 4-8.
- [3] DL/T5092-1999. 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] DL/T5154-2002. 架空送电线路杆塔结构设计技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [5] JAMALEDDINE A, MCCLURE G, ROUSSELET J, et al. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA [J]. Computer and Structures, 1993, 47(4/5): 523-536.
- [6] FEKR M R, MCCLURE G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 1-11.
- [7] KALMAN T, FARZANEH M, MCCLURE G. Numerical analysis of the dynamic effects of shock-load-induced ice shedding on overhead ground wires [J]. Computers and Structures, 2007, 85(7/8): 375-384.
- [8] 侯镭, 王黎明, 朱普轩, 等. 特高压线路覆冰脱落跳跃的动力计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 1-6.
HOU LEI, WANG LI-MING, ZHU PU-XUAN, et al. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 1-6.
- [9] 李黎, 夏正春, 付国祥, 等. 大跨越输电塔-线在线路脱冰作用下的振动[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9): 32-34.
LI LI, XIA ZHENG-CHUN, FU GUO-XIANG, et al. Ice-shedding induced vibration of a long-span electric transmission tower-line system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 32-34.
- [10] ABAQUS 6.4. Theory Manual [M]. [S. l.]: Abaqus Inc., 2003.
- [11] 许建安. 35~110kV 输电线路设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [12] JAMALEDDINE A, BEAUCHEMIN R, ROUSSELET J, et al. Physical and numerical simulations of ice-shedding effects on a reduced-scale model of overhead transmission line [C] // Proceedings of the International Symposium on Cable Dynamics, October 19-21, 1995, Liege, Belgium. [S. l.]: IEEE, 1995: 45-52.
- [13] BROCKENBROUGH R L, MERRITT F S. Structural steel designer's handbook [M]. [S. l.]: McGraw-Hill Inc, 1999.
- [14] 金晓华. 对覆冰区输电线杆塔加固和设计标准修订的建议[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 44-48.
JIN XIAO-HUA. Suggestions to reinforce transmission line towers in ice area and revise the design standard criterion [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 44-48.
- [15] 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.
- [16] FARZANEH M. Atmospheric icing of power networks [M]. [S. l.]: Springer Netherlands, 2008.
- [17] 刘和云. 架空导线覆冰防冰的理论及应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.

(编辑 王维朗)