

线路复合绝缘子运行状况的评估

王星超¹, 李瑶琴², 刘春堂¹, 胡洪炜¹, 刚毅¹

(1. 国网湖北省电力有限公司检修公司, 武汉 430050; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430070)

摘要: 对某地区 220 kV 和 110 kV 输电线路中使用年限已久的复合绝缘子进行了现场调查和抽样试验。该地区运行环境十分恶劣。此外, 抽样复合绝缘子的老化、电气、机械性能进行了测试。结果表明: 长期运行后的复合绝缘子的电气和机械性能出现了不同程度的下降, 但多数仍能满足运行要求。对复合绝缘子特性进行评估时, 应综合老化、电气、机械性能, 但 3 种性能的重要程度不同。其中, 机械性能应作为最重要的评估因素。对于机械强度低于 DL/T 864—2004 规定的复合绝缘子应按批次全部更换。在外观检查中, 出现护套蚀损芯棒外漏、密封开裂的复合绝缘子应退出运行。憎水性下降不会立即危及到复合绝缘子的安全运行, 但应加强跟踪。在憎水性不满足 DL/T 864—2004 规定时可按批次逐步更换。研究结果可为输电线路绝缘子的运行维护提供指导。

关键词: 复合绝缘子; 老化; 憎水性; 机械性能; 运行特性评估

0 引言

1994 年起, 某地区所属 220 kV 和 110 kV 输电线路中大面积推广应用复合绝缘子。复合绝缘子的使用有效地遏制了污闪事故的发生, 提高了线路的安全运行和可靠性。但部分复合绝缘子运行年限已久, 且处在重污秽地区, 一些复合绝缘子在外观上已出现了粉化, 因此需对这部分绝缘子进行抽样调查和试验研究, 以掌握其运行状况是否满足运行要求。

目前, 复合绝缘子用硅橡胶材料的老化状态评估有很多方法^[1-2], 最常用的是憎水性喷水分级法, 然而该方法受主观因素影响较大, 测试精度难以保证。生产运行部门对复合绝缘子日常检测主要采用地面望远镜观察、登杆观察伞裙是否出现粉化、开裂、电蚀和电树等老化现象以及其他损坏或故障现象。此外泄漏电流法、接触角法、热刺激电流法等一般用于实验室条件下的离线检测, 操作复杂^[3-4]。西安交通大学贺博等人用扫描电子显微镜对运行 7 年的复合绝缘子的老化特征进行研究, 分析了紫外老化、电老化、污秽老化对绝缘子伞裙各个部位的影响^[5]。武汉大学蓝磊等人对高温硫化硅橡胶进行了加速电晕老化试验, 然后对绝缘子进行傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析^[6]。文献^[6]指出, 随着老化时间的增加, 高温硫化硅橡胶电晕老化速度会越来越慢。他们还根据基于陷阱理论的聚合物电老化

寿命公式及电晕老化前后绝缘子的红外光谱变化建立了高温硫化硅橡胶的老化寿命模型。D. Birtwhistle 等人对绝缘子伞裙表面材料的分析方法进行评估得出: 扫描电子显微镜 (SEM) 法能够给出绝缘子表面状况的有用信息, 傅里叶变换红外光谱能够给出复合绝缘子的表面粉化信息^[7-8]。

低场核磁共振作为一种无损的检测技术也被用于量化硅橡胶的老化^[9-12]。通过实验室人工加速老化评定复合绝缘子在严酷条件下的老化性能是国际通行的试验方法, 目前复合绝缘子人工加速老化方法主要有斜面法漏电起痕和电蚀损、盐雾法试验、转轮法试验、综合老化试验等^[13-17]。

本文通过对该地区所辖 220 kV 和 110 kV 输电线路中所使用的复合绝缘子进行现场调查和抽样试验, 综合复合绝缘子的劣化、电气、机械性能, 对抽样复合绝缘子的老化状况给出评估, 使运行部门对当前老化绝缘子的运行状况充分认识, 并为维护和决策提供依据。

1 复合绝缘子老化性能测试

1.1 抽样绝缘子情况统计

对该地区所属 220 kV 和 110 kV 输电线路中所使用的复合绝缘子进行了现场调查和抽样, 抽样数量为: 110 kV 等级 14 支, 220 kV 等级 15 支。抽样方案如下。

1) 运行时间: 运行年限均为 10 a 以上。

2) 抽样点: 运行环境较恶劣, 水泥厂、化工厂、冶炼厂、火电厂等工业重污染源区附近, 扬尘

基金资助项目: 国网湖北省电力有限公司检修公司科技项目 (复合绝缘表面老化 (粉化) 现场检测技术)。

较大的铁路、公路旁边。

3) 复合绝缘子机械连接方式: 内楔式、压接式。
抽样试品情况如表 1 和表 2。

1.2 外观检查

对抽样绝缘子进行逐只外观检查, 检查结果如图 1 所示。

110 kV 线路抽样绝缘子因护套开裂、密封开裂的数量为 2 支, 运行年限皆为 14 年, 占抽样绝缘子总数的 13.3%; 220 kV 线路抽样绝缘子因护套蚀损芯棒外漏、密封开裂的数量为 3 支, 运行年限分别为 13、9、11 a, 占抽样绝缘子总数的 21.4%。

护套和密封开裂会导致外部酸雨经裂开的缝隙直接渗透到芯棒裸露部位, 缓慢腐蚀芯棒截面, 造成绝缘子机械强度降低, 甚至芯棒脆断, 引发严重的事故, 应引起重视。

表 1 110 kV 复合绝缘子试品统计情况

试品编号	挂网年份	绝缘子型号	连接工艺
1	1996	HXS2-110/70	内楔式
2	1995	HXS2-110/70	内楔式
3	1995	HXS2-110/70	内楔式
4	1998	HXS2-110/70	内楔式
5	1995	HXS2-110/70	内楔式
6	2005	FXBW-110/100	压接式
7	2005	FXBW-110/100	压接式
8	1995	HXS2-110/70	内楔式
9	1997	HXS2-110/100	内楔式
10	2005	FXBW-110/100	压接式
11	1998	HXS2-110/100	内楔式
12	1998	HXS2-110/100	内楔式
13	1995	HXS2-110/70	内楔式
14	1993	FXBW-110/100	内楔式

表 2 220 kV 复合绝缘子试品统计情况

试品编号	生产年份	绝缘子型号	连接工艺	均压环安装情况
1	2005	HXS2-220/160	压接式	高压端安装
2	1996	HXS2-220/120	内楔式	高压端安装
3	1996	HXS2-220/100	内楔式	高压端安装
4	2005	HXS2-220/160	压接式	高压端安装
5	2001	FXBW-220/100	内楔式	高压端安装
6	1998	FXBW-220/120	内楔式	高压端安装
7	1993	HXS2-220/120	内楔式	高、低压端安装
8	1997	HXS2-220/100	内楔式	高压端安装
9	1997	HXS2-220/100	内楔式	高压端安装
10	1996	HXS2-220/100	内楔式	高压端安装
11	1999	HXS2-220/120	内楔式	高压端安装
12	2005	FXBW-220/100	压接式	高压端安装
13	1997	HXS2-220/100	内楔式	高压端安装
14	1996	FXBW-220/100	内楔式	高压端安装
15	1996	HXS2-220/100	内楔式	高压端安装

1.3 憎水性测量

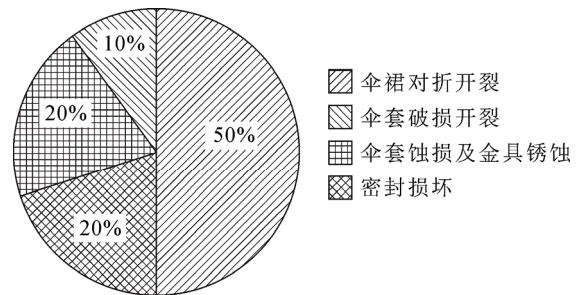
憎水性测量包括憎水性、憎水性迁移特性、憎水性恢复时间、憎水性的丧失与恢复特性。

110 kV 电压等级的复合绝缘子分别取高压端、中部、低压端各一片进行憎水性测量, 220 kV 电压等级的复合绝缘子分别取高压端、中部、低压端各两片进行憎水性测量。在憎水性测量过程中还特别留意到伞裙下表面的憎水性, 测试结果表明伞裙下表面的憎水性与上表面的憎水性状况并无显著的区别。

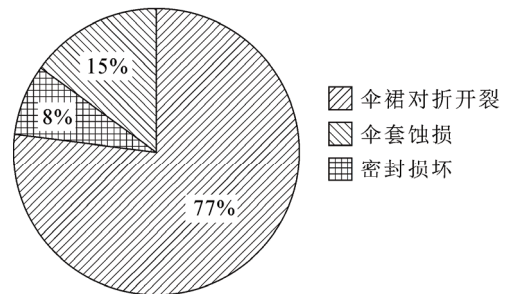
复合绝缘子憎水性等级处于 HC2—HC3 的共 27 支, 占试品总数的 93%, 2 支处于 HC4, 运行年限分别为 12、16 年。

运行复合绝缘子的憎水性的丧失(减弱)特性、恢复特性较差, 均为 HC6 级, 且在 24 h 内憎水性均未恢复。在采用喷水分级法检测复合绝缘子憎水性的同时, 还对其憎水角 θ 进行了测量, 结果如表 3 所示。

依据憎水性分级标准^[16]可知, 憎水性等级和静态接触角存在一定的关系, 即当静态接触角 $50^\circ < \theta < 80^\circ$ 时, 憎水性等级为 HC2, 但测量结果表明处于 HC6 的伞裙静态接触角为 50° 左右, 对应关系与标准不相符, 这可能与滴水量大小、放关系与标准不相符, 这可能与滴水量大小、放置时间、喷水量多少有关系, 而标准对比并未规定。本文认为,



(a) 110 kV 运行复合绝缘子



(b) 220 kV 运行复合绝缘子

图 1 复合绝缘子外观检查结果

当前运行复合绝缘子静态接触角在憎水性等级评价中可作为参考, 但不宜成为评价依据。

1.4 憎水性影响因素的分析

1.4.1 灰密对憎水性恢复的影响

选取 0.3~3.0 mg/cm² 之间的几个附灰密度点进行憎水迁移时间测量, 附盐密度为 0.1 mg/cm²。为说明运行时间对憎水迁移时间的影响, 同上所述, 抽取 1 支绝缘子进行憎水性迁移试验。

从 110 kV 和 220 kV 绝缘子中选出密封有开裂的样品 4 支进行试验试验结果如表 4 所示。由表 4 可知, 全部试品在附灰密度情况下经 96 h 均未恢复, 可见附灰密度对憎水恢复特性影响较大。

1.4.2 附盐密度对憎水恢复特性的影响

选取 0.03 ~0.35 mg/cm² 之间的几个附盐密度点进行憎水迁移时间测量, 附灰密度为 0.1 mg/cm²。为说明运行时间对憎水迁移时间的影响, 抽取 1 支绝缘子进行憎水性迁移试验。试品憎水性恢复特性与附盐密度有一定的关系。

1.4.3 运行复合绝缘子憎水性的温度特性

将复合绝缘子放入所设定的低温条件下 2~8 h, 在温度充分达到平衡后取出复合绝缘子检查憎水性, 不同规格的复合绝缘子憎水性与温度的关系见图 3, 如图 3 所示, 在相同附灰密度的情况下, 盐密越小, 憎水性恢复越快。

表 3 复合绝缘子的憎水性的恢复特性测量

试品编号	θ	HC 值
1	52.2	HC6
2	51.8	HC6
3	51.5	HC6
4	50.3	HC6
5	51.5	HC6
6	52.5	HC6
7	51.3	HC6
8	51.4	HC6
9	51.5	HC6

表 4 附灰密度对憎水迁移性的影响

试品编号	NSDD/(mg·cm ⁻²)	憎水性等级 HC
6	0.3	HC6
7	1.0	HC6
8	1.5	HC6
9	2.0	HC6
10	3.0	HC6

结果表明, 硅橡胶材料的憎水与环境温度有关, 运行的绝缘子在低温下绝缘子的憎水性都出现了不同程度的降低, 温度越低, 憎水性越差, 在温度 0 °C 时, 4 号、14 号试品憎水性下降了 1 个等级, 而温度在 -5 °C, 4 号、14 号试品憎水性则下降了 2 个等级。

2 运行复合绝缘子机械性能测试

2.1 密封试验

试验后检查, 3 支完成试验的绝缘子密封良好,

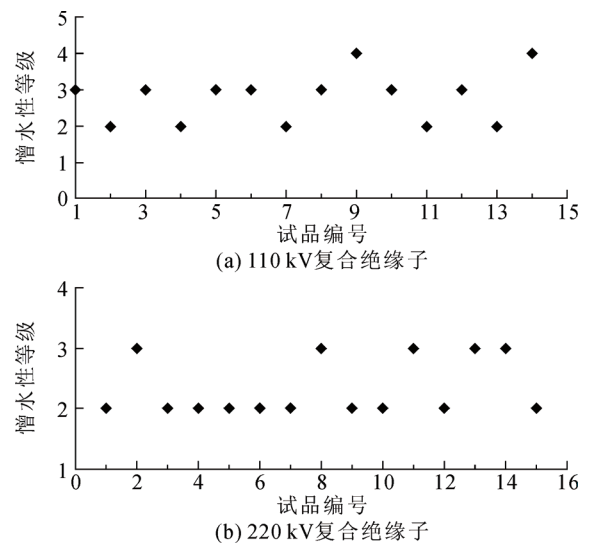


图 2 运行复合绝缘子的憎水性测量

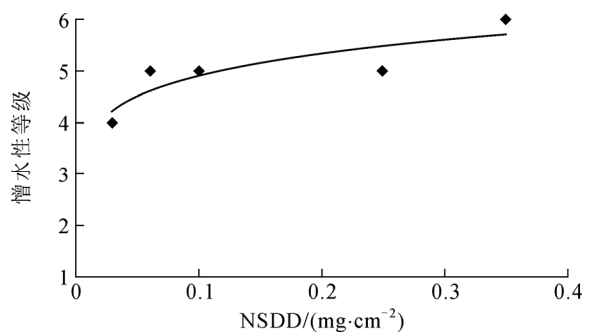


图 3 憎水性恢复特性与附盐密度的关系

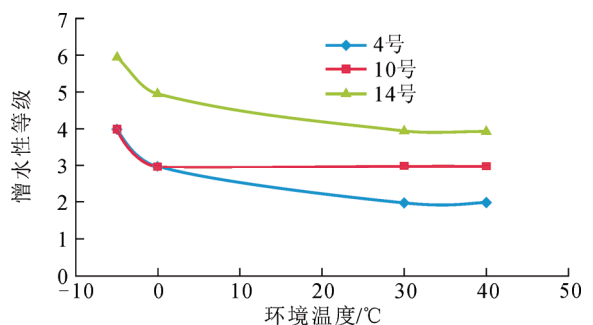


图 4 复合绝缘子憎水性与温度的关系

另一支型号为 HXS2-220/120 的试品在拉力值为 67.2 kN 时铁帽破裂, 为其额定机械负荷的 0.56 倍, 不满足 DL/T 864—2004 要求, 应加大该批绝缘子抽样数量, 重新进行机械性能试验。

2.2 机械负荷试验

先对全部试品进行 100% 的额定机械负荷耐受 1min 试验, 然后进行机械破坏负荷试验, 结果如表 5、表 6 所示。

110 kV 等级内楔式连接复合绝缘子试品共 11 支, 运行年限为 11~16 a, 机械破坏负荷为其额定破坏负荷的 0.77~2.11 倍, 平均为其额定机械破坏负荷的 1.64 倍, 但标准偏差较大为 0.357, 这说明不同厂家生产的内楔式连接的复合绝缘子经过多年运行, 机械性能差别较大, 除 14 号绝缘子的机械破坏负荷为其额定机械破坏负荷的 0.77 倍外, 其余试品机械破坏负荷都大于其额定机械破坏负荷, 都能满足运行要求; 220 kV 等级压接式连接的复合绝缘子运行年限为 4 a, 机械破坏负荷为其额定破坏负荷的 1.12~1.42 倍, 平均为其额定机械破坏负荷的 1.36 倍, 但标准偏差较大为 0.177, 这说明压接式连接的复合绝缘子机械性能偏差较小, 机械破坏负荷都大于其额定机械破坏负荷, 能满足运行要求。

110 kV 等级的 14 号绝缘子的机械强度为其额定机械负荷的 0.77 倍, 运行已达 16 a, 机械强度已有明显下降, 应加强监测。

3 运行复合绝缘子电气性能测试

试品进行自然积污的人工污秽试验、湿工频耐受电压试验和陡波冲击耐受电压试验, 结果见表 7。

3.1 自然积污工频电压闪络试验

110 kV 电压等级 3 支试品的憎水性等级分别为 HC2、HC4、HC4, 220 kV 等级 3 支试品的憎水性等级皆为 HC3, 试品结构尺寸参数见表 8、表 9。

依据 DL/T 859—2004《高压交流系统用复合绝缘子人工污秽试验》进行试验, 其中 220 kV 绝缘子施加电压至 500 kV 均未闪络。

试验结果表明, 运行 10 多年的复合绝缘子仍然具有较高的污闪电压, 能够在正常工频污湿状况下安全运行。但 110 kV 憎水性等级为 HC4 的绝缘子闪络电压比 HC2 低 9% 左右, 试验后检查发现, 憎水性等级较低绝缘子表面有薄层水珠, 憎水性状况较差, 这说明绝缘子憎水性对其污闪电压有较大影响。

表 5 金属附件与绝缘伞套间界面的渗透性试验结果

电压等级 /kV	试品编号	渗透时间 /min	65%的额定机械负荷 /kN	耐受时间 /min
110	13	20	46.0	1
	14	20	65.0	1
220	6	20	80.0	1
	7	5	67.2	

表 6 110 kV 复合绝缘子试验结果

序号	运行时间/a	连接工艺	破坏负荷/kN	破坏形式
1	13	内楔式	124.7	芯棒裂
2	14	内楔式	131.3	帽拉脱
3	14	内楔式	114.3	芯棒裂
4	11	内楔式	147.8	脚断
5	14	内楔式	131.0	帽拉脱
6	4	压接式	111.9	帽拉脱
7	4	压接式	124.4	脚拉脱
8	14	内楔式	109.6	脚拉脱
9	12	内楔式	145.2	帽拉脱
10	4	压接式	141.8	帽拉脱
11	11	内楔式	140.1	脚断
12	11	内楔式	167.1	脚断
13	14	内楔式	133.1	帽拉脱
14	16	内楔式	77.1	脚、帽拉脱

表 7 220 kV 复合绝缘子试验结果

序号	运行时间/a	连接工艺	破坏负荷/kN	破坏形式
1	4	压接式	263.2	脚断
2	13	内楔式	150.7	脚断
3	13	内楔式	157.2	脚断
4	4	压接式	249.6	脚断
5	8	内楔式	153.6	脚拉脱
6	11	内楔式	146.8	芯棒裂
7	16	内楔式	67.2	帽裂
8	12	内楔式	129.3	帽裂
9	12	内楔式	138.8	帽裂
10	13	内楔式	146.5	帽裂
11	10	内楔式	160.8	脚拉脱
12	4	压接式	150.4	帽拉脱
13	12	内楔式	151.0	脚断
14	13	内楔式	141.0	脚断
15	13	内楔式	153.5	芯棒裂

表 8 110 kV 试品技术参数和结构

试品编号	绝缘子型号	结构高度/mm	绝缘距离/mm	爬电距离/mm	伞径/mm	
					大伞	小伞
4	HXS2-110/70	1220	1010	2490	140	108
9	HXS2-110/70	1220	1012	2486	150	100
14	FXBW-110/100	1212	1180	2480	150	100

3.2 湿工频耐受电压试验

将人工污秽试验后的 6 支绝缘子进行湿工频耐受电压试验, 试验结果如表 10、表 11 所示。

表 9 220 kV 试品技术参数和结构

试品编号	绝缘子型号	结构高度/mm	绝缘距离/mm	爬电距离/mm	伞径/mm	
					大伞	小伞
2	HXS2-220/120	2144	1918	4940	150	100
8	HXS2-220/100	2143	1916	4945	150	100
13	HXS2-220/100	2143	1918	4941	150	100

表 10 110 kV 复合绝缘子自然积污工频电压闪络试验结果

试品编号	闪络电压/kV
4	359
9	350
14	322

表 11 110 kV 复合绝缘子湿工频耐受电压试验结果

试品编号	施加电压/kV	结果	标准要求
4	235.2	耐受	施加电压 235.2 kV, 耐受 1 min, 未闪络
9	235.2	耐受	闪络
14	235.2	耐受	

将人工污秽试验后的 6 支绝缘子进行湿工频耐受电压试验, 复合绝缘子能够满足淋雨条件下的工频电气性能要求, 但在试验过程中发现 220 kV 复合绝缘子表面放电明显, 说明经 10 多年的运行, 其外绝缘性能有下降的趋势。

3.3 陡波冲击耐受电压试验

110 kV 电压等级和 220 kV 电压等级各抽取 5 支绝缘子进行试验, 试验结果如表 12、表 13 所示。

110 kV 电压等级和 220 kV 电压等级各抽取 5 支绝缘子进行试验。从运行时间来看, 试品有运行十几年(1995 年、1996 年、1999 年), 也有运行 8 a 和 4 a(2001 年、2005 年)的复合绝缘子, 但都经受住了陡波冲击耐受试验。这说明, 经过多年运行的复合绝缘子的各界面和绝缘材料本身依然具有良好的电气特性。

4 结论

1) 外观检查结果表明长期运行复合后绝缘子出现了老化, 结合以往运行经验, 本文认为护套蚀损芯棒外漏、密封开裂的绝缘子应立即更换。

2) 抽样绝缘子在常温下的憎水性等级处于 HC2—HC4, 但其憎水性的丧失(减弱)特性、恢复特性均为 HC6 级, 但绝缘子电气性能仍然能满足运行要求。大气环境对复合绝缘子运行特性有较大影响, 绝缘子表面附盐、附灰以及低温气象会导致

表 12 220 kV 复合绝缘子湿工频耐受电压试验结果

试品编号	施加电压/kV	结果	标准要求
2	395.4	耐受	施加电压 395 kV,
8	395.4	耐受	耐受 1 min, 未闪络
13	395.4	耐受	

表 13 110 kV 电压等级试品陡波冲击耐受电压试验结果

试品编号	波形陡度/(kV·μs ⁻¹)	冲击次数		结果
		正极性	负极性	
1		25	25	耐受
2		25	25	耐受
6	1 026.5~1 306.5	25	25	耐受
11		25	25	耐受
12		25	25	耐受

表 14 220 kV 电压等级试品陡波冲击耐受电压试验结果

试品编号	波形陡度/(kV·μs ⁻¹)	冲击次数		结果
		正极性	负极性	
1		25	25	耐受
3		25	25	耐受
5	1 026.5~1 306.5	25	25	耐受
11		25	25	耐受
14		25	25	耐受

绝缘子憎水性下降, 因此对重污秽地区绝缘子应加强巡检, 防止污闪事故的发生。故对复合绝缘子憎水性不满足 DL/T 864—2004 要求的, 可采用加强巡检, 逐步更换的方式。

3) 机械性能应作为最重要的评估因素, 复合绝缘子长期运行后机械性能出现了下降, 特别是早期采用内楔式连接的绝缘子, 对不满足 DL/T 864—2004 要求的, 应立即更换。

参考文献

- [1] 审文伟, 宋伟, 王国利, 等. 复合绝缘子 HTV 硅橡胶材料老化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 1-7.
- [2] 屠幼萍, 陈聪慧, 佟宇梁, 等. 现场运行复合绝缘子伞群材料的老化判断方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2522-2527.
- [3] 惠华, 王森, 杨博, 等. 复合绝缘子运行状态和老化性能评估方法研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(1): 64-66.
- [4] 闫斌, 王志惠. 复合绝缘子硅橡胶材料老化性能分析[J]. 绝缘材料, 2009, 42(4): 58-60.
- [5] 贺博, 万军, 金海云, 等. 复合绝缘子的老化特征分析[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 21-24.
- [6] 蓝磊, 王汉良, 文习山, 等. 高温硫化硅橡胶加速电晕老化试验分析及其寿命预测[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 782-789.
- [7] BIRTWHISTLE D, BLACKMORE P, KRIVDA A, et al. Monitoring the condition of insulator shed materials in overhead distribution networks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 612-619.

- [8] AMIN M, AKBAR M, SALMAN M. Composite insulators and their aging: an overview[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 50(6): 697-713.
- [9] 赵书杰. 复合绝缘子伞裙老化评估的核磁共振分析方法及传感器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [10] 徐征, 程江艳, 吴嘉敏, 等. 用于复合绝缘子伞裙老化无损检测的单边核磁共振方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6545-6553.
- [11] 徐征, 郭盼, 何晓龙, 等. 基于核磁共振原理的复合绝缘子老化问题研究[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 21-25.
- [12] GOGA N O, DEMCO D E, KOLZ J, et al. Surface UV aging of elastomers investigated with microscopic resolution by single-sided NMR[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2008, 192(1): 1-7.
- [13] 崔春艳. 复合套管用硅橡胶人工加速老化试验方法设计[D]. 华北电力大学, 2014.
- [14] 方雅琪, 王力农, 李姗姗, 等. 复合材料杆塔人工加速老化试验及其长期性能评估[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 212-219.
- [15] 梁曦东, 张轶博, 殷禹, 等. 复合绝缘子的 5 000 h 多因素试验及长期性能评价[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2492-2498.
- [16] 关志成, 梁曦东, 张仁豫, 等. 硅橡胶合成绝缘子的憎水性使用寿命的研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(1): 6-8.
- [17] 李庆峰, 宿志一. 高压直流复合绝缘子 5 000 h 人工加速老化试验[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 64-68.
- [18] 复合绝缘子用硅橡胶绝缘材料通用技术条件: DL/T 376—2010[S], 2010.

王星超

1985—, 男, 工程师

主要从事超特高压输电线路运检、带电作业管理工作

E-mail: 443701908@qq.com

李瑶琴

1992—, 女, 硕士, 助理工程师

主要从事输电线路防污闪技术、电晕损失研究等工作

E-mail: anne_deer@126.com

收稿日期 2018-07-05 编辑 何秋萍