

XLPE 电缆绝缘状态低频信号感应在线监测技术研究

王尉军¹, 陈旻¹, 殷慧¹, 李原², 周凯²

(1. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局, 贵州省 贵阳市 550004; 2. 四川大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610065)

Research on Online Monitoring Technology for XLPE Cable Insulation Characteristics Based on Low Frequency Signal Induction

WANG Weijun¹, CHEN Min¹, YIN Hui¹, LI Yuan², ZHOU Kai²

(1. Guizhou Power Grid Co., Ltd Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550004, Guizhou Province, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

摘要: 实时掌握电力电缆绝缘状态, 对保障其安全稳定运行具有重要意义。针对已有电缆绝缘在线监测技术的不足, 提出一种基于低频信号感应的 XLPE 电缆绝缘在线监测方法。首先介绍了该方法基本原理, 随后对低频感应信号参数及采样方式进行了分析优选, 最后搭建实验平台, 对人工加速热老化电缆及实际退运电缆进行了绝缘在线监测。结果表明, 将电压幅值 5 V, 信号频率 10 Hz 的低频信号由配网中性点电压互感器开口三角侧注入, 可在电缆线路中感应零序电压电流, 实现电缆绝缘电阻、泄漏电流及介损因数等的精准在线测量。对人工加速热老化电缆, 低频信号感应法所测介损因数与极化-去极化电流法离线测试结果最大误差仅 12.6%, 且两类方法所得结果呈现相同时变规律。对实际退运电缆, 低频信号感应法测试结果与电缆实际运行状态吻合。实验结果表明, 低频信号感应法可实现电缆电气参数精确在线测量, 满足工程实际需求。

关键词: XLPE 电缆; 电缆绝缘状态; 低频信号感应; 绝缘老化; 在线监测

Abstract: The real-time monitoring of power cable insulation status is of great significance to ensure its safe and stable operation. To address the limitations of existing cable insulation online monitoring technology, in this paper we propose an online monitoring method for XLPE cable insulation based on low-frequency signal induction. Firstly, the basic principle of this method is introduced by an analysis on the low-frequency induction signal parameters and optimization of the sampling

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51877142); 贵州电网科技项目 (GZKJXM20210405)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51877142); Guizhou Power Grid Science and Technology Project (GZKJXM20210405).

methods. Then, an experimental platform is built to carry out online insulation monitoring for the artificially accelerated thermal aging cable and actual out-service cable. The results indicate that a signal, characterized by the voltage amplitude of 5 V and the signal frequency of 10 Hz, can be injected through the open triangle side of the potential transformer at the neutral point of the distribution network. This injection induces the zero-sequence voltage and current in the cable line, enabling accurate online measurement of cable insulation resistance, leakage current and dielectric loss factor. For the artificially accelerated thermal aging cable, the maximum error between the dielectric loss factors obtained by the low-frequency signal induction method and the offline polarization-depolarization current method is only 12.6%, and the results obtained by the two methods exhibit identical time-varying patterns. For the actual out-service cable, the test results of the low-frequency signal induction method are consistent with the actual operation status of the cable. The test results demonstrate that the low-frequency signal induction method can achieve accurate online measurement of cable electrical parameters, thereby satisfying the practical requirements of engineering application.

Keywords: XLPE cable; cable insulation status; low frequency signal induction; insulation aging; online monitoring

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0089

0 引言

交联聚乙烯 (XLPE) 电力电缆因具占地面积小、供电可靠性高、安装敷设方便等优势, 在我国输配电网络中得到广泛应用^[1]。然而, 随电缆运行年限增加, 其引发的各类停电事故次数与日俱增, 其中绝缘老化已成为引发电缆故障的主要原因^[2]。因此, 实现电缆绝缘状态在线监测, 对

保障电缆安全稳定供电具有重要意义。

为实现电缆绝缘状态在线监测,国内外学者提出如交流叠加法、直流叠加法、局放测量法、介质损耗法等诸多方法^[3-7]。其中,交流叠加法将 101 Hz 工频信号叠加于电缆金属护套,通过检测 1 Hz 电流信号判断电缆绝缘老化程度。对中性点直接接地系统而言,该方法因无法向线芯叠加电源而不再适用。局部放电法通过检测电缆局放信号判断电缆绝缘老化程度。但在实际环境下,电缆局放信号呈现多源特征,且受现场干扰严重,故该方法仍主要离线进行,其在线监测结果难以直接定量判断电缆绝缘状态。介质损耗法分别利用电流互感器及电压互感器测量电缆绝缘电流及缆芯电压,再由数字化测量装置计算电缆绝缘介损值,从而判断绝缘老化程度。该方法主要由西林电桥及 0.1 Hz 超低频(VLF)介损测试仪实现,但因二者均为离线设备,该方法目前无法实现电缆绝缘状态在线监测。值得注意的是,我国电缆配电系统的电源中性点一般采用不接地方式^[8]。若向中性点电压互感器开口三角侧注入特征频率测试信号,经由电缆对地阻抗入地形成回路后,测量电压互感器开口三角侧电压幅值及相位,则可构建电压电流方程组,从而实现电缆绝缘等效电容、等效电阻及缆芯等效阻抗求解。通过以上参数,可判断电缆绝缘老化程度,实现电缆绝缘状态在线监测。

基于以上思想,本文提出一种基于低频信号感应的电缆绝缘状态在线监测方法,介绍该方法的基本原理及参数求解思路,分析注入信号频率、幅值,及采样方式的选取范围。最后搭建实验平台,对人工加速热老化电缆样本,及实际退运电缆进行实际测试,验证该方法的可行性。

1 低频信号感应法基本原理

为减小接地电流,保障系统安全,我国 35 kV 及以下配电系统多采用中性点不接地方式运行。中性点不接地系统中 3 台三相三绕组 PT 开口侧零序电压为 0,此时从该侧注入区别于工频 50 Hz 的零序电压,相当于在电网中接入一可控三相零序电压源^[9]。该零序电势不能与外电路接通,只能在三角形绕组中形成零序环流^[10]。因此,从母线 PT 开口三角侧注入的零序电压,既可保证系

统正常运行,又不受工频信号影响,可用于电缆绝缘电阻、泄漏电流及介质损耗因数的在线测量。

图 1 为低频信号感应法基本原理图。其中: E_{AB} 、 E_{BC} 、 E_{CA} 分别为三相工频线电压; Z_A 、 Z_B 、 Z_C 为电缆三相缆芯阻抗; R_A 、 R_B 、 R_C 为电缆三相绝缘电阻; C_A 、 C_B 、 C_C 为电缆三相对地电容; L_A 、 L_B 、 L_C 及 L_a 、 L_b 、 L_c 分别代表 PT 等效一次绕组与等效二次绕组。

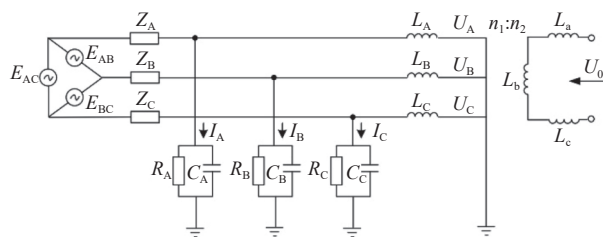


图 1 低频信号感应法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of low frequency signal induction method

图 1 中,低频电源信号 U_0 为从变比为 $n_1:n_2$ 的 PT 开口三角侧注入的恒定电压信号, U_0 在 PT 高压星形侧感应出幅值相等、相位一致的三相电压 U_A 、 U_B 、 U_C 。三相感应电压产生的零序电流与工频电流叠加,并由电缆线芯经过电缆绝缘层、铜屏蔽层,通过接地线形成完整回路,此时流过电缆绝缘的三相零序电流分别为 I_A 、 I_B 、 I_C ,故有

$$\tan \delta_i = \frac{1}{\omega R_i C_i} = \frac{\operatorname{Re}(I_i/U_i)}{\operatorname{Im}(I_i/U_i)} \quad (1)$$

其中: $\tan \delta_i$ 表示 i 相绝缘介损; Re 代表实部; Im 代表虚部。由电压电流参数及式 (1),即可实现基于低频信号感应的电缆绝缘等效电阻、等效电容及缆芯等效阻抗在线测量,以上参数可充分反映电缆整体绝缘状态,判断绝缘老化程度。

2 低频信号感应法参数选择

低频感应信号应具有合适的幅值、频率及采样方式,以在不影响电力系统正常运行的前提下保证检测灵敏性及有效性。为此,搭建配网仿真模型,结合低频信号感应法,获得各信号电压、频率及采用方式下的介损仿真(测试)结果。通过将其与电缆介损计算结果对比,实现对低频注入信号参数的优选。

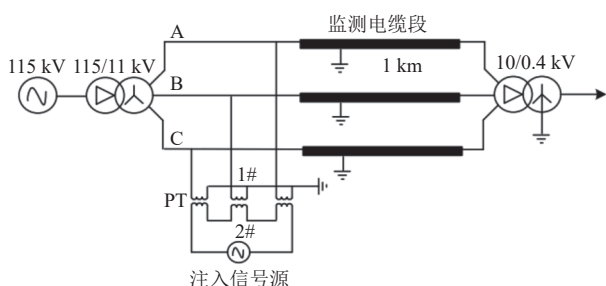


图 2 配网 PSCAD/EMTDC 仿真模型

Fig. 2 PSCAD/EMTDC simulation model of the distribution network

2.1 配网仿真模型搭建

搭建 PSCAD/EMTDC 仿真模型^[11], 如图 2 所示。

图 2 中, 取 10 kV 系统进行仿真, 电网频率 50 Hz, 线路负荷取 $100+j20$ 阻抗, 电缆长度 500 m, 电缆型号 YJLV22-3×95 mm², 其具体尺寸参数^[12]如表 1 所示, 单位长度 (1 km) 电缆线芯电阻、等效电容、等效电感及绝缘电阻分别为 0.388 Ω、202 nF、242 μH、31.29 MΩ。10 kV 配电线路采用三角形接线、中性点不接地的小电流运行方式, 低频信号感应所用 PT 并联于 10 kV 母线。

表 1 YJLV22-3×95mm² 电缆尺寸参数
Table 1 Dimension parameters of the YJLV22-3×95mm² cable

导体截面	缆芯直径	内半导体层	XLPE层	外半导体层
95 mm ²	11.6	0.8	3.4	0.8
铜屏蔽层	内护套	钢带铠装	外护套	电缆外径
0.12	1.0	0.5	3	56

PT 模型采用 PSCAD 自带的 UMEC 变压器模型, 以现场试验用 PT (型号为 JDZJ-10 的电压互感器) 为依据, 通过自定义模型中的 $V-I$ 特性曲线模拟 PT 铁芯的非线性励磁特性, 具体的 $V-I$ 特性如表 2 所示^[13]。为消除 PT 铁磁谐振对配电网的影响, 在 PT 一次侧经非线性电阻 (消谐器, 电阻值 2000 Ω) 接地。

线路变压器选用 SF7-31500/110 型号的降压

表 2 JDZJ-10 电压互感器 $V-I$ 特性
Table 2 $V-I$ characteristics of the JDZJ-10 PT

V/pu	0.00	0.31	0.54	0.86	1.23
I/pu	0.00	0.32	0.57	0.90	1.29
V/pu	1.48	1.70	1.88	2.13	2.23
I/pu	1.63	2.07	2.60	4.20	6.14

变压器, 容量 31.5 MVA, 一次侧 Y 接线中性点直接接地, 二次侧 Δ 接线, 变比 110 kV/10.5 kV, 空载损耗 38.5 kW, 短路损耗 148 kW, 空载电流 0.8%, 阻抗电压 10.5%。用户侧变压器模型以型号为 S9-63/10 的实际产品为依据, 容量 63 kVA, 一次侧 Y 接线不接地, 二次侧 Y 接线中性点直接接地, 空载损耗 0.2 kW, 短路损耗 1.04 kW, 空载电流 2.2%, 阻抗电压 4%。基于以上仿真模型, 对低频注入信号参数进行优选。

2.2 信号电压的选择

信号源的选择主要考虑精确性、可靠性及经济性等指标, 尽可能选用注入及调节方便、功耗小的信号源, 具体可选恒压源及恒流源。为尽量降低设备投资, 并保证测量精度, 宜在配电网电压互感器开口三角侧串入恒定电源信号。考虑到电流信号经由 PT 注入一次侧后幅值按变比缩小, 不便于信号检测, 故选择恒定电压源作为信号源。

据国家标准 GB12325—2008-T《电能质量供电电压允许偏差》规定, 20 kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$ ^[14]。考虑到电压互感器 10/√3、100/3 变比, 为防止注入信号在 10 kV 电缆系统一次侧形成较大的电压偏差, 引起电网电压异常波动, 同时避免过高的检测电压在设备维修时造成触电事故, 注入电压信号幅值不宜过高, 应取 10 V 以内。而当电压信号幅值过低时, 在互感器开口三角侧检测所得的特征频率测试信号可能被干扰信号淹没, 即信噪比过低, 难以保证测量灵敏度, 故注入电压信号幅值也不宜过低。为避免引起电网不规范波动、尽量提高检测灵敏度, 并同时适配常见型号的函数信号发生器, 注入信号电压幅值最终确定为 5 V。

2.3 信号频率的选择

将低频信号用于 XLPE 电缆绝缘状态在线监测, 不仅可区别于工频信号, 易与现场静电干扰及杂散电流干扰分离, 还可有效提高监测系统精确度。其中, 低频信号频率选取主要考虑以下几个方面:

1) 系统分布电容容抗与线路感抗。若频率选择过高, 则电缆容抗 X_C 相对于线路感抗 X_L 很小, 使测试电流减小, 增加检测难度。同时频率不能过低, 频率过低时会流经电缆终端的感性负载电流偏大, 使电缆发热。实际测试频率应使感应零序电流易于检测, 同时有效区别于电网正

常工作频率或谐波频率^[15]。

2) 电压互感器励磁及传变特性。PT励磁特性在不同频率下呈现不同饱和特征,若注入信号频段不合适,不仅会影响PT传变特性,还会影响信号感应法测量电缆绝缘参数的准确度。文献^[16]对型号为JDZX10-10B的3台电磁式电压互感器进行了多次空载试验,结果表明注入信号频率在100 Hz以下时,PT具有良好的传变特性^[16]。其结果如图3所示。

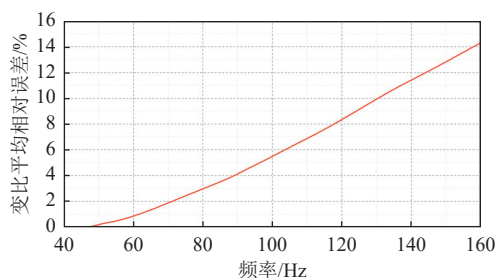


图3 不同频率下PT变比平均相对误差

Fig. 3 Average relative error of transformation ratio of PT at different frequencies

3) 微弱电流测量精度。当注入低频信号频率为 f 时,电缆绝缘泄漏电流包括阻性电流 $I_R(I_R=U/R)$ 及容性电流 $I_C(I_C=2\pi fCU)$,若注入频率可满足 $I_R/I_C>0.2$ 的条件,则能保证工程测量精度要求。当电缆绝缘电阻报警值为500 k Ω ,支路对地电容 $C\leq 100$ nF时,不同电缆绝缘参数和注入低频对应的阻性电流及容性电流比如表3所示,可见注入信号频率在1~20 Hz范围内较妥。

表3 不同频率下阻性电流及容性电流比

Table 3 Resistive current and capacitive current ratio at different frequencies

C/nF	f/Hz						
	50	40	30	20	10	5	1
100	0.064	0.078	0.106	0.159	0.318	0.637	3.185
80	0.080	0.100	0.133	0.199	0.398	0.796	3.981
60	0.106	0.133	0.177	0.265	0.531	1.062	5.308

此外,团队前期研究表明,老化电缆在0.1 Hz频率电压下呈现明显损耗特征,故将注入信号最低频率设定为0.1 Hz。综上所述,注入信号频率范围为0.1~20 Hz。

进一步地,为确定最佳注入频率,通过PSCAD仿真得到不同频率下介损值,并将其与基于式(1)及电缆参数理论计算得到的介损结果进

表4 不同信号频率下的电缆介损仿真及计算结果

Table 4 Simulation and calculation results of cable dielectric loss at different signal frequencies

频率	相角差	tan δ /%		误差/%
		仿真值	计算值	
0.1	75.8587	25.1949	25.1804	0.0145
0.5	87.1140	5.0413	5.0361	0.0052
1	88.5564	2.5201	2.5180	0.0021
2	89.2777	1.2607	1.2590	0.0017
3	89.5191	0.8393	0.8393	0
4	89.6390	0.6301	0.6295	0.0006
5	89.7118	0.5030	0.5036	0.0006
6	89.7596	0.4196	0.4197	0.0001
7	89.7939	0.3597	0.3597	0
8	89.8194	0.3152	0.3148	0.0004
9	89.8393	0.2805	0.2798	0.0007
10	89.8553	0.2525	0.2518	0.0007
11	89.8687	0.2292	0.2289	0.0003
12	89.8794	0.2105	0.2098	0.0007
13	89.8887	0.1943	0.1937	0.0006
14	89.8967	0.1803	0.1799	0.0004
15	89.9036	0.1682	0.1679	0.0003
16	89.9098	0.1574	0.1574	0
17	89.9149	0.1485	0.1481	0.0004
18	89.9196	0.1403	0.1399	0.0004
19	89.9239	0.1328	0.1325	0.0003
20	89.9227	0.1349	0.1259	0.009

行对比,结果如表4所示。由表可见,当注入信号频率在3~19 Hz范围内变化时,仿真与计算误差均小于0.001%。此外,当工频为注入频率的整数倍时,可采用傅里叶算法将注入频率信号从包含复杂频率成分的漏电流中提取,测试信号FFT变换结果不会出现频谱泄漏^[15]。综合以上因素,取注入信号频率为10 Hz。

2.4 采样方式的选择

2.4.1 采样频率

当采样时间固定为1 s,采样频率在1~200 kHz范围内变化时,将仿真所得的介损结果与电缆介损计算结果对比,得其误差如图4所示。

由图4可见,随采样频率增加,介损测量误差平均值及标准差均逐渐减小。当采样频率达到20 kHz以上时,电缆介损绝对误差小于0.03%,标准差小于0.02%,采样频率满足介损测量精度。

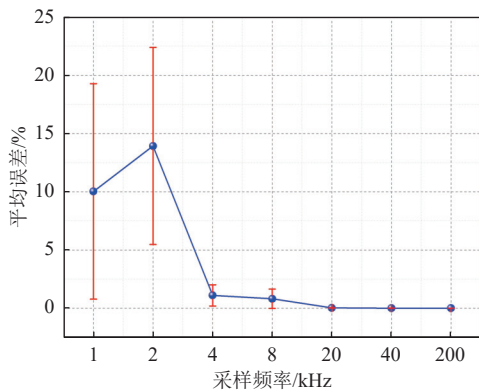


图 4 不同采样频率下电缆介损仿真及计算结果误差

Fig. 4 Errors of simulation and calculation results of cable dielectric loss at different sampling frequencies

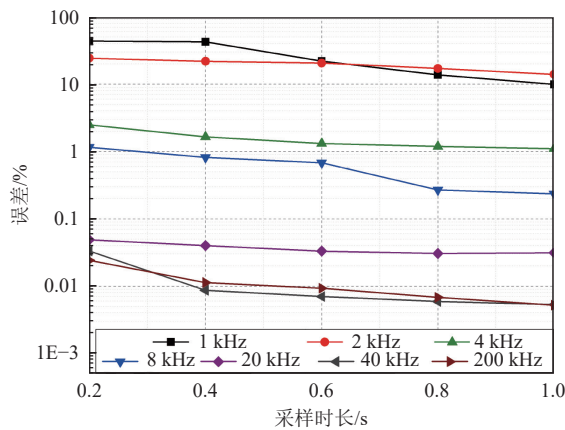


图 5 不同采样时长下电缆介损仿真及计算结果误差

Fig. 5 Errors of simulation and calculation results of cable dielectric loss at different sampling span

因此，低频信号采样频率取 20 kHz。

2.4.2 采样时长

采样频率设置在 1~200 kHz 范围内变换，采样时长依次为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 s，可得介损仿真结果与计算结果间的误差如图 5 所示。

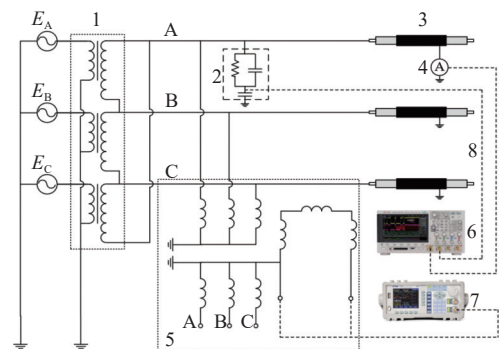
由对比结果可知，在不同采样频率下，介损测试误差随采样时长增加逐步减小。当采样频率为 20 kHz、采样时长为 0.2 s 时，测量误差最大平均值 0.0489%，最大标准差 0.0242%，已满足介损测试精度，故低频信号采样时长取 0.2 s。

3 电缆绝缘状态在线监测实验

为验证基于低频信号感应的电力电缆绝缘状态在线监测。搭建了电缆绝缘状态在线监测实验平台，并对人工加速热老化电缆及实际退运电缆绝缘情况进行了在线测试。

3.1 电缆绝缘状态在线监测实验平台搭建

图 6 所示为电缆绝缘状态在线监测平台，主要由工频电压产生单元、低频信号感应单元及信号采集单元构成。TSGC 15/0.5 型三相接触调压器经 10 kV 电力变压器升压至实验电压，高压端出线接三相老化电缆，构成实验工频主回路。低频信号感应单元采用 JDZJ-10 型户内单相电压互感器（准确级为 0.5），配合 DG1032 函数信号发生器注入低频信号。电缆电压及电缆泄漏电流，分别由 1000 : 1 变比分压器及 Keithley 6485 皮安表采集，送 DS6104 示波器进行后续分析处理。



1—变压器；2—分压器；3—电缆样本；4—Keithley 6485；5—电压互感器；6—示波器；7—信号发生器；8—信号电缆

图 6 电缆绝缘状态在线监测实验平台

Fig. 6 Online test platform for cable insulation status monitoring

3.2 热老化电缆绝缘状态在线监测

在进行热老化电缆绝缘状态在线监测实验前，需制备人工加速热老化电缆：首先，截取多根长度为 50 cm 的电缆段，将其电缆外护套及铜屏蔽层剥离，并在电缆两端预留 2 cm 缆芯；随后，将电缆样本两端各剥掉 10 cm 半导体层，露出绝缘层外表面，同时在近外半导体层侧加装屏蔽环，防止沿面电流对测试产生影响；其次，利用涂有导电胶的薄铜带缠绕粘连至剩余半导体层作为测试电极。最后，将图 7 所示电缆样本置于干燥箱，在 140 °C 条件下分别老化 108、216、324 及 432 h，其中每个老化时长下制备 5 组样本，每组样本含 3 根电缆，构成图 6 所示三相系统。

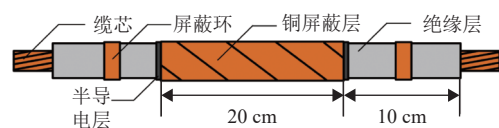


图 7 热老化电缆样本结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of thermal aging cable sample

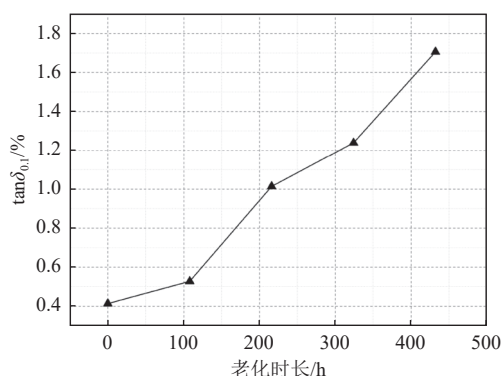


图8 基于PDC法的电缆0.1 Hz介损因数测试结果

Fig. 8 Test results of dielectric loss factor of the cable at the frequency of 0.1 Hz based on PDC method

热老化电缆制备完成后,首先采用极化-去极化电流测试(polarization and depolarization current, PDC)法,对其0.1 Hz介损及直流电导率进行离线测试,结果如图8所示。

由图8可知,样本0.1 Hz介损随热老化程度加深而递增,由未老化样本的0.413%逐步增至0.527%,直至热老化432 h样本的1.706%。在此过程中,一方面,分子链段发生热氧老化生成羰基等极性基团,造成偶极极化损耗。另一方面,材料晶区将发生熔融并生成新的“晶区-非晶区”界面,造成界面损耗。随热老化时间增加,样本中分子链段断裂数量增加,同时生成更多“晶区-非晶区”界面,导致样本介损增加。此外,由于老化初期XLPE出现重结晶现象,已有晶区结构趋于规整,导致热老化初期(老化108 h以前)样本介损增速较小。

随后,将各组热老化电缆接入图6实验平台,取外施电压5 kV,按前述方法对平台注入10 Hz/5 V低频信号,测试电缆10 Hz介损。

图9为采用低频信号感应法测得的电缆10 Hz介损结果,为方便对比,将PDC测试的0.1 Hz介损同时绘制。由图可知,10 Hz介损结果与0.1 Hz介损结果误差较小,最大误差仅为12.6%(324 h)。同时,随老化时间增加,采用低频注入信号法测得的10 Hz介损在0~108 h区间亦缓慢增加,在108 h之后快速增大。由此证明,低频信号感应法可实现电缆介损在线精准测量。

进一步地,对老化电缆中心位置切片,并对样片低温淬断后进行扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观察,结果如图10所示。可以发现,样本在热老化过程中发生链段断裂,其

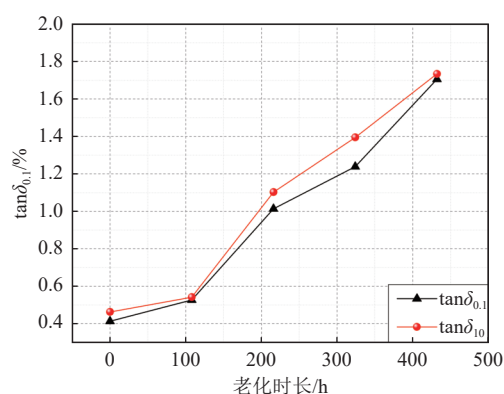
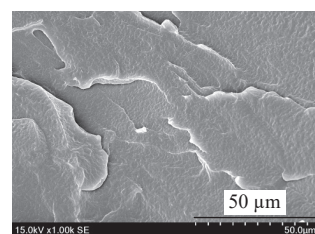
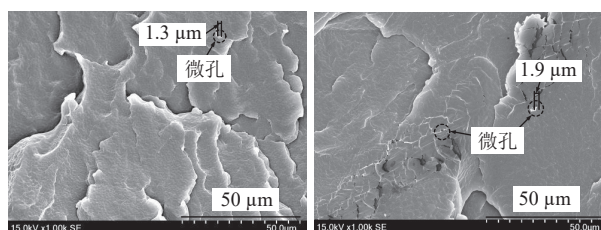


图9 低频信号感应法及PDC法介损因数测试结果对比

Fig. 9 Comparison of dielectric loss factor test results obtained by low-frequency signal induction method and PDC method

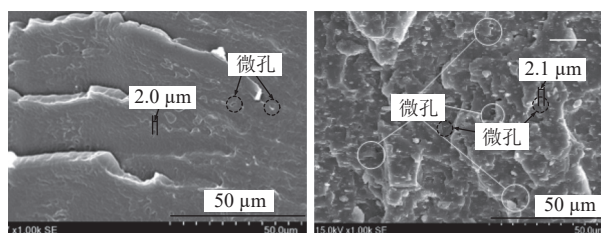


(a) 热老化 0 h



(b) 热老化 108 h

(c) 热老化 216 h



(d) 热老化 324 h

(e) 热老化 432 h

图10 热老化电缆绝缘切片SEM观测结果

Fig. 10 SEM observation results of insulation section of the thermal aging cable

内部生成微孔。未老化样本断面上未发现微孔;热老化108 h后样本中出现少量微孔,最大微孔尺寸约1.3 μm;热老化216 h后样本最大微孔尺寸增至1.9 μm;热老化324 h后样本最大微孔尺寸约2.0 μm;热老化432 h后,样本微孔数量显著增多,最大微孔尺寸增至2.1 μm,此时样本老化严重。该结论与介损测量结果印证,证明低频

信号感应法可有效在线监测电缆绝缘状态。

3.3 实际退运电缆绝缘状态在线监测

取某供电公司提供的 10 kV 三相退运电缆 2 根, 进行基于低频信号感应的绝缘状态监测。电缆型号 YJV22/3×50, 运行年限约 10 年, 其中 1 号电缆长度 5.4 m, 2 号电缆长度 4.2 m。进行测试前, 对电缆样本进行标准热缩式终端处理, 以消除沿面电流及残余应力对测试结果的影响。表 5 为两段电缆测试结果。由表可知, 两段电缆折算至 1 km 的绝缘电阻均处于 10~100 MΩ 之间, 且其介损均超过 1%, 表明电缆绝缘已出现明显老化。

表 5 基于低频信号感应的退运电缆绝缘测试结果
Table 5 Insulation test results of out-service cables based on low-frequency signal induction

测试内容	1号			2号		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
10 Hz介损/%	1.634	1.126	1.264	1.168	1.415	1.110
绝缘电阻/GΩ	5.296	5.484	5.418	6.857	6.337	7.264
泄漏电流/μA	0.317	0.264	0.287	2.180	2.192	2.147

为验证低频信号感应测试的有效性, 对上述电缆进行 PDC 测试, 测试电压为 1 kV, 极化及去极化时长均为 180 s。基于测试所得极化、去极化电流, 计算两段电缆 0.1 Hz 介损如表 6 所示, 可见 1 号与 2 号电缆 0.1 Hz 超低频介损均大于 1%, 测试结果与低频信号感应测试结果一致, 均表明两段电缆出现明显绝缘老化。以上实验进一步验证了低频信号感应法在电缆绝缘状态在线监测方面的有效性。

表 6 基于低频信号感应的退运电缆介损测试结果
Table 6 Insulation test results of out-service cables based on PDC

测试内容	1号			2号		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
0.1 Hz介损/%	1.47	1.06	1.04	1.12	1.13	1.05

此外, 据文献[2]研究, XLPE 样片及真型 XLPE 电缆样本在 10 Hz 至 100 Hz 范围内的介损测试结果偏差极小, 即低频信号感应法所得的 10 Hz 介损与实际工频 50 Hz 下介损接近, 可真实反映 XLPE 电缆的工频介损测试结果。现阶段可考虑以 50 Hz 下的介损相关标准对低频信号感应法所得 10 Hz 介损结果进行约束, 即正常电缆 10 Hz 下介损均值应小于 0.4%^[12]。同时应注意, 由于电

缆 10 Hz 介损略大于 50 Hz 介损, 0.4% 的取值在 10 Hz 下是较为严苛的。

4 结论

1) 通过将低频信号由配网中性点电压互感器开口三角侧注入, 在母线中感应零序电压电流, 可在保证系统正常运行前提下, 实现电缆绝缘电阻、泄漏电流及介损因数等的在线测量。

2) 利用 PSCAD 软件搭建配电网模型, 对低频信号参数进行了优选, 发现低频信号取电压幅值 5 V, 信号频率 10 Hz, 感应信号采样频率 20 kHz, 感应信号采样时长 0.2 s 时, 可实现较高测试精度。

3) 对人工加速热老化电缆及实际退运电缆介损因数的测试结果表明, 低频信号感应法可实现电缆电气参数精确在线测量, 测试结果与线下极化-去极化电流测试结果误差小于 13%, 满足工程实际需求。

参考文献

- [1] 聂永杰, 赵现平, 李盛涛. XLPE 电缆状态监测与绝缘诊断研究进展 [J]. 高电压技术, 2020, 46(04): 1361-1371.
NIE Yongjie, ZHAO Xianping, LI Shengtao. Research progress in condition monitoring and insulation diagnosis of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(04): 1361-1371(in Chinese).
- [2] 赵艾萱, 陈曦, 徐龙, 等. 时域/频域介电响应在 XLPE 电缆绝缘诊断的应用 [J]. 高电压技术, 2020, 46(01): 292-302.
ZHAO Aixuan, CHEN Xi, XU Long, et al. Application of dielectric response in diagnoses of time and frequency domain on XLPE cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(01): 292-302(in Chinese).
- [3] 周凯, 赵世林, 何珉, 等. 考虑短距离电缆中行波特性的振荡波局部放电定位方法 [J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2047-2054.
ZHOU Kai, ZHAO Shilin, HE Min, et al. A partial discharge localization method for oscillating wave in short distance cable is considered[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2047-2054(in Chinese).
- [4] 王一, 文习山, 彭宁云, 等. XLPE 电缆绝缘在线检测直流叠加法的接地 [J]. 高电压技术, 2003, 29(7): 37-39,54.
WANG Yi, WEN Xishan, PENG Ningyun, et al. Study on the grounding in superposing DC current method for the online monitoring of XLPE cable[J]. High Voltage Engin-

- earing, 2003, 29(7): 37-39,54(in Chinese).
- [5] 周志成, 何俊佳, 张洪, 等. 交流叠加法带电测试 XLPE 电缆绝缘性能的研究 [J]. *高电压技术*, 2005, 31(1): 40-41,46.
ZHOU Zhicheng, HE Junjia, ZHANG Hong, *et al.* Research of AC superposition method applied in the hot-line test for the insulation performance of XLPE cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(1): 40-41,46(in Chinese).
- [6] BOGGS S. Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2000, 16(25): 13-18.
- [7] GUDMUNSDOTTIR U S, GUSTAVSEN B, BAK C L, *et al.* Field test and simulation of a 400kV cross-bonded cable system[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2011, 26(3): 1403-1410.
- [8] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [9] 季振东, 孙毅超, 李东野, 等. 星形和三角形连接的链式 H 桥 STATCOM 不平衡补偿分析 [J]. *高电压技术*, 2015, 41(7): 2435-2444.
JI Zhendong, SUN Yichao, LI Dongye, *et al.* Comparative analysis for unbalance compensation of cascaded H-bridge STATCOMs between star and delta configuration[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2435-2444(in Chinese).
- [10] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论 (第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] GB/T 12706—2020, 额定电压 1 kV($U_m=1.2$ kV) 到 35 kV ($U_m=1.2$ kV) 挤包绝缘电力电缆及附件第 2 部分: 额定电压 6 kV($U_m=7.2$ kV) 到 30 kV($U_m=36$ kV) 电缆 [S]. 2008.
- [13] ZHANG T L, TIAN S J, LIU X Z, *et al.* Numerical and experimental simulation researches on effectiveness of anti-ferro resonance measures in distribution power grid[C]// 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference, Xi'an, China, 2016: 2588-2591.
- [14] GB 12325—2008-T. 电能质量供电电压偏差 [S]. 2009.
- [15] 庄劲武, 徐国顺, 戚连锁, 等. 双频法在浮地交流电网绝缘故障定位中的应用 [J]. *电力自动化设备*, 2003, 23(2): 83-86.
ZHUANG Jinwu, XU Guoshun, QI Liansuo, *et al.* Research on application of double frequency principle to insulation fault locating in earth free AC system[J]. *Electric Power Automaton Equipment*, 2003, 23(2): 83-86(in Chinese).
- [16] 张利花, 伍弘. PT 励磁及传变特性在信号注入法测量电容电流中的应用 [J]. *电工电气*, 2018, 1: 83-86.
ZHANG Lihua, WU Hong. Application of excitation and transmission characteristic of potential transformer in measurement of capacitive current by signal injection method[J]. *Electrotechnics Electric*, 2018, 1: 83-86(in Chinese).

收稿日期: 2023-03-10

作者简介:

王尉军 (1982), 男, 硕士, 高级工程师, 通信作者, 研究方向为电力电缆绝缘诊断及运维管理, E-mail: volxik@yeah.net;

陈旻 (1972), 男, 学士, 高级技师, 研究方向为输电线路运维管理, E-mail: 396013739@qq.com;

殷慧 (1988), 女, 学士, 工程师, 研究方向为输电线路运维管理, E-mail: 408955783@qq.com;

李原 (1991), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固体电介质老化特性及放电机理、电力电缆绝缘诊断评估, E-mail: hvliyuan@scu.edu.cn;

周凯 (1976), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电缆绝缘诊断及修复、电力设备状态监测与故障诊断, E-mail: zhokai_scu@126.com。