

DOI: 10.7667/PSPC201785

分裂数及金具对特高压导线扭转刚度特性影响试验研究

商全鸿¹, 赵彬²

(1. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100055)

摘要: 多分裂导线是特高压输电线路中常用的导线形式。为了能够明确线夹回转式间隔棒和压重式间隔棒等防舞金具对导线束扭转刚度的影响, 采用试验方法, 对在多种金具安装工况下多分裂 LGJ-500/45 导线扭转刚度特性进行了测试研究。分析并揭示了防舞金具的类型、安装方式和数量对分裂导线扭转刚度的影响规律。结果表明, 档距不变的情况下, 间隔棒安装越密集, 导线的扭转刚度反而会变小; 安装两种防舞器时, 导线-防舞器系统的扭转刚度区别不大; 多分裂导线的扭转刚度具有不可忽视的非线性特征。

关键词: 特高压; 多分裂导线; 扭转刚度; 线夹回转式间隔棒; 压重式间隔棒; 防舞金具

Experimental study on torsional stiffness properties of ultra-high-voltage conductor affected by bundle number and fittings

SHANG Quanhong¹, ZHAO Bin²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China)

Abstract: Bundle conductor is commonly used in UHV transmission lines. In order to clearly reveal the influences of anti-galloping fittings on torsional stiffness properties, such as the rotary clamp spacers and heavy spacer, their values for bundled LGJ-500/45 wires under various working conditions are determined by test, through which the effect law of anti-galloping fittings' types, installation modes and quantity on bundled wire torsional stiffness is analyzed. The results show that keeping the test span constant, the more anti-galloping fittings just like spacers are used in single span, the smaller torsional stiffness becomes; there are little differences between torsional stiffness values of bundle conductor systems with rotary clamp spacers or heavy spacer; their nonlinear characteristics should not be ignored.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. GC71-17-024).

Key words: ultra-high-voltage; bundle conductor; torsional stiffness; rotary clamp spacer; heavy spacer; anti-galloping fittings

0 引言

为满足建设坚强、智能电网的要求, 我国正在组建一个 750~1000 kV 特高压输电网, 以提供超大功率传输能力, 缓解能源供需矛盾^[1]。至 2017 年, 我国已有包括 1000 kV 南荆 I 线在内的多条特高压线路投入运行, “三交四直” 特高压骨干网架已经初步形成, 由于其大容量、远距离传输的优点, 极大促进了西部水能、风能等清洁能源的开发与利用^[2-4]。特高压线路多采用电能传输特性优良的分裂导线形式, 为防止风致振动等常见自然灾害所带来的风险,

在覆冰舞动易发区域, 需要按照一定布置方案加装防舞金具, 如常见的线夹回转式和压重式间隔棒^[5-6]等, 前者的设计初衷是通过引入线夹扭转关节, 使单根子导线上出现偏心覆冰时, 在偏心重力影响下, 导线可以自然转动, 从而使得形成的覆冰更为均匀, 降低偏心性, 防止舞动发生; 后者则是通过增加分布质量, 改变导线垂向固有频率和运行张力, 达到治理风致振动的目的。很明显, 附加的防舞装置会导致分裂导线的扭转刚度特性发生一定变化。然而现有文献中, 针对多分裂导线-防舞金具系统开展的动力学分析大都简单采用多根子导线的等效扭转刚度, 并未考虑防舞器的安装所产生的影响^[7-8]。

利用理论分析或数值仿真手段研究特高压多分

基金项目: 国家电网公司科技项目 (GC-71-17-024)

裂导线-防舞金具系统扭转刚度的难度较大^[9-14]。由现有文献^[7-8]所建立的描述特高压线路覆冰舞动运动的方程和数值模型可知, 扭转刚度是研究覆冰舞动特性, 体现分裂导线抗振能力的重要参数。为了明确不同防舞金具对分裂导线扭转刚度的影响规律, 提升取值准确性, 为后续研究成果可信性提供可靠依据, 本文采用基于胡克定律的试验方法, 对特高压线路中常用的多分裂 LGJ-500/45 导线的扭转刚度, 受线夹回转式、压重式间隔棒安装数量和间距等因素影响的情况进行试验研究, 为该类型导线的防振防舞设计提供了试验依据。

1 测试原理

根据胡克定律, 扭转力矩 M 与扭转角位移 θ 的关系为^[15]

$$M = k_t \theta \quad (1)$$

式中, k_t 为扭转刚度。试验用的刻度盘结构如图 1 所示, 其主要分为三个部分, 主体为圆形的刻度底盘, 悬挂重物的悬挂端, 悬杆和质量块以及配重端。可以通过加载砝码来施加力矩, 并测量刻度盘相对指针的转角来测定多分裂导线截面的角位移。

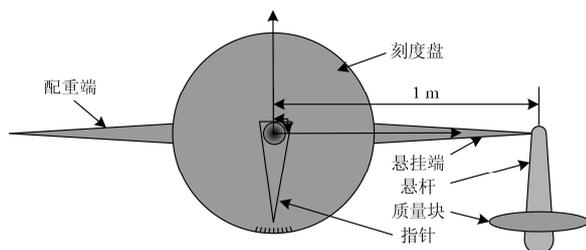


图 1 测试扭转刚度用的刻度盘

Fig. 1 Dials for torsional stiffness test

根据图 2, 截面角位移与力矩的关系为

$$M = mg \cos \theta \quad (2)$$

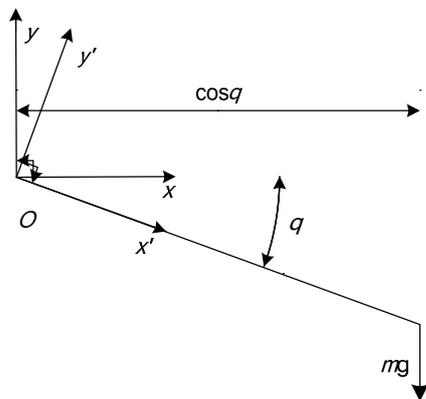


图 2 导线截面扭转示意图

Fig. 2 Relationship between angular displacement and torque

将式(2)代入式(1), 则有

$$k_t = \frac{mg \cos \theta}{\theta} \quad (3)$$

由此, 试验中通过记录砝码质量 m 和导线截面扭转角 θ , 即可按上述式(3)计算得到导线当前扭转刚度 k_t 。

表 1 金具安装方案及编号

Table 1 Installation arrangements and numbers of fittings		
金具布置方案编号	金具及数量	自左向右各次档距/m
方案 0	普通间隔棒×1	70-70
方案 1-1	普通间隔棒×1, 线夹回转式间隔棒×2	30-40-40-30
方案 1-2	普通间隔棒×1, 线夹回转式间隔棒×2	20-50-50-20
方案 1-3	普通间隔棒×1, 线夹回转式间隔棒×2	10-60-60-10
方案 2-1	普通间隔棒×1, 压重式间隔棒×2	30-40-40-30
方案 2-2	普通间隔棒×1, 压重式间隔棒×2	20-50-50-20
方案 2-3	普通间隔棒×1, 压重式间隔棒×2	10-60-60-10

2 试验设备与方法

扭转刚度试验设备布置及试验档实际安装情况分别如图 3 和图 4 所示。如图 3, 按照导线分裂数、金具型号和安装次档距的不同, 试验可分为有多种工况方案, 其中固定表盘用的普通间隔棒始终处于档距中间位置(如表 1 中方案 0 所示), 附加的两个线夹回转式间隔棒(或压重式间隔棒)分别位于两侧, 位置间距见表 1 其余各方案所示。

试验步骤为: 首先依照图 3, 将 140 m 档距的 4 分裂 LGJ-500/45 导线安装于试验系统, 分裂间距为 400 mm, 预紧力为 25%RTS。

其次, 在悬杆上按照 5 kg 的间隔加载砝码, 对多分裂导线施以扭转力矩, 记录对应产生的扭转角位移 θ 。

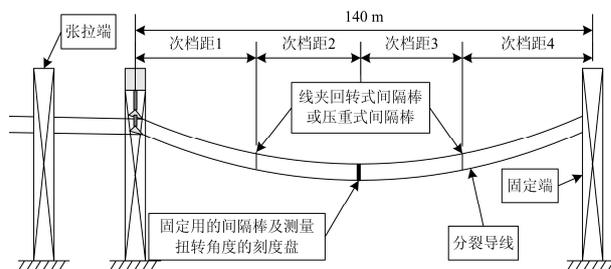


图 3 扭转刚度试验设备布置图

Fig. 3 Equipment installation of torsional stiffness test

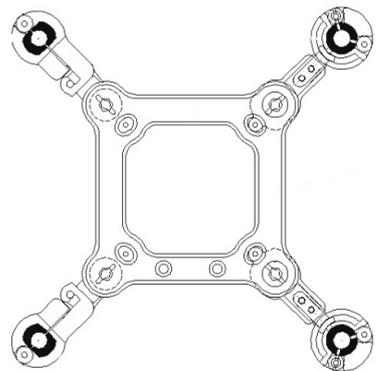


图 4 试验档现场安装图

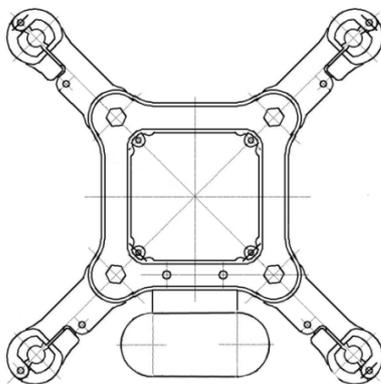
Fig. 4 Installation of devices under test

再次，依次按照表 1 中方案 1-1~2-3 的顺序，将两个 4 分裂线夹回转式间隔棒或压重式间隔棒(如图 5 所示)安装于刻度盘左右，加载砝码并测量不同质量下的角位移数据 θ 。

最后，更换 8 分裂 LGJ-500/45 导线及对应金具(见图 6)为试验对象，并重复上述测试步骤。试验测得的结果见图 7—图 10。



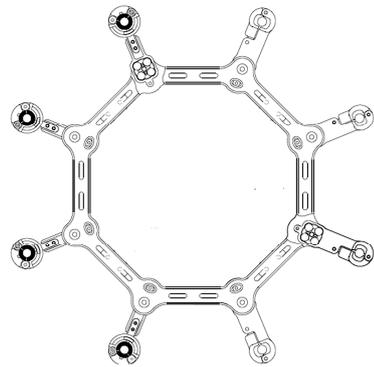
(a) 4 分裂线夹回转式间隔棒



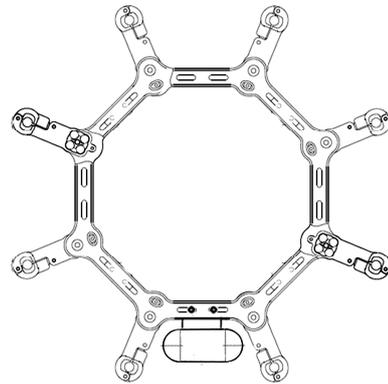
(b) 4 分裂压重式间隔棒

图 5 4 分裂导线防舞金具

Fig. 5 Anti-galloping fittings for 4-bundle conductors



(a) 8 分裂线夹回转式间隔棒



(b) 8 分裂压重式间隔棒

图 6 8 分裂导线防舞金具

Fig. 6 Anti-galloping fittings for 8-bundle conductors

由图 7—图 10 可以看出，在 140 m 档距条件下，受安装金具的影响 4、8 分裂 LGJ-500/45 导线的扭转刚度有以下特点。

1) 保持档距不变，间隔棒的安装反而使得导线的扭转刚度变小。这是由于金具数量增多，次档距相应减小，单个子导线的所分担的形变减小，不同子导线间的相互作用相对增强，力矩作用被分担，从而导致相同力矩作用下，扭角变小。

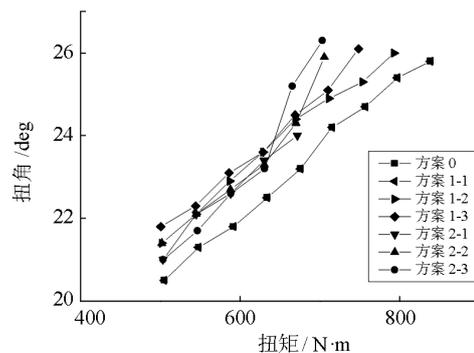


图 7 4×LGJ-500/45 导线扭转角随扭矩的变化

Fig. 7 Curves of angular displacements along with torque for 4×LGJ-500/45

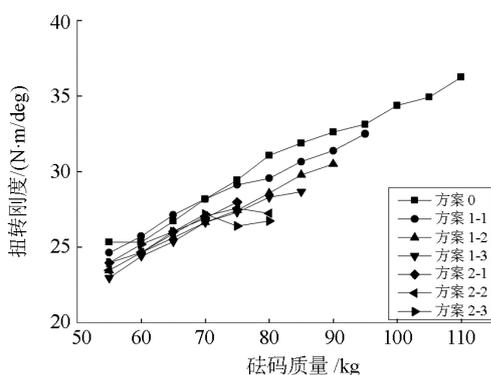


图 8 4×LGI-500/45 导线扭转刚度随砝码质量的变化

Fig. 8 Curves of torsional stiffness along with mass for 4×LGI-500/45

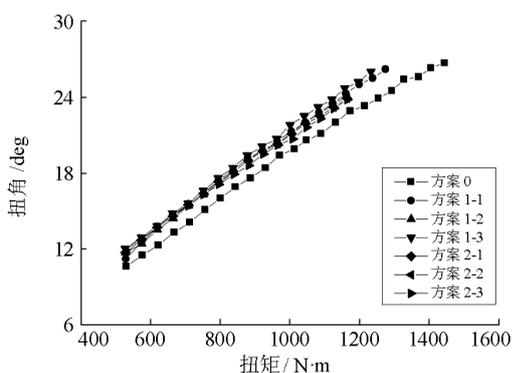


图 9 8×LGI-500/45 导线扭转角随扭矩的变化

Fig. 9 Curves of angular displacements along with torque for 8×LGI-500/45

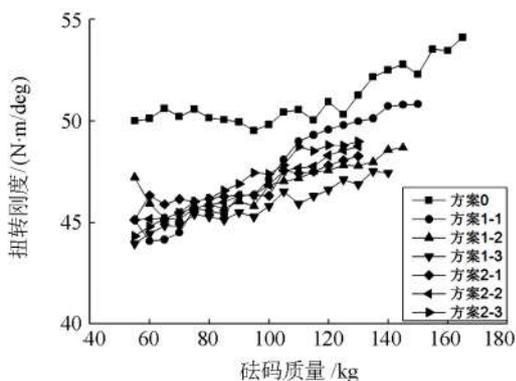


图 10 8×LGI-500/45 导线扭转刚度随砝码质量的变化

Fig. 10 Curves of torsional stiffness along with mass for 8×LGI-500/45

2) 分裂导线-线夹回转式间隔棒系统的扭转刚度与或分裂导线-压重式间隔棒系统相比, 差别很小, 且与安装位置无关, 该现象在 8 分裂导线上最为明显。该现象表明, 回转关节和分布质量块的引

入对分裂导线扭转刚度的影响效果相同。

3) 由图 9 和图 10 可知, 方案 0 条件下的 8 分裂导线扭转刚度特性曲线存在明显的拐点, 约为 (20deg, 1000 N·m)。小于该角位移的区间为线性段, 初始扭转刚度约为 50 N·m/deg, 之后扭转刚度随力矩的增大而增大。其他方案下的 8 分裂以及所有方案下的 4 分裂导线, 则基本不存在线性段, 具有较强非线性刚度特征。由此可知, 导线分裂数量越多或次档距越大均使得导线的超长柔度杆特性相对减弱。

同样, 前述试验方法和结论对 6 分裂导线扭转刚度试验也具有重要参考价值, 有兴趣的研究者或工程人员可据此对其进行详细试验分析。

3 结论

通过对试验室内多分裂 LGJ-500/45 导线扭转刚度的试验研究, 本文结论如下:

1) 间隔棒安装过密, 导线扭转刚度反而会变小。由于导线整体柔性的增加会降低其扭转频率, 尤其不利于防舞。所以, 在线路设计或分析工作中, 安装与间隔棒具有类似功能的防舞器, 应对该特点加以考虑, 在保证二者功能性的基础上, 适度减少其安装数量。

2) 线夹回转式或压重式间隔棒对系统的扭转刚度的影响相同, 且与金具安装位置基本无关, 尤其是 8 分裂导线。实际工程中, 应根据设计目的的不同, 对二者进行合理选择。

3) 除仅安装一个普通间隔棒的 8 分裂导线在角位移小于 20 deg 时表现出初始线性刚度外, 其他多分裂导线-防舞金具系统的扭转刚度均具有不可忽视的非线性特征, 即扭转刚度随着扭转角的增大而明显增大。在对导线或金具的力学特性进行理论分析或计算时, 应对该特性重点加以考虑。

参考文献

- [1] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 潘晓杰, 张顺, 文汀, 等. 渝鄂异步互联对华中电网运行特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 157-162.
- PAN Xiaojie, ZHANG Shun, WEN Ting, et al Operation characteristic analysis of Central China Power Grid in unsynchronized interconnection of Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control,

- 2016, 44(19): 157-162.
- [3] 耿庆申, 卢玉, 樊海荣, 等. 特高压和超高压交流输电系统运行损耗比较分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 72-77.
GENG Qingshen, LU Yu, FAN Hairong, et al. Comparative analysis of operation losses of UHV AC and EHV AC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 72-77.
- [4] 周国伟, 顾用地, 周建平, 等. 特高压直流输电系统非特征谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 122-128.
ZHOU Guowei, GU Yongyi, ZHOU Jianping, et al. Analysis of non-characteristic harmonic in UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 122-128.
- [5] 朱宽军, 刘胜春, 刘彬, 等. 特高压输电线路导、地线风致振动防止技术研究[C] // 特高压输电技术国际会议, 5月21-22, 2009, 北京, 中国: 1-8.
ZHU Kuanjun, LIU Shengchun, LIU Bin, et al. Study on anti-vibration technology of conductor and ground wire for UHV transmission line[C] // International Conference on UHV Transmission Technology, May 21-22, 2009, Beijing, China: 1-8.
- [6] 任西春, 朱宽军, 刘超群. 特高压输电线路新型防舞器建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 96-101.
REN Xichun, ZHU Kuanjun, LIU Chaoqun. Modeling and analysis of new anti-galloping devices on UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 96-101.
- [7] 蔡君艳, 刘习军, 张素侠. 覆冰四分裂导线舞动近似解析解分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 305-310.
CAI Junyan, LIU Xijun, ZHANG Suxia. Analysis of approximate analytical solution on galloping of iced quad bundle conductors[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 305-310.
- [8] 郝淑英, 冯海茂, 范孜, 等. 覆冰输电线非线性瞬态固有频率研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 283-287.
HAO Shuying, FENG Haimao, FAN Zi, et al. Investigation of nonlinear transient natural frequency of iced transmission line[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 283-287.
- [9] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping part II: torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 708-720.
- [10] NIGOL O, CLARKE G J, HAVARD G J. Torsional stability of bundle conductors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1666-1674.
- [11] WANG J, LILIE J L. Overhead electrical transmission line galloping: a full multi-span 3-DOF model, some applications and design recommendations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 909-916.
- [12] WANG J, LILIE J L. A new theory for torsional stiffness of multi-span bundle overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1405-1411.
- [13] 谢增, 刘吉轩, 刘超群, 等. 架空输电线路分裂导线扭转刚度计算新方法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(2): 100-105, 140.
XIE Zeng, LIU Jixuan, LIU Chaoqun, et al. New calculating algorithm for torsional stiffness of bundle overhead transmission lines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(2): 100-105, 140.
- [14] 朱宽军, 刘彬. 架空输电线路分裂导线扭转刚度的计算[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 210-214.
ZHU Kuanjun, LIU Bin. Calculation of torsional stiffness of bundle conductors in overhead transmission lines[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 210-214.
- [15] 单辉祖. 材料力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

收稿日期: 2017-06-10; 修回日期: 2017-11-12

作者简介:

商全鸿(1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力工程规划及防灾减灾;

赵彬(1987—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为输电线路防灾减灾. E-mail: zb9991987@163.com

(编辑 张爱琴)