

电力电缆资产的状态评估与运维决策综述

周承科^{1,4}, 李明贞¹, 王 航¹, 周文俊¹, 鲍玉川², 唐泽洋³

(1. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力公司武汉供电公司, 武汉 430013;
3. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 武汉 430077; 4. 英国格拉斯哥加里多尼亚大学, 格拉斯哥 G4 0BA)

摘 要: 随着中国城市化和城市电网的迅速发展, 电力电缆资产规模迅速扩大, 提高电缆资产的管理水平是电网企业提升服务质量、履行社会责任、增大国有资产收益的重要环节。近年来, 国内外科研人员在电力电缆的绝缘材料、老化机理、状态监测、资产管理等领域开展了大量的研究。为此, 首先针对电力电缆的运维管理, 根据 ISO 55000 资产管理国际标准的要求, 提出了开展电缆运维精益化管理的过程和步骤, 这包括资产登记、状态监测、状态评估、风险分析和运维策略制定。然后总结了近年来在电缆状态监测、状态评估和故障数据分析等方面的研究进展, 这包括应用新的状态监测技术、故障定位方法、统计学工具来处理电缆故障数据并预测未来可能发生的故障数目, 应用热电老化模型来分析电缆绝缘剩余寿命等方面的研究进展。最后介绍了结合状态评估和资产重要性即基于风险分析的退役管理措施。基于该退役决策结果, 电缆运维人员根据每条电缆线路目前的状态及其在电力系统中的重要性即可判断出风险等级高、需要更换的电缆线路, 不仅可以确定每年度退役的数量, 而且可以确定退役的对象。

关键词: 电力电缆; 资产管理; 状态评估; 绝缘老化; 退役管理; 运维决策

Review of Condition Assessment and Maintenance Strategy of Power Cable Assets

ZHOU Chengke^{1,4}, LI Mingzhen¹, WANG Hang¹, ZHOU Wenjun¹, BAO Yuchuan², TANG Zeyang³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430013, China;

3. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

4. Glasgow Caledonian University, Glasgow G4 0BA, UK)

Abstract: With the development of urbanization in China, the amount of cable assets in the power network in China is fast growing, key to improving the service quality, to fulfilling the social responsibility and enhancing the investment return of the power grid is to improve the maintenance and management practice of the increasingly important cable assets. A significant amount of work has been recently published in the area of cable insulation materials, aging mechanisms, condition monitoring and diagnostics, and cable asset management. The present paper reviews and assesses the above research work. Based on ISO 55000 requirement, it proposes a flowchart and the procedure required to implement cable life cycle management. Then the paper reviews the current state-of-the-art in condition monitoring, condition assessment, aging modelling and the use of statistical tools for analysis of cable failure data. Finally it shows a risk based strategy of managing cable replacement. Based on the results of the retire decision, cable operation and maintenance staff can distinguish high risk and replacement needing cables. They could not only determine the annual number of retired cables, but also the cables to be retired.

Key words: power cable; asset management; condition assessment; insulation aging; replacement management; maintenance strategy

0 引言

电力电缆的使用已有多年的历史^[1], 部分电缆即将或者已经达到预期使用寿命, 这些早期制造的电缆由于制造工艺、敷设条件限制, 加之在运行过程中受到电场、温度、机械应力、水分等因素的共同

影响而发生绝缘老化导致绝缘性能下降^[2-3]。随着电力电缆规模高速增长, 电网中运行着大量投运时间较短的电缆, 这些电缆中有一部分因制造或安装缺陷而可能引起故障, 不仅会给电缆的安全运行带来极大的隐患, 而且会造成不良的社会和经济影响^[4-6]。随着电力电缆在电力系统中使用数量的不断

增多及其电压等级的不断提高, 电缆线路的运维管理存在着检修安装人员数量不足和检修工程量过大的问题, 而到期必修与检修时大部分电缆及附属设备处于良好状态之间的矛盾日益突出。电力电缆的安装、检修、运行及维护工作亟需新的技术支持, 以针对不同状态的电缆制定差异化的运行维护策略。

近年来国内外科研人员在电力电缆的局部放电、护层电流、绝缘介损的状态监测^[3,7-8]、电缆的老化机理^[9-10]、缺陷和老化状态评估^[11-12]以及运维管理方面^[13-14]开展了大量的研究工作。本文首先针对电力电缆的运维管理, 根据 ISO 55000 资产管理国际标准的要求, 提出开展电缆运维精益化管理的过程和步骤, 然后总结近年来在电缆状态监测、状态评估和故障数据分析等方面的研究进展, 最后介绍结合状态评估和资产重要性即基于风险分析的退役管理措施。

1 电力电缆的寿命周期与寿命周期管理

1.1 电力电缆状态、缺陷、故障和寿命期

国家电网运维规程^[15-17]及国际大电网多个专题报告里都对电力设备的状态、缺陷以及故障给出了定义。针对电缆线路, 这些定义可归纳如下^[17]:

1) 状态 (condition), 是指运行电缆线路的健康状况, 在进行量化分析时通常用 1、2、3、4 来衡量。国网电缆线路状态评价导则中将状态分为正常、注意、异常和严重这 4 个等级。引起非正常状态的原因可能是故障、缺陷或者老化。

2) 缺陷 (defect), 是指不满足设计要求, 但能继续运行, 须采取测试或检修措施。

3) 故障 (failure), 是指运行电缆线路所发生的事件, 事件发生后电缆线路无法正常运行。

4) 故障状态 (fault), 是指故障状态下电缆线路无法正常运行, 包括严重老化, 需要采取维护或更换措施。

5) 老化 (aging), 是指电缆材料在各种应力作用下发生的性能下降、且不可逆转的劣化过程。

6) 寿命期 (end of life), 是指电缆线路不再满足运行要求的时间节点, 其考虑因素包括技术、经济和策略方面的考量。

7) 故障率 (failure rate), 是指对于电缆本体而言, 为每年每百公里的故障次数; 对于电缆附件而言, 为每年每百件的故障次数。

这里故障 (failure) 是指导致停运的事件; 而

故障状态 (fault) 是指一种状态, 即运行中电缆本体、附件或附属设施存在问题, 它导致电缆线路的可靠性下降, 甚至可能导致立即停运。

故障率 (failure rate) 是时间的函数, 受多种因素影响, 而且各种因素对老化的影响不同。由于电缆家族、运行和环境因素有差异, 所以电缆线路的故障率函数会有差异^[18-19]。尽管如此, 由于电缆老化, 所以几乎所有电缆线路故障率在达到一定运行年限后都会随时间而上升。电缆接头故障率实例如图 1 所示。不同家族电缆接头故障率都随时间而上升, 只是上升速度不同。

1.2 电力电缆的寿命周期

电力电缆寿命周期内的故障遵循浴盆曲线的规律。电缆故障一般分为 3 个阶段: ①早期故障, 一般发生在 0~5 a 时间内, 故障原因多是电缆制造或安装时的缺陷; ②中期故障, 一般发生在约 5~25 a 时间内, 故障原因多是偶发性原因如外力破坏; ③晚期故障, 一般发生在电缆开始老化以后, 电缆绝缘在电、热、机械以及环境等应力的长期作用下出现老化, 从而发生老化故障。这 3 个阶段呈现出中间低、两头高的浴盆曲线的形状^[5], 且到老化后期故障率会因老化加速而急剧升高^[18]。采取适当的维护措施可以降低故障率, 如通过状态监测可以发现电缆线路缺陷并排除隐患^[3], 改善运行环境并修复电缆线路等^[20], 所以实际故障率曲线常常形如锯齿状浴盆曲线, 如图 2 所示。实际上维护部件更换时可能会因操作不当而引发少量的“早期故障”。

交联聚乙烯 (XLPE) 电缆从 20 世纪 80 年代开始逐渐代替油纸绝缘电缆。早期生产的 XLPE 电缆由于没有考虑水树老化, 所以在美国等地投运 10~20 a 后出现了大量故障情况; 后来生产的 XLPE 电缆经过技术改进, 其运行寿命已大幅提高。根据

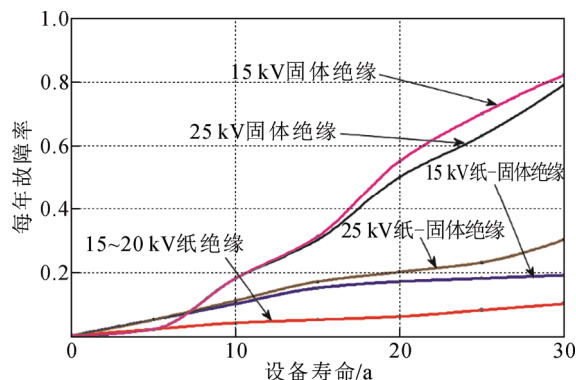


图 1 电缆接头故障率实例

Fig.1 Failure rate of cable joints

国外经验, 在不同安装环境下 XLPE 电缆本体的使用寿命大致如表 1 所示^[21-22]。

由于绝缘材料和生产工艺的进步, 有研究认为新一代电力电缆的寿命可以达到 75~100 a^[23-24]。

1.3 资产管理国际标准 ISO 55000 及电缆状态检修策略

2014 年 5 月国际标准化组织 (ISO) 发布了资产管理的国际标准 ISO 55000^[25]。2015 年中国国家电网也发布了电缆资产全寿命周期管理的标准, 同时, 电力生产管理系统(PMS)也增加了电缆通道精益化管理模块。可以预见的是今后几年电缆线路及通道的管理方面会进行大量的研究及研发投入。

ISO 55000 对资产给出了明确的定义: 一方面, 资产对其拥有者具有价值; 另一方面, 资产的拥有者负有对资产进行优化管理的义务。也就是说, 资产兼具“价值”和“责任”这 2 种属性, 管理者在获取资产“价值”的同时需承担相应的“责任”。资产的全寿命周期管理过程应包括: ①资产登记; ②状态监测; ③状态分析评估; ④经济、社会、环境方面的考量; ⑤管理策略的制定。

对于电缆线路来说, 为满足 ISO 55000 的要求, 电缆资产管理的内容和步骤可用图 3 表示。电力电缆资产管理过程应包括如下步骤:

1) 资产登记, 这包括对电缆线路及通道原始数据如地理信息、制造厂商、安装商、投运日期、电压等级、额定负荷、线路长度及安装方式等进行收集管理。运行过程中随时对电缆线路的运维数据、故障数据和状态数据进行更新, 一旦出现线路故障, 需要对电缆或附件进行维修或更换, 此时就应对资产数据库进行更新。

2) 状态监测, 监测的目的是有效评价电力电缆当前的状态能否满足运行要求, 监测内容至少需要缺陷和故障的记录以及能反映电缆健康状况的状态量。

3) 状态分析评估, 根据监测到的状态量和历史记录来评估电缆目前的状态。这包括: ①利用统计模型对故障数据进行分析处理, 分析电缆故障的影响因素, 预测未来可能发生的电缆故障; ②利用检测/监测结果来评价电缆当前是否存在缺陷和运行隐患; ③对运行中电缆老化程度进行评估, 最后根据其分析结果对电缆的运行维护进行指导, 为确定电缆维修、监测和更换对象提供依据^[9]。

4) 风险评估方面的考量, 内容包括电力电缆

的采购成本、老化折旧情况和剩余价值; 其中风险评估需从经济、社会和环境这 3 个方面进行考量。

5) 管理策略的制定, 根据风险分析的结果来制定电力电缆的运维策略、资产改良以及投资/退役计划。

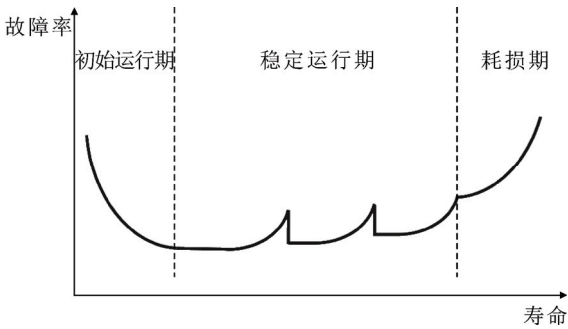


图2 锯齿状浴盆曲线

Fig.2 Bathtub curve with serrated edge

表 1 不同安装环境下的电缆寿命

Table 1 Cable life under various installation environment	
安装环境	电缆寿命/a
电缆隧道/安装环境干燥	>40
环境随季节变化	约 30
环境非常潮湿	约 20
积水通道内电缆	15~20
电缆内进水	<15

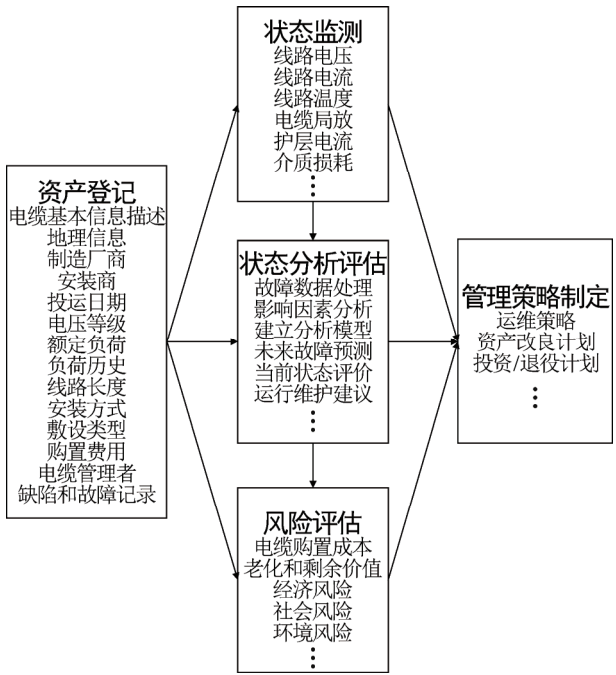


图3 电缆资产管理内容和步骤

Fig.3 Contents and procedures of cable management

2 电力电缆的状态评估

2.1 电力电缆的绝缘老化过程

对于电缆线路而言，电缆接头是最薄弱环节，而对于电缆本体和接头来说，绝缘材料是最薄弱环节。除外力破坏这个原因之外，大多数电缆故障都是由于绝缘击穿所致^[26-27]，导致绝缘击穿的原因多种多样（如表 2 所示），而在击穿之前电缆绝缘往往会经历一个劣化过程^[3,28]。

运行中电缆绝缘材料性能会随时间而发生劣化^[1]或老化，局部缺陷如界面开裂、水分、杂质和绝缘材料中间气隙的存在会增加局部应力，其结果是快速劣化或加速老化。这个过程中往往伴随着局部放电和水树的产生和生长。每条电缆线路的老化过程迥异，但总的来说，其老化过程可以归纳为如图 4 所示的 3 种类型。图 4 中所示的中速老化和慢速老化的差别在于是否存在轻微缺陷以及电缆线路运行过程中所受电、热、机械和环境等应力强度有多少之分。当绝缘层存在严重缺陷时，其老化速度与时间变成非线性的关系，绝缘强度越接近所受应力时，电缆绝缘被击穿的风险就越高^[26]，这种情况被称之为加速老化。

图 5 展示了同一条电缆线路同一绝缘材料 3 种不同部位不同老化程度的绝缘材料寿命与所受电应力之间的关系^[26]。很明显，随着电应力的增加，绝缘材料寿命呈指数下降，例如，当电应力归一化值从 15 增加到 16.5 时，绝缘材料寿命归一化值大约下降 60%。这充分说明电缆制造安装过程中的质量管理极其重要，也解释了同一条电缆线路同一绝缘材料的 3 种不同部位老化程度有很大差异的原因。若某条电缆线路只存在局部缺陷如 1 个较大水树，则即使该电缆线路整体状态良好，局部也可能会因缺陷处应力增高、绝缘强度下降而发生击穿故障。若某条线路沿线存在多个细小的蝴蝶结状水树，则该线路的老化过程可能是中速整体老化。因此，对电缆线路的状态进行诊断并对其问题性质进行界定，将对采取何种最有效的运维措施如是维修还是更换、是局部更换还是整体更换，提供重要技术支撑。若是个别局部缺陷导致击穿，则进行局部维修或者更换就能使电缆状态恢复如初；但若是整体老化或是存在众多的缺陷，则仅对故障点进行维护更换并不能解决问题。

表 2 电缆缺陷和故障原因分类

缺陷和故障原因分类	具体说明
运行环境因素	水分浸入，接地箱进水，化学腐蚀
外力破坏	多点接地，悬浮电位，绝缘层破损，电缆变形，部件断裂
安装工艺不良	电缆部件断裂，含有杂质，电缆部件缺失，电缆接线错误，张力过高，电缆附件施工不良
制造工艺问题	气隙，绝缘中含有杂质，毛刺，护套工艺不良，绝缘厚度不足
运行维护人员操作失误	过电压/过电流，日常维护不足，维护过程中产生的电缆缺陷
电缆服役年限增长引发的劣化	电缆绝缘劣化如绝缘强度降低等

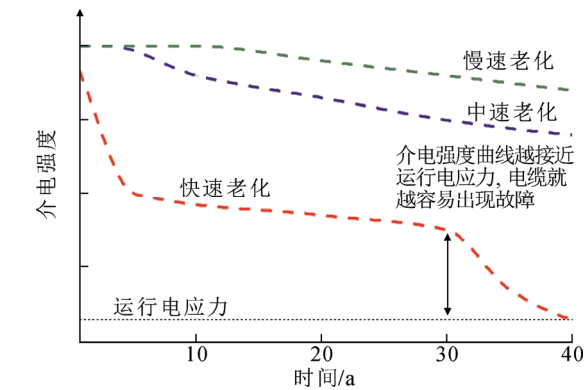


图 4 电缆绝缘的老化分类

Fig.4 Aging classification of cable insulation

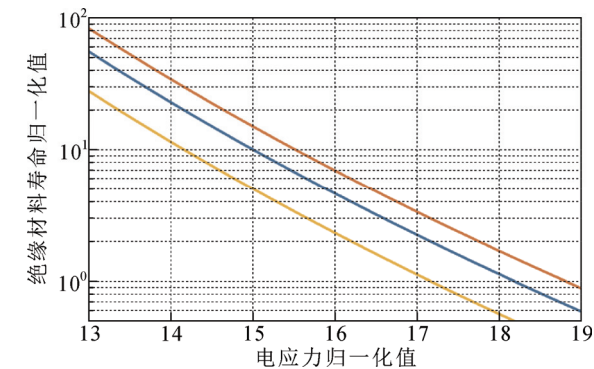


图 5 绝缘材料寿命与电应力之间的关系

Fig.5 Endurance reduction with elevated electrical stresses

2.2 电力电缆的状态监测与状态诊断

对电缆线路进行状态评估主要是对潜在的故障、缺陷进行诊断并对老化程度进行分析^[29-41]。

电力电缆绝缘结构复杂，包括导体、绝缘、半导电屏蔽、外屏蔽和护套等。电缆在交付给用户之前必须通过多种试验以确保其可靠性，主要包括特

殊试验和例行试验, 常规电气测试项目主要包括: 20 ℃ 温度下线芯导体的电阻值测量; 交流耐压测试; 冲击耐压测试; 工频条件下 20 ℃ 以上温度下的介质损耗角测试^[11]。如果温度低于 20 ℃, 就需要根据绝缘的校正曲线将介质损耗角校正到 20 ℃ 时的数值。

为了减少电力电缆故障的发生, 电力电缆在日常的运行维护中通常进行一些在线监测或离线测试。常见的在线监测手段包括分布式光纤测温、护层电流监测、局部放电在线监测。通过分布式光纤测温^[29]可以直接反映电缆物理特性的变化, 但光纤需要在制造电缆时提前预制。通过护层电流^[3,30-31]监测可以反映电缆的外绝缘状况, 但电缆通道存在多回路时, 护层电流与故障类型之间的关系还有待于进一步研究。局部放电在线监测近年来在解决局部放电信号的去噪、典型缺陷局部放电信号的模式识别、交叉互联电缆局部放电源的定位等关键问题^[7-8]上取得了巨大的进展, 但局部放电源的精准定位和所测到的局部放电量与剩余寿命之间的关系还需要进一步的研究。

常见的离线测试手段包括绝缘电阻测试、交直流耐压测试、超低频测试、振荡波测试等。绝缘电阻测试容易受到分布电容的影响^[12], 测试结果往往不准确, 并且当只有局部发生绝缘劣化时, 绝缘电阻往往无法反映真实情况^[32-34]。进行交直流耐压测试时, 一方面直流耐压测试容易在电缆绝缘内残留空间电荷, 这些空间电荷的存在会导致电缆绝缘的进一步破坏^[35-37], 另一方面交流测试需要大功率补偿设备来补偿容性电流^[22], 现场测试复杂, 因此大多采用其他替代手段。超低频测试是一种破坏性试验^[35], 如果测试方案设置不当就会对电缆绝缘造成进一步破坏, 并且当电缆有水树存在时, 测试结果不准确^[36-37]。振荡波测试对于电缆接头和终端测试而言效果好^[38-39], 但是对于电缆本体测试而言则效果较差^[40-41]。

总而言之, 到目前为止电缆监测和状态评估技术还不尽如人意, 即使是在环境和各种技术参数比较容易控制的实验室, 很多电缆绝缘的性能测试结果也都难以重复或难以保持一致, 电缆线路现场带电检测时情况更为复杂。而一些带电测试(如局部放电)标准的缺失导致不同测试设备使用不同技术和诊断标准, 其结果难以检验。加上电缆线路的测试价格昂贵, 比较成熟的测试手段需要停电操作,

所以电缆运维部门大多没有全面开展电缆线路的状态测试与评估。

2.3 电缆故障预测的统计学模型

智能电网的不断发展对电力系统的设备提出了状态检修的要求。然而, 电网中的电缆尤其是配电网电缆的数量庞大, 广泛使用在线监测技术存在着投资过大的问题, 而供电部门人手不足, 对每条配电网电缆进行绝缘状况测试则工作量巨大, 且不好安排停电时间, 因此在短期内难以通过监测技术来掌握每条电缆的健康状况。输电电缆虽然数量相对较少, 但是进行绝缘在线监测则成本很高, 所以也只有少数电缆通道安装了在线监测设备。若根据电缆运行时间、负荷历史和整体故障情况, 有针对性地对电缆进行维护, 则不仅效果好, 而且能提高效率。因此, 近年来国内外学者在对故障数据进行统计分析并用以对可能发生的故障数目进行预测方面也开展了一些研究^[5-6,42-43]。

2.3.1 Cox 比例风险模型

Cox 比例风险模型能提供相对准确的影响因素重要性分析, 它有助于更好地分析早期故障因素^[3]。该模型具有很强的适用性, 对数据分布、残差分布均无特殊要求, 并且由于该模型能对截尾数据进行分析, 所以保证了分析结果的全面性、可靠性, 已广泛地应用在分析病人生存时间的影响因素和可靠性等医学领域。

经典 Cox 比例风险模型用来分析依时协变量和时间独立协变量, 其函数表达式如式(1)所示

$$h(t, X) = h_0(t) \exp\left(\sum_{k=1}^{n_1} \beta_k X_k + \sum_{j=1}^{n_2} \gamma_j X_j\right) \quad (1)$$

式中: $h_0(t)$ 为基准风险函数; X_k 为依时协变量; X_j 为时间独立协变量; X_k 和 X_j 的回归参数分别为 β_k 和 γ_j ; n_1 和 n_2 则分别为依时协变量的数目和时间独立协变量的数目。如果原始数据服从 Weibull 分布, 那么基准风险函数可以用 $h_0(t)$ 来表示, 这样该模型就是一个全参数的模型^[6]。但如果分析的重点在于各协变量相对的重要性, 而 $h_0(t)$ 并不是研究的重点, 那么这种情况只需要用到半参数的 Cox 比例风险模型, 其函数表达式如式(2)所示

$$h(t, X) = h_0(t) \exp\left(\sum_{k=1}^n \beta_k X_k\right) \quad (2)$$

式中: X_k 为第 k 个可能与电缆故障相关的协变量(即影响因素); β_k 为协变量 X_k 所对应的回归参数, 它表示第 k 个可能与电缆故障相关的协变量的权重。 β_k

为正值时表示第 k 个协变量对电缆故障起到正面的作用效果; β_k 为负值时表示第 k 个协变量对电缆故障起到负面的作用效果; β_k 等于 0 时则表示第 k 个协变量与电缆故障无关。

将可能与电缆故障相关的因素确定为协变量, 各协变量的截尾时间序列可用各电缆线路的截止日期减投运日期来得到。各协变量的重要性由它们对电缆故障产生的影响程度来评估, 通过假设检验来完成。原假设为“协变量的 β_k 值等于 0”, 备择假设为“协变量的 β_k 值不等于 0”。这里 β_k 值采用极大似然估计法来估计。

β_k 值的大小可用来判断电缆故障的影响因素, 并对其影响程度进行排序, 从而指导采购、安装和施工, 以及进一步确定重点维护和监测对象。

2.3.2 Weibull 分布模型

与 Cox 比例风险模型和多重对应分析法 (MCA) 不同, Weibull 分布模型更适合反映电缆自身的老化规律和趋势^[42-43]。以 Weibull 分布作为寿命分布模型的首要优点是能够在极少量样本的情况下提供准确的故障分析和故障预测。

Weibull 分布有很多种形式, 其中应用最多的是两参数和三参数 Weibull 分布。两参数 Weibull 分布的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right) \quad (3)$$

式中: t 为故障前运行时间; β 为形状参数; η 为尺度参数。当 $\beta > 1$ 时, 表明故障率在上升; 当 $\beta < 1$ 时, 表明故障率在下降; 当 $\beta = 1$ 时, 表明故障率不变, Weibull 分布退化为指数分布。当 Weibull 分布应用于寿命分布或老化问题研究时, 一般认为当 $\beta < 1$ 时, 表示产品尚未进入老化期; 当 $\beta = 1$ 时, 表示产品处于随机失效的时期; 当 $1 < \beta < 4$ 时, 表示产品处于老化初期; 当 $\beta \geq 4$ 时, 表示产品处于老化的中晚期, 在这个阶段, 产品会迅速老化失效。

两参数 Weibull 分布的分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right) \quad (4)$$

时间 t 服从 Weibull 分布, 记为 $t \sim \text{Wei}(\beta, \eta)$ 。确定 1 个两参数 Weibull 分布的决定性因素就是 β 和 η 的数值, 通过极大似然函数法, 可以估计出形状参数 β 值和尺度参数 η 值。

通过估计出的分布参数值, Weibull 分布模型可以给出电缆的寿命分布曲线, 如图 6 和图 7 所示,

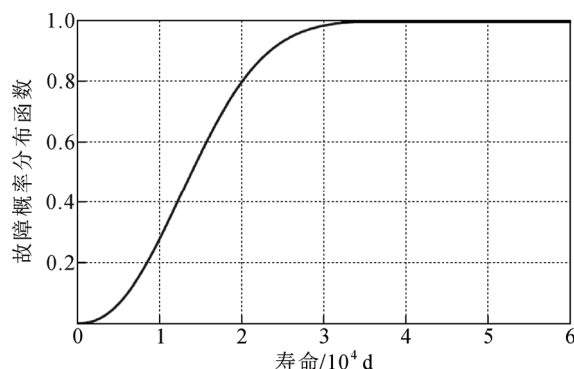


图 6 Weibull 分布的故障概率分布函数

Fig.6 Distribution function of Weibull

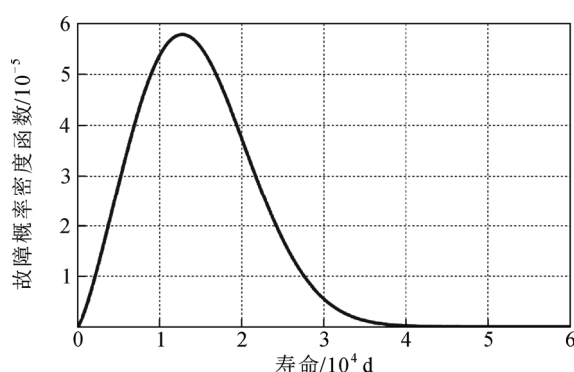


图 7 Weibull 分布的故障概率密度函数

Fig.7 Probability density function of Weibull

可直观判断电缆老化的概率和电缆整体的老化状态, 为电缆的维护更换提供参考和依据。

2.4 电力电缆的电热老化模型

分析电缆的老化过程可以有助于掌握在运电缆线路的不同老化程度并预测其可靠性的变化, 这对于电缆线路运维策略的制定而言极其重要。否则, 一些投运时间较短的电缆线路可能因负荷满载、超载和运行环境恶劣而在无预警的情况下突然发生故障, 但一些投运时间长的电缆线路可能因历史负荷偏低和运行环境较好而仍然处于良好状况, 若按投运时间进行维护更换则会导致极大的浪费。

电缆的温度主要有 2 个影响因素: 电流焦耳效应产生的热量和电缆周围环境引起的热量耗散。在已知每小时负荷的情况下, 可根据 IEEE 242-2001 标准提供的公式计算出电力电缆的运行温度。电流的热效应和土壤的环境温度对电缆温度的升高有协同作用。除了特殊情况超过额定电流值以外, 大部分时间内电缆载流均低于额定电流值。因此, 电缆绝缘层表面温度一般低于额定最高温度。

Montsinger 于 1930 年首次开展了电缆绝缘的老化试验, 发现当温度超过额定值 8~10 °C 时电缆寿命会减半^[44-45], 并得出了绝缘材料热老化寿命与温度成指数关系的结论。

基于实验室加速老化试验, Dalkin 发现热老化过程是由于温度引起的化学反应所带来的变化。老化速率与温度的关系可由 Arrhenius 公式得到^[46-47]

$$t_{\text{life}} = Ae^{\frac{E_a}{RT}} \quad (5)$$

式中: t_{life} 为使用寿命; A 为频率常数; E_a 为绝缘材料的激活能; R 为普适气体常数; T 为试验热力学温度。

电应力引发的老化对绝缘材料来说是一个渐进的劣化过程。电老化与局部放电、水树、电树以及空间电荷等密切相关, 这些现象通常是由于绝缘材料中存在气隙、缺陷和杂质等引起。常用的电老化包括线性和指数模型^[45]。

电缆所加电压值超过电缆额定电压值时, 就有可能发生电击穿。电缆所加电压值恒定时, 反乘幂法则和指数模型都可能用来表示电压/电场关系和正常工作时间。电缆的剩余电热寿命 L_{E,T_C} 可以由反乘幂法则计算得到^[46]

$$L_{E,T_C} = L_0 \left(\frac{-\Delta W}{K_B} (T') \right) \left(\left(\frac{E}{E_0} \right)^{-(n_0 - b_{ET} T')} \right) \quad (6)$$

式中: $T' = 1/T_{C,0} - 1/T_C(\Delta t_i)$ 为通常热应力下的热力学温度, $T_C(\Delta t_i)$ 为在时间 Δt_i 内的导体温度, $T_{C,0}$ 为可允许的最高热力学温度; E 为最高电场强度; E_0 为引起电老化的电场强度临界值; L_0 为在 $T_{C,0} = T_C(\Delta t_i)$ 、 $E = E_0$ 时的电缆寿命; n_0 为在 $T_{C,0} = T_C(\Delta t_i)$ 的耐压系数; b_{ET} 为电热温度协同作用常数; K_B 为 Boltzmann 常数; ΔW 为通过短期试验得到的活化能。

Mantanari G C 等人利用上述理论公式在实验室针对不同绝缘材料展开了一系列试验并得出了电缆绝缘材料的寿命曲线。图 8 展示了不同电应力条件下 XLPE 电缆材料的老化曲线^[45-46]。

Swati Sachan 以 2 个实际案例展示了如何结合电热老化模型、电缆环境温度和负荷历史来估算电缆的剩余寿命^[46]。

电热老化模型充分考虑了运行条件对电缆运行寿命的影响, 其结果还需在实际应用中得到验证, 如果成熟, 就可用来预测电缆的剩余寿命, 并据此确定最佳维护和更换时间。

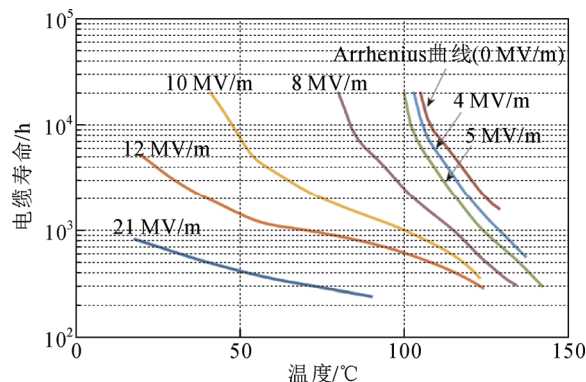


图 8 不同电应力条件下 XLPE 电缆寿命曲线

Fig 8 Life of XLPE cable under varying temperature and constant electrical stresses

3 电缆线路的风险评估、运维及退役策略

设备的运维管理经过 4 个阶段的发展已经成为一门独立的学科^[47]。第 1 个阶段是 20 世纪 80 年代之前, 设备的运维管理是故障后的维护更换; 第 2 个阶段是 20 世纪 80 年代后期, 设备的运维管理转为了基于时间节点的维护更换计划; 第 3 个阶段是 20 世纪 90 年代后期, 开始了状态检修的概念; 第 4 个阶段是近年来, 国外电力设备的运维退役策略的制定是基于设备的风险评估。ISO55000 对风险评估的要求是同时考虑设备的健康状态和其重要性, 其中重要性的分析要求同时考虑设备对经济、社会和环境方面的影响^[16]。

电缆资产的状态评估和故障预测方法可以分为 2 大类: 第 1 类 Bottom-up 方法以绝缘测试手段为基础, 结合实验室绝缘老化模型、测试结果和专家经验, 对电缆个体进行诊断; 第 2 类 Top-down 方法以统计学手段为基础, 分析电缆的历史故障数据和原始数据, 对电缆整体的故障主要影响因素、故障趋势和未来的故障数目进行预测。这 2 类方法分别从个体和整体角度对电缆全寿命周期资产管理工作进行指导。

根据统计分析结果得到的电缆状态和电缆运行因素的重要性程度, 电缆群体的老化状态分布可绘制得到如图 9 所示的曲线。

根据状态监测数据和老化模型可以确定, 在不同运行条件下, 随着时间的推移, 电缆的老化状态会有所差异, 但其整体寿命分布情况服从图 9 所示的 Weibull 分布。对于不同的电缆个体而言, 可根据老化模型和状态监测得出的电缆状态进行排序来决定维护和更换的对象^[19]。

电缆资产的重要性大概可以分为以下几方面的内容:

1) 社会方面, 考察故障引发停电所造成的社会影响, 可以按用户等级、电压等级来区分;

2) 经济方面, 考察线路容量、停电后电力企业和用户的经济损失;

3) 环境方面, 考察故障维修或更换所引发的环境问题和道路拥堵等因素。

每个电力设备都有设备老化程度和设备重要性随时间变化这 2 个维度, 用 2 维图形表示如图 10 所示。落在右上角小格区域的电力设备需要采取级别最高的维护措施或是亟需更换, 并且越靠近右上部小格区域则风险等级越高。很明显, 基于风险的维护更换策略所取得的结果不同于基于状态检修所取得的结果^[19]。

电力电缆的退役决策大致可分为 2 个部分内容: ①确定退役的数量; ②确定退役的对象。根据电缆状态和重要性即可判断出风险等级高、需要更换的电缆。图 11 给出了统计学模型应用于电缆接头更换决策的 1 个案例, 结果显示的是预防性更换数目与可能发生的预期故障数目(仿真结果)之间的关系。图 11 结果表明预防性更换接头显著降低了预期故障水平^[10]。

综合使用统计学方法、老化模型和状态监测来帮助制定电缆运维策略有几个好处: ①统计学方法给出的是历史故障信息和以此为基础的故障趋势, 若只用统计学手段, 则个体情况得不到了解和区分, 大量的巡视和状态监测数据及信息得不到利用, 状态监测中发现的缺陷发展为故障的时间不能用来学习, 造成数据信息的浪费; ②仅使用老化模型无法反映不同故障因素如安装方式、制造质量等的影响; ③状态监测技术暂时还不能准确可靠地预测剩余寿命和电缆绝缘整体老化的程度。

将上述几个方法结合起来, 通过数据收集积累还可以挖掘诊断知识。

4 结论

资产管理国际标准 ISO 55000 的相关内容已经纳入国家电网公司的企业标准, 电力设备的管理者有必要了解更加科学、规范、高效、前沿的电力电缆资产管理策略与研究方法。

1) 电力设备的资产管理标准已经形成, 未来将会有更加规范的管理方案。电力设备兼具“价值”

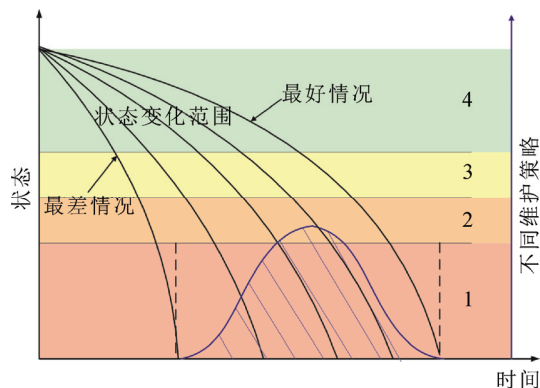


图9 电缆老化状态分布

Fig.9 Cable aging state distribution

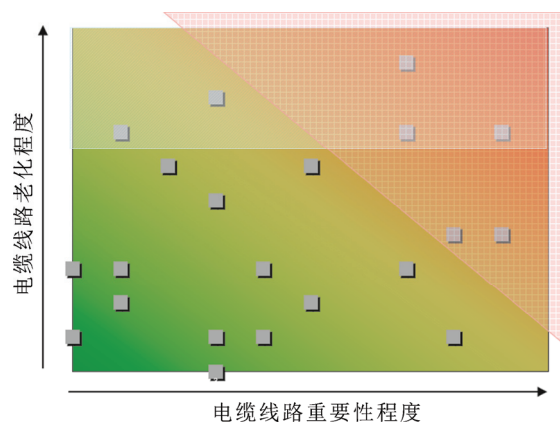


图10 电缆状态分布图

Fig.10 Cable condition distribution

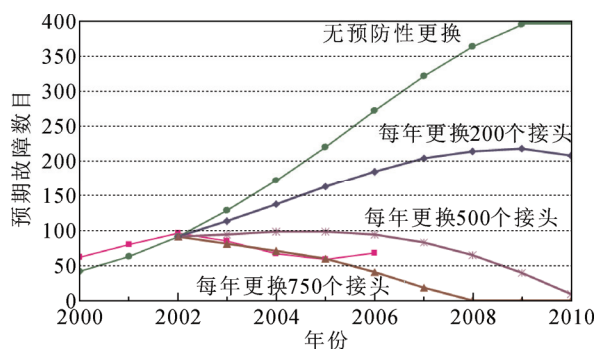


图11 预防性更换数目与预期故障数目之间的关系

Fig.11 Relationship between the number of preventive replacement and the number of failures

和“责任”这 2 种属性, 管理者在获取资产“价值”的同时需承担相应的“责任”。

2) 电力电缆的资产管理包括资产登记、监测、分析评估、审计和管理评估等过程, 这些过程之间都存在一定的联系而并非独立。

3) 电力电缆的状态是其资产管理的核心内容

和重要依据。现阶段电力电缆的在线监测数据需要依托统计学的方法以实现对电缆状态更准确的表征, 从而实现更优化的资产管理。

4) 根据电缆状态和重要性程度, 可提供维护更换决策、确定电缆的退役对象, 应用统计学模型可提供退役数量的决策。

参考文献 References

- [1] 朱晓辉, 孟峥峥, 王浩鸣, 等. 运行高压交联聚乙烯电力电缆的介电性能[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1090-1095.
ZHU Xiaohui, MENG Zhengzheng, WANG Haoming, *et al.* Dielectric properties of operated high voltage XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1090-1095.
- [2] Orton H. 电力电缆技术综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1057-1067.
Orton H. Power cable technology review[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1057-1067.
- [3] 袁燕岭, 周 灏, 董 杰, 等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1194-1203.
YUAN Yanling, ZHOU Hao, DONG Jie, *et al.* Sheath current in HV cable systems and its on-line monitoring for cable fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1194-1203.
- [4] 周远翔, 赵健康, 刘 睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, *et al.* Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [5] Tang Z Y, Zhou W J, Zhao J K, *et al.* Comparison of the Weibull and the crow-AMSAA model in prediction of early cable joint failures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2410-2418.
- [6] Tang Z Y, Zhou C K, Jiang W. Analysis of significant factors on cable failure using the Cox proportional hazard model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 951-957.
- [7] 张磊祺, 盛博杰, 姜 伟, 等. 基于电缆传递函数和信号上升时间的电力电缆局部放电在线定位方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1204-1213.
ZHANG Leiqi, SHENG Bojie, JIANG Wei, *et al.* On-line power cable partial discharge localisation method based on cable transfer function and detected pulse rise-time[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1204-1213.
- [8] 张磊祺, 盛博杰, 姜 伟, 等. 交叉互联高压电缆系统的局部放电在线监测和定位[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2706-2715.
ZHANG Leiqi, SHENG Bojie, JIANG Wei, *et al.* On-line partial discharge localization in cross-bonded HV cable systems[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2706-2715.
- [9] 王 霞, 姚 航, 吴 锴, 等. 交联聚乙烯与硅橡胶界面涂抹不同硅脂对其电荷特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 74-79.
WANG Xia, YAO Hang, WU Kai, *et al.* Effect of different coating silicone grease on space charge characteristics at XLPE/SR interface[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 74-79.
- [10] 王 立, 杜伯学, 任志刚. 高压交联聚乙烯电缆绝缘劣化试验分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 111-116.
WANG Li, DU Boxue, REN Zhigang. Test and analysis of insulation deterioration of XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 111-116.
- [11] 周文俊, 杨 洋, 卫李静, 等. 交叉互联电缆泄漏电流的分离及相间介损相对变化监测应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 468-477.
ZHOU Wenjun, YANG Yang, WEI Lijing, *et al.* Separation method of leakage current in cross-bonded cables and its application in on-line monitoring relative change of dielectric loss between phases[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 468-477.
- [12] 夏 荣, 赵健康, 欧阳本红, 等. 阻尼振荡波电压下 110kV 交联电缆绝缘性能检测[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1753-1760.
XIA Rong, ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong, *et al.* Dielectric property detection of 110 kV XLPE power cables using damped AC voltages[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1753-1760.
- [13] Abbasi E, Firuzabad MF, Jahromi AA. Risk based maintenance optimization of overhead distribution networks utilizing priority based dynamic programming[C] // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 1-11.
- [14] Bloom A J, Feinstein AC, Morris P. Optimal replacement of underground distribution cables[C] // 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE PES, 2006: 389-393.
- [15] 国家电网公司电缆及通道运维管理规定: 国网(运检/4)307—2014[S], 2014.
The operation and maintenance regulations of power cable with its channels of State Grid Corporation of China: 307—2014[S], 2014.
- [16] 电缆线路状态评价导则: Q/GDW 456—2010[S], 2010.
Cable line state evaluation guidelines: Q/GDW 456—2010[S], 2010.
- [17] CIGRE WG B1.10. Brochure 379 update of service experience of HV underground and cable systems[R]. Paris, France: CIGRE, 2009.
- [18] Mehairjan RPY. Application of statistical life data analysis for cable joints in MV distribution networks[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2010.
- [19] Guidelines for the use of statistics and statistical tools on life data: CIGRE D1.39 Technical Brochure[S], 2016.
- [20] 周 凯, 杨明亮, 陶文彪, 等. 单一极性直流电压下交联聚乙烯电力电缆水树生长特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1075-1083.
ZHOU Kai, YANG Mingliang, TAO Wenbiao, *et al.* Propagation characteristics of water trees in XLPE power cables under single polarity DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1075-1083.
- [21] Hampton N, Hartlein R, Lennartsson H, *et al.* Long-life XLPE insulated power cable[C] // 7th International Conference on Power Insulated Cables. Paris, France: [s.n.], 2007: 1-6.
- [22] Barber K W, Marazzato H. Reliable undergrounding of electricity supply in Asia[C] // Asia Pacific Conference on MV Power Cable technologies. Kuala Lumpur, Malaysia: MNC-CIRED, 2005: 1-10.
- [23] Richard EB. Electric power distribution reliability[M]. 2nd ed. London, UK: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009: 267-271.
- [24] Puget Sound Energy. Underground cable replacement, fact sheet[R]. Puget, France: Puget Sound Energy, 2011: 1-2.
- [25] Asset management—overview, principles and terminology: ISO 55000: 2014[S], 2014.
- [26] Hartlein R. Diagnostic testing of underground cable systems[R]. Atlanta, USA: NEETrac, 2010 [2014-03-27]. www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI_Phase_1_Final-Report.pdf.
- [27] Reid J, Zhou C, Hepburn D M, *et al.* Fault location and diagnosis in medium voltage shielded power cable: a case study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 10-18.
- [28] Zhou C, Michel M, Hepburn D, *et al.* On-line partial discharge monitoring in MV underground cables[J]. IET Science Measurement and Technology, 2009, 3(5): 354-363.
- [29] 彭 超, 赵健康, 苗付贵. 分布式光纤测温技术在监测电缆温度[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 43-45.
PENG Chao, ZHAO Jiankang, MIAO Fugui. Distributed temperature system applied in cable temperature measurement[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 43-45.
- [30] 刘 英, 王 磊, 曹晓珑. 双回路电缆护套环流计算及影响因素分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 143-146.
LIU Ying, WANG Lei, CAO Xiaolong. Calculation of circulating current in sheaths of two-circuit arranged cables and analyses of influencing factors[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4): 143-146.
- [31] 李建儒. 单芯电力电缆护层接地及护套损伤危害性分析[J]. 电气化铁道, 2011, 22(2): 29-31.
LI Jianru. Hazard analysis of sheath grounding and jacket damage of

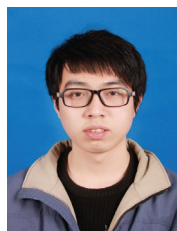
- single core power cable[J]. Electric Railway, 2011, 22(2): 29-31.
- [32] 胡纪五, 吴庆明, 马晋嵘. 电缆绝缘电阻在线测量的研究[J]. 电测与仪表, 2000, 37(5): 9-12.
HU Jiwu, WU Qingming, MA Jirong. Study on the on-line measurement of insulating resistance of cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2000, 37(5): 9-12.
- [33] 孙 鸣, 谢芝东, 张 航. 10 kV 电力电缆绝缘在线监测的一种新方法[J]. 继电器, 2006, 34(22): 32-35.
SUN Ming, XIE Zhidong, ZHANG Hang. A new approach to on-line insulation monitoring of 10 kV electric power cables[J]. Relay, 2006, 34(22): 32-35.
- [34] 黄海鲲. 110 kV 交联聚乙烯电力电缆绝缘在线监测的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
HUANG Haikun. Study of on-line insulation monitoring on 110 kV XLPE cable[D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2004.
- [35] 林楚劲. 高电压直流耐压试验对电缆寿命的影响[J]. 电力设备, 2006, 7(1): 70-72.
LIN Chujin. Influence of HVDC withstand voltage test on cable life[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(1): 70-72.
- [36] 张国光. 交联聚乙烯电缆及其现场交流耐压试验[J]. 电气时代, 2004, 3(3): 100-102.
ZHANG Guoguang. XLPE cable and its AC voltage withstand test on site[J]. Electric Age, 2004, 3(3): 100-102.
- [37] 周 芸. 交联电缆的超低频耐压试验[J]. 华东电力, 2005, 33(3): 67-68.
ZHOU Yun. Ultra-low frequency voltage endurance test for cross-linked cable[J]. East China Electric Power, 2005, 33(3): 67-68.
- [38] 郑晓泉, 屠德民. 含水树枝 XLPE 电缆的超低频谐波响应电流特性实验研究[J]. 电工电能新技术, 2001, 20(4): 25-29.
ZHENG Xiaoquan, TU Demin. Current characteristics of ultra-low frequency harmonic response in XLPE cable containing water treeing[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2001, 20(4): 25-29.
- [39] 任 勇, 吴 剑. 高压电力电缆超低频试验[J]. 云南电力技术, 2005, 33(5): 41-43.
REN Yong, WU Jian. VLF test on high voltage power cables[J]. Yunnan Electric Power, 2005, 33(5): 41-43.
- [40] 陶诗洋. 基于振荡波测试系统的 XLPE 电缆局部放电检测技术[J]. 中国电力, 2009, 42(1): 98-101.
TAO Shiyang. PD detection technique in XLPE power cables based on oscillating wave test system[J]. Electric Power, 2009, 42(1): 98-101.
- [41] 张 皓, 唐嘉婷, 张立志, 等. 振荡波测试系统在电缆局放测试定位中的典型案例[J]. 电力设备, 2009, 9(12): 31-34.
ZHANG Hao, TANG Jiating, ZHANG Lizhi, et al. Typical case analysis of oscillating wave test system in cable partial discharge test and localization in power cable[J]. Electrical Equipment, 2009, 9(12): 31-34.
- [42] John P, Ainscough P E, Ian W, et al. Predicting medium-voltage underground-distribution cable failures[C] // IEEE PES-ICC Fall Meeting. Scottsdale, USA: IEEE PES, 2009: 1-8.
- [43] Gill Y. Development of an electrical cable replacement simulation model to aid with the management of aging underground electrical cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(1): 31-37.
- [44] Dang C, Parpal J L, Crine J P. Electrical aging of extruded dielectric cables: review of existing theories and data[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 237-247.
- [45] Montanari G C. Aging phenomenology and modelling[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(5): 755-776.
- [46] Swati Sachan, Rui Wen, Yong Xiang, 等. 一种电力电缆的随机电热退化模型[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1178-1187.
Swati Sachan, Rui Wen, Yong Xiang, et al. A stochastic electrothermal degradation model of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1178-1187.
- [47] Mowbray J. Reliability centred maintenance: the changing world of maintenance[M]. Oxford, UK: Aladon Ltd, 1999.



ZHOU Chengke

Ph.D., Professor

Corresponding author



LI Mingzhen

Ph.D. candidate



WANG Hang

Ph.D. candidate



ZHOU Wenjun

Ph.D., Professor



BAO Yuchuan

Senior engineer



TANG Zeyang

Ph.D.

周承科(通信作者)

1963—, 男, 博士, 教授, 博导

英国格拉斯哥加里多尼亚大学教授, 武汉大学客座教授, 英国工程技术学会会士 (FIET), 国际电气与电子工程师学会高级会员 (SMIEEE), 英国电气工程师协会注册工程师 (CEng)。研究方向包括电力电缆状态监测、全寿命周期管理、电力系统分析等

E-mail: C.Zhou@gcu.ac.uk

李明贞

1991—, 男, 博士生

研究方向为电力电缆的运行维护技术和管理策略等

E-mail: li-mingzhen@qq.com

王 航

1989—, 男, 博士生

主要从事电缆局部放电和绝缘老化研究

E-mail: whuwanghang@qq.com

周文俊

1959—, 博士, 二级教授, 博导, IEEE 高级会员
从事防雷接地和高电压绝缘与测试研究, 已发表论文 130 余篇

E-mail: wjzhou@whu.edu.cn

鲍玉川

1970—, 男, 硕士, 高工

主要从事电力生产管理工作

E-mail: baoyc2@hb.sgcc.com.cn

唐泽洋

1987—, 博士

从事电缆资产管理与电网运行分析

E-mail: whu_tzy@126.com