

导线防冰雪技术应用展望

唐巍 梁明

(西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要: 概述了输电线路导线覆冰覆雪与导线自身结构型式、材质的关联性,总结了目前国内外导线防冰雪技术的一些研究进展,提出了在中国开展导线防冰雪技术研究开发的迫切必要性,重覆地区导线采用防冰雪技术是对现有输电线路重冰设计的一个重要补充,是一个相对安全、简单的方法。

关键词: 防冰雪; 导线; 临界电流; 应用; 展望

中图分类号: TM75 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)02-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.012

Prospects for Application of Anti-icing Technology to Conductors

Tang Wei, Lang Ming

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: The relationship between the icing of transmission line and the structure and material of conductor is described. The research progress of anti-icing conductor at home and abroad is summarized. It is urgent to develop the research of anti-icing conductor in China. And using anti-icing conductor in the heavy icing area is an important complement to the design of transmission line, which is a relatively safe and simple method.

Key words: preventing accumulation of ice and snow; conductor; critical current; application; prospects

0 引言

输电线路的覆冰严重威胁着电网设备的安全运行,轻者引起闪络跳闸,重者导致倒塔断线,使电力设施遭到毁灭性破坏,对电力系统的安全运行产生严重危害。中国是输电线路覆冰灾害严重的国家之一。2005年华中地区冰灾、2008年南方地区大面积冰灾、2017年华中地区输电线路舞动都对当地电网造成极大破坏,给当地经济、社会和人民生活造成了极为严重的影响,因此,开展防覆冰技术研究,开发可靠的导线防冰雪技术,采用有针对性的预防措施和处理方法,已成为一个重要而紧迫的课题,对提高电力系统的安全运行具有非常重要的价值。

就目前来讲,根据抗冰雪原理的不同,输电线路导线防冰雪技术又分为以下几种类型^[1-2]:

1) 发热融冰:使输电线本身或缠绕其上的电阻丝发热,从而使冰融化。

2) 振动除冰:通过使输电线产生振动,实现除

冰的目的。

3) 改进结构减冰:通过改进外层铝股单丝结构,使导线表面光滑,冰雪不容易附着在导线表面。

4) 涂覆材料防冰:通过在导线表面涂覆某些材料减缓和防止导线结冰。

下面对目前国内外导线防冰雪技术的科研成果进行了调研总结,提出了下阶段防冰雪导线应用发展的方向。

1 导线的结构型式

中国导线型式普遍选用 GB 1179-83《铝绞线及钢芯铝绞线》及 GB/T 1179-2008《圆线同心绞架空导线》中的定型产品,具有成熟的生产、运行、施工经验,但由于绞线中单丝均呈圆柱状,因此绞制后单丝间往往存在较大的缝隙、凹槽,而这些缝隙、凹槽使覆冰可以牢牢地粘附在导线表面上。

对此,国外已研制开发出 Z 型结构型式的防冰雪导线,已投入生产并挂网运行。中国 2006 年发布

表1 不同冰区导线覆冰量比较表

导线型号	导线直径 /mm	单位长度导线覆冰量/(kg·mm ⁻¹)					
		10 mm 冰区	15 mm 冰区	20 mm 冰区	30 mm 冰区	40 mm 冰区	50 mm 冰区
JL/G1A - 400/50	27.6	1.063	1.807	2.692	4.886	7.645	10.970
JLX/G1A - 400/52	25.1	0.992	1.701	2.550	4.674	7.363	10.617

注:上表覆冰密度取0.9 g/cm³。

了GB/5 20141 - 2006《型线同心绞架空导线》,各电缆厂家在2008年特大冰灾后,也加大了这方面产品的研制,中天科技等电缆厂家已研制出梯型和Z、S型的型线同心绞导线。该系列导线绞合后,单丝间咬合更紧密,导线表面更光滑,可以减小覆冰在导线表面的附着力,过冷水滴、冰雪等不易聚集在导线表面,从而延缓了导线覆冰的时间;并且在相同铝截面下可以减少导线直径10%~15%,相应减少了导线上的覆冰量,适合重冰线路使用。普通导线及型线导线结构型式见图1、图2。



图1 普通导线结构

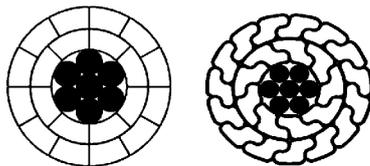


图2 型线导线结构

分别从GB/T 1179 - 2008《圆线同心绞架空导线》及GB/5 20141 - 2006《型线同心绞架空导线》标准中选择出相同铝截面、结构相近的JL/G1A - 400/50钢芯铝绞线和JLX/G1A - 400/52型线结构钢芯铝绞线,对其在不同冰区下的覆冰量进行计算比较,计算结果见表1。结果表明在未考虑导线粗糙程度对导线覆冰量影响的前提下,型线结构仍较普通圆线结构覆冰量减少了约3.2%~6.5%。

此外,根据覆冰观测和试验发现,导线覆冰或积雪过程中,总是先在导线迎风侧形成覆冰或积雪,后在冰雪重力作用下,使导线发生扭转,覆冰或积雪继续在导线迎风面堆积,使导线再次扭转,该过程重复发生,使覆冰或积雪在导线表面不断增长。其发展过程如图3所示。根据覆冰或积雪这一发展过程,可以优化导线排列结构,如法国耐克森公司的aero

-z型架空导线,增大了导线的扭距,可以减小小导线的扭转,从而减少覆冰或积雪在导线表面的聚集。

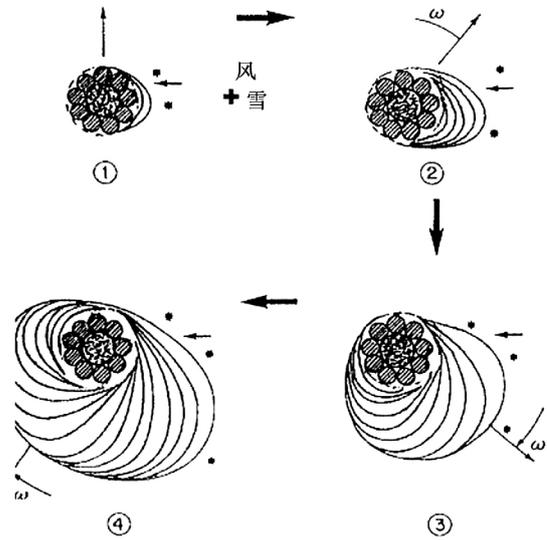


图3 覆冰或积雪在导线表面的发展过程

综上所述,导线采用型线结构可改善导线表面状况、减小导线直径、提高导线的抗扭转性能,较圆线结构在防冰雪方面具有优势。目前该项技术已在国内外多条线路上推广采用,具有一定的设计和运行经验。

2 发热融冰

2.1 耐热导线

目前中国输电线路通常采用铝、铝合金等良导体与机械性能较好的钢丝绞制而成的钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线,导线允许温度不超过70℃~80℃;而钢芯耐热铝合金导线,由于在普通的金属铝中添加了金属锆等成分,提高了材料的再结晶温度,使其能在较高的温度下不降低机械强度,其最高允许温度可达150℃。

按中国规程要求输电线路一般按经济电流密度选择导线截面,仅对于大跨越线路按照导线允许载流量来选择。对于重冰区线路采用钢芯耐热铝合金

导线后,按导线允许载流量来选择后,较普通钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线可减小导线截面积、重量,从而减小杆塔冰风荷载,降低单基塔重,节约线路初投资;虽然导线电晕、电阻产生的电能损失相对增加,但由于重冰区区段长度较短,相对总的电能损失增加不多,并且对于相同的工作负荷电流,钢芯耐热铝合金导线温度较普通导线高,能避免过冷却水滴在导线上冻结,从而使导线不结冰或尽量减少导线覆冰量的可能。下面从 GB/T 1179-2008《圆线同心绞架空导线》标准中分别选择在中国 500 kV 线路中广泛采用的 LGJ-500/45 钢芯铝绞线、A3/S1A-523/68 钢芯铝合金绞线与中天科技生产的 JGQNR-LHX/EST-480/90、NRLH60/G1A-300/40、NR-LH60/G1A-240/30 钢芯耐热铝合金绞线进行比

较。各导线参数见表 2。

按 GB 50545-2010《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》给出的载流量公式计算,各导线相同工作电流情况下导线表面温升比较见表 3。

由表 3 可以看出相同输送功率情况下,耐热铝合金导线由于将导线最高允许温度提高到 150℃,因此耐热铝合金导线的截面、直径可较常规钢芯铝(铝合金)绞线大大降低。表 3 选择的耐热铝合金导线均能满足常规 500 kV 线路极限输送容量的要求。

按导线覆冰形成机理的研究,影响导线覆冰的气象因素主要有 4 种,即空气温度(T_a)、风速风向(V)、空气或云中过冷却水滴直径(MHD)、空气中液态水含量(LWC)。这 4 种因素的不同组合确定了导线覆冰类型,各种类型覆冰形成的气象条件见表 4。

表 2 导线参数表

参数和单位	LGJ-500/45	A3/S1A-523/68	JGQNR-LHX/EST-480/90	NRLH60/G1A-300/40	NRLH60/G1A-240/30
铝(铝合金)/根	48/3.6	54/3.51	25/4.94	24/3.99	24/3.6
铝(铝合金)截面积/mm ²	488.58	523.00	479.16	300.09	244.29
钢丝/根	7/2.8	7/3.51	7/4.1	7/2.66	7/2.4
钢丝截面积/mm ²	43.10	67.80	92.42	38.90	31.67
直径/mm	30.00	31.60	28.82	23.94	21.60
单位长度质量/(kg·km ⁻¹)	16 880.00	1 974.20	2 046.17	1 131.90	921.50
额定抗拉力/kN	128.10	239.26	246.44	92.36	75.19
导线弹性模量/GPa	65.00	69.00	76.83	70.49	70.49
导线热胀系数/(×10 ⁻⁶ /℃)	19.30	19.30	18.40	19.44	19.44
直流电阻(20℃)/(Ω·km ⁻¹)	0.0591 2	0.064 3	0.066 83	0.097 75	0.120 07
导线截面积/mm ²	531.68	591.00	571.58	338.99	275.96

表 3 导线表面温升比较表

输送功率 /MW	工作电流 /A	导线表面温度/℃				
		LGJ-500/45	A3/S1A-523/68	JGQNR-LHX/EST-480/90	NRLH60/G1A-300/40	NRLH60/G1A-240/30
540	164	55.0	55.3	55.0	54.8	54.8
1 333	405	60.0	60.7	60.6	64.0	67.1
1 800	547	65.0	66.0	66.2	73.5	79.8
2 165	658	70.0	71.4	71.9	83.2	92.6
2 471	751	75.0	76.7	77.5	92.8	105.8
2 741	833	80.0	82.0	83.2	102.8	119.3

注: 1) 环境温度取 40℃; 2) 功率因数取 0.95; 3) 表中按 500 kV 电压等级, 单回三相, 每相导线四分裂计算输送功率。

表 4 覆冰的形成条件

覆冰类型	条件	$V/(m \cdot s^{-1})$	$T_a/℃$	$MVD/\mu m$	$LWC/(g \cdot m^{-3})$
雨淞	范围	3~20	-5~0	10~40	0.6~3
	典型值	8	-2	25	1.25
混合淞	范围	1~15	-3~-9	5~35	0.4~2
	典型值	5	-5	15~18	0.8
雾淞	范围	1~10	-10~-25	1~20	0.05~0.6
	典型值	3	-10	10	0.3

表5 典型覆冰条件下导线不覆冰的临界电流

导线型号	临界电流/A			临界电流密度/(A·mm ⁻²)		
	雨淞	混合淞	雾淞	雨淞	混合淞	雾淞
LGJ-500/45	494	693	887	1.011	1.418	1.815
A3/S1A-523/68	476	669	857	0.91	1.279	1.639
JGQNLHX/EST-480/90	472	663	847	0.985	1.384	1.768
NRLH60/G1A-300/40	375	524	670	1.106	1.546	1.976
NRLH60/G1A-240/30	330	461	589	1.196	1.671	2.134

按表4给出的典型覆冰条件,对5种导线不覆冰的临界电流进行计算,计算结果见表5^[3]。

通过表5可以看出典型覆冰气象条件下,耐热铝合金导线的临界电流均小于普通钢芯铝(铝合金)绞线,其中随着耐热铝合金导线截面的减小其临界电流亦在减小。NRLH60/G1A-240/30导线在雨淞情况下的临界电流值基本与中国500kV线路一般正常输送容量1000MW时对应的四分裂导线每根子导线的工作电流300A接近。因此在冬季通过科学调度,提高易覆冰线路输送功率,并选用导线直径、临界电流均较小的耐热铝合金导线,再辅之其他导线防冰雪的措施,可以减少导线覆冰量或使导线不覆冰。但耐热铝合金导线导电率较钢芯铝绞线低,且运行温度高在运行中损耗较大,实际应用中应采用最小年费用法并结合工程施工运行情况,综合比较选用合理的导线型式。

2.2 低居里铁磁材料

铁磁材料的居里点特性,指当材料在其居里点温度以下时,磁感应强度增高,表现为铁磁体;而在居里点温度以上时,磁感应强度显著下降,表现为顺磁体^[4]。目前常用的铁磁材料有铁(Fe)、镍(Ni)、钴(Co),其中铁(Fe)的居里温度为1034K,镍(Ni)的居里温度为627K,钴(Co)的居里温度为1397K。钴(Co)不仅居里温度高且价格昂贵,因此目前普遍采用铁镍合金做为铁磁材料,为降低铁镍合金的居里温度,掺入铬(Cr)、硅(Si)元素,制成Fe-Ni-Cr-Si低居里铁磁合金材料。该类材料在居里点温度以下时,受电场影响,其表面磁滞、涡流明显,发热量显著上升,可以融冰或避免导线结冰。并且在居里点温度以下时,在导线电流大到某一数值后,铁磁材料磁感应强度接近饱和,此后随着导线电流的

增加,铁磁材料产生的损耗基本不变,武汉高压研究所等单位研制的一种低居里点铁磁材料发热功率与导线传输电流的特性曲线见图4^[5];而此类铁磁材料在居里温度以上时,材料磁感显著降低,发热很少或不发热,线路损耗相对增加不多。

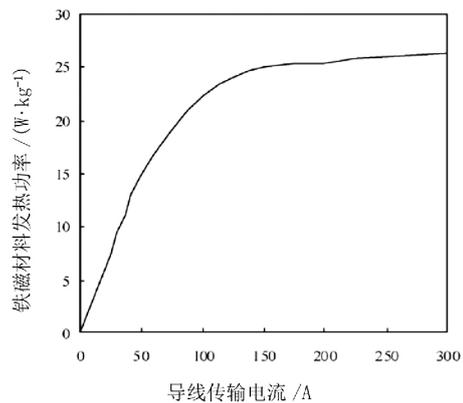


图4 低居里点铁磁材料发热功率与导线传输电流的特性曲线

英国学者对普通LN-ACSR-940钢芯铝绞线、外层缠绕、不缠绕铁磁线的情况进行了试验比较,导线外层缠绕铁磁线后发热明显增加,且通过适当提高铁磁线中镍金属含量,可进一步提高导体的发热量,导体中的电流与发热量的关系曲线见图5。

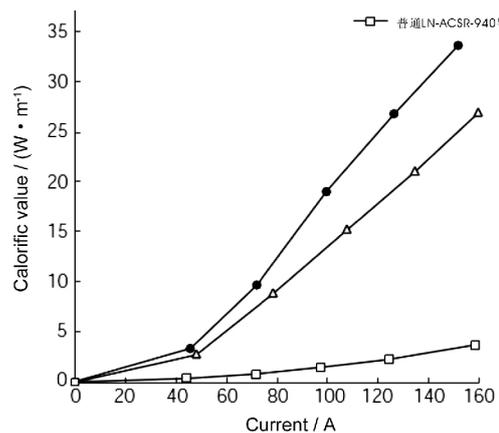


图5 电流与发热量的关系曲线

英国等其他国家亦已开发出具有同样特性的铁磁线,其中英国学者通过对铁磁材料中镍(Ni)含量的比例进行调节,并通过磁感应强度测试、发热试验及实验室人工降雪模拟试验,合理确定了Fe、Ni、Cr、Si四种元素的含量,该种铁磁线已在覆雪严重的输电线路挂网运行,并取得不错的防雪效果。

由于目前铁磁材料采用Fe、Ni、Cr、Si等元素,原材料费用高,制造工艺复杂;国内对铁磁材料的研究还相对落后,目前研制出的铁磁材料居里点温度在60℃~80℃之间,使线路在大部分时间运行情况下,铁磁线仍发热,线路损耗大大增加,且施工也较为复杂,目前国内外仅有少量线路采用,下一阶段能否通过铁磁材料配方的调整优化降低其居里点温度,成为该类低居里铁磁材料推广应用于防冰雪导线的关键。

3 涂覆材料

根据覆冰形成机理,覆冰是空气中的过冷却水滴在导线表面冻结并持续发展的过程。因此通过在导线表面涂覆憎水性涂料,一方面可减少冰雪在导线上的粘附力;另一方面也可减少过冷却水滴在导线表面的集聚,从而抑制覆冰的形成和发展。

在人工气候模拟箱中通过温控系统控制覆冰气温和成冰水温,对同种铝单丝涂附不同涂料后的覆冰特性进行了比较,试验表明涂料的表面张力越小,憎水性越强,防止铝单丝覆冰的效果越明显。该试验中铝单丝不同涂料表面覆冰增长情况见图6^[6]。

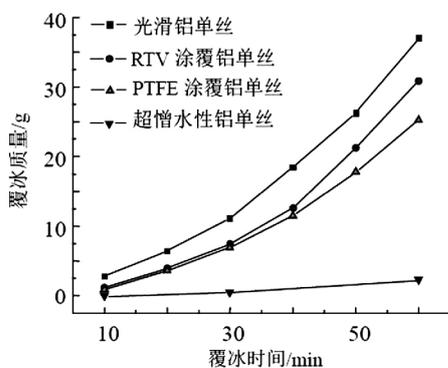


图6 不同铝单丝表面覆冰质量增长情况
用作导线的防冰雪涂料,一方面要有较高的热

传导性,另一方面又要有较低的表面张力和较强的憎水性,并在野外恶劣的自然条件下具有很好的抗老化性能及耐候性,否则每次冰雪来临前重新涂刷

的话,运行维护成本太高。由于防冰雪导线用涂料起步较晚,目前各科研院校在实验研究中已开发出部分导线防覆冰涂料,虽然其疏水性能均达到了较高的水平,但除冰效果有限并只在湿雪条件下起作用,在气温低、水雾呈过冷却的情况下,防冰效果均不理想。因此对于涂料中成膜物质的选择、配套颜料的制备、涂料合成工艺等方面还有待进一步科研攻关,但防冰雪涂料应用前景还是非常明朗的。

4 结 语

虽然目前导线防冰雪技术的研究仍处于起步阶段,但通过对导线结构型式及材质的优化、型线工艺的成熟、耐热导线的逐步推广、低居里铁磁材料的研发、防冰雪导线涂料的破题,导线防冰雪技术的研究和攻关已取得初步成效。通过以上调研结论,从提高导线防冰防雪能力方面对今后重冰线路设计具有重要的参考和借鉴意义。今后在此基础上继续加大投入力度,并将理论研究与工程实践紧密结合,必将对以避、抗为主的重冰线路的设计理念产生深远影响,并进一步提高重冰区线路的安全性,降低运行维护的难度。

参考文献

- [1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防冰[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 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.
- [3] 审屠刚. 电力系统输电线路抗冰除冰技术研究进展综述[J]. 机电工程, 2008, 25(7): 72-75.
- [4] 蒋兴良,范松海,孙才新,等. 低居里点铁磁材料在输电线路防冰中应用前景分析[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 19-22.
- [5] 梅冰笑,潘学明. 输电线路防覆冰临界电流密度预测模型研究[J]. 电气应用, 2009, 28(4): 72-76.
- [6] 汪佛池,李成榕,吕玉珍,等. 憎水涂层对铝单丝表面覆冰性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 123-128.

作者简介:

唐 巍(1979),高级工程师,从事输电线路电气设计;
梁 明(1973),教授级高工,从事输电线路电气设计。

(收稿日期:2018-10-11)