

Review of Characters and Prevention Measures of Recent Galloping in Transmission Line

Xinmin Li, Junhui Li

China Electric Power Research Institute, Beijing, 100055

Email: lixm@epri.sgcc.com.cn, ljh@epri.sgcc.com.cn

Abstract: The conductor galloping is a self-excited vibration caused by wind excitation to iced transmission line conductors which leads to strand break and wire break due to conductor fatigue and interphase flashover and trip, and even results in hardware fittings damage and tower collapsing and other accidents. Based on galloping accident occurred in large-area within State Grid Corporation of China, it analyzed and summarized the mechanism of galloping, new characteristics of galloping and anti-galloping measures as well as the progress of research approach of galloping home and abroad and other aspects. It can be seen from the analysis results of line galloping in China that icing parameters, wind excitation situation and line structure and parameters and other aspects are the major factors effecting line galloping. With the fast development of line construction in China, however, some new characteristics of line galloping presented. It discussed the efficiencies for different anti-galloping measures and respective limitations by talking about the galloping prevention and controlling study that had been put into practice, and raised the problems to be solved in study on conductor galloping and further research direction.

Keywords: transmission line, iced galloping, new characteristics of galloping, prevention and controlling technology study.

输电线路舞动特点及防治措施研究进展

李新民, 李军辉

中国电力科学研究院, 北京, 中国, 100055

Email: lixm@epri.sgcc.com.cn, ljh@epri.sgcc.com.cn

摘要: 导线舞动是输电线路导线覆冰后在风激励下所产生的一种自激振动, 极易发生导线疲劳断股、断线、相间闪络跳闸, 严重的甚至会导致金具破坏、倒塔等事故发生。基于近期国网公司范围内的大面积舞动事故, 分析总结了输电导线舞动的舞动机理、舞动现象的新特点, 以及国内外防舞措施及舞动研究方法的进展等情况。针对国内线路舞动的分析结果表明, 覆冰参数、风激励情况以及线路结构和参数等仍是影响线路舞动的主要因素, 但随着我国线路建设的快速发展, 线路舞动也出现了一些新的特点。通过讨论我国已开展的舞动防治研究工作, 探讨了不同防舞措施的有效性, 以及不同防治措施的局限性。最后提出了导线舞动研究中尚待解决的问题和进一步研究方向。

关键词: 输电线路; 覆冰舞动; 舞动新特性; 防治技术研究

1. 引言

随着国民经济的快速发展, 我国电力需求持续攀升, 电网规模迅速扩大, 特别是特高压输电线路的建设和运行, 我国电网已成为世界上结构最复杂、规模最大的电网。由于我国幅员辽阔, 地理及气象条件复杂多变, 使得我国很多地区的电网在冬季易遭受冰雪、大风天气影响, 引发气象灾害, 加之近年来的气候变

化, 恶劣气象频繁出现, 使得我国电网遭受气象灾害的概率、程度都大为增加。在我国电网气象灾害中, 架空导线覆冰舞动是发生频率高、影响范围广、造成损失大的一种灾害形式, 严重威胁到电网的安全稳定运行。面对复杂的环境因素, 为建设坚强国家电网、确保大电网的长期安全稳定运行, 需要安全、先进、经济、可靠的防舞动理论和措施作为保证。

统计资料表明, 我国属于舞动灾害最严重的国家之一。截止目前, 我国共发生有文字记录的舞动事故约 150 起 (同一时间、同一地区发生的记为一起),

国家自然科学基金项目 (50908218)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50908218)

随着我国电网规模的发展和恶劣气象的频繁出现,进入新世纪以来,电网发生舞动事故的频率和危害程度明显呈增加的趋势,几乎每年都发生大范围的舞动事故,造成了严重的经济损失和社会影响。2009年11月到2010年3月,河南、山西、湖南、江西、浙江、辽宁、河北、山等省相继出现六次输电线路大面积覆冰舞动现象,造成多条不同电压等级线路发生机械和电气故障,给电网运行带来巨大威胁,其中山西、浙江、江西、湖南、河北、山东六省都是首次出现大规模的舞动现象。

面临新的形势和挑战,现有的技术水平表现出了认识上滞后、知识储备不足和应对能力欠缺等问题。

输电线路覆冰舞动具有发生机理复杂、防治难度大和破坏力强的特点,是架空输电线路领域国际公认的难题。存在的主要问题如:缺乏统一的舞动机理,每种机理只适用于某些特定情况;现有舞动分析技术多基于简化模型,计算精度有限;现有防舞方法及防舞装置应用仍存在很多缺陷,防舞效果不稳定;缺乏防舞设计规范和标准等。为建设统一、坚强、智能国家电网,对输电线路覆冰舞动相关关键技术问题开展系统性的研究已刻不容缓。

2. 09-10年冬季线路舞动事故概述

根据统计,受七次大范围大风降温、雨雪冰冻等恶劣天气影响,公司系统河南、山西、湖南、江西、浙江、东北、辽宁、河北、山东、陕西、湖北、安徽、江苏等13个网省公司共634条66千伏及以上输电线路发生舞动现象,舞动及跳闸情况统计如表1所示,并造成337条66千伏及以上电压等级线路发生闪络跳闸619次。

Tab1 Line galloping and flash statistics for different voltage
表1 不同电压等级线路舞动及跳闸统计表

电压等级 kV	66	110	220	330	500	合计
舞动线路	123	129	232	4	146	634
跳闸线路条数	103	37	123	4	70	337
未跳闸线路条数	20	92	109	0	76	297
跳闸次数	213	42	212	4	148	619

线路舞动除引起电气故障外,还同时造成螺栓松动、脱落,金具、绝缘子、跳线损坏,导线断股、断线,塔材、基础受损等严重的机械损伤。2009-2010年冬季线路舞动范围之广、涉及设备之多、危害影响

之大,历年罕见。

3. 09-10年冬季线路舞动规律及特点分析

根据研究,线路舞动是由于导线发生偏心覆冰后,在风的激励作用下产生的一种低频率(约0.1~3Hz)、大振幅(可达10m以上)自激振动现象。舞动的形成主要取决于三方面的因素,即覆冰、风的激励(风力和风向)和线路结构参数。2009-2010年冬季发生的线路舞动属于典型的覆冰舞动,其发生条件、舞动表现形式、造成的后果等与以往的舞动规律基本一致。

3.1 舞动发生规律

从气象条件看,2009年11月入冬以来的气象特点较往年有较大差异,主要表现为降水多,降温幅度大、范围广、过程频繁、持续时间长,极端降温事件多等,在每一次天气过程中都有雨雪冰冻,并伴有大风降温,极易诱发线路覆冰舞动。七次大面积线路舞动,基本都经历了雨淞或雨夹雪天气过程,都观察到了明显的导线覆冰,覆冰厚度4-25mm不等。

从线路走向看,舞动线路的路径区域以平坦开阔平原或丘陵为主,96%的舞动线路(区段)为东西走向。由于我国冬季的主导风向以北风或偏北风为主,发生舞动线路的走向与主导风向的夹角普遍大于45°。少数南北走向的舞动线路,经过调查了解,主要原因是受微地形、微气象影响,舞动时实际风向和线路走向同样保持较大夹角。

从线路结构看,不同结构的线路对舞动影响较大。500千伏和220千伏线路占舞动总数的60%,其中,500千伏线路导线多为四分裂、六分裂型式,220千伏线路导线多为双分裂型式。架线较高的同塔双(多)回线路占舞动线路的61.5%,舞动区域内的紧凑型线路普遍发生了舞动。

3.2 线路舞动特点

与以往线路舞动事件相比,2009-2010年冬季线路舞动表现出一些新的特点。

1 舞动范围扩大,频度明显增加:2009-2010年冬季七次舞动过程波及14个网省公司,湖北、河南、辽宁等传统的易舞区线路舞动仍较严重,而历史上极少发生舞动的河北、山东、浙江、山西、陕西、安徽和江苏等省份也相继发生了大范围的舞动现象,舞动区域范围明显扩大。冬季每一次大风降温、冰冻雨雪天气过程,都有线路舞动事件发生,仅河南就发生了三

次大范围的线路舞动，舞动发生频度明显增加。

2 舞动发生规模远远超过历年：据统计，2000 至 2008 年，公司系统 500 千伏、220 千伏舞动线路总数分别为 43 条和 54 条；而 2009-2010 年冬季的七次舞动中，500 千伏、220 千伏舞动线路分别为 148 条和 212 条，远远超过前九年之和。同时，舞动线路范围涉及 10-500 千伏各个电压等级线路，部分通讯线路和电铁接触网也发生了舞动。

综上所述，舞动已不能简单认为是个别地区、个别区段的小概率事件，当气象、覆冰、线路结构参数等条件满足时，各区域、各电压等级输电线路均可能发生舞动。

3 新型线路抗舞能力较弱：七次线路舞动过程中，同塔双（多）回线路较之单回线路、紧凑型线路较之普通线路更易受到舞动影响，在相同气象、覆冰及地貌条件下，新型线路更易发生舞动，舞动发生后也更容易发生跳闸故障，同时更易造成机械故障。在七次线路舞动过程中，同塔双回线路舞动 390 条，占舞动线路总数的 62%；单回线路舞动 244 条，占总数的 38%。同塔双回舞动线路中 62% 发生跳闸故障，单回舞动线路中 39% 发生跳闸故障；330 千伏 4 条舞动线路均为同塔双回线路，全部发生跳闸故障如表 2 所示。

Tab.2 Line galloping and failure statistics for different voltage levels and structure characters

表 2 不同电压等级及结构特点线路舞动及故障统计表

电压等级	同塔双（多）回		单回路	
	舞动条数	故障条数	舞动条数	故障条数
66kV	95	78	28	25
110kV	75	28	54	9
220kV	116	81	116	42
330kV	4	4		
500kV	100	51	46	19
合计	390	242	244	95

3.3 新型线路抗舞能力分析

与常规单回线路相比，同塔双（多）回线路、紧凑型线路在杆塔结构、挂线方式、相间距离等方面存在明显差异，这些差异导致在同等的气象、区域等条件下，更易发生舞动损坏。

(1) 新型线路架线高度明显高于常规线路，且多为分裂导线，导线截面也较大，这些条件更易于激发线路舞动。导线舞动主要以垂直方向为主，振幅最大可达 1 倍弧垂甚至更大，在相同条件下，同塔双（多）

回、紧凑型因相间距离减小，与单回线路相比更容易发生相间闪络跳闸。

(2) 国内杆塔设计中，单回路杆塔外型普遍采用酒杯型、猫头型，横担较短；而双回路杆塔外型普遍采用鼓型、伞型，横担较长。舞动发生时，双回路杆塔承受的载荷和弯矩相对较大，更易受损。

(3) 相同设计条件下，双回路耐张塔横担承受静荷载的能力相当。但由于双回路耐张塔横担螺栓较多，松脱破坏的概率较高；多回路导线产生较大舞动载荷的组合工况增多，双回路耐张塔在舞动载荷作用下的破坏几率比单回路要高。

3.4 输电线路舞动对电网安全的影响和危害

从以上对舞动规律和特点的分析可知，输电线路舞动是一种对电网安全运行危害较大的故障型态，对正在建设中的特高压及“三华”同步电网影响巨大，必须认真研究，全面防治。

3.4.1 高电压、长距离、大容量输电形式易发生舞动。

目前投运及建设中的 1000 千伏、±800 千伏、±660 千伏的输电线路，大多采用 6 分裂、8 分裂导线，杆塔平均高度在 50 米以上，同时还大量采用同塔双回杆塔。而我国能源分布特点又决定了大部分高压、特高压输电线路都是东西走向，与冬季主导风向成较大夹角，这些都是易于引起舞动的主要因素。

3.4.2 线路舞动易导致电网大面积停电

线路舞动影响范围大，持续时间长，相间故障多发，容易导致电网大面积停电事故。1 月 20 日山东发生大面积舞动，自 8 时 18 分起至 21 时 50 分，13 条 500 千伏线路跳闸 36 条次，41 条 220 千伏线路跳闸 86 条次，电网结构遭受严重破坏，烟威电网仅通过崂阳线并网。1 月 28 日，河北、山东、河南发生大面积舞动，华北与山东联网的辛聊双回线、黄滨双回线先后故障，山东与华北两次短时解列。阳城电厂送出的三回线路也先后因舞动导致永久故障，阳城电厂全停。

3.4.3 线路舞动易造成机械故障

线路舞动不仅引起短路跳闸，长时间舞动还会导致杆塔螺栓松动、强度降低，金具、绝缘子、跳线损坏，导线断股、断线，塔材、基础受损甚至倒塔等大量机械损坏，抢修难度大。另外，舞动造成的杆塔螺栓松动、导线、金具、绝缘子隐性损伤等缺陷短时间内往往难以发现，对线路安全运行构成威胁。

2 月 9 日-10 日凌晨，河南发生大面积舞动，18

条 500 千伏及以上线路舞动, 5 条线路跳闸, 8 条线路杆塔、导线损坏严重, 抢修工作持续到 2 月 20 日完成。图 1 为线路舞动造成的破坏情况。



Fig 1 Damage conditions of line tower, hardware fittings and infrastructure caused by galloping

图 1 舞动造成的线路杆塔、金具、基础损坏情况

4. 线路舞动防治工作现状及存在的问题

导线舞动具有强非线性特点, 是架空输电线路力学方面的世界性难题。国际上舞动研究最早始于 20 世纪 30 年代, 加拿大、日本、前苏联、美国及北欧一些线路舞动事故频繁的国家, 在理论分析、试验研究和防舞技术等方面开展了广泛的研究。

国内线路舞动问题的大规模研究和治理工作始于上世纪 80 年代, 主要集中在中国电科院、部分高校和湖北、河南等网省公司, 虽然起步比较晚, 但也取得了丰硕的研究成果, 其中湖北中山口汉江大跨越舞动治理工程获得了 1997 年国家科技进步一等奖。近年来, 由于线路舞动问题并不突出, 舞动防治的后续研究和治理工作有所停滞。

4.1 舞动防治方法及效果评估

现行的舞动防治技术和方法主要是针对引起舞动的三要素, 分别从“避、抗、防”三个方面采取措施。一是从气象条件考虑, 在线路设计时避开易于引起舞动的覆冰区域或主导风向的线路走向。二是适当提高输电线路的机械和电气强度以抵抗舞动对线路的破坏。三是从改变导线系统的参数考虑, 采取各种防舞措施, 以抑制舞动发生。经过多年舞动理论研究及舞动治理实践, 国内外建立了多种防舞方法, 研制了不同的防舞装置, 线路舞动防治工作取得了一定成效。从工程实际应用看, “避”、“抗”技术的理论研究不够, 经济性及可操作性较差, 也缺乏实践经验。“防”舞技术相对成熟且易于实现, 经济性也较“避”和“抗”好, 对于易舞区新建、在运线路基本都采用“防”的措施。

目前常用防舞装置包括: 相间间隔棒、双摆防舞器、线夹回转式间隔棒、失谐摆、防舞鞭、偏心重锤、阻尼防舞器、扰流器等, 目前应用较广、效果较好的防舞器及其形式如图 2 所示。从防舞效果看, 河南三次舞动过程共有 59 条 500 千伏线路和 119 条 220 千伏线路发生舞动, 其中, 其中 33 条 500 千伏线路和 40 条 220 千伏线路跳闸, 跳闸率分别为 56% 和 34%; 500 千伏舞动线路中有 15 条安装了双摆防舞器或线夹回转式间隔棒, 其中 3 条跳闸, 跳闸率为 20%; 220 千伏舞动线路中有 17 条安装了相间间隔棒, 其中 5 条跳闸, 跳闸率为 29%, 但主要是对与其交叉跨越的 35 千伏或 10 千伏线路舞动跳闸所致。总体来看, 防舞装置对舞动具有较好的抑制效果, 但也存在应用上的局限性, 目前尚无一种防舞装置在任何情况下都能防止舞动的发生。



(a) 相间间隔棒防舞



(b) 线夹回转式间隔棒



(c) 双摆防舞器

Fig.2 Normal anti-galloping devices

图2 常用防舞装置

4.2 舞动防治工作存在的主要问题

(1) 舞动理论和试验研究基础薄弱。导线舞动是一种低频大振幅振动，具有很强的非线性，理论研究难度较大。冰冻雨雪天气具有随机性，使得各类模型无法全面模拟舞动的真实过程。舞动现场条件千变万

化，某些局部防舞治理经验难以全面推广。另外，舞动研究试验手段缺乏，耗资大、周期长，难以满足实际需要。

(2) 防舞设计依据和标准缺乏。现行输电线路设计规程中缺少线路舞动防治的具体技术指标和措施，也没有明确的防舞治理方案和原则；同时，舞动区域的划分标准尚未建立，线路设计中难以定位防舞区段，防舞设计存在困难。

(3) 线路设计未考虑舞动动载荷影响。现行线路设计载荷按照静载荷考虑，当线路舞动时，会产生较大的动载荷，易造成杆塔横担挂线部位及杆塔螺栓承受超过设计的极限载荷，导致杆塔整个横担失稳或强度破坏、杆塔螺栓剪切破坏等。这也是除线路跳闸外，舞动所造成的更为隐蔽和具有破坏性的影响及后果。

(4) 防舞治理效果评价及舞动监测需要加强。现有防舞装置都有其使用特点和适用范围，专业性较强，不同单位对防舞技术的掌握参差不齐，技术应用存在一定的盲目性，防舞治理效果评估方法和标准需要建立。另外，线路舞动监测缺乏必要的技术规范和手段作支撑，线路舞动监测记录不全面、不规范，线路舞动往往是在跳闸后才发现，不利于电网安全预警和控制。

5. 进一步的研究工作

在输电线路舞动研究中，需要系统、全面、深入地开展输电线路舞动机理、舞动数值模拟以及舞动的防治研究工作，完善现有的舞动基本理论，全面详细的分析覆冰舞动规律及对我国输电线路的破坏影响，研究有效的防治措施和应对方案，提出合理的设计规范和标准，以切实提高输电线路抵御覆冰舞动能力。

针对国内线路舞动的特征，需要在以下 5 个方面开展研究工作：

5.1 输电线路覆冰舞动理论及数值仿真研究

舞动属于强非线性问题，现有的舞动机理都是基于线性化条件得到，机理的应用存在一定的局限性；随着我国电网建设的迅猛发展，输电线路系统变得更加复杂多样，舞动影响因素也变得愈加复杂。数值计算和模拟方法是分析舞动现象的有效工具，较之理论分析，利用数值分析技术可以更真实的模拟导线及金具、绝缘子等相关配套结构的特征；较之试验分析，数值分析不受试验条件、费用等因素的限制。目前数值计算中用到的振子模型由于自由度较少适合进行定

性分析,而有限元模型中传统的梁、索等单元应用于导线这种特定的柔性结构存在很多缺陷,需要开发更有效的有限元离散单元及数值计算方法;现有舞动数值分析方法有多种,目前对这些方法的特点及适用性缺乏系统性的分析;针对我国线路特点,舞动产生的动态响应特性对杆塔、导线、金具的影响也是目前比较关注的问题。针对这些问题,开展舞动相关理论及数值仿真研究。开展舞动影响参数、舞动仿真技术及舞动对线路系统影响研究。

5.2 输电线路覆冰舞动试验技术研究及应用

由于舞动问题的复杂性,目前通过理论分析完全解决其机理是不现实的,试验方法是研究舞动问题的一个重要手段,通过试验分析可以模拟真实环境下舞动性态、验证数值分析结论、评估防舞设计方法等,试验方法主要包括真型试验和风洞试验两种。目前风洞试验分析主要是基于准稳态假设测试覆冰导线空气动力参数,而非稳态条件下的气动参数特性更接近实际情况,但相关研究工作比较缺乏,我国相关参数试验结果的积累也比较匮乏;真型试验主要集中在国外试验线路上,国内至今还没有建成一条试验线路。针对上述问题,开展输电线路覆冰舞动试验技术研究,建立防舞装置效果评估系统。

5.3 防舞技术系统性研究和新型防舞器研制

实现线路防舞治理是舞动相关研究分析的最终目的,目前根据不同防舞机理开发的防舞装置有很多种,每种防舞装置的结构特点、防舞功能差别较大,缺乏系统性分析;在我国应用较广的双摆防舞器、线夹回转式间隔棒和相间间隔棒都有特定的适用范围,不能从根本上达到抑制舞动的功能。针对上述问题,开展防舞技术系统性研究和新型防舞器研制。研究各种防舞装置的经济性、技术性、适用范围;研制粘弹性阻尼防舞装置;研究相间间隔棒防舞机理,优化防舞布置方法,并研发有效的相间间隔棒连接金具。

5.4 气象信息分析及舞动监测技术研究

气象条件是影响舞动激发的最重要因素,统计分析我国气象变化特征及区域性的气象条件是研究舞动发生机理及发展趋势的关键工作,但目前国内尚未针

对线路舞动特点开展专门的气象条件分析课题;舞动在线监测技术是收集现场气象资料和舞动特征资料最有效的方法,建立舞动在线监测系统是实现全面防舞治理工作的关键环节,但目前舞动在线监测技术还处于初步阶段,无法真正服务于舞动治理实际工作中。针对上述问题,开展气象信息分析及舞动监测技术研究。建立舞动气象预警模型;研究气象预警技术在架空输电线路防舞中的应用。

5.5 防舞工程设计规范和标准

统计表明,我国已经呈现出舞动频发的趋势,急需在线路勘测、规划、设计及运行维护阶段实现防舞系统化和标准化,国内目前没有系统开展此方面的研究工作,工程应用中仍缺乏防舞设计规范和标准的指导。针对上述问题,开展防舞工程设计规范和标准研究。建立舞动信息数据库,并实现数据更新和交互功能;研究舞动分布图绘制标准和技术,绘制重点区域舞动分布图;研究差异化防舞设计原则,建立防舞差异化设计方法;研究制定防舞设计规范和标准。

致 谢

感谢国家自然科学基金项目(50908218)的支持。

References (参考文献)

- [1] Guo Yinglong, Li Guoxing, You chuanyong. Galloping Process of Transmission Line[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] Lilien, Jean-Louis, Van Dyke. STATE OF THE ART OF CONDUCTOR GALLOPING[M]. France: CIGRE publication, 2007.
- [3] Wang Shaohua, Jiang Xingliang, Sun Caixin. Study Status of Conductor Galloping on Transmission Line[J]. High Voltage Engineering: 2005, 31(10): 11-14. 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术: 2005, 31(10): 11-14.
- [4] Xu Zhongnian. Study of Wind Tunnel Experiment for Conductor Galloping on Transmission Line[J]. Electric Power Technology, 1992, (4): 7-11. 徐中年. 输电线舞动的风洞试验研究[J]. 电力技术: 1992, (4): 7-11.
- [5] Cai Tingxiang. Study of new Mechanism for Conductor Galloping on Transmission Line[J]. China Electric Power: 1998, 31(10): 62-66. 蔡廷湘. 输电线舞动新机理研究[J]. 中国电力: 1998, 31(10): 62-66.