

840 kN 大吨位悬式绝缘子振动疲劳性能测试及分析

姚修远¹, 周 军¹, 谷 琛¹, 孙东旭¹, 于佳欢¹, 近藤诚一², 田中直树²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. NGK 电力事业本部, 日本 485-8566)

摘 要: 为减轻串重, 简化金具, 研发 840 kN 大吨位绝缘子已成为迫切需要解决的问题。840 kN 大吨位绝缘子为国内外首次研发, 为了确定其长期机械疲劳性能, 总结以往经验, 设计了一套有效的技术方法, 能够量化考核大吨位绝缘子机械性能。依据所提出的试验方法, 确定了试验参数、设计了合适的试验装置。对 7 个厂家共 10 种型号的 420 kN 和 840 kN 悬式绝缘子进行了振动疲劳试验, 考核了 840 kN 绝缘子的振动疲劳极限及残余机械强度, 并与 420 kN 绝缘子的相关性能进行了对比。依据试验结果, 得到了 840 kN 绝缘子机械疲劳性能的设计薄弱点及其振动疲劳特性, 证明了 840 kN 绝缘子的振动疲劳性能不低于 420 kN 绝缘子。相关研究结果为 840 kN 大吨位绝缘子振动疲劳检测提供了思路, 也为其工程推广应用提供了技术支撑。

关键词: 840 kN 大吨位悬式绝缘子; 振动疲劳性能; 振动疲劳极限; 机械破坏负荷; 残余机械强度; 振动破坏次数

Test and Analysis on Vibration Fatigue Properties of 840 kN Large Tonnage Suspension Insulator

YAO Xiuyuan¹, ZHOU Jun¹, GU Chen¹, SUN Dongxu¹, YU Jiahuan¹, Seiichi Kondo², Naoki Tanaka²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. NGK Power Business Group, Japan 485-8566)

Abstract: To reduce the weight of the string and simplify fittings, how to develop 840 kN large tonnage insulator has become an urgent problem to be solved. The 840 kN large tonnage insulator is a completely new product. In order to determine its long-term mechanical fatigue properties, a set of effective techniques and methods were designed to give the quantitative assessment of 840 kN large tonnage insulator. According to the proposed test methods, the test parameters and the vibration fatigue device was determined. Then, the fatigue tests of 7 different manufacturers, 10 types 840 kN large tonnage insulators and 420 kN insulators were carried out, the mechanical properties of 840 kN large tonnage insulators were assessed, and the fatigue weak points were found. It is found that the fatigue property of 840 kN insulator is not worse than that of 420 kN insulators. The research results provide helps for the mechanical properties detection of 840 kN large tonnage insulators, and also provided technical support for the promotion and application of the engineering.

Key words: 840 kN large tonnage suspension insulator; vibration fatigue property; vibration fatigue limitation; mechanical damage load; residual mechanical strength; vibration damage times

0 引言

到目前为止, 世界各国直流输电悬式绝缘子机械负荷等级多为 120 kN、160 kN、210 kN、300 kN, 而我国所采用的直流输电线路悬式绝缘子机械负荷多为 420 kN、550 kN。上述绝缘子均经过了长期的工程应用及现场考核, 机械性能和疲劳性能均满足工程需求^[1-7]。

随着特高压直流输送容量和电压等级提高, 输

电线路的设计需要进一步优化。尤其是 ± 1100 kV 直流输电工程开始建设, 为了降低输电损耗, 1250 mm^2 截面导线被广泛应用, 导线重量明显增加。因此, 单串 420 kN 或 550 kN 绝缘子难以满足受力需求, 需要多串并联以满足大截面导线的载荷强度。这势必对金具选型、杆塔设计等工作带来挑战。为减轻串重, 简化金具, 特高压直流输电工程对更大吨位绝缘子的工程应用提出了新的要求。研发 840 kN 大吨位悬式绝缘子已成为迫切需要解决的问题, 该机械负荷的悬式绝缘子为国内外首次研发, 其各项机电性能都需要经过深入的研究和测试。由于特高压输电线路沿线气象条件差别较大, 悬式绝

基金资助项目: 国家电网公司科技项目(± 1100 kV 以上电压等级直流输电技术前期研究) (GYB17201600174)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (Preliminary Research on UHVDC Transmission Above ± 1100 kV) (GYB17201600174).

缘子在承受导线负荷的同时, 还会面临微风振动、舞动和次档距振动^[8-9]等动态载荷的考验, 可能造成绝缘子串疲劳损坏甚至掉串、倒塔等重大事故。大吨位悬式绝缘子长期振动的机械疲劳性能直接影响了特高压直流输电线路的安全可靠运行。

关于绝缘子的振动疲劳性能, 国内外学者取得了一些研究成果。文献^[10-11]主要针对复合绝缘子的机械可靠性能进行研究, 得到了绝缘子破坏强度的试验方法及要求。文献^[12-13]针对复合绝缘子耐张串微风振动疲劳特性进行了研究, 设计了微风振动试验平台, 对 300 kN 载荷以下的复合绝缘子开展了 3 000 万次的振动试验, 找到了复合绝缘子的薄弱环节并认为微风振动对复合绝缘子机械性能影响较小; 文献^[14-15]依据正弦振动试验台, 完成了载荷 210 kN 的瓷或玻璃悬式绝缘子以及 400 kN 以下复合绝缘子的振动试验。国际上, 日本 NGK 公司对瓷绝缘子可变载荷的疲劳性能进行了研究^[16-17], 研究中发现绝缘子瓷件几乎不会产生疲劳, 疲劳破坏无一例外是发生在绝缘子金具部分, 绝缘子疲劳主要表现为金具的疲劳。并通过纵型疲劳试验机, 使用 5 片串 120 kN 绝缘子开展了疲劳试验, 试验结果表明绝缘子钢脚球头根部是金具的最易疲劳部位。

但是上述研究结果存在以下问题: 1) 针对悬式绝缘子振动疲劳的研究成果较少, NGK 公司针对小吨位绝缘子进行了大量的疲劳试验工作, 但是并没有对更大吨位的绝缘子进行疲劳试验, 也没有进一步提出相应的试验标准和关键试验参数, 难以直接对大吨位绝缘子的机械性能进行评估; 2) 针对复合绝缘子开展的振动疲劳试验, 虽然要求完成 3 000 万次以上的振动^[18-19], 但是试验可能并没有检测到绝缘子的振动疲劳极限; 3) 微风振动疲劳试验的振动参数选择没有经过完整的试验验证, 需要进一步完善; 4) 微风振动试图试验整串的疲劳性能, 由于试验条件和场地限制, 难以维持试验条件恒定, 试验存在较大的分散性; 5) 目前, 并没有被广泛认可的悬式绝缘子振动疲劳性能的测试方法及考核标准。

本文通过归纳总结以往经验, 提出了一套可量化考核的疲劳性能试验方法, 并依此搭建了一套大吨位悬式绝缘子振动疲劳性能试验平台; 完成了国内外主要厂家 840 kN 大吨位悬式绝缘子产品的振动疲劳试验及数据分析, 探讨了大吨位绝缘子长期运行的可靠性。

1 840 kN 大吨位悬式绝缘子振动疲劳性能试验方法

本文提出的大吨位悬式绝缘子振动疲劳性能试验方法能够检测大吨位绝缘子的机械破坏力值、振动疲劳极限和破坏形式等参数, 并与 420 kN 绝缘子(认为该绝缘子经过了长期工程使用的考核)的参数进行对比, 为 840 kN 悬式绝缘子的疲劳性能设计提供依据。

1.1 试验原理及方案

对于绝缘子机械性能的测试应分为两个部分:

1) 机械破坏试验, 直接将未疲劳绝缘子试品用静态力拉至破坏。作为绝缘子未疲劳状态下的机械强度指标。

2) 振动试验, 对绝缘子串施加一个正弦变化的动态力, 直至绝缘子串破坏或达到规定次数。经过研究可知, 绝缘子的疲劳强度由钢脚的金属疲劳特性及其动态力的振幅主要决定^[16], 满足如图 1 所示的 SN 曲线。

图 1 为金属材料是否产生破坏的统计结果分界线, SN 曲线有“L”型趋势, 虚线疲劳产生临界曲线的示意。恒定振幅条件下在 A、E 区间, 认为绝缘子无疲劳状态; B 点为疲劳产生临界点; C 区间为绝缘子疲劳发展区域; D 点后, 绝缘子达到金属疲劳的极限。当负荷振幅较小时, SN 曲线基本为水平直线, 即为 E 区间, 认为如果振动次数>200 万次, 绝缘子仍未被破坏, 就证明当前试验条件不能达到绝缘子的振动疲劳极限^[17]。

SN 曲线可以展示出绝缘子的振动疲劳性能, 但是绘制绝缘子的 SN 曲线需要大量的试品和试

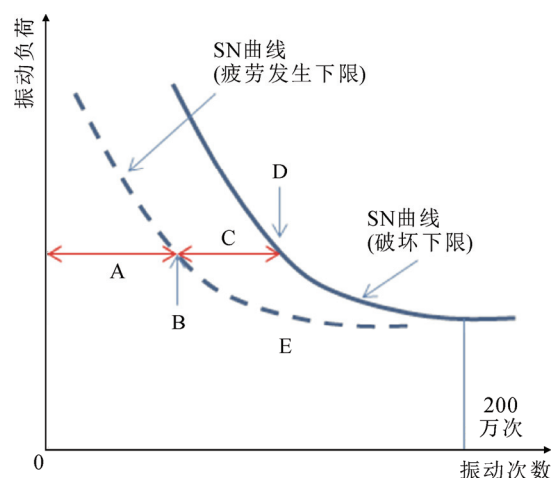


图 1 金属疲劳的 SN 曲线

Fig.1 SN curve of metal fatigue

验。为了测试绝缘子的振动疲劳性能,可以设定统一的振动负荷,作为考核绝缘子疲劳性能的指标。该振动负荷较低将会导致绝缘子处于 E 区域,无论振动次数如何都无法达到疲劳极限(类似于微风振动 3 000 万次而机械强度改变较小);如果振动负荷较高,条件过于苛刻,绝缘子会很快破坏,无法通过振动次数考核绝缘子的疲劳性能。

综合上述考虑,本文设计悬式绝缘子振动疲劳试验方案如图 2 所示,能够考核绝缘子机械破坏负荷、疲劳极限以及疲劳状态下的残余机械强度。

步骤 1: 选择一种型号的待测绝缘子,通过静力装置将其直接破坏,得到机械破坏值 F_{con} ,并记录其破坏形态。

步骤 2: 选择步骤 1 中同型号的待测绝缘子,组成绝缘子串。对绝缘子串施加变化的力,模拟绝缘子串的受力振动,保持该施力状态直至有绝缘子串达到疲劳极限而损坏,记录该振动破坏次数 N_f 以及破坏绝缘子的破坏形态;同时,认为该串绝缘子中尚未损坏的绝缘子处于疲劳状态,将一部分疲劳绝缘子按照步骤 1 的流程,静态破坏,记录破坏力值 F_f ,该值即为残留机械强度,并记录破坏形态。

1.2 试验参数选择

如 1.1 节试验方案介绍,本方法是基于同一考核标准来检测绝缘子疲劳性能的。为降低试验分散性及试验设备设计难度,对由 4 片绝缘子构成的绝缘子串进行振动疲劳试验。

由于工程设计上,对绝缘子机械负荷的使用不会超过其额定机械负荷的 30%,本文采用这个极限条件,令绝缘子串始终承受一个 $30\% \times$ 额定机械负荷的力。

中国电力科学研究院前期对 420 kN 悬式绝缘子进行了深入研究^[20],基本获得了 2 种型号绝缘子的 SN 曲线。考虑到试验设计和效果,振动负荷选择 $\pm 7.5\% \times$ 额定机械负荷,试验中力值变化波形如图 3 所示。

根据对导线微风振动的研究^[4,8],当在导线背风面形成的气流涡旋脱离频率与导线固有频率重合而产生谐振时,导线开始振动,其振动形式正弦波。该振动频率为 3~150 Hz,且发生频繁。当风速为 0.5~10 m/s 时,导线最容易产生振动,且振幅和持续时间较长,绝缘子串受到的振动越强烈^[12]。根据中国电力科学研究院和日本 NGK 公司的研究成果^[16-17,20],选择绝缘子串的振动频率为 6.7 Hz。

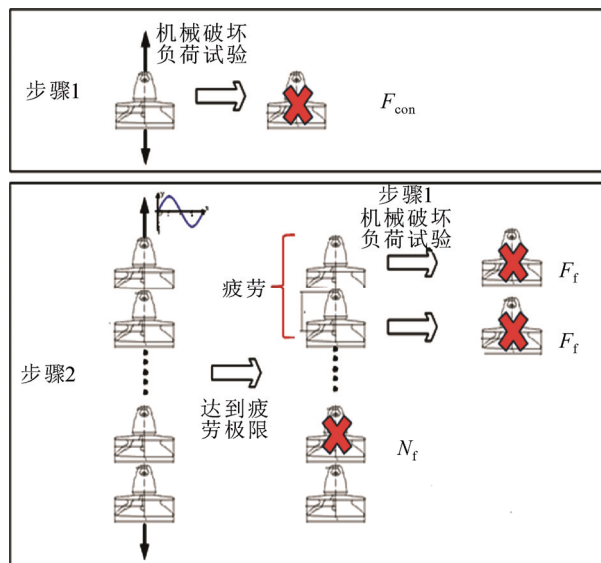


图2 所提出试验方案的示意图

Fig.2 Schematic diagram of the proposed test method

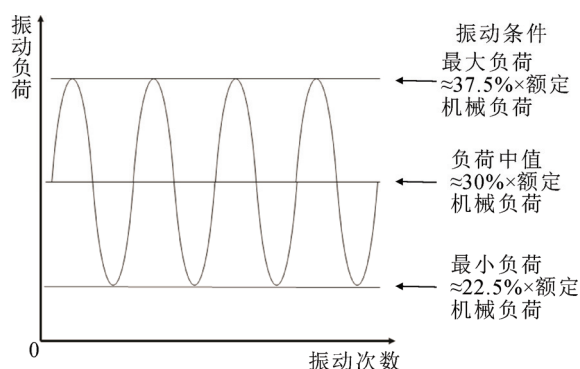


图3 绝缘子振动条件

Fig.3 Vibration parameters of insulator string

1.3 试验装置

根据 1.1 节和 1.2 节的试验方法和参数,完成相关振动疲劳试验需要有静力破坏试验机、振动疲劳试验机。

1.3.1 静力破坏试验机

静力破坏试验机用于测试绝缘子的机械破坏负荷 F_{con} 和疲劳状态下的残余机械强度 F_f 。

其关键参数为:最大试验力 2 000 kN;最大拉伸空间 2 000 mm (不包括连接金具);试验力测量精度: $\pm 1\%$ 。

1.3.2 振动疲劳试验机

振动疲劳试验机用于测试绝缘子串的振动疲劳性能。针对 840 kN 绝缘子的要求,其动态拉力需要达到 ± 400 kN,力值精度 $\pm 1\%$,频率范围 0.1~30 Hz,能够输出正弦波、三角波、方波、梯形波、斜

波等力值变化波形。

2 大吨位悬式绝缘子振动疲劳性能试验结果及分析

2.1 试品介绍

按照所提出的绝缘子振动疲劳试验方法, 针对目前市场上主要的 7 个绝缘子厂家 10 个型号的绝缘子进行了振动疲劳试验, 如表 1 所示。

厂家 1—7 分别提供了各自最新生产的 840 kN 绝缘子作为试验组, 厂家 1—3 还提供了 420 kN 绝缘子作为比较组, 用来横向对比 840 kN 大吨位绝缘子的振动疲劳性能。每种型号的 840 kN 绝缘子均完成了 3 组试验, 并且用厂家 1—3 的 2 组 420 kN 绝缘子试验结果作为对比。

2.2 振动疲劳性能试验

针对 10 种型号的绝缘子, 开展了振动疲劳性能试验, 试验中需要加装绝缘子串保护装置防止绝缘子串损坏后出现倾倒或坠落的二次损坏; 在进行玻璃绝缘子试验时需要表面包好塑料膜, 防止绝缘子自爆; 并保证好每一片绝缘子的钢脚与钢帽紧密连接, 不歪斜。

在 $(30\% \pm 7.5\%) \times$ 额定机械负荷的试验条件下, 各厂家试验结果如图 4 所示。

对于厂家 1, 其 420 kN 绝缘子完成 24.4—38.66 万次振动后出现损坏, 单片绝缘子钢脚球头部断裂, 达到了疲劳极限; 840 kN 绝缘子完成 24.48—78.76 万次振动后达到疲劳极限, 同样是钢脚球头位置损坏。两种型号绝缘子的振动疲劳性能基本持平。

对于厂家 2, 其 420 kN 绝缘子完成 26.8—39.5 万次振动后达到疲劳极限, 840 kN 绝缘子完成 30.31—39.14 万次振动后达到疲劳极限, 且两种型号绝缘子均为钢脚球头部断裂。

厂家 3 的 420 kN 绝缘子在相同试验条件下完成 68.21—71.01 万次振动达到疲劳极限, 而其 840 kN 绝缘子均完成了 200 万次振动, 因此认为该试验条件并不能造成绝缘子疲劳。840 kN 绝缘子的振动疲劳性能优于 420 kN 绝缘子。

对于厂家 4—7 的试品, 只完成了 840 kN 绝缘子的试验, 大部分完成了 200 万次的振动。厂家 4 和厂家 7 分别有一组试品在完成 147 万次和 75.43 万次振动后达到疲劳极限。

整个振动疲劳试验过程中, 各型号绝缘子如果达到疲劳极限, 其破坏状态均为钢脚球头部位断裂,

表 1 试品介绍

Table 1 Introduction of the insulators

序号	生产厂家	机械强度 /kN	结构高度 /mm	爬电距离 /mm
1	厂家 1	420	205	550
2	厂家 1	840	300	635
3	厂家 2	420	205	620
4	厂家 2	840	300	700
5	厂家 3	420	205	550
6	厂家 3	840	300	700
7	厂家 4	840	300	720
8	厂家 5	840	300	650
9	厂家 6	840	300	710
10	厂家 7	840	300	700

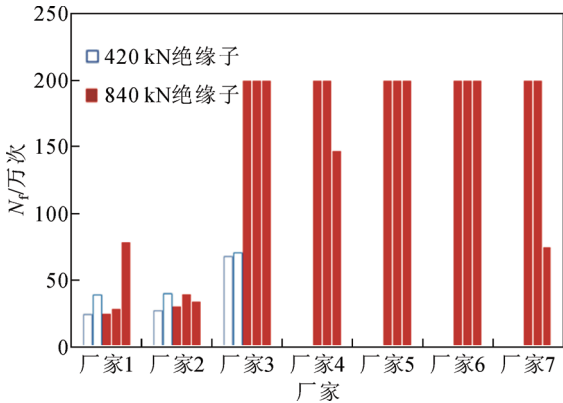


图 4 振动疲劳试验结果

Fig.4 Results of the vibration fatigue tests

且其断面均为典型的海浪冲击波纹形状, 如图 5 所示, 该形状为典型疲劳特性状态。同时, 各型号绝缘子均未出现水泥开裂或者粘接面分离等现象, 目测外观未见变化。

综上所述, 各厂家 840 kN 大吨位绝缘子的振动疲劳极限相差较大, 但其振动疲劳特性均至少达到了 420 kN 绝缘子的水平; 所有达到疲劳极限的绝缘子, 其破坏位置皆为钢脚的球头部位, 疲劳性能的薄弱点一致。

2.3 机械破坏试验

按照本文所提出的方案, 对每组进行过振动疲劳试验的绝缘子进行机械破坏, 以得到其残余机械强度 F_r , 并与相同型号、相同批次的绝缘子机械破坏负荷 (10 组试验平均值) 进行比较, 以考核振动疲劳试验对绝缘子机械特性的影响, 如图 6 所示。

图 6 数据与振动疲劳试验的结果有一定的可比性。如果振动疲劳试验中有绝缘子达到了振动疲劳极限, 那么同一串中的绝缘子皆处于疲劳状态, 在

图 1 的 SN 曲线中的 C 区域。该区域中的绝缘子由于疲劳, 导致了其机械性能的下降。

厂家 1—3 的 420 kN 绝缘子均处于疲劳状态, 其绝缘子残余机械强度比型式试验机械强度下降了 17%~35%。

厂家 1、2、4、7 均有部分 840 kN 绝缘子在振动疲劳试验中达到了疲劳极限, 同一串内的绝缘子皆认为处于疲劳状态, 其机械强度下降了 11%~33% 之间。

同时, 处于疲劳状态的绝缘子的静力破坏位置均为钢脚球头处, 与振动疲劳破坏位置一致。破坏位置如图 7 所示, 疲劳造成的海浪冲击波纹形状清晰可见。图 7(b)虽然没有因为达到疲劳极限直接损坏, 但是由于进入疲劳发展区, 钢脚球头处金属机械特性受损, 机械强度明显下降。

作为对比, 各厂家完成 200 万次考核的绝缘子串, 由于并没有进入疲劳状态, 其机械强度基本不变与机械负荷相差 5% 以内, 考虑到试验分散性的原因, 认为其机械强度下降不明显。

其破坏形式与疲劳状态破坏大不相同, 多为钢脚延伸破坏, 也有少部分绝缘件损坏和铁帽破坏的情况, 如图 8 所示, 而并非球头处断裂。

3 结论

1) 经过 26.8 万次—71.01 万次的振动疲劳试验, 几乎所有 420 kN 试品都进入了疲劳损坏区, 其机械强度降低范围是 17%~35%。

2) 经过 24.48 万次—200 万次的振动疲劳试验, 21 组 840 kN 试品试品中有 7 组试品进入疲劳损坏区, 机械强度降低范围是 11%~33%, 其余 840 kN 试品未进入疲劳损坏区, 机械强度基本没有变化。

3) 840 kN 大吨位绝缘子与 420 kN 绝缘子一样, 在进入疲劳状态后, 无论是振动疲劳损坏或是机械破坏, 其薄弱点均为钢脚球头处, 其破坏断面均为典型的海浪冲击波纹形状; 若绝缘子未进入疲劳状态, 振动疲劳试验不会造成损坏, 其机械破坏形式大多数为钢脚延伸损坏, 也有部分绝缘件和铁帽损坏的情况。

4) 通过振动疲劳试验、机械破坏试验得到的机械破坏值 F_{con} 、振动破坏次数 N_f 和残留机械强度 F_r 等关键参数, 并观察绝缘子破坏形式及外观检查可知, 7 个主要厂家共 21 组 840 kN 大吨位绝缘子的振动疲劳特性均能达到 420 kN 绝缘子的水平, 大



图 5 振动疲劳破坏的典型外观 (厂家 1)

Fig.5 Typical damage appearance of the vibration fatigue tests (manufacturers 1)

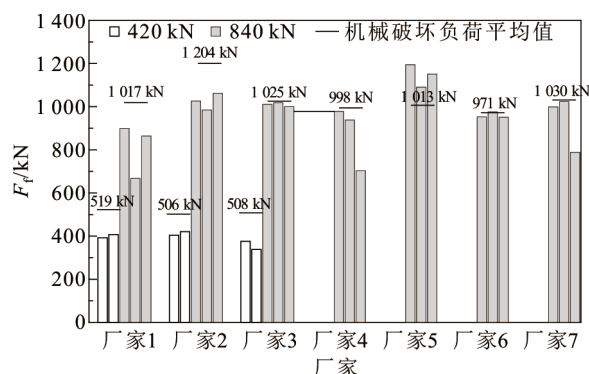
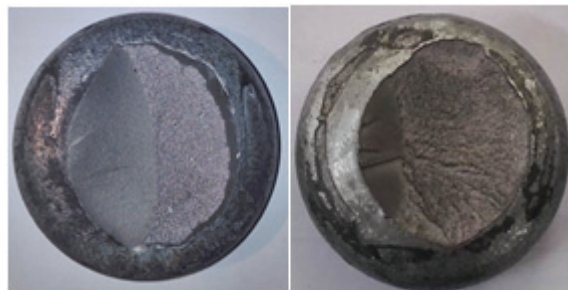


图 6 机械破坏试验结果

Fig.6 Results of mechanical disruption tests



(a) 振动疲劳破坏外观 (b) 疲劳状态下机械破坏外观

图 7 振动疲劳和机械破坏试验破坏形式对比 (厂家 3)

Fig.7 Comparison of damage appearance between vibration fatigue tests and mechanical disruption tests (manufacturers 3)



图 8 未疲劳绝缘子机械破坏外观

Fig.8 Damage appearance of insulators without fatigue status in mechanical disruption tests

部分厂家性能更优。鉴于 420 kN 绝缘子的振动疲劳特性经过了长期实际应用的考验, 可以认为 840 kN 大吨位绝缘子也可以满足输电线路长期运行的需要。

悬式绝缘子的振动疲劳性能研究需要长期的试验和大量的数据支撑, 后续相关工作需要深入进行, 以优化悬式绝缘子的振动疲劳性能。

参考文献 References

- [1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
GUAN Zhicheng. Insulators and outdoor insulation of power transmission lines[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 梁曦东, 周远翔. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
LIANG Xidong, ZHOU Yuanxiang. High voltage engineering[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2003.
- [3] 张 锐, 吴光亚. 高压架空输电线路绝缘子行业发展和技术综述[J]. 电力技术, 2009(2): 47-53.
ZHANG Rui, WU Guangya. Industry development and technical summary of high voltage overhead transmission line insulators[J]. Electric Power Technology, 2009(2): 47-53.
- [4] 林凤羽. 送电线路绝缘子性能综述[J]. 电力建设, 1999(1): 27-29.
LIN Fengyu. Performance review of transmission line insulators[J]. Electric Power Construction, 1999(1): 27-29.
- [5] 李 鹏, 谷 琛, 陈 东, 等. $\pm 1\ 500\ \text{kV}$ 特高压直流输电技术前期研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3139-3148.
LI Peng, GU Chen, CHEN Dong, et al. Development of technologies in $\pm 1\ 500\ \text{kV}$ UHV DC transmission research[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3139-3148.
- [6] 陈秀娟, 张翠霞, 时卫东, 等. $\pm 800\ \text{kV}$ 特高压直流输电线路绝缘配合的差异化[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1726-1731.
CHEN Xiujuan, ZHANG Cuixia, SHI Weidong, et al. Insulation coordination differentiation for $\pm 800\ \text{kV}$ UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1726-1731.
- [7] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 输电线路悬式瓷绝缘子老化形式分析与试验研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1259-1267.
QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on aging modes and test of transmission line porcelain suspension insulators[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1259-1267.
- [8] 齐义禄. 电力线路技术手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991: 245-255.
QI Yilu. Power line technical manual[M]. Beijing, China: Ordnance Industry Press, 1991: 245-255.
- [9] 周振山. 高压架空送电线路机械计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 28-30.
ZHOU Zhenshan. High voltage overhead transmission line mechanical calculation[M]. Beijing, China: Water Resources and Electric Power Press, 1984: 28-30.
- [10] 宿志一, 殷 禹, 周 军, 等. 特高压交流线路用复合绝缘子及其可靠性[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2329-2334.
SU Zhiyi, YIN Yu, ZHOU Jun, et al. Reliability of composite insulators used for UHV AC/DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2329-2334.
- [11] 宿志一, 范建斌. 复合绝缘子用于高压及特高压直流输电线路的可靠性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 16-24.
SU Zhiyi, FAN Jianbin. Research on reliability of composite insulators

used in EHV and UHV DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 16-24.

- [12] 李庆峰, 魏 杰, 殷 禹, 等. 复合绝缘子耐张串微风振动疲劳特性研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 269-275.
LI Qingfeng, WEI Jie, YIN Yu, et al. Research on aeolian vibration caused fatigue properties of strain composite insulator string[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 269-275.
- [13] 魏 杰, 高海峰, 李庆峰, 等. 大吨位复合绝缘子在耐张串使用的可靠性研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
WEI Jie, GAO Haifeng, LI Qingfeng, et al. Research on reliability of large-tonnage composite insulators used in tension strings[R]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2011.
- [14] 张 锐, 吴光亚, 袁 田, 等. 架空输电线路绝缘子串机械振动疲劳性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2009(1): 12-17.
ZHANG Rui, WU Guangya, YUAN Tian, et al. The study of mechanical vibration characteristics of transmission line insulators string[J]. Insulators and Surge Arrester, 2009(1): 12-17.
- [15] 高明振, 张 锐, 张志伟. 线路绝缘子串机械振动疲劳性能的试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2591-2596.
GAO Mingzhen, ZHANG Rui, ZHANG Zhiwei. Test study of mechanical vibration characteristics of EHV transmission line insulators string[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2591-2596.
- [16] IMAKOMA T, SUZUKI Y, TANAKA K, et al. Reliability of suspension insulators in harsh environments and its laboratory evaluation methods[C]// 7th CEPSI. Brisbane, Australia: [s.n.], 1988.
- [17] MATSUURA Y, SUZUKI Y, ARAKAWA K, et al. Technical aspect on long term performance of suspension insulators and its laboratory evaluation methods[C]// Canadian Electrical Association Symposium on Insulators. Motreal, Canada: [s.n.], 1990.
- [18] Insulators for overhead lines—composite suspension and tension insulators for AC systems with a nominal voltage greater than 1 000 V—definitions, test methods and acceptance criteria: IEC 61109-2008[S], 2008.
- [19] 标称电压高于 1 000 V 交流架空线路用复合绝缘子使用导则: DL/T 864—2004[S], 2004.
Application guide of composite insulators for AC overhead lines with a nominal voltage over 1 000 V: DL/T 864—2004 [S], 2004.
- [20] 周 军, 姚修远, 孙东旭, 等. 扎鲁特—山东 $\pm 800\ \text{kV}$ 特高压直流线路工程 700~840 kN 大吨位悬式绝缘子振动疲劳性能试验研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2016.
ZHOU Jun, YAO Xiuyuan, SUN Dongxu, et al. Experimental study on vibration fatigue performance of 700~840 kN large-tonnage suspension insulator in Zhalu-Shandong $\pm 800\ \text{kV}$ UHVDC project[R]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2016.

姚修远(通信作者)

1987—, 男, 博士, 工程师

主要研究方向为特高压直流输电外绝缘和海拔校正、带电作业技术和绝缘子检测技术

E-mail: yaoksiuyuan@epri.sgcc.com.cn



YAO Xiuyuan

Ph.D.

Corresponding author

收稿日期 2017-12-11 修回日期 2018-05-10 编辑 陈 蔓